



Vlaanderen
is wetenschap



19_065_2
WL rapporten

Actualisatie evaluatiemethodiek Schelde-Estuarium

Deelrapport 2
Bevaarbaarheid (scheepsbewegingen)

DEPARTEMENT
**MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN**

waterbouwkundiglaboratorium.be

Actualisatie evaluatiemethodiek Schelde-Estuarium

Deelrapport 2 – Bevaarbaarheid (scheepsbewegingen)

Verwilligen, J.; Eloot, K.; Plancke, Y.; Meire, D.

Juridische kennisgeving

Het Waterbouwkundig Laboratorium is van mening dat de informatie en standpunten in dit rapport onderbouwd worden door de op het moment van schrijven beschikbare gegevens en kennis.

De standpunten in deze publicatie zijn deze van het Waterbouwkundig Laboratorium en geven niet noodzakelijk de mening weer van de Vlaamse overheid of één van haar instellingen.

Het Waterbouwkundig Laboratorium noch iedere persoon of bedrijf optredend namens het Waterbouwkundig Laboratorium is aansprakelijk voor het gebruik dat gemaakt wordt van de informatie uit dit rapport of voor verlies of schade die eruit voortvloeit.

Copyright en wijze van citeren

© Vlaamse overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Waterbouwkundig Laboratorium 2022
D/2022/3241/004

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Verwilligen, J.; Eloot, K.; Plancke, Y.; Meire, D. (2022). Actualisatie evaluatiemethodiek Schelde-Estuarium: Deelrapport 2 – Bevaarbaarheid. Versie 5.0. WL Rapporten, 19_065_2. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

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

Documentidentificatie

Opdrachtgever:	VNSC	Ref.:	WL2022R19_065_2
Trefwoorden (3-5):	VNSC, bevaarbaarheid, Schelde-estuarium, oevereffecten, kielspeling, dwarsstroming, evaluatiemethodiek.		
Kennisdomeinen:	Havens en vaarwegen > Manoeuvreergedrag > Invloed kielspeling > Simulaties Havens en vaarwegen > Manoeuvreergedrag > Oevers > Simulaties Havens en vaarwegen > Manoeuvreergedrag > Stroming > Simulaties Havens en vaarwegen > Veiligheid > Risico-analyse > Simulaties		
Tekst (p.):	72	Bijlagen (p.):	14
Vertrouwelijk:	☒ Nee	☒ Online beschikbaar	

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

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Eloot, K.; Plancke, Y.	Getekend door: Katrien Eloot (Signature) Getekend op: 2022-01-17 15:28:23 +01:0 Reden: Ik keur dit document goed Getekend door: Yves Plancke (Signature) Getekend op: 2022-01-18 15:24:15 +01:0 Reden: Ik keur dit document goed <i>Katrien Eloot</i> <i>Yves Plancke</i>
Projectleider:	Meire, D.	Getekend door: Dieter Meire (Signature) Getekend op: 2022-02-03 09:34:48 +01:0 Reden: Ik keur dit document goed <i>Dieter Meire</i>

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Bellafkih, A.	Getekend door: Abdelkarim Bellafkih (Sig) Getekend op: 2022-01-18 10:21:25 +01:0 Reden: Ik keur dit document goed <i>Abdelkarim Bellafkih</i>
-----------------	---------------	---



Abstract

Het Waterbouwkundig Laboratorium ontwikkelde een methodologie om de bevaarbaarheid van een vaarweg te beoordelen op basis van fasttime vaarsimulaties. De signaalparameters afstand tot referentietraject (als maat voor het ruimtegebruik door het schip) en roergebruik (als maat voor de manoeuvreerreserve van het schip) worden hierbij toegepast als maat voor de bevaarbaarheid. De methode laat toe om een kwalitatieve beoordeling van de bevaarbaarheid van een vaaromgeving uit te voeren en is aldus toepasbaar voor het vergelijken van verschillende scenario's (historische evolutie, toekomstige morfologische ontwikkelingen, bagger- en stortstrategieën).

De methodologie werd toegepast op de bevaarbaarheid van de Westerschelde en Beneden-Zeeschelde met als doel om opgenomen te worden in de evaluatiemethodiek van het Schelde-estuarium die zesjaarlijks uitgevoerd wordt onder leiding van de Vlaams-Nederlandse Schelde-Commissie. Ter illustratie van de evaluatiemethodiek werd de methodologie ingezet voor drie condities van het Schelde-estuarium overeenkomstig de jaren 2011, 2015 en 2019.

De signaalparameters voor bevaarbaarheid blijken gunstig toegepast te kunnen worden voor het identificeren van de evolutie van de bevaarbaarheid van het Schelde-estuarium.

De belangrijkste nadelige evolutie in het Schelde-estuarium tussen 2011 en 2019 voor wat betreft bevaarbaarheid blijkt de toename van de dwarsstroming omstreeks hoog water. Deze invloed blijkt het hoogst in de vaarweg tussen Hansweert en Walsoorden. Een gunstige evolutie is waarneembaar te Bath, waar echter de conditie uit 2011 aantoont dat een voldoende diepte in de bocht van Bath noodzakelijk is voor een voldoende bevaarbaarheid van deze bocht. Verder is het onderhoud van de vaarwegbreedte in de Pas van Borssele een aandachtspunt.

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de figuren	VII
1 Situering.....	1
1.1 Evaluatiemethodiek.....	1
1.2 Nautische aspecten - bevaarbaarheid	1
1.3 Kenniscentrum varen in ondiep en beperkt water	1
1.4 Fasttime simulaties met track controller	1
2 Evaluatiemethodiek.....	2
2.1 Piramide toegankelijkheid.....	2
2.2 Update piramide.....	2
3 Evaluatiemethodiek bevaarbaarheid	4
3.1 Maatgevend schip	4
3.2 Track-controller	5
3.3 Vaartraject	6
3.4 Vaarsnelheden.....	8
3.5 Vaaromgeving.....	10
3.5.1 Mesh bathymetrie	10
3.5.2 Tijcondities.....	10
3.6 Scenariomatrix.....	11
3.7 Verwerking simulatieresultaten	14
3.7.1 KMZ-export per simulatie.....	14
3.7.2 Lijngrafieken in functie van baanafstand of tijd.....	16
3.7.3 2D-contourplot in functie van baanafstand en tijd	17
4 Resultaten 2019.....	18
4.1 Resultaten voor scenario opvaart 2019	18
4.1.1 Kielspelingen.....	18
4.1.2 Vaarsnelheden.....	19
4.1.3 Giersnelheden	20
4.1.4 Langsstroming.....	21
4.1.5 Dwarsstroming en stromingsgradiënt	23

4.1.6	Afstand tot referentietraject	25
4.1.7	Roergebruik	31
4.2	Resultaten voor scenario afvaart 2019.....	34
4.2.1	Afstand tot referentietraject	34
4.2.2	Roergebruik	37
5	Resultaten bevaarbaarheid voor historische condities	41
5.1	Opvaart.....	41
5.2	Afvaart	53
6	Samenvatting.....	69
7	Referenties	72
Bijlage 1	Pilot Card	B1
Bijlage 2	Baanafstanden langsheen referentietraject.....	B3
Bijlage 3	ALS-analyse opvaart en afvaart.....	B10
Bijlage 4	Visualisatie bodemmesh.....	B12
Bijlage 5	Benodigde simulaties.....	B14

Lijst van de figuren

Figuur 1 – Communicatie indicator “Bevaarbaarheid” in de evaluatiemethodiek, zoals weergegeven in Maris et al. (2014).....	2
Figuur 2 – Extra toetsparameter binnen communicatie indicator “Hydrodynamiek” in de evaluatiemethodiek, voorgesteld voor de update van de evaluatiemethodiek	3
Figuur 3 – Visualisatie van het 3D-model van een ULCS met afmetingen 399 m x 54.0 m zoals beschikbaar in de simulatievloot van WL	4
Figuur 4 – Fuzzy Inference System voor de fuzzy controller toegepast in de track-controller	5
Figuur 5 – Illustratie referentietrajecten te Bath voor opvaart (wit) en afvaart (blauw) ten opzichte van baggertracé (groen en rood)	7
Figuur 6 – Illustratie referentietrajecten te Walsoorden voor opvaart (wit) en afvaart (blauw) ten opzichte van baggertracé (groen en rood).....	7
Figuur 7 – Vergelijking van referentietraject opvaart (wit) met AIS-trajecten van opvarende ULCS (geel)	8
Figuur 8 – Aangenomen vaarsnelheden door het water tijdens de fasttime vaarsimulaties in opvaart.....	9
Figuur 9 – Aangenomen vaarsnelheden door het water tijdens de fasttime vaarsimulaties in afvaart.....	9
Figuur 10 – Tij te Vlissingen, Hansweert en Bath voor opvaart simulatie scenario 2019 gerefereerd naar aanvangstijdstip simulatie	12
Figuur 11 – Tij te Vlissingen, Hansweert en Bath voor afvaart simulatie scenario 2019 gerefereerd naar aanvangstijdstip simulatie	13
Figuur 12 – Voorbeeld van KMZ-export in Google Earth voor simulatie 01h10 in opvaart 2019 bij passage Bath	15
Figuur 13 – Lijngrafiek voor vaarsnelheid over de grond in functie van baanparameter met statistieken over de tijd (scenario opvaart 2019)	16
Figuur 14 – Lijngrafiek voor vaarsnelheid over de grond in functie van aanvangstijd simulatie met statistieken over het traject (scenario opvaart 2019).....	17
Figuur 15 – 2D-contourplot van de snelheid over de grond in functie van baanafstand en aanvangstijd voor scenario opvaart 2019	17
Figuur 16 – Statistische analyse van kielspeling langs referentietraject voor scenario opvaart 2019.....	18
Figuur 17 – Statistische analyse van kielspeling langs referentietraject voor scenario opvaart 2019 (detail)	19
Figuur 18 – Statistische analyse van kielspeling in functie van tijd voor scenario opvaart 2019.....	19
Figuur 19 – Vergelijking tussen vaarsnelheden zoals bekomen uit AIS-analyse en zoals toegepast tijdens fasttime vaarsimulaties voor scenario opvaart 2019	20
Figuur 20 – Statistische analyse van giersnelheden langs referentietraject voor scenario opvaart 2019.....	20
Figuur 21 – Evolutie van langsstroming en giersnelheid in bocht van Bath op basis van 2D-contourplot voor scenario opvaart 2019	21
Figuur 22 – Statistische analyse van langsstroming (absolute waarde) langs referentietraject voor scenario opvaart 2019	22
Figuur 23 – Statistische analyse van dwarsstroming in functie van tijd voor scenario opvaart 2019	22

Figuur 24 – KMZ-weergave van de belangrijkste langsstroming in de simulatie in opvaart van scenario 2019 (simulatie 11h20 te Overloop Hansweert).....	22
Figuur 25 – Statistische analyse van dwarsstroming langs referentietraject voor scenario opvaart 2019	23
Figuur 26 – KMZ-weergave van de belangrijkste dwarsstroming in simulatie 12h40 te Ossenis in opvaart scenario 2019	24
Figuur 27 – KMZ-weergave van de dwarsstroming opwaarts Bath bij vloed in simulatie 10h50 bij opvaart scenario 2019	24
Figuur 28 – Statistische analyse van stromingsgradiënt langs referentietraject voor scenario opvaart 2019	25
Figuur 29 – KMZ-weergave van de belangrijkste stromingsgradiënt in scenario opvaart 2019 (13h00 te Valkenisse).....	25
Figuur 30 – Statistische analyse afstand tot referentietraject in functie van km aanduiding langs referentietraject voor scenario opvaart 2019.....	27
Figuur 31 – Statistische analyse afstand tot referentietraject in functie van tijd voor scenario opvaart 2019	27
Figuur 32 – 2D-contourplot voor giersnelheid (boven), dwarsstroming (midden) en afstand tot referentietraject (onder) voor scenario opvaart 2019.....	28
Figuur 33 – KMZ-weergave grote afstand tot referentietraject bij vloedconditie te bocht Saeftinge (10h50) voor scenario opvaart 2019.....	29
Figuur 34 – KMZ-weergave grote afstand tot referentietraject bij vloedconditie te bocht Hansweert (12h40) voor scenario opvaart 2019.....	29
Figuur 35 – KMZ-weergave grote afstand tot referentietraject bij vloedconditie te bocht Hansweert (12h20) voor scenario opvaart 2019.....	30
Figuur 36 – KMZ-weergave grote afstand tot referentietraject bij ebconditie bocht Hansweert (13h50) voor scenario opvaart 2019	30
Figuur 37 – Statistische analyse roergebruik langs referentietraject voor scenario opvaart 2019	32
Figuur 38 – Statistische analyse roergebruik in functie van tijd voor scenario opvaart 2019	32
Figuur 39 – 2D-contourplot voor giersnelheid (boven), kielspeling (midden) en afstand tot roerhoek (onder) voor scenario opvaart 2019.....	33
Figuur 40 – KMZ-weergave grootste roergebruik bij laag water te Bath (05h30) voor scenario opvaart 2019 (detail Bath)	34
Figuur 41 – 2D-contourplot voor giersnelheid (boven), dwarsstroming (midden) en afstand tot referentietraject (onder) voor scenario afvaart 2019.....	35
Figuur 42 – KMZ-weergave afstand tot referentietraject bij ebstroom te Hansweert (05h00) voor scenario afvaart 2019.....	36
Figuur 43 – KMZ-weergave afstand tot referentietraject bij vloedstroom te Borssele (09h10) voor scenario afvaart 2019.....	36
Figuur 44 – 2D-contourplot voor giersnelheid (boven), kielspeling (midden) en afstand tot roerhoek (onder) voor scenario afvaart 2019.....	38
Figuur 45 – KMZ-weergave roergebruik bij ebstroom te Bath (06h20) voor scenario afvaart 2019 (detail Bath)	39
Figuur 46 – KMZ-weergave roergebruik bij ebstroom te Europaterminal (07h30) voor scenario afvaart 2019	39

Figuur 47 – KMZ-weergave roergebruik bij vloedstroom te Hansweert (12h30) voor scenario afvaart 2019	40
Figuur 48 – Stroompatronen uit het hydrodynamische numeriek model ter hoogte van Hansweert, berekend op basis van een bathymetrie van 2019 (links) en 2011 (rechts).....	42
Figuur 49 – 2D-contourplots voor afstand tot referentietraject en roergebruik voor opvaart in 2019 (boven), 2015 (midden) en 2011 (onder)	43
Figuur 50 – 2D-contourplots (detail Bath) voor afstand tot referentietraject en roergebruik voor opvaart in 2019 (boven), 2015 (midden) en 2011 (onder).....	44
Figuur 51 – KMZ-weergave van vaarbaanplot in opwaartse deel bocht van Bath bij laag water (05h20) voor opvaart in 2019 (links), 2015 (midden) en 2011 (rechts).....	45
Figuur 52 – 2D-contourplots (detail Bath) voor kielspeling en giersnelheid voor opvaart in 2019 (boven), 2015 (midden) en 2011 (onder)	46
Figuur 53 – KMZ-weergave van vaarbaanplot te Valkenisse bij hoog water (12h50) voor opvaart in 2019 (links), 2015 (midden) en 2011 (rechts)	47
Figuur 54 – 2D-contourplots (detail Hansweert) voor afstand tot referentietraject en roergebruik voor opvaart in 2019 (boven), 2015 (midden) en 2011 (onder).....	48
Figuur 55 – 2D-contourplots voor dwarsstroming voor opvaart en afvaart in 2019 (boven), 2015 (midden) en 2011 (onder).....	49
Figuur 56 – KMZ-weergave van vaarbaanplot opwaarts Hansweert bij hoog water (12h30) voor opvaart in 2019 (links), 2015 (midden) en 2011 (rechts)	50
Figuur 57 – KMZ-weergave van vaarbaanplot te Ossenissee (12h50) voor opvaart in 2019 (links), 2015 (midden) en 2011 (rechts).....	51
Figuur 58 – KMZ-weergave van vaarbaanplot te Hansweert bij laag water (05h30) voor opvaart in 2019 (links), 2015 (midden) en 2011 (rechts).....	52
Figuur 59 – 2D-contourplots voor afstand tot referentietraject en roergebruik voor afvaart in 2019 (boven), 2015 (midden) en 2011 (onder)	55
Figuur 60 – 2D-contourplots voor schroeftoerental voor opvaart en afvaart in 2019 (boven), 2015 (midden) en 2011 (onder).....	56
Figuur 61 – 2D-contourplots (detail Bath) voor afstand tot referentietraject en roergebruik voor afvaart in 2019 (boven), 2015 (midden) en 2011 (onder).....	57
Figuur 62 – KMZ-weergave van vaarbaanplot in bocht van Bath bij laag water (08h10) voor afvaart in 2019 (links), 2015 (midden) en 2011 (rechts)	58
Figuur 63 – 2D-contourplots (detail Bath) voor kielspeling en giersnelheid voor afvaart in 2019 (boven), 2015 (midden) en 2011 (onder)	59
Figuur 64 – KMZ-weergave van vaarbaanplot te Bocht van Saeftinghe bij laag water (08h10) voor afvaart in 2019 (links), 2015 (midden) en 2011 (rechts)	60
Figuur 65 – 2D-contourplots (detail Hansweert) voor afstand tot referentietraject en roergebruik voor afvaart in 2019 (boven), 2015 (midden) en 2011 (onder).....	61
Figuur 66 – 2D-contourplots (detail Hansweert) voor kielspeling en dwarsstroming voor afvaart in 2019 (boven), 2015 (midden) en 2011 (onder).....	62
Figuur 67 – KMZ-weergave van vaarbaanplot te Ossenissee bij hoog water (12h30) voor afvaart in 2019 (links), 2015 (midden) en 2011 (rechts).....	63

Figuur 68 – KMZ-weergave van vaarbaanplot te Hansweert bij ebstroom (04h00) voor afvaart in 2019 (links), 2015 (midden) en 2011 (rechts)	64
Figuur 69 – KMZ-weergave van vaarbaanplot te Boei12A bij laag water (05h00) voor afvaart in 2019 (links), 2015 (midden) en 2011 (rechts)	65
Figuur 70 – 2D-contourplots (detail Borssele) voor afstand tot referentietraject en roergebruik voor afvaart in 2019 (boven), 2015 (midden) en 2011 (onder)	66
Figuur 71 – 2D-contourplots (detail Borssele) voor kielspeling en dwarsstroming voor afvaart in 2019 (boven), 2015 (midden) en 2011 (onder)	67
Figuur 72 – KMZ-weergave van vaarbaanplot te Borssele bij vloedstroom (09h00) voor afvaart in 2019 (links), 2015 (midden) en 2011 (rechts)	68

1 Situering

1.1 Evaluatiemethodiek

6-jaarlijks wordt een evaluatie opgemaakt door de VNSC omtrent de toestand van het Schelde - estuarium, op basis van de drie hoofdfuncties: veiligheid, natuurlijkheid en toegankelijkheid. Deze evaluatie wordt opgemaakt op basis van een vooropgestelde evaluatiemethodiek (Holzhauer *et al.*, 2011). Na de T2015, de evaluatie van de monitoringsresultaten voor de periode 2010-2015, wordt gewerkt aan een actualisatie van deze evaluatiemethodiek, die zal toegepast worden in de evaluatie van de periode 2016-2021 (T2021). In het kader van deze actualisatie wordt door het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) nagegaan of en hoe enkele parameters zouden opgenomen kunnen worden in de evaluatiemethodiek voor het Schelde-estuarium. Hierbij wordt gekeken naar getijvoortplanting (bij stormen), nautische aspecten en sedimentbalans. In dit rapport wordt een methode uitgewerkt voor de evaluatiemethodiek van de nautische aspecten, onderdeel van de functietoegankelijkheid.

1.2 Nautische aspecten - bevaarbaarheid

Ter beoordeling van de nautische aspecten, onderdeel van de functie toegankelijkheid, wordt een criterium voor de bevaarbaarheid van de Westerschelde ontwikkeld (opgenomen onder de nieuwe communicatie-indicator Hydrodynamiek van de geactualiseerde evaluatiemethodiek). In dit rapport wordt de methode voorgesteld op basis waarvan de bevaarbaarheid van een maatgevend containerschip beoordeeld kan worden (H2). De methode wordt in H5 toegepast op enkele historische condities van het Schelde-estuarium (2011, 2015, 2019), waarna een voorstel gedaan wordt om de ontwikkelde evaluatiemethodiek voor bevaarbaarheid te integreren in de evaluatiemethodiek voor het Schelde-estuarium (H2).

1.3 Kenniscentrum varen in ondiep en beperkt water

Het Waterbouwkundig Laboratorium en de afdeling Maritieme Techniek van de Universiteit Gent vormen samen het kenniscentrum voor varen in ondiep en beperkt water. Deze expertise is erg relevant bij de beoordeling van de bevaarbaarheid van de Westerschelde, waar fenomenen als ondiep water, oevereffecten en stroming een belangrijke impact hebben op het vaargedrag van het schip. In de voorgestelde methode ter beoordeling van de bevaarbaarheid van de Westerschelde werd getracht om zo goed als mogelijk de kennis beschikbaar in het kenniscentrum toe te passen voor de beoordeling van de bevaarbaarheid.

1.4 Fasttime simulaties met track controller

In het Schelde-estuarium wordt de bevaarbaarheid beïnvloed door een samenspel van verschillende parameters zoals bochten, vaarsnelheden, oevereffecten, (dwars)stromingen, kielspeling, etc. Door dit complexe samenspel is het niet mogelijk om de bevaarbaarheid te beoordelen op basis van individuele parameters, maar wordt een simulatie gemaakt van het vaargedrag in een representatieve vaaromgeving die alle bovenvermelde parameters in rekening brengt.

De methode die hiervoor toegepast wordt zijn fasttime vaarsimulaties, waarbij het schip langs een vooropgesteld traject 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.

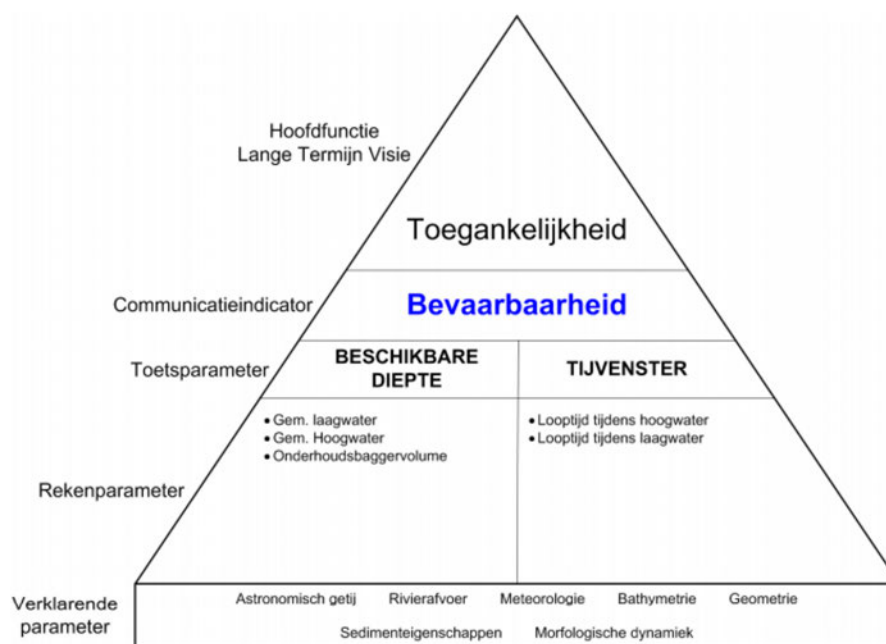
De beoordeling van de bevaarbaarheid is gebaseerd op de fasttime simulatie met track controller van op- en afvaarten van de Westerschelde bij maatgevende condities.

2 Evaluatiemethodiek

Binnen de VNSC wordt zesjaarlijks een evaluatie uitgevoerd van het Schelde estuarium op basis van zijn hoofdfuncties (veiligheid, toegankelijkheid en natuurlijkheid). Om deze evaluatie uit te voeren wordt gebruik gemaakt van een evaluatiemethodiek, die werd opgesteld voor de eerste evaluatie in 2009 (Depreiter *et al.*, 2014) en nadien werd geupdated (Maris *et al.*, 2014). Tussen de T2015 (Barneveld *et al.*, 2018), de evaluatie voor de periode 2010-2015 (T2015) en de geplande rapportage T2021 voor de periode 2016-2021, wordt een actualisatie van de evaluatiemethodiek voorzien. Hierbij wordt door het WL nagegaan op welke wijze de hoofdfunctie toegankelijkheid beter geëvalueerd kan worden.

2.1 Piramide toegankelijkheid

De communicatie-indicator “Bevaarbaarheid” zoals nu opgenomen is weergegeven in Figuur 1 (Maris *et al.*, 2014). Hierbij wordt enkel gekeken naar getijkarakteristieken, met beschikbare diepte en tijvenster, bepaald op basis van looptijden hoog- en laagwater. In de huidige methodiek worden dus geen nautische aspecten meegenomen, waardoor de evolutie van bepaalde morfologische en hydrodynamische variabelen in het systeem i.r.t. bevaarbaarheid niet volledig is.



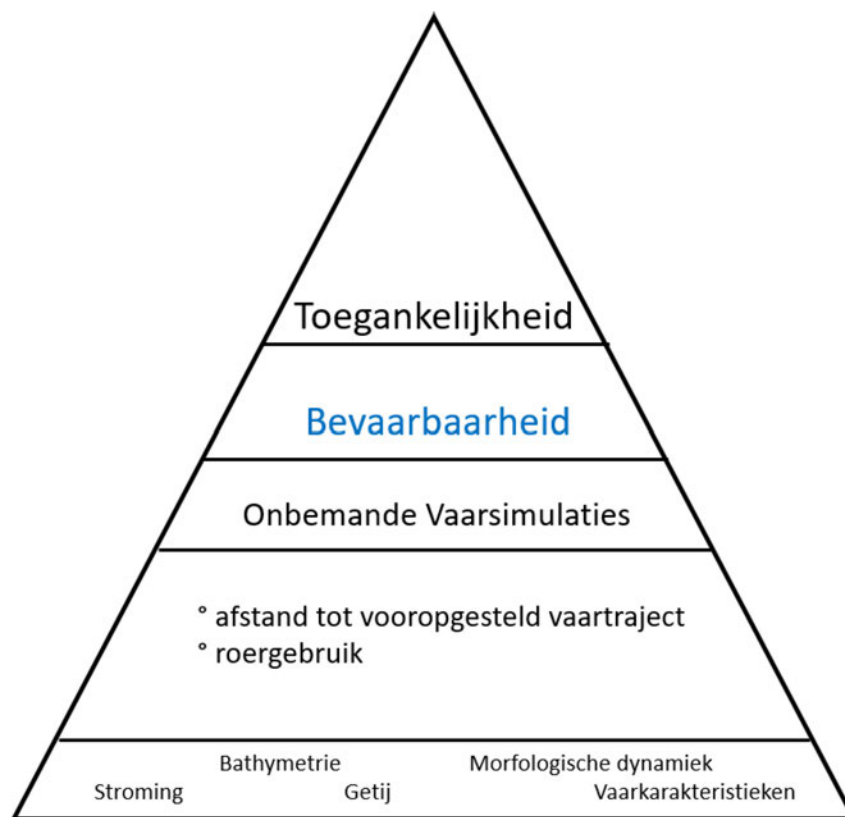
Figuur 1 – Communicatie indicator “Bevaarbaarheid” in de evaluatiemethodiek, zoals weergegeven in Maris *et al.* (2014)

2.2 Update piramide

De combinatie van bochten, vaarsnelheden, oevereffecten, dwarsstromingen, kielspeling ... bepalen de bevaarbaarheid, maar kunnen niet allemaal individueel worden ingeschat. Daarvoor worden fasttime vaarsimulaties voorgesteld, waarbij de combinatie van deze verschillende effecten automatisch in rekening wordt gebracht. Het effect van wind wordt wel niet meegenomen in de vaarsimulaties, aangezien deze niet als systeem parameter van het Schelde-estuarium zelf beschouwd kan worden.

Het uitgangspunt voor de evaluatie van de bevaarbaarheid zijn de systeemaspecten die de bevaarbaarheid mogelijk kunnen beïnvloeden. De voorgestelde toets- en rekenparameters zijn dan ook geen operationele inschatting van de bevaarbaarheid, maar een objectieve methodiek voor het inschatten van tendensen. Het garanderen van een veilige doorvaart voor schepen in het Schelde-estuarium vormt dan ook geen onderdeel van de Evaluatiemethodiek, dit wordt gedaan door de Gemeenschappelijke Nautische Autoriteit (GNA). De externe ontwikkelingen (veranderingen in scheepstypes en dusdanig karakteristieken,...) worden buiten beschouwing gelaten.

In Figuur 2 is het voorstel weergegeven waarin de resultaten van de fasttime vaarsimulaties mee worden opgenomen. Deze figuur beschouwt enkel de extra toetsparameter m.b.t. de fasttime vaarsimulaties, en is met andere woorden geen voorstel voor de volledige piramide “bevaarbaarheid” (binnen de geactualiseerde methodiek hernoemd tot “Hydrodynamiek”. De simulaties geven input aan 2 rekenparameters: met name de intensiteit van de roerwerking (% t.o.v. maximale roerhoek) en uitwijkafstand van de vaarweg (in m). Voor deze rekenparameters wordt een trend t.o.v. de referentiesituatie bepaald, en een significante toename als ongunstig beschouwd.



Figuur 2 – Extra toetsparameter binnen communicatie indicator “Hydrodynamiek” in de evaluatiemethodiek, voorgesteld voor de update van de evaluatiemethodiek

Een overzicht van de noodzakelijke input voor het uitvoeren van simulaties is weergegeven in Bijlage. Als referentiejaar wordt het jaar 2011 vooropgesteld. Dit startjaar is geselecteerd na de derde verruiming, waardoor geen rekening dient gehouden te worden met sterke veranderingen van het vaartracé of een onrealistische referentie door sterk verschillende kielspelingen. Ook valt dit ogenblijk quasi overeen met de met de versnelling van de schaalvergroting in de scheepvaart. Bovendien is deze keuze voor 2011 identiek als deze waarop de evolutie van de onderhoudsbaggervolumes wordt beschouwd.

Als frequentie wordt een driejaarlijkse update vooropgesteld, zodat per evaluatiecyclus (T-rapport) 2 nieuwe updates beschikbaar zijn. Deze frequentie komt overeen met de bathymetrische opmeting in de Westerschelde, volgens de MWTL monitoring.

