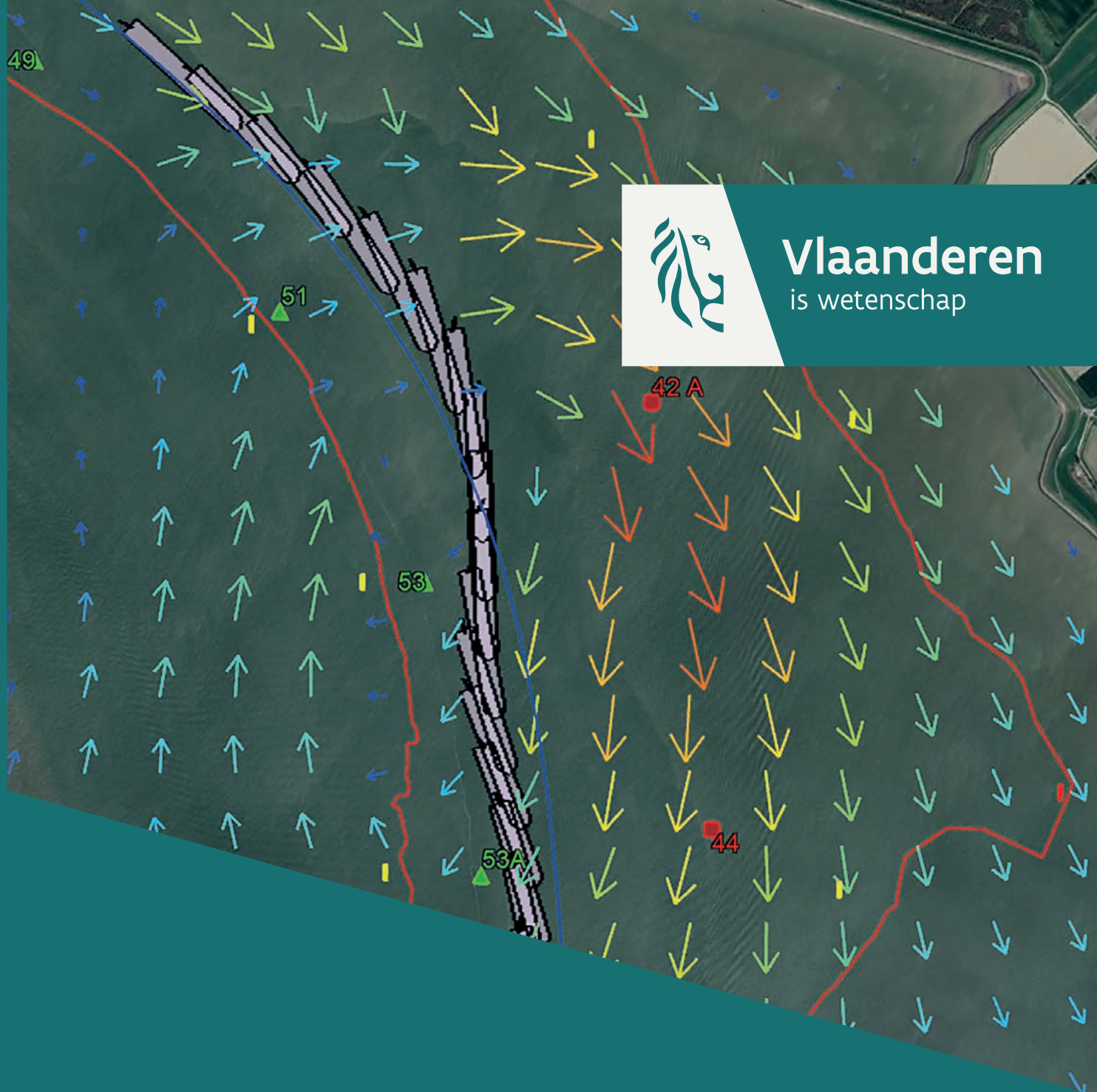




**Vlaanderen**  
is wetenschap



23\_075\_1  
WL rapporten

## Oriënterend onderzoek nautische criteria giertij Ossense

Deelrapport 1 – Selectie HF-radarbeelden  
en nautische fasttime simulaties

DEPARTEMENT  
MOBILITEIT &  
OPENBARE  
WERKEN

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

# Oriënterend onderzoek nautische criteria giertij Ossenisse

## Deelrapport 1 – Selectie HF-radarbeelden en nautische fasttime simulaties

Verwilligen, J.; Stark, J.; Eloot, K.; Plancke, Y.

### 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 2024  
D/2024/3241/297

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

**Verwilligen, J.; Stark, J.; Eloot, K.; Plancke, Y.** (2024). Oriënterend onderzoek nautische criteria giertij Ossenisse Deelrapport 1 – Selectie HF-radarbeelden en nautische fasttime simulaties. Versie 4.0. WL Rapporten, 23\_075\_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

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

### Documentidentificatie

Opdrachtgever:	VNSC	Ref.:	WL2024R23_075_01
Trefwoorden (3-5):	Giertij, HF-radar, fasttime simulaties, container schip, stroming.		
Kennisdomeinen:	Havens en vaarwegen > Manoeuvreegedrag > Stroming > Simulaties		
Tekst (p.):	75	Bijlagen (p.):	10
Vertrouwelijk:	<input checked="" type="checkbox"/> Nee	<input checked="" type="checkbox"/> Online beschikbaar	

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

### Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Eloot, K.	Getekend door:Katrien Eloot (Signature) Getekend op:2024-12-16 13:25:24 +01:0 Reden:Ik keur dit document goed
	Plancke, Y.	Getekend door:Yves Plancke (Signature) Getekend op:2024-12-16 14:57:21 +01:00 Reden:Ik keur dit document goed
Projectleider:	Verwilligen, J.	Getekend door:Jeroen Verwilligen (Signa) Getekend op:2024-12-16 14:15:09 +01:0 Reden:Ik keur dit document goed

### Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Bellafkih, K.	Getekend door:Abdelkarim Bellafkih (Sig) Getekend op:2024-12-16 12:46:46 +01:0 Reden:Ik keur dit document goed
-----------------	---------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

## Abstract

In deze studie werd de nautische impact van een aantal karakteristieke stroombeelden voor het giertij Ossenisse bepaald.

Hiervoor werden vijf giertijen geselecteerd uit een beschikbare dataset (01/08/2023-15/09/2023) met stroombeelden uit de HF-radar opmetingen. De vijf geselecteerde giertijen werden bovendien kunstmatig versterkt door de dwarscomponenten in het vectorveld met 20% of 50% te verhogen. Op die manier werden er 15 stroombeelden bekomen waarvoor de nautische hinder bepaald diende te worden.

De methode die gebruikt werd om de nautische hinder van de stroomvelden op een vaartraject door het Zuidergat te beoordelen betreffen track-controlled vaarsimulaties waarbij het schip langs een vooropgesteld referentietraject geleid wordt door toepassing van roer en schroef (aangestuurd door een track-control algoritme). De beoordeling van de nautische hinder ten gevolge de onderzochte omgevingscondities (in deze studie variërende stroombeelden) wordt geïllustreerd door middel van de afwijking van de vaarpositie ten opzichte van het referentietraject.

De analyse werd uitgevoerd voor twee types containerschepen (ULCS en Panamax) en voor opvarende en afvarende vaarrichting. De vaarsnelheden en referentietrajecten voor de vier condities werden afgeleid uit AIS-gegevens voor het kalenderjaar 2022.

De resultaten tonen aan dat met name voor opvaart de impact van de verschillende stroombeelden op de vaartrajecten divers is en beïnvloed wordt door een groot aantal factoren zoals: de locatie van de neer ten opzichte van de bocht te Hansweert; de dwarspositie van de neer in de vaarweg; de dwarsstroming in het eerste deel van de neer en de dwarspositie in het tweede deel van de neer. Ook de afmetingen en manoeuvreereigenschappen van het schip blijken een belangrijke invloed te hebben op de ervaren hinder.

Voor afvaart blijkt de invloed van de onderzochte giertijen meer gematigd en voornamelijk bepaald door de dwarsstroming en stromingsgradiënt ter hoogte van boei 51. Het grootste potentieel voor het toelaten van scheepvaart bij giertijcondities lijkt dan ook in afvaart te liggen.

De nautische hinder verschilt sterk voor de verschillende onderzochte giertijen waarbij één giertij dat gepaard ging met dwarsstroomwaarschuwing 'STERK' zowel in op- als afvaart aanleiding lijkt te geven tot aanvaardbare passages.



# Inhoudstafel

Abstract .....	III
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de tabellen.....	VII
Lijst van de figuren .....	VIII
1 Inleiding .....	1
1.1 Studiegebied .....	2
1.2 Doelstelling.....	3
1.3 Plan van aanpak .....	3
1.4 Leeswijzer.....	3
2 Analyse en selectie HF-radar stroombeelden .....	4
2.1 Beschrijving dataset .....	4
2.2 Analyse neerkarakteristieken.....	5
2.2.1 Getijkarakteristieken .....	5
2.2.2 Dwarsstroom .....	7
2.2.3 Positie van de neer .....	9
2.3 Selectie HF-radarbeelden voor nautische analyse.....	10
2.4 Combineren HF-radarbeelden en gemodelleerde stroombeelden .....	12
2.5 Artificieel verhogen dwarsstroming.....	13
3 Nautische fasttime simulaties .....	15
3.1 Track-controller.....	15
3.1.1 Gids algoritme.....	15
3.1.2 Stuur algoritme .....	17
3.1.3 Instelgegevens .....	18
3.2 Definitie simulatieomgeving .....	19
3.2.1 Studieschepen .....	19
3.2.2 Stroming.....	25
3.2.3 Bathymetrie en waterstand.....	27
3.2.4 Vaarsnelheid en toerental .....	27
3.3 Analyse en verwerking .....	29
3.3.1 Dwarsafstand.....	29
3.3.2 KMZ-weergave en grafieken.....	30
3.3.3 Grafieken .....	31

3.3.4	Hittekaarten belangrijkste parameters .....	31
3.4	Resultaten fasttime simulaties.....	33
3.4.1	ULCS opvaart.....	33
3.4.2	ULCS afvaart.....	46
3.4.3	Panamax opvaart .....	49
3.4.4	Panamax afvaart .....	57
4	Vergelijking simulaties met stromingscondities.....	61
4.1	Methode.....	61
4.2	Visualisatie .....	61
4.3	Resultaten .....	61
4.3.1	Opvaart .....	62
4.3.2	Afvaart .....	66
5	Conclusies en aanbevelingen .....	70
5.1	Conclusies.....	70
5.2	Aanbevelingen.....	72
	Referenties .....	74
Bijlage 1	Dwarscomponent van de stroming in geselecteerde HF-radarbeelden.....	B1
Bijlage 2	Geconstrueerde stroombeelden met artificieel verhoogde dwarscomponent .....	B6

## Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Getijkarakteristieken inclusief intensiteit van maximale dwarsstroom langs drie transecten. Met dikgedrukt de geselecteerde getijden voor nautische analyse.....	6
Tabel 2 – Getijkarakteristieken en maximale dwarsstroom langs drie transecten voor geselecteerde stroombeelden. ....	12
Tabel 3 – Combinaties van HF-radarbeeld en gemodelleerd stroombeeld. ....	13
Tabel 4 – Instelgegevens track-controller zoals toegepast in fasttime simulaties.....	18
Tabel 5 – Stroomvelden toegepast in fasttime simulaties.....	26
Tabel 6 – Gemiddelde vaarsnelheden en toerentallen aangenomen voor de fasttime simulaties.....	28
Tabel 7 – Samenvattende bevaarbaarheidsparameters voor opvarende ULCS voor baanafstand 0 km tot 5 km .....	45
Tabel 8 – Samenvattende bevaarbaarheidsparameters voor afvarende ULCS voor baanafstand 0 km tot 5 km .....	49
Tabel 9 – Samenvattende bevaarbaarheidsparameters voor opvarende Panamax voor baanafstand 0 km tot 5 km .....	57
Tabel 10 – Samenvattende bevaarbaarheidsparameters voor afvarende Panamax voor baanafstand 0 km tot 5 km .....	60



## Lijst van de figuren

Figuur 1 – Illustratie stranding Fowairet door giertij op basis van vaarsimulatie .....	1
Figuur 2 – Overzichtskaart van geulen en platen in het studiegebied .....	2
Figuur 3 – Illustratie van reikwijdte HF-radarbeeld.....	4
Figuur 4 – Voormelding dwarsstroomwaarschuwing voor de geselecteerde periode in augustus/september 2023. bron: HMC. ....	5
Figuur 5 – Illustratie van de definitie van dwarsrichting en langsrichting. Uit: Stark <i>et al.</i> (2022a). ....	8
Figuur 6 – Segmenten van de vaartracés voor opvaart (groen) en afvaart (rood) in het studiegebied. ....	9
Figuur 7 – Voorbeelden van HF-radar stroombeelden met berekende vortciteit en posities van het centrum van de neer.....	10
Figuur 8 – Geselecteerde HF-radar stroombeelden.....	11
Figuur 9 – Gecombineerde stroombeelden. ....	14
Figuur 10 – Principe van het line-of-sight (LOS) gids algoritme (C. Y. Chen <i>et al.</i> , 2020).....	16
Figuur 11 – Principe van het fuzzy stuur algoritme (C. Y. Chen <i>et al.</i> , 2020). ....	18
Figuur 12 – Fuzzy Inference System voor de fuzzy controller toegepast in de track-controller (Sugeno, 1985) .....	18
Figuur 13 – Weergave van AIS-trajecten voor opvaart (groen) en afvaart (rood/oranje) tussen de passagelijnen Hoofdvaarwater Overloop van Hansweert en Hoofdvaarwater Bocht van Bath voor januari 2022 .....	20
Figuur 14 – Midvaarwatercurve met bijhorende baanafstanden in combinatie met de boeien begin 2023. ....	20
Figuur 15 – Opvarende (groen) en afvarende (rood) AIS-trajecten voor ULCS (links) en Panamax (rechts) overeenkomstig de 10%, 50% en 90% excentriciteit .....	21
Figuur 16 – Vergelijking van de AIS-trajecten voor scheepstypes Panamax (meest excentrisch) en ULCS (meest centraal in HVW) .....	21
Figuur 17 – Verloop van snelheid over de grond (boven) en snelheid door het water (onder) voor opvarende ULCS Links (KM 0) = Overloop van Hansweert, rechts (KM 7) = Bath .....	23
Figuur 18 – Verloop van snelheid over de grond (boven) en snelheid door het water (onder) voor opvarende Panamax Links (KM 0) = Overloop van Hansweert, rechts (KM 7) = Bath.....	23
Figuur 19 – Verloop van snelheid over de grond (boven) en snelheid door het water (onder) voor afvarende ULCS.....	24
Figuur 20 – Verloop van snelheid over de grond (boven) en snelheid door het water (onder) voor afvarende Panamax .....	24
Figuur 21 – Weergave van de bathymetrie toegepast tijdens de fasttime simulaties door middel van dieptelijnen.....	27
Figuur 22 – Relatie tussen schroeftoerental en vaarsnelheid ter hoogte van boei 53A voor studieschepen op basis van track-controlled fasttime simulaties zonder stroming. ....	29
Figuur 23 – KMZ-visualisatie van opvarende simulatie met ULCS bij passage neer in stroomveld 01 .....	31

Figuur 24 – Hittekaart voor de dwarse stroomcomponent voor opvarende simulaties met ULCS .....	32
Figuur 25 – KMZ-visualisatie van opvarende simulatie met ULCS in stroomveld 00 .....	33
Figuur 26 – Grafieken bevaarbaarheidsparameters voor opvarende ULCS bij stroomveld 0.....	35
Figuur 27 – Grafieken bevaarbaarheidsparameters voor opvarende ULCS bij stroomvelden 01 (boven), 02 (midden) en 03 (onder) .....	35
Figuur 28 – Grafieken bevaarbaarheidsparameters voor opvarende ULCS bij stroomvelden 04 (boven), 05 (midden) en 06 (onder) .....	36
Figuur 29 – Grafieken bevaarbaarheidsparameters voor opvarende ULCS bij stroomvelden 07 (boven), 08 (midden) en 09 (onder) .....	36
Figuur 30 – Grafieken bevaarbaarheidsparameters voor opvarende ULCS bij stroomvelden 10 (boven), 11 (midden) en 12 (onder) .....	37
Figuur 31 – Grafieken bevaarbaarheidsparameters voor opvarende ULCS bij stroomvelden 13 (boven), 14 (midden) en 15 (onder) .....	37
Figuur 32 – Heatmap roerhoek voor opvarende ULCS bij alle stroomvelden.....	38
Figuur 33 – Heatmap dwarsafstand voor opvarende ULCS bij alle stroomvelden.....	38
Figuur 34 – Heatmap kielspeling voor opvarende ULCS bij alle stroomvelden.....	39
Figuur 35 – KMZ-visualisatie van opvarende simulatie met ULCS in stroomveld 07 (detail Zuidergat) .....	40
Figuur 36 – KMZ-visualisatie van opvarende simulatie met ULCS in stroomveld 08 (detail Zuidergat) .....	40
Figuur 37 – KMZ-visualisatie van opvarende simulatie met ULCS in stroomveld 09 (detail Zuidergat) .....	41
Figuur 38 – KMZ-weergave van roergebruik voor eerste dwarsstroom ter hoogte van boei 51 in simulatie 09 .....	42
Figuur 39 – KMZ-weergave van roergebruik om de eerste gierbeweging te stutten in simulatie 09.....	43
Figuur 40 – KMZ-weergave van conditie waarin het schip het oog van de neer bereikt in simulatie 09 .....	43
Figuur 41 – KMZ-weergave van maximale dwarsafstand tot referentietraject (sim 09) waarbij de roerhoek opnieuw verminderd werd.....	44
Figuur 42 – Heatmap roerhoek voor afvarende ULCS bij alle stroomvelden.....	47
Figuur 43 – Heatmap dwarsafstand voor afvarende ULCS bij alle stroomvelden.....	47
Figuur 44 – KMZ-weergave van verstoring vaartraject door grote dwarsstroom en stromingsgradiënt op afvarende ULCS (sim 07).....	48
Figuur 45 – KMZ-weergave van verstoring vaartraject door grote dwarsstroom en stromingsgradiënt op afvarende ULCS (sim 13).....	48
Figuur 46 – Heatmap roerhoek voor opvarende Panamax bij alle stroomvelden .....	52
Figuur 47 – Heatmap dwarsafstand voor opvarende Panamax bij alle stroomvelden .....	52
Figuur 48 – Simulatietraject opvarende ULCS (blauwe contour) en Panamax (groene contour) bij stroming 09 .....	53
Figuur 49 – Simulatietraject opvarende ULCS (blauwe contour) en Panamax (groene contour) bij stroming 06 .....	53
Figuur 50 – KMZ-visualisatie van opvarende simulatie met Panamax in stroomveld 07 (detail Zuidergat)...	54
Figuur 51 – KMZ-visualisatie van opvarende simulatie met Panamax in stroomveld 04 (detail Zuidergat)...	55

Figuur 52 – Simulatietraject opvarende Panamax bij stroming 07, 08 en 09 .....	55
Figuur 53 – Heatmap absolute dwarsafstand voor opvarende ULCS bij alle stroomvelden .....	56
Figuur 54 – Heatmap absolute dwarsafstand voor opvarende Panamax bij alle stroomvelden .....	56
Figuur 55 – Heatmap roerhoek voor afvarende Panamax bij alle stroomvelden .....	58
Figuur 56 – Heatmap dwarsafstand voor afvarende Panamax bij alle stroomvelden .....	58
Figuur 57 – KMZ-visualisatie van afvarende simulatie met Panamax in stroomveld 09 (detail Boei 51) .....	59
Figuur 58 – Heatmap absolute dwarsafstand voor afvarende ULCS bij alle stroomvelden .....	59
Figuur 59 – Heatmap absolute dwarsafstand voor afvarende Panamax bij alle stroomvelden .....	60
Figuur 60 – Heatmap dwarsstroom over scheepslengte (positief naar stuurboord) langs AIS-traject opvarende ULCS voor $L_{pp}=385$ m .....	63
Figuur 61 – Heatmap stromingsgradiënt over scheepslengte (positief naar stuurboord) langs AIS-traject opvarende ULCS voor $L_{pp}=385$ m .....	63
Figuur 62 – Heatmap dwarsstroom over scheepslengte (positief naar stuurboord) langs AIS-traject opvarende Panamax voor $L_{pp}=290$ m .....	64
Figuur 63 – Heatmap stromingsgradiënt over scheepslengte (positief naar stuurboord) langs AIS-traject opvarende Panamax voor $L_{pp}=290$ m .....	64
Figuur 64 – KMZ-visualisatie van opvarende simulatie met Panamax in stroomveld 15 (detail Zuidergat) ...	65
Figuur 65 – Relatie tussen de maximale dwarsstroom over een scheepslengte op het opvarende referentietraject en de maximale dwarsafstand waargenomen in de simulaties voor de opvarende ULCS..	65
Figuur 66 – Relatie tussen de maximale stromingsgradiënt over een scheepslengte op het opvarende referentietraject en de maximale dwarsafstand waargenomen in de simulaties voor de opvarende ULCS..	66
Figuur 67 – Heatmap dwarsstroom over scheepslengte (positief naar stuurboord) langs AIS-traject afvarende ULCS voor $L_{pp}=385$ m .....	67
Figuur 68 – Heatmap stromingsgradiënt over scheepslengte (positief naar stuurboord) langs AIS-traject afvarende ULCS voor $L_{pp}=385$ m .....	67
Figuur 69 – Heatmap dwarsstroom over scheepslengte (positief naar stuurboord) langs AIS-traject afvarende Panamax voor $L_{pp}=290$ m .....	68
Figuur 70 – Heatmap stromingsgradiënt over scheepslengte (positief naar stuurboord) langs AIS-traject afvarende Panamax voor $L_{pp}=290$ m .....	68
Figuur 71 – Relatie tussen de dwarsstroom over een scheepslengte op het afvarende referentietraject ter hoogte van boei 51 en de maximale dwarsafstand waargenomen in de simulaties voor de afvarende ULCS .....	69
Figuur 72 – Relatie tussen de stromingsgradiënt over een scheepslengte op het afvarende referentietraject ter hoogte van boei 51 en de maximale dwarsafstand waargenomen in de simulaties voor de afvarende ULCS .....	69
Figuur 73 – Dwarsstroming langs groene boeienlijn en langs van de vaartracés voor opvaart (groen) en afvaart (rood) voor stroombeeld van 01/09/2023 02:20. ....	B1
Figuur 74 – Dwarsstroming langs groene boeienlijn en langs van de vaartracés voor opvaart (groen) en afvaart (rood) voor stroombeeld van 02/09/2023 03:20. ....	B2
Figuur 75 – Dwarsstroming langs groene boeienlijn en langs van de vaartracés voor opvaart (groen) en afvaart (rood) voor stroombeeld van 03/09/2023 04:00. ....	B3

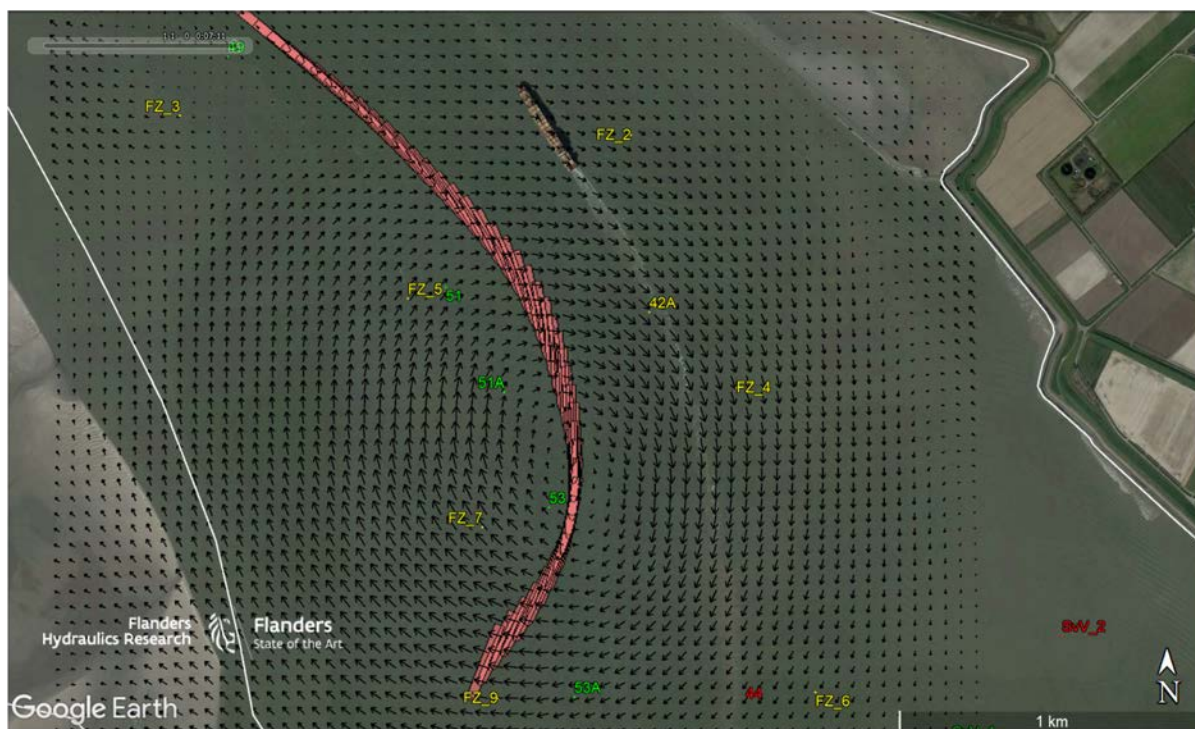
Figuur 76 – Dwarsstroming langs groene boeienlijn en langs van de vaartracés voor opvaart (groen) en afvaart (rood) voor stroombeeld van 03/09/2023 04:20. ....	B4
Figuur 77 – Dwarsstroming langs groene boeienlijn en langs van de vaartracés voor opvaart (groen) en afvaart (rood) voor stroombeeld van 03/09/2023 17:00. ....	B5
Figuur 78 – Stroombeeld van 01/09/2023 02:20 (linksboven) en stroombeelden waarin de dwarscomponent met 20% (linksonder) en 50% (rechtsonder) is verhoogd. ....	B6
Figuur 79 – Stroombeeld van 02/09/2023 03:20 (linksboven) en stroombeelden waarin de dwarscomponent met 20% (linksonder) en 50% (rechtsonder) is verhoogd. ....	B7
Figuur 80 – Stroombeeld van 03/09/2023 04:00 (linksboven) en stroombeelden waarin de dwarscomponent met 20% (linksonder) en 50% (rechtsonder) is verhoogd. ....	B8
Figuur 81 – Stroombeeld van 03/09/2023 04:20 (linksboven) en stroombeelden waarin de dwarscomponent met 20% (linksonder) en 50% (rechtsonder) is verhoogd. ....	B9
Figuur 82 – Stroombeeld van 03/09/2023 17:00 (linksboven) en stroombeelden waarin de dwarscomponent met 20% (linksonder) en 50% (rechtsonder) is verhoogd. ....	B10

# 1 Inleiding

In het vaargebied tussen Hansweert en Walsoorden (aan de oostzijde van de plaat van Ossenisse) treedt bij springtij (ook “giertij” genaamd) een belangrijke neer op die aanleiding geeft tot aanzienlijke en veranderlijke dwarsstroming. In 2005 gaf dit giertij Ossenisse aanleiding tot de stranding van het schip Fowairet ter hoogte van de Platen van Ossenisse. In Figuur 1 wordt de impact van het giertij op een scheepstraject geïllustreerd op basis van een simulatie uitgevoerd op de scheepsmanoeuvresimulatoren van het Waterbouwkundig Laboratorium.

Sinds 2005 wordt er getracht om het optreden van het giertij te voorspellen en om meer informatie te bekomen over het werkelijke stroompatroon in het studiegebied. Hiervoor werden verschillende meetcampagnes uitgevoerd (Plancke *et al.*, 2021; Plancke & De Maerschallck, 2023; Plancke & Stark, 2022) en verschillende numerieke modellen (Decrop *et al.*, 2009; Plancke *et al.*, 2020a; Stark *et al.*, 2022b) ontwikkeld. Sedert oktober 2022 werd in het gebied een nieuw meetsysteem (HF Radar) in gebruik genomen dat continu en realtime de oppervlaktestroming aan de oostzijde van de Plaat van Ossenisse monitort.

Op heden publiceert de Gemeenschappelijke Nautische Autoriteit (GNA) een “voormelding” voor het optreden van giertij. Deze voorspelling is gebaseerd op het verval in waterstand tussen de stations Terneuzen en Hansweert. Er wordt zowel een astronomische (in november gepubliceerd voor het volgende kalenderjaar) als operationele (48u op voorhand) gepubliceerd. De astronomische voormelding waarschuwt voor een “sterke” of “matige” dwarsstroming van zodra een bepaalde drempelwaarde voor het criterium bereikt is. In de operationele waarschuwing is sinds medio 2024 ook een extra waarschuwing opgenomen voor “zwakke” dwarsstroming. Op die manier kan er in de op- en afvaartplanning rekening gehouden worden met deze complexe stromingen en wordt vermeden dat schepen deze zone passeren wanneer er een giertij voorspeld is.

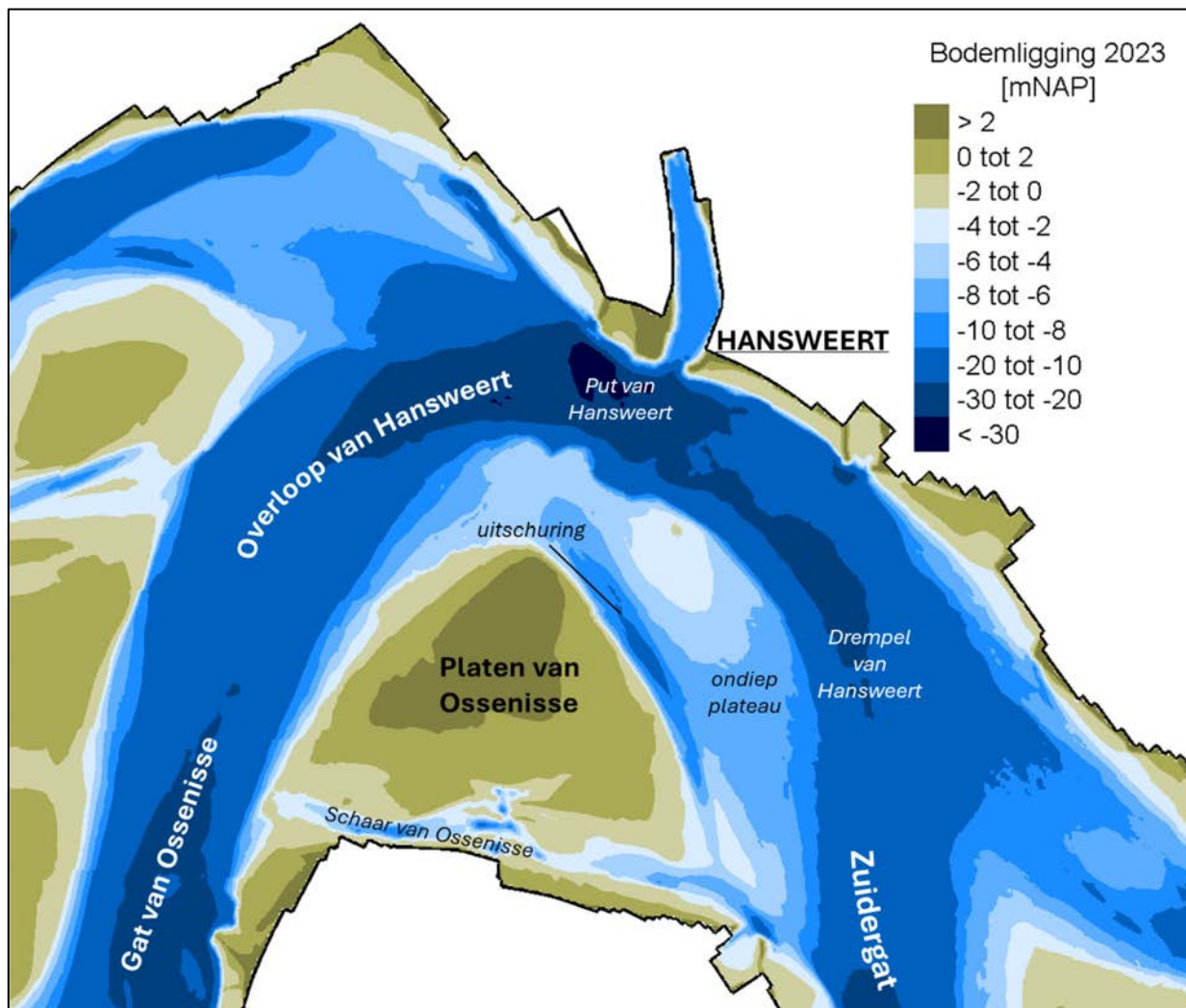


Figuur 1 – Illustratie stranding Fowairet door giertij op basis van vaarsimulatie.

## 1.1 Studiegebied

De dwarsstroming doet zich voor ter hoogte van de vaargeul nabij de drempel van Hansweert, grenzend aan de oostkant van de Platen van Ossenissee. Vanuit de Overloop van Hansweert plant de getijgolf zich in noordoostelijke richting voort naar Hansweert waar ze afbuigt in zuidoostelijke richting naar Walsoorden en het Zuidergat. Gedurende een groot deel van de getijcyclus vormen de Platen van Ossenissee een barrière waar het water rond moet stromen, slechts in de periode rond hoogwater worden deze platen overstromd en kan het water vanuit de Overloop van Hansweert naar het Zuidergat stromen over de platen (Figuur 2).

Ten oosten van de Platen van Ossenissee bevindt zich een ondiepte die zich over de laatste decennia heeft ontwikkeld. Dit plateau heeft op basis van recente bathymetrische gegevens uit 2023 een hoogteligging van om en nabij -7 m NAP in het zuidoostelijk deel van de ondiepte tot maximaal -2 m NAP op het noordelijk deel. In het meest noordelijk deel ontwikkelt de laatste jaren een kleine nieuwe plaat, waarbij er tevens een geul ('uitschuring' op Figuur 2) uitdiept tussen deze plaat en de Platen van Ossenissee. Het is op dit ondiepe plateau dat een depressie ontstaat die de aanleiding vormt voor de vorming van de neer die dwarsstromingen in de vaargeul kan veroorzaken (Plancke *et al.*, 2020b). Ten zuiden van de plaat bevindt zich nog een ondiepe geul (Schaar van Ossenissee), waarin medio 2019 een dam is verwijderd. Deze ingreep kan mogelijk ook een effect hebben op het stroompatroon ter hoogte van het ondiep plateau.



Figuur 2 – Overzichtskarta van geulen en platen in het studiegebied.

## 1.2 Doelstelling

Mede door de beschikbaarheid van HF-radar is er inmiddels een goed beeld beschikbaar van het verwachte stroombeeld (i.e., vectorveld) in het studiegebied. Het doel van deze studie is om de invloed van verschillende karakteristieken van het stroombeeld (zoals maximale dwarsstroom, stroomgradiënt en rotatiesnelheid) te relateren aan de nautische veiligheid. Op deze manier zou het nautische risico van een bepaald stroombeeld ingeschat kunnen worden, hetgeen vervolgens (na afstemming met de loodsen) aanleiding kan geven tot meer gerichte aanbevelingen aan de scheepvaart (via de voormeldingen van de GNA).

De methode die toegepast wordt om de stroombeelden te relateren aan een nautisch risico betreffen track-controlled vaarsimulaties met twee types containerschepen. Deze methode werd eerder toegepast in de evaluatiemethodiek van het Schelde-estuarium (Verwilligen *et al.*, 2022).

## 1.3 Plan van aanpak

Het plan van aanpak bestaat uit onderstaande onderdelen:

1. Afleiden van karakteristieken van de neer uit beschikbare HF-radarbeelden;
2. Generatie van representatieve stroomvelden met onderscheidende neerparameters;
3. Uitvoeren van fasttime simulaties voor op- en afvarende typeschepen bij verschillende stroomcondities.

## 1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 worden de stroombeelden zoals verkregen uit de HF-radar geanalyseerd en worden er vijf karakteristieke beelden van de neer geselecteerd. De vijf karakteristieke stroombeelden werden vervolgens kunstmatig versterkt om ook de impact van sterkere giertijen te kunnen onderzoeken. Vervolgens worden in hoofdstuk 3 deze stroomvelden als input gebruikt voor een nautische evaluatie op basis van track-controlled vaarsimulaties. Voor twee scheepstypes en twee vaarrichtingen wordt onderzocht in welke mate de schepen een vooropgesteld referentietraject kunnen volgen. De afwijkingen van het scheepstraject ten opzichte van het referentietraject (verder dwarsafstand) wordt gezien als een maat voor de nautische hinder van het stroombeeld.

In hoofdstuk 4 wordt getracht om de resultaten van de vaarsimulaties te relateren aan eigenschappen van de stroombeelden zoals de dwarsstroom en de stromingsgradiënt.

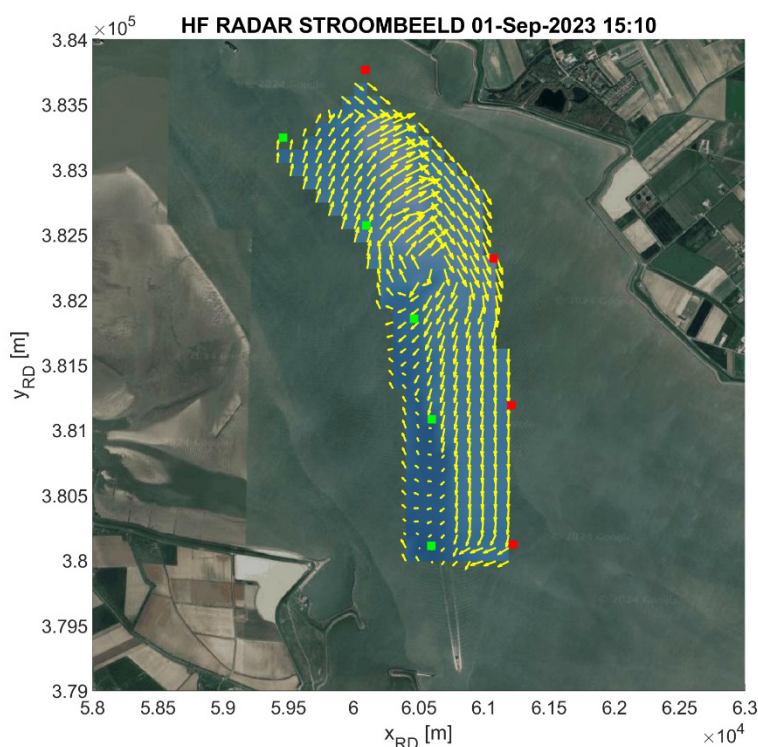
Ten slotte worden in hoofdstuk 5 de resultaten van het onderzoek samengevat en worden de conclusies en aanbevelingen voor verder onderzoek geformuleerd.

## 2 Analyse en selectie HF-radar stroombeelden

### 2.1 Beschrijving dataset

Er is een data-analyse uitgevoerd van de beschikbare 2D-stroombeelden (i.e., oppervlaktestroming) vanuit de HF-radar-installatie. Deze analyse is gericht op het kwantificeren van de belangrijkste parameters die de neer beschrijven en die onderscheidend zijn voor een specifiek stroombeeld.

De HF-radarbeelden bestrijken een beperkte zone van de vaargeul ten oosten van de Plaat van Ossenisse (Figuur 3). Deze zone omvat het volledige vaargeulsegment waar dwarsstromingen als gevolg van neervorming in het Zuidergat voorkomen. De neer zelf kan wel een ruimere zone, buiten de vaargeul, bestrijken.



Figuur 3 – Illustratie van reikwijdte HF-radarbeeld.

#### Analyseperiode

De analyse wordt uitgevoerd op een dataset met een periode van 6 weken (01/08/2023-15/09/2023). In deze periode zijn meerdere getijden waarvoor een matige of sterke dwarsstroming werd voorspeld op basis van de astronomische voorspellingen (zie Figuur 4). Voor de analyse zullen naast deze sterke springtijden, ook de zwakkere springtijden (getijfactor > 1,05) geanalyseerd worden, om op deze manier de variatie in neercharacteristieken in beeld te brengen. Getijden met een lagere getijfactor maken geen deel uit van de analyse omdat de neer dan afwezig is of dusdanig zwak is dat er geen relevantie is voor dit onderzoek. Aangezien de neervorming enkel plaatsvindt rondom hoogwater worden enkel de HF-radarbeelden tussen 90 minuten vóór hoogwater en 120 minuten ná hoogwater geselecteerd.



Uiteindelijk zijn er 462 individuele stroombeelden voor 21 verschillende getijden geanalyseerd. Slechts een klein deel van deze stroombeelden bevat een neer in het studiegebied. Bovendien komen in veel van de stroombeelden onregelmatigheden voor. Deze kunnen meestal worden toegeschreven aan interferentie door passerende scheepvaart. Het aantal stroombeelden waarvoor neer karakteristieken en dwarsstroming werd bepaald, ligt daarom lager dan het hierboven genoemde aantal.

voormelding dwarsstroomwaarschuwing januari t/m december 2023 omgeving boei 51/53 op basis van vervalcriterium astronomisch getij									
	hoogwater	Hansweert (astro)		cm	cm		tijdvenster (lokale tijd)	Maxvv	stroom-
	datum	lokale tijd		tov	tov		mogelijke dwarsstroom	(cm)	sterkte
				NAP	LAT				
donderdag	3	augustus	2023 04h39	+297	+580	3	augustus 2023 van 04h19 tot 05h39	66	matig
vrijdag	4	augustus	2023 05h27	+301	+584	4	augustus 2023 van 05h07 tot 06h27	74	STERK
vrijdag	4	augustus	2023 17h48	+279	+562	4	augustus 2023 van 17h28 tot 18h48	66	matig
zaterdag	5	augustus	2023 06h15	+299	+582	5	augustus 2023 van 05h55 tot 07h15	77	STERK
zaterdag	5	augustus	2023 18h34	+277	+560	5	augustus 2023 van 18h14 tot 19h34	66	matig
zondag	6	augustus	2023 07h06	+290	+573	6	augustus 2023 van 06h46 tot 08h06	74	STERK
maandag	7	augustus	2023 07h55	+276	+559	7	augustus 2023 van 07h35 tot 08h55	67	matig
vrijdag	1	september	2023 04h24	+306	+589	1	september 2023 van 04h04 tot 05h24	74	STERK
vrijdag	1	september	2023 16h42	+288	+571	1	september 2023 van 16h22 tot 17h42	71	STERK
zaterdag	2	september	2023 05h09	+309	+592	2	september 2023 van 04h49 tot 06h09	81	STERK
zaterdag	2	september	2023 17h24	+293	+576	2	september 2023 van 17h04 tot 18h24	74	STERK
zondag	3	september	2023 05h53	+304	+587	3	september 2023 van 05h33 tot 06h53	82	STERK
zondag	3	september	2023 18h07	+293	+576	3	september 2023 van 17h47 tot 19h07	72	STERK
maandag	4	september	2023 06h36	+292	+575	4	september 2023 van 06h16 tot 07h36	76	STERK
dinsdag	5	september	2023 07h22	+273	+556	5	september 2023 van 07h02 tot 08h22	66	matig

Figuur 4 – Voormelding dwarsstroomwaarschuwing voor de geselecteerde periode in augustus/september 2023. bron: HMC.

## 2.2 Analyse neer karakteristieken

Voor de 21 getijden zijn relevante getijkarakteristieken bepaald aan de hand van het waterstandsverloop in Terneuzen en Hansweert. Ook is op basis van de HF-radarbeelden de maximale dwarsstroom langs de groene boeienlijn berekend en werd de positie van de neer per relevant stroombeeld bepaald. Tabel 1 geeft een overzicht van de getijkarakteristieken en maximale dwarsstroom per getij. Een toelichting bij deze neer karakteristieken wordt hieronder gegeven.

### 2.2.1 Getijkarakteristieken

#### Verticaal getij

Allereerst wordt voor elk getij in de dataset het tijdstip van hoogwater  $T_{HW}$ , de hoogwaterstand  $HW$ , de getijslag  $GTV$  en de getijfactor  $GF$  bepaald uit het geobserveerde waterstandsverloop in Hansweert. Deze parameters worden opgesomd in Tabel 1. De getijslag is weergegeven als het verschil tussen het desbetreffende hoogwater en het voorgaande laagwater. Deze varieert tussen 4,9 en 5,9 m voor de geanalyseerde getijden. De getijfactor is de relatieve waarde van de getijslag ten opzichte van de gemiddelde getijslag in Hansweert (i.e., zoals vermeld in het tijboekje op basis van tien jaar waarnemingen). De getijfactor varieert tussen 1,08 en 1,30 voor de geanalyseerde getijden. Merk op dat getijden met een getijfactor lager dan 1,05 al uit de analyse werden gelaten. De hoogwaterniveaus variëren tussen 2,55 m NAP en 3,32 m NAP.

#### Verval Terneuzen-Hansweert

Rijkswaterstaat gebruikt het vervalcriterium waarbij op basis van astronomische voorspellingen een inschatting wordt gemaakt van het voorkomen van “matige” en “sterke” dwarsstromingen. Het criterium dat RWS hanteert, is gebaseerd op het astronomisch voorspelde maximale verhang tussen Terneuzen en Hansweert tijdens de vloedfase voorafgaand aan het hoogwater te Hansweert:  $Maxvv$ .

Als dit verhang groter is dan 0,71 m<sup>1</sup> wordt een waarschuwing voor een “sterke” dwarsstroming in het Zuidergat gegeven. Als het maximale verhang tussen Terneuzen en Hansweert tussen 0,66 m en 0,71 m blijft, wordt een waarschuwing gegeven voor een “matige” dwarsstroom in het Zuidergat. Bij een lager maximaal verhang werd tot 2024 geen waarschuwing gegeven. Vanaf medio 2024 worden in de operationele voorspellingen aanvullend nog waarschuwingen uitgegeven voor een “zwakke” dwarsstroming.

In Tabel 1 wordt voor elk getij het maximum verval *Maxvv* in cm weergegeven. De waarden kunnen afwijken van de voormelding dwarsstroomwaarschuwing in Figuur 4 omdat die gebaseerd is op astronomische voorspellingen en Tabel 1 op het geobserveerd waterstandsverloop. Het maximum verval tussen Terneuzen en Hansweert varieert in deze dataset tussen 48 cm en 74 cm. Er zijn vier getijden waarvoor het vervalcriterium voor “sterke” dwarsstroom wordt overschreden. Dit is lager dan het aantal van 10 getijden waarvoor in de voormelding een “sterke” dwarsstroom werd voorspeld. In algemene zin blijkt overigens dat de geobserveerde waarden voor *Maxvv* lager zijn dan de waarden die in de astro-predictie worden voorspeld.