3 Evaluatiemethodiek bevaarbaarheid

Zoals geïntroduceerd in H1 wordt de beoordeling van de bevaarbaarheid¹ van het Schelde-estuarium gebaseerd op fasttime vaarsimulaties. Deze methode kan opgedeeld worden in verschillende deelopdrachten:

1. definitie maatgevend schip bevaarbaarheid en bijhorende manoeuvreermodellen;
2. definitie track-controller;
3. definitie vaartraject voor op- en afvaart;
4. definitie vaarsnelheden voor op- en afvaart;
5. definitie vaaromgeving in overeenstemming met condities Schelde-estuarium;
6. definitie scenario-matrix.

3.1 Maatgevend schip

Als maatgevend schip voor de bevaarbaarheid van de Westerschelde wordt een Ultra Large Container Ship (ULCS) met lengte 399 m en breedte 54.0 m voorgesteld (zie Figuur 3). Dit schip maakt deel uit van de grootste 400 m containerschepen die op heden de haven van Antwerpen aandoen.

De officiële tijonafhankelijke scheepsdiepgang voor de Westerschelde bedraagt 13.1 m. In functie van het getij kunnen schepen met grotere diepgangen de Westerschelde bevaren indien een minimale kielspeling gerespecteerd wordt. Deze minimaal vereiste kielspeling bedraagt 12.5% van de scheepsdiepgang voor de Scheldedrempels op Nederlands grondgebied en 10% voor de drempels op Belgisch grondgebied. Om te verzekeren dat de bevaarbaarheid ook beoordeeld wordt bij de kleinste aanvaardbare kielspelingen wordt een diepgang geselecteerd die weinig groter is dan de tijonafhankelijke diepgang van de Westerschelde. Een diepgang gelijk aan 13.5 m werd toegepast. Indien uit de uitgevoerde simulaties bleek dat bepaalde tijcondities overeenstemden met een onrealistische kielspeling (d.i. kleiner dan de geldende criteria) dan werden deze simulaties geweerd uit de beoordeling.

Het manoeuvreermodel van het toegepaste schip is gebaseerd op sleeptankproeven uitgevoerd in de sleeptank voor beperkt water (samenwerking Waterbouwkundig Laboratorium en afdeling Maritieme Techniek, Universiteit Gent). De proeven werden uitgevoerd bij kielspelingen 10%; 35% en 100%. De modellering van het manoeuvreergedrag wordt beschreven in Delefortrie et al. (2016) en wordt in de vorm van een Pilot Card voorgesteld in Bijlage 1. De oevereffecten werden gemodelleerd op basis van Lataire et al. (2007). De kwaliteit van het manoeuvreermodel werd gevalideerd tijdens realtime simulaties op de vaarsimulatoren van WL uitgevoerd door ervaren rivierloodsen.



Figuur 3 – Visualisatie van het 3D-model van een ULCS met afmetingen 399 m x 54.0 m zoals beschikbaar in de simulatievloot van WL

¹ In EMSE wordt deze toetsparameter 'Scheepsbewegingen' genoemd

3.2 Track-controller

De track-controller die in deze studie toegepast werd ontleend aan een recent doctoraatsonderzoek aan de Universiteit Gent (Chen *et al.*, 2020).

Voor de sturing van het roer werd de fuzzy controller geselecteerd. Voor een gedetailleerde beschrijving van de fuzzy controller wordt verwezen naar Chen *et al.* (2020). Hieronder wordt het algemene principe van de fuzzy controller uitgelegd.

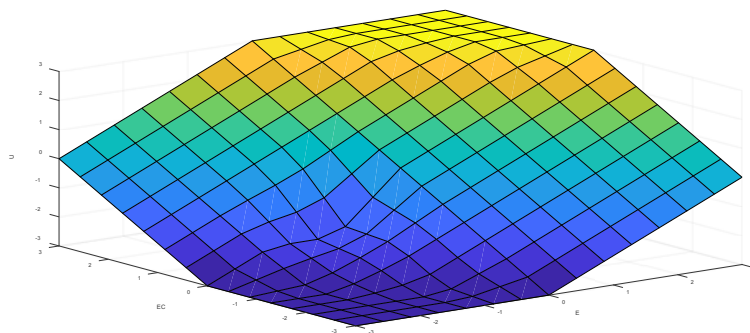
Op basis van de huidige koers van het schip en de gewenste koers naar het vooropgestelde traject, wordt de afwijking op de koers bepaald. Deze afwijking dient gecorrigeerd te worden door een gepast roergebruik.

Om de koersafwijking te relateren aan een gepaste roerhoek wordt rekening gehouden met zowel de koersafwijking als met de eerste afgeleide van de koersafwijking (d.i. de giersnelheid waarmee de koersafwijking varieert en wordt verder gieraafwijking genoemd). Op basis van beide inputs (koersafwijking en gieraafwijking) wordt de roerhoek (lineair) geïnterpoleerd uit een zogenaamd Fuzzy Inference Surface die weergegeven wordt in Figuur 4 en ontleend werd aan Sugeno (1985). De Fuzzy Inference Surface zet de combinatie van koers- en gieraafwijking om tot een waarde variërend tussen +3 en -3. Door deze waarde te vermenigvuldigen met één derde van de maximale roerhoek van het schip wordt de gewenste roerhoek bekomen.

Een apart sturingsalgoritme werd toegevoegd voor de vaarsnelheid. Hierbij werd door middel van een PI-regelaar het schroeftoerental gevarieerd om de gewenste vaarsnelheid langs het traject te volgen.

Bovenstaande sturingsalgoritmes voor roerhoek en schroeftoerental werden aan 40 Hz uitgevoerd (d.i. eveneens de rekenfrequentie van de vaarsimulatiesoftware).

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 dan 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 4 – Fuzzy Inference System voor de fuzzy controller toegepast in de track-controller

3.3 Vaartraject

Een belangrijke input voor de track-controller is vanzelfsprekend het vaartraject dat gevolgd dient te worden. Het vaartraject wordt gedefinieerd als een polylijn met opeenvolgende waypoints en wordt verder referentietraject genoemd.

In de evaluatiemethodiek die in dit rapport voorgesteld wordt, werd het referentietraject gedefinieerd op basis van de polylijnen die de baggercontouren op de Westerschelde definiëren. Het voordeel van de baggercontouren is dat deze continue lijnen zijn die overeenstemmen met een realistisch vaartraject. De referentietrajecten die toegepast werden in op- en afvaart werden gedefinieerd op $1/3^{\text{de}}$ van de breedte van de baggercontour. Voor opvaart betreft het dus op $1/3^{\text{de}}$ van de baggercontour linkeroever en voor afvaart op $1/3^{\text{de}}$ van de baggercontour rechteroever. In Figuur 5 en Figuur 6 worden de referentietrajecten voor op- en afvaart weergegeven te Bath en te Walsoorden.

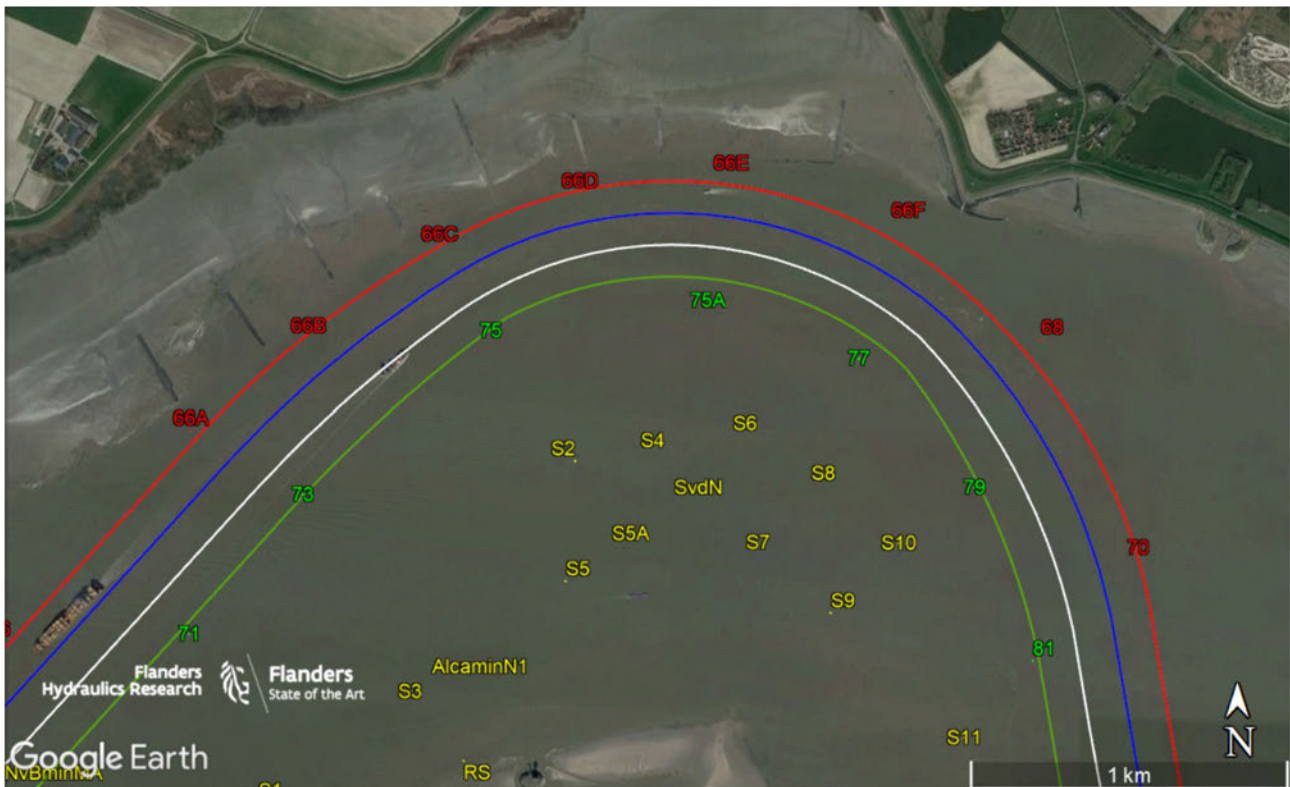
De referentietrajecten bepalen ook de baanafstand langsheen het traject die toegepast wordt als parameter ten opzichte waarvan de latere resultaten van de simulaties weergegeven worden. De baanafstanden worden steeds oplopend volgens de vaarrichting gedefinieerd en worden gerefereerd naar het meest afwaartse punt van het traject (te Wielingen). Bijgevolg hebben voor eenzelfde locatie de baanafstanden voor op- en afvaart een gelijkaardige waarde (kleine verschillen kunnen optreden op basis van buitenbocht of binnenbocht) maar een verschillend teken. De baanafstanden langsheen de trajecten voor op- en afvaart worden weergegeven in Bijlage 2. De simulaties werden geëvalueerd in het gebied tussen Vlissingen ($s = \pm 10$ km) en Drempel van Frederik ($s = \pm 80$ km). De simulaties werden iets vroeger opgestart om mogelijke opstartfouten bij de track-controller te vermijden. De opvaartsimulaties werden opgestart bij $s = 3.8$ km en de afvaartsimulaties bij $s = -83.5$ km.

Figuur 6 te Walsoorden illustreert echter het nadeel dat verbonden is aan de toepassing van het baggertracé als basis voor de vaartrajecten. Het baggertracé is officieel vastgelegd en wordt bijgevolg slechts uitzonderlijk aangepast. De morfologie van de Schelde is op sommige locaties (zoals Walsoorden) erg dynamisch, waardoor de vaargeul (aangeduid door middel van navigatieboeien) verplaatst wordt. Deze aanpassing van de vaargeul aan de dynamische morfologie van de Schelde wordt niet in rekening gebracht in het baggertracé en leidt te Walsoorden (zie Figuur 6, boei 57) tot een baggercontour die zich buiten de groene boeienlijn bevindt. Bijgevolg zal het opvarende referentietraject te dicht bij de groene boeienlijn/oever liggen in vergelijking met werkelijke scheepvaart.

Een alternatieve (en nautisch meer relevante) input zouden de boeienlijnen in de vaarweg kunnen zijn. Deze zijn echter discrete punten op basis waarvoor geen nautisch (continu) referentietraject afgeleid kan worden.

De meeste geschikte methode om de referentietrajecten te bepalen wordt een traject op basis van statistisch verwerkte AIS-registraties over een relevante periode en voor relevante schepen (zie ook §3.4). Door de AIS-posities van ULCS om te rekenen naar de positie van het midden van het schip, kan de spreiding van de vaarpositie over de breedte van de vaarweg bepaald worden langsheen de Westerschelde. Het referentietraject kan dan gedefinieerd worden als een percentiel-waarde binnen deze spreiding (bvb. de 75% percentiel naar stuurboord om een positie aan de rechterzijde van de vaarweg af te dwingen). Een dergelijk methode wordt aangeraden om tot referentietrajecten te komen voor de evaluatiemethodiek maar werd nog niet verder uitgewerkt of toegepast. Wel wordt in Figuur 7 geïllustreerd dat de AIS-trajecten van opvarende schepen te Walsoorden inderdaad niet overeen komen met het referentietraject voor opvaart dat afgeleid werd uit de baggercontour.

De relevante tijdsperiode waarvoor AIS-gegevens als input gebruikt worden dient in overeenstemming te zijn met de conditie van de vaarweg die onderzocht wordt (bvb. overeenstemming met het jaartal van de bathymetrie die geëvalueerd wordt).



Figuur 5 – Illustratie referentietrajecten te Bath voor opvaart (wit) en afvaart (blauw) ten opzichte van baggertracé (groen en rood)



Figuur 6 – Illustratie referentietrajecten te Walsoorden voor opvaart (wit) en afvaart (blauw) ten opzichte van baggertracé (groen en rood)



Figuur 7 – Vergelijking van referentietraject opvaart (wit) met AIS-trajecten van opvarende ULCS (geel)

3.4 Vaarsnelheden

De bevaarbaarheid van de rivier wordt mede bepaald door de snelheid waarmee de rivier bevaren wordt. Een realistisch snelheidsprofiel werd bekomen op basis van historische waarnemingen.

Hoewel het vaartraject in deze fase van de uitwerking van de methodologie nog niet gebaseerd werd op AIS-gegevens (zie §3.3), werden de aannames voor vaarsnelheden wel gebaseerd op AIS-data welke voor de periode 01/10/2018 – 31/12/2019 bekomen werden uit de Schelde Radar Keten (SRK) en door WL verwerkt werden.

Bij het definiëren van de vaarsnelheden op basis van historische gegevens treedt de complexiteit op dat de historische vaarsnelheden beïnvloed worden door de heersende stroomgegevens. Doordat schepen met diepgang groter dan 13.1 m tijafhankelijk zijn, zullen deze schepen steeds bij gelijkaardige tijcondities de Schelde bevaren. Bijgevolg zal in een statistische analyse van de vaarsnelheden van deze schepen de invloed van stroming vervat zitten. Als input voor de fasttime simulaties over een volledige tijcyclus wenst men de vaarsnelheden te definiëren door het water, waarbij de brondata niet beïnvloed worden door stroming. Hiervoor worden enkel de historische vaarsnelheden gebruikt voor schepen met tijonafhankelijke diepgangen die geen voorkeur hebben voor tijcondities.

Binnen de beschikbare periode aan AIS-gegevens werden de historische vaarsnelheden geanalyseerd voor de schepen die voldeden aan onderstaande eigenschappen:

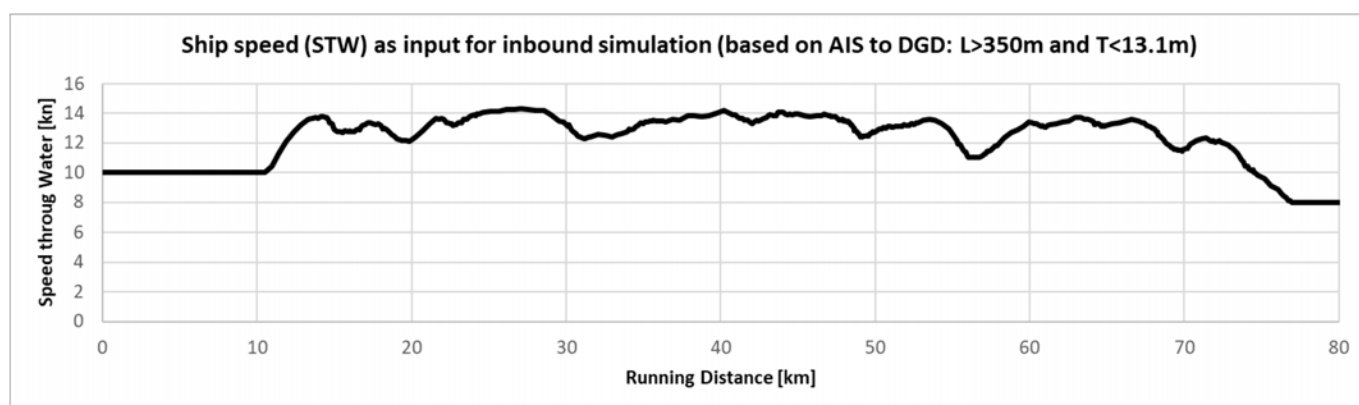
- Containerschip
- Lengte > 350 m
- Diepgang ≤ 13.1 m
- Bestemming (opvaart) of vertrek (afvaart) Deurganckdok

De statistische verwerking van deze AIS-resultaten wordt weergegeven in Bijlage 3.

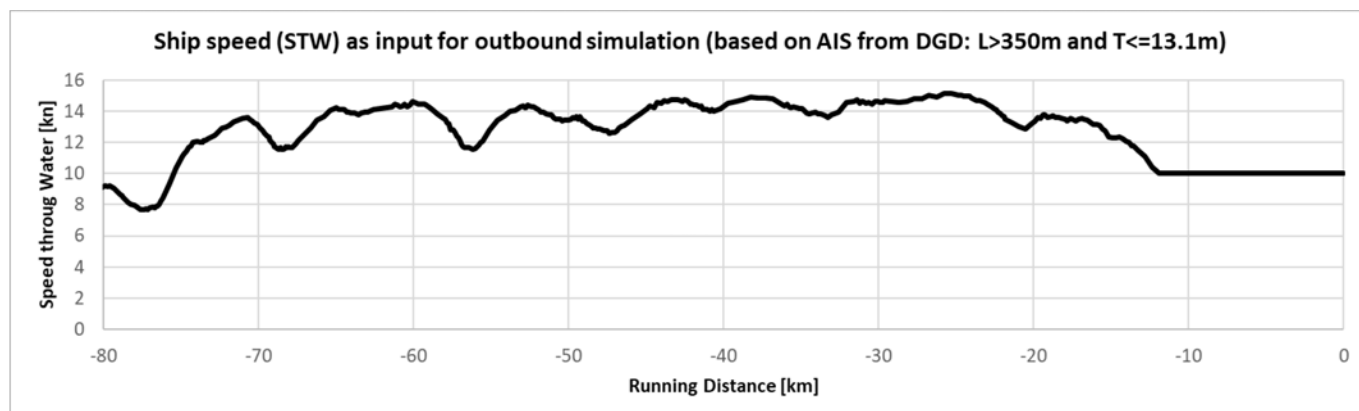
De gemiddelde vaarsnelheden over de grond bekomen uit de AIS-analyse werden als input voor de vaarsnelheden door het water voor de fasttime simulaties toegepast (zie Figuur 8 en Figuur 9). Hierbij werden onderstaande aannames gedaan:

- de snelheidsreductie voor de loodswissel te Vlissingen werd beperkt tot 10 kn;
- de minimale snelheid op het traject werd ingesteld als 8 kn².

Bij de start van elke simulatie worden de vaarsnelheden door het water omgerekend naar vaarsnelheden over de grond op basis van de verwachte stroomconditie langsheen het referentietraject. De aldus bekomen vaarsnelheden over de grond werden als input aangeboden voor de snelheidssturing van de track-controller.



Figuur 8 – Aangenomen vaarsnelheden door het water tijdens de fasttime vaarsimulaties in opvaart



Figuur 9 – Aangenomen vaarsnelheden door het water tijdens de fasttime vaarsimulaties in afvaart

² Bij het naderen van Deurganckdok zal het opvarende schip de snelheid verlagen tot onder de 8 kn. Deze manoeuvres worden echter steeds begeleid door sleepboten welke niet in rekening gebracht worden in de fasttime simulaties.

3.5 Vaaromgeving

De fasttime vaarsimulaties worden uitgevoerd in een virtuele representatie van het Schelde-estuarium. Als voorbeeld wordt hier de vaaromgeving voor de situatie 2019 gepresenteerd.

3.5.1 Mesh bathymetrie

Een belangrijke input voor de evaluatiemethodologie betreft de bathymetrie van het Schelde-estuarium. Deze bathymetrie wordt in de simulatieomgeving gedefinieerd op een triangulair grid, waarvoor de celgrootte gevarieerd wordt naar gelang de afstand tot de vaarweg.

De buitencontour van de simulatiemesh wordt gedefinieerd op basis van de in Vanlede *et al.* (2020) toegepaste rand van de Schelde. De celgrootte van de bodemmesh in de simulatieomgeving wordt gedefinieerd als:

- Minimale celgrootte gelijk aan 20 m binnen het baggertracé
- Graduele toename van de minimale celgrootte tot 50 m op een afstand 500 m van het baggertracé
- Graduele toename van de minimale celgrootte tot 200 m op een afstand 1000 m van het baggertracé
- Minimale celgrootte 1000 m op een afstand groter dan 1000 m van het baggertracé.

In Bijlage 4 worden enkele visualisaties getoond van de bodemmesh die gebruikt werd in de simulatieomgeving.

De bathymetrie werd aangeleverd op een 10x10 grid gebaseerd op vaklodingen. Op sommige locaties blijkt de interpolatie van vaklodingen niet optimaal uitgevoerd te worden (bvb. Pas van Borssele weergegeven in Figuur 72). Dit geldt als een aandachtspunt voor de aangeleverde bathymetrie voor de bevaarbaarheidsanalyse.

3.5.2 Tijcondities

Op basis van een dieptegemiddeld, tweedimensionaal NeVla-model (Stark *et al.*, 2020) werden voor de aangeleverde bathymetrieën de waterdiepten/waterstanden en stroomvelden berekend voor een springtijconditie (getijfactor 1.17) overeenkomstig de randvoorwaarden op 09/03/2020. De resultaten voor tijstanden en stroomvectoren worden aangeboden op de rekengrids van het NeVla model voor twee getijcycli (09/03/2020 01h00 tot 10/03/2020 02h00) dag met tussenperiode 15 minuten. Er wordt aangeraden om de frequentie van de aangeleverde stroomvelden in de evaluatiemethodiek te verhogen tot een tussenperiode gelijk aan 5 minuten. Dit dient de impact van snel veranderende stroomcondities (zoals giertij) in rekening te brengen.

De gekozen tijconditie stemt overeen met een gemiddeld springtij. Meer uitzonderlijke tijcondities (zoals een giertij met belangrijke neervorming te Ossensisse) worden in de evaluatiemethodiek niet beschouwd.

Voor de stroomvectoren in de nautische simulatie werd een gelijkaardige mesh toegepast als voor de bathymetrie, met dat verschil dat de toename van de celgrootte in functie van de afstand tot het baggertracé sneller doorgevoerd werd:

- Minimale celgrootte gelijk aan 20 m binnen het baggertracé
- Graduele toename van de minimale celgrootte tot 50 m op een afstand **200 m** van het baggertracé
- Graduele toename van de minimale celgrootte tot 200 m op een afstand **500 m** van het baggertracé
- Minimale celgrootte 1000 m op een afstand groter dan 1000 m van het baggertracé.

Bij het uitvoeren van de opdracht ondersteunde de simulator nog geen dynamische variatie van getij en stroom. Bijgevolg worden de resultaten uit voorliggend rapport bekomen op basis van een waterdieptemesh waarin de effecten van bathymetrie en getij gecombineerd werden en een stromings-mesh waarin de stroomvectoren gedefinieerd werden. De evolutie van getij en stroming doorheen tijd werd in rekening gebracht op basis van de tijd-plaats relatie die ontstaat op basis van de vooropgestelde vaarsnelheden (input

track controller) over de grond langs het referentietraject. Voor elk gridpunt werd de ‘passeertijd’ bekomen als de tijd overeenkomstig het dichtstbijzijnde punt langs het referentietraject en werden de tij en stroomvectoren voor deze tijd en locatie toegepast. Op deze manier werden statische grids bekomen die de evolutie van getij en stroming deterministisch in rekening brengen.

Vanaf de herfst 2021 ondersteunen de simulatoren van WL ook dynamische tijcondities. Hierbij kan de simulator de tijgegevens uitlezen voor een combinatie van positie en tijd op basis van de actuele conditie van het schip. Hierdoor is de preprocessing van tijcondities tot statische grids niet langer noodzakelijk. De resultaten weergegeven in voorliggend rapport zijn echter nog bekomen op basis van statische grids. Doordat de track-controller in staat is om accuraat het vooropgestelde snelheidsprofiel te volgen, komen de gerealiseerde snelheden goed overeen met de vooropgestelde vaarsnelheden en zijn de afwijkingen op basis van een statisch grid, vergeleken met een dynamische simulatie klein.

In toekomstige toepassingen van de evaluatiemethodiek wordt wel een rechtstreekse dynamische definitie van tij en stroming aangeraden, aangezien deze de bijkomende preprocessing van data overbodig maakt en de uitvoering van de simulaties dus vereenvoudigt. Deze optimalisatie heeft geen impact op het uiteindelijke resultaat van de simulaties.

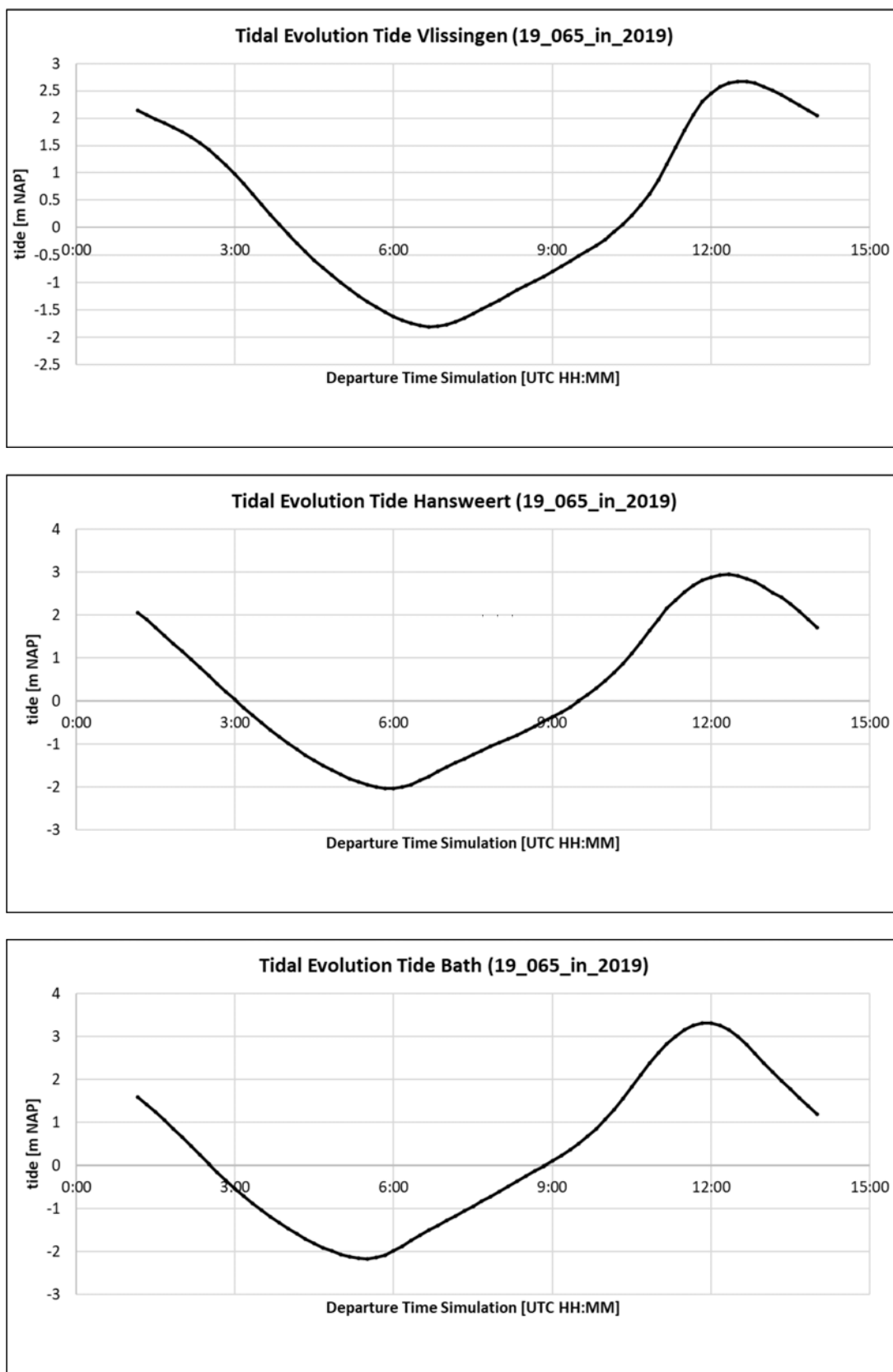
3.6 Scenariomatrix

De analyse werd uitgevoerd voor zowel opvaart als afvaart en diende een volledige tijcyclus (12h25) te omvatten. Om dit te garanderen werd gedurende 13h elke tien minuten³ een simulatie aangevat werd. Zo werd op basis van 78 simulaties (13h x 60 min/h / 10 min) de volledige tijcyclus omvat. De eerste simulatie werd aangevat op het tij-tijdstip 09/03/2021 01h10 (UTC) en de laatste simulatie op het tij-tijdstip 09/03/2021 14h00.

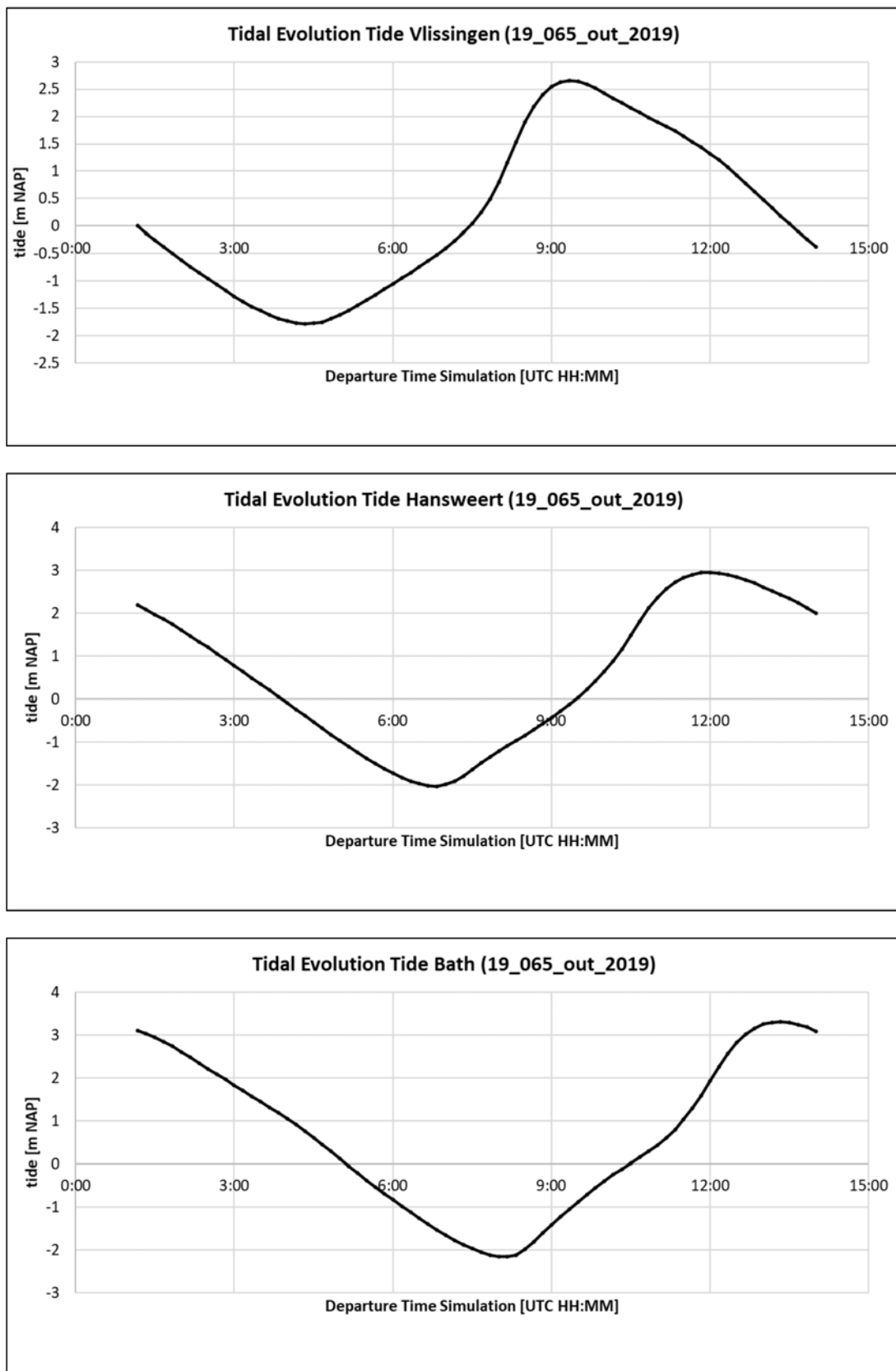
De resultaten van de simulaties worden gerefereerd naar het tijdstip waarop de simulatie aangevat werd (opvaartsimulaties opgestart bij $s = 3.8$ km, Wielingen en de afvaartsimulaties bij $s = -83.5$ km, Deurganckdok). Dit is mogelijks verwarrend, doordat hierdoor bijvoorbeeld de tijcurves op bepaalde locaties niet weergegeven worden op basis van de werkelijke tijd op deze locatie, maar op basis van het tijdstip waarop de bijhorende simulatie gestart werd. Als voorbeeld worden in Figuur 10 de tijkrommen weergegeven voor de locaties Vlissingen, Hansweert en Bath voor de 78 simulaties in opvaart die uitgevoerd werden in het scenario 2019. Het zou op Figuur 10 kunnen lijken dat het hoog water te Bath op een vroeger tijdstip optreedt dan te Vlissingen. Deze presentatie is echter gebaseerd op de tijdsreferentie naar het aanvangstijdstip van de simulatie (te Wielingen om bijvoorbeeld hoog water te hebben ter hoogte van Vlissingen of Bath). Men dient deze dan ook te interpreteren als: voor een simulatie die te Wielingen opgestart werd om 01h10 (begin van de tijdsreeksen), wordt de bijhorende tijstand weergegeven bij het passeren van Vlissingen, Hansweert of Bath. Doordat het schip trager vaart dan de vloedgolf zich door de Westerschelde voortplant (of met andere woorden de vloedgolf haalt het opvarende schip in tijdens de simulatie), zal een eerdere simulatie (12h00) overeenstemmen met een passage van Bath bij hoog water en zal pas een latere simulatie gepaard gaan met een passage van Vlissingen met hoog water (12h30). Dit wordt geïllustreerd in de tijkrommen in Figuur 10.

Voor de volledigheid worden in Figuur 11 dezelfde tijkrommen weergegeven voor afvaart. Volgens dezelfde logica als hierboven, geven de tijkrommen ten opzichte van het aanvangstijdstip van de simulatie voor afvaart wel aanleiding tot een veel later optreden van hoog water te Bath (13h20) dan te Vlissingen (9h20). Nu is het tijdsverschil groter dan wat men verwacht op basis van tijkrommen gerefereerd naar absolute tijd doordat in afvaart het schip zich tegen de tij-evolutie in beweegt.

³ Er wordt aangeraden om deze periode te verminderen tot 5 minuten om ook kort optredende stroomcondities in rekening te brengen. Deze opmerking houdt ook verband met de eerdere opmerking over de gewenste frequentie voor de aanlevering van stroomvelden (eveneens met update-periode 5 minuten).



Figuur 10 – Tijd te Vlissingen, Hansweert en Bath voor opvaart simulatie scenario 2019 gerefereerd naar aanvangstijdstip simulatie



Figuur 11 – Tijd te Vlissingen, Hansweert en Bath voor afvaart simulatie scenario 2019 gerefereerd naar aanvangstijdstip simulatie

3.7 Verwerking simulatieresultaten

De fasttime simulaties die voor op- en afvaart bekomen worden voor een traject langs de volledige Westerschelde (70 km) en gedurende een volledige 13h-tijdcyclus (omvat door 78 simulaties) gaan gepaard met een enorme hoeveelheid aan data, welke op een gepaste manier weergegeven moeten worden.

De belangrijkste verwerking die uitgevoerd wordt op de fasttime simulaties zijn:

1. Voor elke simulatie:
 - a. Geanimeerde replay in KMZ-formaat inclusief tijdsgrafieken van de belangrijkste parameters
2. Voor elk scenario:
 - a. Lijngrafieken met statistische informatie over de belangrijkste parameters in functie van het referentietraject (baanafstand) of in functie van de tijd (aanvangstijdstip simulatie)
 - b. 2D-contourplot met evolutie van de belangrijkste parameters in functie van het referentietraject (baanafstand op horizontale as) en tijd (aanvangstijdstip simulatie).

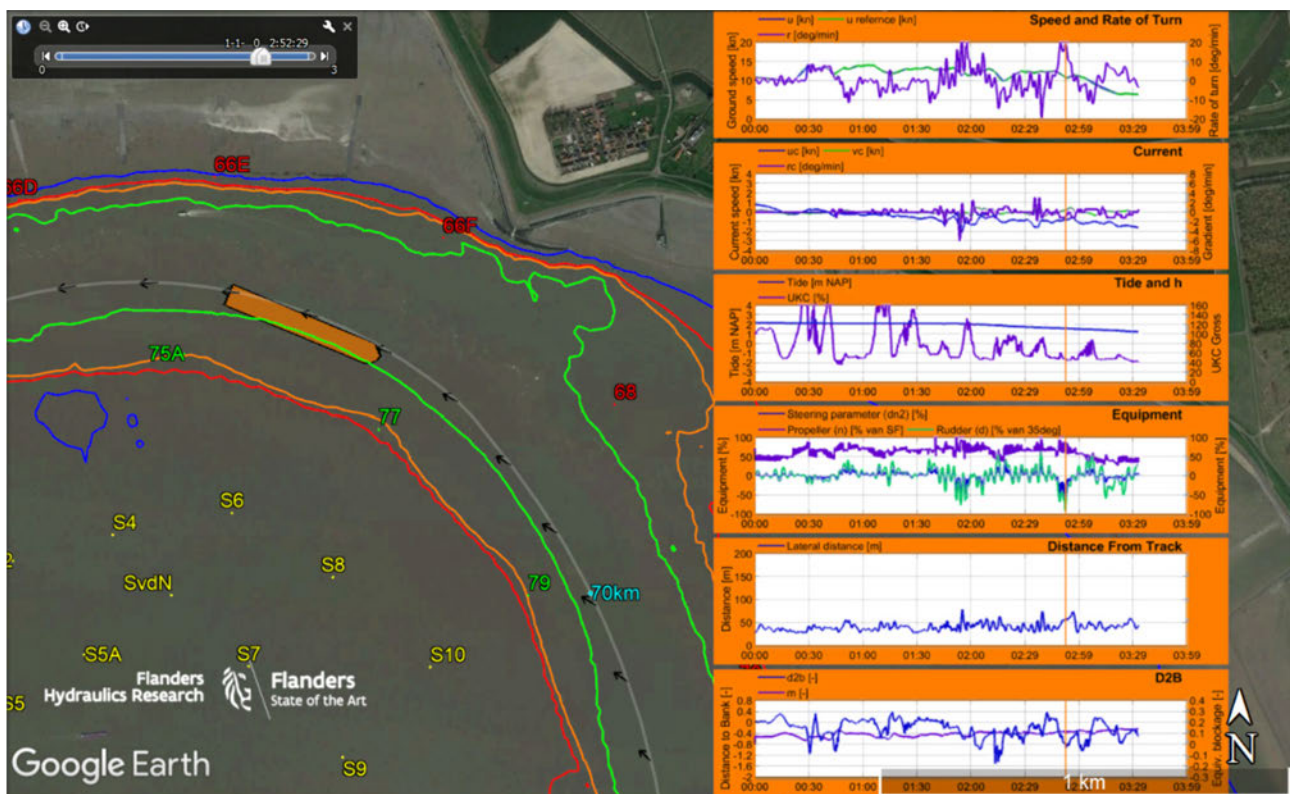
3.7.1 KMZ-export per simulatie

Elke simulatie werd geëxporteerd in de vorm van een KMZ-bestand (te openen in Google Earth™). In Figuur 12 wordt een screenshot weergegeven van de eerste simulatie in opvaart (01h10) voor het scenario 2019 bij de scheepspositie waarbij de grootste roerhoek aangewend werd door de track-controller. Deze positie bevindt zich ter hoogte van Bath. Op de KMZ-export wordt onderstaande weergegeven:

- Scheepstraject: Tijdsgerefereerde (ten opzichte van starttijdstip simulatie) positie van het schip in de vorm van een ingekleurde scheepscontour (oranje (scenario 2019); blauw (scenario 2015) of groen (scenario 2011))
- Omgevingsdata:
 - Referentietraject track controller (transparante witte lijn) met baanafstanden (elke 5 km, lichtblauw)
 - Dieptelijnen waterdiepte (combinatie van bodem en getij)
 - Groen: UKC 50 % (20.25 m)
 - Oranje: UKC 12.5% (15.18 m)
 - Rood: UKC 0% (13.5 m)
 - Blauw: halve diepgang (6.75 m)
 - Stroomvectoren elke 200 m op referentietraject volgens schaal 1/100 [m/s]
 - Boeiposities ter referentie
- Grafieken: grafieken van de belangrijkste parameters in de simulatie in functie van de simulatietijd en met verticale tijdsindicator (oranje (scenario 2019); blauw (scenario 2015) of groen (scenario 2011))
 - Speed and Rate of Turn ("vaarsnelheid en giersnelheid over de grond")
 - u: langscheepse vaarsnelheid over de grond (positief voorwaarts, [kn])
 - $u_{reference}$: gewenste vaarsnelheid over de grond als input voor track-controller (positief voorwaarts, [kn])
 - r: giersnelheid over de grond (positief naar stuurboord, [°/min])
 - Current ("stroming")
 - u_c : langscheepse stroomsnelheid ofwel langsstroming (positief voorwaarts, [kn])
 - v_c : dwarsscheepse stroomsnelheid ofwel dwarsstroming⁴ (positief stuurboord, [kn])

⁴ De term dwarsstroming dient hier in de strikte betekenis van het woord geïnterpreteerd te worden: nl. de component van de stroomvector dwars op de scheepsoriëntatie. Dwarsstroming wordt vaak als synoniem voor giertij gebruikt, maar dat is niet het geval in dit rapport. Het giertij zal aanleiding geven tot een afwisselende dwarsstroming naar bakboord en stuurboord (of omgekeerd).

- r_c : stromingsgradiënt⁵ (positief voorwaarts, [°/min])
 - Tide and h (“waterstand en bodemdiepte”)
 - tide: waterstand [m NAP]
 - UKC: kielspeling als percentage van de diepgang [%]
 - Equipment (“scheepsuitrusting”)
 - rudder: roerhoek [aandeel van maximale roerhoek (positief naar bakboord), %]
 - propeller: schroeftoerental [aandeel van maximale toerental, %]
 - steering parameter: roerhoek * schroeftoerental² [aandeel van maximum, %]
 - Distance From Track (“Afstand tot traject”)
 - Lateral distance: Grootste afstand⁶ tussen de buitencontour van het schip en de referentiebaan [m]
 - D2B (“Afstand tot oever”)
 - d2b: maatgevende parameter voor oevereffecten (asymmetrie) uit Lataire et al. (2007) [-]
 - m: maatgevende blockage parameter voor beperking vaarwegsectie uit Lataire et al. (2007) [-]
- Logo WL



Figuur 12 – Voorbeeld van KMZ-export in Google Earth voor simulatie 01h10 in opvaart 2019 bij passage Bath

⁵ Stromingsgradiënt: de gradiënt van de stroom over de scheepslengte ofwel de giersnelheid veroorzaakt door de stroming (uitgedrukt in °/min)

⁶ De kleinste waarde die deze parameter kan hebben is gelijk aan een halve scheepsbreedte ($B/2 = 27$ m).

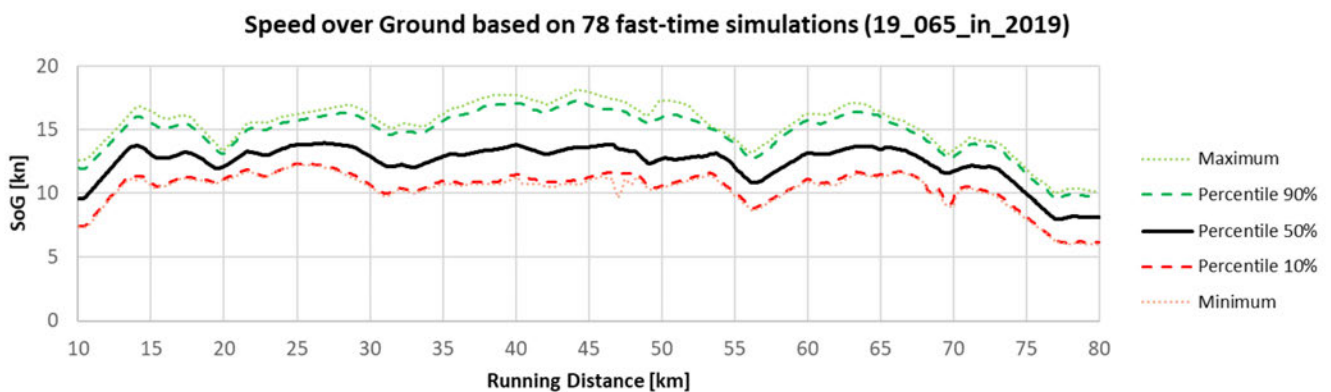
3.7.2 Lijngrafieken in functie van baanafstand of tijd

Om globale eigenschappen van verschillende parameters te onderzoeken in functie van de aanvangstijd van de simulatie of in functie van de positie langsheen het referentietraject werd er een statistisch analyse uitgevoerd van de belangrijkste parameters. Het betreffen dezelfde parameters als weergegeven in de grafieken uit de KMZ-weergave (zie §3.7.1).

Om een eenduidige vergelijking van de variatie langsheen het traject toe te laten werd het referentietraject opgedeeld in segmenten van 100 m waaraan voor elke simulatie per parameter het absolute gemiddelde⁷ berekend werd (met uitzondering van de tijstand waarbij het gewone gemiddelde toegepast werd). Op deze manier wordt voor elke parameter een resultaten-matrix bekomen voor 78 simulaties en voor 700 trajectsegmenten. Deze matrix laat toe om statistiek te berekenen in functie van baanafstanden of in functie van de tijd. In beide gevallen worden de onderstaande statistieken weergegeven in lijngrafieken:

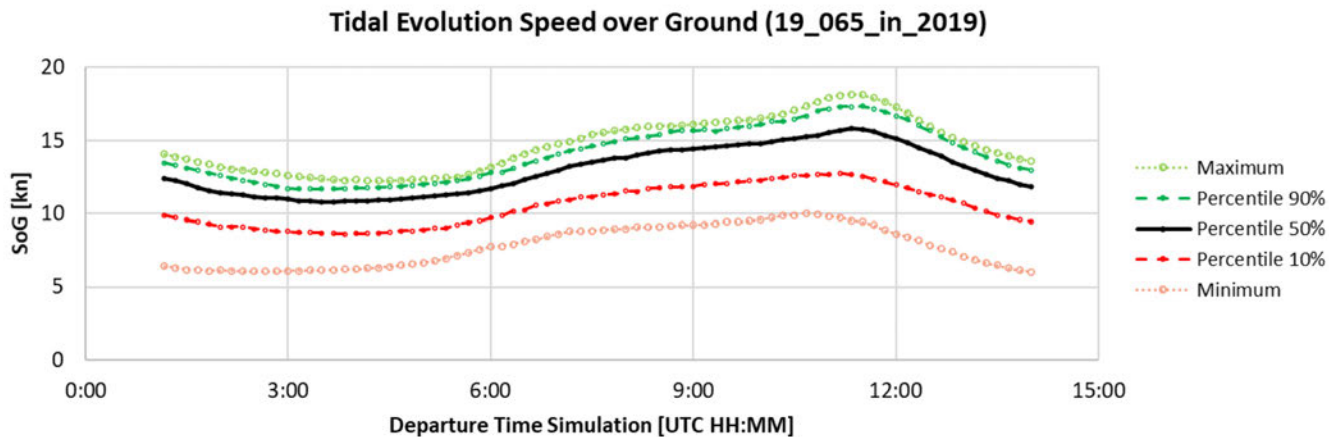
- minimum;
- 10%-percentiel;
- mediaan (50%-percentiel);
- 90%-percentiel;
- maximum.

Als voorbeeld voor de resultaten worden hieronder de resultaten voor de snelheid over de grond weergegeven voor de simulaties in opvaart in scenario 2019. In Figuur 13 wordt de statistische evaluatie van de vaarsnelheden langsheen het vaartraject weergegeven en in Figuur 14 in functie van het aanvangstijdstip van de simulatie. Figuur 13 toont dat de vaarsnelheid voor een bepaald punt langs het traject een belangrijke variatie vertoonde over de verschillende simulaties. Dit was vanzelfsprekend te wijten aan de verschillende stroomcondities (voor een volledige tijcyclus) die in de simulaties optraden. De grootste vaarsnelheid (18.15 kn) bleek op te treden ter hoogte van baanafstand 44.2 km (boei 39, afwaarts Hansweert). Op basis van Figuur 14 blijkt dat deze maximale vaarsnelheid optrad in de simulatie die aanving om 11h20. In deze simulatie passeerde het schip baanafstand 44.2 km dus bij maximale vloedstroom.



Figuur 13 – Lijngrafiek voor vaarsnelheid over de grond in functie van baanparameter met statistieken over de tijd (scenario opvaart 2019)

⁷ Het absolute gemiddelde van een segment wordt gedefinieerd als de gemiddelde waarde van de absolute waardes van alle datapunten die zich binnen het segment bevinden.

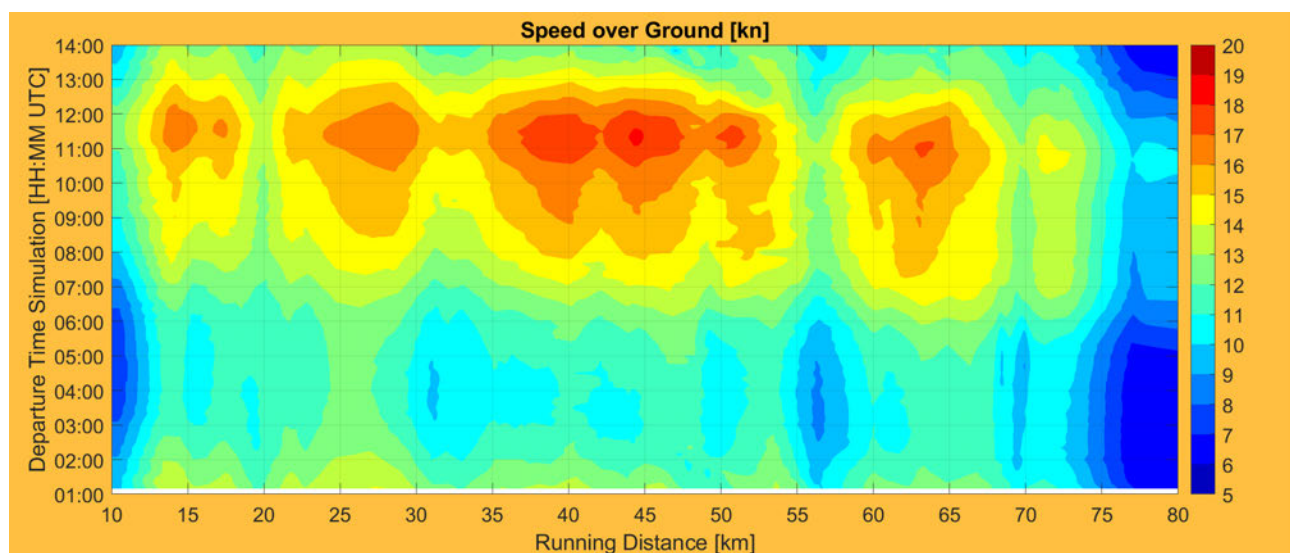


Figuur 14 – Lijngrafiek voor vaarsnelheid over de grond in functie van aanvangstijd simulatie met statistieken over het traject (scenario opvaart 2019)

3.7.3 2D-contourplot in functie van baanafstand en tijd

Naast het verwerken van de resultaten-matrix tot statistische data die weergegeven kunnen worden in lijngrafieken (zie §3.7.2), kan deze resultaten-matrix ook gevisualiseerd worden als een 2D-contourplot waarin de matrix ingekleurd wordt op basis van de waardes.

Deze methode wordt in Figuur 15 opnieuw geïllustreerd voor de resultaten van de vaarsnelheid over de grond voor het scenario opvaart 2019. Het voordeel van deze weergave is dat er een volledig beeld geschetst wordt van de evolutie in functie van tijd en volgens het referentietraject. Een nadeel is dat de magnitude van de parameter moeilijker af te lezen is dan uit de lijngrafieken uit §3.7.2 en dat de contourplot wat minder eenvoudig te interpreteren is. Voor de weergave in Figuur 15 kan (bij benadering) vastgesteld worden dat de grootste vaarsnelheden optraden ter hoogte van baanafstand 44.2 km (horizontale as) en voor simulatie 11h20 (verticale as).



Figuur 15 – 2D-contourplot van de snelheid over de grond in functie van baanafstand en aanvangstijd voor scenario opvaart 2019

4 Resultaten 2019

In de voorgaande paragrafen werd een beschrijving gegeven van de methode, input en verwerking van de fasttime vaarsimulaties die als basis dienen voor de evaluatiemethodiek bevaarbaarheid. Hieronder werd deze methode toegepast op de condities uit 2019.

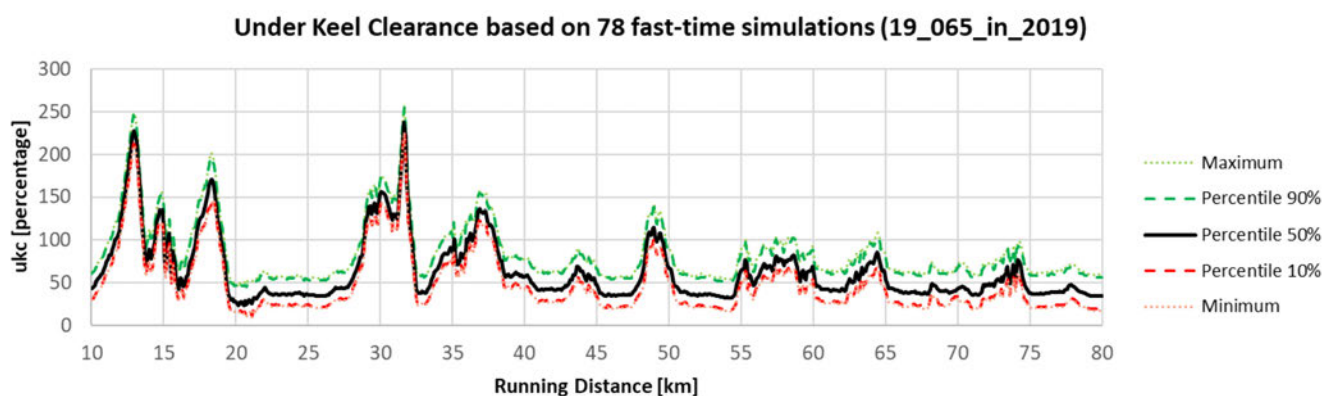
4.1 Resultaten voor scenario opvaart 2019

In voorliggende paragraaf worden enkele resultaten weergegeven voor het scenario opvaart 2019.

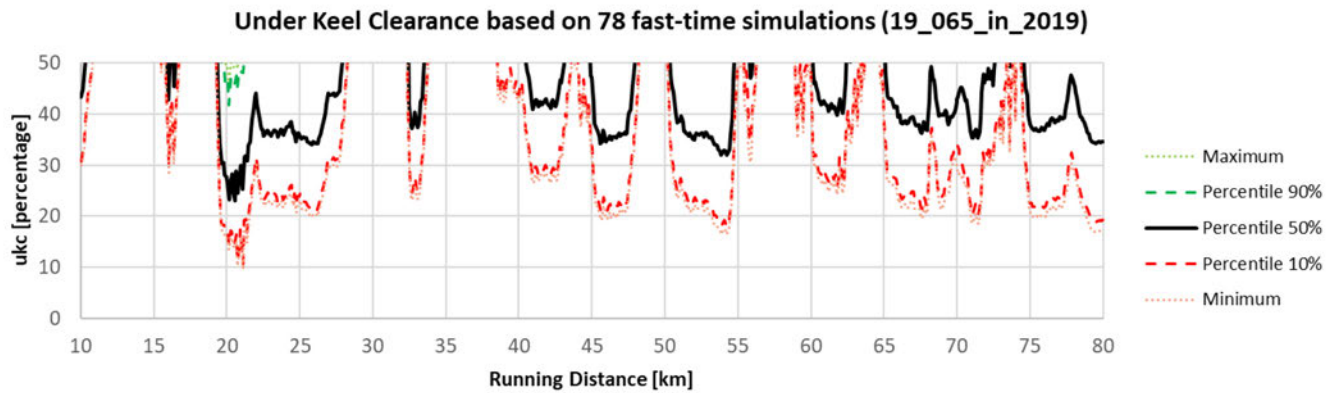
4.1.1 Kielspelingen

De kielspelingen die ervaren werden tijdens de simulaties zijn een rechtstreeks gevolg van de bathymetrie en de tijstanden die in rekening gebracht werden in het scenario opvaart 2019. Uit Figuren 16 en 17 wordt de statistische variatie van de kielspeling over het traject weergegeven. Hieruit blijkt dat de meest ondiepe locatie op de Westerschelde de drempel van Borssele (baanafstand 21 km) is. Bij laag water treden hier lagere waarden op dan de minimale kielspelingsvoorwaarde gelijk aan 12.5%. Nader onderzoek leert echter dat er slechts voor twee 100 m-segmenten (20.7 km en 21.1 km) een minimale kielspeling kleiner dan 12.5 % aanwezig is (simulatie 06h10). De kielspelingsvoorwaarde is dus slechts op een erg korte locatie niet vervuld. Hoewel het schip (diepgang 13.5 m) geen tijpoort zou hebben bij laag water condities te Borssele, worden deze resultaten toch behouden in de evaluatie.

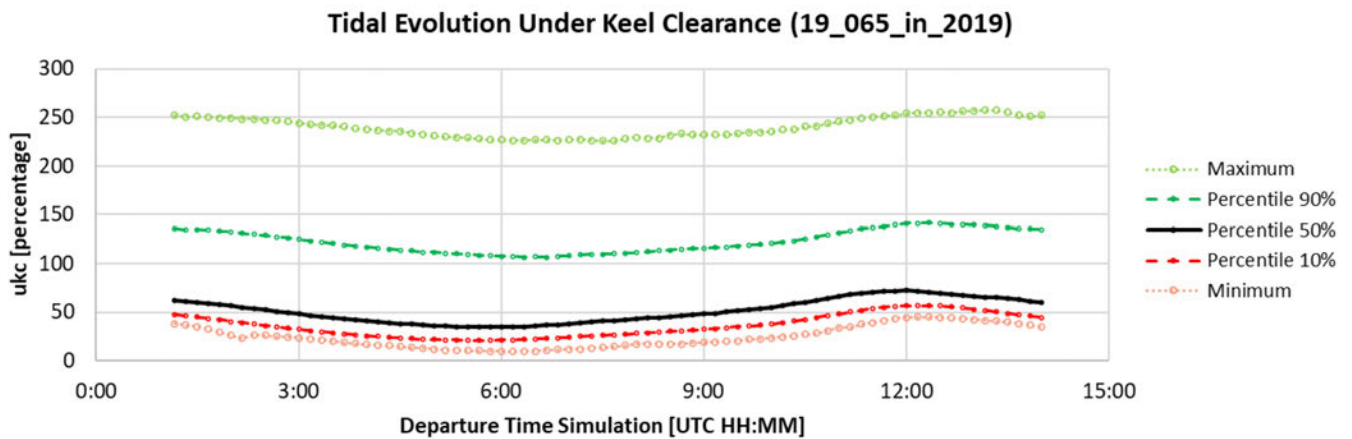
Uit Figuur 18 blijkt de tijvariatie van de kielspeling. Hierbij stemmen minimale waarden overeen met de drempel van Borssele en maximale waarden met de passage van de put van Terneuzen. De laag water conditie te Borssele wordt bereikt door de simulatie in opvaart aangevat om 06h10.