Tabel 1 – Getijkarakteristieken inclusief intensiteit van maximale dwarsstroom langs drie transecten.  
 Met dikgedrukt de geselecteerde getijden voor nautische analyse.

Datum (MET)	T <sub>HW</sub> [MET]	GF [-]	GTV [m]	HW [mNAP]	Maxvv [cm]	dhdt <sup>1</sup> [cm/min]	Groene Boeienlijn V <sub>dwarsDiff</sub> [m/s]	Vaartracé Opvaart V <sub>dwarsDiff</sub> [m/s]	Vaartracé Afvaart V <sub>dwarsDiff</sub> [m/s]
04-Aug-2023	04:40	1.23	5.54	3.14	70	4.1	2.63	2.32	2.39
04-Aug-2023	16:50	1.09	4.92	2.90	60	3.3	2.72	2.30	1.91
05-Aug-2023	05:30	1.21	5.47	2.91	72	4.1	1.66	1.90	2.44
05-Aug-2023	17:30	1.10	4.95	2.78	60	3.4	2.47	2.74	2.13
06-Aug-2023	06:20	1.26	5.71	3.32	72	3.8	1.67	1.86	1.92
07-Aug-2023	07:00	1.12	5.06	2.97	61	3.5	2.03	1.79	1.86
08-Aug-2023	07:45	1.08	4.9	2.70	53	3.0	1.64	1.22	1.20
16-Aug-2023	03:05	1.10	4.97	2.67	47	2.8	1.74	2.04	1.70
17-Aug-2023	03:40	1.09	4.92	2.55	55	3.2	1.49	1.85	1.48
18-Aug-2023	04:15	1.10	4.95	2.58	57	3.2	1.90	1.94	1.78
19-Aug-2023	04:40	1.11	5.03	2.66	56	3.2	2.26	2.03	2.21
30-Aug-2023	02:00	1.08	4.90	2.80	48	2.9	1.89	1.60	1.78
31-Aug-2023	02:45	1.23	5.54	3.10	58	3.5	2.23	2.01	1.73
31-Aug-2023	14:55	1.08	4.90	2.85	57	3.4	1.48	2.36	1.70
<b>01-Sep-2023</b>	<b>03:30</b>	<b>1.25</b>	<b>5.64</b>	<b>3.16</b>	<b>69</b>	<b>4.2</b>	<b>1.85</b>	<b>1.76</b>	<b>2.04</b>
01-Sep-2023	15:35	1.12	5.07	3.01	62	3.7	2.69	2.80	2.77
<b>02-Sep-2023</b>	<b>04:25</b>	<b>1.30</b>	<b>5.89</b>	<b>3.20</b>	<b>72</b>	<b>4.6</b>	<b>1.89</b>	<b>2.05</b>	<b>2.29</b>
02-Sep-2023	16:25	1.13	5.11	2.97	61	3.6	2.13	2.78	2.59
<b>03-Sep-2023</b>	<b>05:10</b>	<b>1.23</b>	<b>5.58</b>	<b>2.95</b>	<b>74</b>	<b>4.5</b>	<b>2.74</b>	<b>2.31</b>	<b>2.37</b>
<b>03-Sep-2023</b>	<b>17:05</b>	<b>1.09</b>	<b>4.91</b>	<b>2.90</b>	<b>56</b>	<b>3.5</b>	<b>2.21</b>	<b>2.30</b>	<b>2.68</b>
04-Sep-2023	05:55	1.17	5.30	2.86	68	4.2	2.00	1.97	2.30

<sup>1</sup> De grenswaarden voor het maximum verval tussen Terneuzen en Hansweert zijn in 2023 gewijzigd op basis van een vernieuwde set astronomische componenten waarmee het waterstandsverloop op de tijstations wordt geproduceerd.

## Stijgsnelheid Hansweert

In Tabel 1 is voor elk getij ook de maximale stijgsnelheid te Hansweert  $dhd_t^{-1}$  opgenomen. Deze varieert tussen 2,9 cm/min en 4,6 cm/min.

Vanaf 2005 tot april 2024 werden door Rijkswaterstaat varende stroommetingen uitgevoerd wanneer een sterke dwarsstroming voorspeld werd op basis van het gehanteerde voorspellingscriterium. Telkens werd een raai langs de groene boeienzijde van de vaargeul nabij de oostrand van de Platen van Ossenisse meerdere keren gevaren om een snelheidsprofiel langs de groene boeienlijn te meten. De stromingsdata verkregen tijdens de meetcampagnes werden door Deltares geanalyseerd (van Weerdenburg & van der Werf, 2019). Deze analyse werd later uitgebreid door Stark *et al.* (2022) met meer recente metingen. Uit beide analyses blijkt dat de stijgsnelheid van de waterstand bij Hansweert een redelijke indicator is voor de sterkte van de dwarsstroming in de neer. Voor de beschikbare dataset functioneert de maximale stijgsnelheid beter als indicator dan het vervalcriterium. Echter, voor het voorspellingscriterium dient ook rekening gehouden te worden met de beperkte nauwkeurigheid van voorspellingen voor deze twee indicatoren met het huidige modelinstrumentarium.

### 2.2.2 Dwarsstroom

Voor elk getij in de HF-radar dataset is de dwarsstroming bepaald door de geobserveerde stroming uit het HF-radar stroombeeld eerst lineair te interpoleren op de groene boeienlijn in Figuur 5 (i.e., voor de sectie tussen Boei 49 en Boei 55) of op de gemiddelde vaartracés voor de opvaart en de afvaart in Figuur 6. Deze tracés werden bepaald met behulp van AIS-gegevens (zie: Hoofdstuk 3). Vervolgens worden de stromingsvectoren ontbonden in een dwarscomponent en een langscomponent, waarbij de dwarsrichting wordt gedefinieerd als loodrecht op de groenen boeienlijn (zie illustratie in Figuur 5). Op deze manier wordt steeds een dwarscomponent verkregen die in deze studie met positieve waarden wordt aangeduid als de stroomrichting van de vaargeul af (westelijk) is en als negatief als de stroomrichting naar de vaargeul toe (oostelijk) is. Het maximale dwarsstroomverschil per stroombeeld wordt vervolgens bepaald als het maximale instantaan verschil tussen de hoogste dwarsstromingen in positieve richting (i.e., van de vaargeul af) en negatieve richting (i.e., naar de vaargeul toe). Deze maximale waarden worden voor elk van de drie transecten vermeld in Tabel 1 als  $V_{dwarsDiff}$ .

#### INTERMEZZO

De dwarsstroming kan op verschillende manieren uitgedrukt worden. In de hier gepresenteerde data-analyse wordt de dwarsstroming geïnterpreteerd als het dwarsstroomverschil waarvoor een zelfde definitie gehanteerd wordt als in de eerdere studie van Deltares. Het dwarsstroomverschil wordt uitgedrukt als het verschil tussen de dwarse component richting de vaargeul en de dwarse component weg van de vaargeul langs de groene boeienlijn of één van de vooraf gedefinieerde (gemiddelde) vaartracés.

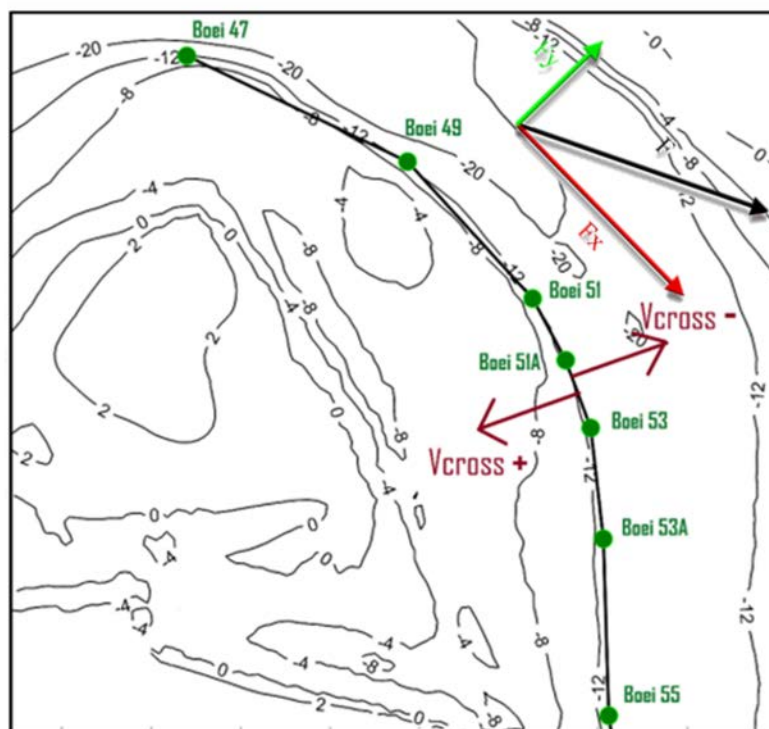
In de nautische analyse wordt de dwarsstroming uitgedrukt als de dwarse stroom die door het schip ervaren wordt en daarbij berekend wordt als stromingscomponent dwars op de voorligging van het schip en gemiddeld over de scheepslengte. Het teken bij de nautische dwarsstroming is positief naar stuurboord en negatief naar bakboord.

Daarnaast verdient het de nodige aandacht om bewust te zijn van de verschillende eenheden. Bij de analyse van de meetdata wordt de stroming meestal uitgedrukt in m/s of cm/s. Voor nautische toepassing hanteert men meestal knoop, waarbij 1 kn = 0,514 m/s.

Het maximale dwarsstroomverschil  $V_{dwarsDiff}$  langs de groene boeienlijn varieert tussen ongeveer 1,5 m/s en 2,7 m/s. Langs het vaartracé voor de opvaart varieert het maximale dwarsstroomverschil  $V_{dwarsDiff}$  tussen 1,6 m/s en 2,8 m/s en langs het vaartracé afvaart tussen 1,5 m/s en 2,8 m/s. Het maximale dwarsstroomverschil voor elk getij verschilt dus tussen de drie transecten. Ook het transect waar het maximale dwarsstroomverschil het sterkst is, verschilt tussen de getijden. Voor sommige getijden is de dwarsstroming het sterkst langs de groene boeienlijn, terwijl voor andere getijden de dwarsstroming sterker is langs het vaartracé afvaart nabij de rode boeienlijn. Deze verschillen kunnen deels verklaard worden door ruimtelijke variaties in de positie van de neer, waarbij de intensiteit en positie van de neer ook nog varieert over de tijd. De sterkste neerstroming vindt daardoor niet voor elk getij op hetzelfde moment plaats en verschilt ook per transect of locatie.

Overigens dient de verklaring voor de verschillen tussen de transecten ook gezocht te worden in de onnauwkeurigheid van de HF-radarbeelden zelf. Veel van de geanalyseerde radarbeelden bevatten onrealistische snelheidsvectoren die voor deze analyse uit de dataset werden genomen, ook in radarbeelden waarin de neer aanwezig was. Hierdoor kan het voorkomen dat het moment van maximale dwarsstroomverschil langs een transect niet goed is gecapteerd.

Verder wordt opgemerkt dat het maximale dwarsstroomverschil in Tabel 1 niet voor elk getij louter door de neer wordt veroorzaakt. In sommige gevallen is de dwarscomponent als gevolg van de reguliere eb- of vloedstroming hoger dan de dwarscomponent die door de neer wordt veroorzaakt. Met name aan de uiteinden van de segmenten heeft de getijstroming regelmatig hoge dwarscomponenten omdat de richting van de getijstroming daar relatief veel afwijkt van de oriëntatie van de groene boeienlijn. De waarden in Tabel 1 zijn dus niet altijd volledig toe te schrijven aan de neer.



Figuur 5 – Illustratie van de definitie van dwarsrichting en langsrichting. Uit: Stark *et al.* (2022a).

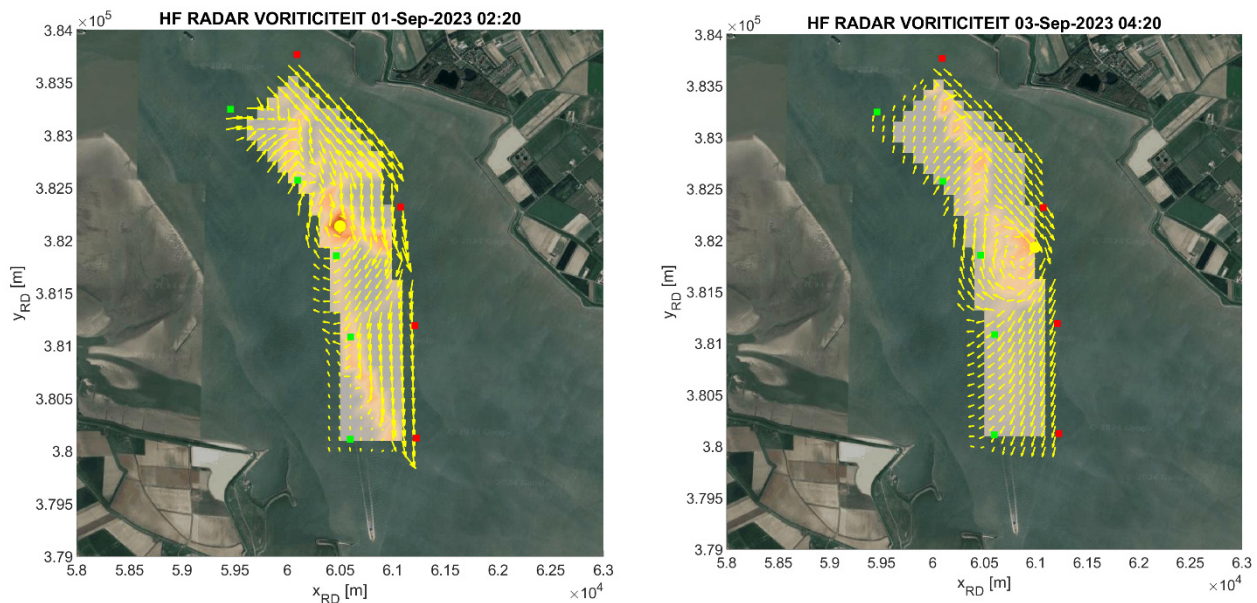


Figuur 6 – Segmenten van de vaartracés voor opvaart (groen) en afvaart (rood) in het studiegebied.

### 2.2.3 Positie van de neer

Voor elk van de relevante stroombeelden wordt de positie van het centrum van de neer bepaald door visuele inspectie van het stroombeeld en een analyse van de vortciteit (i.e., 2x de hoeksnelheid), waarbij het centrum van de neer zich situeert waar de richtingsgradiënt in het stroomveld maximaal is. Figuur 7 geeft ter illustratie twee voorbeelden van de berekende vortciteit voor stroombeelden van 01/09/2023 en 03/09/2023, waarin het centrum van de neer respectievelijk aan de groene en rode boeienkant is gesitueerd.

Als de neerposities voor de relevante getijden en stroombeelden worden geanalyseerd, blijkt dat het centrum van de neer in de bruikbare stroombeelden zich steeds situeert in de omgeving van Boei 53. De ruimtelijke variatie in positie van de neer beperkt zich tot maximaal enkele honderden meters opwaarts en afwaarts of transversaal richting de rode boeienlijn.

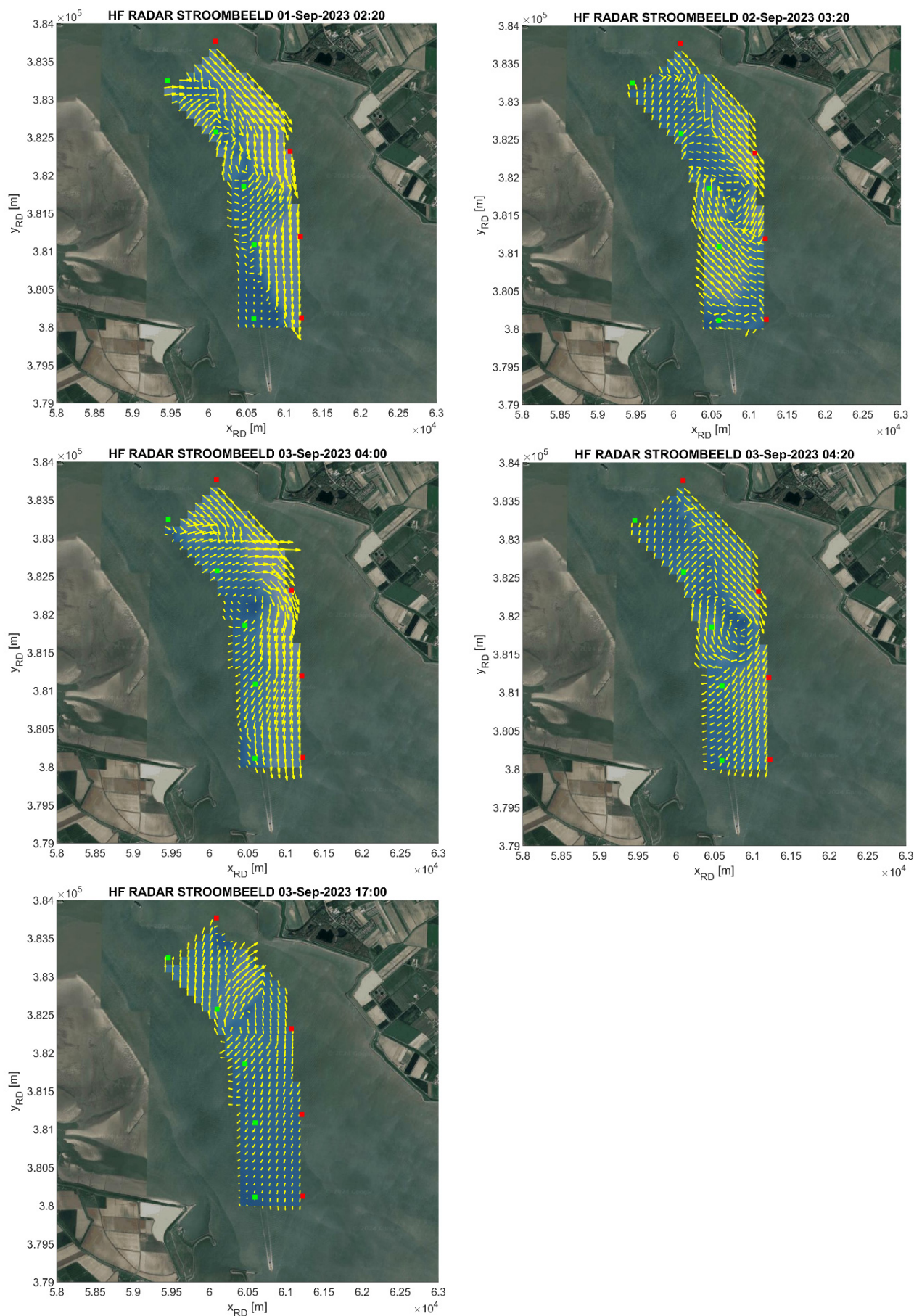


Figuur 7 – Voorbeelden van HF-radar stroombeelden met berekende vorticeit en posities van het centrum van de neer.

## 2.3 Selectie HF-radarbeelden voor nautische analyse

Uiteindelijk zijn vijf onderscheidende stroombeelden geselecteerd. De selectie is voornamelijk gebaseerd op voldoende variatie in de posities van de neer. Ook was de bruikbaarheid van de HF-radarbeelden een limiterende factor. In veel stroombeelden komen namelijk onrealistische vectorvelden voor als gevolg van fouten in de metingen zelf, of door interferentie van passerende schepen. De geselecteerde stroombeelden en bijbehorende getijkaracteristieken, inclusief de sterkte van de dwarsstroming  $V_{dwarsDiff}$  langs de groene boeienlijn en langs de gemiddelde vaartracés voor opvaart en afvaart, staan voor elk van deze stroombeelden in Tabel 2. Deze waarden voor  $V_{dwarsDiff}$  wijken af van de maximale dwarsstroming per transect in Tabel 1 omdat de tijdstippen van de geselecteerde stroombeelden niet allemaal overeen komen met het moment van maximale dwarsstroming op één van de transecten. Bovendien is de maximale waarde voor  $V_{dwarsDiff}$  soms het resultaat van reguliere getijstroming die zeker na kentering hoogwater ook een sterke dwarscomponent veroorzaakt. Figuur 8 geeft een overzicht van de vijf geselecteerde HF-radar stroombeelden voor de nautische analyse. Het verloop van de dwarsstroming langs elk van de drie transecten (i.e., boeienlijn en vaartracés) staat geïllustreerd in de figuren in “Bijlage 1 Dwarscomponent van de stroming in geselecteerde HF-radarbeelden”.

Er dient opgemerkt te worden dat de vijf geselecteerde stroombeelden wel overeenstemmen met een hoogwater waarvoor een giertijwaarschuwing gepubliceerd werd, maar dat de geselecteerde stroombeelden vaak voorkomen op een tijdstip voorafgaand aan het gedefinieerde spervenster. In de giertijwaarschuwing wordt een spervenster [-20 min - +60 min] ten opzichte van hoogwater Hansweert gehanteerd, terwijl op basis van de analyse van stroombeelden uit de HF-radar dataset vijf stroombeelden geselecteerd werden voor tijdstippen -70 min (x2); -65 min; -50 min en -05 min ten opzichte van HW. Op één na bevinden alle geselecteerde stroombeelden zich dus vóór het gepubliceerde spervenster.



Figuur 8 – Geselecteerde HF-radar stroombeelden.

Tabel 2 – Getijkarakteristieken en maximale dwarsstroom langs drie transecten voor geselecteerde stroombeelden.

Datum (MET)	GF [-]	TR [m]	Maxvv [cm]	dhdt <sup>1</sup> [cm/min]	Groene Boeienlijn $V_{dwarsDiff}$ [m/s]	Vaartracé Opvaart $V_{dwarsDiff}$ [m/s]	Vaartracé Afvaart $V_{dwarsDiff}$ [m/s]
01-Sep-2023 02:20	1.25	5.64	69	4.2	2.22	1.48	1.34
02-Sep-2023 03:20	1.30	5.89	72	4.6	2.04	1.72	1.64
03-Sep-2023 04:00	1.23	5.58	74	4.5	1.75	1.79	2.29
03-Sep-2023 04:20	1.23	5.58	74	4.5	1.64	1.75	1.37
03-Sep-2023 17:00	1.09	4.91	56	3.5	1.08	1.89	1.94

## 2.4 Combineren HF-radarbeelden en gemodelleerde stroombeelden

Omdat de nautische simulaties ook opwaarts en afwaarts van de HF-radar beelden stroomsnelheden als input nodig hebben worden de HF-radar beelden gecombineerd met gemodelleerde stroomvelden. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van numerieke modelresultaten die in het kader van eerdere studies werden verkregen (e.g. Stark *et al.*, 2020, 2021, 2022; Verwilligen *et al.*, 2022). In alle gevallen betreft dit hydrodynamische simulaties die werden uitgevoerd met het Delft3D-NeVla model. Voor meer gedetailleerde informatie over de modelopzet en achtergronden bij de modelstudies wordt verwezen naar de hierboven genoemde rapporten.

Binnen de beschikbare Delft3D simulaties wordt gezocht naar gemodelleerde stroombeelden die aan de opwaartse en afwaartse rand van het HF-radarbeeld goed aansluiten voor wat betreft de snelheid van de vloed- of ebstroming. Zo worden abrupte overgangen in de stroomsnelheid in de nautische simulaties zo veel als mogelijk voorkomen. Een geleidelijke overgang langs de overige randen van het HF-radarbeeld (i.e., langs de groene en rode boeienlijn) is niet of nauwelijks van belang omdat de stroomsnelheid buiten de vaargeul normaliter geen invloed heeft op de nautische simulaties.

Tabel 3 geeft voor elk van de selecteerde HF-radarbeelden het gemodelleerd stroombeeld dat is toegevoegd (i.e., simulatieperiode en de bodemligging die lokaal werd geïmplementeerd) en de modelstudie waarin dit stroombeeld werd gesimuleerd. De gecombineerde stroombeelden worden getoond in Figuur 9.

Voor elk van de geselecteerde stroombeelden is de dwarscomponent van de stroming berekend langs de groene boeienlijn en langs de gemiddelde vaartrajecten voor opvaart en voor afvaart (zie: Figuur 6 voor vaartrajecten). In “Bijlage 1 *Dwarscomponent van de stroming in geselecteerde HF-radarbeelden*” worden deze dwarscomponenten van de stroming weergegeven. Uit deze figuren volgt dat de variatie in locatie van de neer ertoe leidt dat voor sommige stroombeelden de dwarsstroming maximaal is langs de groene boeienkant en voor andere stroombeelden langs de rode boeienkant.



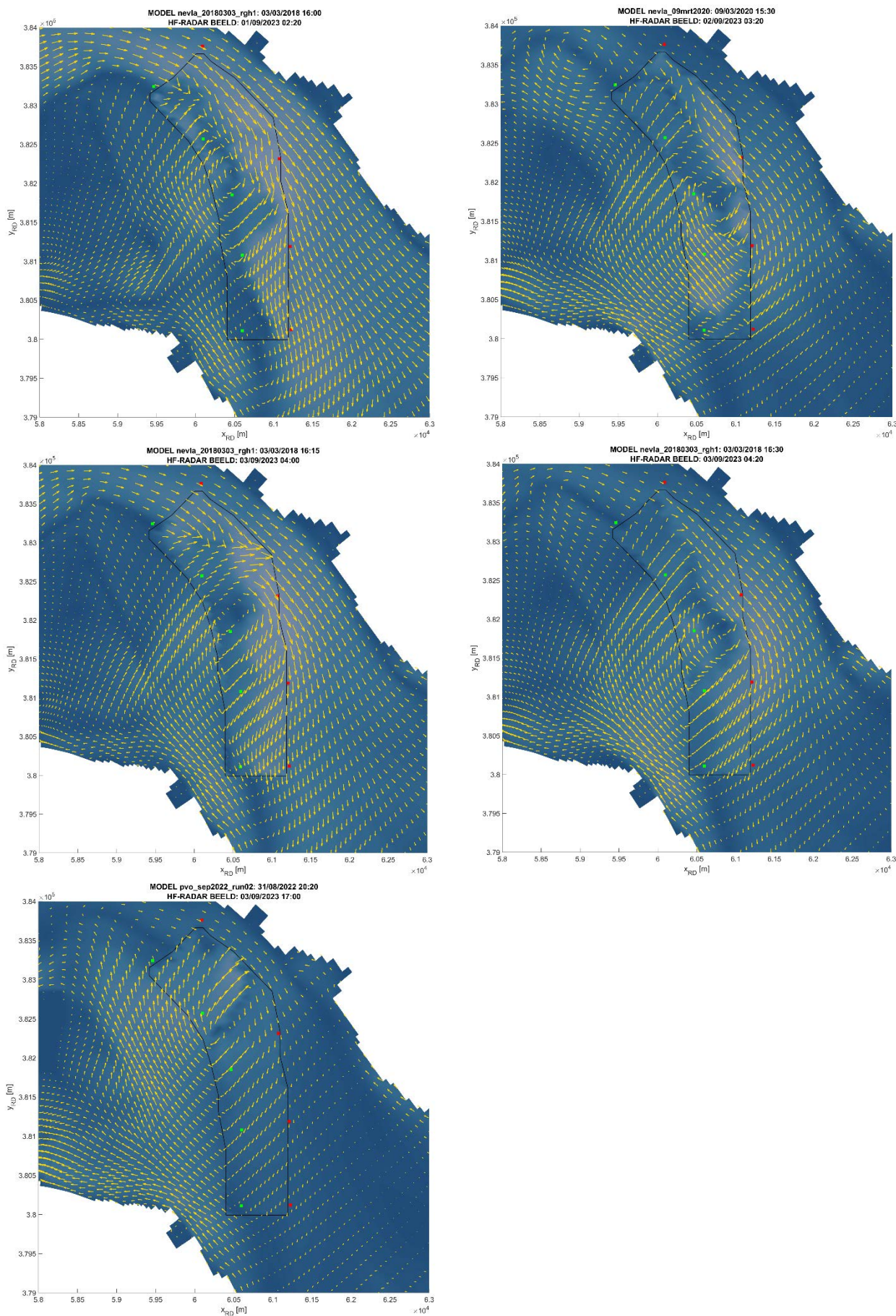
Tabel 3 – Combinaties van HF-radarbeeld en gemodelleerd stroombeeld.

HF radarbeeld	Datum gemodelleerd stroombeeld	Bodemligging voor modelsimulatie	Referentie modelstudie
01-Sep-2023 02:20	3-Mrt-2018 16:00	2018	<i>Stark et al. (2022)</i>
02-Sep-2023 03:20	9-Mrt-2020 15:30	2019	<i>Verwilligen et al. (2022)</i>
03-Sep-2023 04:00	3-Mrt-2018 16:15	2018	<i>Stark et al. (2022)</i>
03-Sep-2023 04:20	3-Mrt-2018 16:30	2018	<i>Stark et al. (2022)</i>
03-Sep-2023 17:00	31-Aug-2022 20:20	2020	<i>niet gerapporteerd</i>

## 2.5 Artificieel verhogen dwarsstroming

Op basis van de gecombineerde stroombeelden zijn aanvullend ook stroombeelden geconstrueerd waarin de dwarscomponent van de stroming artificieel met 20% of 50% is verhoogd. Hiervoor is op elk roosterpunt voor het HF-radar stroombeeld de stroomvector ontleed in een dwarscomponent en een langskomponent. De dwarscomponent is vervolgens opgeschaald, waarna beide componenten weer worden samengevoegd tot een nieuw stroombeeld. De dwars- en langsrichtingen worden per roosterpunt bepaald op basis van de oriëntatie ten opzichte van het meest dichtbij gelegen punt op de groene boeienlijn (zie: Figuur 5). Er is voor gekozen om enkel de dwarscomponent te verhogen en niet de langskomponent omdat anders de reguliere langsstroming (i.e., vloedstroming) ook wordt versterkt met uitzonderlijk hoge stroomsnelheden als gevolg. De focus van dit scenario-onderzoek ligt echter op het effect van een eventuele versterking van de dwarsstroom in de neer en niet op het effect van een versterking van de reguliere vloedstroom. De stroombeelden met verhoogde dwarscomponent worden weergegeven in “Bijlage 2 *Geconstrueerde stroombeelden met artificieel verhoogde dwarscomponent*”.

In Tabel 5 wordt een overzicht geboden van de originele en de artificieel verhoogde stroomvelden zoals deze toegepast werden in de nautische fasttime simulaties.



Figuur 9 – Gecombineerde stroombeelden.

## 3 Nautische fasttime simulaties

In het Zuidergat wordt de bevaarbaarheid beïnvloed door een samenspel van verschillende parameters zoals stromingen, het bochtmanoeuvre, vaarsnelheden, oevereffecten, kielspeling, etc. Om de impact van al deze factoren op het scheepsgedrag te beoordelen werd in deze studie gebruik gemaakt van track-controlled fasttime vaarsimulaties. Bij track-controlled vaarsimulaties wordt het schip langs een vooropgesteld referentietraject geleid door toepassing van roer en schroef. Het controle-algoritme dat roer en schroef aanstuurt om zo goed mogelijk een vooropgesteld vaartraject af te leggen, wordt een track-controller genoemd. Doordat de track-controller een deterministisch computer algoritme is, is de toepassing niet beperkt tot realtime toepassingen. De simulatietijd kan bijgevolg versneld worden waardoor deze simulaties in fasttime mode uitgevoerd kunnen worden. De beoordeling van de nautische hinder ten gevolge van de onderzochte omgevingscondities (in deze studie variërende stroombeelden) wordt geïllustreerd door middel van de afwijking van de vaarpositie ten opzichte van het vooropgestelde referentietraject (verder dwarsafstand genoemd).

De analyse werd uitgevoerd voor twee types containerschepen en voor opvarende en afvarende vaarrichting.

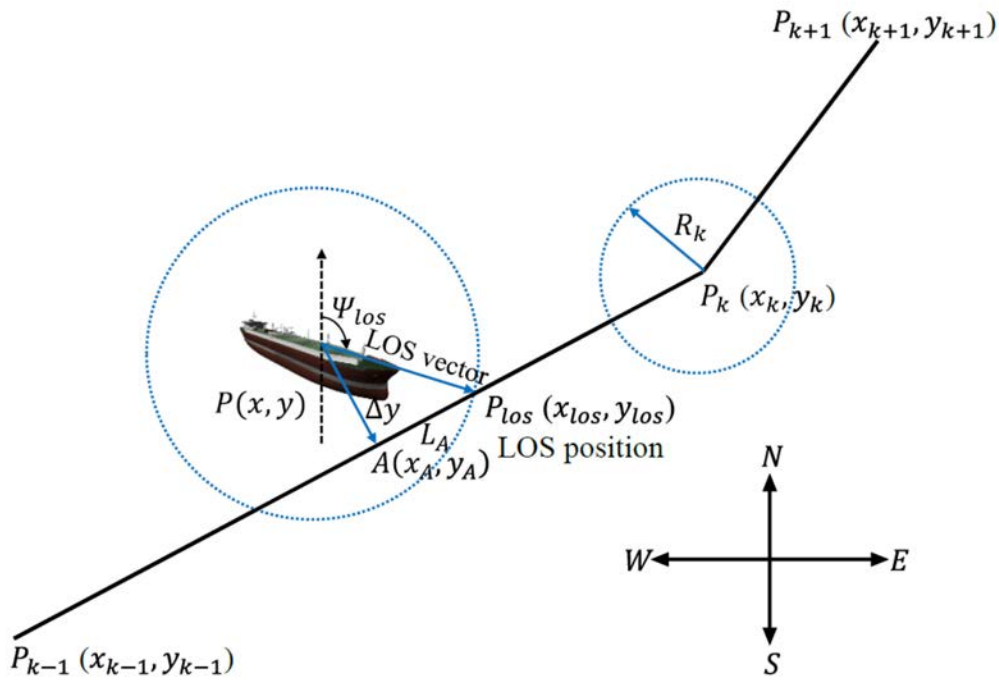
### 3.1 Track-controller

De track-controller die toegepast wordt in de fasttime simulaties, werd ontleend aan Chen *et al.* (2020). De track-controller bestaat uit twee controle algoritmes. Een eerste controle algoritme (het gids algoritme/guidance algorithm) bepaalt de gewenste koers van het schip om een vooropgesteld pad te volgen. Een tweede controle algoritme (het stuur algoritme/ship motion algorithm) bepaalt de roerhoeken die vereist zijn om de gewenste koers te realiseren (en eventueel ook het schroeftoerental om een vooropgestelde snelheid te realiseren).

#### 3.1.1 Gids algoritme

Het gids algoritme dat toegepast werd tijdens de fasttime simulaties, betreft een line-of-sight (LOS) methode waarbij de gewenste koers ( $\Psi_{\text{los}}$ ) bepaald wordt als de geografische hoek tussen de huidige scheepspositie (P) en de positie voor een bepaalde vooruitrekenafstand ( $L_A$ ) langsheen het referentietraject (tot punt  $P_{\text{los}}$ ). De vooruitrekenafstand wordt uitgezet langs het referentietraject ten opzichte van de orthogonale projectie van de scheepspositie tot het referentietraject (A).

Dit principe wordt geïllustreerd in Figuur 10.



Figuur 10 – Principe van het line-of-sight (LOS) gids algoritme (C. Y. Chen *et al.*, 2020).

De vooruitrekenafstand die toegepast wordt in het gidsalgoritme wordt gedefinieerd op basis van de lengte van de LOS-vector die gedefinieerd wordt als de som van de cross track error ( $\Delta y$ ) en een fractie ( $c_{LA}$ ) van de scheepslengte ( $L_{pp}$ : scheepslengte tussen de loodlijnen). Aanbevolen waarden voor  $c_{LA}$  liggen tussen 0.5 en 2.0.

$$L_A = \sqrt{(\|LOS\|)^2 - (\Delta y)^2} = \sqrt{(\Delta y + c_{LA} L_{pp})^2 - (\Delta y)^2} \quad (1)$$

Het referentietraject is gedefinieerd als een polylijn waarbij rechte lijnsegmenten gedefinieerd worden door middel van waypoints. De LOS-methode houdt bij wat het vorige waypoint ( $P_{k-1}$ ) en het volgende waypoint ( $P_k$ ) zijn waartussen het schip zich bevindt. Van zodra de orthogonale projectie van het schip ( $A$ ) zich binnen een afstand  $2R_k$  van het volgende waypoint bevindt, dan wordt de vooruitrekenafstand niet langer langs de lijn  $[A, P_k]$  bepaald, maar wel vanaf de lijn  $[A, P_{k+1}]$ . Wanneer het schip vervolgens het waypoint  $P_k$  gepasseerd is en het schip zich opnieuw binnen het vaarsegment bevindt wordt de bovenvermelde procedure herhaald. De afstand ( $R_k$ ) ten opzichte van het volgende waypoint waarvoor er doorgeschakeld wordt naar het daaropvolgende waypoint wordt bepaald als een fractie van de scheepslengte ( $\omega_{los}$ ).

$$R_k = \omega_{los} L_{pp} \quad (2)$$

Bovenvermelde procedure kijkt maximaal één waypoint verder dan het huidige lijnsegment waarin het schip zich bevindt. Deze methode werkt goed indien de afstand tussen twee waypoints voldoende groot is (enkele scheepslengtes), maar kan instabiliteiten vertonen wanneer er veel waypoints gedefinieerd zijn en/of wanneer er grote vooruitrekenafstanden toegepast worden (bijvoorbeeld door grote cross track errors die aanleiding kunnen geven tot grote vooruitrekenafstanden zoals blijkt uit (1).

### 3.1.2 Stuur algoritme

Het stuur algoritme dient het schip te sturen opdat de gewenste koershoek zoals aangeleverd door het gids algoritme zo goed mogelijk benaderd wordt. Hiervoor wordt in de fasttime simulaties het fuzzy control algorithm (C. Y. Chen *et al.*, 2020) toegepast (zie Figuur 11).

Op basis van de huidige koers van het schip ( $\Psi$ ) en de gewenste koers ( $\Psi_d = \Psi_{los}$ ) naar het vooropgestelde traject (resultaat van het gids algoritme), wordt de afwijking op de koers ( $e$ ) bepaald. Deze afwijking dient gecorrigeerd te worden door een gepast roergebruik.

Om de koersafwijking te relateren aan een gepaste roerhoek wordt rekening gehouden met zowel de koersafwijking ( $e$ ) als met de eerste afgeleide van de koersafwijking (d.i. de giersnelheid waarmee de koersafwijking varieert en wordt verder gierafwijking genoemd,  $de/dt$ ). Beide inputs worden versterkt met een scheepsafhankelijke multiplicator ( $K_e$  en  $K_c$ ) waarna op basis van de versterkte inputs de roerhoek (lineair) geïnterpoleerd wordt uit een zogenaamd Fuzzy Inference Surface dat weergegeven wordt in Figuur 12 en ontleend werd aan Sugeno (1985). De Fuzzy Inference Surface zet de combinatie van koers- en gierafwijking om tot een waarde ( $U$ ) variërend tussen +3 en -3. Door deze waarde te vermenigvuldigen met één derde van de maximale roerhoek van het schip ( $d_{MAX}$ ) wordt de gewenste roerhoek bekomen.

$$K_u = \frac{d_{MAX}}{3} \quad (3)$$

De scheepsafhankelijke multiplicatoren  $K_e$  en  $K_c$  kunnen ook bepaald worden als de maximale fout ( $e_{MAX}$ ) en de maximale afgeleide fout ( $ed_{MAX}$ ) die overeenstemmen met de maximale waarden uit het Fuzzy Inference Surface (+3 en -3). De relatie tussen  $K_e$  en  $K_c$  enerzijds en  $e_{MAX}$  en  $ed_{MAX}$  anderzijds worden weergegeven in onderstaande formules.

$$K_e = \frac{3}{e_{max}} \quad (4)$$

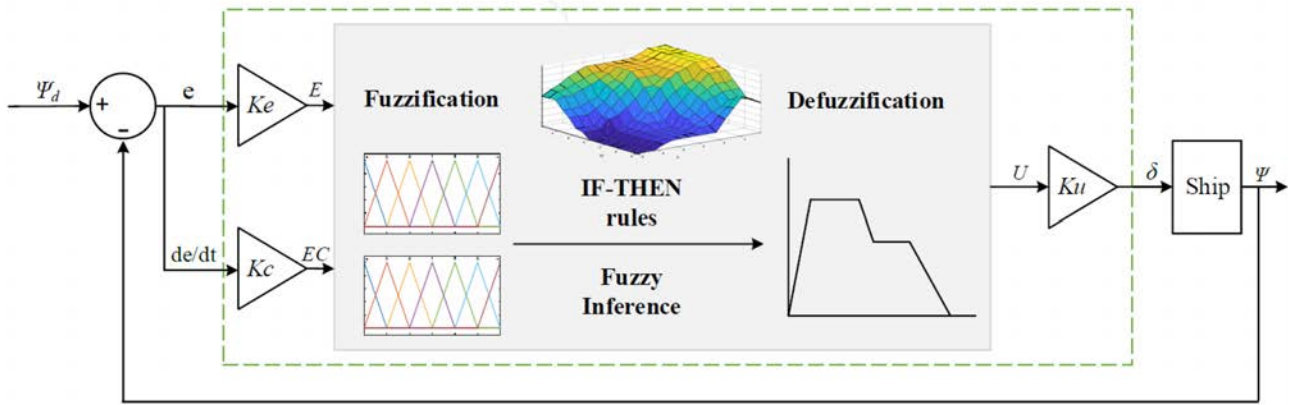
$$K_c = \frac{3}{ed_{max}} \quad (5)$$

Met:

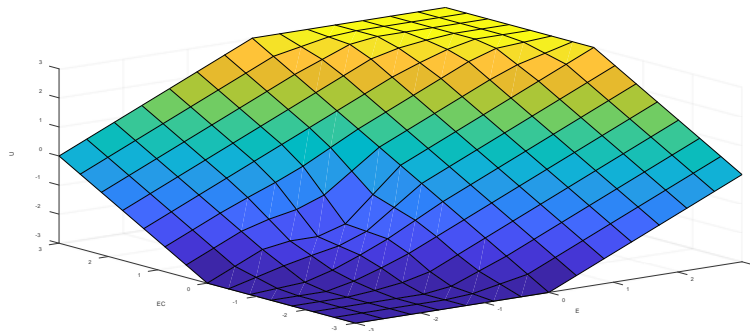
- $e_{MAX}$ : de maximale koersafwijking (rad) waarbij het maximum van de eerste dimensie van de Fuzzy Inference Surface bereikt wordt;
- $ed_{MAX}$ : de maximale afgeleide van de koersafwijking (rad/s) waarbij het maximum van de tweede dimensie van de Fuzzy Inference Surface bereikt wordt.

Bovenstaande stuur algoritme voor roerhoek werd aan 40 Hz uitgevoerd (d.i. eveneens de rekenfrequentie van de vaarsimulatiesoftware van het Waterbouwkundig Laboratorium). Deze frequentie is ruim voldoende opdat deze niet bepalend zou zijn voor het eindresultaat.

De track-controller blijkt in staat om bij vereenvoudigde omgevingscondities (afwezigheid van wind en ander scheepvaartverkeer) het schip op een realistische wijze langs de vooropgestelde trajecten te leiden. Hierdoor laat de track-controller een objectieve vergelijking van het vaarcomfort toe bij verschillende (omgevings-)condities zoals vereist in voorliggend onderzoek. Dit wil echter niet zeggen dat de track-controller in realiteit een ervaren rivierloods zou kunnen vervangen. Het beslissingsalgoritme van de toegepaste track-controller is immers sterk verschillend van dat van een ervaren rivierloods (die vanuit zijn kennis van schip en omgeving proactief zal handelen waar de track-controller reactief handelt). De toepassing van een track-controller is ingegeven door de noodzaak van een objectief en reproduceerbaar bevaarbaarheids criterium en is geenszins een pleidooi om deze toe te passen bij de werkelijke beloodsing van schepen.



Figuur 11 – Principe van het fuzzy stuur algoritme (C. Y. Chen *et al.*, 2020).



Figuur 12 – Fuzzy Inference System voor de fuzzy controller toegepast in de track-controller (Sugeno, 1985)

### 3.1.3 Instelgegevens

De instelgegevens voor het gids algoritme en stuur algoritme werden in deze studie geoptimaliseerd voor de te onderzoeken condities. Voor beide studieschepen werd een verschillende definitie van de track-controller toegepast. De instelgegevens van de track-controller voor de twee studieschepen worden weergegeven in Tabel 4.

Tabel 4 – Instelgegevens track-controller zoals toegepast in fasttime simulaties

Schip	Traject	Gids algoritme		Stuur algoritme				
		$c_{LA}$ [-]	$\omega_{los}$ [-]	$K_e$ [1/deg]	$K_c$ [s/deg]	$K_u$ [deg]	$e_{MAX}$ [deg]	$ed_{MAX}$ [deg/s]
ULCS	Opvaart	1.05	0.8	0.33	0.75	11.67	9.0	4.01
ULCS	Afvaart	1.05	0.8	0.33	0.75	11.67	9.0	4.01
Panamax	Opvaart	1.50	1.0	0.48	2.62	11.67	6.3	1.15
Panamax	Afvaart	1.50	1.0	0.48	6.54	11.67	6.3	0.46

## 3.2 Definitie simulatieomgeving

### 3.2.1 Studieschepen

De fasttime simulaties bij het varen bij giertijcondities werd uitgevoerd voor twee types containerschepen:

- Ultra Large Container Ship (ULCS): 399 m x 54 m x 13.5 m
- Panamax Container Ship: 300 m x 32.2 m x 12 m

Voor deze schepen was reeds een wiskundig manoeuvreermodel en oevereffectenmodel beschikbaar in de simulatoren van het Waterbouwkundig Laboratorium.

#### Referentietrajecten AIS

Als input voor de track-controller dient een referentiep pad bepaald te worden dat het studieschip dient te proberen volgen. Dit pad werd gebaseerd op AIS-gegevens bekomen voor het jaar 2022 waarbij in eerste instantie de vaarttrajecten van alle doorgaande op- en afvaarten tussen de Overloop van Hansweert en Bath bepaald werden. Doorgaande trajecten werden hierbij gedefinieerd als de reizen tussen deze passagelijnen die maximaal 8h in beslag namen. Figuur 13 toont de toegepaste passagelijnen net als de op- en afvarende AIS-trajecten voor de maand januari 2022.

Vervolgens werden in deze trajecten enkel de reizen weerhouden die ook ter hoogte van Valkenisse via het hoofdvaarwater verliepen (dus de vaarten via Schaar van Valkenisse werden niet in rekening gebracht).