Figuur 16 – Statistische analyse van kielspeling langs referentietraject voor scenario opvaart 2019



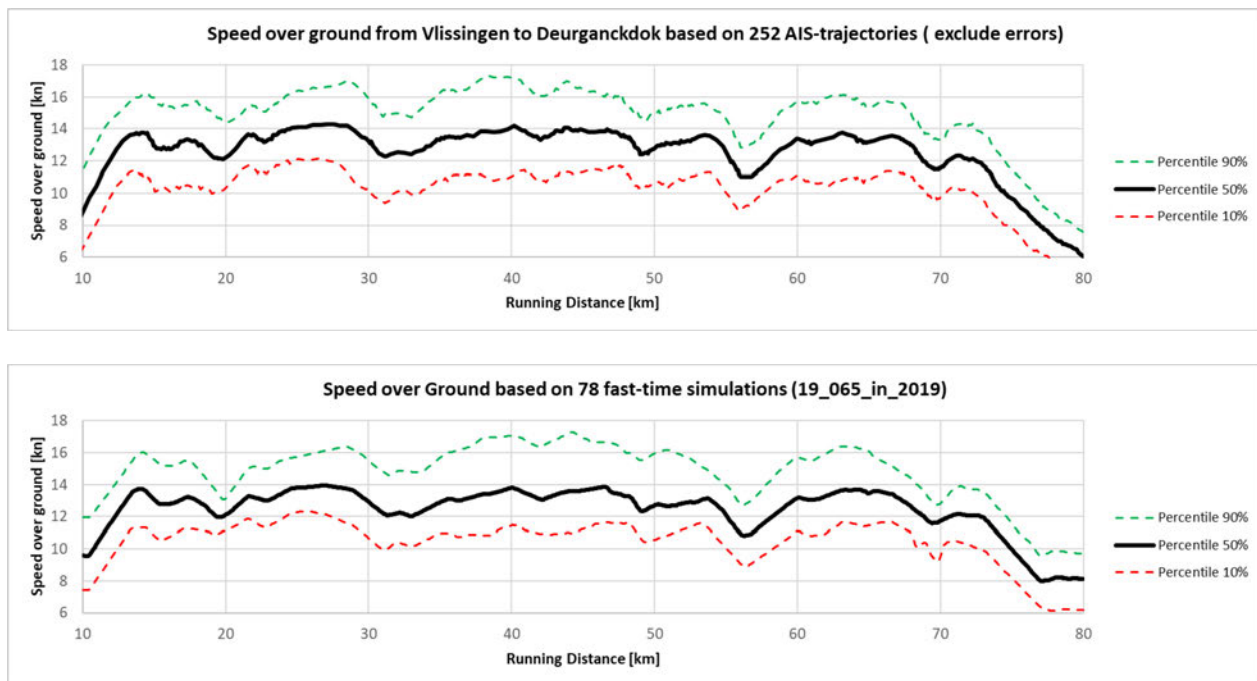
Figuur 17 – Statistische analyse van kielspeling langs referentietraject voor scenario opvaart 2019 (detail)



Figuur 18 – Statistische analyse van kielspeling in functie van tijd voor scenario opvaart 2019

4.1.2 Vaarsnelheden

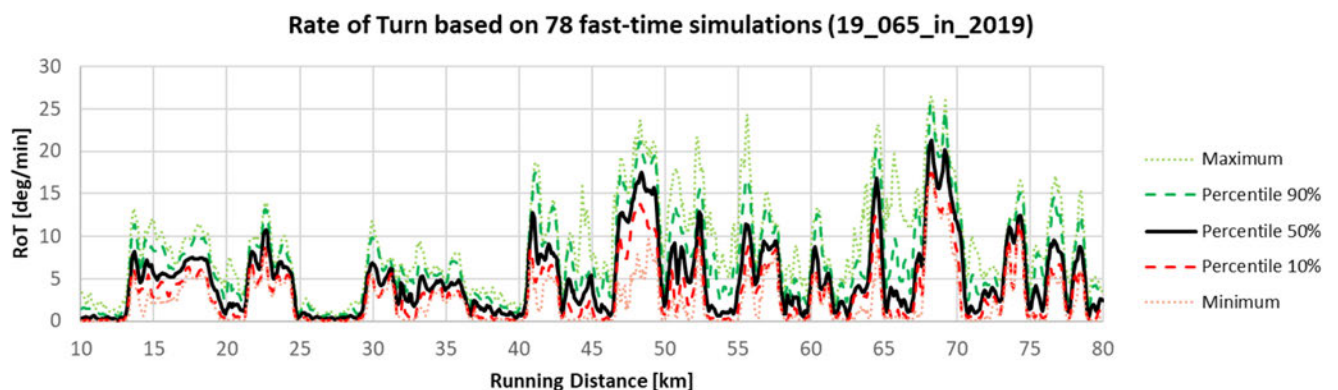
In §3.4 werd reeds aangegeven dat de vaarsnelheden door het water tijdens de simulaties bepaald werden als gemiddelde AIS-snelheden van tijonafhankelijke containerschepen. Bovendien werden in Figuur 13, Figuur 14 en Figuur 15 resultaten weergegeven van de vaarsnelheid over de grond zoals toegepast tijdens de verschillende fasttime simulaties in opvaart. Wanneer dezelfde analyse wordt uitgevoerd op de resultaten van de simulaties als op de AIS-gegevens van tijonafhankelijke containerschepen dan worden resultaten bekomen zoals samengevat in Figuur 19. De vergelijking toont aan dat de vaarsnelheden zoals toegepast in de fasttime vaarsimulaties goed overeenstemmen met de waarnemingen op basis van historische gegevens en dat bijgevolg de vaarsnelheden (over de grond) in grote mate bepaald worden door de stroomconditie waarbij gevaren wordt. Een beperkte overschatting van de maximale vaarsnelheden kan waargenomen worden. Deze is het resultaat van de eerder extreme stromingscondities (springtij met getijfactor 1.17) die aangenomen werden in de vaarsimulaties.



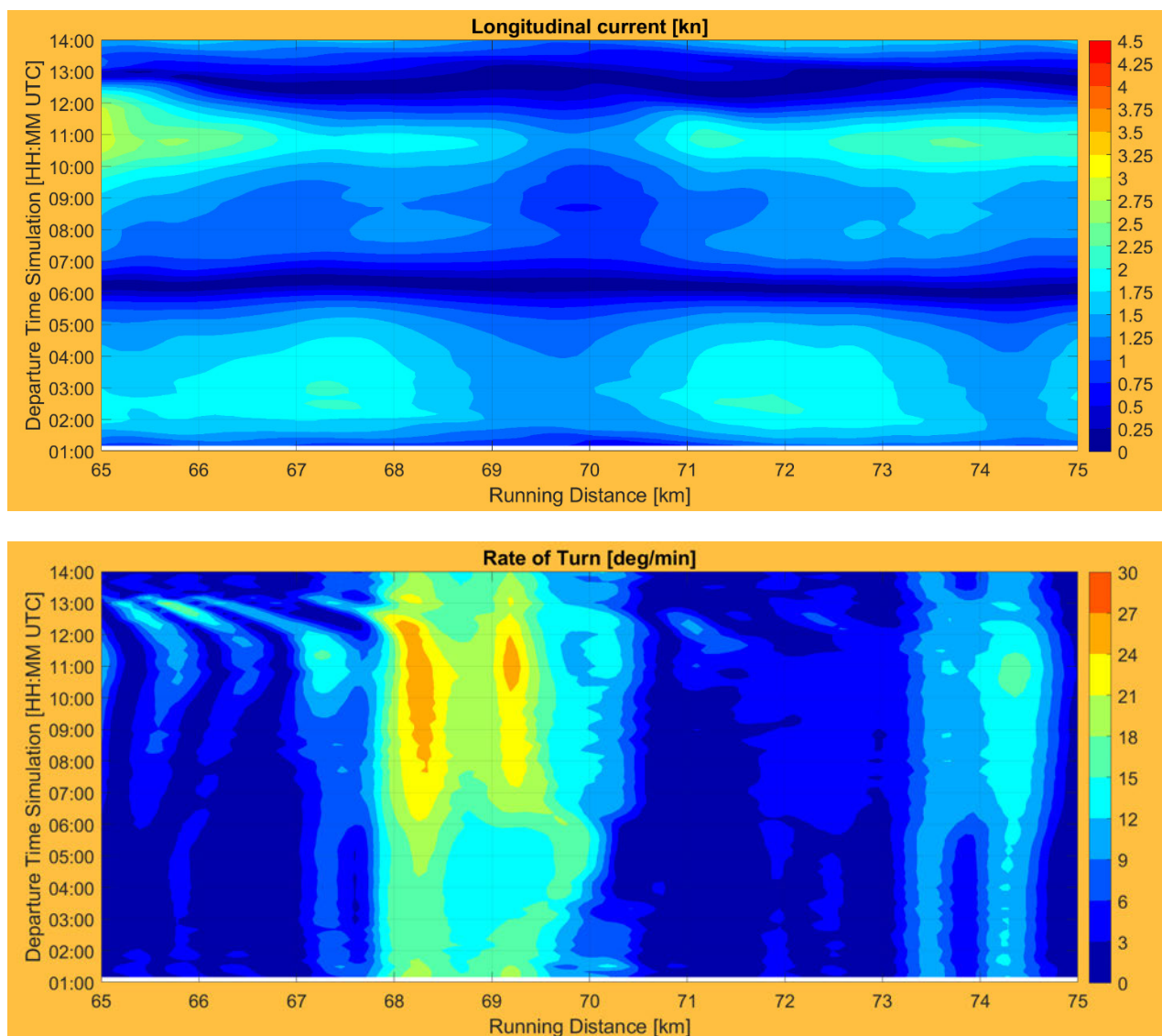
Figuur 19 – Vergelijking tussen vaarsnelheden zoals bekomen uit AIS-analyse en zoals toegepast tijdens fasttime vaarsimulaties voor scenario opvaart 2019

4.1.3 Giersnelheden

De giersnelheden die toegepast werden tijdens de fasttime vaarsimulaties zijn vanzelfsprekend het hoogste ter hoogte van de rivierbochten. Zo worden in Figuur 20 duidelijk de bochten van Hansweert (48 km) en Bath (69 km) herkend. De snelheid waarmee het schip diende te gieren wordt bovendien ingegeven door de vaarsnelheid van het schip, waarbij een hoge vaarsnelheid (voor opvaart is dit bij belangrijke vloedstroom) een snellere gierbeweging vereist. De relatie tussen de stroomsnelheid en de giersnelheid wordt geïllustreerd in Figuur 21. Hieruit blijkt dat de grootste giersnelheden in de bocht gerealiseerd worden bij de belangrijkste vloedstroomcondities (en dus grootste vaarsnelheden over de grond) en er bij ebcondities veel kleinere giersnelheden noodzakelijk zijn om het referentietraject te volgen in de bocht van Bath.



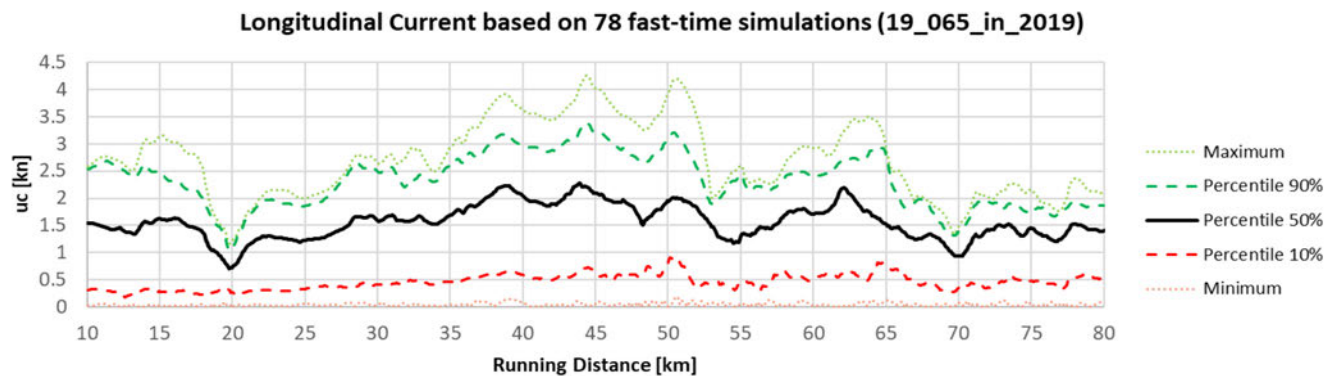
Figuur 20 – Statistische analyse van giersnelheden langs referentietraject voor scenario opvaart 2019



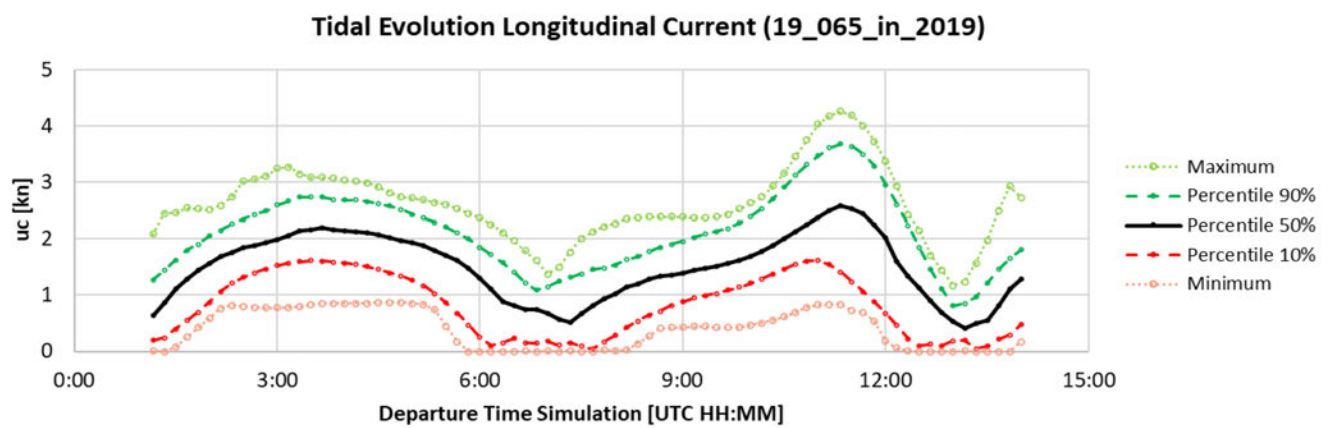
Figuur 21 – Evolutie van langsstroming en giersnelheid in bocht van Bath op basis van 2D-contourplot voor scenario opvaart 2019

4.1.4 Langsstroming

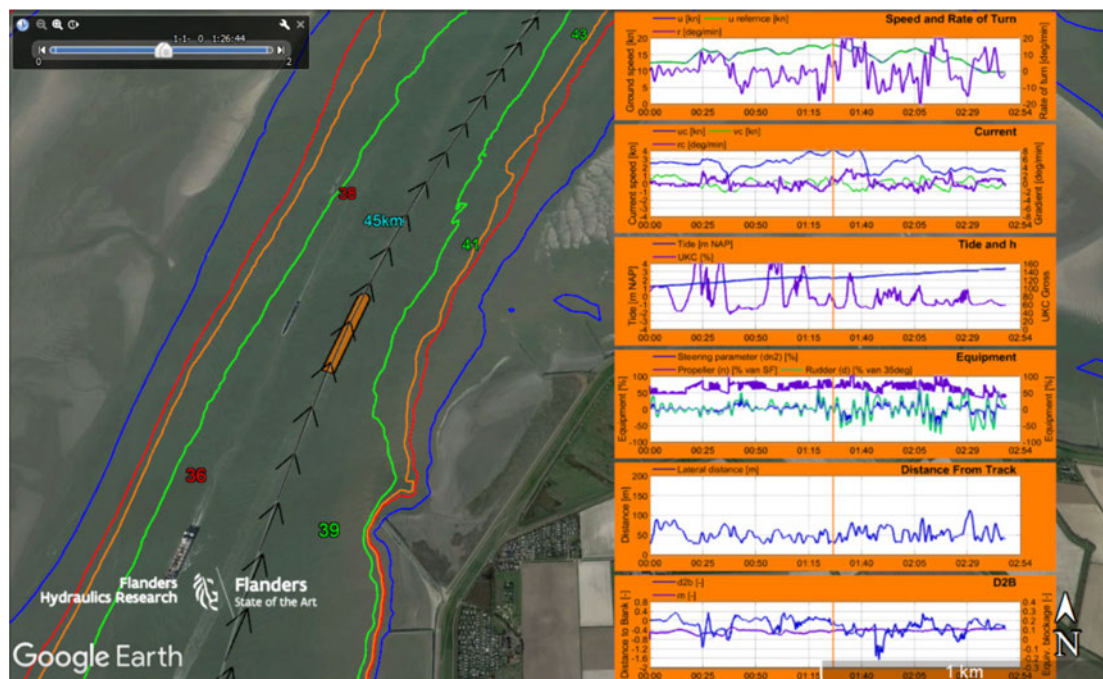
De vaarsnelheden gepresenteerd in §4.1.1 bevatten reeds de invloed van langsscheepse stroming (langsstroming). In Figuren 22 en 23 worden nog specifieke resultaten voor de langsstroming weergegeven. Hieruit blijkt dat de grootste stroomsnelheden optreden te Overloop van Hansweert (baanafstand 44.4 km: 4.26 kn) en te Hansweert (baanafstand 50.6 km: 4.20 kn) en gepaard gaan met de vloedstroom (simulatie 11h20). In Figuur 24 wordt de locatie aangeduid waarvoor de hoogste stroomsnelheid geregistreerd werd.



Figuur 22 – Statistische analyse van langsstroming (absolute waarde) langs referentietraject voor scenario opvaart 2019



Figuur 23 – Statistische analyse van dwarsstroming in functie van tijd voor scenario opvaart 2019



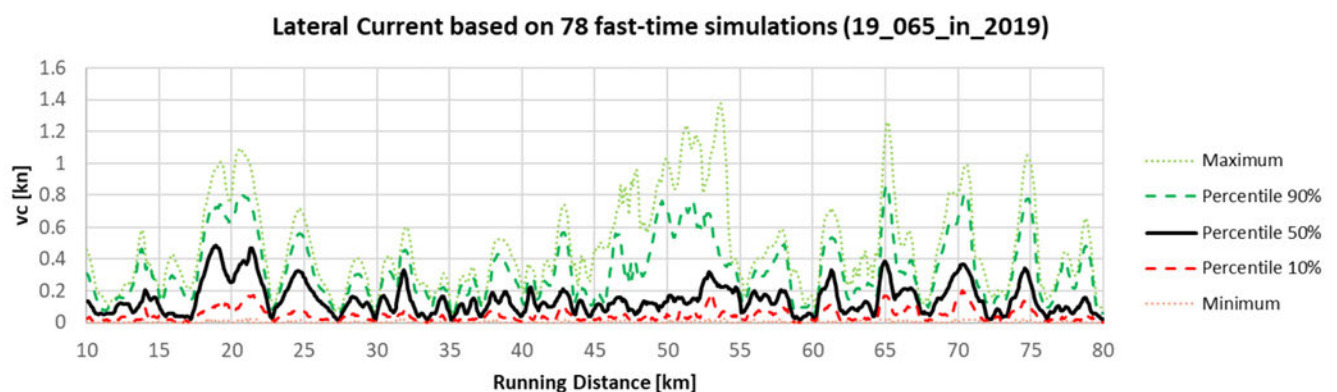
Figuur 24 – KMZ-weergave van de belangrijkste langsstroming in de simulatie in opvaart van scenario 2019 (simulatie 11h20 te Overloop Hansweert).

4.1.5 Dwarsstroming en stromingsgradiënt

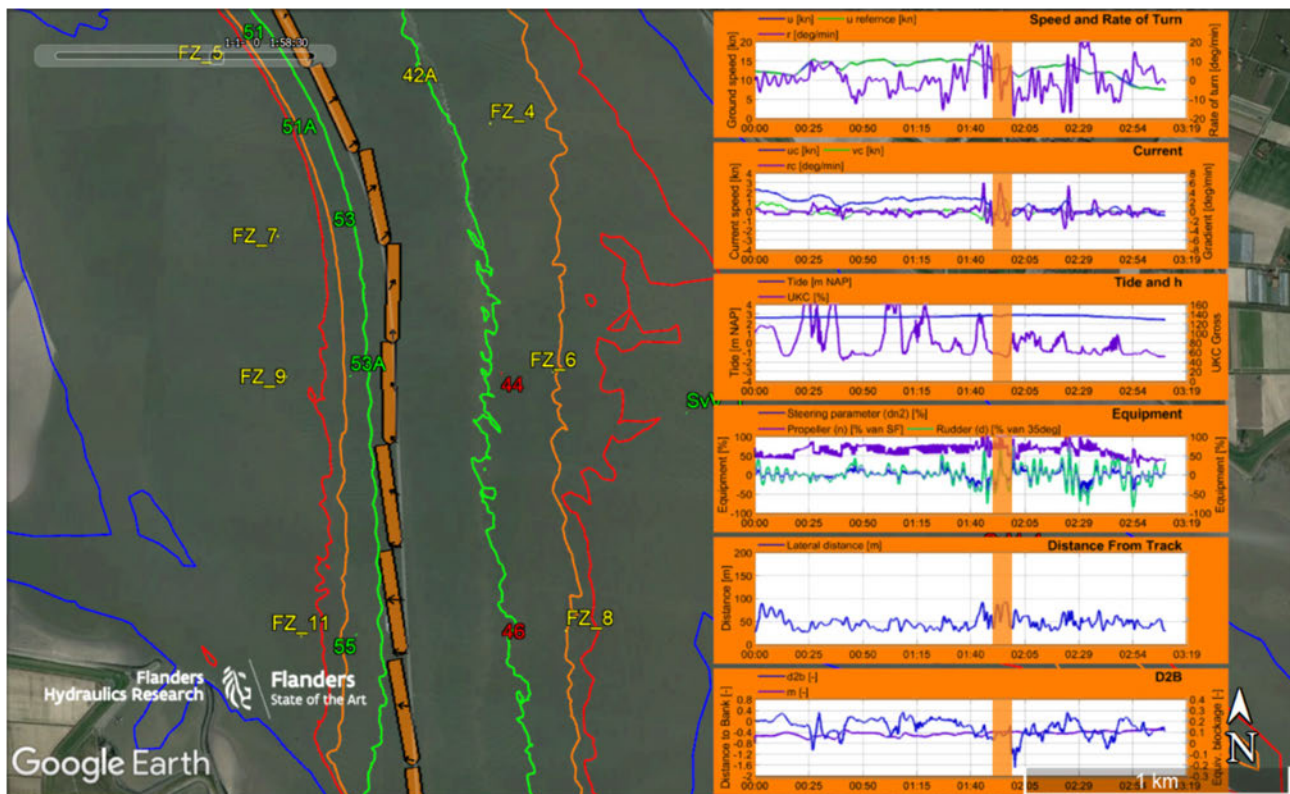
De stroomparameters die de grootste impact hebben op de bevaarbaarheid van de Westerschelde zijn enerzijds de dwarsstroming op het schip en anderzijds de giersnelheid die door de stroom veroorzaakt wordt (de stromingsgradiënt).

Voor de dwarsstroming (zie Figuur 25) geldt dat deze vaak maxima vertoont in de buurt van de rivierbochten. De grootste dwarsstroming treedt op ter hoogte van Ossenis (1.37 kn). Nader onderzoek toonde aan dat dit maximum optrad in simulatie 12h40 bij opvaart. Figuur 26 illustreert het stroomprofiel in deze conditie en het bijhorende vaartraject dat hierdoor beïnvloed wordt. De maximale dwarsstroming blijkt gepaard te gaan met de kentering op deze locatie waardoor het schip achtereenvolgens een dwarsstroming naar bakboord en naar stuurboord (maximaal) ervaart. Ook op- en afwaarts Bath treedt er bij vloed een belangrijke dwarsstroming op zoals geïllustreerd in Figuur 27 voor de locatie opwaarts Bath.

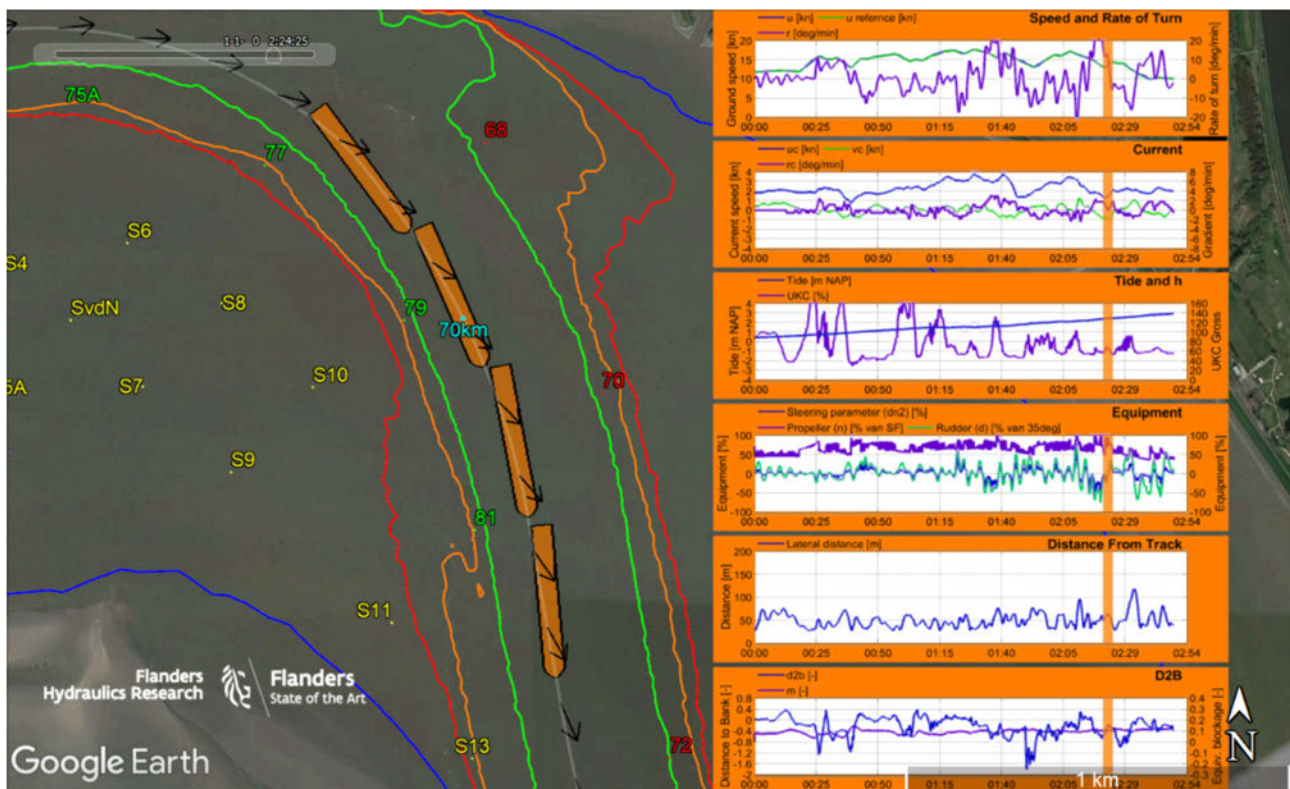
De stromingsgradiënt (Figuur 28) veroorzaakt een koersafwijking die eveneens gecompenseerd dient te worden door een gepast roergebruik en aldus de bevaarbaarheid van de rivier beïnvloedt. De grootste stromingsgradiënt in het scenario opvaart 2019 blijkt op te treden te Valkenisse (7.5 °/min) en blijkt veroorzaakt door een plotse toename van de ebstroom bij het kruisen van de Schaar van Valkenisse (zie Figuur 29). Gelijkaardige effecten treden op in de bocht van Hansweert bij het passeren van het Middelgat (baanafstand 48 km). Ook de conditie overeenkomstig de belangrijkste dwarsstroming (kentering Ossenis) gaat gepaard met een belangrijke stromingsgradiënt (zie Figuur 26).