Voor beide studieschepen werd een scheepsfilter gedefinieerd op basis waarvan enkel containerschepen overbleven die gelijkaardig beschouwd kunnen worden als de studieschepen:

- ULCS:  $L_{OA} > 350$  m (390 opvaarten en 396 afvaarten)
- Panamax:  $L_{OA} > 250$  m en B tussen 32.0 m en 33.0 m (531 opvaarten en 530 afvaarten)

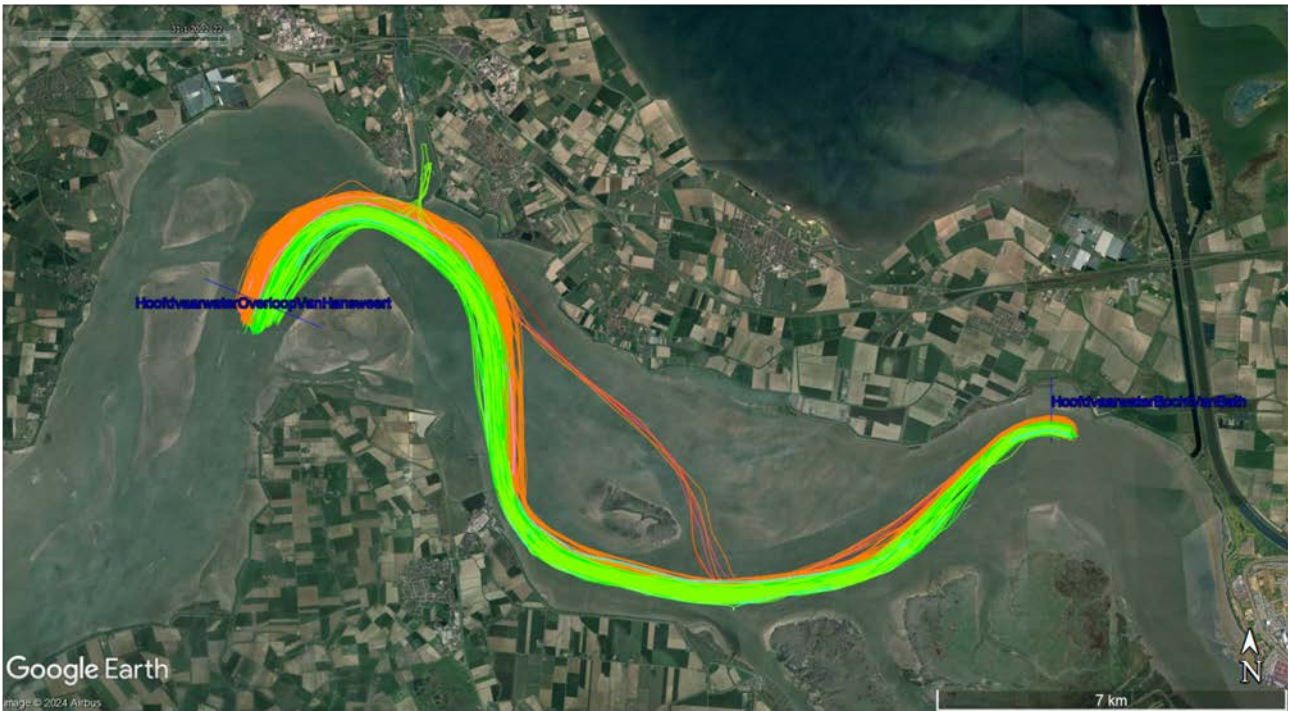
Voor deze trajecten werden de vaarsnelheden over de grond berekend en werden de stroomsnelheden langsheen het traject bepaald op basis van de methode beschreven in Verwilligen & Eloot (2024). Door de langsscheepse stroomcomponent te combineren met de vaarsnelheid over de grond werd de vaarsnelheid door het water bekomen.

Om de dwarspositie van de vaarttrajecten te analyseren werd per traject de excentriciteit van het AIS-traject ten opzichte van de midvaarwatercurve bepaald. De midvaarwatercurve werd bovendien gebruikt als een geografische referentie van de vaarweg met baanafstanden gerefereerd ten opzichte van de passage van Hansweert (0 km). De midvaarwatercurve en de bijhorende baanafstanden worden geïllustreerd in Figuur 14. De analyse van de excentriciteiten ten opzichte van de midvaarwatercurve werd elke 50 m uitgevoerd waarbij voor elke positie een statistische analyse uitgevoerd kon worden. Hierbij werd het verloop van verschillende statistische trajecten bekomen op basis van:

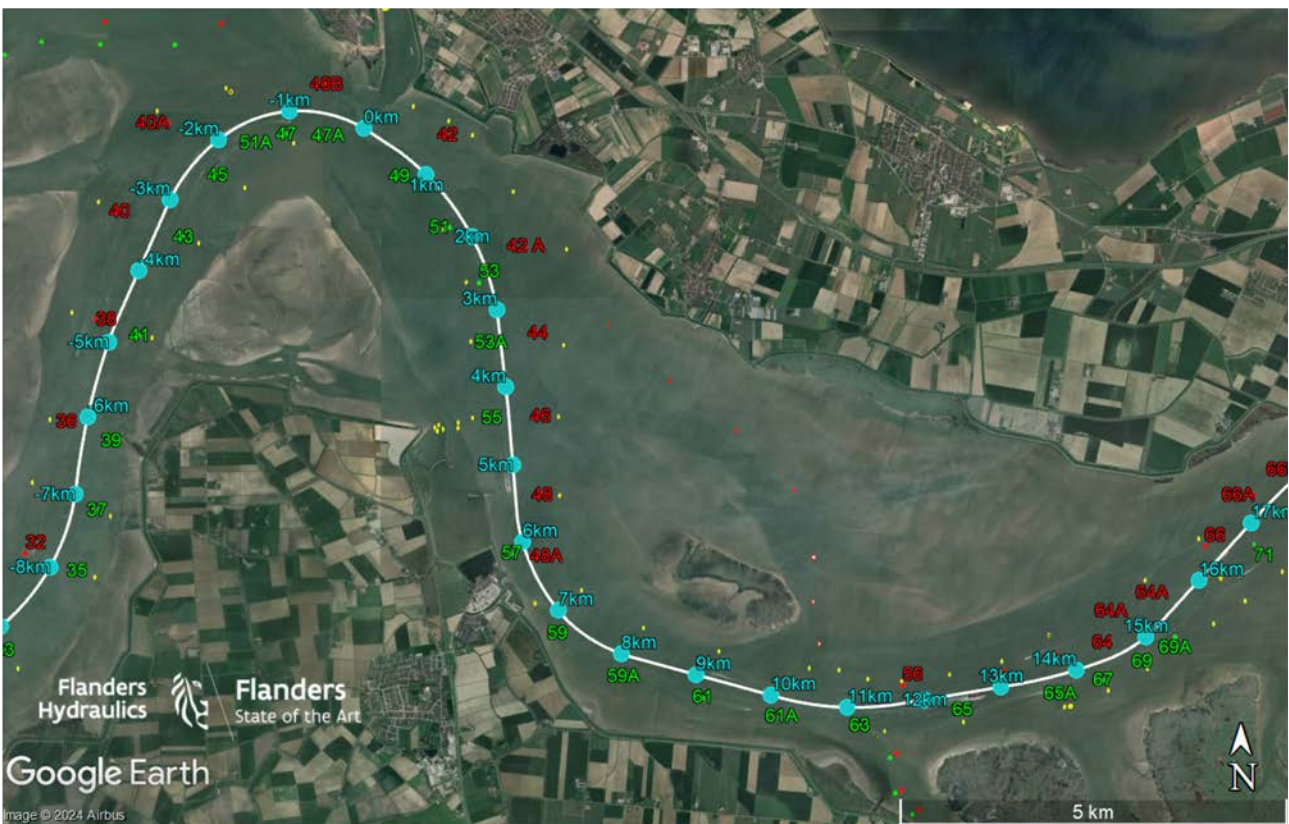
1. een traject overeenkomstig met de mediaan van de excentriciteiten (wat beschouwd kan worden als een gemiddeld traject van de betreffende schepen);
2. een traject overeenkomstig de 10%-percentiel van de excentriciteiten;
3. een traject overeenkomstig de 90%- percentiel van de excentriciteiten.

De resultaten van deze analyse voor het Zuidergat worden voor beide scheepstypes weergegeven in Figuur 15. Figuur 16 toont een detail van de onderlinge verschillen van de trajecten voor beide scheepstypes.

Voor de fasttime simulaties werden enkel de gemiddelde trajecten gehanteerd als referentietraject voor de track-controller.

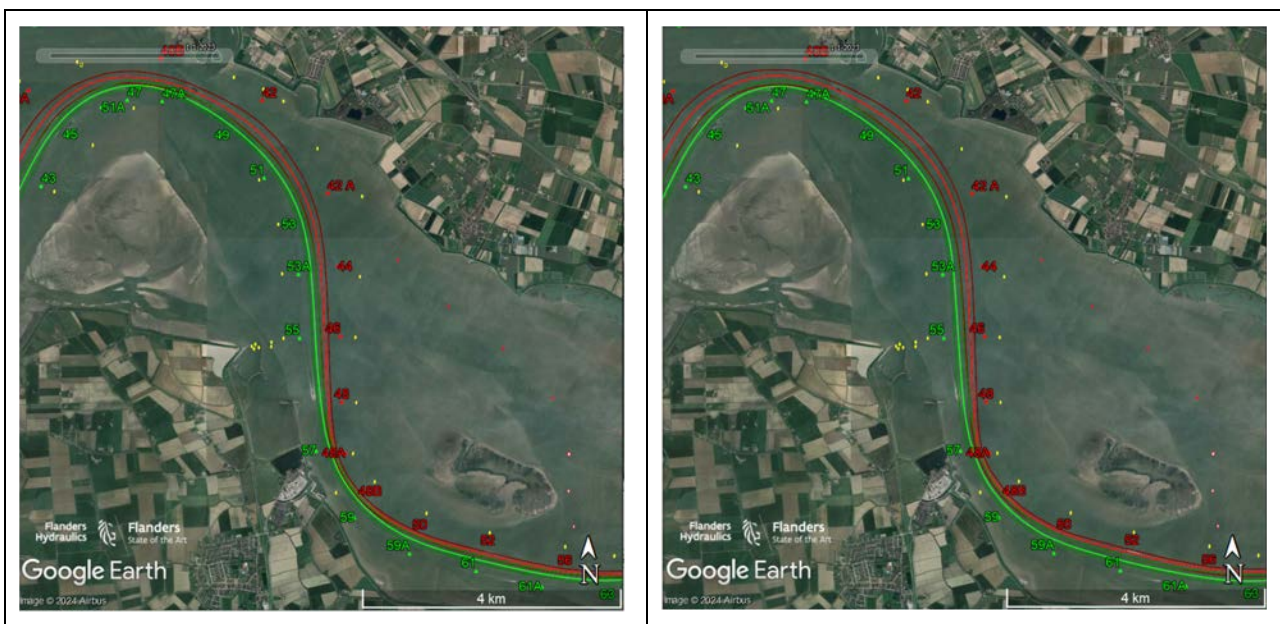


Figuur 13 – Weergave van AIS-trajecten voor opvaart (groen) en afvaart (rood/oranje) tussen de passagelijnen Hoofdvaarwater Overloop van Hanswoert en Hoofdvaarwater Bocht van Bath voor januari 2022

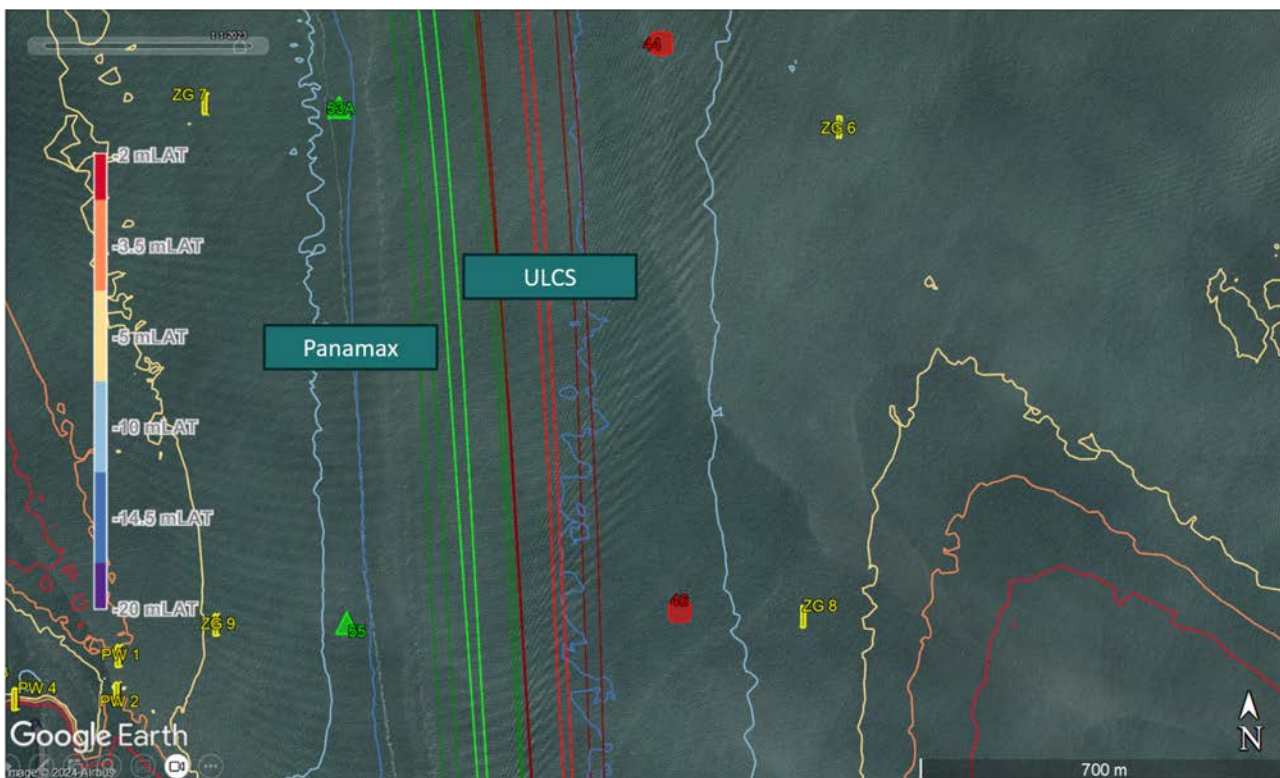


Figuur 14 – Midvaarwatercurve met bijhorende baanafstanden in combinatie met de boeien begin 2023





Figuur 15 – Opvarende (groen) en afvarende (rood) AIS-trajecten voor ULCS (links) en Panamax (rechts) overeenkomstig de 10%, 50% en 90% excentriciteit



Figuur 16 – Vergelijking van de AIS-trajecten voor scheepstypes Panamax (meest excentrisch) en ULCS (meest centraal in HWW)

## Vaarsnelheden AIS

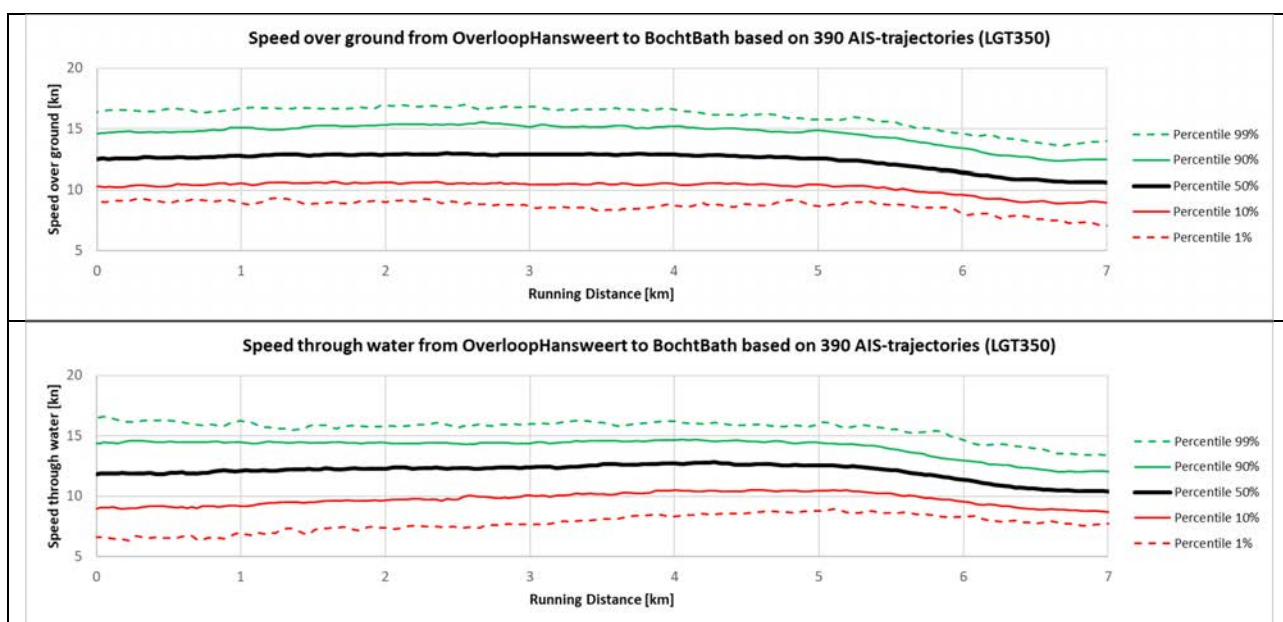
Voor beide geselecteerde scheepstypes en bijhorende scheepsfilters werden er ook statistische analyses uitgevoerd van de vaarsnelheid van de schepen ten opzichte van de midvaarwatercurve. Hiervoor werden zowel de snelheid over de grond als de snelheid door het water onderzocht.

De resultaten van deze analyse worden weergegeven in Figuren 17 tot 20 voor respectievelijk de scheepstypes ULCS en Panamax en voor de op- en afvarende trajecten. Merk op dat voor de afvarende trajecten de schepen zich langs de horizontale as van de figuren bewegen van rechts naar links (dalende baanafstanden).

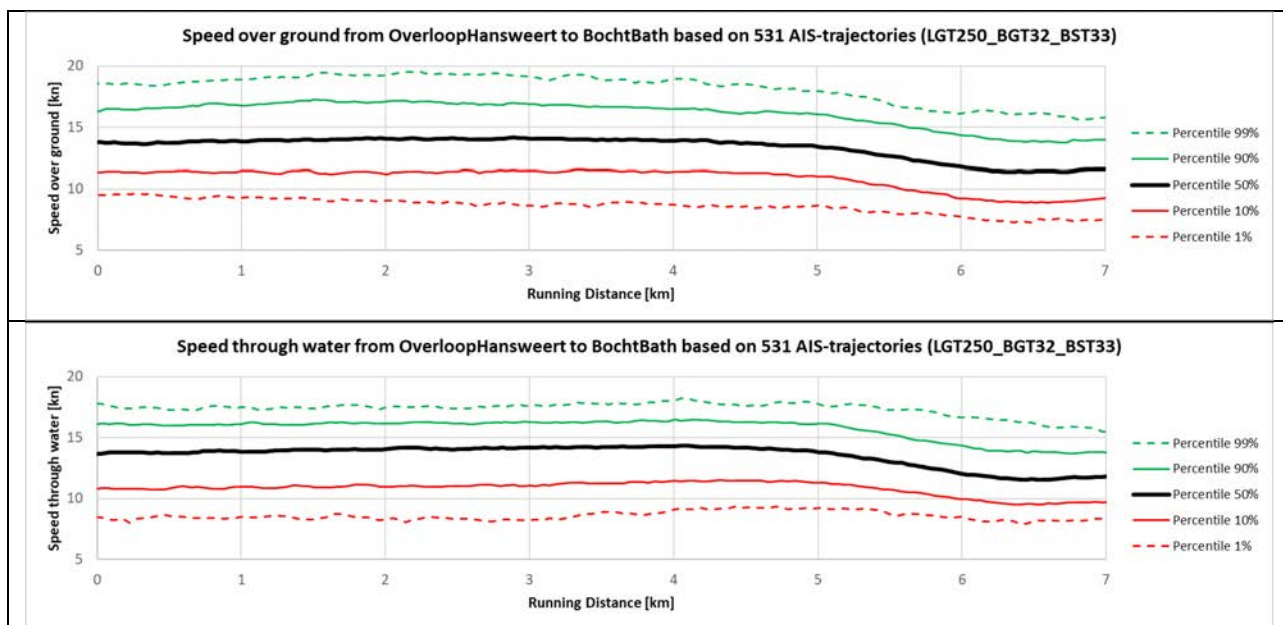
Op basis van deze snelheidsresultaten gelden onderstaande waarnemingen:

1. De vaarsnelheid van afvarende scheepvaart is in het Zuidergat hoger dan voor opvaart. Het verschil bedraagt tot 1.5 kn voor de grootste containerschepen (ULCS) en ca. 0.9 kn voor de Panamax containerschepen.
2. Zowel in op- als afvaart treedt een snelheidsvermindering op in de bocht van Walsoorden ( $s = 6.5$  km) die te verklaren is door de uitvoering van het bochtmanoeuvre waarbij de scheepssnelheid terugvalt en door een bewuste vermindering van scheepsnelheid in functie van de golfslag in de haven van Walsoorden.
3. De onderzochte scheepstypes vertonen een grote spreiding in de gehanteerde vaarsnelheden. Deze spreiding is over het algemeen beperkt kleiner voor de snelheden door het water dan voor de snelheden over de grond wat aangeeft dat een deel van deze spreiding veroorzaakt wordt door de variërende stroomcondities waarbij de schepen varen.

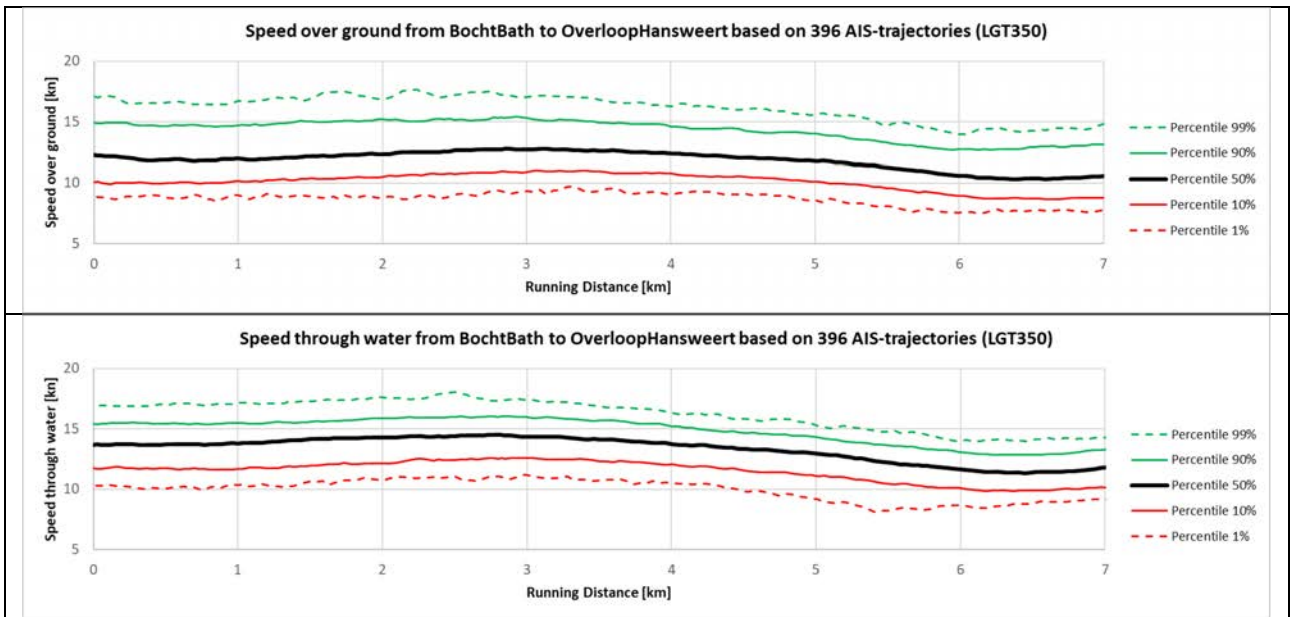
De gemiddelde vaarsnelheid door het water werd als input gebruikt voor de fasttime simulaties zoals beschreven in §3.2.4.



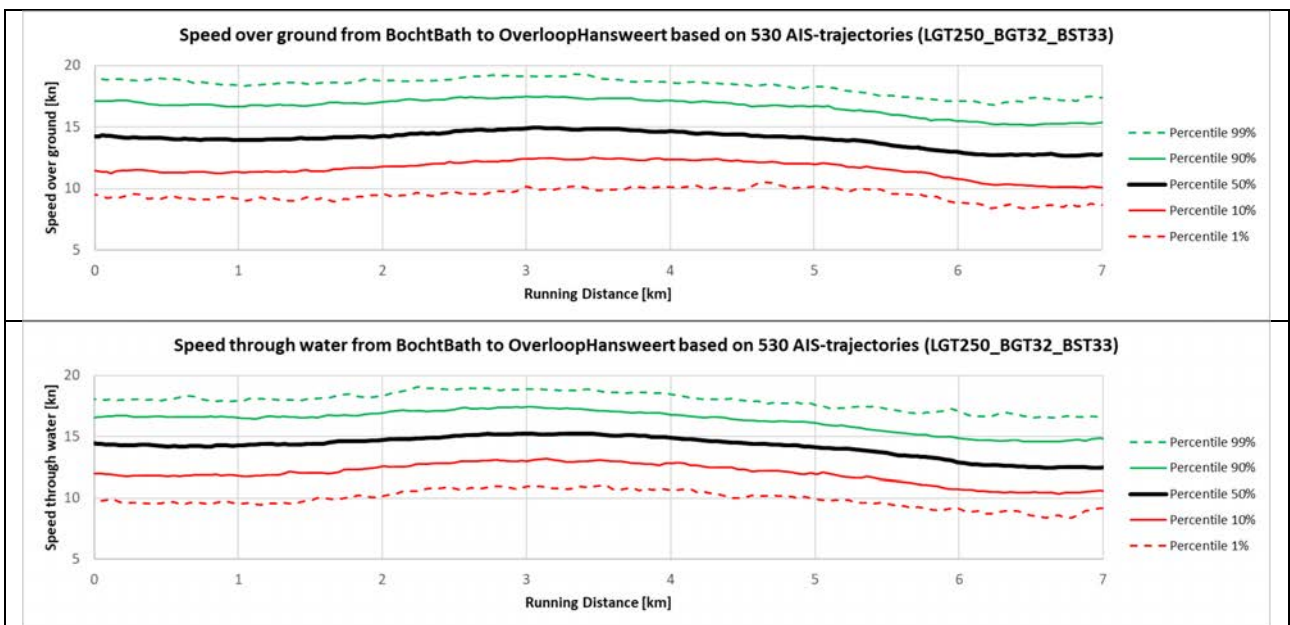
Figuur 17 – Verloop van snelheid over de grond (boven) en snelheid door het water (onder) voor opvarende ULCS  
Links (KM 0) = Overloop van Hansweert, rechts (KM 7) = Bath



Figuur 18 – Verloop van snelheid over de grond (boven) en snelheid door het water (onder) voor opvarende Panamax  
Links (KM 0) = Overloop van Hansweert, rechts (KM 7) = Bath



Figuur 19 – Verloop van snelheid over de grond (boven) en snelheid door het water (onder) voor afvarende ULCS



Figuur 20 – Verloop van snelheid over de grond (boven) en snelheid door het water (onder) voor afvarende Panamax

### 3.2.2 Strooming

De stroomprofielen die toegepast werden in de simulatiestudie betreffen de gecombineerde stroomvelden zoals gepresenteerd in §2.4 en §2.5. Vijf verschillende vectorvelden bekomen uit de HF Radar werden hiervoor als basis genomen waarbij steeds twee varianten gegenereerd werden met een kunstmatig verhoogde dwarscomponent (120% en 150%). Op die manier werden er 15 verschillende stroomvelden bekomen die als input dienden voor de simulatiestudie. De stroomvelden werden in de simulator gedefinieerd als dieptegemiddelde stroomvelden en werden geprojecteerd op een basismesh met hoge resolutie binnen de vergunde vaargeul en grotere resolutie op grotere afstand van de vaargeul. De resolutie van het vectorveld in de simulatieomgeving bedroeg 20 m.

Om de resultaten van de verschillende stroomvelden onderling te vergelijken werd een kleurcode toegepast. Een overzicht van de stroomvelden gehanteerd in de fasttime simulaties en de bijhorende kleurcodes wordt weergegeven in Tabel 5.

Tabel 5 – Stroomvelden toegepast in fasttime simulaties

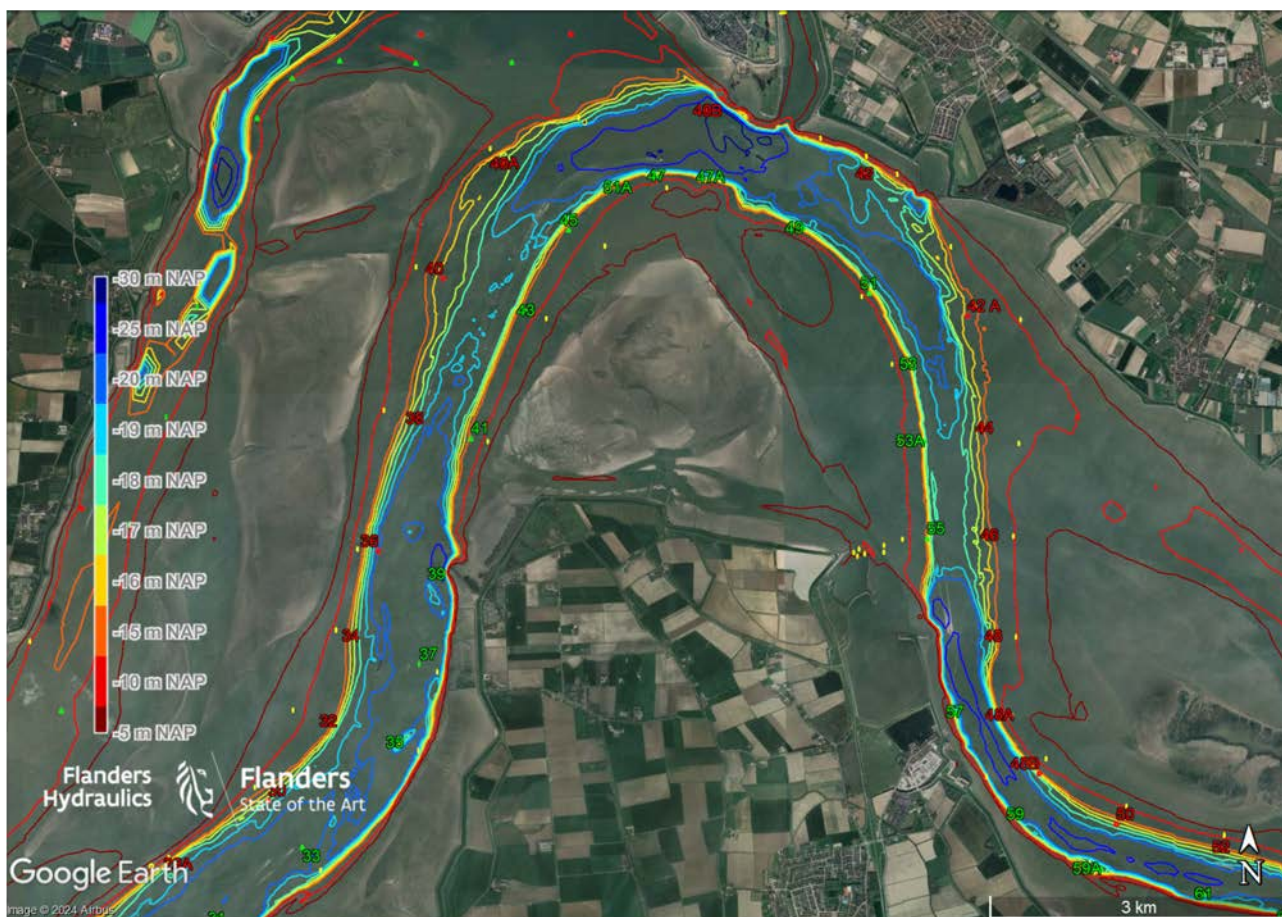
Stroom- veld	HF-radar	Multi- plicator	Tijd HW [min]	GF [-]	GTV [m]	Positie neer langs referentieas [s km]	Positie neer dwars van referentieas [m]	Groene Boeienlijn VdwarsDiff [m/s]	Vaartracé Opvaart VdwarsDiff [m/s]	Vaartracé Afwart VdwarsDiff [m/s]
0	stroom gedefinieerd als nulvectoren									
1	1/09/2023 2:20	100%	-70	1.25	5.64	2.40	125	2.22	1.48	1.34
2	1/09/2023 2:20	120%						2.66	1.78	1.61
3	1/09/2023 2:20	150%						4.00	2.66	2.41
4	2/09/2023 3:20	100%	-65	1.30	5.89	2.80	-120	2.04	1.72	1.64
5	2/09/2023 3:20	120%						2.45	2.06	1.97
6	2/09/2023 3:20	150%						3.67	3.10	2.95
7	3/09/2023 4:00	100%	-70	1.23	5.58	2.25	60	1.75	1.79	2.29
8	3/09/2023 4:00	120%						2.10	2.15	2.75
9	3/09/2023 4:00	150%						3.15	3.22	4.12
10	3/09/2023 4:20	100%	-50	1.23	5.58	2.60	-175	1.64	1.75	1.37
11	3/09/2023 4:20	120%						1.97	2.10	1.64
12	3/09/2023 4:20	150%						2.95	3.15	2.47
13	3/09/2023 17:00	100%	-5	1.09	4.91	2.07	90	1.08	1.89	1.94
14	3/09/2023 17:00	120%						1.30	2.27	2.33
15	3/09/2023 17:00	150%						1.94	3.40	3.49

### 3.2.3 Bathymetrie en waterstand

Alle simulaties werden uitgevoerd ten opzichte van de bathymetrie in overeenstemming met de vakloding 2023 (resolutie 20 m x 20 m) die geprojecteerd werd op een basismesh met variërende celgrootte naar gelang de afstand tot de vergunde vaargeulcontour. Voor het basismesh geldt dat de celgrootte ter hoogte van de gesimuleerde vaartrajecten 20 m bedroeg. De bathymetrie werd gedefinieerd ten opzichte van NAP in overeenstemming met de verticale referentie toegepast in de NEVLA-berekeningen uit §2.4. Een visualisatie van de bathymetrie toegepast tijdens de simulaties wordt weergegeven in Figuur 21.

Uit Figuur 4 blijkt dat de astronomische waterstand bij hoog water voor de geselecteerde hoog waters ca. 2.93 m NAP bedraagt. Doordat de stroombeelden in deze analyse steeds optreden omstreeks ca. 60 minuten voor hoog water werden alle simulaties uitgevoerd bij een waterstand overeenkomstig dit tijdstip. Deze waterstand werd ingesteld als 2.5 m NAP; ofwel +4.84 m TAW; ofwel +5.34 m LAT.

Alle simulaties werden bijgevolg uitgevoerd bij dezelfde bathymetrie en zelfde waterstand.



Figuur 21 – Weergave van de bathymetrie toegepast tijdens de fasttime simulaties door middel van dieptelijnen

### 3.2.4 Vaarsnelheid en toerental

Op basis van AIS-gegevens werden voor beide ontwerpschepen de snelheid door het water en over de grond geanalyseerd voor zowel op- als afvaart. In §3.2.1 worden de resultaten van deze analyse meer in detail weergegeven. De input voor de simulaties werd gebaseerd op de gemiddelde snelheidspatronen door het water.

Doordat de effectiviteit van het roer in belangrijke mate bepaald werd door het ingestelde schroeftoerental werden de simulaties uitgevoerd bij een constant toerental dat gepaard gaat met de gemiddelde snelheid door het water in het Zuidergat ter hoogte van boei 53A. Het gevolg van deze keuze is dat het toerental dus niet aangepast wordt tijdens de simulaties waar dat in realiteit mogelijks wel het geval zou zijn. Indien het vaargedrag aanleiding geeft tot een belangrijke vermindering van de vaarsnelheid of wanneer de effectiviteit van het roer onvoldoende is om het gewenste traject te volgen dan zal de loods in realiteit wel het toerental verhogen. Echter bij een normale passage van het Zuidergat kan er aangenomen worden dat het toerental niet verhoogd wordt in functie van de dwarsstroom, waardoor deze keuze voor de huidige analyse gerechtvaardigd lijkt (te meer omdat dit de vergelijking tussen verschillende stroombeelden vereenvoudigt).

Deze gemiddelde vaarsnelheden ter hoogte van boei 53A werden bekomen op basis van de gemiddelde vaarsnelheden tussen  $s=3$  km en  $s=4$  km (zie Figuur 14) zoals bekomen op basis van de AIS-analyse. Deze gemiddelde snelheden worden weergegeven in Tabel 6.

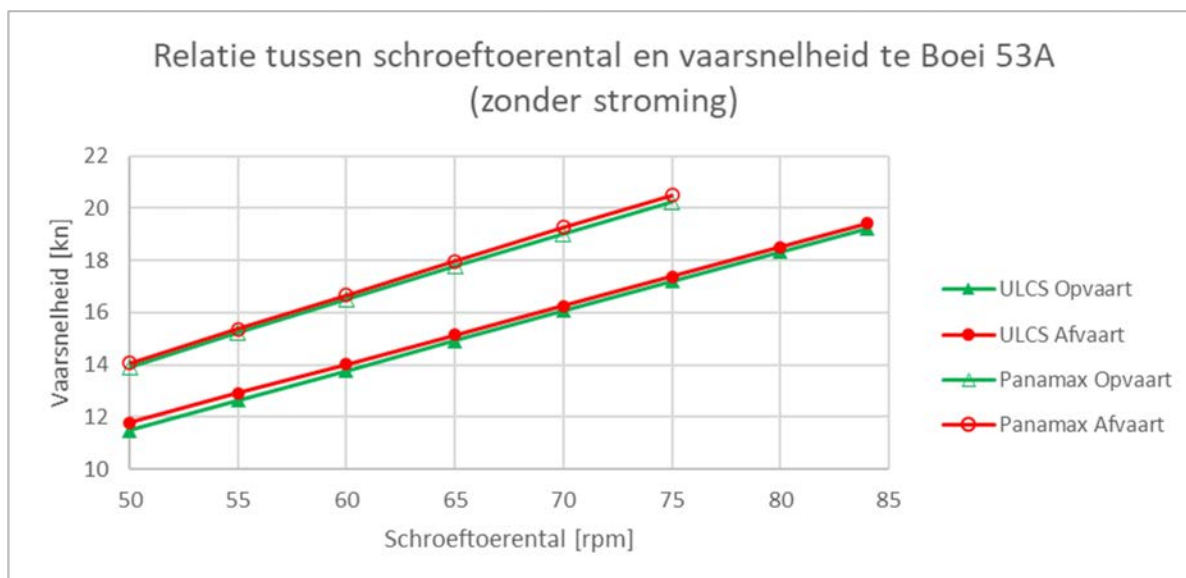
Om het schroeftoerental te bepalen dat overeenkomt met dezelfde vaarsnelheid ter hoogte van boei 53A werden er track-controlled fasttime simulaties uitgevoerd bij verschillende toerentallen en zonder stroming. Voor deze simulaties werd de gemiddelde vaarsnelheid berekend tussen de baanafstanden 3 km en 4 km en werd de aldus bekomen relatie tussen schroeftoerental en vaarsnelheid geïnterpoleerd naar de gewenste vaarsnelheid. De bekomen relaties tussen schroeftoerental en vaarsnelheid worden weergegeven in Figuur 22. Beperkte verschillen worden waargenomen voor op- en afvaart waarbij in opvaart beperkt kleinere vaarsnelheden (tot 0.3 kn) bekomen worden voor hetzelfde toerental. Dit heeft te maken met de snelheidsreductie van het schip in de bocht van Hansweert die ter hoogte van boei 53A een beperkt belangrijkere impact heeft voor de opvaart dan de bocht van Walsoorden dit heeft voor de afvaart.

In Tabel 6 worden voor de beide ontwerpschepen en beide vaarrichtingen de aangenomen vaarsnelheden door het water en de bijhorende toerentallen weergegeven.

Tabel 6 – Gemiddelde vaarsnelheden en toerentallen aangenomen voor de fasttime simulaties

Schip	Vaartraject	Gemiddelde vaarsnelheid [STW kn]	Schroef-toerental [rpm]
ULCS	Opvaart	12.6	54.6
ULCS	Afvaart	14.1	60.2
Panamax	Opvaart	14.2	51.1
Panamax	Afvaart	15.1	54.0





Figuur 22 – Relatie tussen schroeftoerental en vaarsnelheid ter hoogte van boei 53A voor studieschepen op basis van track-controlled fasttime simulaties zonder stroming.

### 3.3 Analyse en verwerking

Voor elk van de twee studieschepen en twee vaarrichtingen werden er 16 simulaties uitgevoerd bij de 16 stroomvelden zoals gepresenteerd in Tabel 5.

De simulaties werden geanalyseerd en verwerkt tot volgende rapporteringsformaten:

- KMZ-weergave voor geanimeerde replay van simulatie;
- overzichtsgrafieken met tijdsevolutie van de belangrijkste parameters;
- hittekaarten van de belangrijkste parameters voor een combinatie van simulaties.

#### 3.3.1 Dwarsafstand

In de track-controlled simulaties tracht de track-controller zo goed als mogelijk een referentiep pad te volgen. De afwijking van de scheepspositie ten opzichte van dit referentiep pad is dan ook een belangrijke parameter in de beoordeling van de bevaarbaarheid van de onderzochte conditie.

Op basis van de simulatieresultaten werd de dwarsafstand bepaald als de maximale uitwijking van de scheepscontour ten opzichte van het referentiep pad verminderd met een halve scheepsbreedte. Immers wanneer het schip zich exact op het referentiep pad bevindt en hier ook mee gealigneerd is dan wijkt de scheepscontour steeds een halve scheepsbreedte af van het referentiep pad.

Behalve wanneer anders vermeld wordt de dwarsafstand gerapporteerd relatief ten opzichte van de scheepsbreedte (%B).

### 3.3.2 KMZ-weergave en grafieken

De meeste intuïtieve manier om het verloop van de simulaties voor te stellen is een presentatie van de simulaties in Google Earth™ door middel van de KMZ-bestanden (zie Figuur 23) die digitaal toegevoegd werden aan dit rapport. In deze KMZ-bestanden wordt het vaartraject weergegeven samen met grafieken van tijdreeksen voor onderstaande parameters:

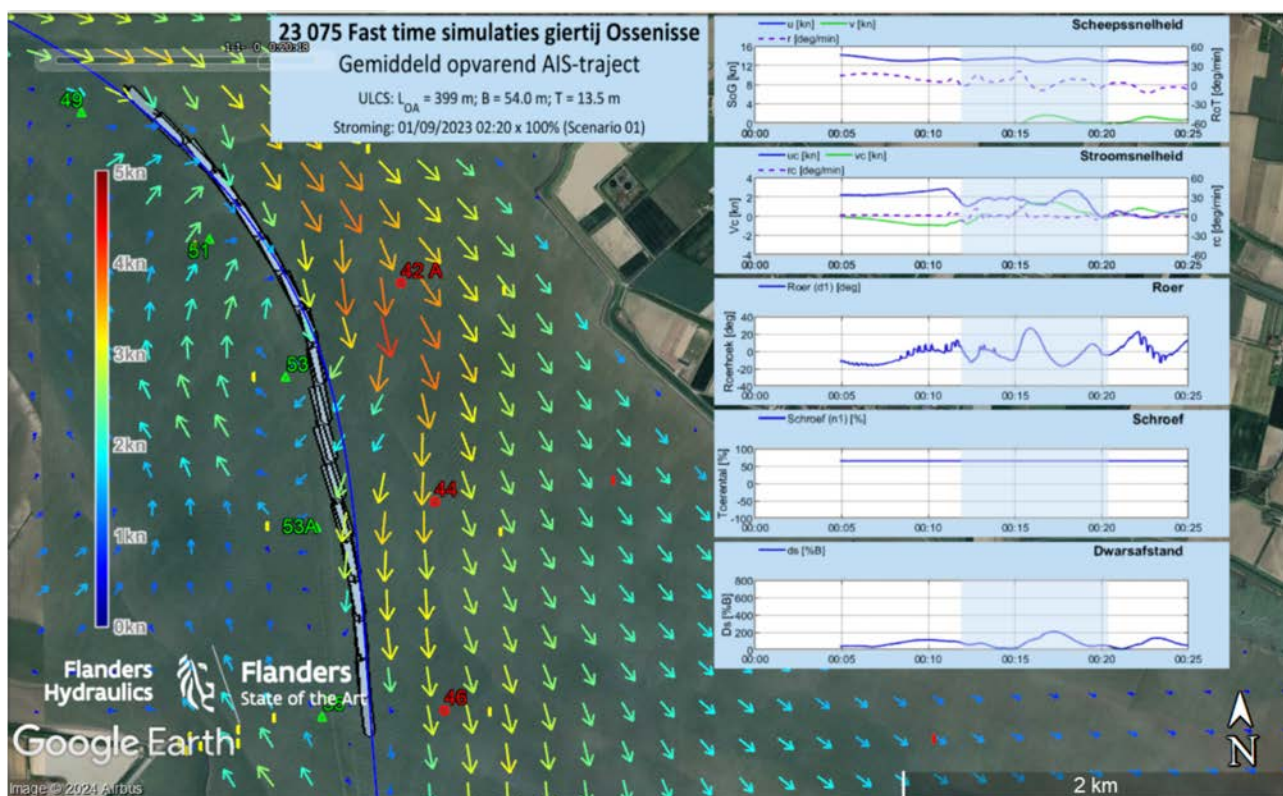
- Scheepssnelheid:
  - primaire as
    - langsscheepse snelheid schip (kn)
    - dwarsscheepse snelheid schip (kn)
  - secundaire as
    - giersnelheid schip (°/min, positief naar stuurboord)
- Stromingsnelheid:
  - primaire as
    - langsscheepse stroming (kn)
    - dwarsscheepse stroming (kn)
  - secundaire as
    - stromingsgradiënt over de scheepslengte (°/min, positief naar stuurboord)
- Roer:
  - roerhoek van het schip (°, positief naar bakboord)
- Schroef:
  - schroeftoerental van het schip (% van rpm Harbour Full Ahead)
- Dwarsafstand:
  - Dwarsafstand van het schip tot het referentie pad (%B, zie §3.3.1);

In de KMZ-weergave worden bovendien onderstaande lagen toegevoegd:

1. header met metadata van de simulatie;
2. geanimeerde weergave van de scheepspositie (interval 30 s);
3. geanimeerde weergave van de weergegeven tijd als een overlay in de tijdsgrafieken;
4. vectorveld weergegeven met resolutie 200 m x 200 m;
5. referentiepad dat toegepast werd door de track-controller;
6. locaties van de boeien (situatie begin 2023).

De simulaties werden opgestart op een recht vaartraject (voor opvaart te Overloop van Hansweert,  $s=-3$  km) en voor afvaart te Valkenisse,  $s=11$  km) De resultaten in de KMZ-files worden echter beperkt voor het traject van het schip tussen baanafstanden -2 km en 8 km overeenkomstig het Zuidergat inclusief de aangrenzende bochten te Hansweert en Walsoorden.

Behalve de KMZ-bestanden van de simulaties worden er voor visualisatiedoeleinden ook KMZ-bestanden gerapporteerd van de boeien in het vaargebied, de bathymetrie waarbij gesimuleerd werd en de midvaarwatercurve met baanafstanden.



Figuur 23 – KMZ-visualisatie van opvarende simulatie met ULCS bij passage naar in stroomveld 01

### 3.3.3 Grafieken

Behalve de grafieken met tijdreeksen zoals gepresenteerd in §3.3.2 worden er ook grafieken gegenereerd die de bevaarbaarheidsparameters weergeven in functie van de baanafstand. Hiervoor werd enkel het vaargebied Zuidergat weergegeven tussen de baanafstanden 0 km en 5 km.

De weergegeven bevaarbaarheidsparameters betreffen:

- De absolute waarde van de gehanteerde roerhoek (% van de maximale roerhoek);
- De dwarsafstand van het schip tot het referentie pad (%B, zie §3.3.1);

### 3.3.4 Hittekaarten belangrijkste parameters

Per studieschip en per vaarrichting werden er hittekaarten gegenereerd voor de belangrijkste parameters tijdens de simulatie. Deze hittekaarten worden op de horizontale as gerefereerd aan de baanafstand ten opzichte van de midvaarwatercurve (zie Figuur 14) en op de verticale as worden de resultaten van de verschillende simulaties bij verschillende stroomvelden (zie Tabel 5) weergegeven. De midvaarwatercurve werd onderverdeeld in segmenten van 50 m waarvoor de meest conservatieve waarde weergegeven wordt (doorgaans de maximale waarde). De hittekaarten werden gegenereerd voor het vaargebied tussen baanafstand 0 km (Hansweert) en 5 km (halverwege tussen boeien 55 en 57).

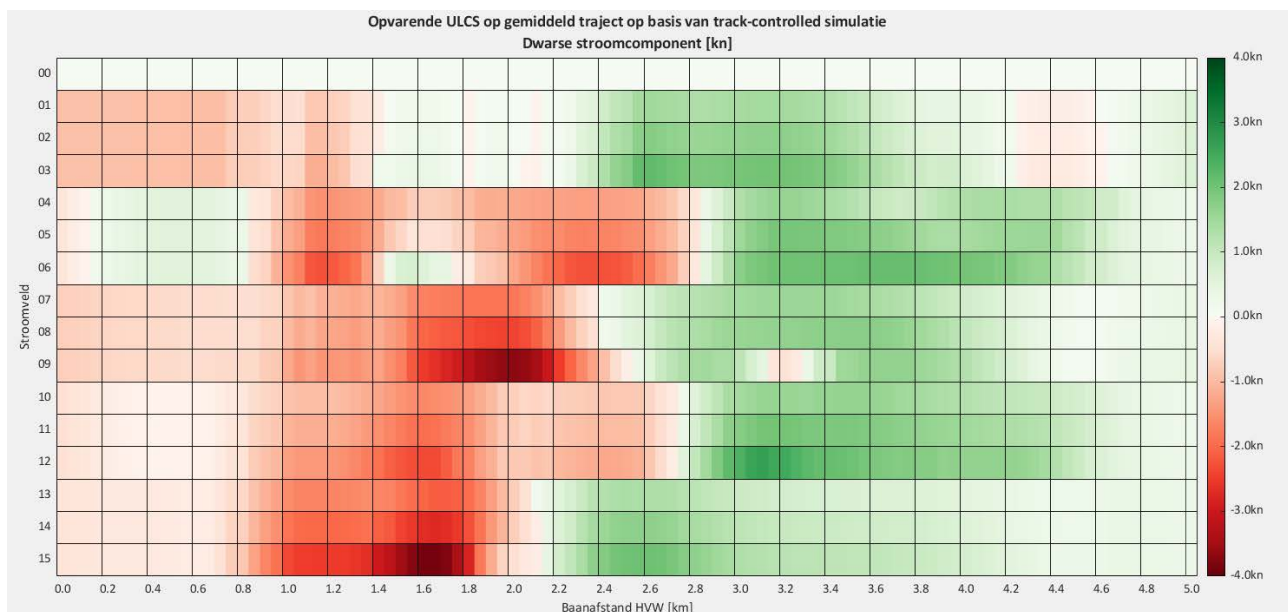
De verwerkte parameters betreffen:

- de langsscheepse vaarsnelheid van het schip (kn);
- de absolute waarde van de dwarsscheepse vaarsnelheid van het schip (kn);
- de absolute waarde van de giersnelheid van het schip (°/min);
- de langsscheepse vaarsnelheid door het water van het schip (kn, positief vooruit);
- de absolute waarde van de dwarsscheepse vaarsnelheid door het water van het schip (kn);
- de absolute waarde van de giersnelheid door het water van het schip (°/min);

- de langsscheepse component van de stromingsvector (kn);
- de absolute waarde van de dwarsscheepse component van de stromingsvector (kn);
- de dwarsscheepse component van de stromingsvector (kn, positief naar stuurboord);
- de absolute waarde van stromingsgradiënt over de scheepslengte(°/min);
- de stromingsgradiënt over de scheepslengte(°/min, positief naar stuurboord);
- het procentueel gebruik van de absolute roerhoek ten opzichte van de maximale roerhoek (%);
- de dwarsafstand van het schip ten opzichte van het referentiepad (%B, , zie §3.3.1);
- de dwarsafstand van het schip ten opzichte van het referentiepad (m);
- de kielspeling op basis van de diepte onder het scheepsmidden (%T)

Als voorbeeld wordt in Figuur 24 de hittekaart weergegeven voor de dwarsstroming die ervaren werd tijdens de simulaties met opvarende ULCS. Op de bovenste rij worden de resultaten voor het stroomveld 0 weergegeven waarbij er geen dwarsstroom aanwezig is. Voor de andere simulaties illustreert de heatmap duidelijk de toenemende dwarsstroom door het kunstmatig verhogen van de dwarsstroom in de stroomvelden en de onderlinge verschillen in de oriëntatie, magnitude en positie van de maximale dwarsstroomsnelheid in de vijf stroomvelden die rechtstreeks uit de HF-radar volgen (snelheidsvelden 01, 04, 07, 10 en 13).

Er dient opgemerkt te worden dat de heatmapresultaten wel gerefereerd worden ten opzichte van de baanafstand van de midvaarwatercurve, maar dat de getoonde resultaten niet overeenkomen met de condities op de midvaarwatercurve maar wel met de positie van het schip uit de respectievelijke simulaties die overeenkomen met de baanafstand langs de midvaarwatercurve. Het verband tussen scheepspositie en baanafstand langsheen de midvaarwatercurve werd bekomen door orthogonale projectie van de scheepsposities op de midvaarwatercurve. Dit verklaart ook waarom voor de stroomvelden die bekomen worden door de dwarsstroom kunstmatig te verhogen (bijvoorbeeld sne15 is 150% verhoging van sne13) de dwarsstroom in de heatmap (Figuur 24) veel meer afwijkt dan de toegepaste multiplicator (vb. 150%). Het schip zal immers in belangrijkere mate afgeweken zijn van het referentiepad en daardoor op een andere locatie terechtkomen met andere stroomcondities.



Figuur 24 – Hittekaart voor de dwarse stroomcomponent voor opvarende simulaties met ULCS

## 3.4 Resultaten fasttime simulaties

In de volgende hoofdstukken worden de resultaten weergegeven voor de simulaties uitgevoerd voor de beide studieschepen en de beide vaarrichtingen.

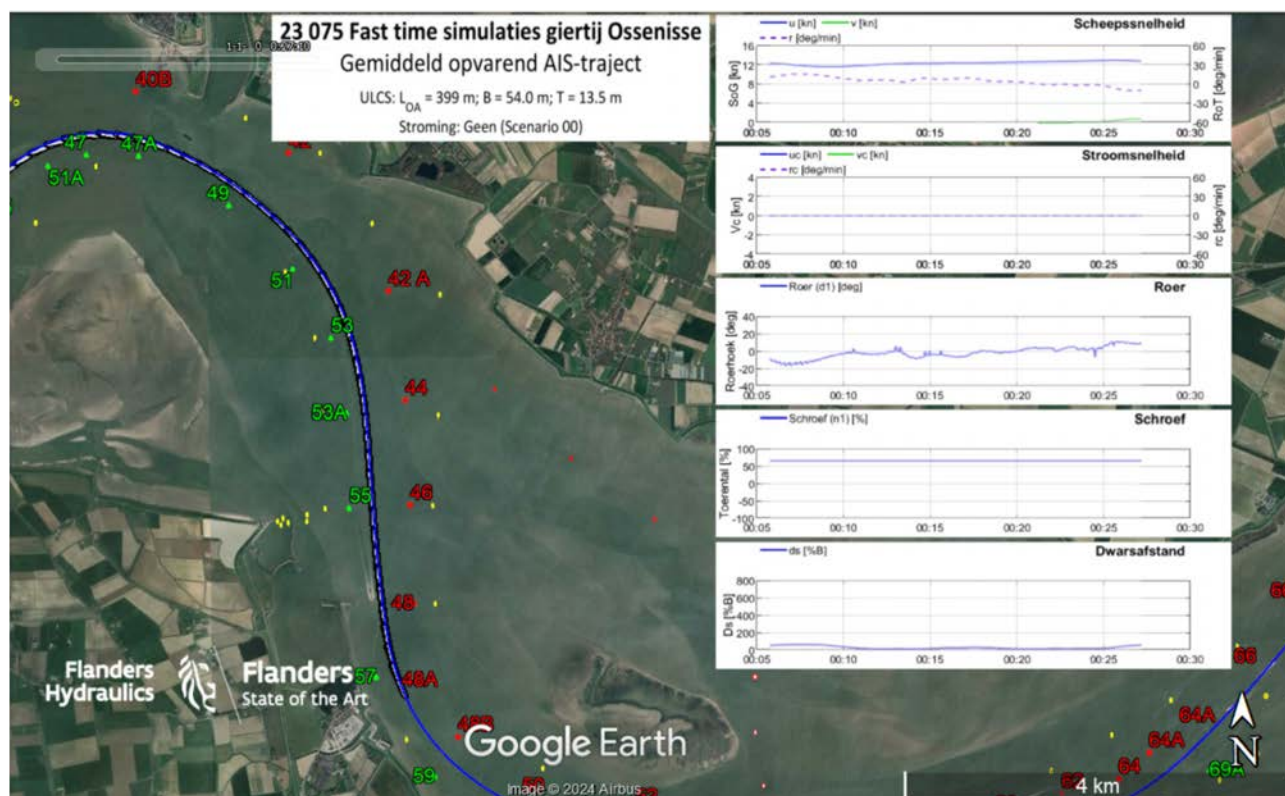
### 3.4.1 ULCS opvaart

Het eerste vaartraject dat geëvalueerd wordt betreft de opvaart van ULCS. Voor dit traject zullen gedetailleerde resultaten getoond worden om de resultaten van de simulaties te illustreren.

#### Simulatie zonder stroming

In eerste instantie worden de resultaten van de simulatie zonder stroom gepresenteerd. Deze illustreren de toepasbaarheid van de track-controller in deze condities en gelden als voorbeeld voor de toegepaste methodiek.

De KMZ-weergave van deze simulatie wordt geïllustreerd in Figuur 25. De resultaten van deze simulatie illustreren dat de track-controller in staat is om het referentiepad (gemiddeld AIS-traject) goed te volgen waarbij enkel in de bochten beperkt grotere dwarsafstanden ontstaan door de drifthoek van het schip. Het traject kon bovendien gerealiseerd worden met beperkt roergebruik waarbij enkel in de bochten een wat groter roergebruik (tot max 15°) waargenomen kan worden.



Figuur 25 – KMZ-visualisatie van opvarende simulatie met ULCS in stroomveld 00

## Resultaten bevaarbaarheidsparameters

De bevaarbaarheid van de simulatie wordt voornamelijk beoordeeld op basis van de dwarsafstand tot het referentietraject en in mindere mate op basis van de gehanteerde roerhoek. Deze parameters worden voor elk stroomveld weergegeven ten opzichte van de baanafstand langs de midvaarwatercurve voor het traject tussen baanafstanden 0 en 5 km.

Deze grafieken worden weergegeven in Figuren 26 tot 30 en illustreren duidelijk het grote roergebruik en de grote dwarsafstanden die overeenstemmen met het merendeel van de onderzochte stroomvelden. Zo blijkt het versterkte stroomveld 09 (150%) in Figuur 29 aanleiding te geven tot erg hoge roerhoeken die desondanks niet kunnen vermijden dat de dwarsafwijking van het schip toeneemt tot meer dan acht scheepsbreedtes.

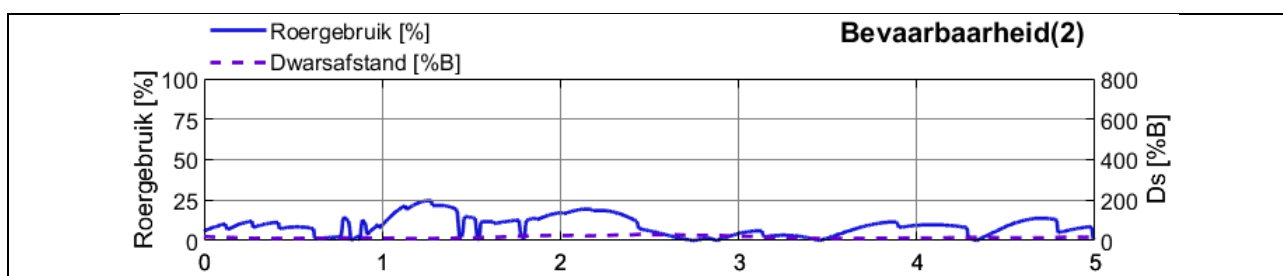
Om de onderliggende verbanden tussen de verschillende stroomvelden beter te illustreren worden de heatmaps van de bevaarbaarheidsparameters weergegeven in Figuur 32 en Figuur 33 voor respectievelijk de roerhoek en de dwarsafstand.

Allereerst illustreert deze heatmap opnieuw de gunstige condities indien er geen stroming aanwezig is. Voor de onderzochte stroomvelden onderling blijkt dan weer een grote variatie in de roerhoek die door de track-controller toegepast diende te worden.

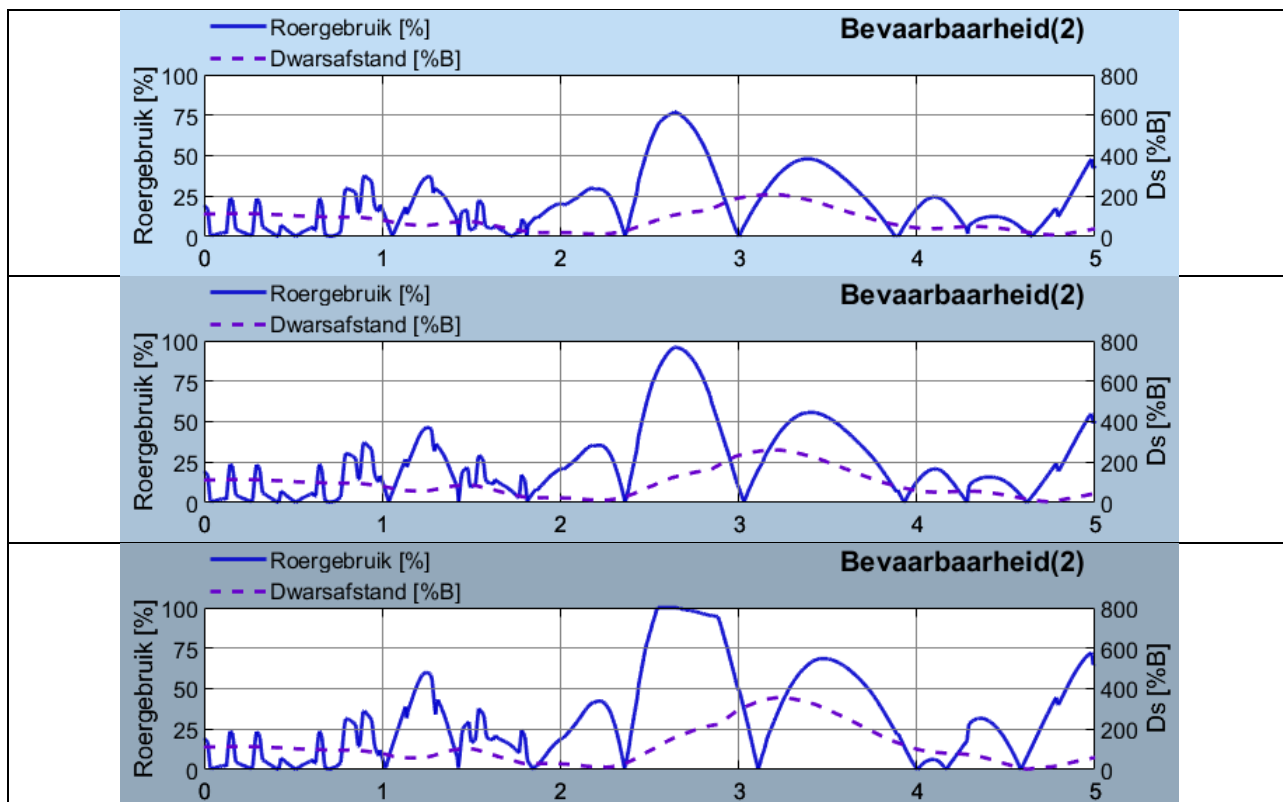
In slechts één stroomveld (01) blijkt het niet noodzakelijk om de maximale roerhoek toe te passen en traden er relatief beperkte dwarsafstanden op. In Figuur 23 werd reeds geïllustreerd dat dit stroomveld gepaard gaat met relatief beperkte dwarscomponenten voor het gemiddelde AIS-traject.

Voor andere stroomvelden blijkt dan weer een erg hoog roergebruik waarbij achtereenvolgens het roer naar stuurboord en bakboord gebruikt diende te worden (de zin van de roerhoek is niet afleesbaar uit de heatmaps maar blijkt uit de KMZ-weergaves) en waarvoor in sommige gevallen toch nog erg grote afwijkingen van het referentiep pad waargenomen worden. Zo blijken vooral voor de versterkte stroomvelden de dwarsafstanden tot het referentietraject erg grote waarden te bereiken (tot meer dan 10 scheepsbreedtes voor stroomveld 09). Opvallend hierbij is de grote toename van de dwarsafstanden wanneer het stroomveld 07 tot 150% versterkt wordt tot stroomveld 09.

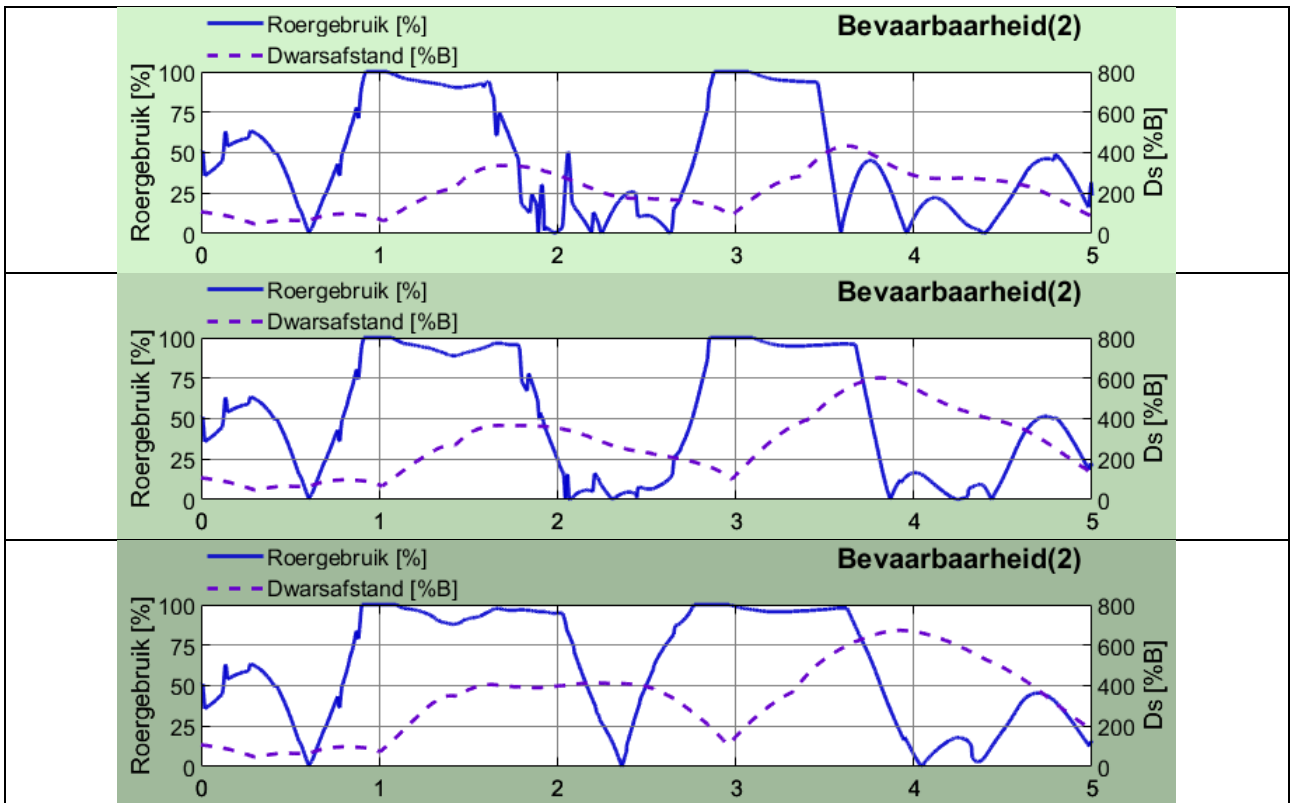
In volgende paragrafen worden voor enkele specifieke stroomvelden de simulatieresultaten meer in detail besproken.



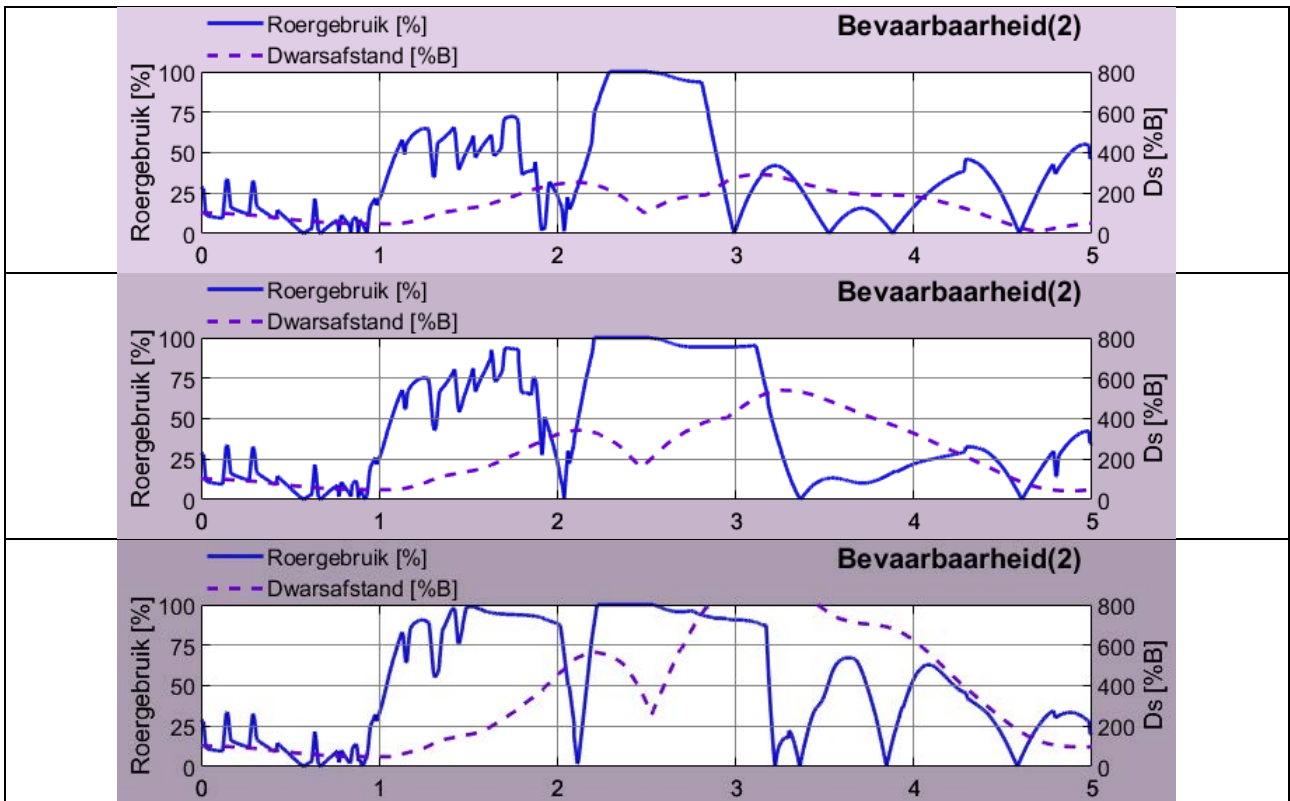
Figuur 26 – Grafieken bevaarbaarheidsparameters voor opvarende ULCS bij stroomveld 0



Figuur 27 – Grafieken bevaarbaarheidsparameters voor opvarende ULCS bij stroomvelden 01 (boven), 02 (midden) en 03 (onder)

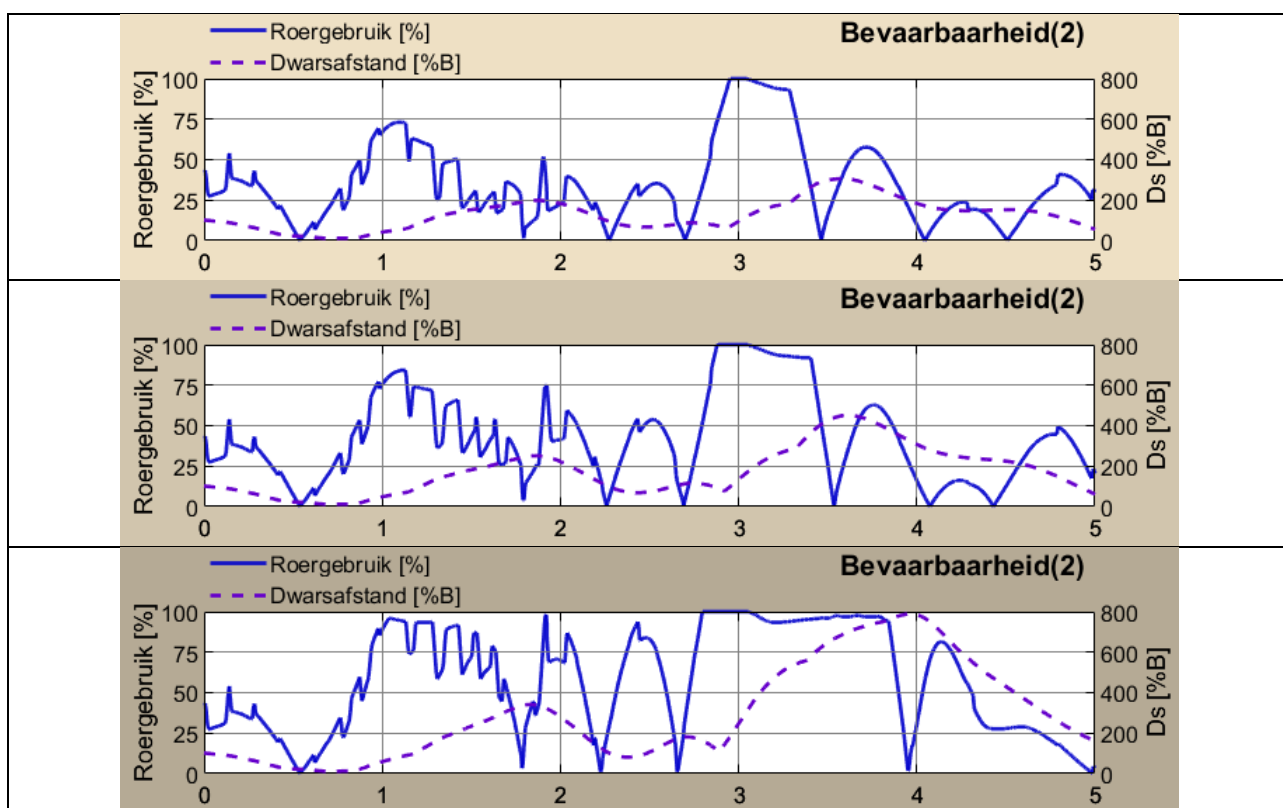


Figuur 28 – Grafieken bevaarbaarheidsparameters voor opvarende ULCS bij stroomvelden 04 (boven), 05 (midden) en 06 (onder)

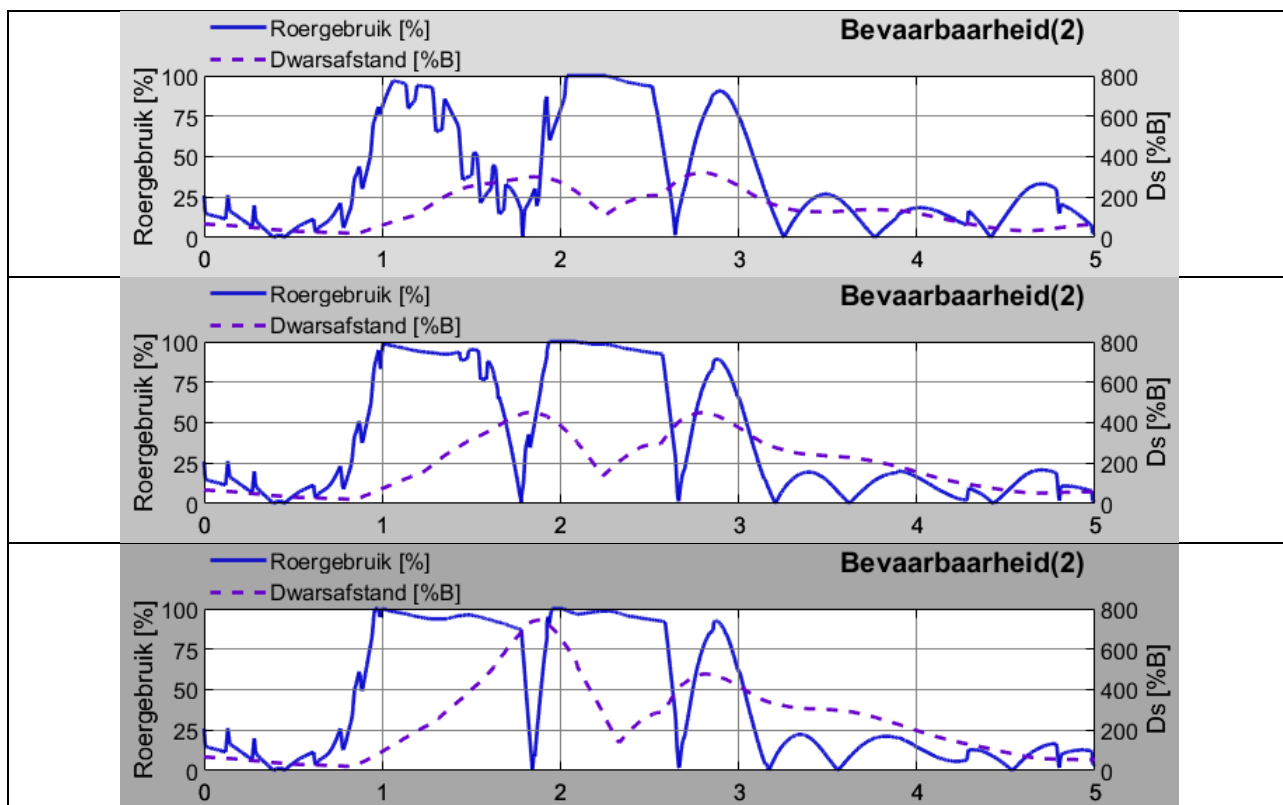


Figuur 29 – Grafieken bevaarbaarheidsparameters voor opvarende ULCS bij stroomvelden 07 (boven), 08 (midden) en 09 (onder)

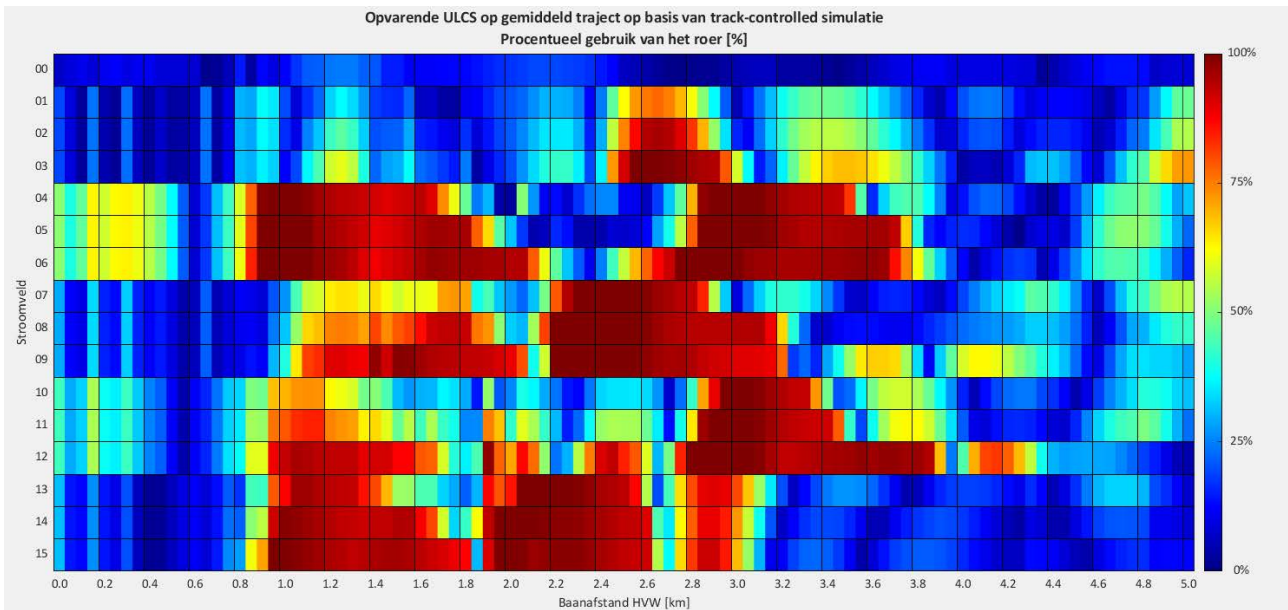




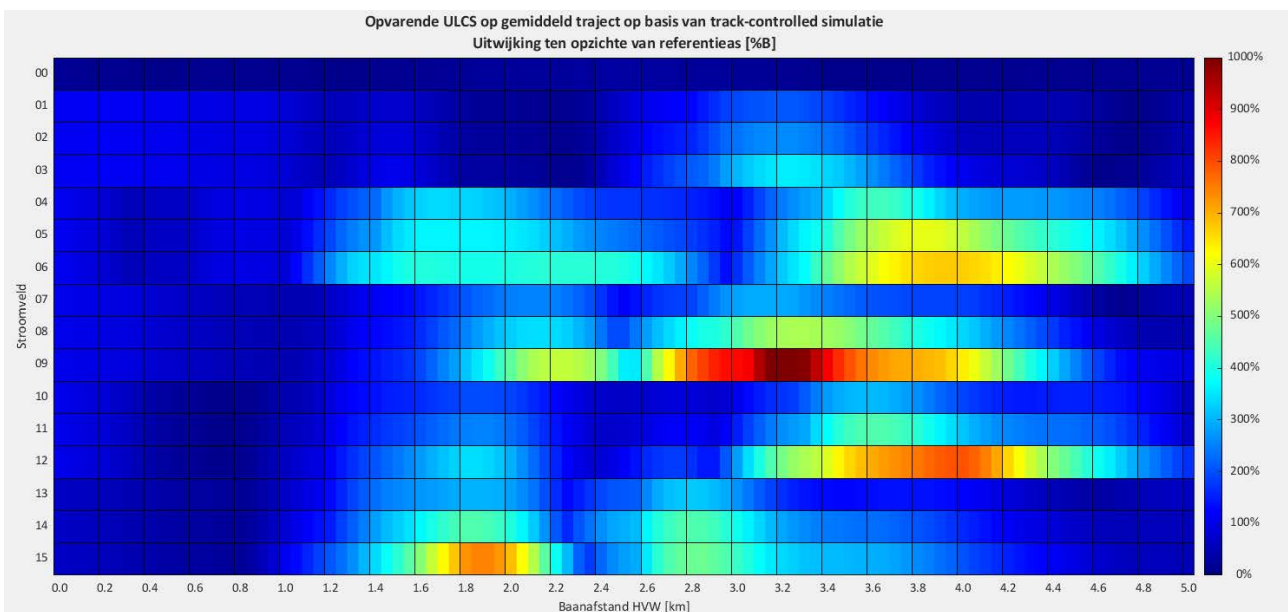
Figuur 30 – Grafieken bevaarbaarheidsparameters voor opvarende ULCS bij stroomvelden 10 (boven), 11 (midden) en 12 (onder)



Figuur 31 – Grafieken bevaarbaarheidsparameters voor opvarende ULCS bij stroomvelden 13 (boven), 14 (midden) en 15 (onder)



Figuur 32 – Heatmap roerhoek voor opvarende ULCS bij alle stroomvelden



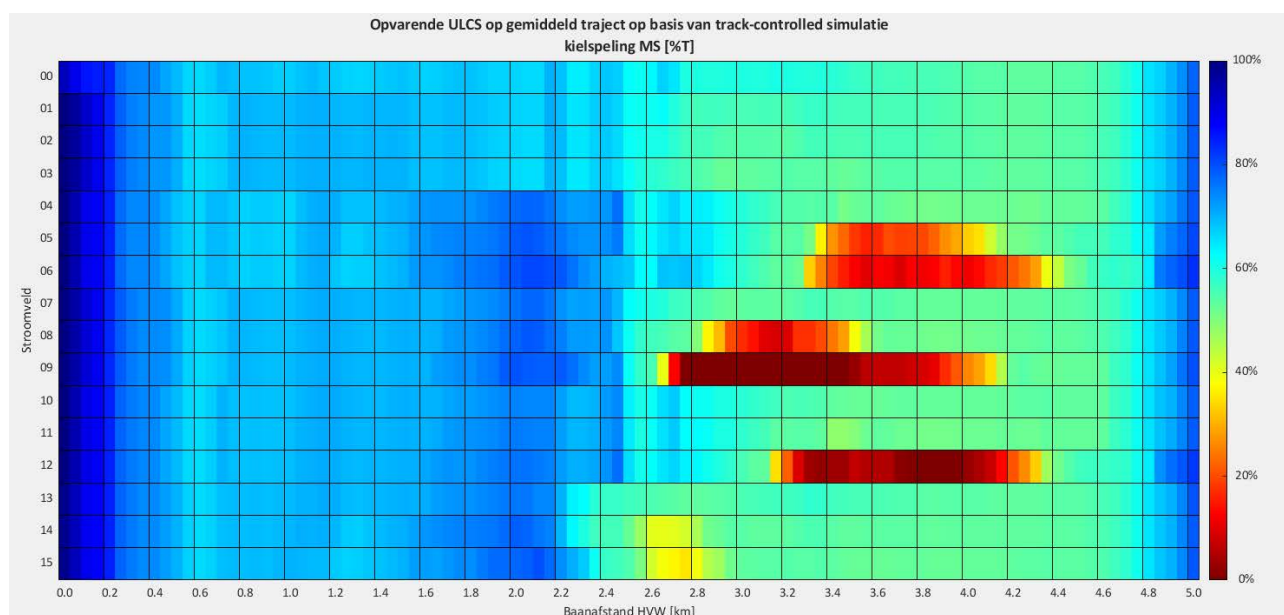
Figuur 33 – Heatmap dwarsafstand voor opvarende ULCS bij alle stroomvelden

### Resultaten kielspeling

Een alternatief aanvaardbaarheids criterium betreft de kielspeling die de schepen ervaren tijdens de simulaties. De manoeuvreermodellen in de simulator zijn geldig voor kielspelingen tot 10% van de scheepsdiepgang (en hoger). Indien in een simulatie de kielspeling kleiner wordt dan deze waarde, dan wordt er toch met het meeste ondiepe manoeuvreermodel gerekend. Bovendien worden er in de simulator geen strandingen gesimuleerd waardoor bij negatieve kielspelingen de simulatie verdergezet werd.

Deze keuze werd gemaakt om een continu resultaat te bekomen voor de dwarsafstand, maar in wezen zou een simulatie afgebroken moeten worden wanneer een schip strandt.

In Figuur 34 wordt de hittekaart weergegeven voor de kielspelingen ter hoogte van het scheepsmidden tijdens de simulaties voor opvarende ULCS. Uit deze resultaten blijkt dat voor de stroomvelden 06 en 09 de kielspeling kleiner werd dan nul, waardoor in die simulaties het schip in realiteit gestrand zou zijn.



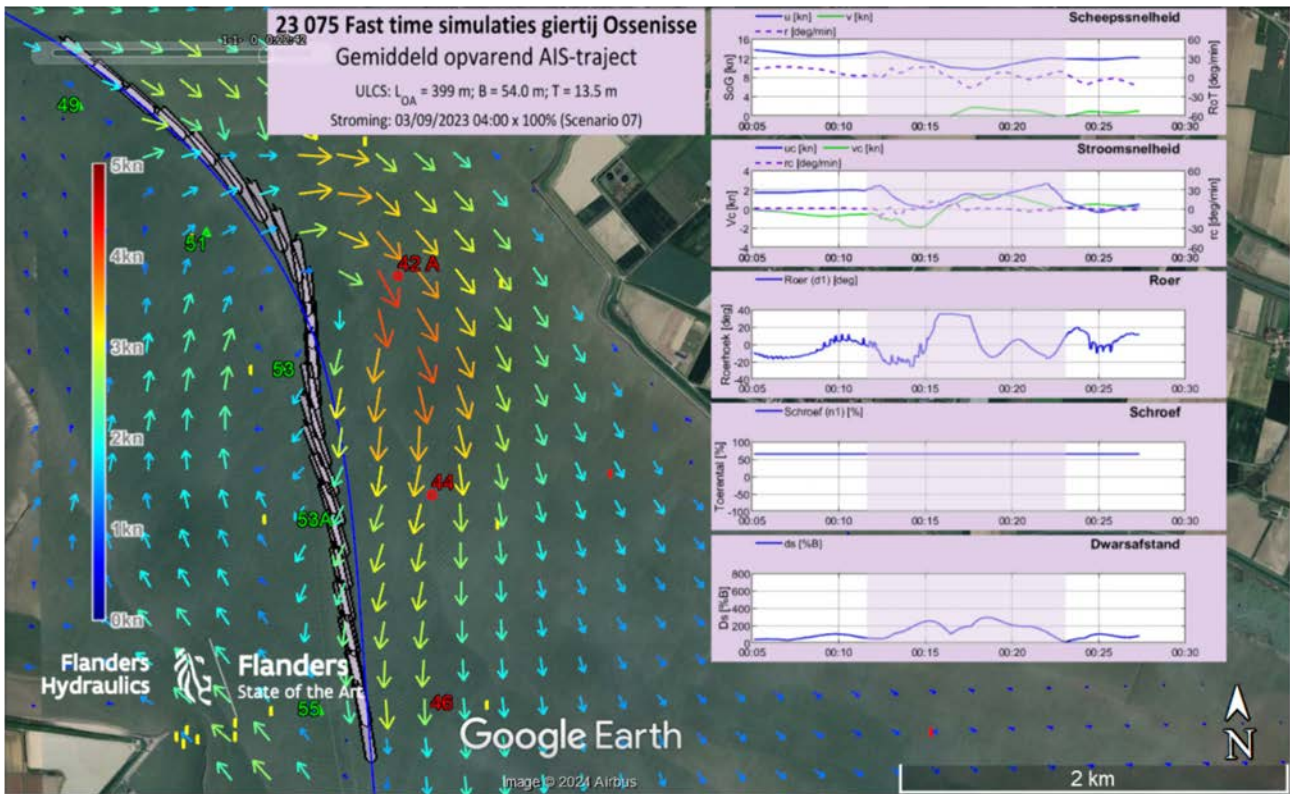
Figuur 34 – Heatmap kielspeling voor opvarende ULCS bij alle stroomvelden

### Resultaten simulaties HF Radar 03/09/2023 04h00

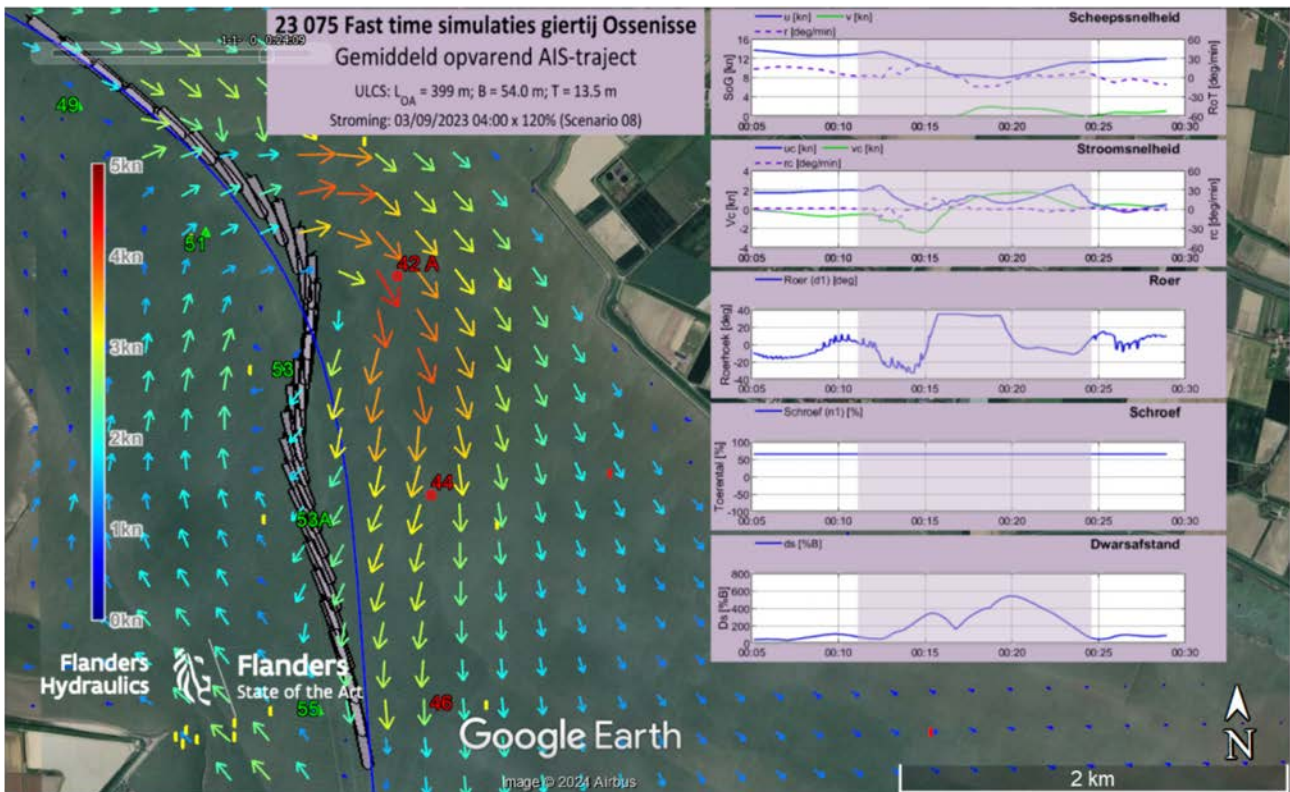
De simulaties bij stroomvelden 07, 08 en 09 stemmen overeen met de al dan niet versterkte resultaten uit de HF Radar op 03/09/2023 04h00 (zie Tabel 5). Deze versterkte stroomvelden blijken hierbij aanleiding te geven tot veel ongunstigere bevaarbaarheidsparameters dan het originele stroomveld. Zoals ook blijkt uit de KMZ-weergaves van deze drie simulaties weergegeven in respectievelijk Figuur 35, Figuur 36 en Figuur 37.