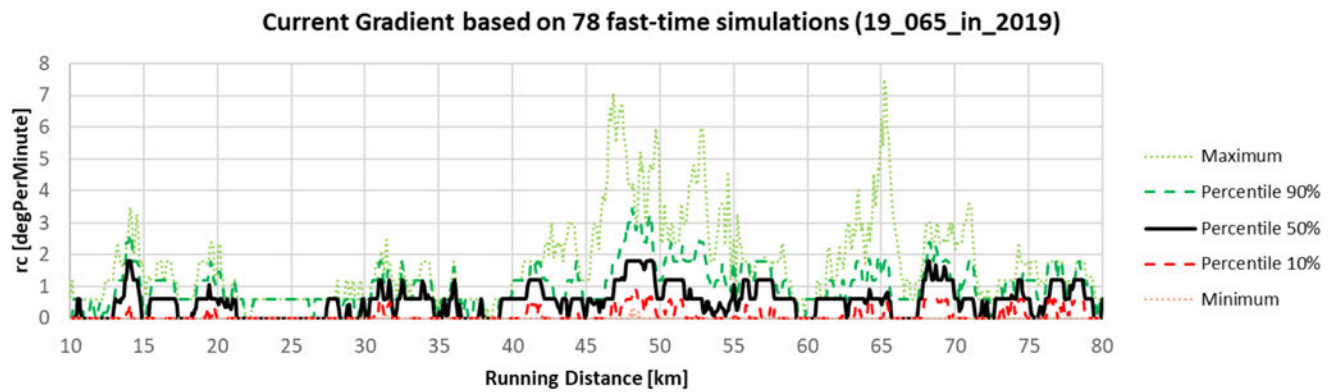
Figuur 25 – Statistische analyse van dwarsstroming langs referentietraject voor scenario opvaart 2019



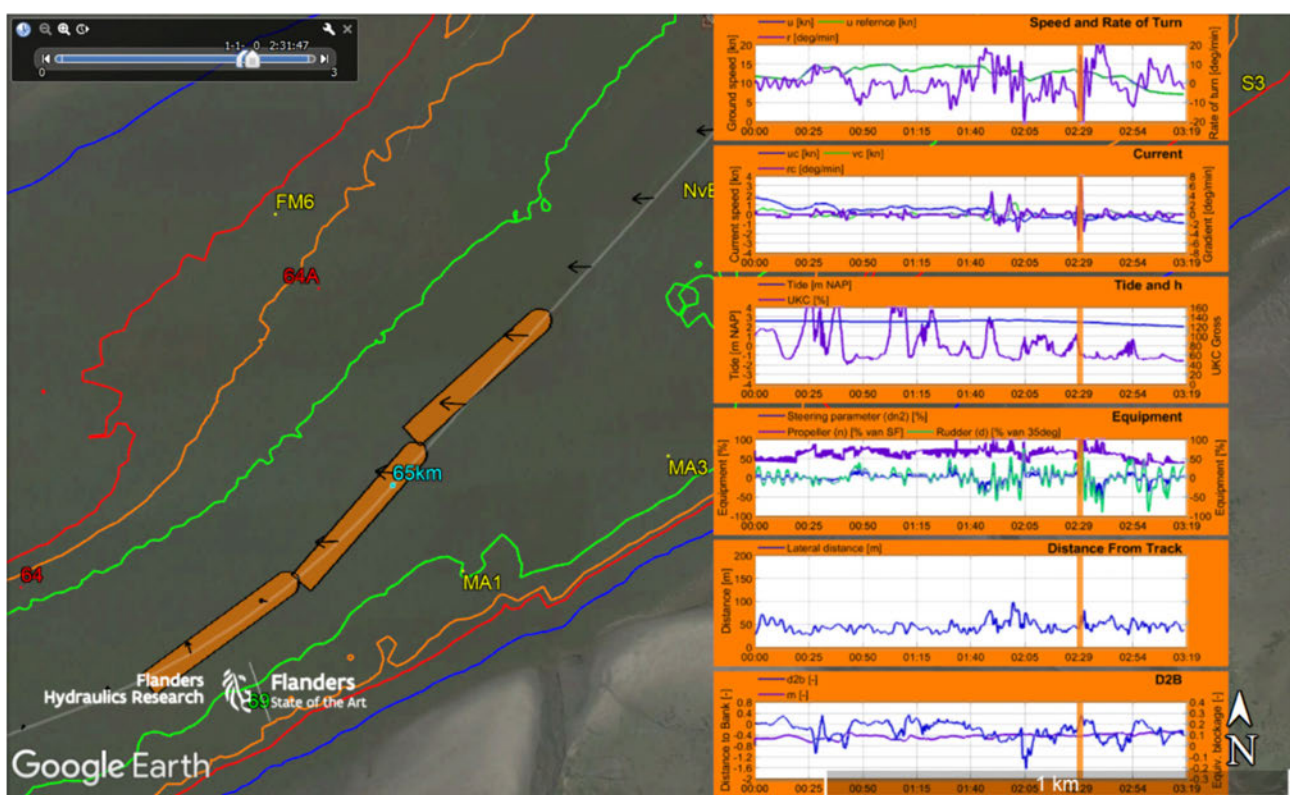
Figuur 26 – KMZ-weergave van de belangrijkste dwarsstroming in simulatie 12h40 te Ossensisse in opvaart scenario 2019



Figuur 27 – KMZ-weergave van de dwarsstroming opwaarts Bath bij vloed in simulatie 10h50 bij opvaart scenario 2019



Figuur 28 – Statistische analyse van stromingsgradiënt langs referentietraject voor scenario opvaart 2019



Figuur 29 – KMZ-weergave van de belangrijkste stromingsgradiënt in scenario opvaart 2019 (13h00 te Valkenisse)

4.1.6 Afstand tot referentietraject

In vorige paragrafen werden de resultaten weergegeven van omgevingsparameters of van operationele parameters die een rechtstreeks gevolg waren van de omgevingsparameters of track-controller instellingen. Een eerste parameter die als maat beschouwd kan worden voor de bevaarbaarheid van de omgevingsconditie is de maximale afstand waarop het schip zich van het referentietraject bevindt (kort: afstand tot referentietraject). De track-controller zal steeds proberen om het schip zo min mogelijk te laten afwijken van het referentietraject. Bijgevolg zijn grote afstanden tot het referentietraject het gevolg van verstoringen waarvoor de track-controller niet (tijdig) kan compenseren.

De afstand tot het referentietraject werd berekend in post-processing op basis van de punten van de buitencontour van het schip. Het contourpunt met de grootste afstand tot het referentietraject werd behouden. Deze methode geeft aanleiding tot een minimale afstand tot het referentietraject gelijk aan een halve scheepsbreedte (27 m). Deze waarde stemt immers overeen met de afstand tot het referentietraject indien het schip zich precies op een recht referentietraject bevindt.

In Figuur 30 wordt de evolutie van de afstand tot het referentietraject in functie van het referentietraject getoond. De grootste afwijkingen blijken op te treden te Hansweert (zowel af- (48 km) als opwaarts (52 km)), te Walsoorden (56 km), te Valkenisse (65 km), te Bath (69 km) en te Saeftinghe (74 km). Figuur 31 illustreert dat de grootste afwijkingen van het referentietraject optreden bij vloedcondities.

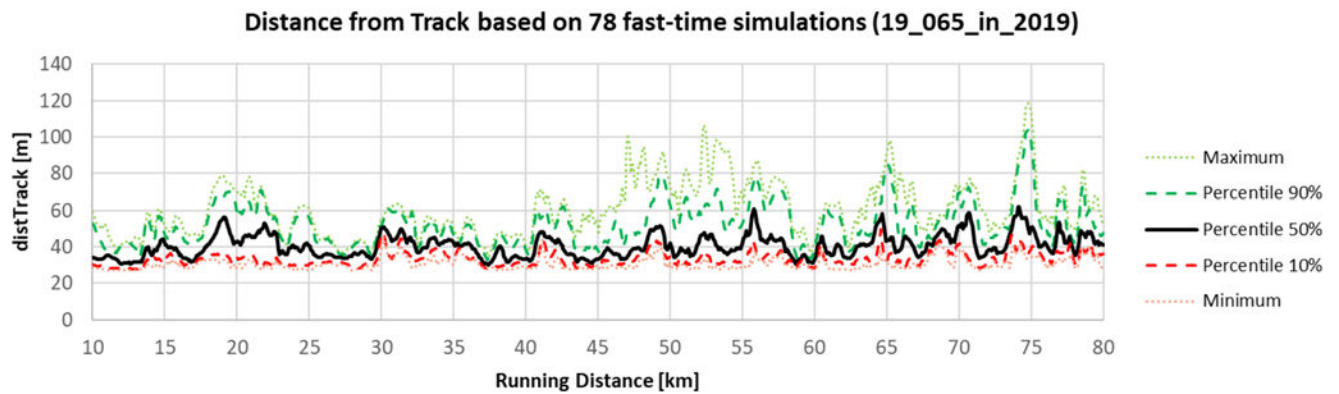
Een volledig beeld van de tijd- en plaatsafhankelijkheid van de afstand tot het referentietraject wordt verkregen op basis van de 2D-contourplots. In Figuur 32 wordt de contourplot voor de afstand tot het referentietraject gecombineerd met deze voor de giersnelheid en de dwarsstroming. De contourplot voor de afstand tot het referentietraject wordt gegenereerd voor een kleurenschaal van 27 m (halve scheepsbreedte = minimale waarde) tot 108 m (twee scheepsbreedtes). Figuur 32 illustreert erg duidelijk de relatie tussen dwarsstroming en de afwijking tot het referentietraject. Ook de invloed van een bochtmanoeuvre op de afstand tot het referentietraject wordt geïllustreerd. Voorbeelden hiervan zijn de bochten van Hansweert (49 km) en Bath (69 km) bij kleine dwarsstroming. Het insturen van een bocht geeft aanleiding tot een grotere padbreedte bij bochtmanoeuvres en bijhorende grotere afstanden tot het referentietraject.

Op basis van Figuur 32 kunnen de meest kritische condities duidelijk geïdentificeerd worden. De meest uitgesproken locatie betreft de bocht van Saeftinghe bij vloedstroom, waarbij de stroom het schip verzet naar de buitenbocht (groene boeienlijn) zoals geïllustreerd in Figuur 33. Uit Figuur 33 kan bovendien afgeleid worden dat de afwijking van het referentietraject te Saeftinghe niet gepaard ging met een risico tot stranding van het schip aangezien de vaarweg daar voldoende ruim is. De dieptelijn overeenkomstig UKC150% vertoont een verruiming in de buitenbocht die de afwijking van het scheepstraject faciliteert. Gelijkaardige combinaties van dwarsstroming richting buitenbocht treden op te Hansweert (49 km, zie Figuur 34; en 52 km, zie Figuur 35), Walsoorden (56 km) en Valkenisse (65 km).

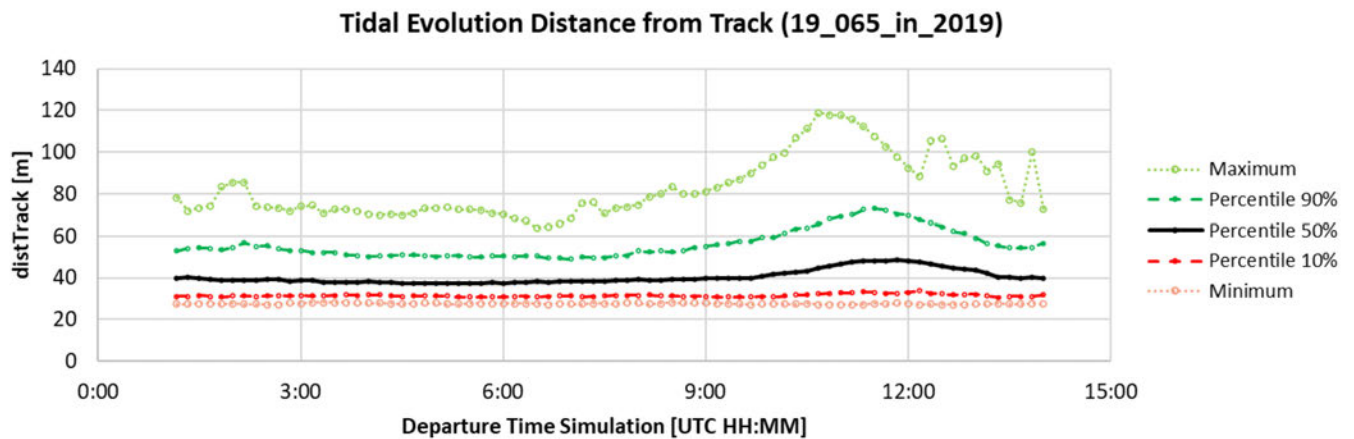
Afwaarts Hansweert (47 km) treedt er ook een grote afstand tot het referentietraject op bij ebstroom doordat deze een stromingsgradiënt genereert die de opbouw van de giersnelheid naar stuurboord tegenwerkt (zie Figuur 36).

Ook opwaarts Hansweert (53-54 km) werd in Figuur 26 reeds geïllustreerd dat de dwarsstroming en stromingsgradiënt bij kentering te Ossensisse (12h40) een belangrijke invloed kunnen hebben op het vaartraject. Dit wordt eveneens geïllustreerd in Figuur 32, die voor deze conditie (combinatie van tijd en positie) een horizontale oranje zone vertoont voor deze simulatie.

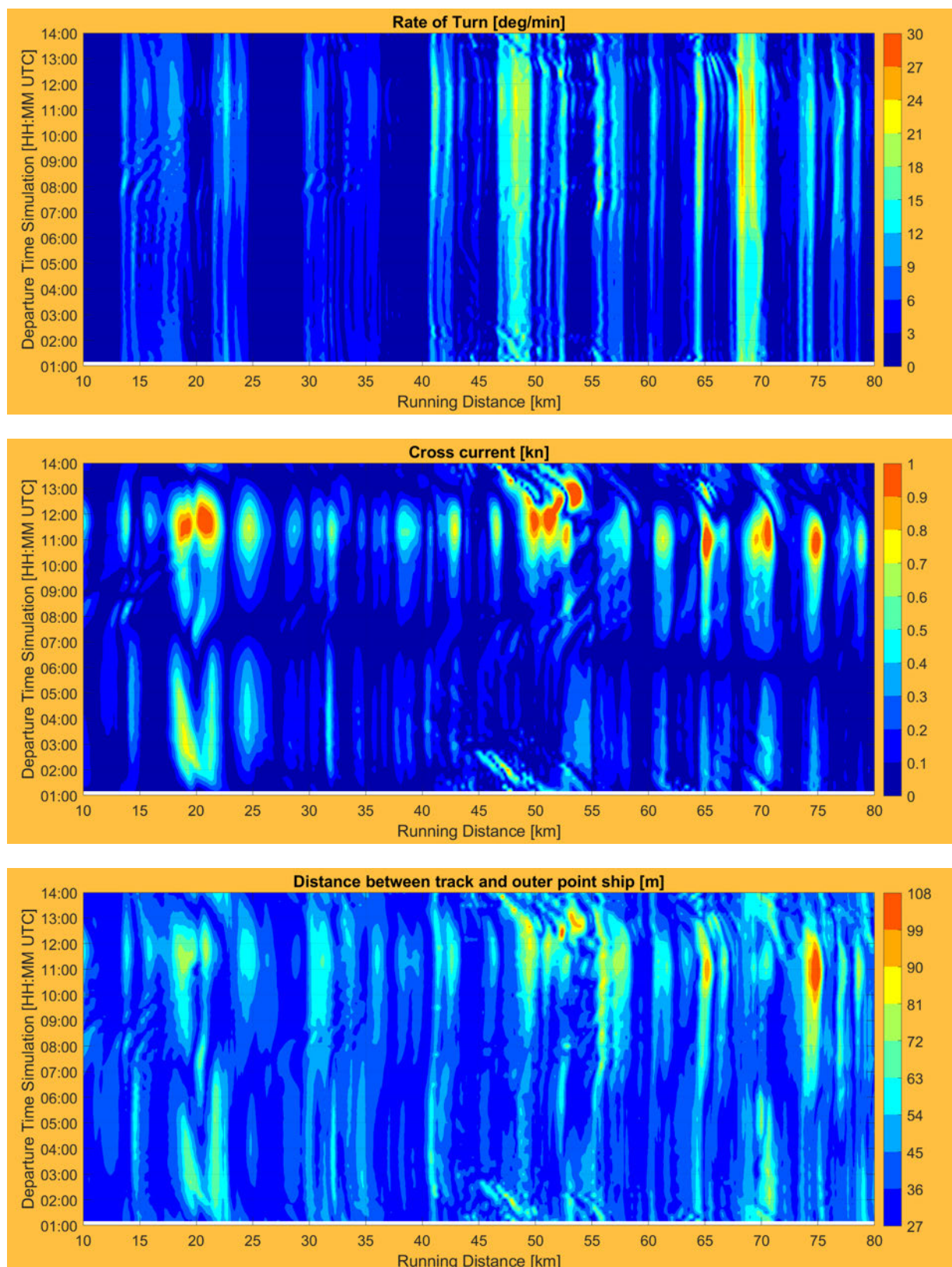
Bovenstaande voorbeelden illustreren dat de afstand tot het referentietraject een geschikte parameter is voor het aantonen van externe verstoringen van de bevaarbaarheid en dus als signaalparameter voor de bevaarbaarheid geldt. Voornamelijk de invloed van stroomcondities komt tot uiting in deze signaalparameter.



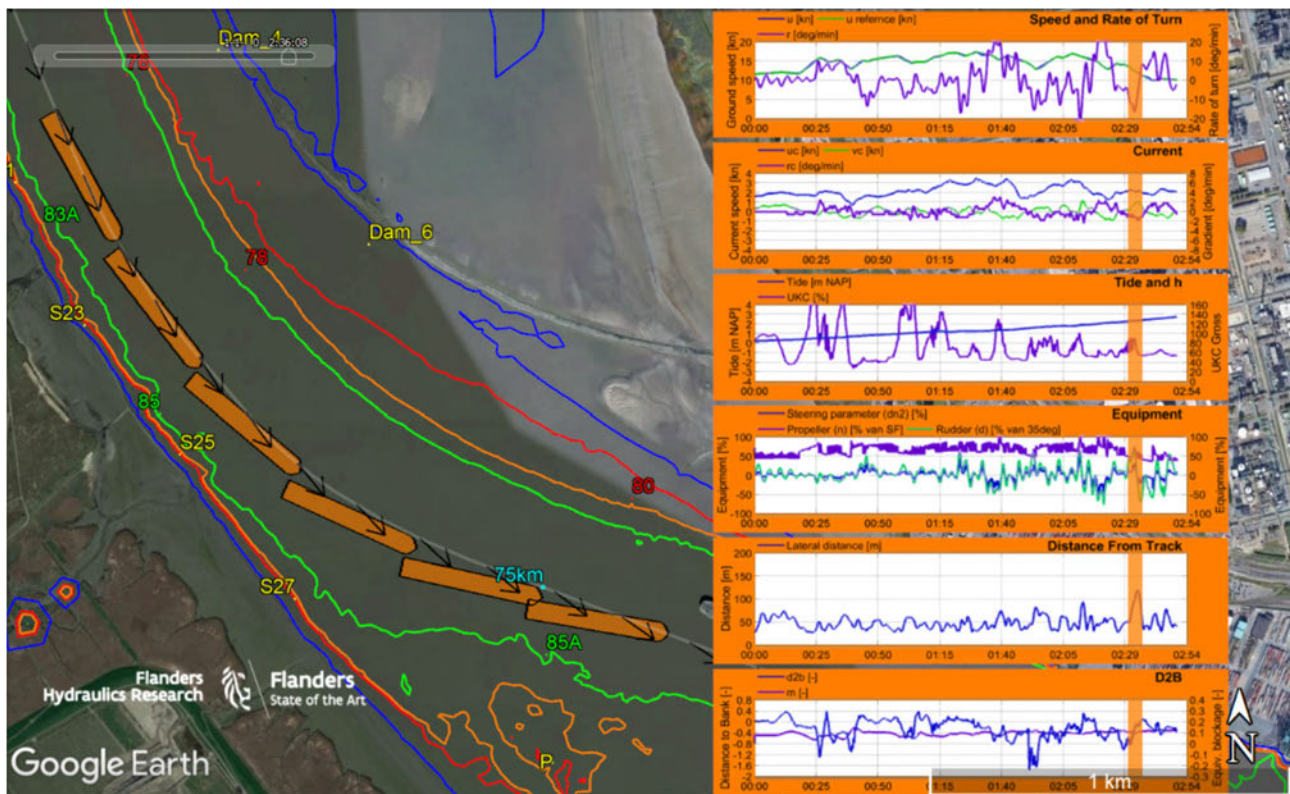
Figuur 30 – Statistische analyse afstand tot referentietraject in functie van km aanduiding langs referentietraject voor scenario opvaart 2019



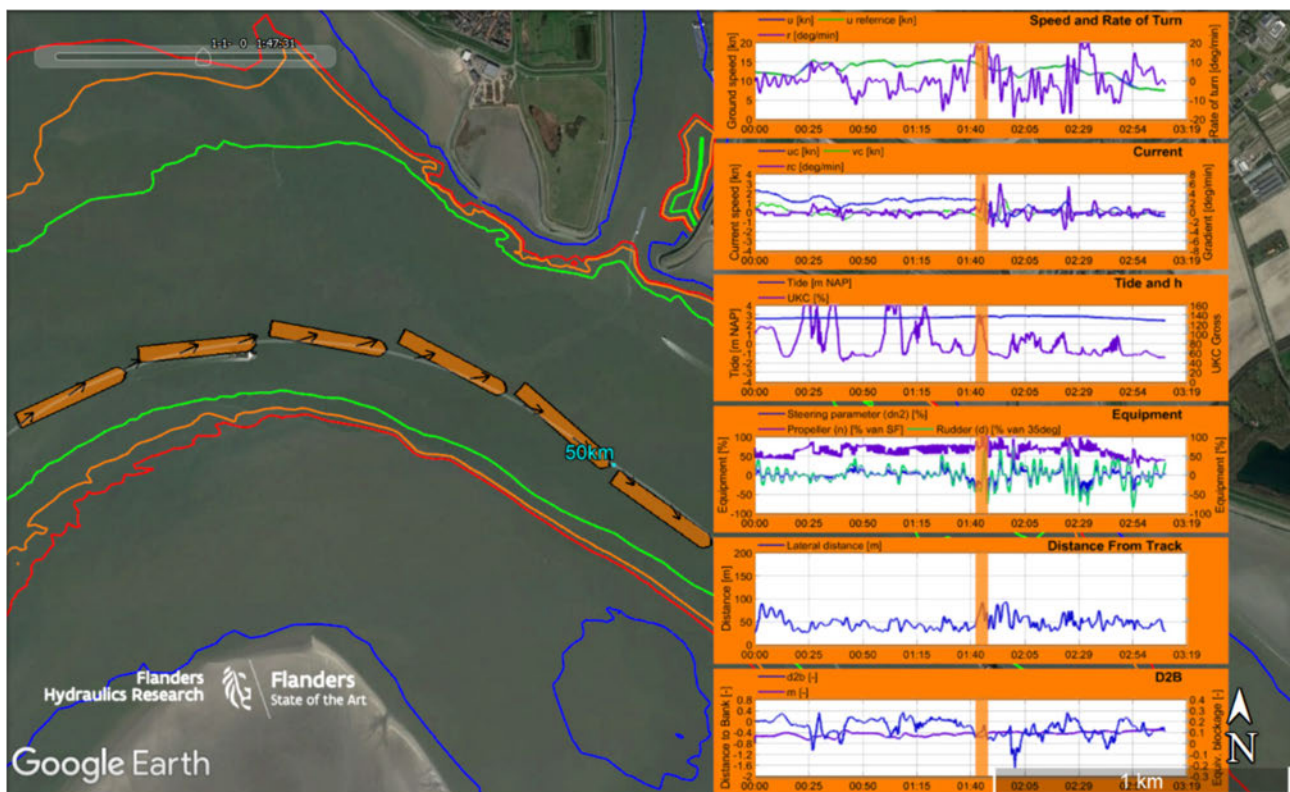
Figuur 31 – Statistische analyse afstand tot referentietraject in functie van tijd voor scenario opvaart 2019



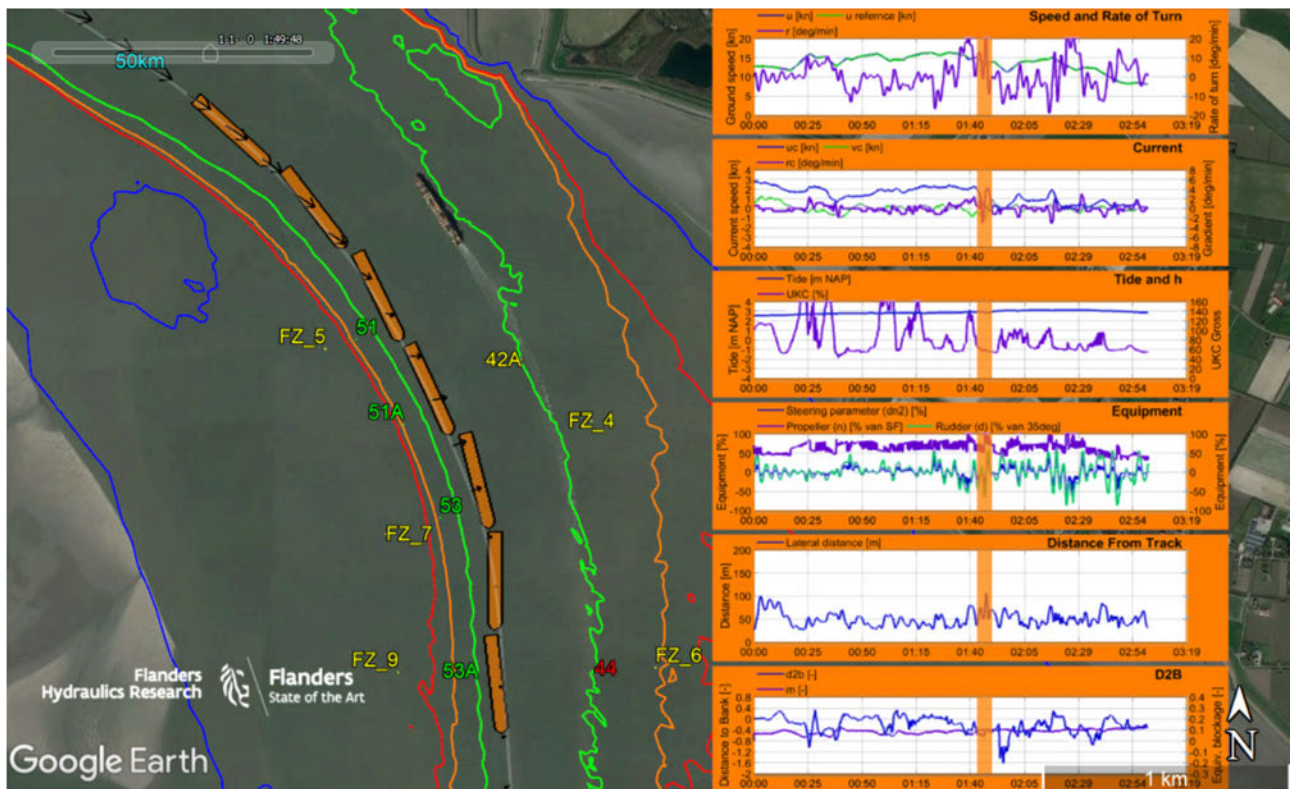
Figuur 32 – 2D-contourplot voor giersnelheid (boven), dwarsstroming (midden) en afstand tot referentietraject (onder) voor scenario opvaart 2019



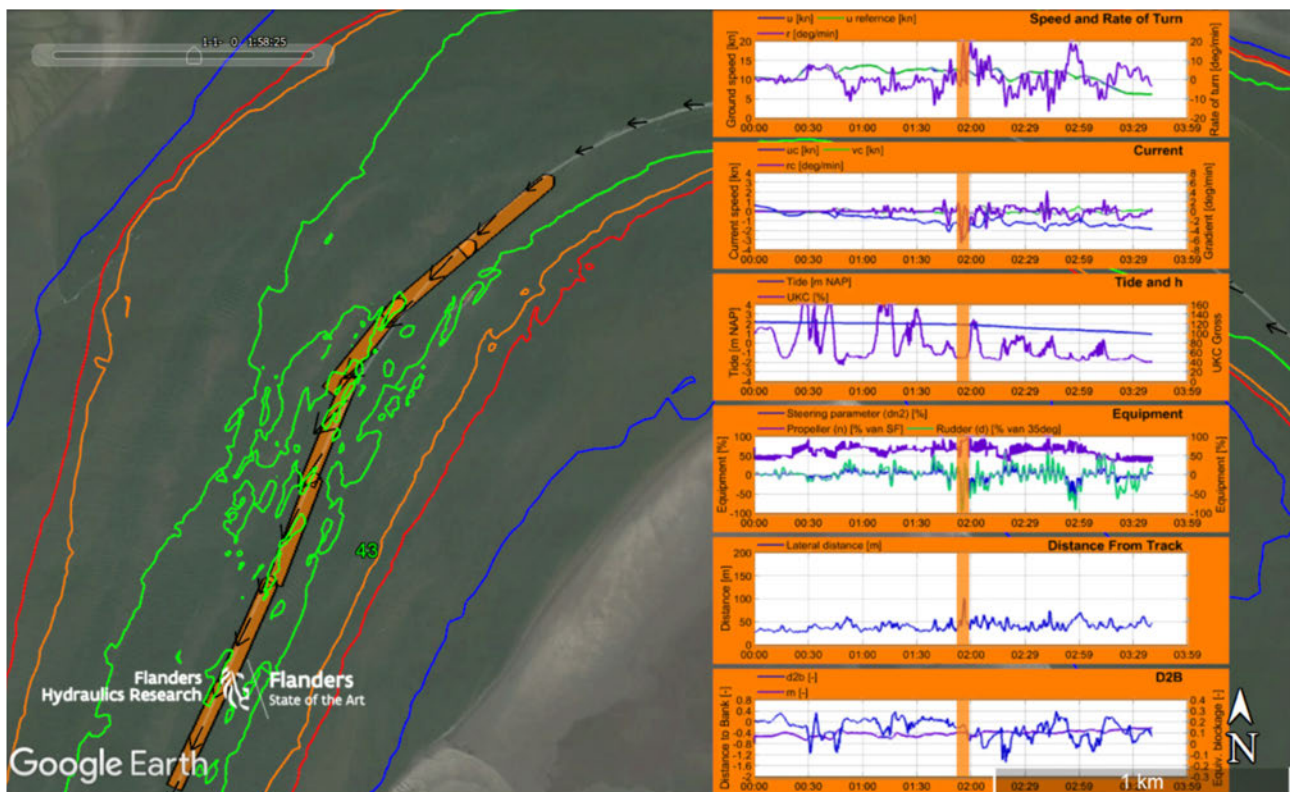
Figuur 33 – KMZ-weergave grote afstand tot referentietraject bij vloedconditie te bocht Saeftinghe (10h50) voor scenario opvaart 2019



Figuur 34 – KMZ-weergave grote afstand tot referentietraject bij vloedconditie te bocht Hansweert (12h40) voor scenario opvaart 2019



Figuur 35 – KMZ-weergave grote afstand tot referentietraject bij vloedconditie te bocht Hansweert (12h20) voor scenario opvaart 2019



Figuur 36 – KMZ-weergave grote afstand tot referentietraject bij ebconditie bocht Hansweert (13h50) voor scenario opvaart 2019

4.1.7 Roergebruik

In §4.1.6 werd de afstand tot het referentietraject gepresenteerd als een parameter voor de bevaarbaarheid van een omgeving. Deze parameter houdt enkel rekening met het vaarpad van het schip maar houdt geen rekening met de inspanning die het schip moet doen om het vooropgestelde traject te volgen. Een tweede signaalparameter is bijgevolg noodzakelijk om dit tweede aspect van bevaarbaarheid te beoordelen.