In simulatie 07 slaagt de track-controller er nog in om het schip binnen de boeienlijn te houden. De opeenvolgende dwarsstroom naar bakboord (t.h.v. boei 51) en naar stuurboord (t.h.v. boei 53A) vereisen overeenkomstige compensaties met het roer. Bovendien blijkt dat ter hoogte van boei 51 de stroomcomponenten ten oosten van het referentietraject belangrijk groter zijn dan ter hoogte van het referentietraject. Wanneer de simulaties in de versterkte stroomvelden 08 en 09 uitgevoerd worden dan wordt het schip ter hoogte van boei 51 in belangrijkere mate verzet naar de zones met grote dwarsstroom waardoor het schip een veel grotere hinder gaat ervaren dan in het stroomveld 07 wat een duidelijke invloed heeft op de bevaarbaarheidsparameters. De resultaten van simulaties 08 en 09 tonen aan dat deze stroomvelden niet aanvaardbaar zijn voor opvarende ULCS.

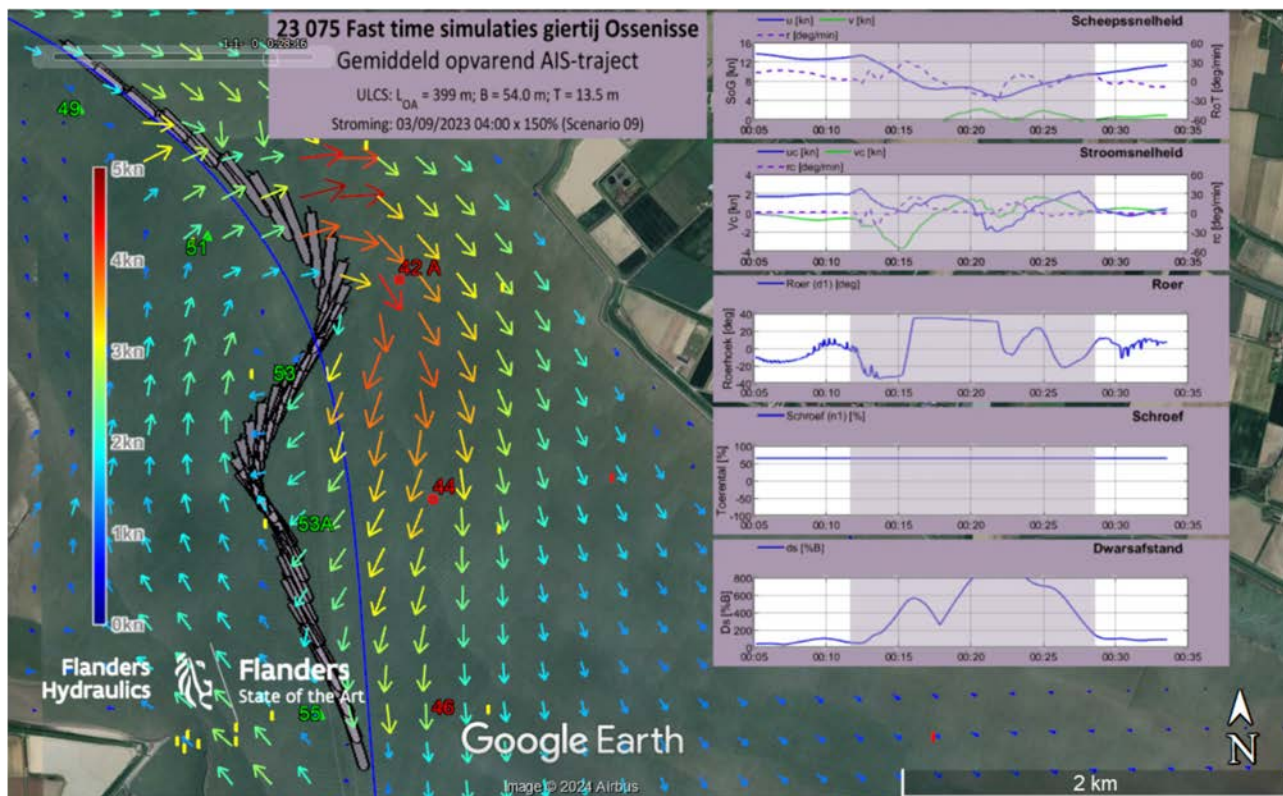
De resultaten van deze simulaties illustreren ook de nadelige invloed van een neer vergeleken met een conditie waarin een constante (of éénzijdige) dwarsstroom zou optreden. Dit wordt in de volgende paragraaf verder geïllustreerd voor het stroomveld 09.



Figuur 35 – KMZ-visualisatie van opvarende simulatie met ULCS in stroomveld 07 (detail Zuidergat)



Figuur 36 – KMZ-visualisatie van opvarende simulatie met ULCS in stroomveld 08 (detail Zuidergat)



Figuur 37 – KMZ-visualisatie van opvarende simulatie met ULCS in stroomveld 09 (detail Zuidergat)

### Impact van neer op bevaarbaarheid

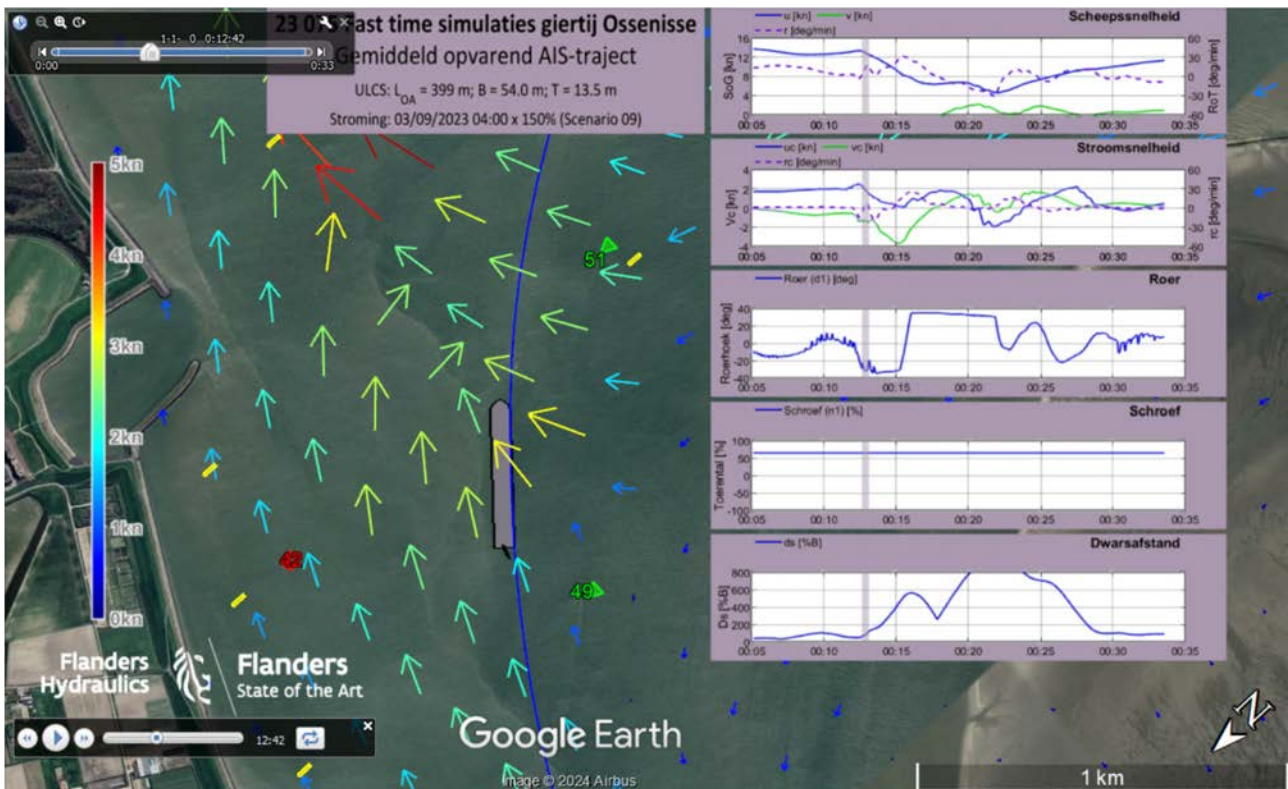
Zoals geïllustreerd werd in de vorige paragrafen blijkt de neer in stroomveld 09 een erg grote impact te hebben op het traject van een opvarende ULCS. Hieronder wordt meer in detail verklaard waarom de neer (en opeenvolgende dwarsstroom met verschillende zin) een belangrijke impact heeft op de bevaarbaarheid van het Zuidergat. Hierbij wordt erkend dat stroomveld 09 een erg extreem giertij is maar zich wel goed leent om de effecten van de neer op het schip te illustreren.

In Figuur 38 wordt geïllustreerd hoe bij het bereiken van de neer ter hoogte van boei 51 een roerhoek naar stuurboord gehanteerd wordt om de verzetbeweging van het schip door de dwarsstroom te compenseren door het schip op te sturen naar het referentietraject. Ondanks deze snelle roeractie doet de dwarsstroom het schip naar bakboord verzetten en dient het schip verder naar stuurboord opgestuurd te worden om opnieuw het gewenste vaartraject op te zoeken. Voor de opvaart wordt het roergebruik in het eerste deel van de neer ook bepaald door het bochtmanoeuvre dat op deze locatie uitgevoerd dient te worden. Het bochten en compenseren van de dwarsstroom vereisen immers beide roerhoeken naar stuurboord.

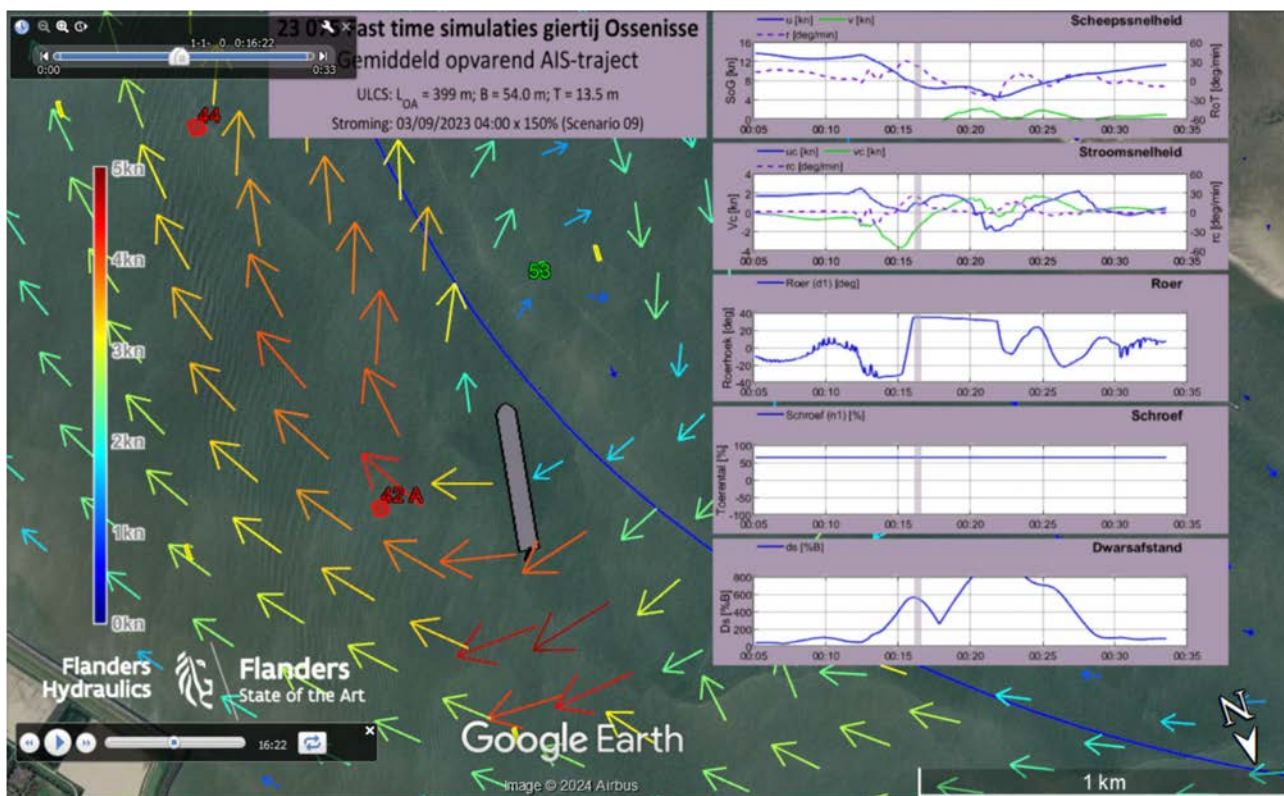
Figuur 39 illustreert dat wanneer het schip opnieuw een gunstige koers heeft ten opzichte van het referentiep pad de track-controller het roer omslaat naar bakboord om de gierbeweging te stutten (de track controller neemt dus de correcte beslissing). Op dat ogenblik echter bevindt het schip zich in het oog van de neer waarbij er een belangrijke asymmetrie optreedt van de dwarsstroom over de lengte van het schip. Hierbij bedraagt de stromingsgradiënt over de scheepslengte van het schip bijna  $30^\circ/\text{min}$  naar stuurboord waardoor de initieel opgebouwde gierbeweging naar stuurboord (ter compensatie van eerste dwarsstroom) slechts traag afgebouwd kan worden. Dit ondanks het erg hoge roergebruik dat gedurende meer dan vijf minuten meer dan 30 graden naar bakboord bedroeg.

Door de vertraagde afbouw van de gierbeweging naar stuurboord passeert het schip het oog van de neer bij een belangrijke koersafwijking ten opzichte van het referentietraject (zie Figuur 40) waarbij het schip een voorligging heeft die overeenstemt met de dwarsstroom in het tweede deel van de neer (beide naar stuurboord). De ongunstige Ausgangspositie (zie Figuur 40) van het schip bij het bereiken van de tweede dwarsstroom (startend te boei 53) zorgt voor een grote dwarsafstand van het schip naar stuurboord waarna het roer opnieuw omgeslaan wordt (zie Figuur 41). Zoals geïllustreerd in Figuur 34 zou deze positie aanleiding geven tot een stranding van het schip.

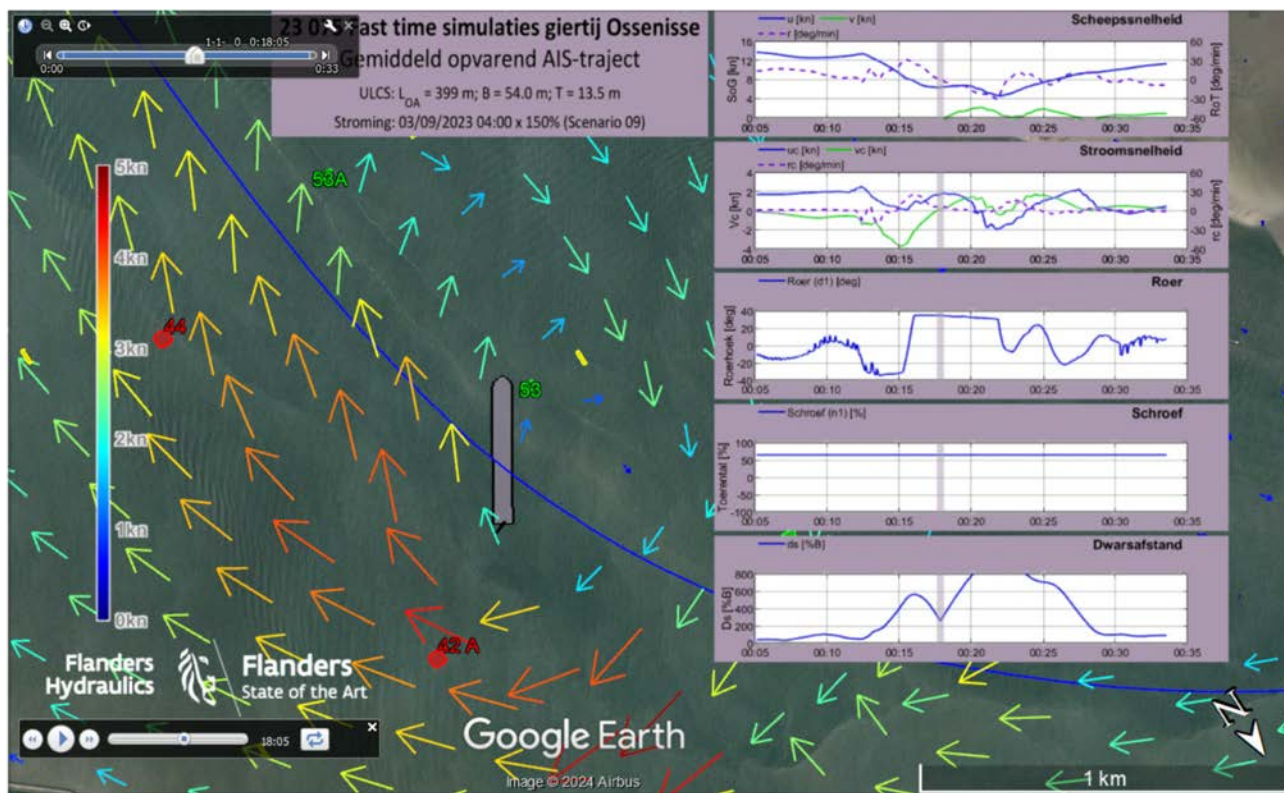
Het mechanisme dat hierboven beschreven werd, is erg gelijkaardig aan de waarneming die in februari 2024 gerapporteerd werd door het Nederlands Loodswezen bij de passage van een opvarende ULCS.



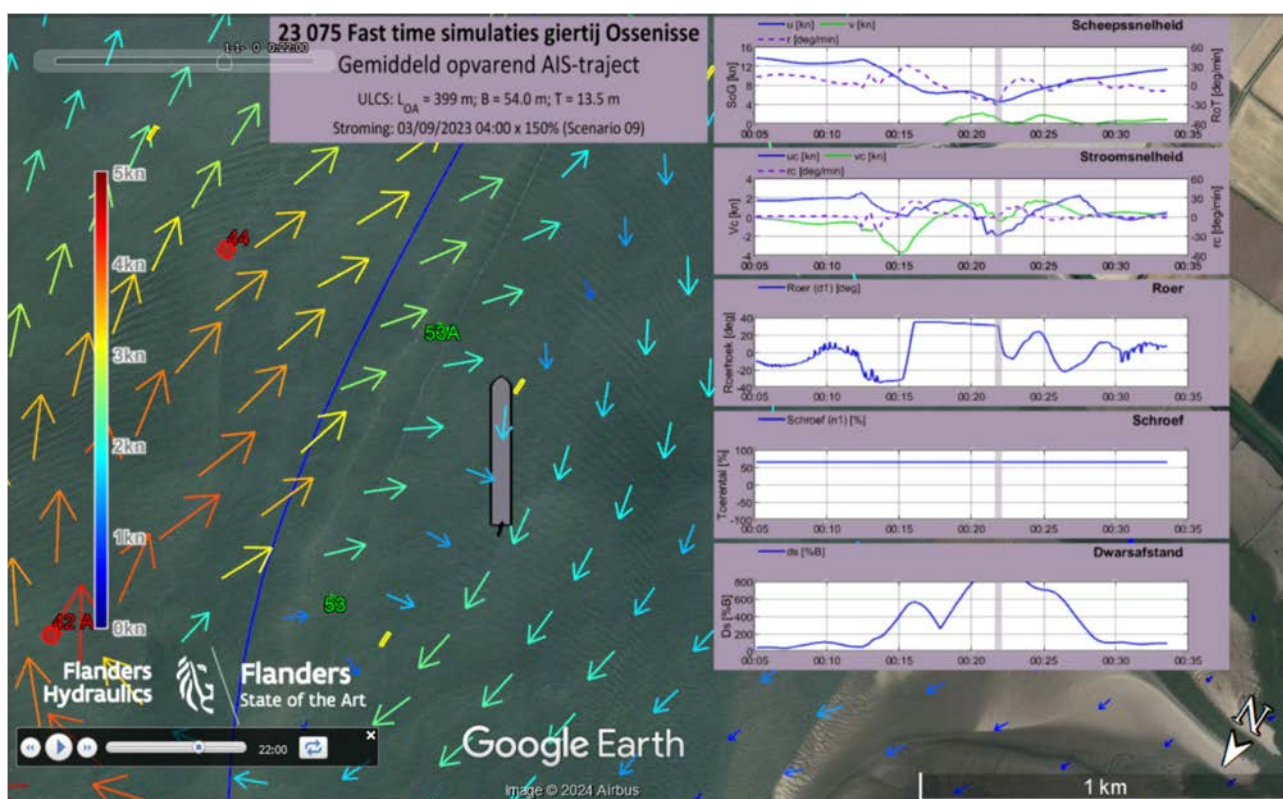
Figuur 38 – KMZ-weergave van roergebruik voor eerste dwarsstroom ter hoogte van boei 51 in simulatie 09



Figuur 39 – KMZ-weergave van roergebruik om de eerste gierbeweging te stutten in simulatie 09



Figuur 40 – KMZ-weergave van conditie waarin het schip het oog van de neer bereikt in simulatie 09



Figuur 41 – KMZ-weergave van maximale dwarsafstand tot referentietraject (sim 09) waarbij de roerhoek opnieuw verminderd werd

### Samenvattende parameters bevaarbaarheid

De track-controller die in deze studie toegepast werd, illustreert goed de impact van verschillende stroomvelden op de bevaarbaarheidsparameters en om relatieve verschillen tussen verschillende giertijen te illustreren, maar laat niet toe om een absolute aanvaardbaarheidsgrens te definiëren voor de stroomvelden. Men zou kunnen stellen dat de track-controller enerzijds sneller reageert op onvoorziene verstoringen (in deze studie het giertij) maar dat anderzijds de track-controller niet proactief zal handelen zoals een ervaren loods wel zal doen als hij/zij vertrouwd is met de effecten van het giertij. Bovendien wordt in de simulaties slechts één vaartraject onderzocht waarbij de impact van het giertij op het vaargedrag in belangrijke mate afhangt van de passage van het oog van de neer.

Als samenvatting van de hinder ten gevolge van de onderzochte stroomvelden voor een opvarende ULCS worden onderstaande parameters geëvalueerd voor het vaartraject tussen baanafstanden 0 km en 5 km:

- De gemiddelde absolute roerhoek (% van maximale roerhoek);
- De gemiddelde dwarsafstand (% van de scheepsbreedte);
- De maximale dwarsafstand (% van de scheepsbreedte).

De resultaten van deze samenvattende bevaarbaarheidsparameters worden weergegeven in Tabel 7. De tabel illustreert dat in afwezigheid van stroom de bevaarbaarheidsparameters erg beperkt zijn met een gemiddeld roergebruik gelijk aan 9% en een maximale dwarsafstand tot het referentietraject die slechts 32% scheepsbreedte bedraagt wat aangeeft dat het schip erg goed het vooropgestelde traject kan volgen.

Voor de stroomvelden is de maximale dwarsafstand de meest relevante parameter. Hiervoor blijken de meest gunstige effecten op te treden bij stroomveld 01 waarbij het schip slechts ca. 2 scheepsbreedtes afwijkt van het vooropgestelde traject. Voor andere stroomvelden nemen de maximale dwarsafstanden soms in belangrijke mate toe.



De maximale dwarsafstand kan vooropgesteld worden als een goede parameter om de aanvaardbaarheid van een stroomveld te beoordelen. Indien aanvaard zou worden dat het schip zich tot maximaal twee scheepsbreedtes buiten het vooropgestelde traject bevindt, dan zouden geen van de stroomvelden voldoen aan deze voorwaarde (stroomveld 01 schendt dit criterium in beperkte mate). Voor de bepaling van een geschikte aanvaardingsgrens is afstemming noodzakelijk met de beide loodswezens en mogelijks bijkomend simulatieonderzoek.

In H4 worden de maximale dwarsafstanden zoals waargenomen tijdens de simulaties gerelateerd aan maximale dwarsstroming en maximale stromingsgradiënt bekomen voor de respectievelijke stroomvelden.

Tabel 7 – Samenvattende bevaarbaarheidsparameters voor opvarende ULCS voor baanafstand 0 km tot 5 km

<b>ULCS Opvaart</b>			
<b>Stroom- veld</b>	<b>Gemiddelde roerhoek [%]</b>	<b>Gemiddelde dwarsafstand [%B]</b>	<b>Maximale dwarsafstand [%B]</b>
<b>00</b>	9%	17%	32%
<b>01</b>	22%	81%	208%
<b>02</b>	26%	94%	260%
<b>03</b>	33%	118%	356%
<b>04</b>	47%	210%	434%
<b>05</b>	53%	279%	601%
<b>06</b>	62%	338%	673%
<b>07</b>	37%	143%	292%
<b>08</b>	44%	229%	540%
<b>09</b>	53%	383%	1033%
<b>10</b>	36%	128%	306%
<b>11</b>	43%	173%	452%
<b>12</b>	58%	294%	790%
<b>13</b>	39%	140%	321%
<b>14</b>	41%	196%	450%
<b>15</b>	44%	248%	744%

### 3.4.2 ULCS afvaart

De resultaten voor afvarende ULCS worden beknopter gerapporteerd op basis van de samenvattende visualisaties die in §3.4.1 in detail gepresenteerd werden.

De hittekaarten voor de bevaarbaarheidsparameters worden weergegeven in Figuur 42 en Figuur 43.

In §3.4.1 werd reeds geïllustreerd dat de belangrijkste risico's bij de passage van het giertij optreden bij de passage van het tweede deel van de neer (waarbij het eerste deel van de neer zorgt voor een ongunstige uitgangspositie). Het hoeft dan ook niet te verwonderen dat voor de afvaart de grootste dwarsafstanden optreden ter hoogte van boei 51.

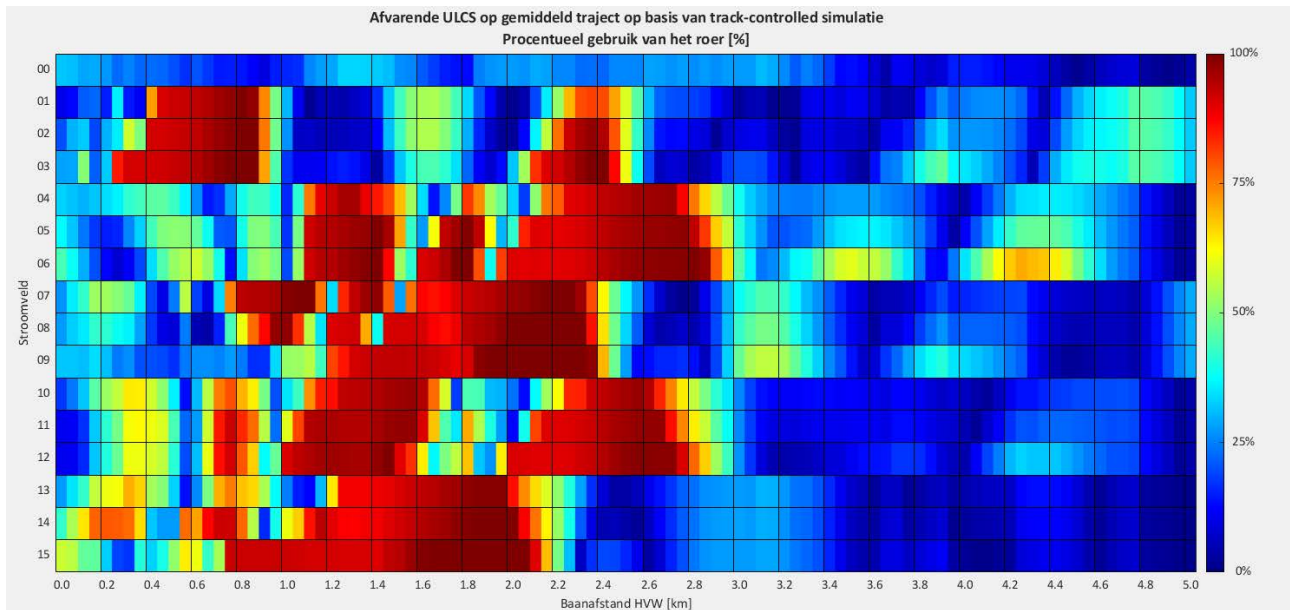
Over het algemeen blijken de dwarsafstanden in afvaart kleiner dan in opvaart. Uitzonderingen hierop echter betreffen de stroomvelden afgeleid uit HF-radar 03/09/2023 04h00 (07; 08 en 09) en HF-radar 03/09/2023 17h00 (13, 14 en 15).

Voor de stroomvelden 07, 08 en 09 overeenkomstig HF-radar 03/09/2023 04h00 blijkt dat een belangrijke dwarsstroom en een belangrijke stromingsgradiënt naar stuurboord optreden bij het begin van de bocht van Hansweert waarbij het schip naar bakboord dient te bochten (zie Figuur 44). Deze effecten vertragen het bochtmanoeuvre en verzetten het schip naar de buitenbocht waardoor er belangrijke afwijking van het referentietraject waargenomen wordt.

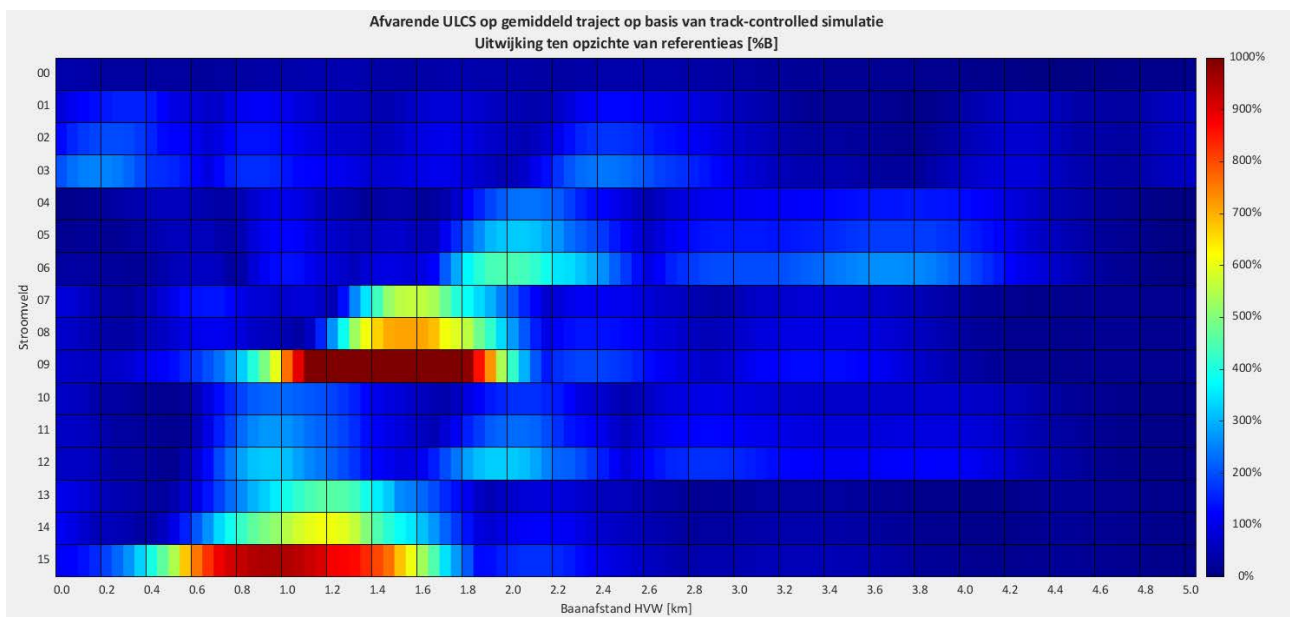
Een gelijkaardig effect treedt op bij de stroomvelden 13, 14 en 15 overeenkomstig HF-radar 03/09/2023 17h00 waarbij de dwarsstroom wat meer gematigd is en meer afwaarts een maximum bereikt (zie Figuur 45).

Voor de stroomvelden 04 en 10 is de dwarsstroming ter hoogte van boei 42A beperkter waardoor deze stroomvelden een meer beperkte impact hebben op het bochtmanoeuvre te Hansweert. Ter hoogte van boei 53 gaan deze stroomvelden gepaard met een neer, maar aangezien de afvarende trajecten, in tegenstelling tot de opvarende trajecten, niet door het oog van de neer passeren is voor deze stroomvelden de hinder voor de afvaart kleiner dan voor de opvaart.

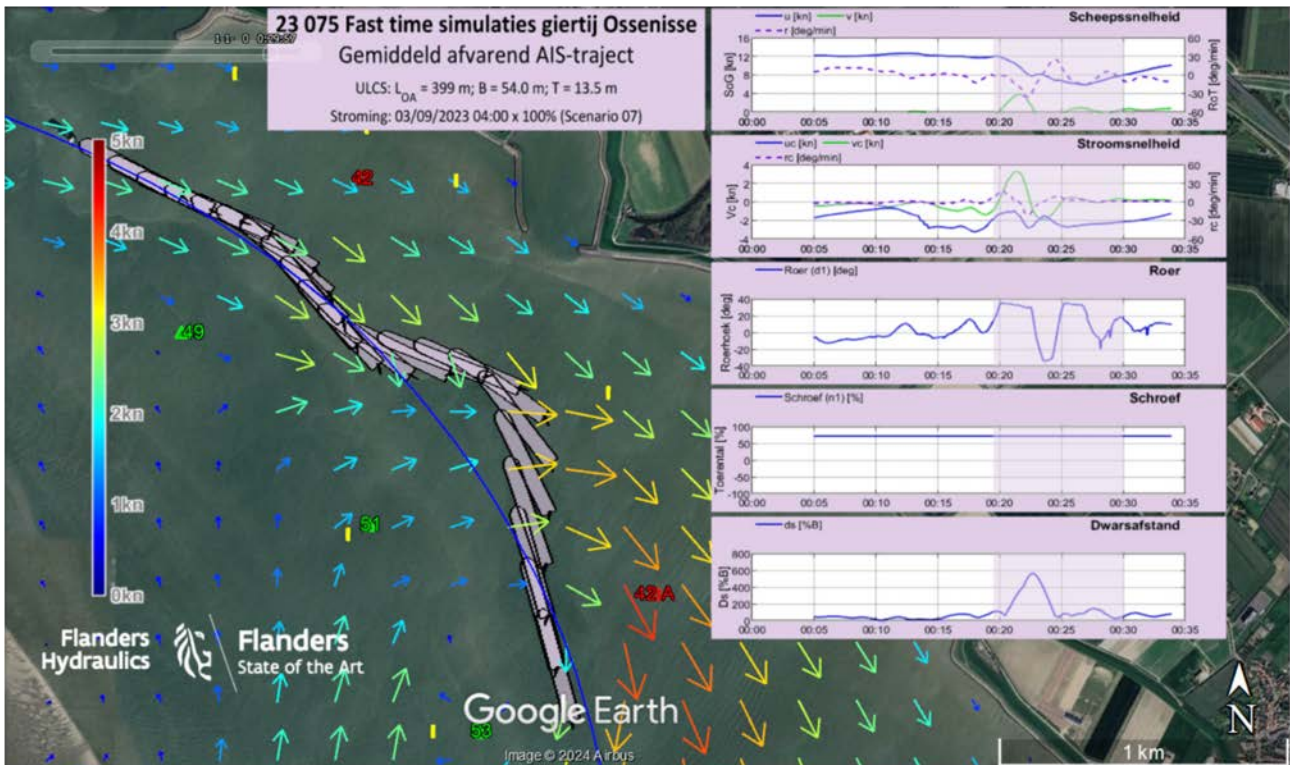
Voor het stroomveld 01 geldt dat de dwarscomponenten van het stroomveld ten opzichte van het afvarende referentietraject eerder beperkt zijn. Voor dit stroomveld geldt dat er ter hoogte van het afvarende referentietraject er enkel dwarsstroom naar bakboord ervaren wordt en de wisselende dwarsstroom die optreedt bij het doorvaren van de neer niet aanwezig is in de rode kant van de vaarweg. De hinder van dit stroomveld op afvarende ULCS is eerder beperkt.



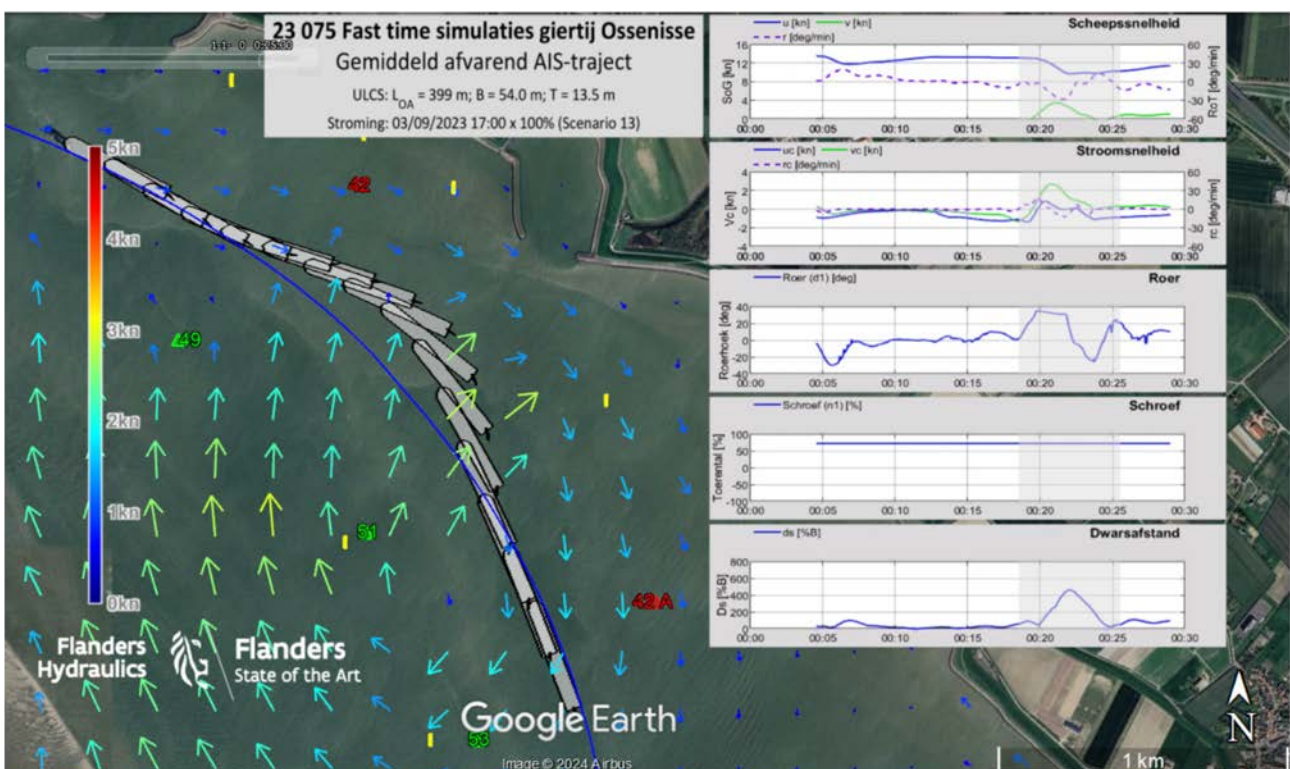
Figuur 42 – Heatmap roerhoek voor afvarende ULCS bij alle stroomvelden



Figuur 43 – Heatmap dwarsafstand voor afvarende ULCS bij alle stroomvelden



Figuur 44 – KMZ-weergave van verstoord vaartraject door grote dwarsstroom en stromingsgradiënt op afvarende ULCS (sim 07)



Figuur 45 – KMZ-weergave van verstoord vaartraject door grote dwarsstroom en stromingsgradiënt op afvarende ULCS (sim 13)

De samenvattende parameters voor de afvarende ULCS worden weergegeven in Tabel 8. Zoals reeds eerder opgemerkt blijken de belangrijkste dwarsafstanden voor afvarende ULCS het gevolg te zijn van grote dwarsstroming en stromingsgradiënten ter hoogte van boei 42A die het bochten te Hansweert bemoeilijken. Voor de andere stroomvelden blijken de afvarende trajecten gunstiger te liggen ten opzichte van de neer waardoor hiervoor minder grote dwarsafstanden bekomen worden.

Indien aangenomen zou worden dat een aanvaardbaar traject overeenstemt met een traject dat binnen twee scheepsbreedtes van het referentietraject uitgevoerd zou kunnen worden, dan blijkt het stroomveld 01 (HF-Radar 01/09/2023 02h20 hieraan te voldoen). Ook wanneer de dwarsstroming in dit stroomveld met 20% verhoogd wordt, dan voldoet het gesimuleerde traject nog aan deze voorwaarde. Ook voor de stroomvelden 04 en 10 worden relatief beperkte uitwijkingen waargenomen (<2.4B).

Tabel 8 – Samenvattende bevaarbaarheidsparameters voor afvarende ULCS voor baanafstand 0 km tot 5 km

ULCS Afvaart			
Stroom- veld	Gemiddelde roerhoek [%]	Gemiddelde dwarsafstand [%B]	Maximale dwarsafstand [%B]
00	17%	27%	47%
01	29%	66%	156%
02	32%	83%	199%
03	36%	106%	250%
04	41%	84%	237%
05	47%	109%	323%
06	53%	150%	449%
07	40%	108%	564%
08	38%	141%	715%
09	39%	292%	1263%
10	38%	81%	224%
11	42%	99%	272%
12	45%	130%	327%
13	33%	95%	461%
14	37%	132%	610%
15	38%	252%	954%

### 3.4.3 Panamax opvaart

Het manoeuvreermodel van het Panamax containerschip bleek minder koersstabil dan de ULCS die in vorige hoofdstukken besproken werd. Hierdoor dienden de instellingen van de track-controller aangepast te worden waarbij onder andere de vooruitkijkafstand verhoogd diende te worden. Deze aanpassing heeft tot gevolg dat de track-controller in de bochten de bocht zal gaan afsnijden en dat de dwarsafstanden in bochten groter zijn vergeleken met de simulaties uitgevoerd met ULCS.

Voor opvarende Panamax containerschepen worden de hittekaarten van de bevaarbaarheidsparameters weergegeven in Figuur 46 en Figuur 47.

De evoluties van de roerhoek vertonen een gelijkaardig verloop als voor de opvarende ULCS. Hierbij blijkt echter de trend tussen de dwarsstroomverhoging en de maximaal gehanteerde roerhoek (zie Figuur 46) niet steeds eenduidig. Zo blijkt voor de stroomvelden 04, 05 en 06 het roergebruik voor het eerste stroomprofiel (04: origineel uit HF-radar) groter dan in de stroomprofielen waarvoor de dwarscomponenten kunstmatig verhoogd werden (05: 120% en 06: 150%). Dit heeft te maken met de grotere afwijking van de vaartrajecten ten opzichte van de midvaarwatercurve voor de stroomvelden met verhoogde dwarsstroomverhoging. Hierdoor blijken de hittekaarten voor de dwarsafstanden een geschiktere presentatie op te leveren voor de impact van het stroomprofiel op het vaargedrag dan de hittekaarten voor roerhoek.

Voor de dwarsafstanden blijkt er een belangrijk verschil tussen de opvarende Panamax en ULCS. In eerste instantie blijkt de relatieve waarde van de dwarsafstand groter voor de Panamax schepen waardoor in deze hittekaarten de kleurenschaal aangepast werd aan een maximale waarde bij  $20 \cdot B$ . De reden voor deze aanpassing is tweërlei. Enerzijds hebben de Panamax schepen een kleinere breedte waardoor voor eenzelfde absolute waarde van de dwarsafstand een grotere relatieve waarde bekomen wordt dan voor de ULCS, maar anderzijds blijken de afwijkingen van het vaartraject voor de Panamax schepen ook in absolute waarde groter dan voor de ULCS, zoals geïllustreerd in Figuur 48 voor stroomveld 09. De reden hiervoor betreft enerzijds de kleinere snelheidsafbouw voor de Panamax schepen in het eerste deel van de neer en anderzijds de lagere koersstabiliteit van de Panamax schepen waardoor er een grotere overshoot optreedt in het tweede deel van de passage van de neer. Deze vaststelling toont aan dat het niet eenduidig is om de impact van de neer op verschillende scheepstypes te beoordelen en dat kleinere schepen niet noodzakelijk minder hinder zullen ervaren van het giertij.

Waar voor de ULCS het stroomveld 09 aanleiding gaf tot de grootste dwarsafstanden blijkt dit voor de Panamax-schepen te gelden voor het stroomveld 06. In Figuur 49 worden opnieuw de trajecten van de ULCS en het Panamax-schip met elkaar vergeleken voor dit stroomveld. Deze figuur illustreert duidelijk dat het Panamax-schip minder koersstabil is en daardoor grotere overshoot vertoont dan de ULCS. Hierdoor worden de dwarsafstanden in het tweede deel van de neer belangrijk groter voor het Panamax-schip dan voor de ULCS. De manoeuvre-eigenschappen en ladingsconditie van het schip blijken bijgevolg in belangrijke mate te bepalen hoeveel hinder het schip ervaart van het giertij.

Voor de onversterkte stroomvelden 07 en 04 worden de simulaties met het Panamax-schip gepresenteerd in Figuur 50 en Figuur 51. Hierbij blijkt het schip in stroomveld 04 ter hoogte van boei 49 reeds een dwarsstroming naar stuurboord te ervaren waardoor het eerste deel van de neer (ter hoogte van boei 51) reeds met een ongunstige voorligging bereikt wordt en daardoor het schip in een meer oostelijk gebied terecht komt waarbij er belangrijke stroomsnelheden optreden. Zoals in detail gepresenteerd in §3.4.1 hebben de verstoringen van het scheepstraject in het eerste deel van de neer een grote invloed op de verstoringen in het tweede deel van de neer door de ongunstige conditie waarin het schip het oog van de neer bereikt. Dit wordt ook in Figuur 51 voor stroomveld 04 duidelijk geïllustreerd. De ongunstige positie waarin het tweede deel van de neer, met belangrijke dwarsstromingen, bereikt wordt, geeft op deze locatie aanleiding tot grote dwarsafstanden tot het referentietraject. Voor stroomveld 04 geldt bovendien dat er voorafgaand aan de eerste neer (met dwarsstroom richting bakboord) er ter hoogte van boei 49 reeds een dwarsstroom optreedt richting stuurboord (zie Figuur 62) waardoor het eerste deel van de neer reeds bij een ongunstige voorligging bereikt wordt. Deze wisselwerking van de dwarsstroming gecombineerd met de mindere prestaties van de track controller voor dit koersinstabiele schip geven aanleiding tot de grote dwarsafstanden zoals bekomen voor stroomveld 04. Anderzijds blijkt voor stroomveld 07 het schip het referentietraject wel goed te kunnen volgen (zie Figuur 50) waarbij enkel in het eerste deel van de neer een kortstondig maximaal roergebruik nodig was om het schip te bochten bij de beperkte dwarsstroom.

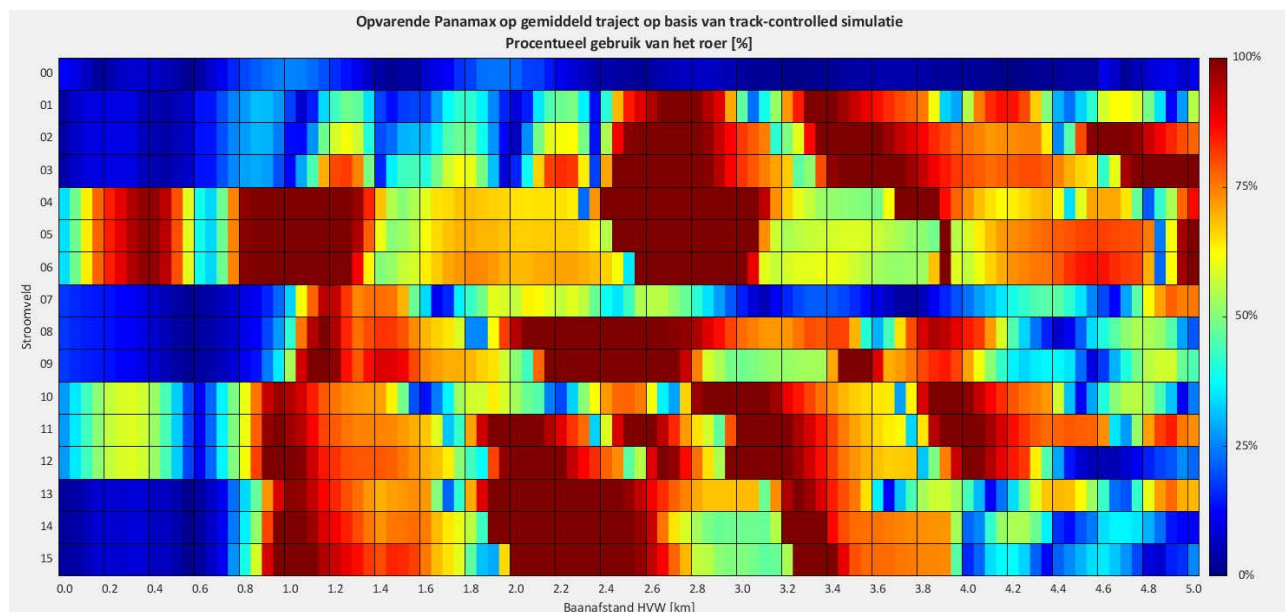
Echter wanneer in Figuur 52 de vaartrajecten bij de versterkte varianten van stroomveld 07 (stroomvelden 08 en 09) weergegeven worden, dan blijkt deze versterking van de dwarsstroming een belangrijke invloed te hebben op het uit te voeren traject. Net als eerder opgemerkt blijkt voor de versterkte stroomvelden dat wanneer het schip in het eerste deel van de neer afwijkt van het referentietraject, dat dan de overshoot in het tweede deel van de neer aanleiding geeft tot erg grote dwarsafstanden. Hierbij dient wel opgemerkt te worden dat de track-controller steeds zal proberen om het originele referentietraject te volgen daar waar een loods vermoedelijk de gewenste vaarpositie zal aanpassen wanneer het schip in het eerste deel van de neer afwijkt van het vooropgestelde traject. Echter indien in realiteit het schip een ontmoeting dient uit te voeren in het Zuidergat, dan kan aangenomen worden dat de loods een gelijkaardig manoeuvre zou uitvoeren als de track-controller.

Voor het stroomveld 01 (en de versterkte varianten) blijkt net als voor de eerder onderzochte condities de maximale dwarsafstand langsheen het traject eerder beperkt.

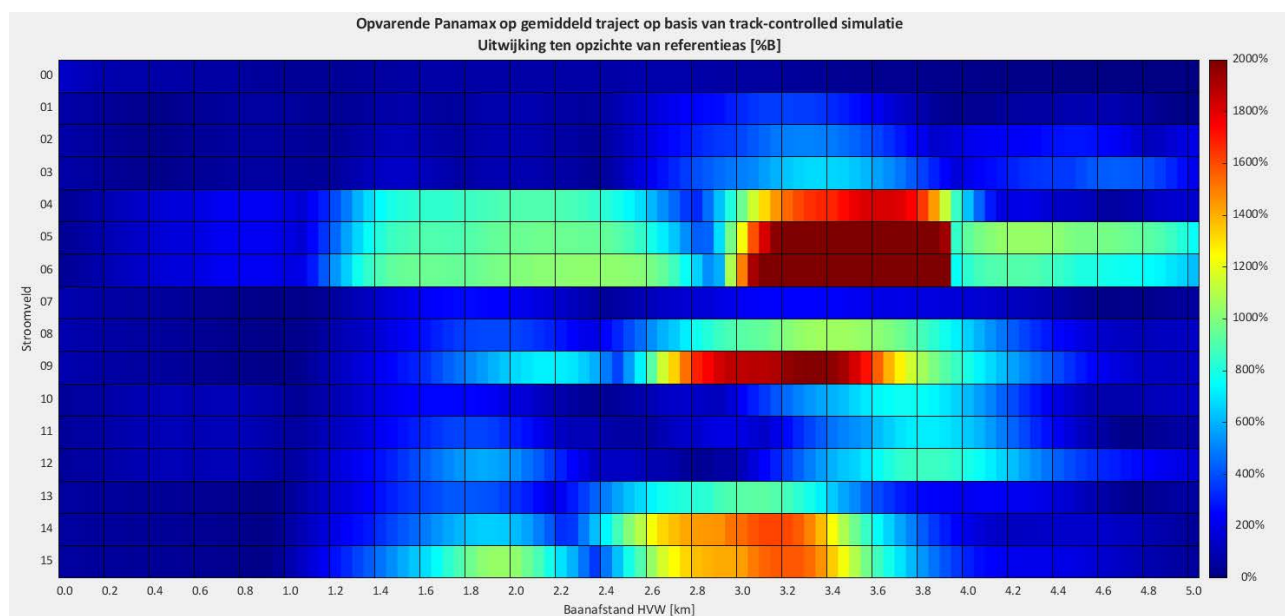
Voor de andere stroomvelden is er geen eenduidige relatie tussen de (absolute waarde van de) dwarsafstanden en de onderzochte scheepstypes. Voor een rechtstreekse vergelijking van de dwarsafstanden gerealiseerd door de beide scheepstypes worden in Figuur 53 en Figuur 54 de hittekaarten weergegeven voor de absolute waarden van de dwarsafstanden uitgedrukt in meters. Hieruit blijkt dat voor de stroomvelden afgeleid uit 04, 07 en 13 de grootste dwarsafstanden optreden voor het Panamax-schip en voor de stroomvelden afgeleid uit 10 blijkt dit te gelden voor de ULCS.

In Tabel 9 worden opnieuw de bevaarbaarheidsparameters weergegeven. Hieruit blijkt dat door de lagere koersstabiliteit van het schip en de verschillende instellingen van de track-controller (grotere vooruitrekenafstand waardoor grotere afwijking in de bochten) de maximale dwarsafstand bij afwezigheid van stroming belangrijk groter is dan voor de ULCS. Een maximale dwarsafstand gelijk aan 1.26 scheepsbreedtes ter hoogte van boei 53 wanneer er geen stroom is (00), is echter nog ruim aanvaardbaar.

Voor de stroomvelden illustreert ook Tabel 9 dat (zeker wanneer uitgedrukt als percentage van de scheepsbreedte) de dwarsafstanden voor het Panamax-schip merklijk hoger zijn dan voor de ULCS. Voor de onversterkte stroomvelden 01 en 07 zou aangenomen kunnen worden dat deze aanleiding kunnen geven tot een aanvaardbaar vaartraject. Voor simulatie 07 geldt echter dat toenames van de dwarsstroming (zoals aanwezig in stroomvelden 08 en 09) aanleiding geven tot een erg belangrijke toename van de dwarsafstanden (zie eerder) waardoor enkel stroomveld 01 als aanvaardbaar beschouwd kan worden op basis van de track-controlled simulaties.

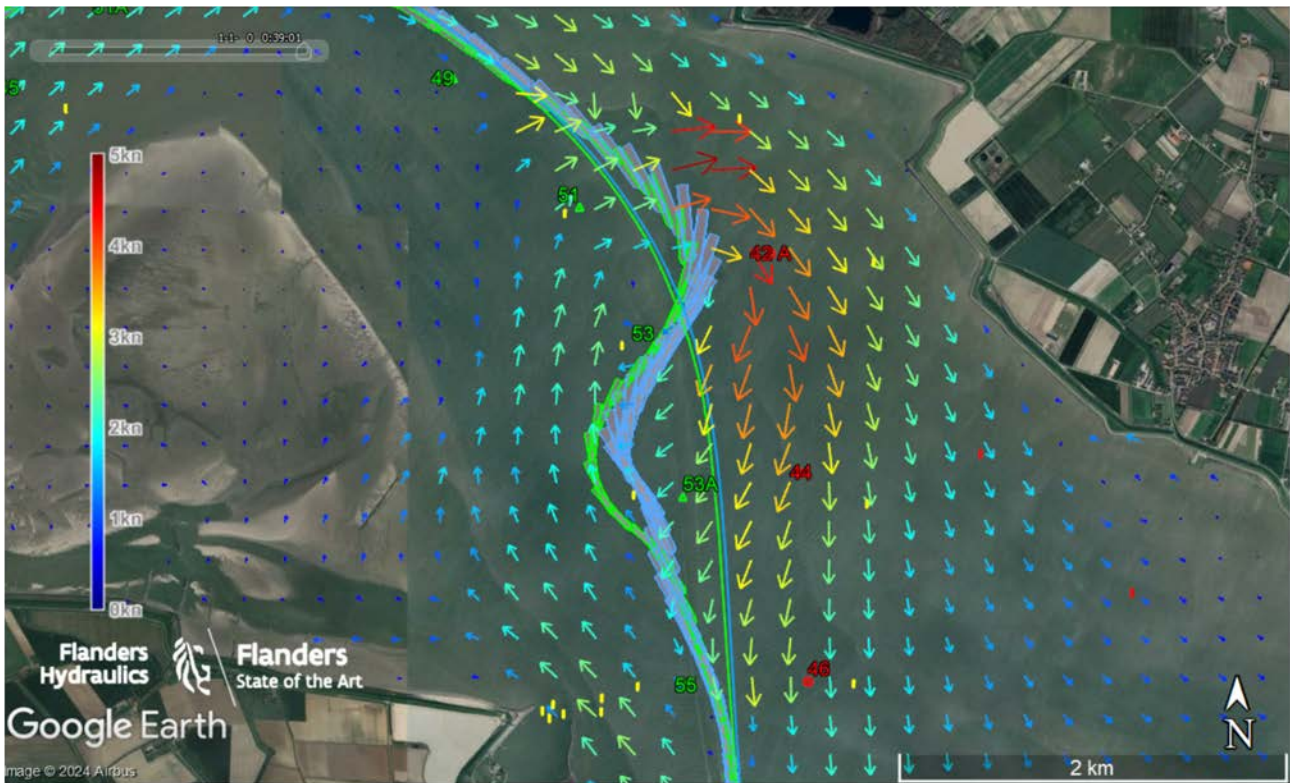


Figuur 46 – Heatmap roerhoek voor opvarende Panamax bij alle stroomvelden



Figuur 47 – Heatmap dwarsafstand voor opvarende Panamax bij alle stroomvelden

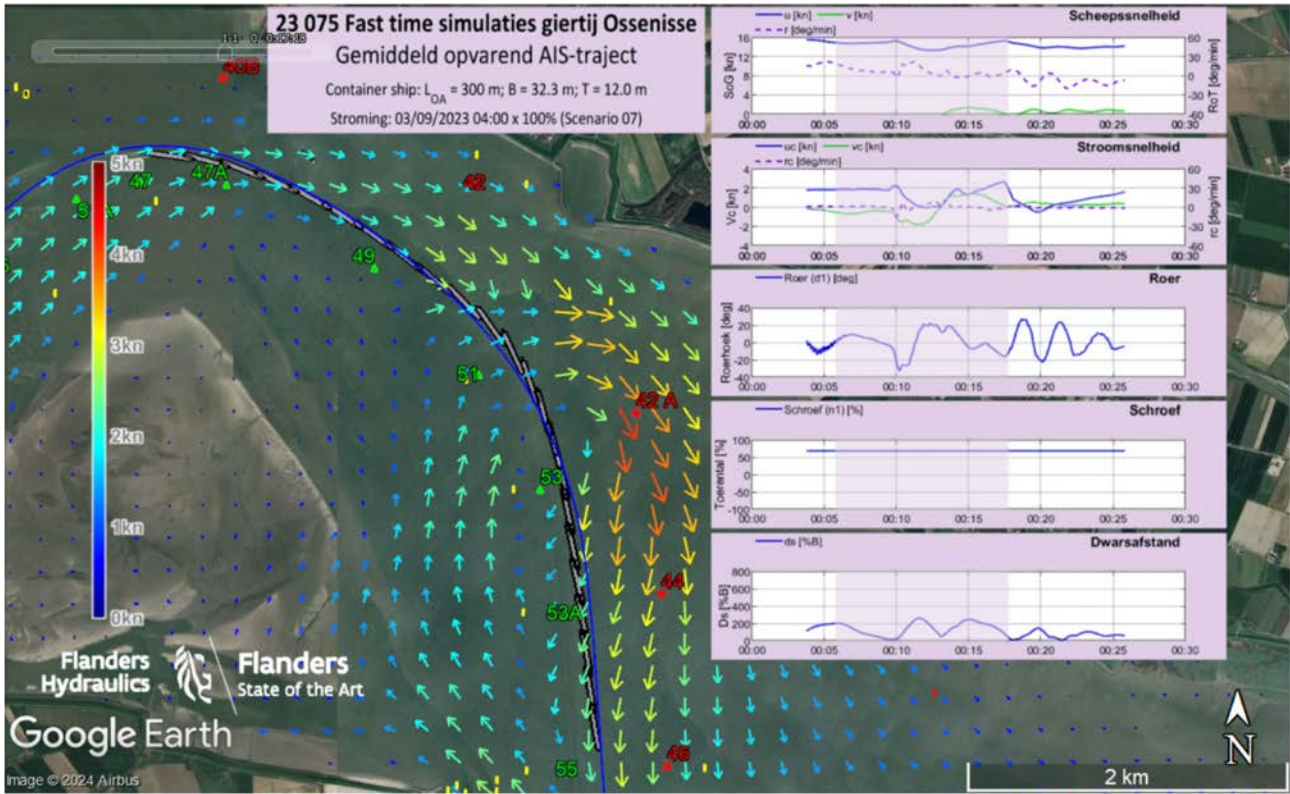




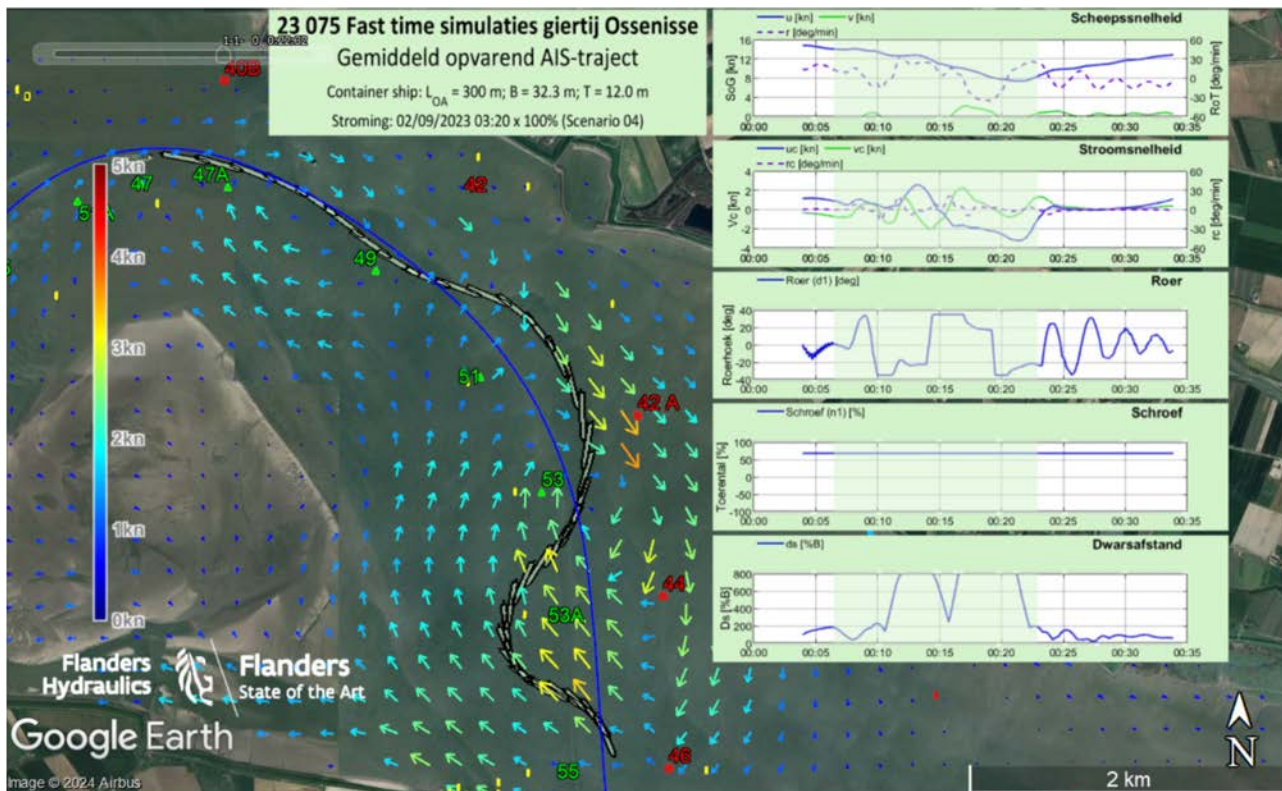
Figuur 48 – Simulatietraject opvarende ULCS (blauwe contour) en Panamax (groene contour) bij stroming 09



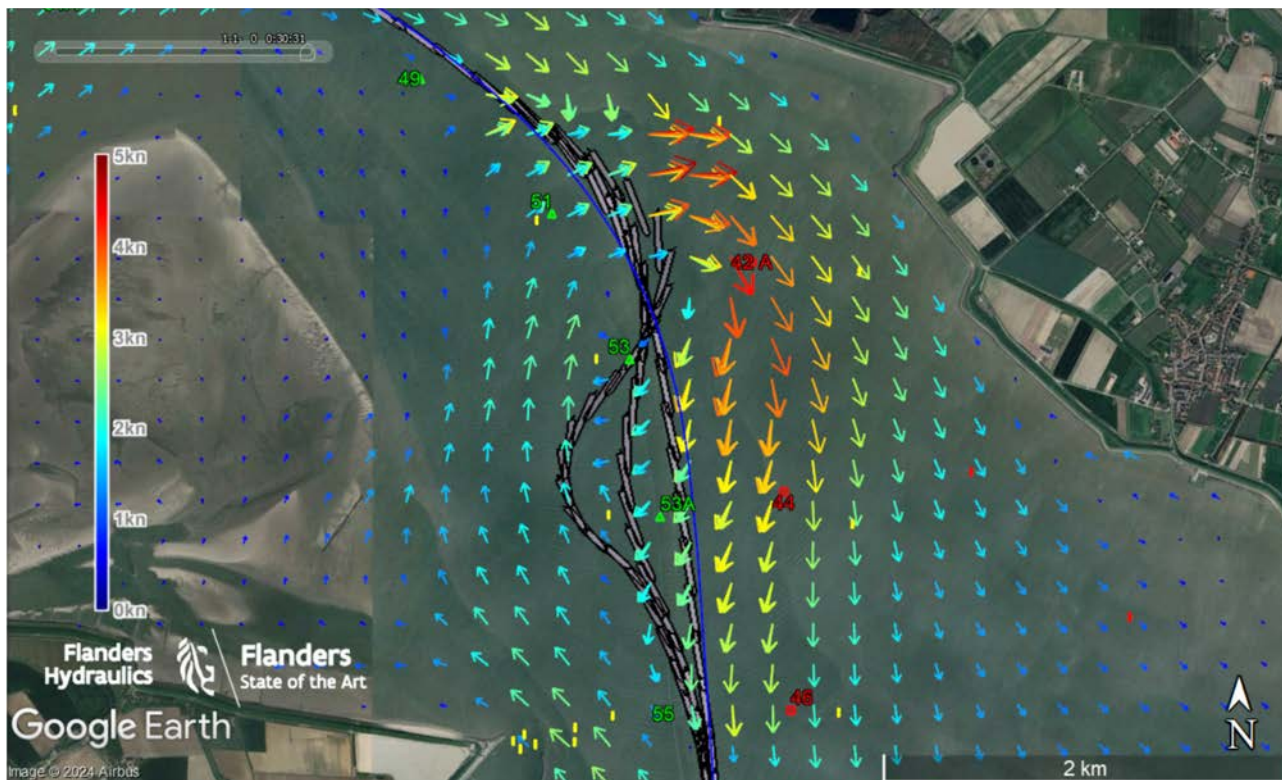
Figuur 49 – Simulatietraject opvarende ULCS (blauwe contour) en Panamax (groene contour) bij stroming 06



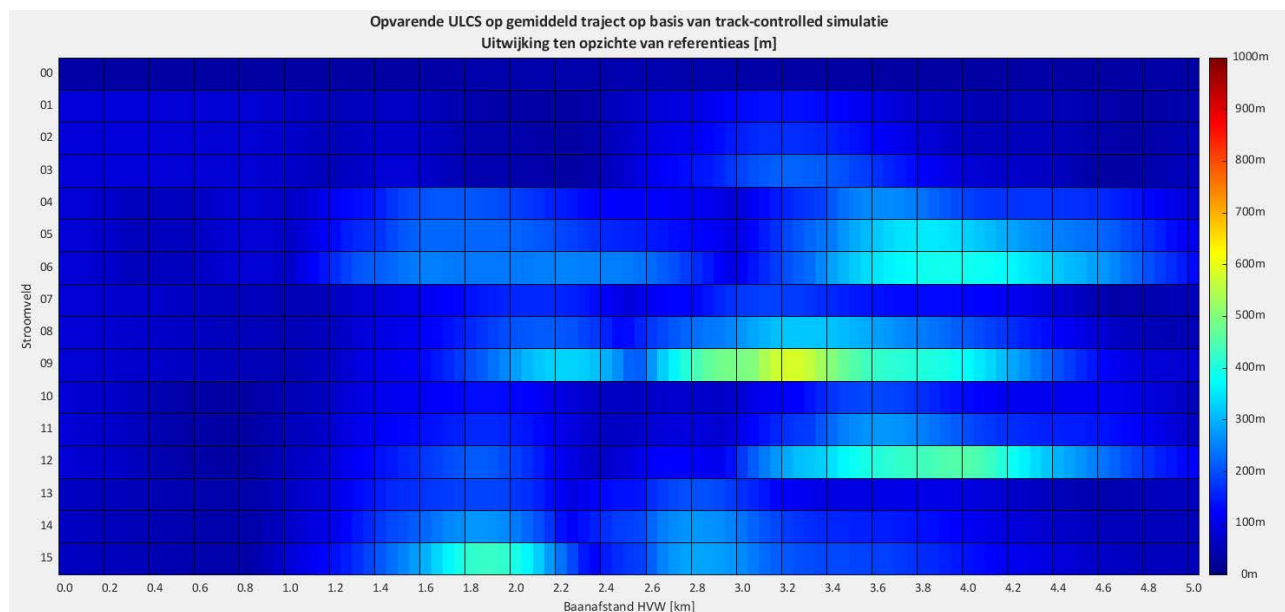
Figuur 50 – KMZ-visualisatie van opvarende simulatie met Panamax in stroomveld 07 (detail Zuidergat)



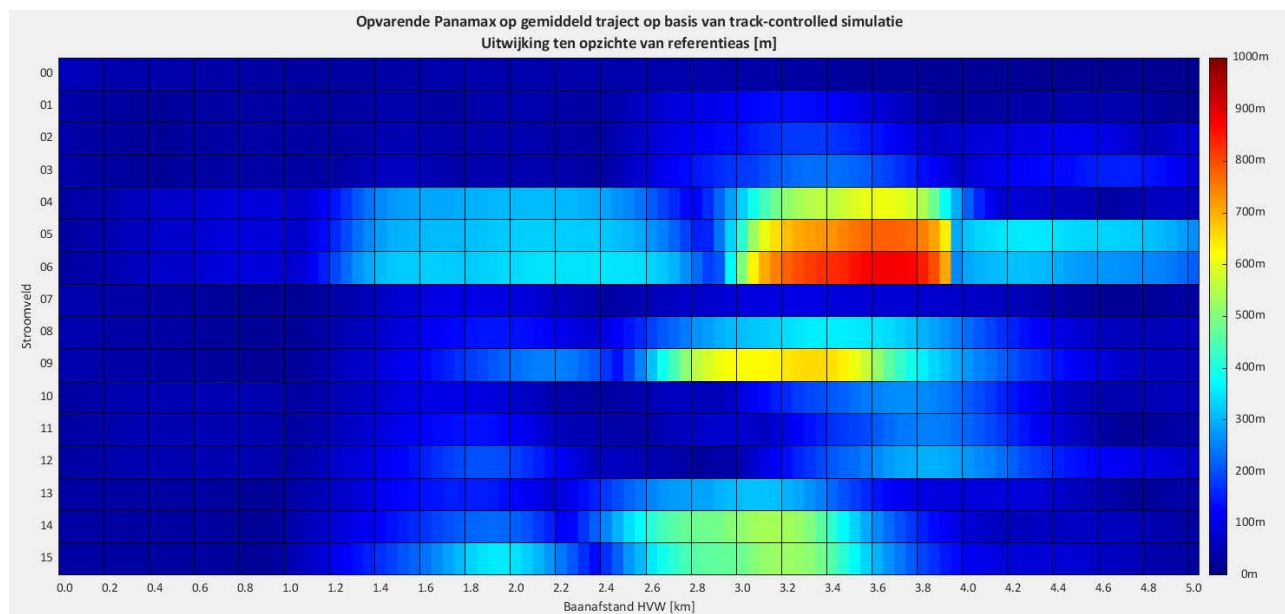
Figuur 51 – KMZ-visualisatie van opvarende simulatie met Panamax in stroomveld 04 (detail Zuidergat)



Figuur 52 – Simulietraject opvarende Panamax bij stroming 07, 08 en 09



Figuur 53 – Heatmap absolute dwarsafstand voor opvarende ULCS bij alle stroomvelden



Figuur 54 – Heatmap absolute dwarsafstand voor opvarende Panamax bij alle stroomvelden

Tabel 9 – Samenvattende bevaarbaarheidsparameters voor opvarende Panamax voor baanafstand 0 km tot 5 km

Panamax Opvaart			
Stroom- veld	Gemiddelde roerhoek [%]	Gemiddelde dwarsafstand [%B]	Maximale dwarsafstand [%B]
00	7%	50%	126%
01	42%	106%	367%
02	53%	170%	505%
03	58%	233%	674%
04	70%	626%	1828%
05	71%	917%	2363%
06	71%	971%	2681%
07	32%	123%	261%
08	56%	385%	1059%
09	55%	638%	1991%
10	58%	232%	769%
11	69%	227%	715%
12	62%	317%	863%
13	56%	307%	924%
14	55%	487%	1612%
15	53%	543%	1577%

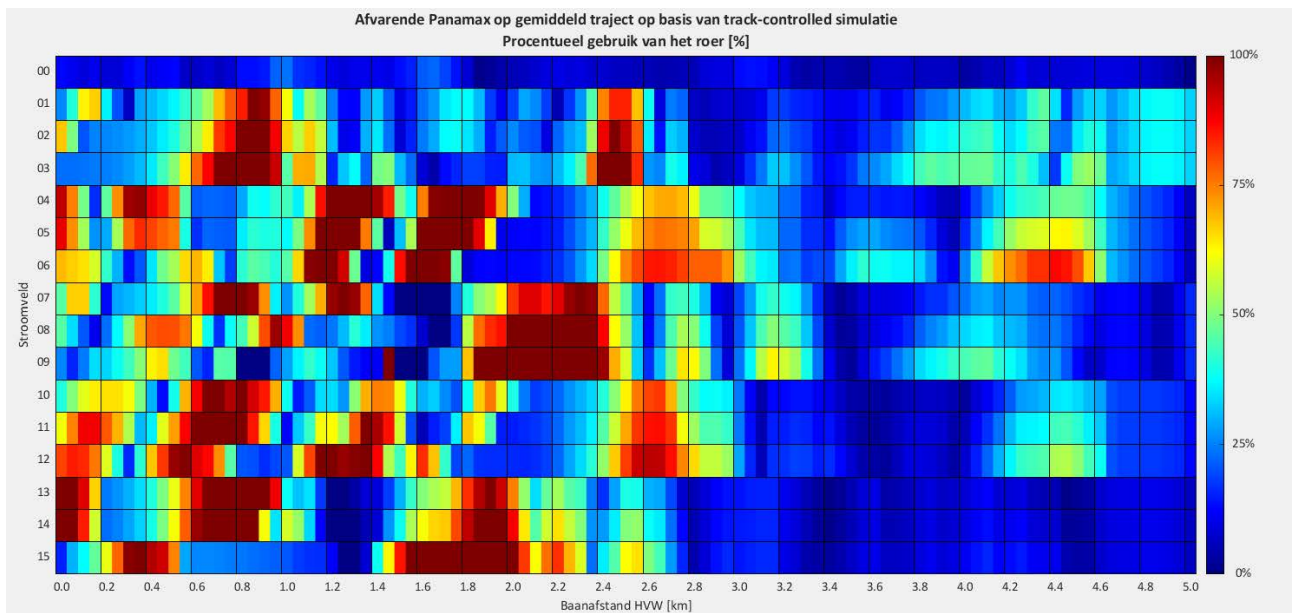
#### 3.4.4 Panamax afvaart

Voor afvarende Panamax-schepen blijken er erg gelijkaardige tendensen waarneembaar als voor afvarende ULCS. De hittekaarten voor roerhoek en dwarsafstand worden weergegeven in respectievelijk Figuur 55 en Figuur 56. Doordat de roerhoek voornamelijk een middel is om het schip op het referentietraject te houden worden er enkele conclusies verbonden aan de hittekaart voor dwarsafstanden.

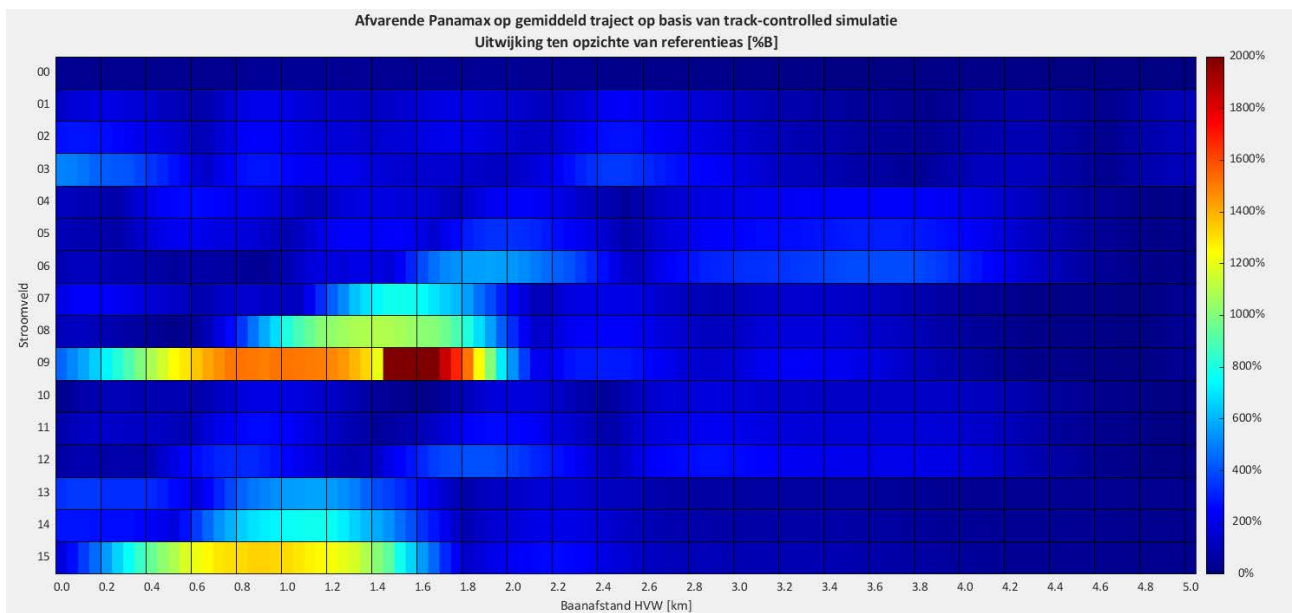
Uit Figuur 56 blijkt een uitgesproken dwarsafstand voor de simulatie uitgevoerd met het versterkte stroomveld 09. Ook bij de simulaties met de ULCS bleek dit stroomveld aanleiding te geven tot de grootste dwarsafstanden ten gevolge van een belangrijke dwarsstroom bij de passage van boei 51. De impact van deze dwarsstroom op het traject van het afvarende Panamax-schip blijkt nu nog groter en zou in realiteit aanleiding gegeven te hebben tot een stranding (zie Figuur 57). In de simulatie gaf de vaarpositie op korte afstand van de rechteroever aanleiding tot een belangrijk oevermoment waardoor het schip een belangrijke gierbeweging naar bakboord ervoer.

In Figuren 58 en 59 worden de absolute dwarsafstanden tijdens afvarende simulaties met respectievelijk het scheepstype ULCS en Panamax weergegeven. De resultaten vertonen de gelijkaardige invloed van de stroomvelden op de vaartrajecten van de beide scheepstypes en in tegenstelling tot de opvaarten blijkt nu ook de grootte van de (absolute) dwarsafstanden voor beide scheepstypes gelijkaardig.

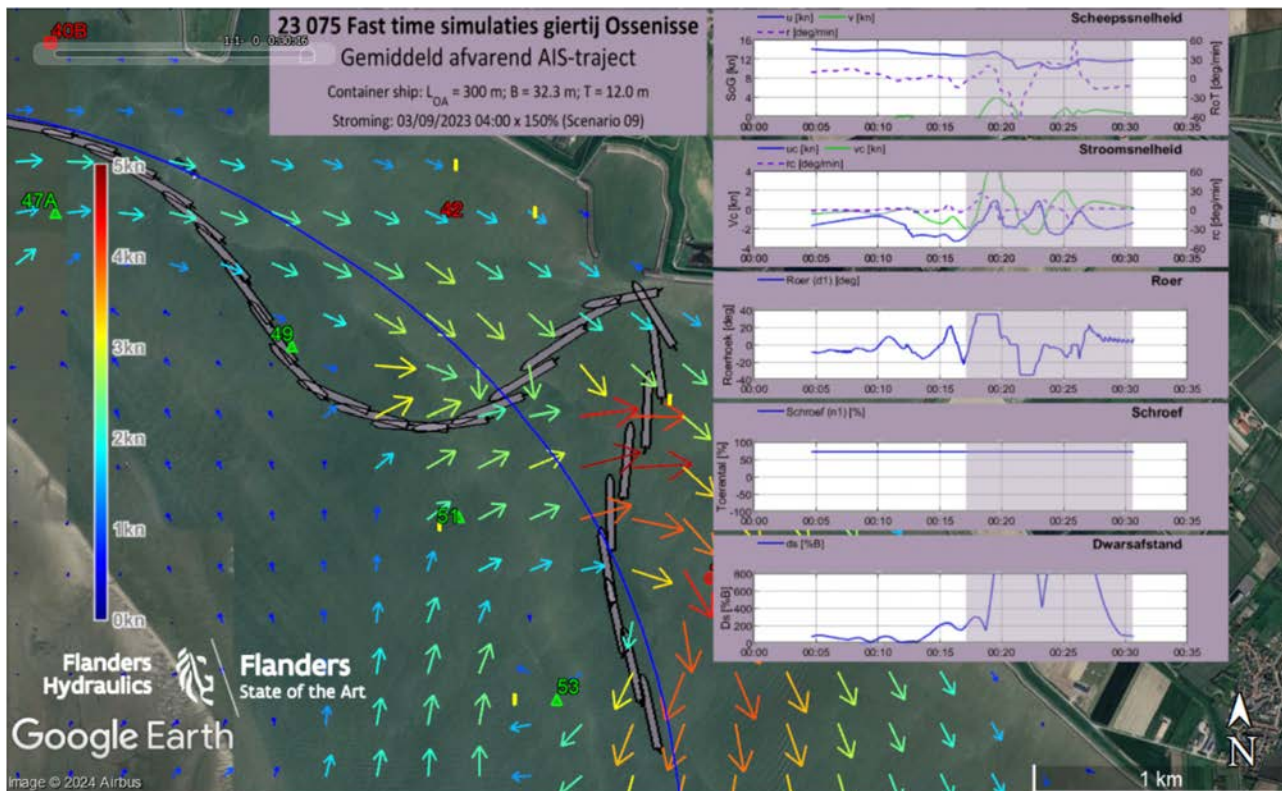
Tenslotte illustreert Tabel 10 de samenvattende bevaarbaarheidsparameters. Hieruit blijkt opnieuw dat voor stroomveld 01 een vaartraject op korte afstand van het referentietraject afgelegd kan worden. Dit geldt ook voor de stroomvelden 04 en 10 (deze stroomvelden bleken niet aanvaardbaar voor de opvaart). Ook op basis van de samenvattende bevaarbaarheidsparameters blijken er gelijkaardige resultaten voor de beide scheepstypes.



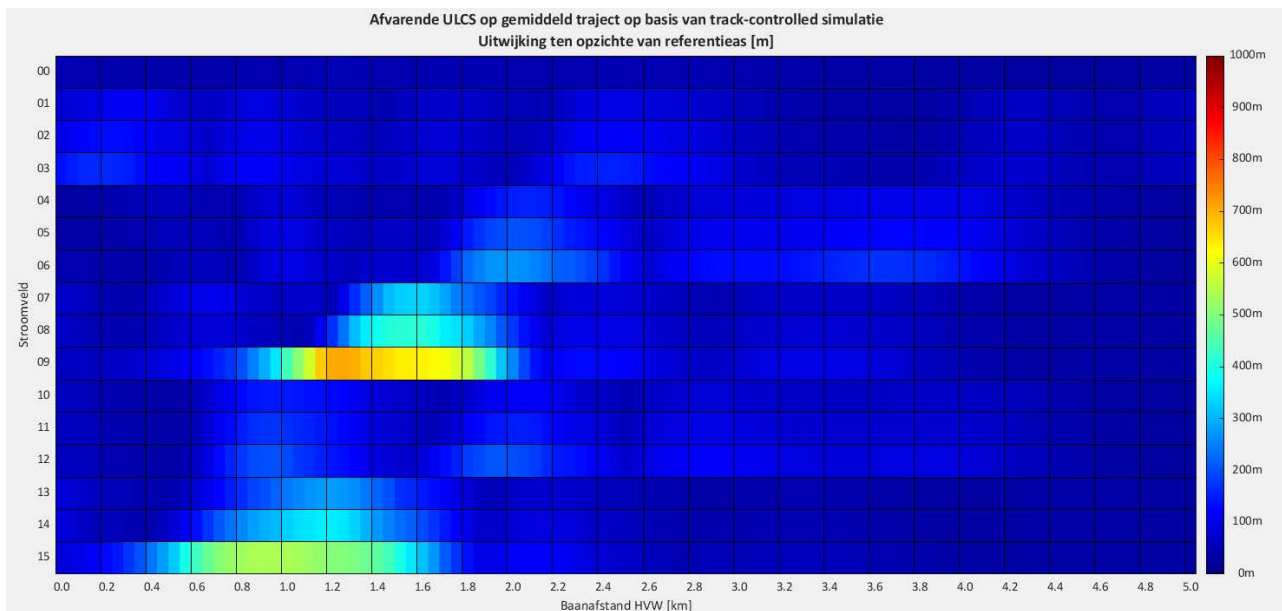
Figuur 55 – Heatmap roerhoek voor af varende Panamax bij alle stroomvelden



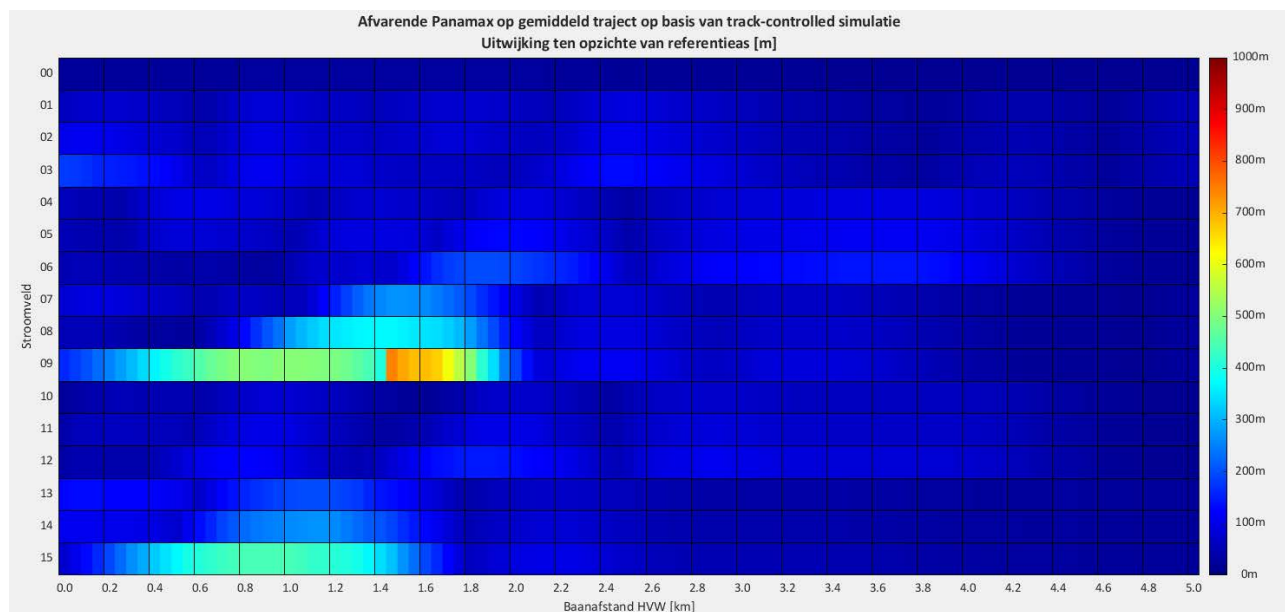
Figuur 56 – Heatmap dwarsafstand voor af varende Panamax bij alle stroomvelden



Figuur 57 – KMZ-visualisatie van afvarende simulatie met Panamax in stroomveld 09 (detail Boei 51)



Figuur 58 – Heatmap absolute dwarsafstand voor afvarende ULCS bij alle stroomvelden



Figuur 59 – Heatmap absolute dwarsafstand voor afvarende Panamax bij alle stroomvelden

Tabel 10 – Samenvattende bevaarbaarheidsparameters voor afvarende Panamax voor baanafstand 0 km tot 5 km

Panamax Afvaart			
Stroom- veld	Gemiddelde roerhoek [%]	Gemiddelde dwarsafstand [%B]	Maximale dwarsafstand [%B]
00	8%	21%	44%
01	28%	120%	229%
02	31%	145%	284%
03	35%	182%	503%
04	41%	157%	261%
05	42%	186%	341%
06	43%	231%	563%
07	35%	188%	776%
08	35%	282%	1094%
09	34%	603%	2260%
10	33%	105%	193%
11	37%	140%	262%
12	38%	189%	405%
13	29%	170%	564%
14	30%	210%	778%
15	32%	388%	1329%



## 4 Vergelijking simulaties met stromingscondities

Uit de track-controlled fasttime simulaties blijkt duidelijk de impact van het giertij op het vaargedrag van het schip waarbij deze impact voornamelijk geïllustreerd werd op basis van de dwarsafstand tot het vooropgestelde referentietraject in het vaargebied Zuidergat.

In het voorliggende hoofdstuk wordt getracht om de resultaten van de bevaarbaarheid van het schip te relateren aan eigenschappen van de vectorvelden van de respectievelijke stromingscondities. Hiervoor werden de stroomvelden geëvalueerd langsheen de referentietrajecten die eerder als input dienden voor de track-controller en werden onderstaande parameters berekend:

- De langsscheepse stroomcomponent gemiddeld over de scheeps lengte;
- De gemiddelde dwarsscheepse stroomcomponent gemiddeld over de scheeps lengte;
- De stromingsgradiënt over de scheeps lengte van het schip.

Uit de resultaten van de simulaties bleek reeds dat de hinder van het giertij op een schip niet uitsluitend afhangt van de stroomcondities op het referentietraject aangezien het schip onder invloed van het giertij vaak een belangrijke afwijking van het referentietraject zal vertonen en dus andere stroomcondities zal ervaren.

### 4.1 Methode

Voor deze analyse werd per 10 m van het referentietraject een lijnstuk gedefinieerd met middelpunt op het referentietraject, met een lengte overeenkomstig de lengte tussen de loodlijnen van het overeenkomstige schip (respectievelijk 385 m en 290 m voor ULCS en Panamax) en oriëntatie overeenkomstig de oriëntatie van het referentietraject. Over dit lijnstuk werden de hierboven beschreven parameters berekend als:

$$\bar{u} = \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{L/2} u(x) dx \quad (6)$$

$$\bar{v} = \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{L/2} v(x) dx \quad (7)$$

$$\bar{r} = \frac{\int_{-L/2}^{L/2} v(x)x dx}{\int_{-L/2}^{L/2} x dx} \quad (8)$$

### 4.2 Visualisatie

Voor de visualisatie van de resultaten werden dezelfde hittekaarten gegenereerd als bij de verwerking van de simulaties (zie §3.3.4). De referentietrajecten werden gerelateerd aan de baanafstanden van de midvaarwatercurve en per segment van 50 m werd de minst gunstige waarde weerhouden.