De inspanning die een schip moet uitoefenen om een vooropgesteld traject te volgen kan geëvalueerd worden aan de hand van de roerhoek. De roerhoek wordt ingesteld door de track-controller, waarbij grotere afwijkingen van de gewenste koers aanleiding zullen geven tot grotere roerhoeken. Deze parameter wordt steeds weergegeven als een verhouding tot de maximale roerhoek (35°). De roerhoek die als output geldt van de simulaties is dus een gevolg van de manoeuvre-eigenschappen van het schip (zie §3.1) en de instellingen van de track controller en meerbepaald de keuze van het Fuzzy Inference Surface (zie §3.2). Andere scheepstypes dan toegepast in deze studie zullen grotere of kleinere roerhoeken nodig hebben om de simulaties uit te voeren. In voorliggend onderzoek wordt de signaalparameter roerhoek echter gebruikt om de relatieve impact van verschillende omgevingscondities onderling te vergelijken en doet deze parameter geen uitspraak over de aanvaardbaarheid van een bepaalde conditie.

In Figuur 37 wordt de evolutie van het roergebruik weergegeven langsheen het referentietraject. Het zal niet verbazen dat het grootste roergebruik toegepast wordt ter hoogte van de rivierbochten. Dit wordt ook geïllustreerd in de bijhorende 2D-contourplots uit Figuur 39. Uit Figuur 38 blijkt dan weer dat de variatie van het roergebruik in functie van het getij kleiner is dan waargenomen voor de parameter afstand tot referentietraject (zie Figuur 31). Opvallend is wel dat het maximale roergebruik nu niet blijkt op te treden bij vloedcondities, maar maximale waarden vertoont bij lage waterstanden en dus kleinere kielspelingen.

De kielspeling heeft immers een belangrijke invloed op het manoeuvreergedrag van het schip, waarbij kleinere kielspelingen aanleiding zullen geven tot een grotere koersstabiliteit van het schip en er bijgevolg grotere roerhoeken nodig zijn om eenzelfde giersnelheid te genereren. Een ander effect dat sterk gerelateerd is aan de kielspeling zijn de oevereffecten die krachten veroorzaken op het schip die de boeg afstoten van de oever. Bij het uitvoeren van een bochtmanoeuvre aan de binnenbocht (zoals het geval voor opvaart te Bath en Hansweert) zullen de oevereffecten de op te bouwen gierbeweging om te bochten dus tegenwerken.

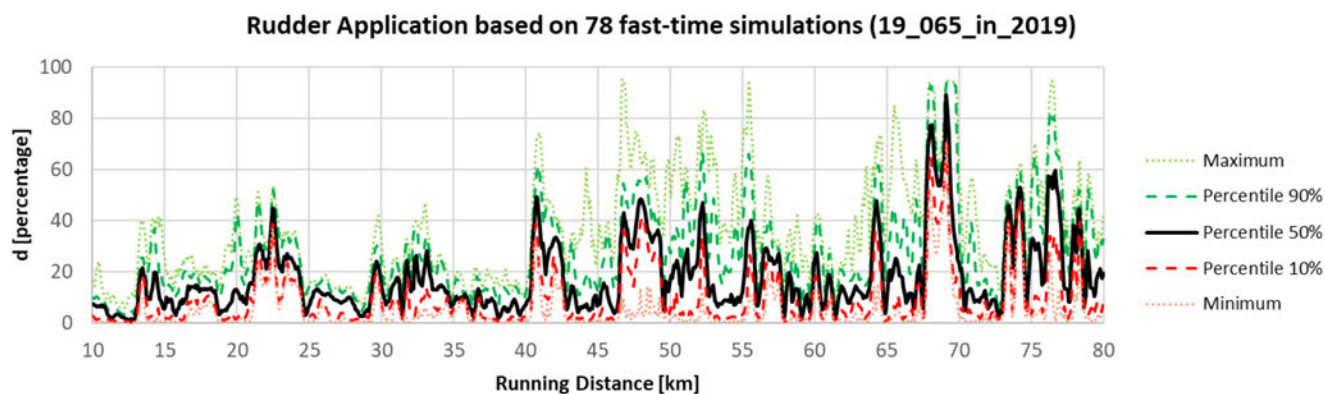
Eén en ander wordt mooi geïllustreerd in de 2D-contourplots uit Figuur 31. De grootste gierbewegingen dienen uitgevoerd te worden in de bocht van Bath ($s=69$ km). In §4.1.3 werd reeds opgemerkt dat de vereiste giersnelheid afhankelijk is van de vaarsnelheid over de grond en dus hogere waarden heeft bij maximale vloedstroom. Dit wordt geïllustreerd in de verticale variatie van de giersnelheden in de bovenste contourplot uit Figuur 31. Anderzijds blijkt uit de contourplot van het roergebruik (onderste grafiek uit Figuur 31), dat het grootste roergebruik niet nodig is voor de hoogste giersnelheden bij vloedstroom, maar wel voor de condities waarbij de bocht van Bath bereikt wordt bij kleine kielspelingen (middelste grafiek uit Figuur 31). Dit toont de belangrijke invloed van de kielspeling op het roergebruik aan.

De kielspeling is voor gelijke tijcondities rechtstreeks gerelateerd aan het bodemprofiel van de vaarweg waarbij de morfologische evolutie van de vaarweg één van de belangrijkste variabelen in de evaluatiemethodologie is. Deze morfologische evolutie van het Schelde-estuarium blijkt dus een belangrijke rechtstreekse impact te hebben op de bevaarbaarheid van de rivier waarvoor het roergebruik een geschikte signaalparameter is.

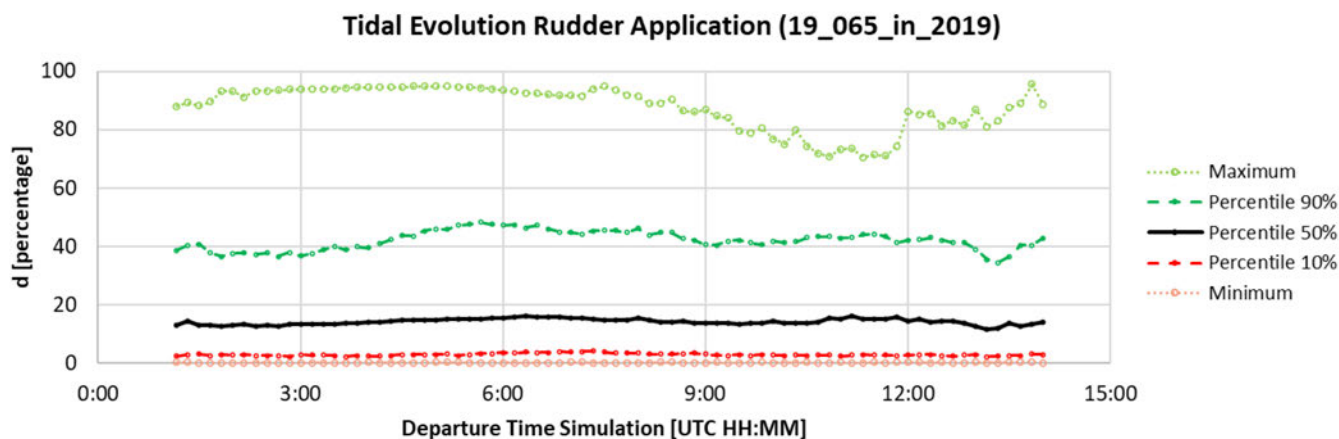
Het grootste roergebruik wordt vastgesteld te Bath bij laag water (05h30). Voor de tijkromme te Bath wordt verwezen naar Figuur 10. De vaarbaanplot te Bath van de bijhorende simulatie wordt weergegeven in Figuur 40. Hieruit blijkt dat in deze conditie de track-controller (geholpen door de hoge koersstabiliteit bij kleine kielspeling) in staat is om het schip op korte afstand van het referentietraject te sturen en dus relatief kleine waarden heeft voor de signaalparameter afstand tot referentietraject. Anderzijds blijkt dat de track-controller, om dit gunstige vaartraject te volgen, een erg groot roergebruik diende toe te passen. Gedurende meer dan vijf minuten dienden roerhoeken groter dan 19° toegepast te worden, waarbij de roerhoek tweemaal opgevoerd diende te worden tot (bijna) de maximale roerhoek (35°). Figuur 40 illustreert dus de

beperkte reserves op de bevaarbaarheid van de bocht van Bath en de toepasbaarheid van de roerhoek als signaalparameter voor deze reserves.

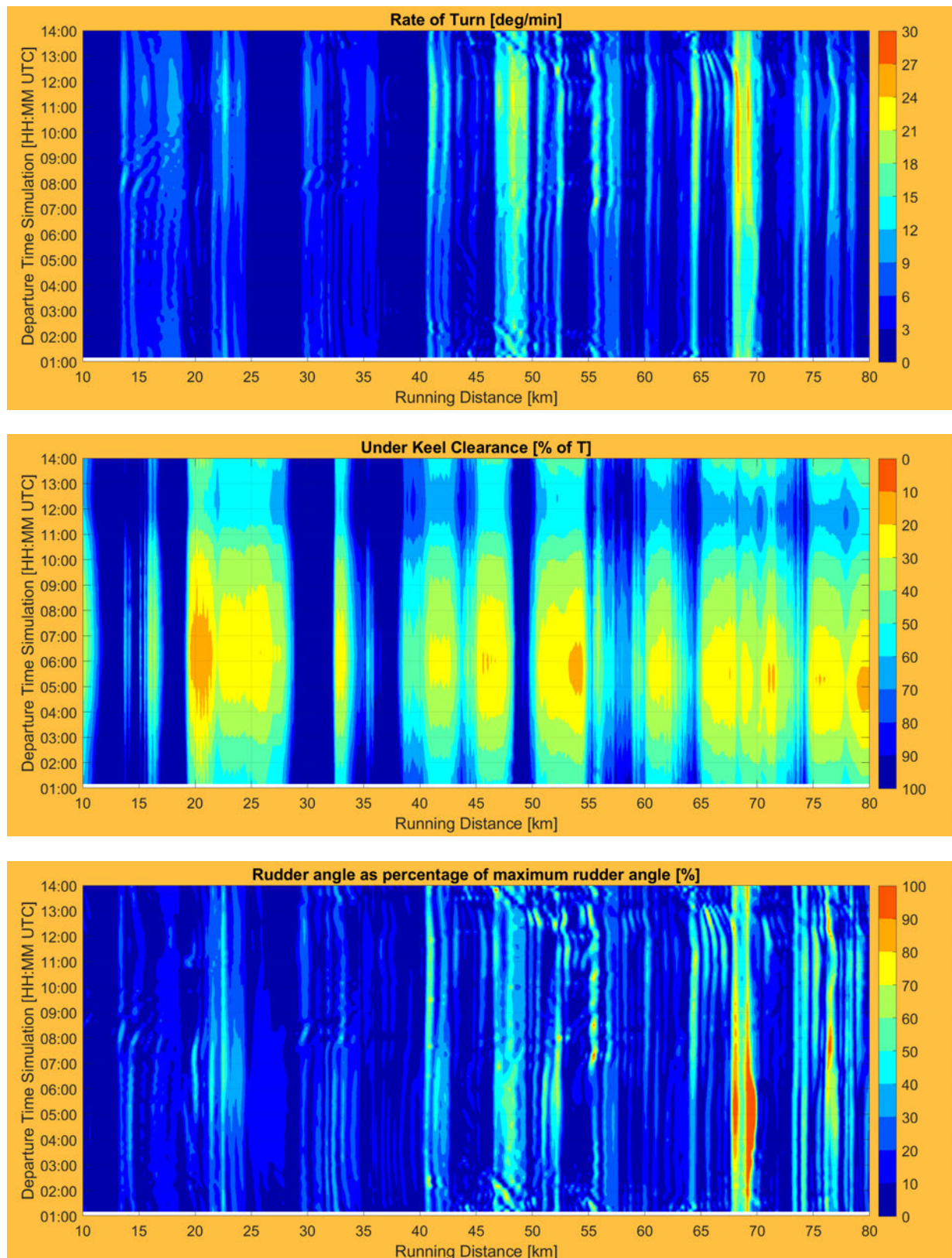
Ook ter hoogte van de Noordzeeterminal bleken er sporadisch hoge roerhoeken nodig om de bocht naar stuurboord (richting Europaterminal) te maken. Deze grote roerhoeken waren eerder ingegeven door de kleine schroeftoerentallen die in deze zone ingezet werden om tegemoet te komen aan de deceleratie vooropgesteld door de vaarsnelheden. Een kleiner schroeftoerental geeft aanleiding tot een mindere roereffectiviteit waardoor de grotere roerhoeken nodig zijn om eenzelfde gierbeweging te realiseren.



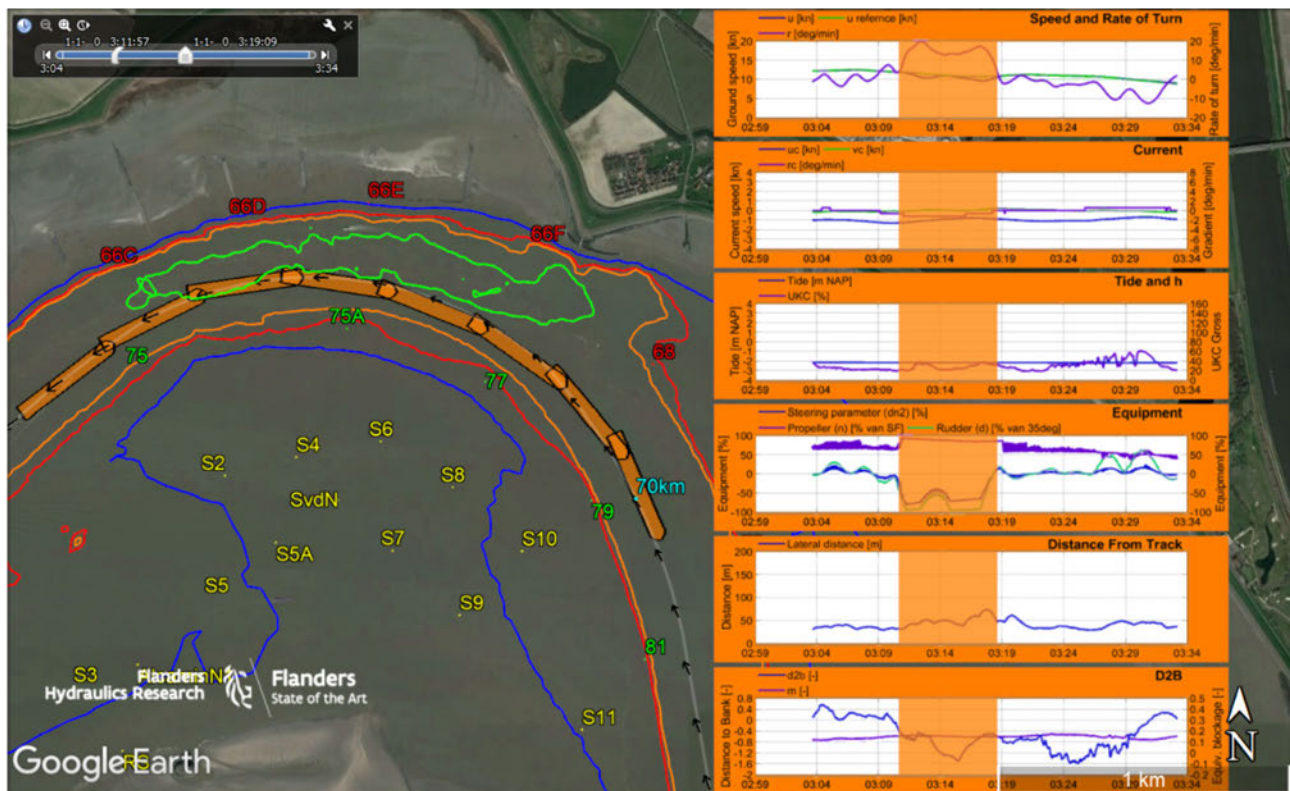
Figuur 37 – Statistische analyse roergebruik langs referentietraject voor scenario opvaart 2019



Figuur 38 – Statistische analyse roergebruik in functie van tijd voor scenario opvaart 2019



Figuur 39 – 2D-contourplot voor giersnelheid (boven), kielspeling (midden) en afstand tot roerhoek (onder) voor scenario opvaart 2019



Figuur 40 – KMZ-weergave grootste roergebruik bij laag water te Bath (05h30) voor scenario opvaart 2019 (detail Bath)

4.2 Resultaten voor scenario afvaart 2019

In §4 werden de resultaten voor simulaties bij opvaart in de simulatieomgeving 2019 uitvoerig gepresenteerd. Op basis hiervan werden de parameters afstand tot referentietraject en roergebruik voorgesteld als signaalparameters voor de bevaarbaarheid.

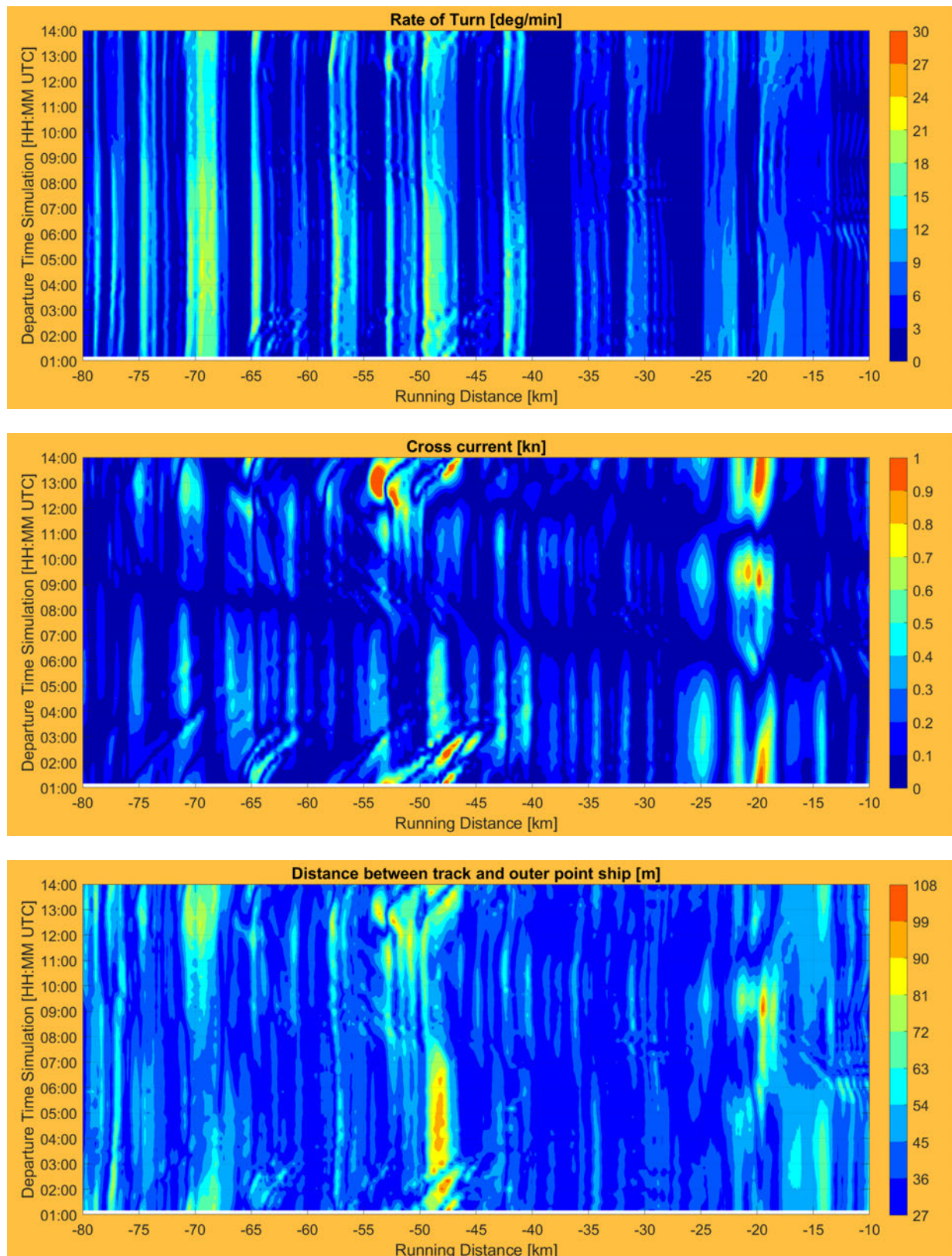
Bij de bespreking van de afvaart wordt de nadruk gelegd op deze signaalparameters en wordt op basis van deze resultaten de belangrijkste bevaarbaarheidsknelpunten bij afvaart geïdentificeerd.

4.2.1 Afstand tot referentietraject

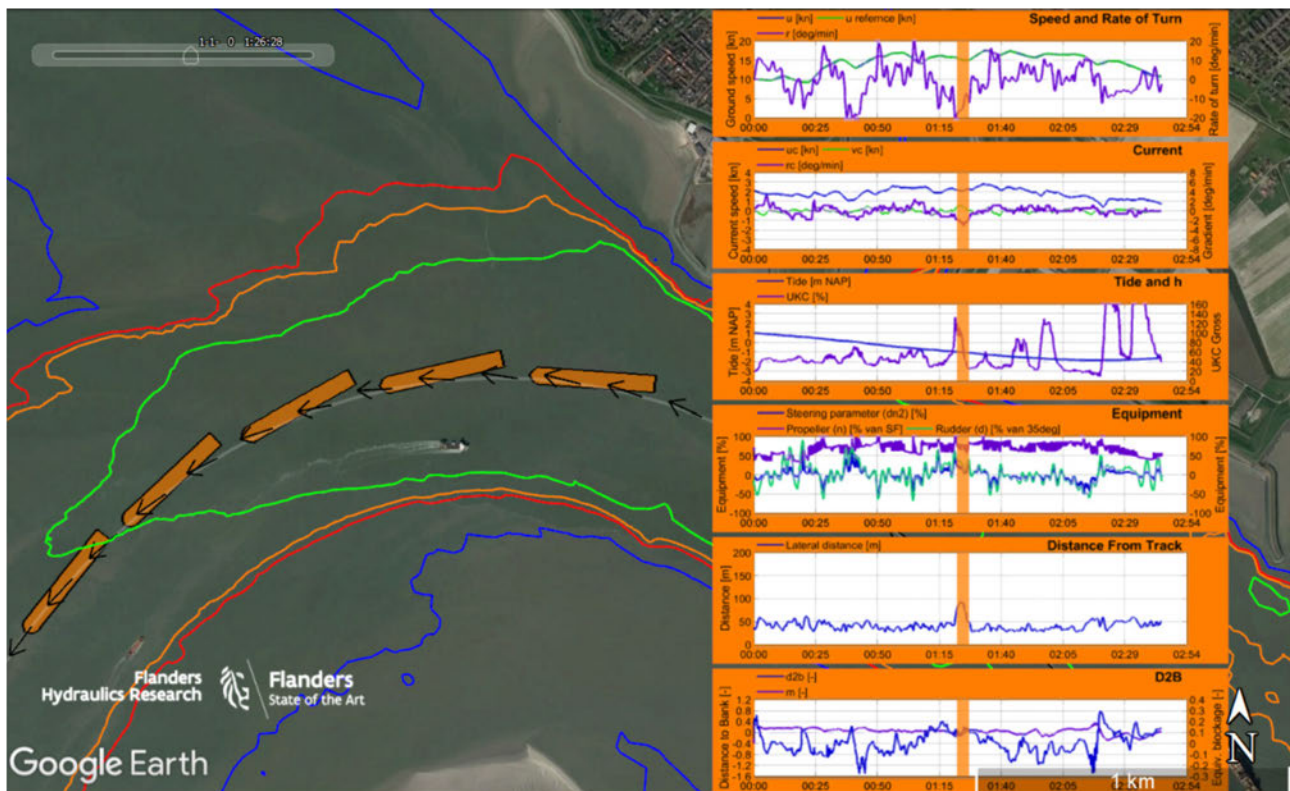
De 2D-contourplots voor de afstand tot het referentietraject, gecombineerd met de giersnelheid en de dwarsstroming voor de simulaties uit 2019 in afvaart worden weergegeven in Figuur 41. Opvallend hierbij is dat de giersnelheden voor de bocht van Bath en Hansweert gepaard gaan met lagere waarden voor afvaart dan voor opvaart. Dit is enerzijds een gevolg van de positie van de afvaart in de buitenbocht en anderzijds door de kleinere ebstroomsnelheden vergeleken met vloedstroomsnelheden en de daaruit volgende kleinere vaarsnelheden over de grond bij afvaart. Bovendien helpen oevereffecten (boeg wordt weg van de dichtstbijzijnde oever gedraaid) het bochten.

Net als bij opvaart blijken grotere afwijkingen van het referentietraject op te treden bij dwarsstroming naar de buitenbocht, zoals waarneembaar te Hansweert (49 km) bij ebstroom (zie Figuur 42).

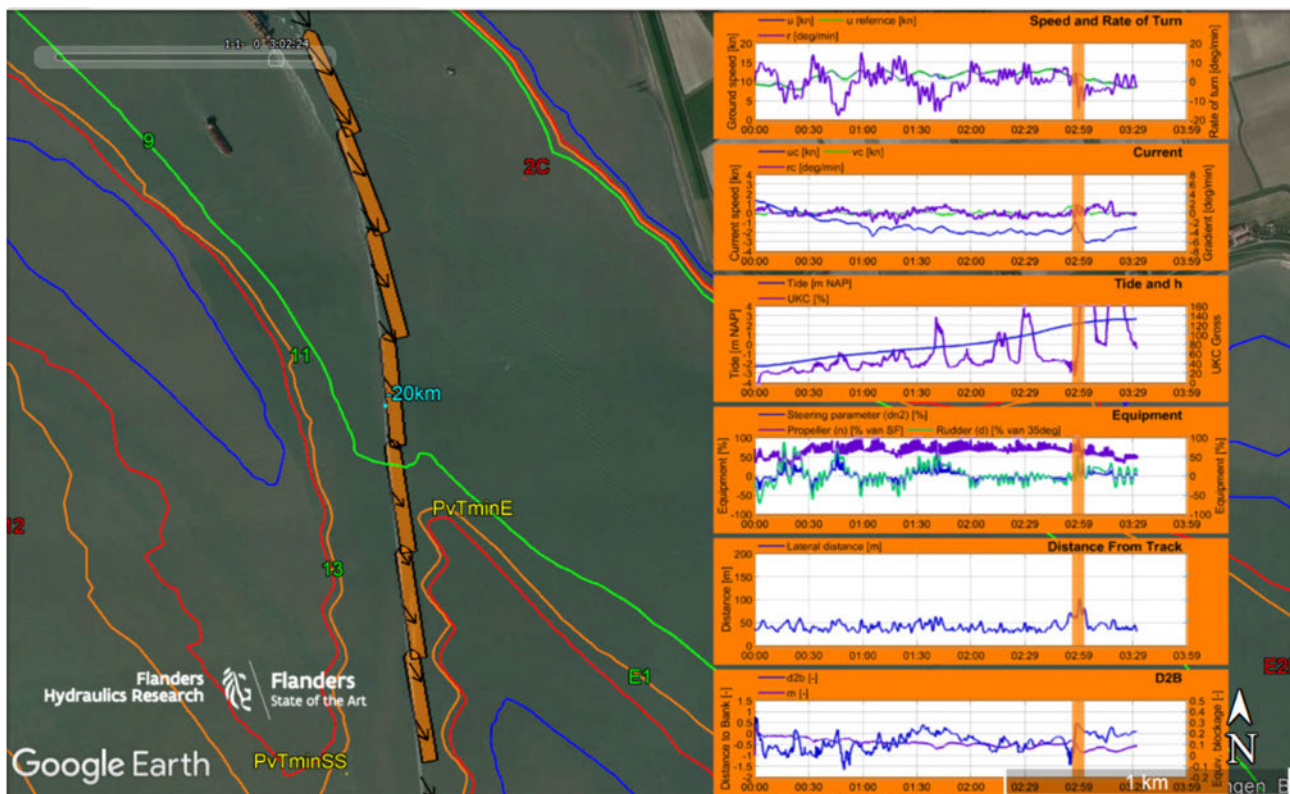
Ook de vloedstroom in de pas van Borssele en tijdens het bochtmanoeuvre naar bakboord na Borssele geeft aanleiding tot een kortstondige belangrijke afwijking van het referentietraject afwaarts Borssele (zie Figuur 43).



Figuur 41 – 2D-contourplot voor giersnelheid (boven), dwarsstroming (midden) en afstand tot referentietraject (onder) voor scenario afvaart 2019



Figuur 42 – KMZ-weergave afstand tot referentietraject bij ebstroom te Hansweert (05h00) voor scenario afvaart 2019



Figuur 43 – KMZ-weergave afstand tot referentietraject bij vloedstroom te Borsselle (09h10) voor scenario afvaart 2019

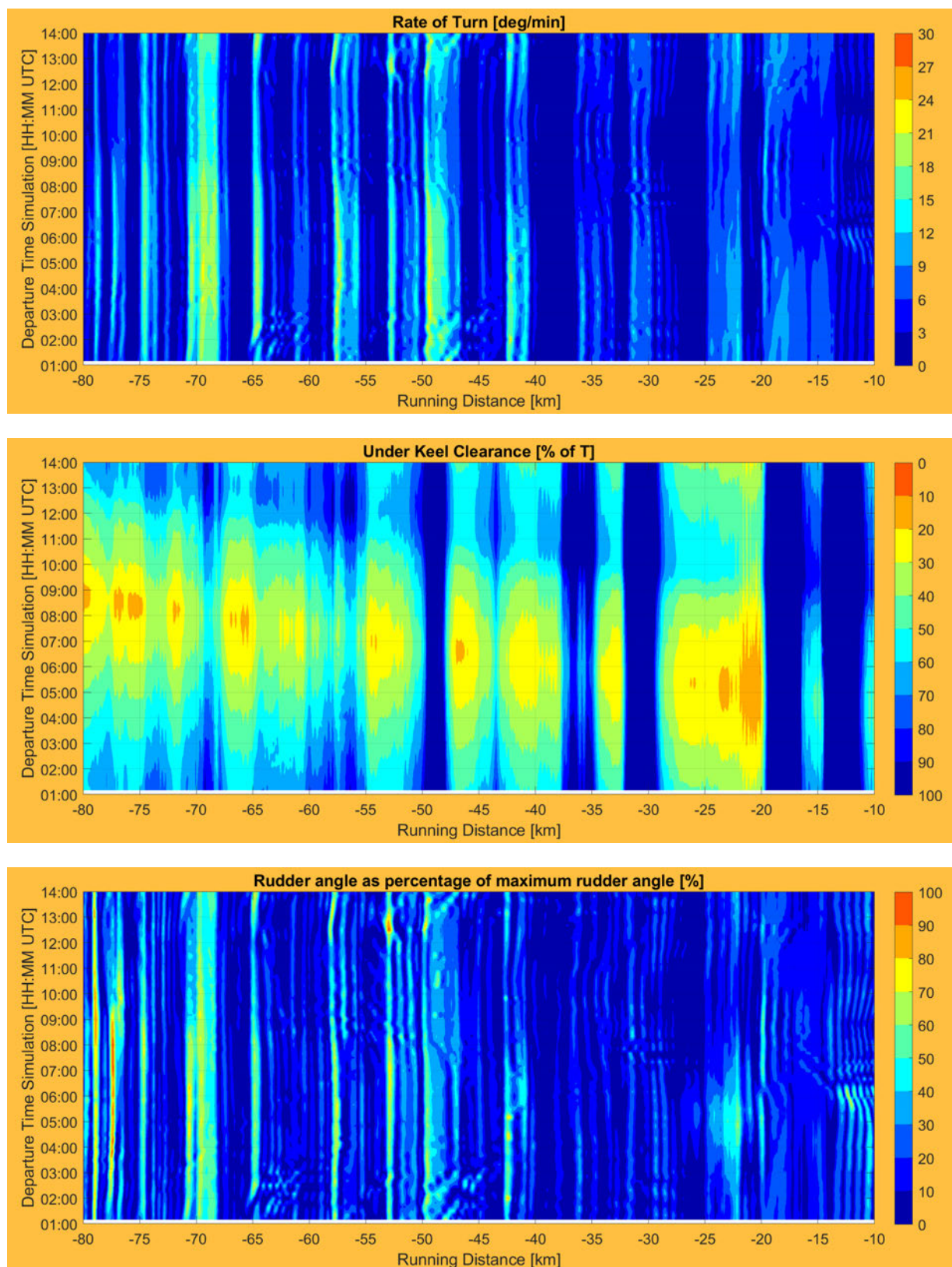
4.2.2 Roergebruik

Wanneer het roergebruik in afvaart (zie Figuur 44) vergeleken wordt met het roergebruik in opvaart (zie Figuur 39) dan blijken in afvaart kleinere maximale roerhoeken op te treden. Zo blijkt bij Bath het roergebruik steeds minder dan 80% te bedragen. De reden hiervoor zijn de ruimere bocht in afvaart, de grotere waterdiepte aan de rechterzijde van de vaarweg en de positie van de oever in de buitenbocht, waardoor de oevereffecten de gierbeweging helpen. Het grootste roergebruik in de bocht van Bath blijkt op te treden in de simulatie die aanvatte om 06h20 en was een erg kortstondige toename van de roerhoek om de bocht van Bath in te zetten. Deze was ingegeven door de maximale ebconditie die op dat tijdstip optrad in de bocht van Bath (en de bijhorende maximale giersnelheid zoals blijkt uit de bovenste grafiek van Figuur 44). De invloed van de kielspeling op het roergebruik te Bath is bij afvaart veel minder uitgesproken dan bij opvaart (wegens de grotere bodemdiepte en de gunstige invloed van oevereffecten).

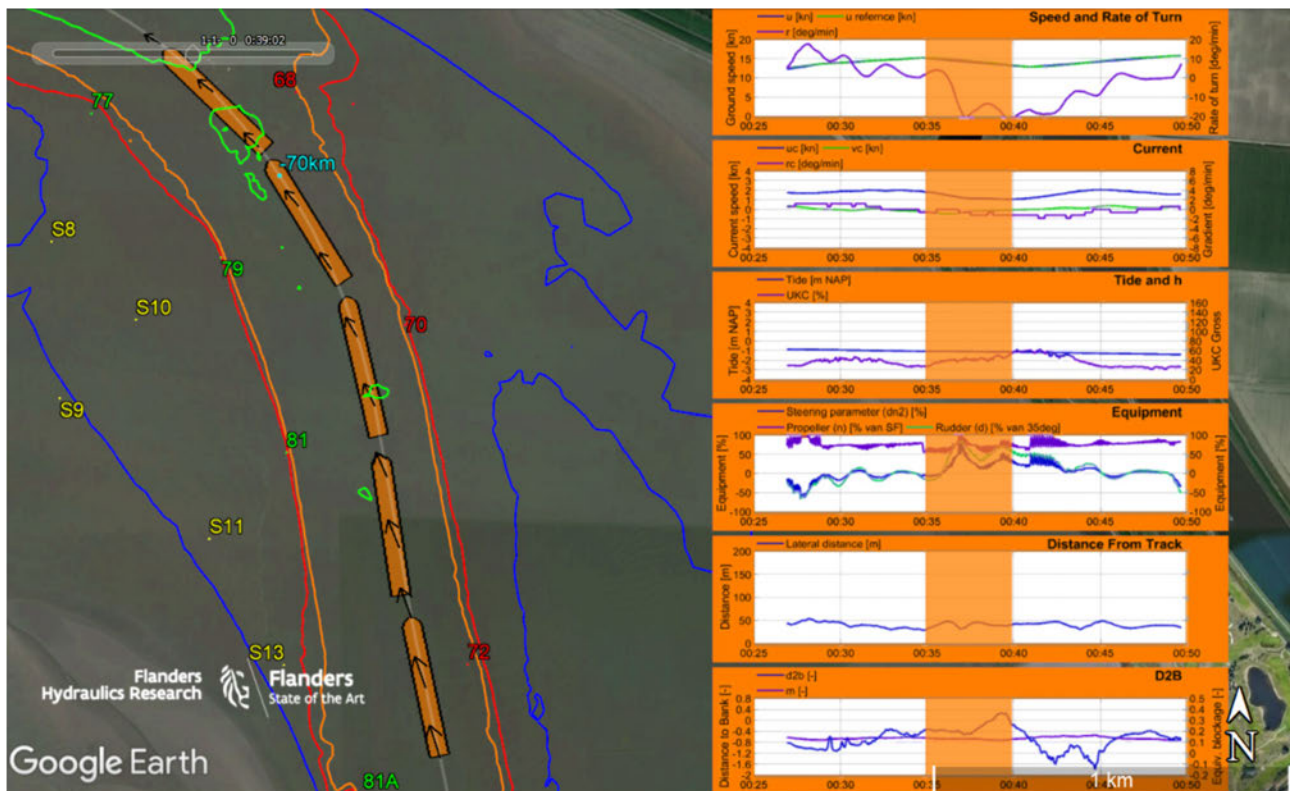
Bij (gematigde) ebcondities blijkt er ook een kortstondig groot roergebruik op te treden aan de Europaterminal (-78 km). De oorzaak was opnieuw de relatief grote vaarsnelheid over de grond waardoor voldoende snel de giersnelheid opgebouwd diende te worden.

Een laatste locatie waar een belangrijk roergebruik waargenomen wordt, is opwaarts Hansweert bij hoog water (12h30) waarbij de vloedstroom richting Schaar van Valkenisse een gierbeweging naar stuurboord induceert terwijl het schip naar bakboord wil bochten (zie Figuur 47). De grote roerhoeken zijn hier ook ingegeven door de aanloop naar deze bocht waarbij het schip onder invloed van de neervorming (initiële dwarsstroming naar bakboord) de bocht nadert met een drifthoek naar stuurboord. Deze conditie is de enige waarbij een groot roergebruik ook aanleiding gaf tot een groot ruimtegebruik (geïllustreerd door de relatief grote afstand tot het referentietraject).

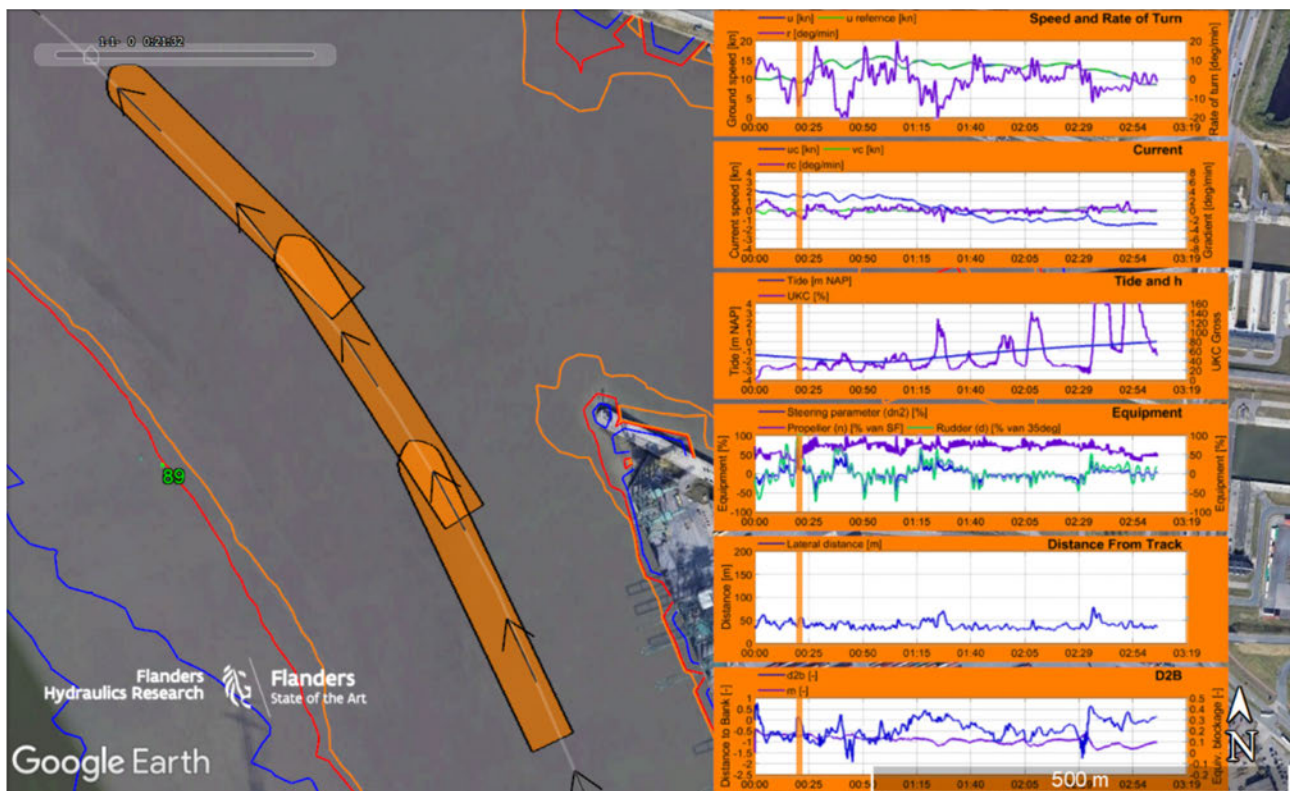
Algemeen kan gesteld worden dat de grootste bevaarbaarheidsknelpunten optreden bij de opvaart maar dat de afvaart ook aandachtspunten heeft.



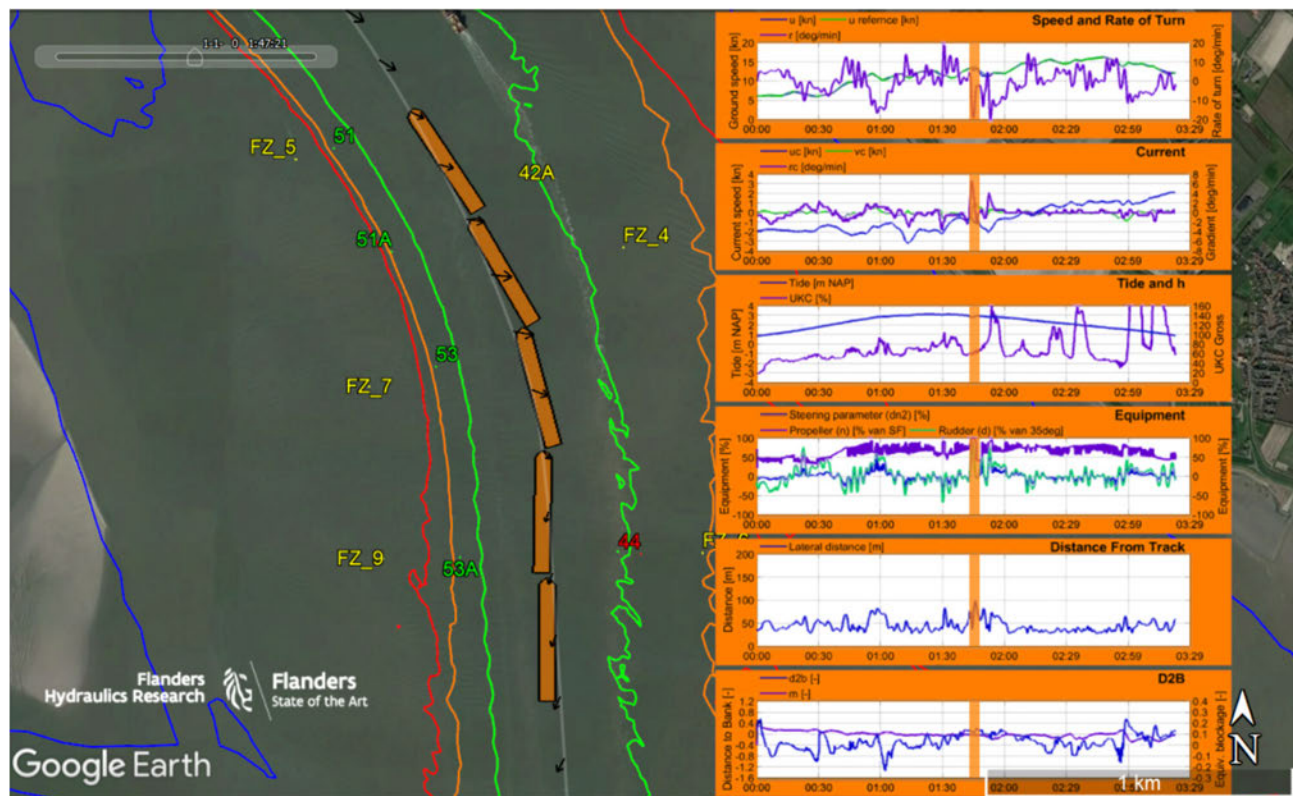
Figuur 44 – 2D-contourplot voor giersnelheid (boven), kielspeling (midden) en afstand tot roerhoek (onder) voor scenario afvaart 2019



Figuur 45 – KMZ-weergave roergebruik bij ebstroom te Bath (06h20)
voor scenario afvaart 2019 (detail Bath)



Figuur 46 – KMZ-weergave roergebruik bij ebstroom te Europaterminal (07h30)
voor scenario afvaart 2019



Figuur 47 – KMZ-weergave roergebruik bij vloedstroom te Hansweert (12h30) voor scenario afvaart 2019

5 Resultaten bevaarbaarheid voor historische condities

In H2 werd een methode geïntroduceerd voor de beoordeling van de bevaarbaarheid van een vaaromgeving op basis van fasttime vaarsimulaties en de daaruit volgende signaalparameters voor ruimtegebruik (afstand tot referentietraject) en voor manoeuvreerreserves (roergebruik).

Deze methode wordt in voorliggend hoofdstuk toegepast op enkele historische condities voor de jaren 2011, 2015 en 2019. Voor elk van deze jaren werden een bathymetrie en numerieke tijberekeningen geïmplementeerd in de vaarsimulator en werden 78 op- en afvaarsimulaties uitgevoerd. De resultaten van deze verschillende historische condities worden onderling vergeleken om de evolutie van de bevaarbaarheid te illustreren op basis van de voorgestelde signaalparameters.

5.1 Opvaart

In Figuur 49 worden de 2D-contourplots weergegeven van de afstand tot het referentietraject (ruimtegebruik) en het roergebruik (manoeuvrerreserve). Bovendien worden in Figuren 50 en 54 gelijkaardige figuren weergegeven met respectievelijk een detail van de omgevingen Bath en Hansweert.

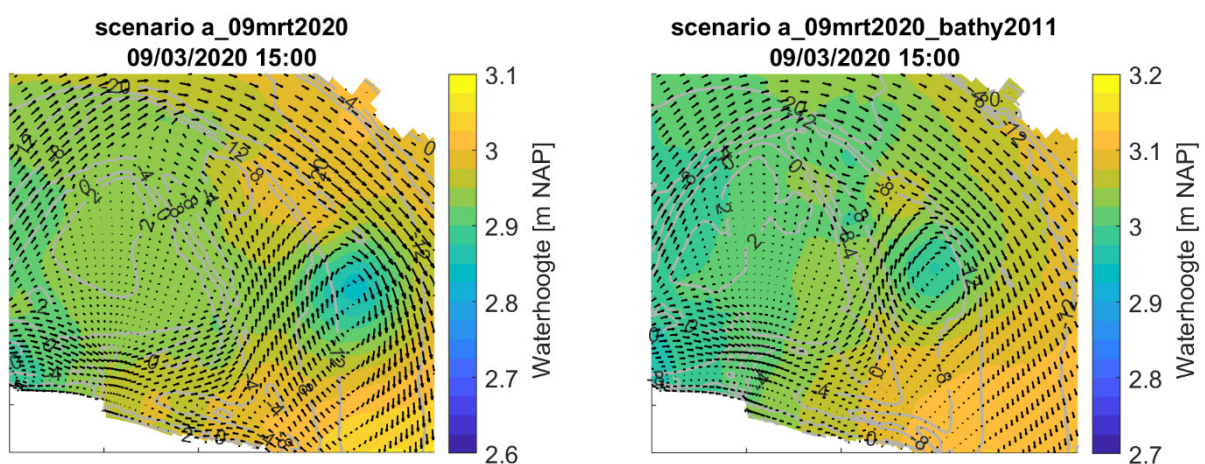
De belangrijkste evolutie die op basis van de drie jaartallen waargenomen kan worden is de laag water conditie te Bath (detail in Figuur 50). De bocht van Bath bestaat uit twee bochten naar stuurboord verbonden door een kort traject met een flauwere kromming. Dit illustreert zich in de twee rode zones (100%, geen reserve) voor roergebruik ter hoogte van baanafstanden 68 km en 69 km. Voornamelijk in het tweede (opwaartse) deel van de bocht blijkt het roergebruik in 2015 en in 2011 over een langere tijd toe te nemen tot maximale waarde bij de laag water condities. Bovendien blijkt dat in dezelfde condities (tijd en locatie) de afstanden tot het referentietraject ook hogere waarden te vertonen in 2015 en 2011 vergeleken met 2019. Waar deze afstand in 2019 maximaal 81 m bedroeg, bedroeg deze in het scenario 2015 tot 90 m om in scenario 2011 tot boven de maximale waarde uit te komen die in de grafiek weergegeven wordt (>99 m). Bijgevolg blijkt in scenario 2011 (en in mindere mate ook 2015) ondanks een maximaal roergebruik (geen reserve) het schip niet meer in staat om het vooropgestelde referentietraject te volgen. Een duidelijke illustratie van de vaartrajecten bij laag water worden weergegeven in de KMZ-weergaves uit Figuur 51. Hieruit blijkt dat de afwijking van de referentiebaan in 2011 veel hoger is dan wat weergegeven wordt in de contourplot.

De signaalparameters illustreren dus duidelijk een negatievere bevaarbaarheid van de bocht van Bath in het jaar 2011 dan in 2015 en in 2019. De oorzaak bleek het ondiepere vaarwegprofiel ter hoogte van baanafstanden 69-69.5 km, wanneer de giersnelheid opgebouwd diende te worden. De kleinere kielspeling op deze locatie vertraagt de opbouw van de giersnelheid (die in 2011 en 2015 stagneert op een waarde tussen 9 °/min en 12 °/min) waardoor het schip onvoldoende snel bocht om het referentietraject te volgen. Bovendien blijkt in 2011 deze ondiepte aan te houden in de zone omstreeks baanafstand 70 km, terwijl op deze locatie de bathymetrie in de jaren 2015 en 2019 een dieper vaarwater vertoont. De vertraging van de giersnelheid kan in 2015 bijgevolg gecompenseerd worden door sneller te gieren in het diepere gebied te 70 km, maar in 2011 is dit door de kleinere kielspeling niet mogelijk, hoewel dit wel noodzakelijk is om een gunstig traject te volgen.

Omgekeerd blijkt dat in het eerste deel van de bocht van Bath (68 km) er in 2011 een kleiner roergebruik nodig was dan in 2015 en 2019 en dat ook dit gerelateerd kan worden aan de kielspeling (de vaarweg was op deze locatie dieper in 2011 dan in de andere jaren).

Uit Figuur 50 blijkt verder voor 2019 een afwijkend roergebruik te Valkenisse (68 km) waarvan in Figuur 53 geïllustreerd wordt dat deze veroorzaakt wordt door een ongunstige stroomconditie in 2019 die niet tot uiting kwam in de numerieke berekeningen uitgevoerd voor 2015 en 2011.

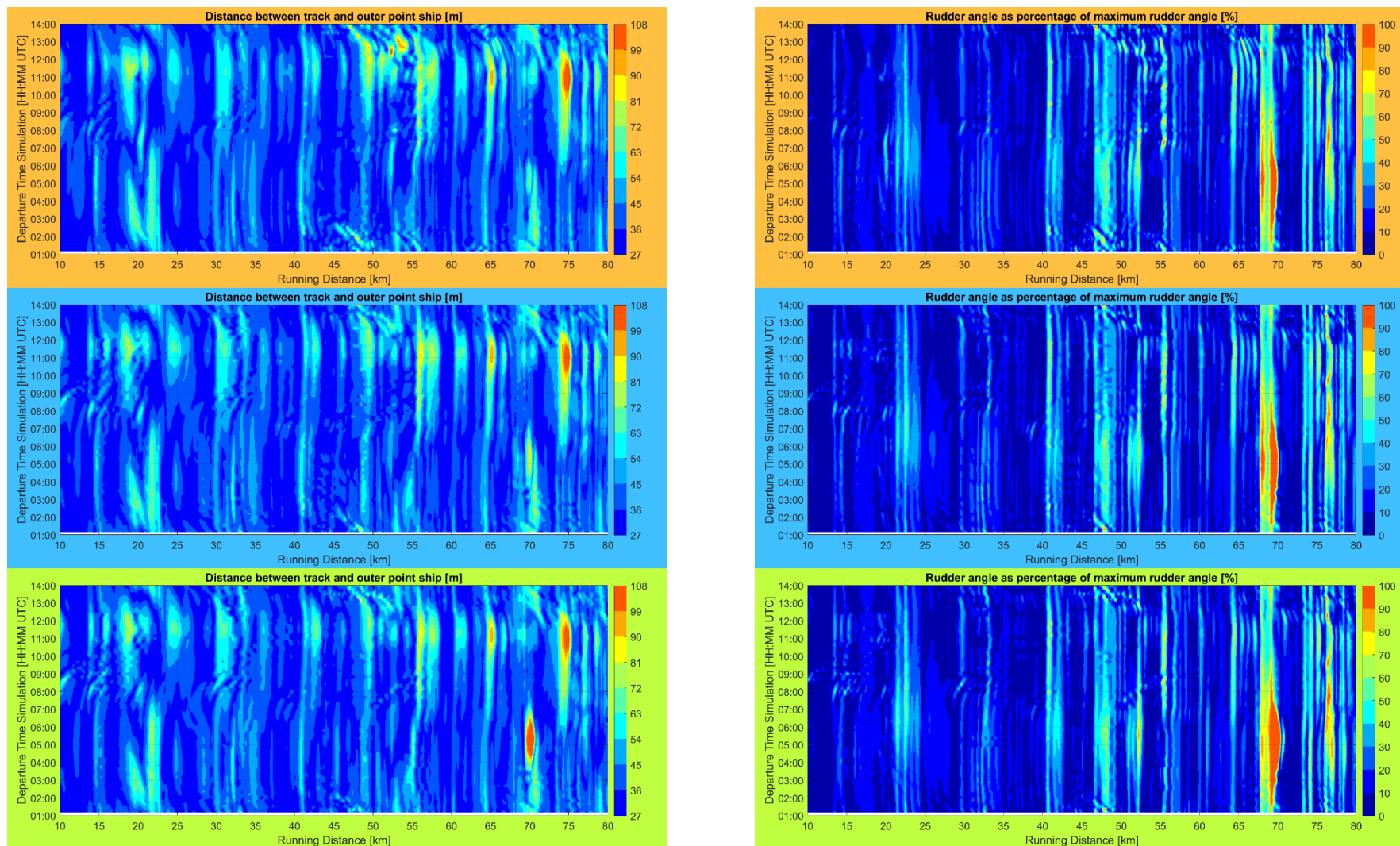
Te Hansweert (zie Figuur 54) springen in eerste instantie het grotere roergebruik in 2019 omstreeks hoog water in het oog. Het meest uitgesproken verschil treedt op om 12h30 te baanafstand 52.5 km (zie Figuur 56) en om 12h50 te baanafstand 53.5 km (zie Figuur 57). Er kunnen echter ook belangrijke verschillen waargenomen worden in de bocht van Hansweert zelf (49 km). Opnieuw blijken de verschillen in bevaarbaarheid te Hansweert het gevolg te zijn van verschillen in stroomprofielen berekend voor 2019 vergeleken met de jaren 2015 en 2011 (zie ook Figuur 55). De stroombeelden voor de situatie in 2019 en 2011 zijn weergegeven in Figuur 48. Hieruit blijkt duidelijk dat in beide situaties een neer wordt gesimuleerd, resulterend in een dwarsstroming. Het is met name de locatie die verschilt tussen beide simulaties. In 2019 is deze zuidwestelijker gelegen t.o.v. 2011, waardoor deze meer in de vaarbaan van het schip optreedt en bijgevolg resulteert een groter effect op de bevaarbaarheid.



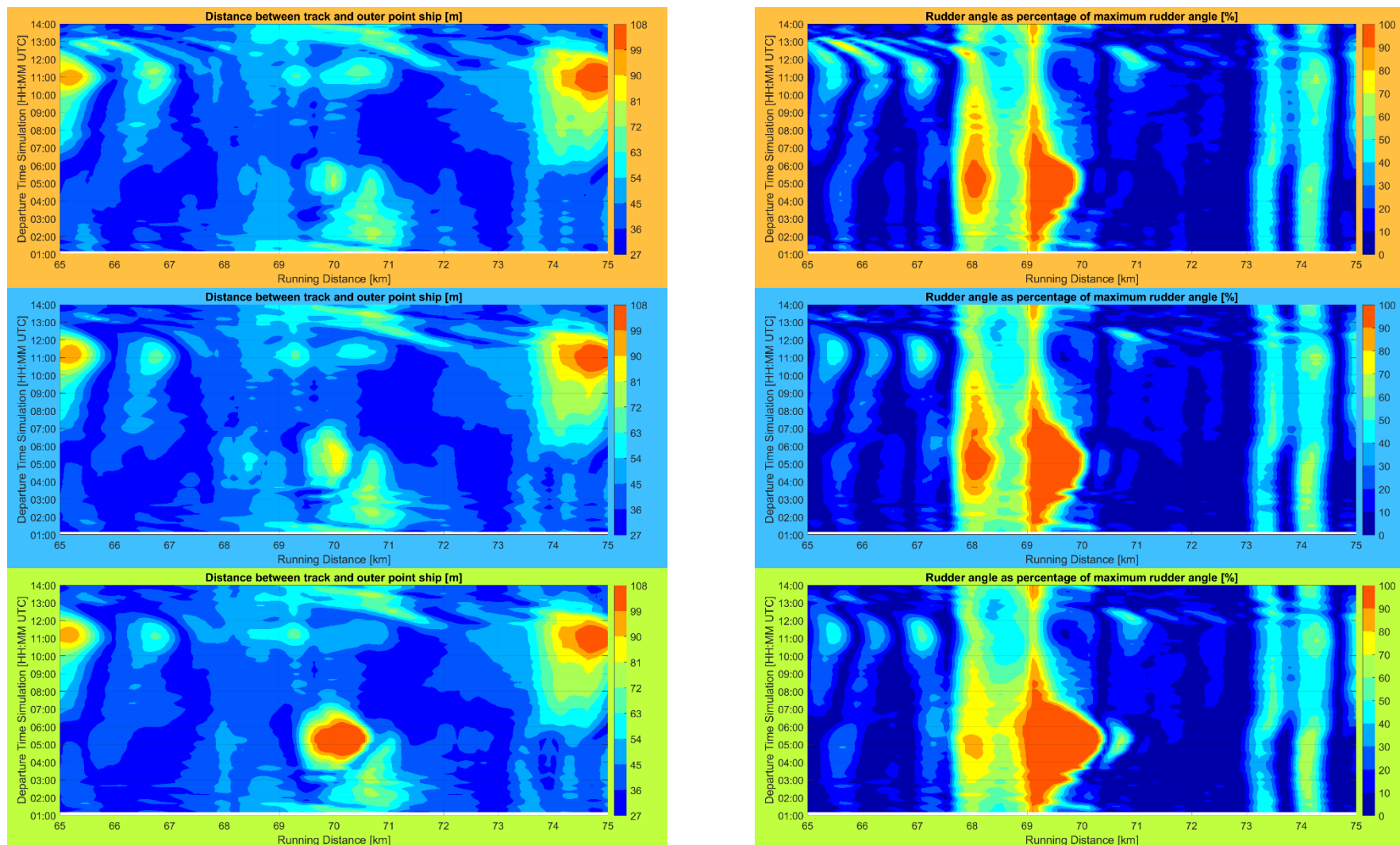
Figuur 48 – Stroompatronen uit het hydrodynamische numeriek model ter hoogte van Hansweert, berekend op basis van een bathymetrie van 2019 (links) en 2011 (rechts)

De signaalparameters voor bevaarbaarheid tonen duidelijk de impact van stroomverschillen op de bevaarbaarheid. De waargenomen toename van dwarsstroming voor het jaar 2019 vergeleken met de eerdere jaren is een aandachtspunt.