### 4.3 Resultaten

De grootste hinder wordt veroorzaakt door de dwarsstroom en/of de stromingsgradiënt. De resultaten voor deze parameters worden hieronder gepresenteerd voor de verschillende vaartrajecten.

#### 4.3.1 Opvaart

In Figuur 60 en Figuur 61 worden de hittekaarten voor de dwarsstroming en stromingsgradiënt weergegeven voor het gemiddelde AIS-traject voor opvarende ULCS en voor een scheepslengte gelijk aan 385 m. Gelijkwaardige resultaten worden in Figuur 62 en Figuur 63 weergegeven voor het opvarende Panamax-traject ( $L_{pp} = 290$  m). Zowel voor de dwarsstroming als de stromingsgradiënt blijkt de grootste waarde op te treden voor het snelheidsveld 13 en de daaruit afgeleide stromingsvelden 14 en 15. Deze stromingsvelden gaan inderdaad gepaard met een belangrijke dwarsstroom waarbij het AIS-traject door het midden van het oog van de neer loopt en bijgevolg ook een maximum vertoont in de stromingsgradiënt.

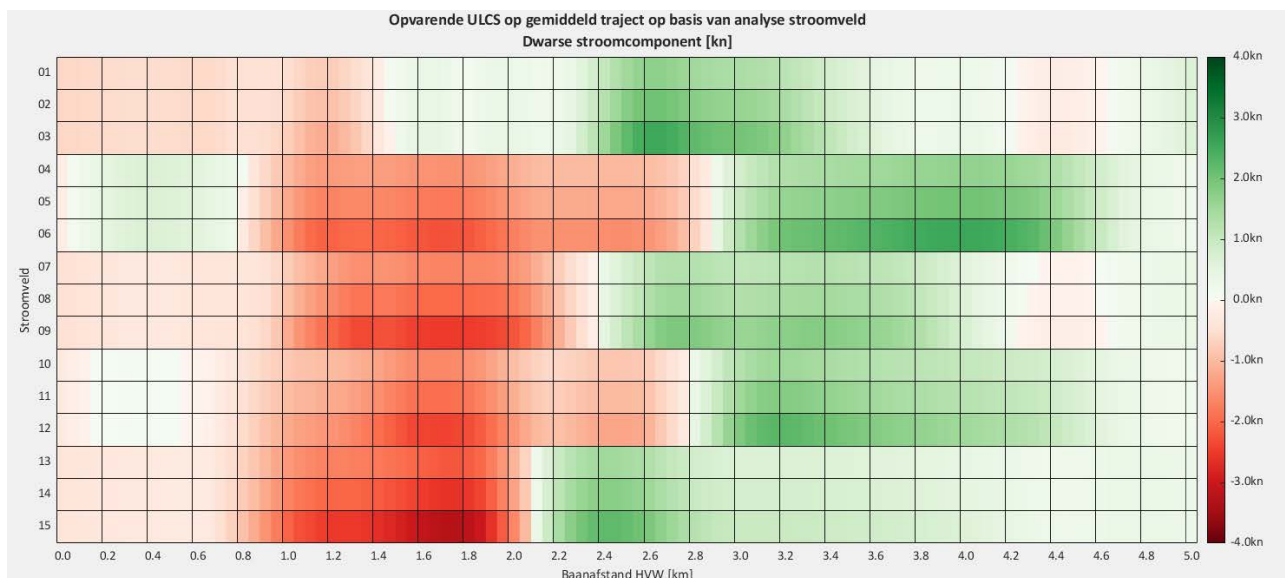
Figuur 65 en Figuur 66 tonen voor de opvaarsimulaties met de ULCS de relatie tussen de maximale dwarsafstand waargenomen tijdens de simulatie en respectievelijk de maximale waarde van de dwarsstroming en de stromingsgradiënt langsheen de referentie-as. Uit deze figuren blijkt geen eenduidige relatie tussen de maximale stroomcomponenten en de dwarsafstanden in de simulaties. Wanneer de resultaten van de opvaarsimulaties bekeken worden dan blijkt het uitgesproken maximum in de stromingsgradiënt voor simulatie 15 niet gepaard te gaan met maximale dwarsafstanden. Voor zowel ULCS als Panamax zijn de dwarsafstanden voor simulatie 15 groot, maar niet maximaal. De grootste dwarsafstanden worden immers waargenomen bij stroomvelden 09 (ULCS) en 06 (Panamax) waarvoor de stromingsgradiënt en de dwarsstroom eerder gematigd zijn. Wel is er met name voor het Panamax schip een relatie waarneembaar tussen de dwarsafstanden en de stromingsgradiënt voorafgaand aan het eerste deel van de neer (ter hoogte van baanafstand 1 km). De stroomvelden 6, 9 en 15 die hiervoor gepaard gaan met de grootste stromingsgradiënt naar bakboord (zie Figuur 63) blijken ook gepaard te gaan met de grootste dwarsafstand. Dit resultaat wordt echter deels toegeschreven aan de moeilijke sturing van dit koersinstabiele schip door middel van de track-controller en vereist meer onderzoek op basis van andere track controllers.

Bij de uitgevoerde analyse dient opgemerkt dat hoewel de schepen wel de intentie hebben om op het referentietraject te varen, er in de simulaties vaak belangrijke afwijkingen optraden van de scheepspositie. Zo wordt in Figuur 64 geïllustreerd dat hoewel het referentietraject voor opvarende Panamax-schepen wel door het oog van de neer passeert, het schip, dat dit traject probeert te volgen, niet door dit oog vaart en de maximale stromingsgradiënt dus niet ervaart in de simulatie.

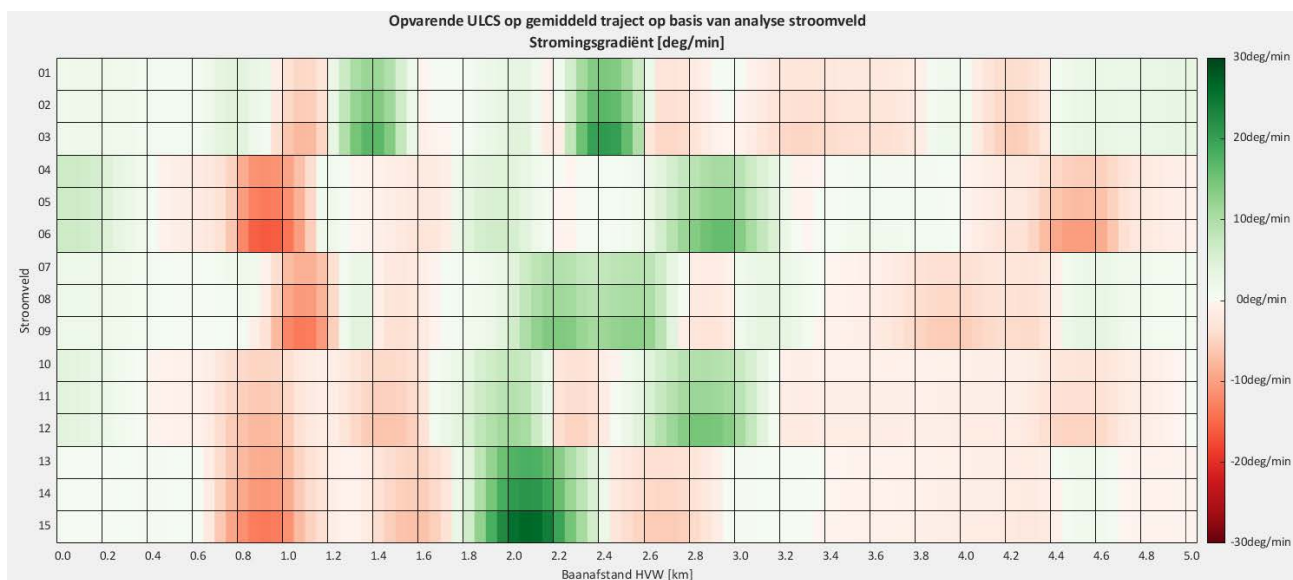
Ook voor snelheidsveld 01 wordt een belangrijke stromingsgradiënt berekend op het referentietraject zonder dat deze aanleiding geeft tot een belangrijke dwarsafstand in de simulaties.

Er dient dus geconcludeerd te worden dat in deze theoretische simulaties (met aannames zoals AIS traject en fuzzy controller algoritmes) er geen rechtstreeks verband bestaat tussen de stromingsparameters dwarsstroom en stromingsgradiënt langs het referentietraject en de hinder ervaren door het schip (waarvoor de dwarsafstand een maatstaf is). Het vaartraject wordt voor de opvaart immers op een meer complexe manier beïnvloed door de stroombeelden dan enkel de dwarsstroming en stromingsgradiënt langsheen een gemiddeld vaartraject.

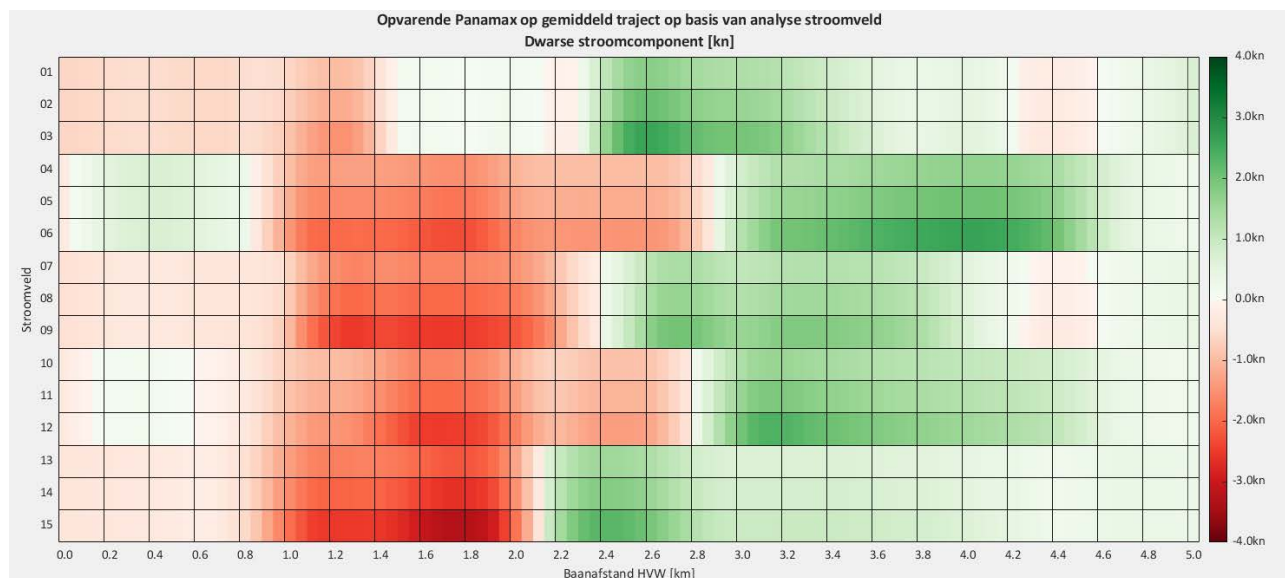
Wel kan vastgesteld worden dat voor de stroomvelden waarvoor de schepen het opvarende traject relatief goed konden volgen (stroomvelden 01, 02 en 07), de dwarsstroom beperkt was tot 2 kn en de stromingsgradiënt tot 17 °/min. Op basis van het gevoerde onderzoek worden stroomvelden waarbij binnen de vaargeul grotere waarden optreden niet aanvaardbaar geacht. Voor de aanvaardbaarheid van stroomvelden die voldoen aan bovenstaande limieten is bijkomend onderzoek nodig aangezien meerdere stroomvelden die voldoen aan bovenstaande limieten toch aanleiding gaven tot onaanvaardbare simulaties.



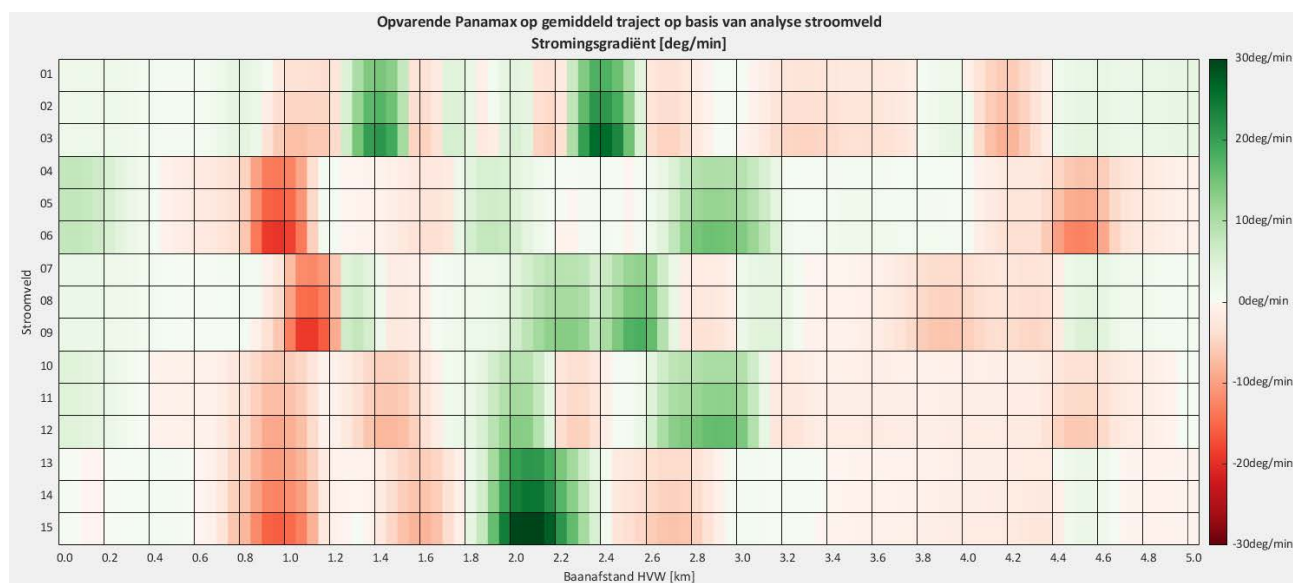
Figuur 60 – Heatmap dwarsstroom over scheepslengte (positief naar stuurboord) langs AIS-traject opvarende ULCS voor  $L_{pp}=385$  m



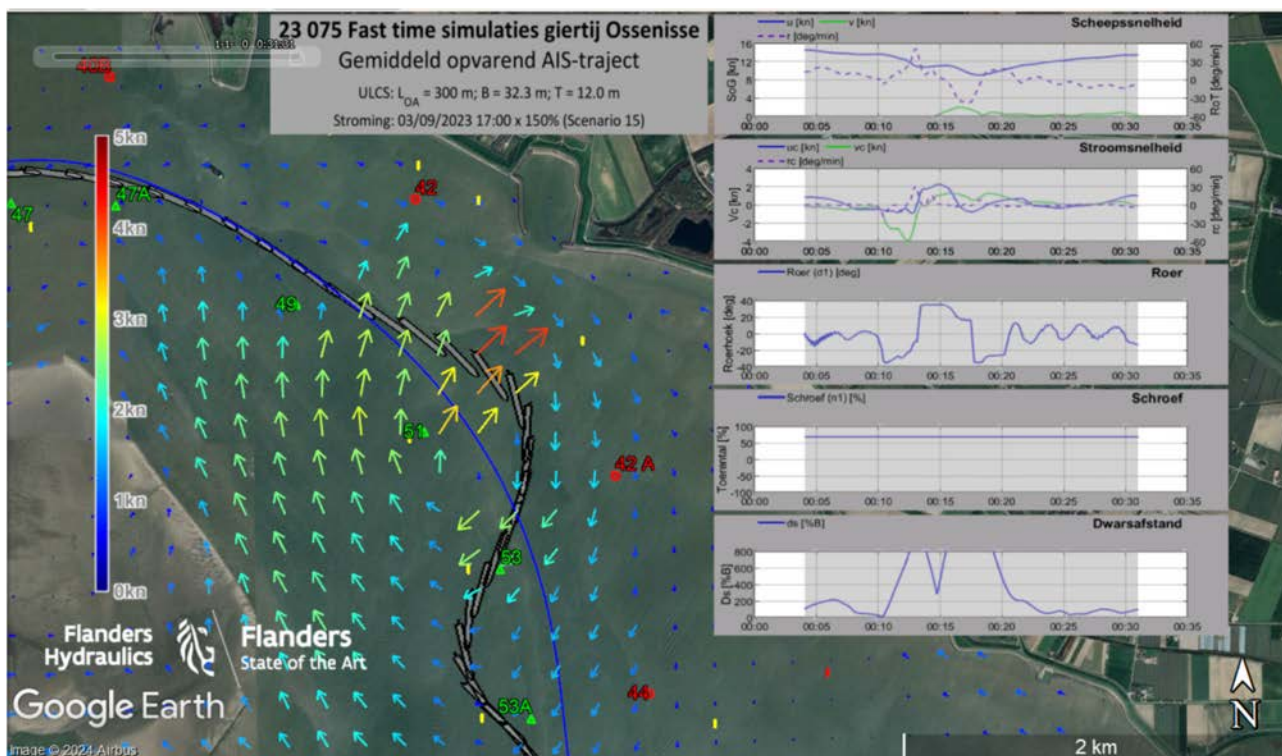
Figuur 61 – Heatmap stromingsgradiënt over scheepslengte (positief naar stuurboord) langs AIS-traject opvarende ULCS voor  $L_{pp}=385$  m



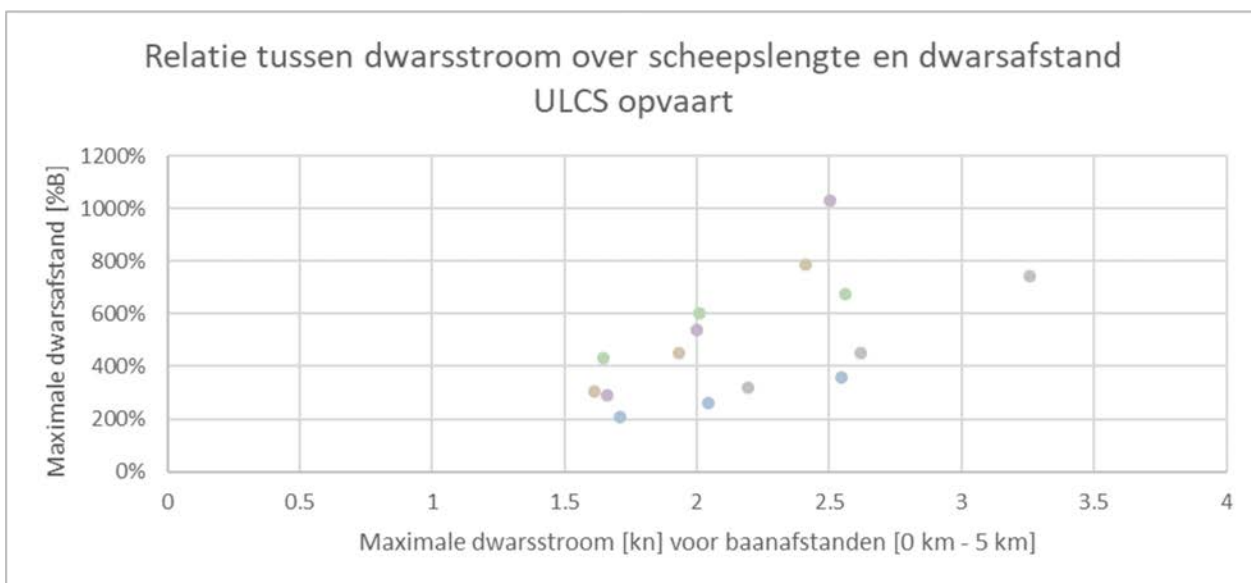
Figuur 62 – Heatmap dwarsstroom over scheeps lengte (positief naar stuurboord) langs AIS-traject opvarende Panamax voor  $L_{pp}=290$  m



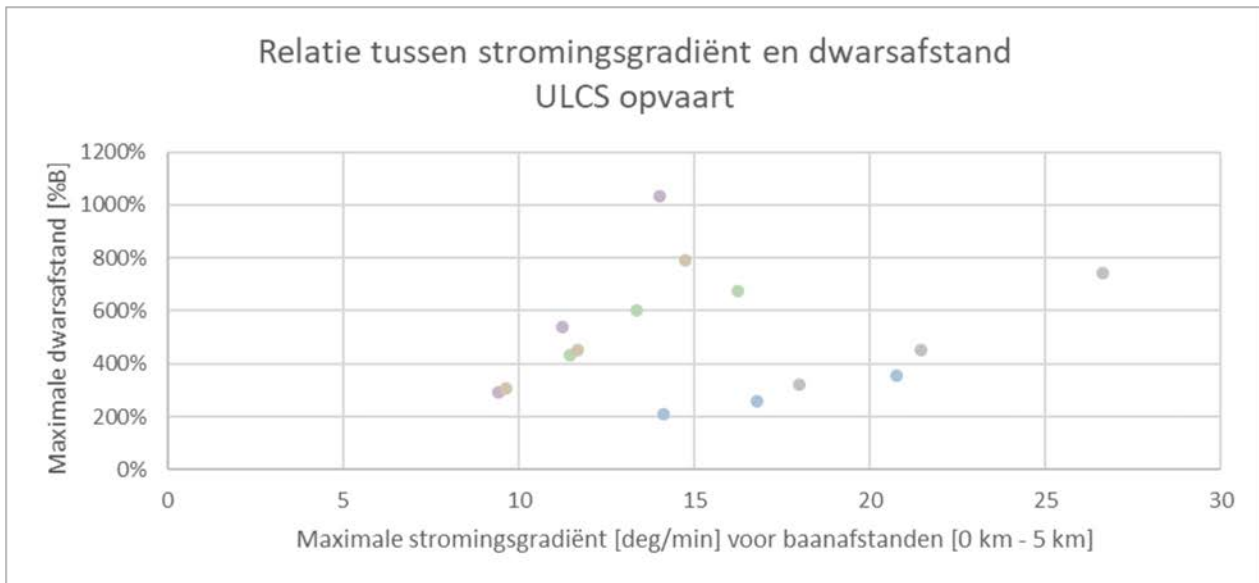
Figuur 63 – Heatmap stromingsgradiënt over scheeps lengte (positief naar stuurboord) langs AIS-traject opvarende Panamax voor  $L_{pp}=290$  m



Figuur 64 – KMZ-visualisatie van opvarende simulatie met Panamax in stroomveld 15 (detail Zuidergat)



Figuur 65 – Relatie tussen de maximale dwarsstroom over een scheepslengte op het opvarende referentietraject en de maximale dwarsafstand waargenomen in de simulaties voor de opvarende ULCS



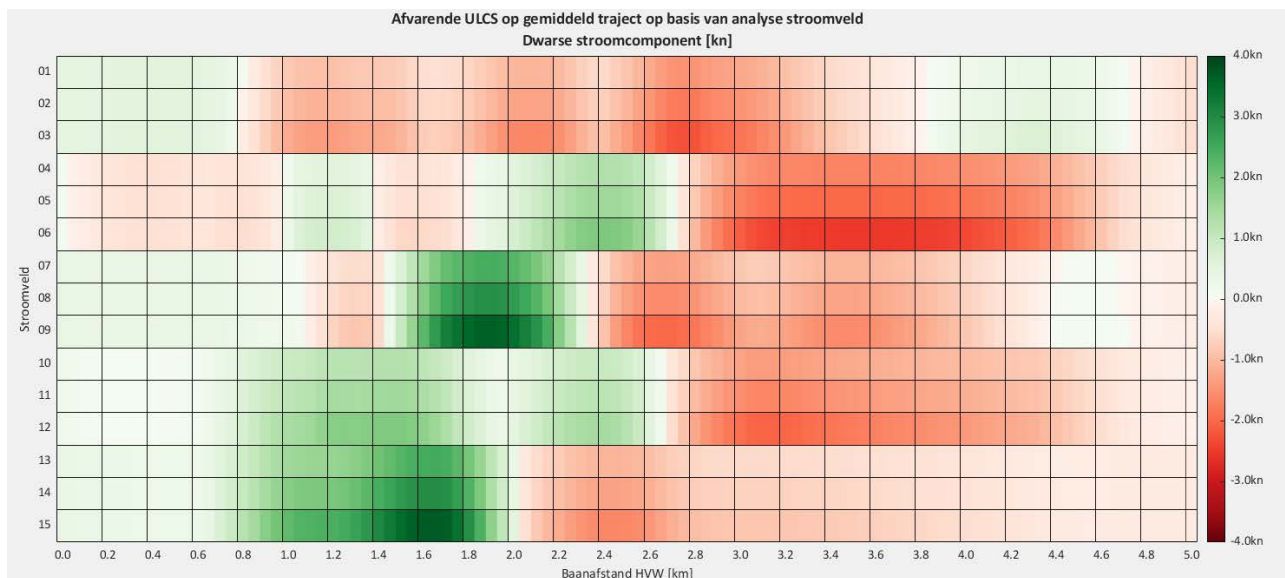
Figuur 66 – Relatie tussen de maximale stromingsgradiënt over een scheepslengte op het opvarende referentietraject en de maximale dwarsafstand waargenomen in de simulaties voor de opvarende ULCS

#### 4.3.2 Afvaart

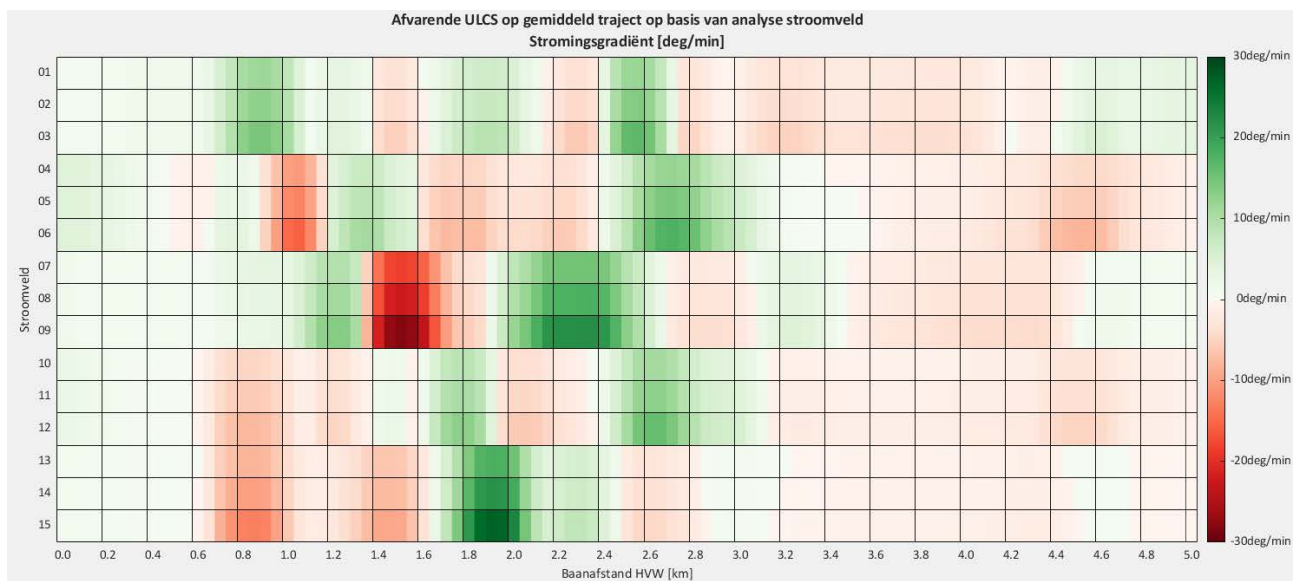
Voor de afvarende trajecten van beide scheepstypes worden de hittekaarten voor dwarsstroming en stromingsgradiënt weergegeven in Figuren 67 tot 70.

De track-controlled simulaties illustreerden dat de belangrijkste hinder voor de afvaarten optreedt ter hoogte van boeien 51-42A overeenkomstig de baanafstand 2 km waarbij de neer het bochten naar bakboord bemoeilijkt. Uit de hittekaarten voor dwarsstroom en stromingsgradiënt blijkt dat ter hoogte van deze baanafstand de minst gunstige condities aanwezig zijn voor de stroomvelden afgeleid uit stroomveld 07 en 13. Voor beide schepen bleken dit ook de stroomvelden waarvoor de grootste dwarsafstanden optraden zoals geïllustreerd wordt door de maximale dwarsafstanden samengevat in Tabel 8 en Tabel 10. Voor de afvaart blijkt er dus wel een relatie waarneembaar tussen de stroomcondities langsheen het referentietraject en de resultaten van de vaarsimulaties.

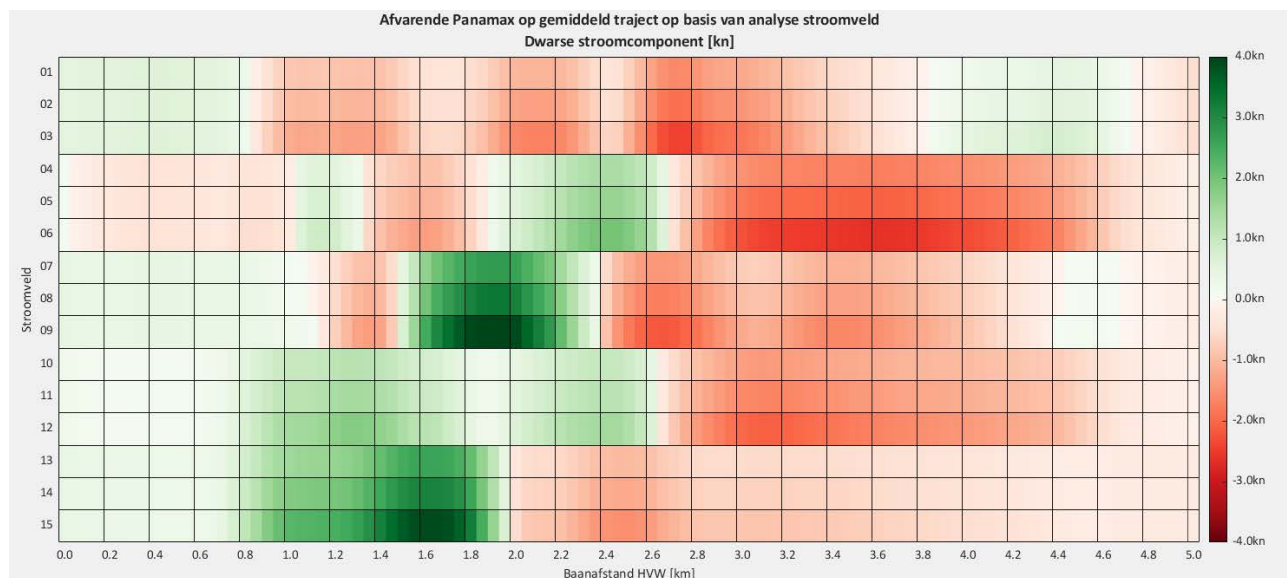
Voor de resultaten voor de afvarende ULCS blijkt dat voor de stroomvelden 01, 02, 04 en 10 de dwarsafstand tot het referentietraject maximaal 2.4 scheepsbreedtes bedroeg. Voor deze stroomvelden gold dat in de zone rond boei 51 (baanafstand 1 km tot 2.5 km) de maximale dwarsstroom op het referentietraject steeds minder dan 1.3 kn bedroeg en de stromingsgradiënt steeds minder dan 13 deg/min. De relatie tussen enerzijds de dwarsstroom en anderzijds de stromingsgradiënt op de maximale dwarsafstanden gerealiseerd tijdens de simulaties (zie Tabel 8), worden geïllustreerd in Figuur 71 en Figuur 72. Het verband tussen de stroomcomponenten en de impact op de hinder voor afvarende scheepvaart wordt in deze figuren duidelijk geïllustreerd. Voor de afvaart blijkt voornamelijk de stromingsgradiënt de hinder te bepalen.



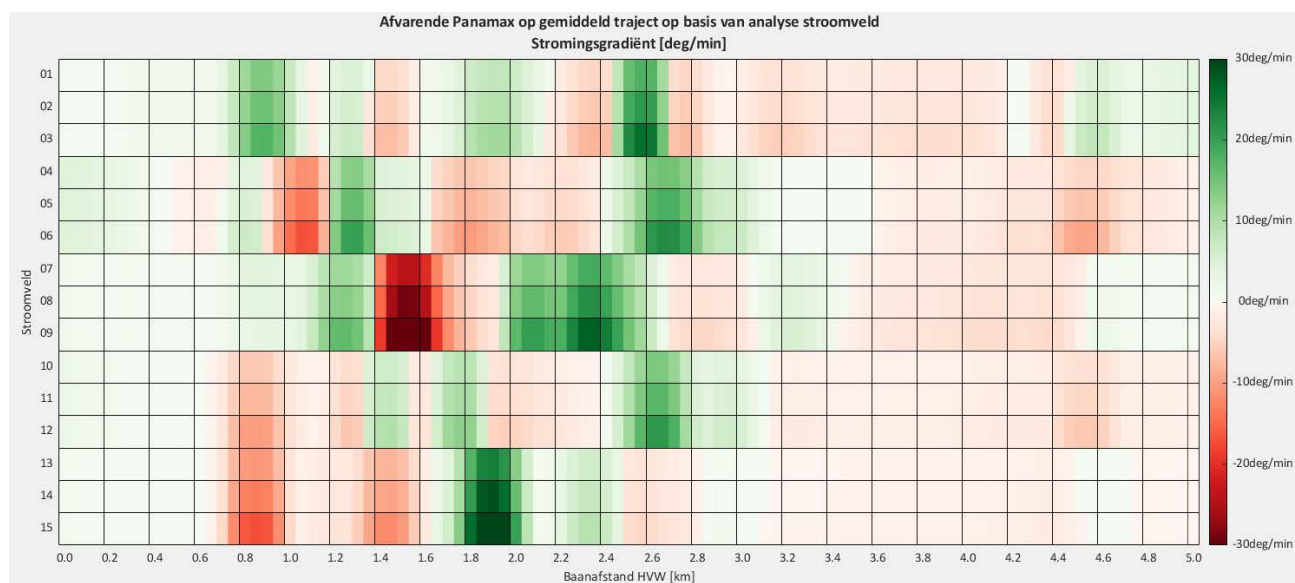
Figuur 67 – Heatmap dwarsstroom over scheeps lengte (positief naar stuurboord) langs AIS-traject afvarende ULCS voor  $L_{pp}=385$  m



Figuur 68 – Heatmap stromingsgradiënt over scheeps lengte (positief naar stuurboord) langs AIS-traject afvarende ULCS voor  $L_{pp}=385$  m

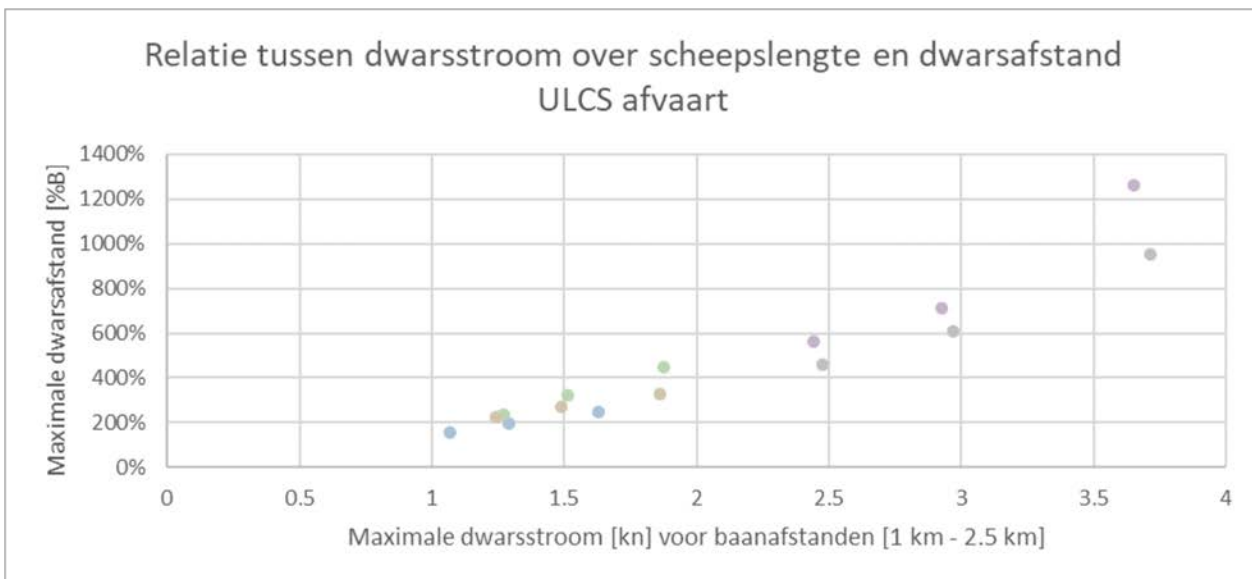


Figuur 69 – Heatmap dwarsstroom over scheepslengte (positief naar stuurboord) langs AIS-traject afvarende Panamax voor  $L_{pp}=290$  m

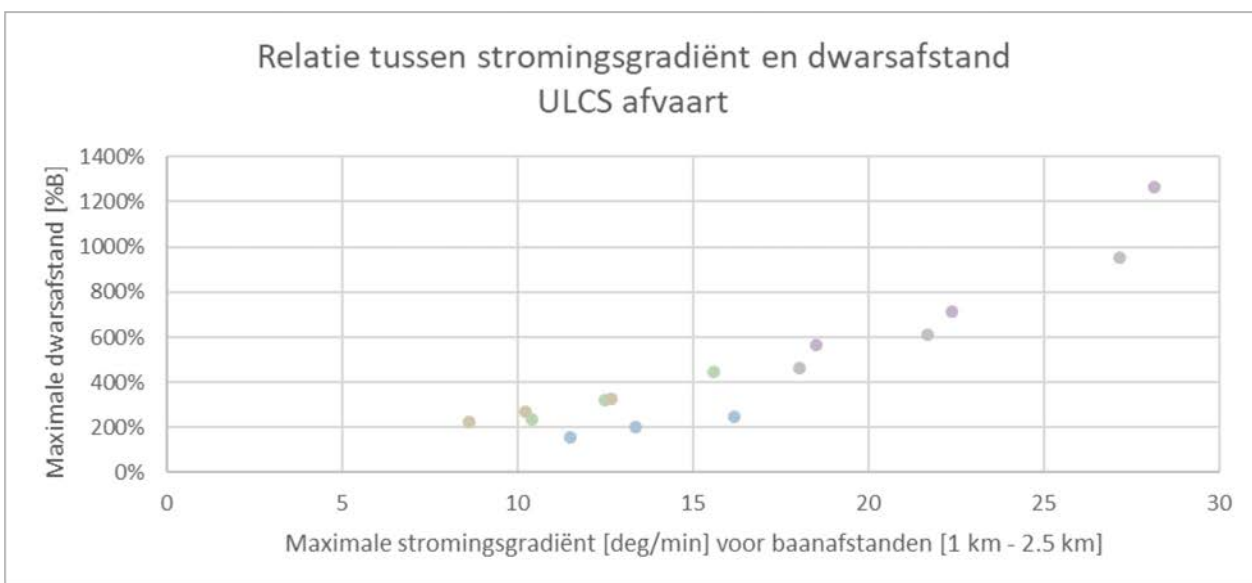


Figuur 70 – Heatmap stromingsgradiënt over scheepslengte (positief naar stuurboord) langs AIS-traject afvarende Panamax voor  $L_{pp}=290$  m





Figuur 71 – Relatie tussen de dwarsstroom over een scheeps lengte op het afvarende referentietraject ter hoogte van boei 51 en de maximale dwarsafstand waargenomen in de simulaties voor de afvarende ULCS



Figuur 72 – Relatie tussen de stromingsgradiënt over een scheeps lengte op het afvarende referentietraject ter hoogte van boei 51 en de maximale dwarsafstand waargenomen in de simulaties voor de afvarende ULCS

## 5 Conclusies en aanbevelingen

### 5.1 Conclusies

In het voorliggende onderzoek werd de nautische hinder voor een aantal karakteristieke stroombeelden voor het giertij Ossenisse bepaald door middel van track-controlled fasttime simulaties.

In eerste instantie werden er vijf karakteristieke giertijen geselecteerd uit een beschikbare dataset (01/08/2023-15/09/2023) aan opmetingen uit de HF-radar. De geselecteerde giertijen stemmen overeen met hoogwaters waarvoor een sterke dwarsstroomwaarschuwing uitgegeven werd en waarbij dit gepaard ging met verschillende neerposities binnen het studiegebied. De vijf geselecteerde giertijen werden bovendien kunstmatig versterkt door de dwarscomponenten in het vectorveld met 20% of 50% te verhogen. Op die manier werden er 15 stroombeelden bekomen waarvoor de nautische hinder bepaald diende te worden.

Bij de selectie van stroombeelden uit de HF-radar werd opgemerkt dat de vijf geselecteerde stroombeelden wel overeenstemmen met een hoog water (HW) waarvoor een sterke dwarsstroomwaarschuwing gepubliceerd werd, maar dat de geselecteerde stroombeelden veelal voorkomen op een tijdstip voorafgaand aan het gedefinieerde spervenster. In de dwarsstroomwaarschuwing wordt een spervenster [-20 min - +60 min] ten opzichte van hoogwater Hansweert gehanteerd waar op basis van de analyse van stroombeelden uit de HF-radar giertijen geselecteerd werden voor tijdstippen -70 min (x2); -65 min; -50 min en -05 min ten opzichte van HW. Op één na bevinden alle geselecteerde stroombeelden zich dus voor het gepubliceerde spervenster.

De methode die gebruikt werd om de nautische hinder van de stroomvelden op een vaartraject door het Zuidergat te beoordelen betreffen de eerder vermelde track-controlled fasttime simulaties waarbij het schip langs een vooropgesteld referentietraject geleid wordt door toepassing van roer en schroef. Het controle-algoritme dat roer en schroef aanstuurt om zo goed mogelijk een vooropgesteld vaartraject af te leggen wordt een track-controller genoemd. De beoordeling van de nautische hinder ten gevolge de onderzochte omgevingscondities (in deze studie variërende stroombeelden) wordt geïllustreerd door middel van de uitwijking van de vaarpositie ten opzichte van het vooropgestelde referentietraject (verder dwarsafstand genoemd).

De analyse werd uitgevoerd voor twee types containerschepen (ULCS en Panamax) en voor opvarende en afvarende vaarrichting. De vaarsnelheden en vaartrajecten voor de vier condities werden afgeleid uit AIS-gegevens voor het kalenderjaar 2022.

De resultaten tonen aan dat de impact van de neer op, met name de opvarende, vaarsimulaties een complex gegeven is waarbij de ervaren hinder zowel bepaald wordt door de stroomcondities in het eerste deel van de neer (voordat het oog van de neer bereikt wordt), de mate waarin het schip deze effecten kan compenseren, de daaruit volgende conditie waarbij het schip het tweede deel van de neer bereikt en uiteindelijk de stroomcondities in het tweede deel van de neer. Hierdoor wordt de nautische hinder van het giertij bepaald door een combinatie van verschillende eigenschappen van het stroombeeld zoals: de locatie van de neer ten opzichte van de bocht te Hansweert; de dwarspositie van de neer in de vaarweg; de dwarsstroming in het eerste deel van de neer en de dwarspositie in het tweede deel van de neer. Ook de afmetingen en manoeuvreereigenschappen van het schip blijken een belangrijke invloed te hebben op de ervaren hinder. De grote afhankelijkheid van de eigenschappen van het stroombeeld en de relatief grote variatie aan stroombeelden bij giertijcondities maakt dat er geen eenvoudige relatie gevonden kon worden tussen het stroombeeld enerzijds en de nautische hinder voor opvaart anderzijds. Een poging om de resultaten van de vaarsimulaties te relateren aan stroomcondities (dwarsstroming en stromingsgradiënt) langs het referentietraject gaf dan ook geen gunstige resultaten voor de opvarende vaartrajecten.

Vanzelfsprekend wordt de hinder van de stroombeelden op de opvarende vaartrajecten vergroot wanneer de dwarscomponenten in de stroombeelden verhoogd werden.

Voor de afvarende vaartrajecten bleek de impact van de neer op de dwarsafstanden voornamelijk bepaald te worden door de dwarsstroming en de stromingsgradiënt ter hoogte van boei 51 wat voor afvaart overeenstemt met het tweede deel van de neer. De voorafgaandelijke dwarsstroming in het eerste deel van de neer is meer gematigd dan voor de opvaart en gaf aanleiding tot kleinere afwijkingen van het referentietraject en had bijgevolg een kleinere impact op het manoeuvre. Voor afvaart kon dan ook wel een relatie gevonden worden tussen de nautische hinder en de stroomcondities op het referentietraject. Zo tonen Figuur 71 en Figuur 72 aan dat wanneer voor de afvarende ULCS ter hoogte van boei 51 de dwarsstroom (gemiddeld over de scheepslengte) kleiner is dan 1.3 kn en de stromingsgradiënt kleiner is dan 13 deg/min de afvaart steeds uitgevoerd kon worden binnen 2.4 scheepsbreedtes (= 130 m) van het referentietraject.

Wanneer aangenomen wordt dat het schip in de track-controlled simulaties slechts maximaal 130 m mag uitwijken ten opzichte van het referentietraject dan blijkt er slechts één stroombeeld hieraan tegemoet te komen voor de beide scheepstypes en beide vaarrichtingen. Het betreft het stroomveld 01 overeenkomstig de HF-radar registratie op 01/09/2023 02h20. Voor dit stroombeeld zou de mogelijkheid om scheepvaart toe te laten verder onderzocht kunnen worden.

Voor de afvaart blijken ook de onversterkte stroomvelden 04 (HF-radar 02/09/2023 03h20) en 10 (HF-radar 03/09/2023 04h20) aanleiding te geven tot kleinere uitwijkingen dan 130 m. Voor stroomveld 04 geldt wel dat wanneer de dwarscomponenten in dit stroomveld versterkt worden met 20% (stroomveld 05) of 50% (stroomveld 06) de uitwijkingen voor afvarende ULCS wel in belangrijke mate toenemen (tot respectievelijk 175 m en 242 m).

Voor de opvaart worden over het algemeen ongunstige resultaten bekomen voor de al dan niet versterkte stroombeelden die niet overeenstemmen met stroombeeld 01. De uitwijkingen op basis van de track-controlled simulaties met de ULCS kunnen hierbij niet aanvaardbaar geacht worden. Nochtans blijkt voor deze stroombeelden wel een belangrijke impact van het al dan niet toepassen van de versterking van de dwarscomponenten, waardoor deze giertijen mogelijks wel aanvaardbaar worden indien een beperking van de dwarscomponenten zou gelden (bijvoorbeeld bij eerder matige giertijen die momenteel niet onderzocht werden). Men kan stellen dat zowel voor op- als afvaart het doorvaren van het oog van de neer (of de locatie met de hoogste stromingsgradiënt) gepaard gaat met de grootste hinder. Voor de opvaart echter wordt de positionering in het eerste deel van de neer bovendien bemoeilijkt doordat het schip hier ook een bochtmanoeuvre dient uit te voeren waardoor de combinatie van dwarsstroom in het eerste deel van de neer en het bochtmanoeuvre (beide vereisen gierbewegingen naar stuurboord) versterkend werkt en aanleiding geeft tot een ongunstige uitgangspositie bij het bereiken van het oog van de neer en de daaropvolgende dwarsstroming in het tweede deel van de neer (dit gedrag is in belangrijke mate aanwezig bij het sturen op een vast vooropgesteld traject maar zal minder uitgesproken zijn wanneer een ervaren rivierloods het schip zou sturen, zie verder). Doordat in afvaart het eerste deel van de neer gepaard gaat met een recht stuk van de vaarweg bereikt de afvaart de stromingsgradiënt bij een meer gunstige positie. Voor de afvaart geldt wel dat de stromingsgradiënt het bochten te Hansweert vertraagt of bemoeilijkt, maar hierdoor zou in realiteit geanticipeerd kunnen worden door vroeger te bochten.

Bovendien wordt opgemerkt dat de simulaties met het kleinere scheepstype (Panamax) niet noodzakelijk aanleiding geven tot kleinere uitwijkingen ten opzichte van het referentietraject. Dit bleek te maken te hebben met de verschillende manoeuvreereigenschappen van de schepen waarbij de Panamax schepen minder koersstabiel waren en hierdoor belangrijkere overshoot vertoonden in het tweede deel van de neer. De impact van het giertij op het vaargedrag bleek het beste geïllustreerd te kunnen worden voor de simulaties uitgevoerd met de ULCS. Voor dit schip illustreren de vaarsimulaties met versterkte giertijen ook de hinder ervaren met gelijkaardige schepen door het Nederlands Loodswezen in februari 2024. Figuur 37 illustreert de stranding in een track-controlled simulatie van een opvarende ULCS uitgevoerd bij het versterkte stroomprofiel 09.

Verder dient opgemerkt dat de resultaten van de vaarsimulaties ongetwijfeld verschillend zullen zijn indien de simulaties uitgevoerd zouden worden door een ervaren rivierloods. Men zou kunnen stellen dat de track-controller enerzijds sneller reageert op onvoorziene verstoringen (in deze studie het giertij) maar dat anderzijds de track-controller niet proactief zal handelen zoals een ervaren loods wel zal doen als hij/zij vertrouwd is met de effecten van het giertij. Zo kan gesteld worden dat voor afvaart, en bij afwezigheid van belangrijke opvarende scheepvaart (en dus afwezigheid van ontmoetingen) een alternatieve vaarroute gehanteerd zou kunnen worden wanneer er belangrijke vloedstroom of giertij voorspeld wordt. Dit geeft aan dat een opleiding van de loodsen voor afvaart de aanvaarbaarheid van deze trajecten bij bepaalde giertijcondities mogelijk kan toelaten.

Voor de opvaart is (zoals eerder vermeld) de impact van de neer op de vaartrajecten dynamischer (dit zowel door het uitvoeren van een bochtmanoeuvre in het eerste deel van de neer als door de grotere dwarsstroming in het tweede deel van de neer voor opvaartrajecten) waardoor verschillende giertijen een verschillende impact op de manoeuvres hebben. Hierdoor wordt verwacht dat het voor rivierloodsen moeilijker zal zijn om ervaring op te bouwen in het passeren van een giertij in opvaart en dus dat het minder evident zal zijn om opvaarten door het Zuidergat toe te laten. Dit neemt niet weg dat de opleiding van rivierloodsen in het herkennen en compenseren van giertijcondities wel nuttig geacht wordt. Het verleden heeft immers aangetoond dat ondanks het huidige voorspellingsstelsel het niet uitgesloten kan worden dat een schip in een neer terecht komt.

## 5.2 Aanbevelingen

Als aanbevelingen voor verder onderzoek worden gedefinieerd:

1. Bijkomend onderzoek op basis van track-controlled simulaties voor ULCS om de invloed van verschillende giertijen op opvarende en afvarende vaartrajecten te beoordelen en de slaagpercentages van de manoeuvres te verhogen:
  - a. Definiëren van optimale vaartrajecten voor op- en afvaart bij giertijcondities waarbij er van uitgegaan wordt dat er geen ontmoetingen uitgevoerd dienen te worden (hierdoor kan het schip het meest gunstige traject binnen de betonde vaargeul toepassen). Op basis van het gevoerde onderzoek kunnen voor deze optimale vaartrajecten de onderstaande principes gedefinieerd worden
    - i. Opvaart:
      1. naderen van boei 49 op korte afstand van de groene boeienlijn (vb. 10% AIS-traject);
      2. onder invloed van dwarsstroom opschuiven naar het midden van de vaargeul tussen boeien 51 en 53 (in deze fase de gierendebeweging naar stuurboord beperken);
      3. geleidelijke verplaatsing naar het gemiddelde AIS-traject tussen boeien 53 en 55.
    - ii. Afvaart:
      1. naderen boei 44 op het gemiddelde AIS-traject of op een positie dicht bij de rode boeienlijn (vb. 10% AIS-traject) indien een belangrijke dwarsstroom in het eerste deel van de neer verwacht wordt;
      2. dwarsstroom naar bakboord in het eerste deel van de neer (boei 46 – 42 A) toelaten om het schip te verzetten naar het midden van de vaarweg (of zelf de groene boeienlijn) en vermijden van giersnelheden naar stuurboord;
      3. vanaf boei 44 tijdig het bochten naar bakboord inzetten in functie van de positie van het schip in de vaarweg (lees: de mate waarin het schip in de eerste helft van de neer verzet werd naar het midden van de vaarweg).

- b. De analyse en optimalisatie van alternatieve vaartrajecten kan uitgevoerd worden door de huidige methodologie op basis van track-controlled simulaties uit te breiden en/of door het uitvoeren van realtime simulaties met loodsens. Deze laatste worden als een voorwaarde gezien voor de besluitvorming indien de toegankelijkheid van het studiegebied (lees: spervensters giertij) aangepast wordt;
  - c. De analyse van een grotere variatie aan giertijcondities door een langere evaluatieperiode van HF-radar beelden waarbij een grotere variatie in stroomsnelheden (bijvoorbeeld ook bij matige dwarsstroomwaarschuwing) en neerposities onderzocht wordt. Deze analyse wordt ook nuttig geacht voor het bepalen van het vereiste spervenster ten opzichte van het optreden van hoog water te Hansweert (relatie tussen dwarsstroming, stromingsgradiënt en tijdstip tot HW).
2. Analyse van gerapporteerde incidenten met betrekking tot dwarsstroom (HF-Radar stroombeeld + track-controlled vaarsimulatie voor verschillende referentietrajecten) en/of de analyse van AIS-trajecten van schepen bij uitgestuurde dwarsstroomwaarschuwingen. Deze studie zou het bewustzijn in verband met giertij moeten verhogen en mogelijke alternatieve vaarstrategieën kunnen bepalen.
3. Terugkoppeling van de resultaten uit dit onderzoek met rivierloodsen om eventuele aanpassingen aan de huidige stremmingen ten gevolge van giertij te bespreken bij op- en afvaart van de studieschepen. Bepaling van nut, noodzaak en fasering van realtime simulaties in giertijcondities.
4. Verder onderzoek naar de voorspelling van het te verwachten stroombeeld voor een gegeven tijconditie wat een noodzakelijke voorwaarde lijkt om aanvaarbaarheidscriteria te definiëren op basis van verwachte stroomcondities en om een alternatief voorspellingsstelsel voor giertij te ontwikkelen.
5. In vervolgonderzoek met track-controlled simulaties wordt aangeraden om een meer geavanceerde track-controller op basis van vaarpredicties (PMC: Predictive Model Control) toe te passen eerder dan een track-controller op basis van het Line-Of-Sight (LOS) gids-algoritme. Een PMC stemt meer overeen met het werkelijke gedrag van de loods en is minder afhankelijk van de manoeuvre-eigenschappen van het schip. De PMC laat ook toe om het schroeftoerental aan te passen aan de vereiste koersverandering van het schip (vb. toepassen van propeller kicks om roereffectiviteit te verhogen). Op heden beschikt WL hiervoor over de PMTC (Prescience model based tracking controller) die beschreven wordt in C. Chen *et al.* (2021) en in Eloit & Mansuy (2024). De PMTC zou toegepast kunnen worden bij verschillende kennisniveaus van het stroombeeld (geen stroming, halve stroomsnelheid, volledig stroombeeld) in de voorspellingsfase om op die manier ook de impact van ervaring en training op de simulatieresultaten te illustreren.

## Referenties

- Chen, C.; Verwilligen, J.; Mansuy, M.; Eloot, K.; Lataire, E.; Delefortrie, G.** (2021). Tracking controller for ship manoeuvring in a shallow or confined fairway: Design, comparison and application. *Appl. Ocean Res.* 115: 102823
- Chen, C.Y.; Delefortrie, G.; Lataire, E.** (2020). Experimental investigation of practical autopilots for maritime autonomous surface ships in shallow water. *Ocean Eng.* 218: 108246. doi:10.1016/j.oceaneng.2020.108246
- Decrop, B.; De Clercq, B.; van Holland, G.; Plancke, Y.; De Mulder, T.; Mostaert, F.** (2009). Dwarsstromingen Ossenisse-Zuidergat: rapport numeriek modelonderzoek. Versie 3.0. *WL Rapporten*, 753\_07. Waterbouwkundig Laboratorium/IMDC: Antwerpen
- Eloot, K.; Mansuy, M.** (2024). Manoeuvring in shallow and confined water with model predictive track controller. *MTEC-ICMASS 2024*
- MDK - afdeling KUST - Vlaamse Hydrografie.** (2024). Getijtafels 2024 voor Nieuwpoort, Oostende, Blankenberge, Zeebrugge, Vlissingen, Prosperpolder, Antwerpen en Wintam
- Plancke, Y.; De Maerschalck, B.** (2023). Dwarsstroming Zuidergat: deelrapport 4. Factual data rapport ADCP-metingen (maart 2023). Versie 3.0. *WL Rapporten*, 20\_108\_4. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. Available at: <https://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=366664>
- Plancke, Y.; Stark, J.** (2022). Dwarsstroming Zuidergat: deelrapport 1. GPS vlottermetingen. Versie 3.0. *WL Rapporten*, 22\_066\_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. Available at: <https://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=360278>
- Plancke, Y.; Stark, J.; Meire, D.; Schrijver, M.** (2020a). Complex flow patterns in the Scheldt estuary: field measurements and validation of a hydrodynamic model. *J. Hydraul. Eng.* 146(7). Available at: [https://hdl.handle.net/10.1061/\(asce\)hy.1943-7900.0001737](https://hdl.handle.net/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0001737)
- Plancke, Y.; Stark, J.; Meire, D.; Schrijver, M.** (2020b). Complex flow patterns in the Scheldt estuary: field measurements and validation of a hydrodynamic model. *J. Hydraul. Eng.* 146(7)
- Plancke, Y.; Stark, J.; Mostaert, F.** (2021). Operationele voorspelling dwarsstromingen Platen van Ossenisse: deelrapport 2. Factual data rapport ADCP-metingen. Versie 4.0. *WL Rapporten*, 20\_060\_2. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. Available at: <http://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=344411>
- Stark, J.; Plancke, Y.; Mostaert, F.** (2021). Verversingstijden voor stroombeelden van neervorming Ossenisse: hoogfrequente modeluitvoer van Delft3D-NeVla voor springtij 12/03/2020. Versie 2.0. *WL Rapporten*, 21\_021\_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. Available at: <http://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=344416>
- Stark, J.; Smolders, S.; Plancke, Y.; Mostaert, F.** (2020). Mitigatie dwarsstromingen Platen van Ossenisse: deelrapport 1. Scenario onderzoek. Versie 3.0. *WL Rapporten*, 19\_030\_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- Stark, J.; Vanlede, J.; Plancke, Y.** (2022a). Operationele voorspelling dwarsstroming: Validatie NeVla model in Simona/Waqua en Delft3D voor representatie dwarsstromingen Ossenisse. Versie 1.0. *WL Rapporten*, 20\_060\_3.: Antwerpen. 47 pp.
- Stark, J.; Vanlede, J.; Plancke, Y.** (2022b). Operationele voorspelling dwarsstroming Platen van Ossenisse: deelrapport 3. Validatie NeVla model voor representatie dwarsstromingen Ossenisse. Versie 2.0. *WL Rapporten*, 20\_060\_3. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. Available at: <https://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=360272>

**Stark, J.; Vanlede, J.; Plancke, Y.** (2022c). Operationele voorspelling dwarsstroming Platen van Ossenisse: deelrapport 3. Validatie NeVla model voor representatie dwarsstromingen Ossenisse. Versie 2.0. *WL Rapporten, 20\_060\_3*. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

**Sugeno, M.** (1985). An introductory survey of fuzzy control. *Inf. Sci. (Ny)*. 36: 59–83

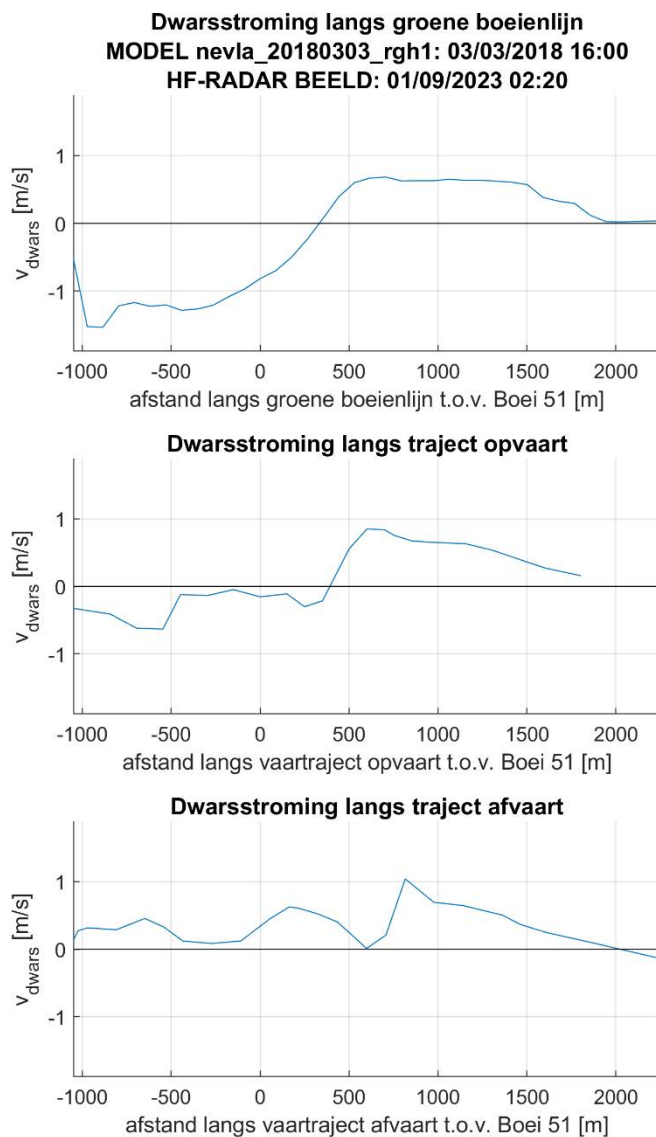
**van Weerdenburg, R.; van der Werf, J.** (2019). Dwarsstroming in het Zuidergat, Westerschelde: Analyse op basis van metingen tussen 2005 en 2019. 39 pp.

**Verwilligen, J.; Eloot, K.** (2024). Nautisch onderzoek toegankelijkheid Schaar van Valkenisse. 1.0. *WL\_Rapporten, 21\_077\_1*. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

**Verwilligen, J.; Eloot, K.; Plancke, Y.; Meire, D.** (2022a). Actualisatie evaluatiemethodiek Schelde-Estuarium: deelrapport 2. Bevaarbaarheid. Versie 5.0. *WL Rapporten, 19\_065\_2*. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

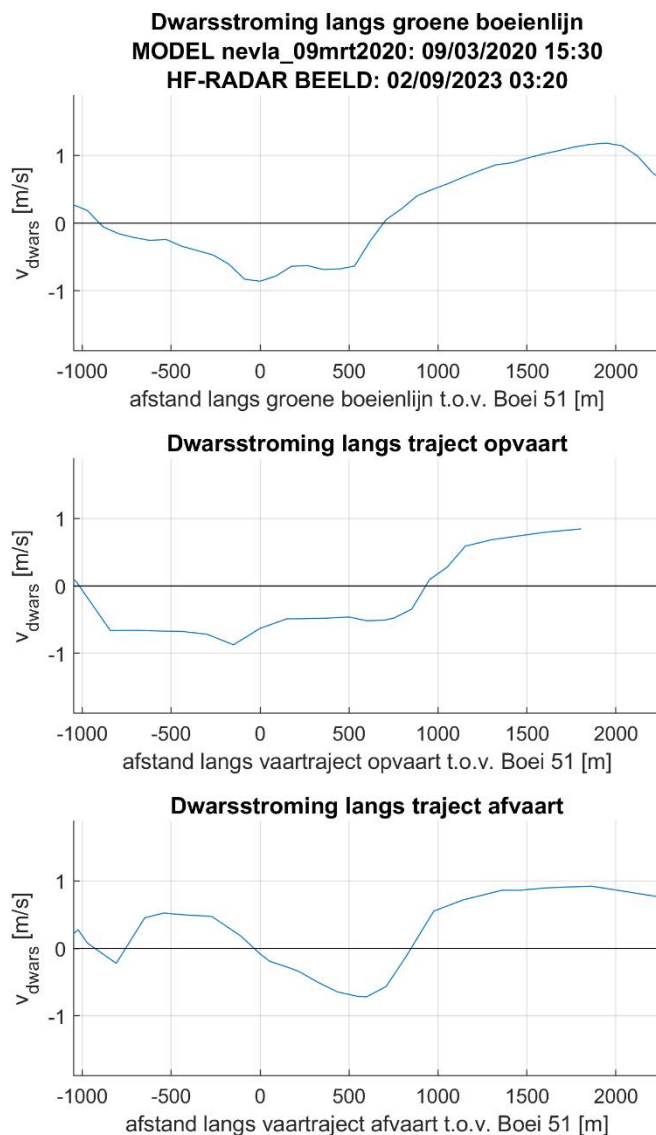
**Verwilligen, J.; Eloot, K.; Plancke, Y.; Meire, D.** (2022b). Actualisatie evaluatiemethodiek Schelde-Estuarium: deelrapport 2. Bevaarbaarheid. Versie 5.0. *WL Rapporten, 19\_065\_2*. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. Available at: <http://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=349541>

# Bijlage 1 Dwarscomponent van de stroming in geselecteerde HF-radarbeelden



Figuur 73 – Dwarsstroming langs groene boeienlijn en langs van de vaartracés voor opvaart (groen) en afvaart (rood) voor stroombeeld van 01/09/2023 02:20.

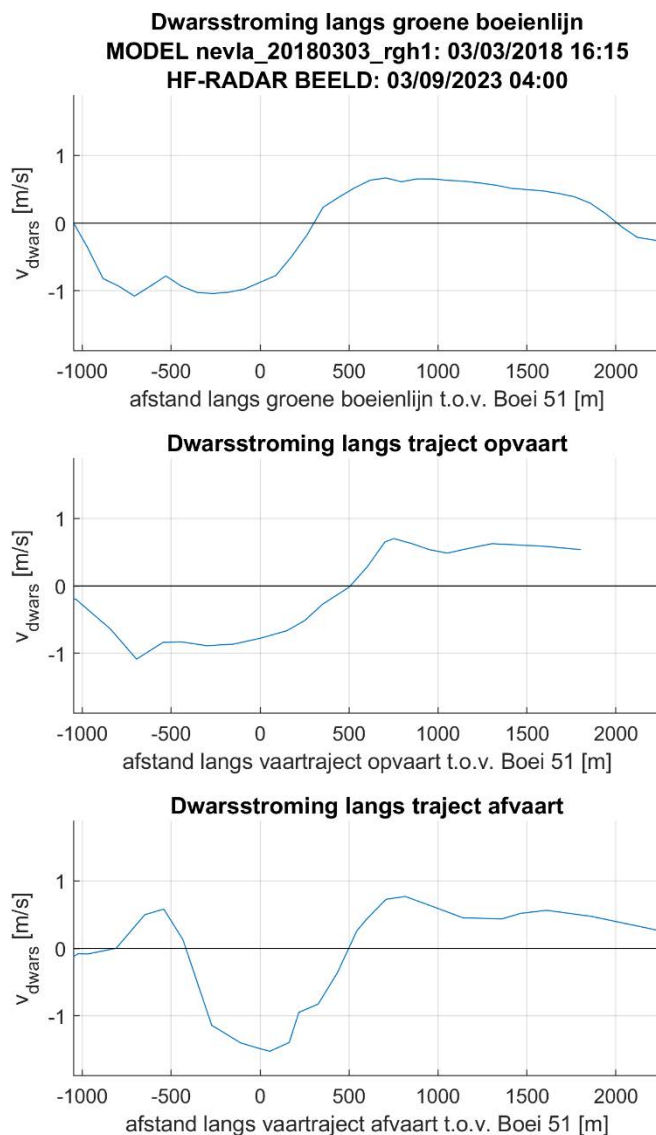




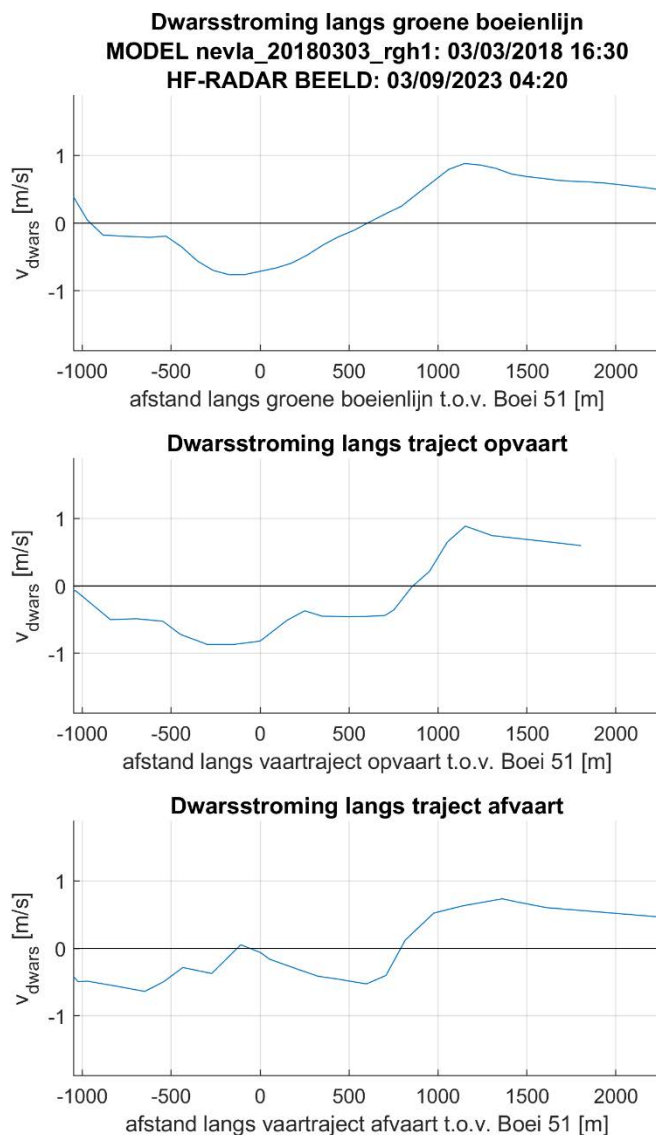
---

Figuur 74 – Dwarsstroming langs groene boeienlijn en langs van de vaartracés voor opvaart (groen) en afvaart (rood) voor stroombeeld van 02/09/2023 03:20.

---



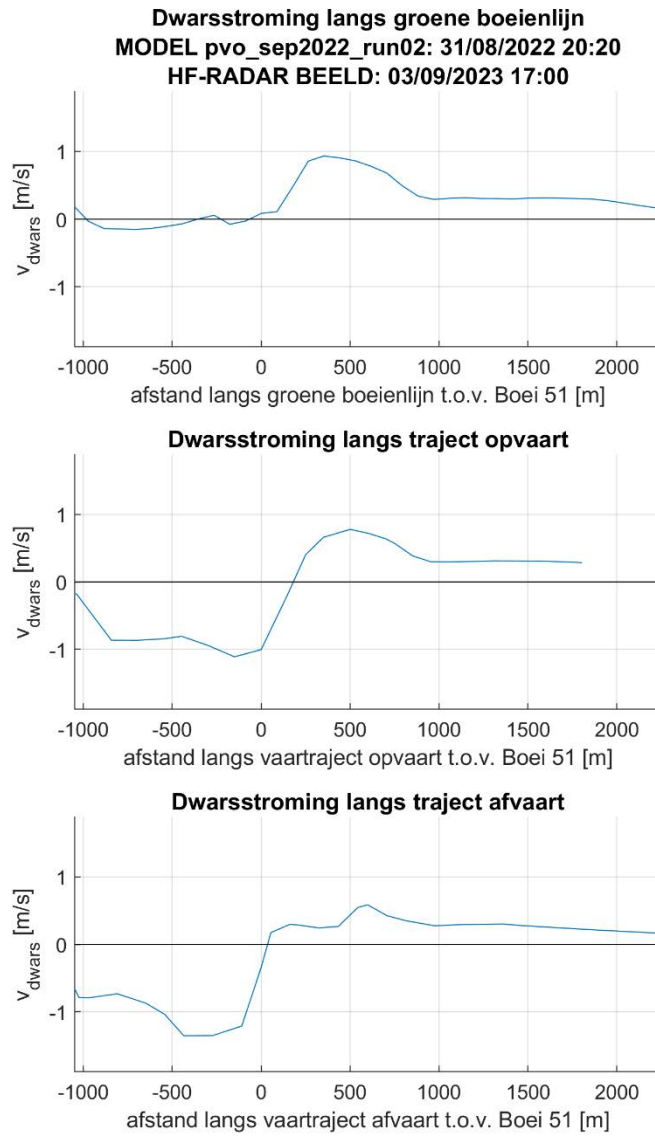
Figuur 75 – Dwarsstroming langs groene boeienlijn en langs van de vaartracés voor opvaart (groen) en afvaart (rood) voor stroombeeld van 03/09/2023 04:00.



---

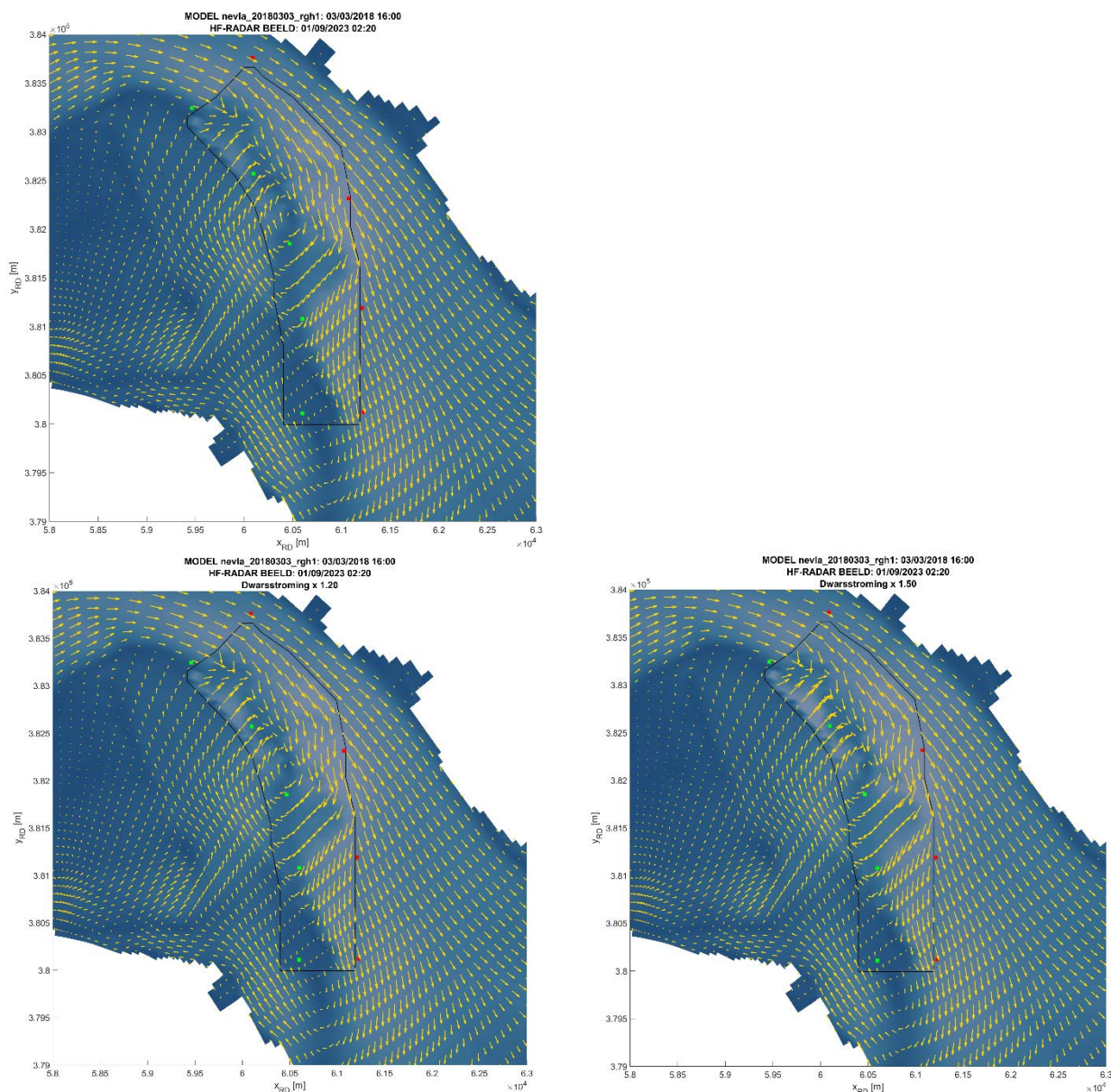
Figuur 76 – Dwarsstroming langs groene boeienlijn en langs van de vaartracés voor opvaart (groen) en afvaart (rood) voor stroombeeld van 03/09/2023 04:20.

---

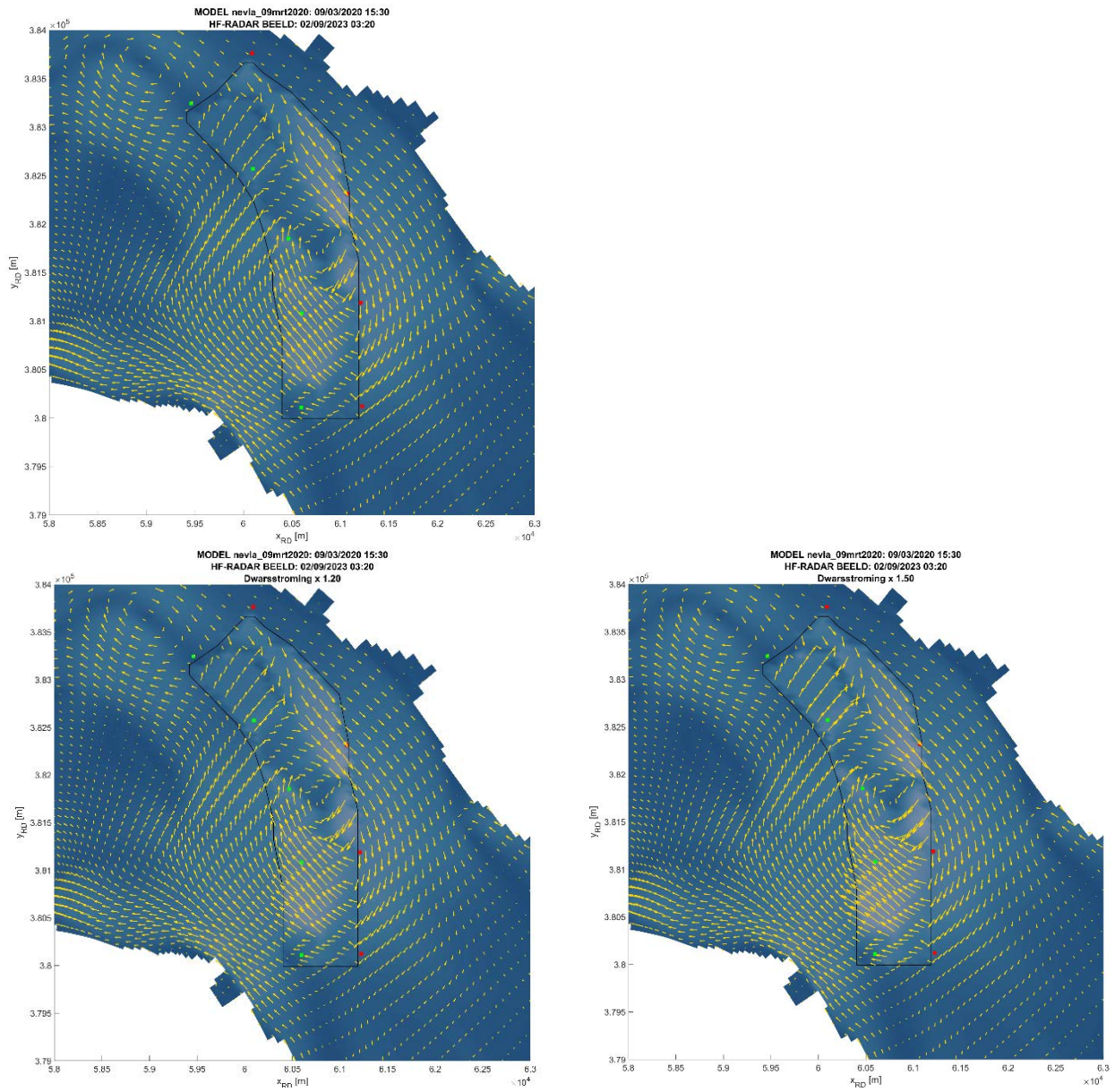


Figuur 77 – Dwarsstroming langs groene boeienlijn en langs van de vaartracés voor opvaart (groen) en afvaart (rood) voor stroombeeld van 03/09/2023 17:00.

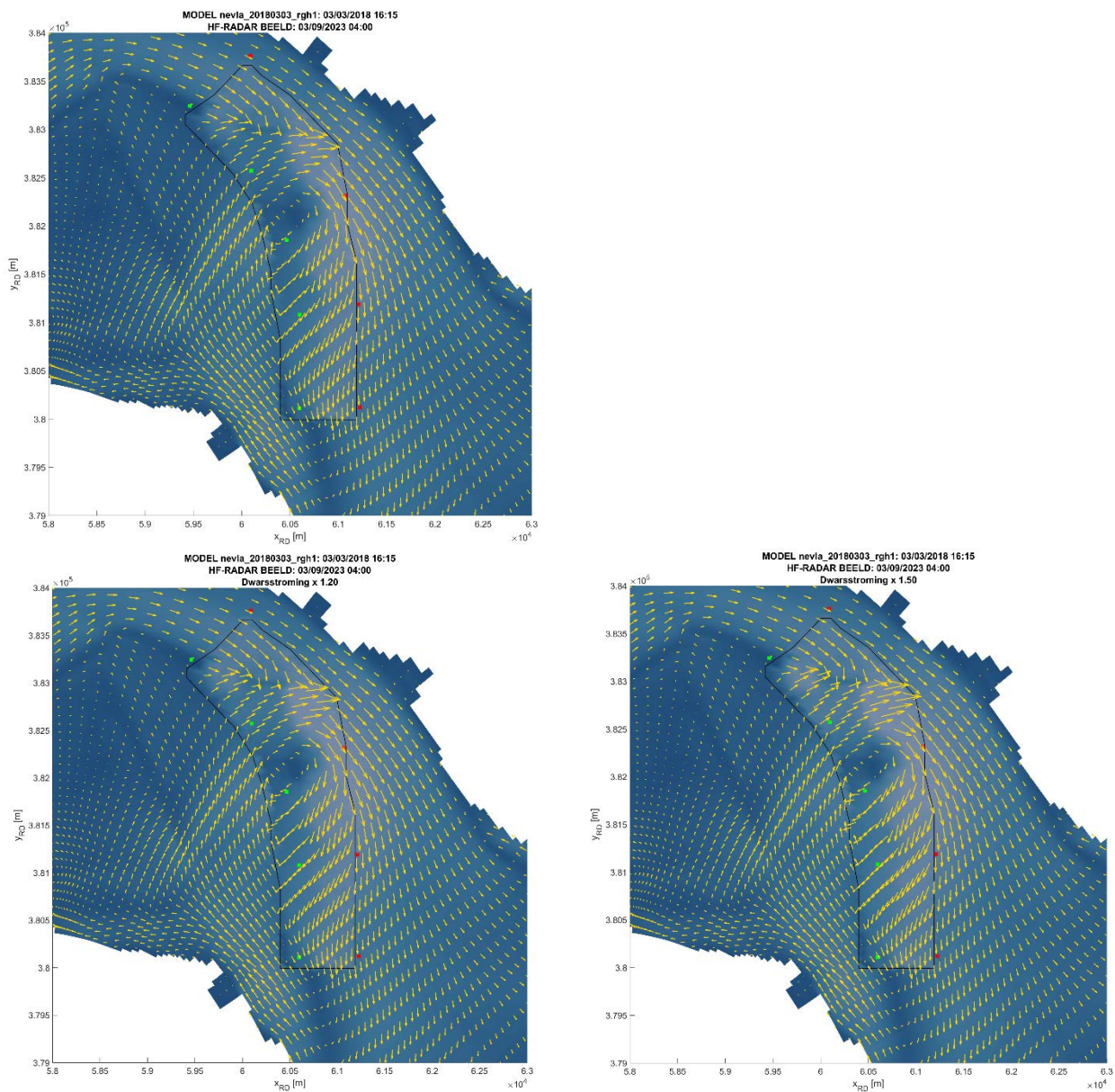
## Bijlage 2 Geconstrueerde stroombeelden met artificieel verhoogde dwarscomponent



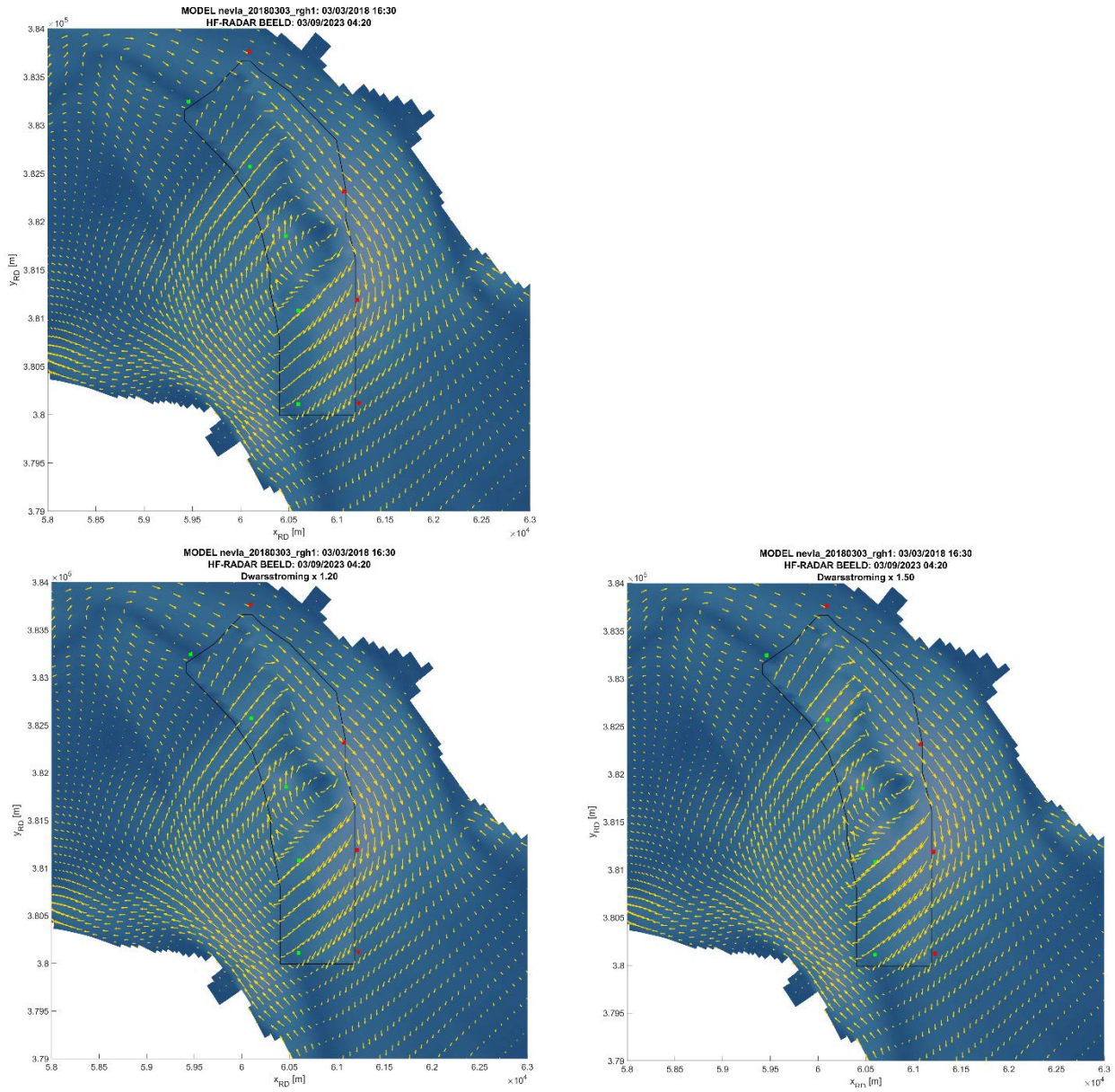
Figuur 78 – Stroombeeld van 01/09/2023 02:20 (linksboven) en stroombeelden waarin de dwarscomponent met 20% (linksonder) en 50% (rechtsonder) is verhoogd.



Figuur 79 – Stroombeeld van 02/09/2023 03:20 (linksboven) en stroombeelden waarin de dwarscomponent met 20% (linksonder) en 50% (rechtsonder) is verhoogd.

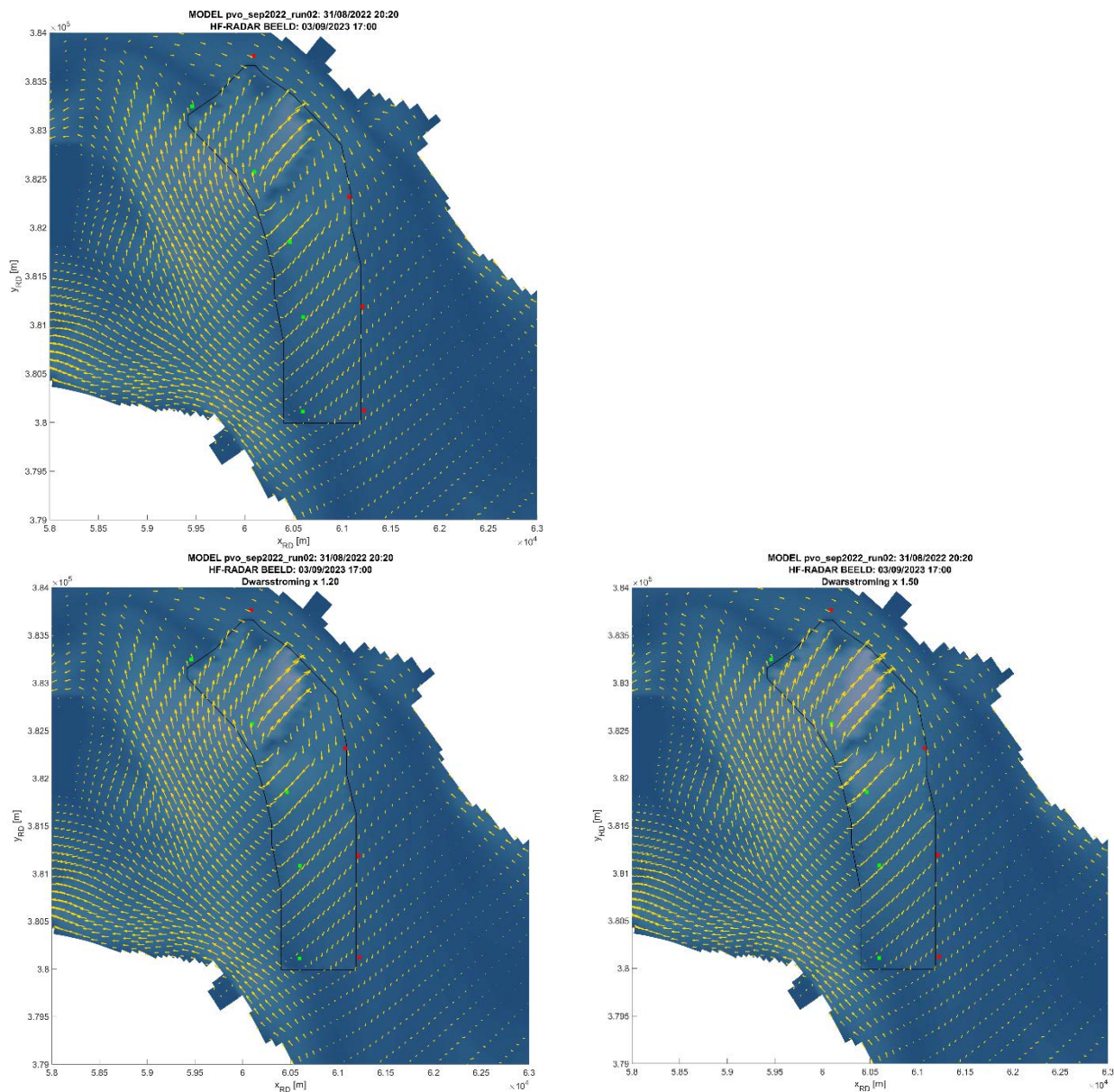


Figuur 80 – Stroombeeld van 03/09/2023 04:00 (linksboven) en stroombeelden waarin de dwarscomponent met 20% (linksonder) en 50% (rechtsonder) is verhoogd.



Figuur 81 – Stroombeeld van 03/09/2023 04:20 (linksboven) en stroombeelden waarin de dwarscomponent met 20% (linksonder) en 50% (rechtsonder) is verhoogd.





Figuur 82 – Stroombeeld van 03/09/2023 17:00 (linksboven) en stroombeelden waarin de dwarscomponent met 20% (linksonder) en 50% (rechtsonder) is verhoogd.

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)