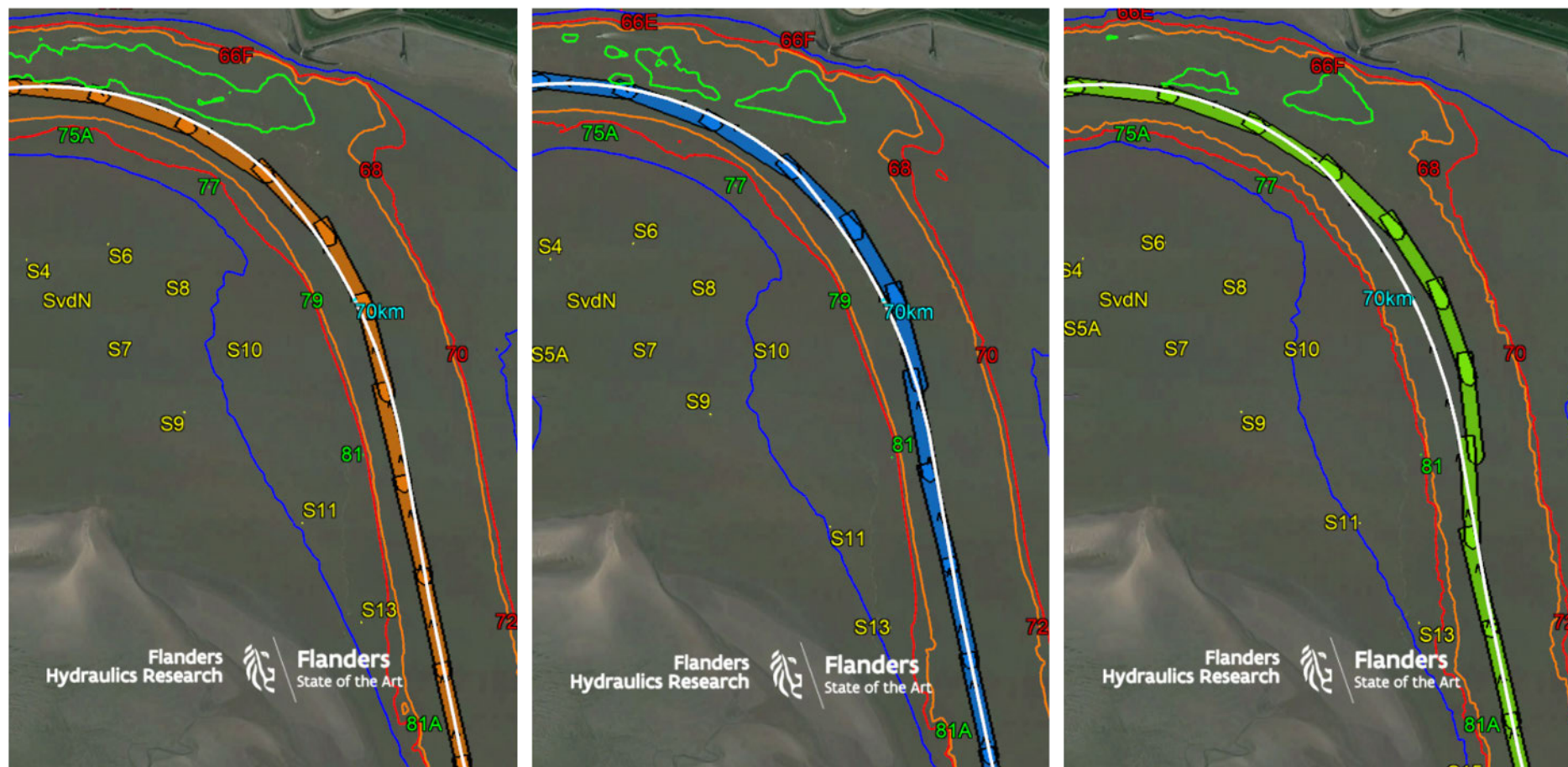
Een laatste opvallende afwijking in bevaarbaarheid te Hansweert wordt waargenomen te baanafstand 52.3 km om 05h30 (laag water). In deze conditie blijkt een groter roergebruik voor het scenario 2011 vergeleken met het jaar 2015. Voor 2019 geldt een tussenliggend resultaat. Wanneer deze locatie (halverwege tussen boeien 51A en 53) in detail onderzocht wordt (zie Figuur 58) dan blijkt de oorzaak voor het grotere roergebruik in 2011 (en in mindere mate in 2019) te wijten aan de kleinere oeverafstand die op deze locatie optreedt bij laag water. De oeverligging in scenario 2015 is merkbaar westelijker wat een gunstig effect heeft op de oevereffecten (binnenbocht) en de opbouw van de gierbeweging bij gematigde roerhoeken. De signaalparameter roergebruik illustreert de ongunstigere oevereffecten tijdens de opvaart in 2011.



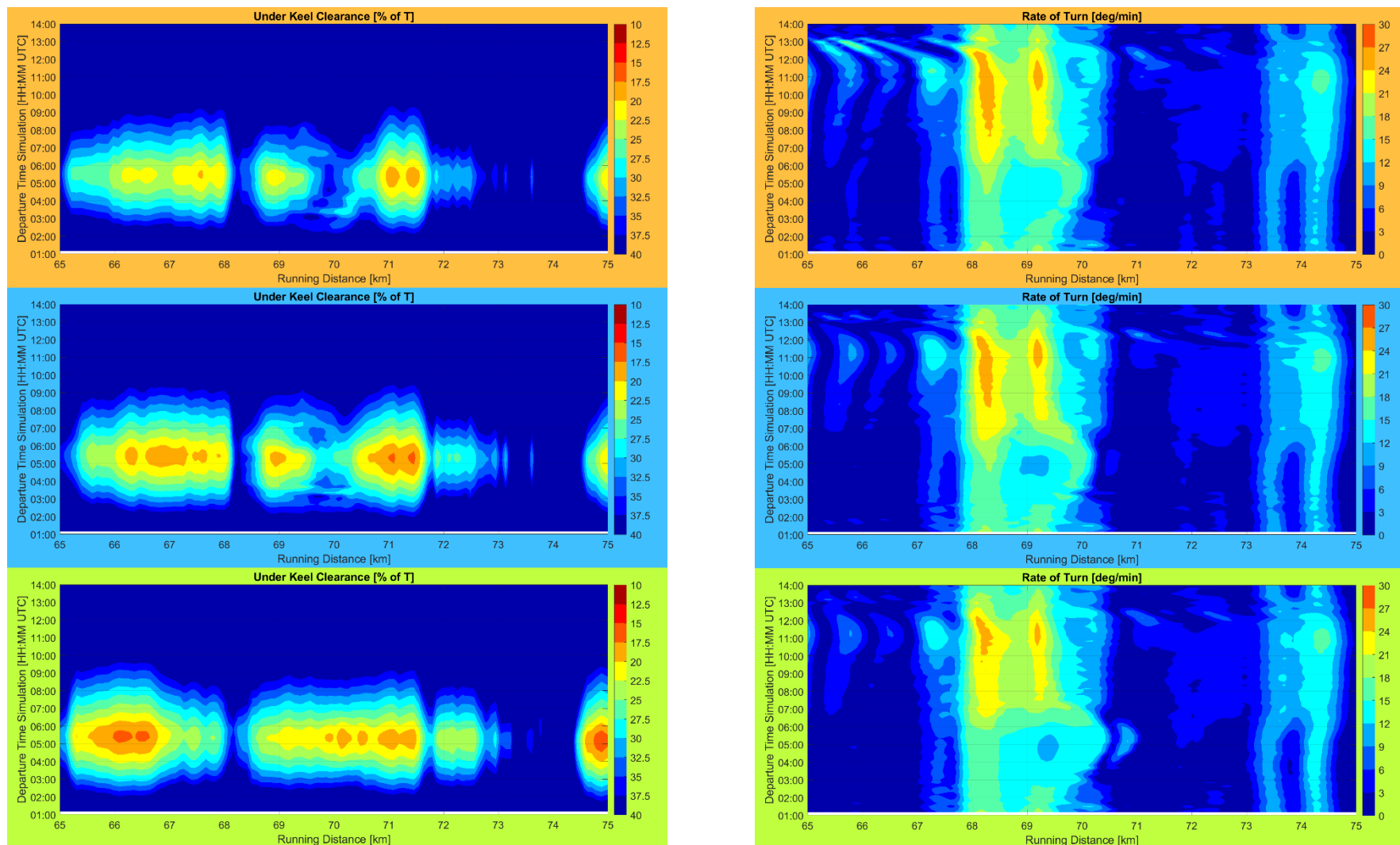
Figuur 49 – 2D-contourplots voor afstand tot referentietraject en roergebruik voor opvaart in 2019 (boven), 2015 (midden) en 2011 (onder)



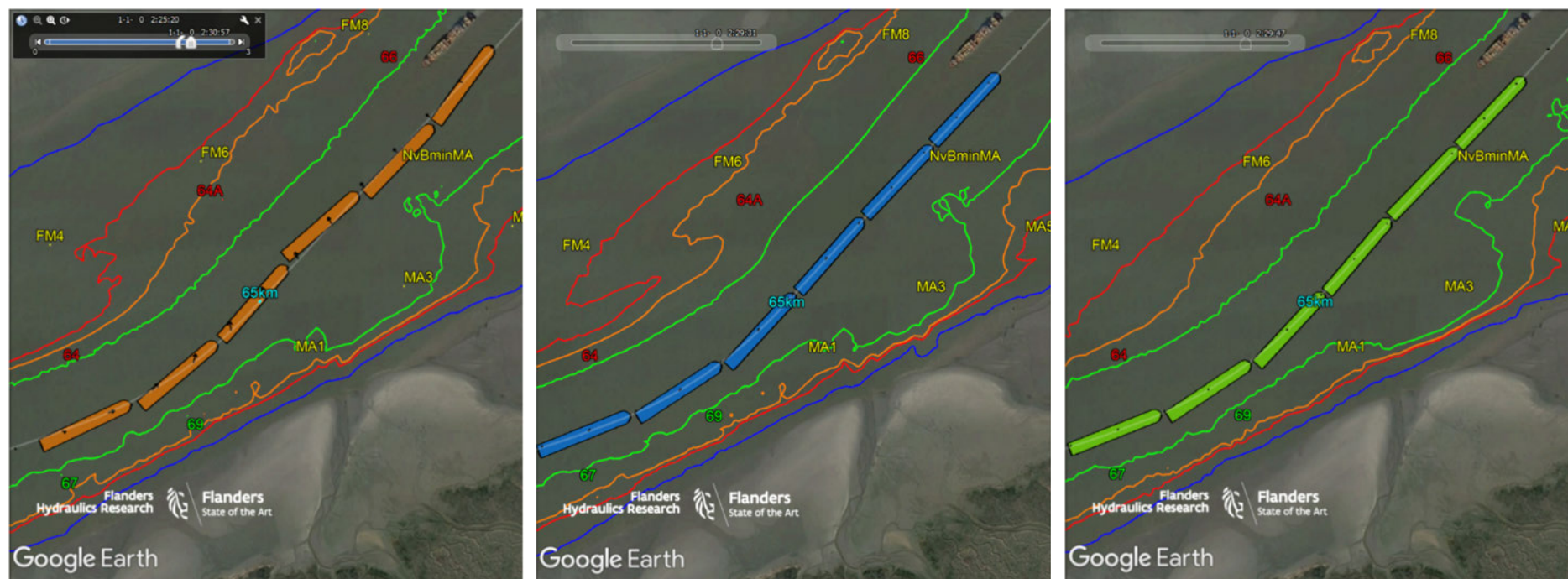
Figuur 50 – 2D-contourplots (detail Bath) voor afstand tot referentietraject en roergebruik voor opvaart in 2019 (boven), 2015 (midden) en 2011 (onder)



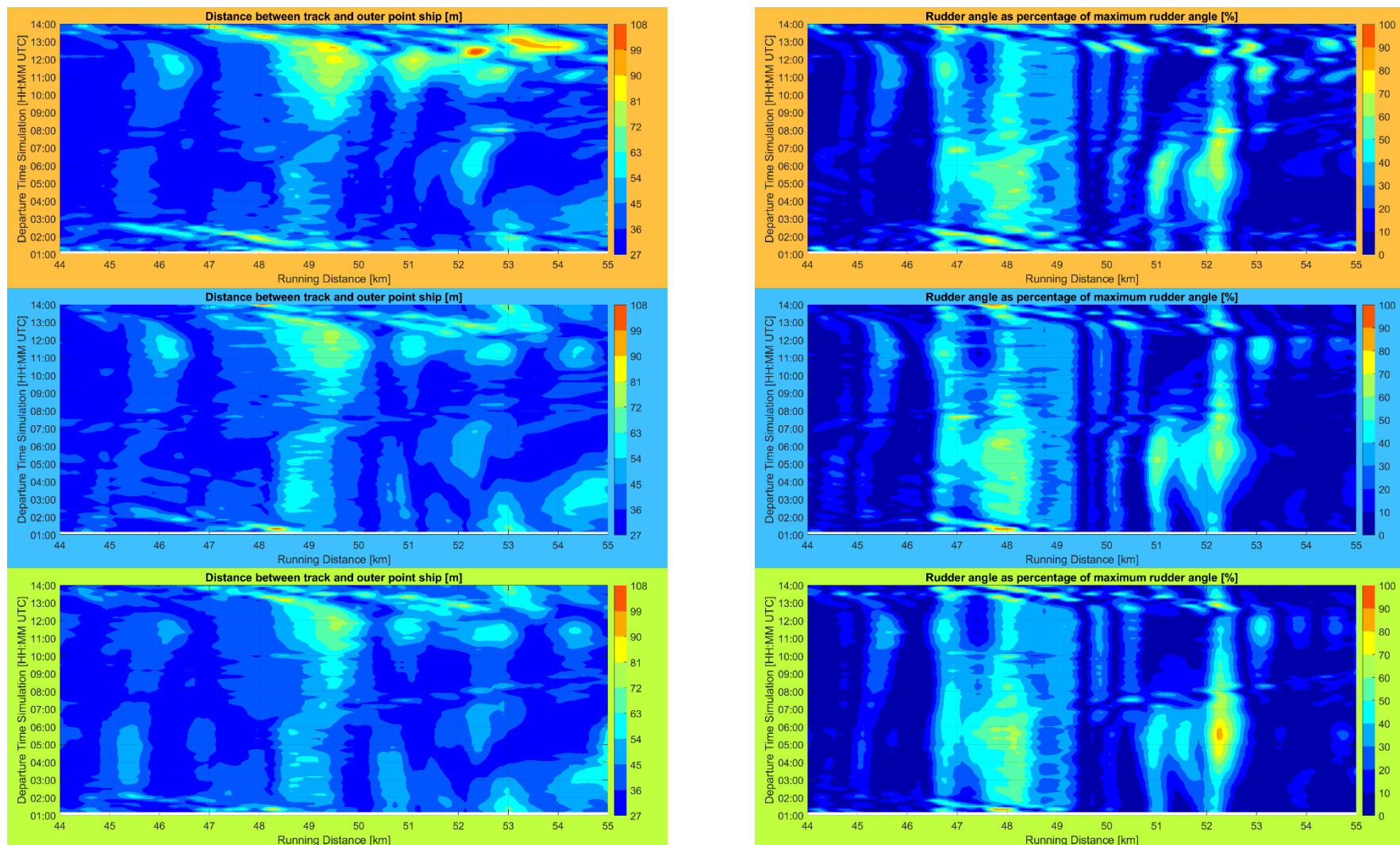
Figuur 51 – KMZ-weergave van vaarbaanplot in opwaartse deel bocht van Bath bij laag water (05h20) voor opvaart in 2019 (links), 2015 (midden) en 2011 (rechts)



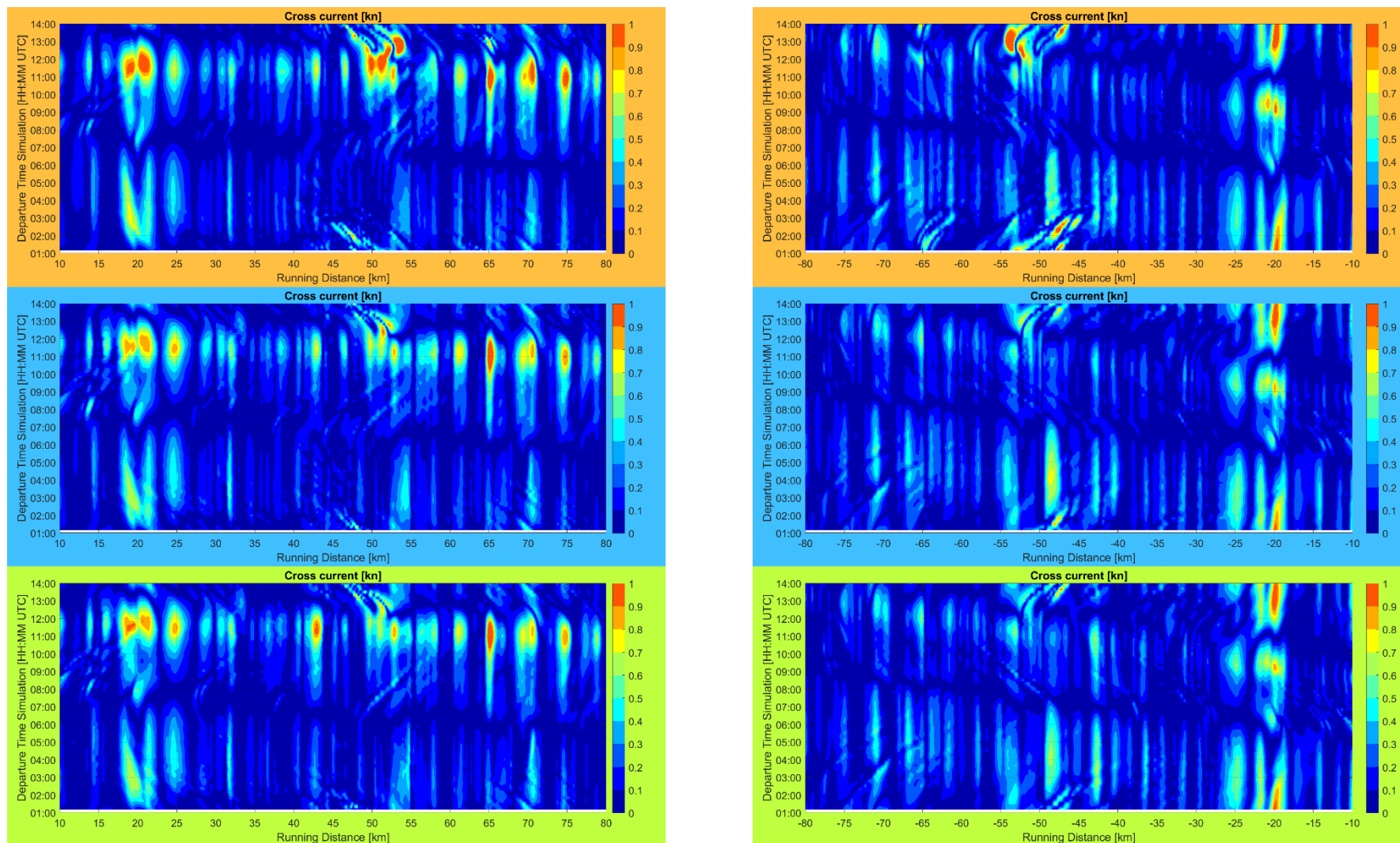
Figuur 52 – 2D-contourplots (detail Bath) voor kielspeling en giersnelheid voor opvaart in 2019 (boven), 2015 (midden) en 2011 (onder)



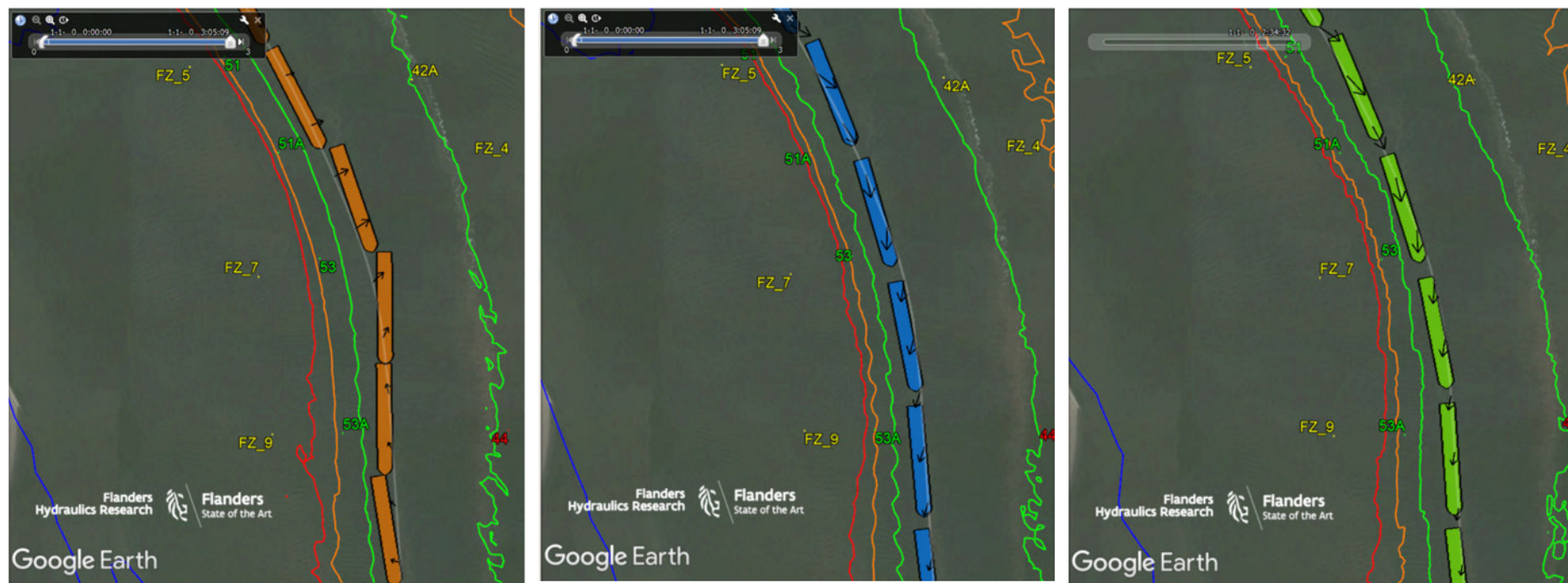
Figuur 53 – KMZ-weergave van vaarbaanplot te Valkenisse bij hoog water (12h50) voor opvaart in 2019 (links), 2015 (midden) en 2011 (rechts)



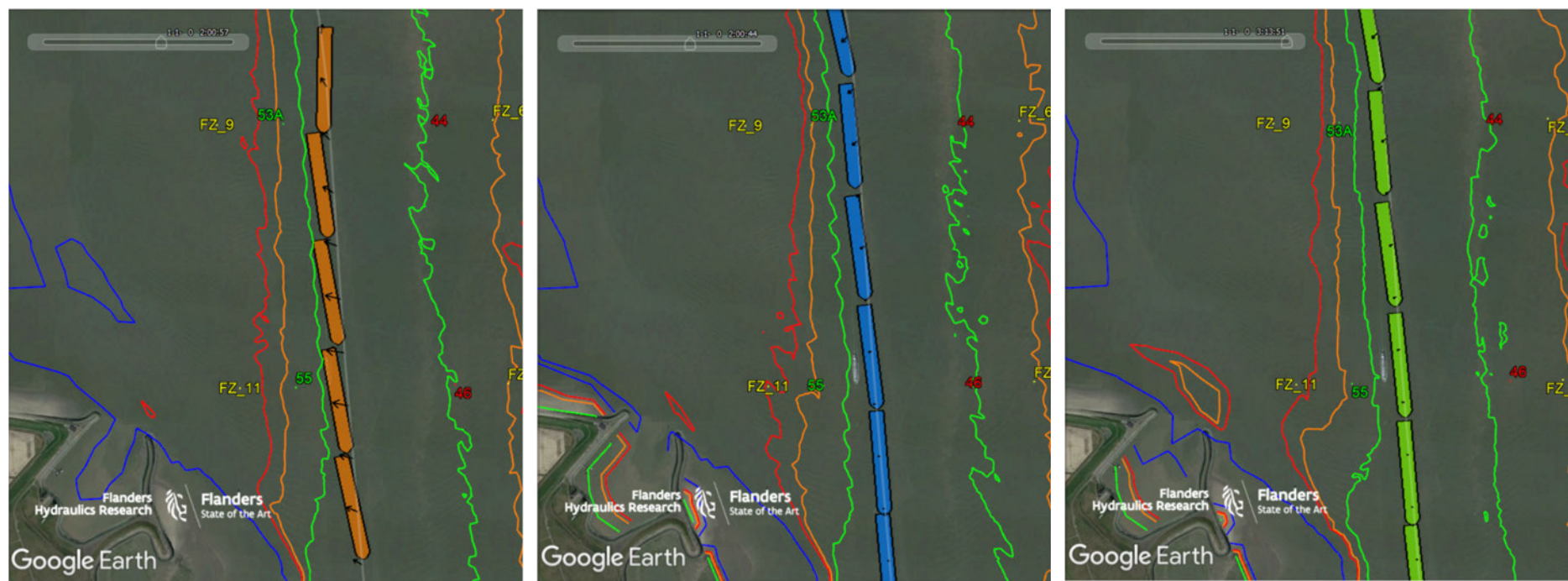
Figuur 54 – 2D-contourplots (detail Hansweert) voor afstand tot referentietraject en roergebruik voor opvaart in 2019 (boven), 2015 (midden) en 2011 (onder)



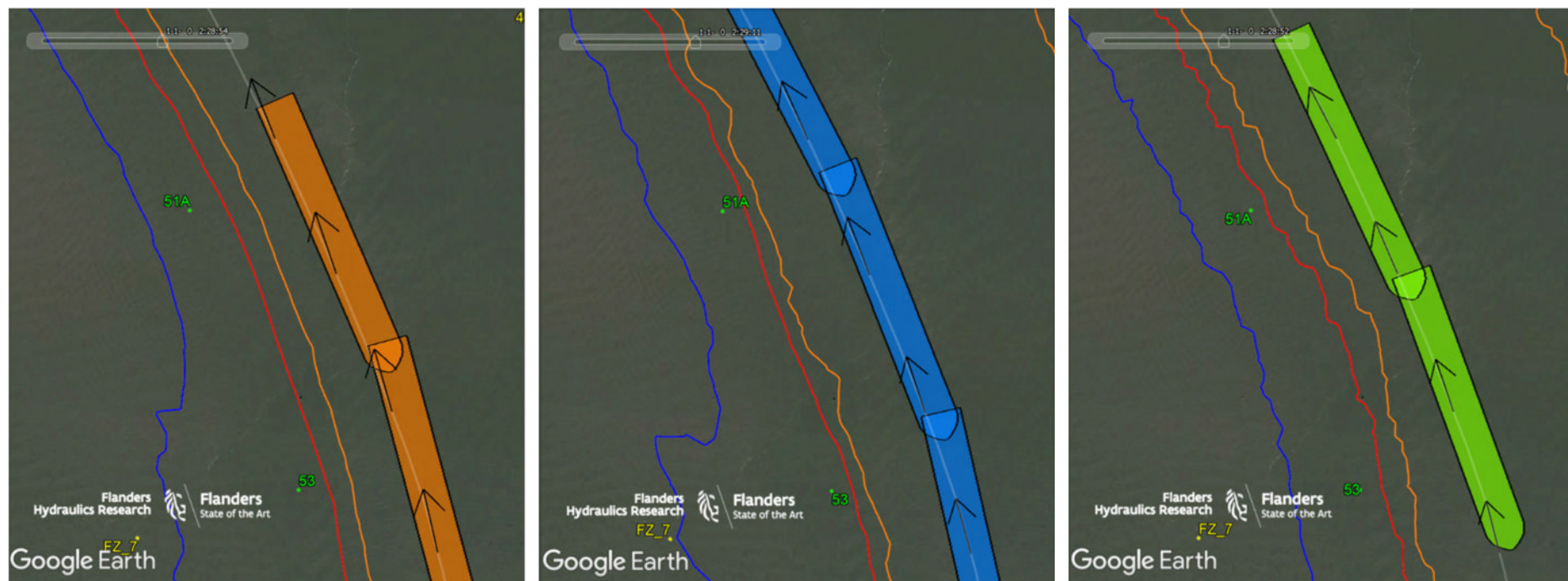
Figuur 55 – 2D-contourplots voor dwarsstroming voor opvaart en afvaart in 2019 (boven), 2015 (midden) en 2011 (onder)



Figuur 56 – KMZ-weergave van vaarbaanplot opwaarts Hansweert bij hoog water (12h30) voor opvaart in 2019 (links), 2015 (midden) en 2011 (rechts)



Figuur 57 – KMZ-weergave van vaarbaanplot te Ossenisse (12h50) voor opvaart in 2019 (links), 2015 (midden) en 2011 (rechts)



Figuur 58 – KMZ-weergave van vaarbaanplot te Hansweert bij laag water (05h30) voor opvaart in 2019 (links), 2015 (midden) en 2011 (rechts)

5.2 Afvaart

Eenzelfde beoordeling voor de bevaarbaarheid zoals gemaakt voor opvaart, kan nu ook gemaakt worden voor afvaart op basis van de samenvattende Figuur 59.

Een eerste opvallende vaststelling is een afwijkend resultaat ter hoogte van de Europaterminal (77 km) voor het scenario 2011. Deze bleek het gevolg van een ongelukkige keuze van de track-controller om in het scenario 2011, simulatie 09h20 de schroef te stoppen om de vaarsnelheid af te bouwen. Een schip met gestopte schroef wordt in vele gevallen zo goed als onbestuurbaar, wat in simulatie 09h20 aanleiding gaf tot een grote afwijking van het referentietraject waarna maximale roerhoeken ingezet werden om het schip terug te sturen. Er worden bijgevolg geen conclusies verbonden aan het afwijkende vaartraject voor scenario 2011 (09h20). Er wordt aangeraden om in de track-controller een minimaal toerental gelijk aan Dead Slow Ahead in te stellen.

Verder worden er te Bath gelijkaardige afwijkingen vastgesteld als het geval was bij opvaart. Uit Figuur 61 blijkt een significant verschil in roergebruik (maximaal in 2011). In afvaart hebben de oevereffecten te Bath een positief effect op de giersnelheid, en blijken de verschillen in bevaarbaarheid grotendeels ingegeven door een verdieping van de buitenbocht in 2019 in vergelijking met de eerdere jaren. In Figuur 63 worden de 2D-contourplots voor kielspeling weergegeven. Hieruit blijkt duidelijk een ondiepere conditie in 2011 in de bocht van Bath die, met name bij laag water, verantwoordelijk blijkt voor de grotere roerhoeken die in 2011 nodig waren om de bocht te bevaren in afvaart. Als illustratie worden de vaarbaanplots toegevoegd van de simulaties uitgevoerd bij laag water (08h10), waaruit voornamelijk uit de verschillende dieptelijnen de evoluerende bathymetrie waargenomen kan worden.

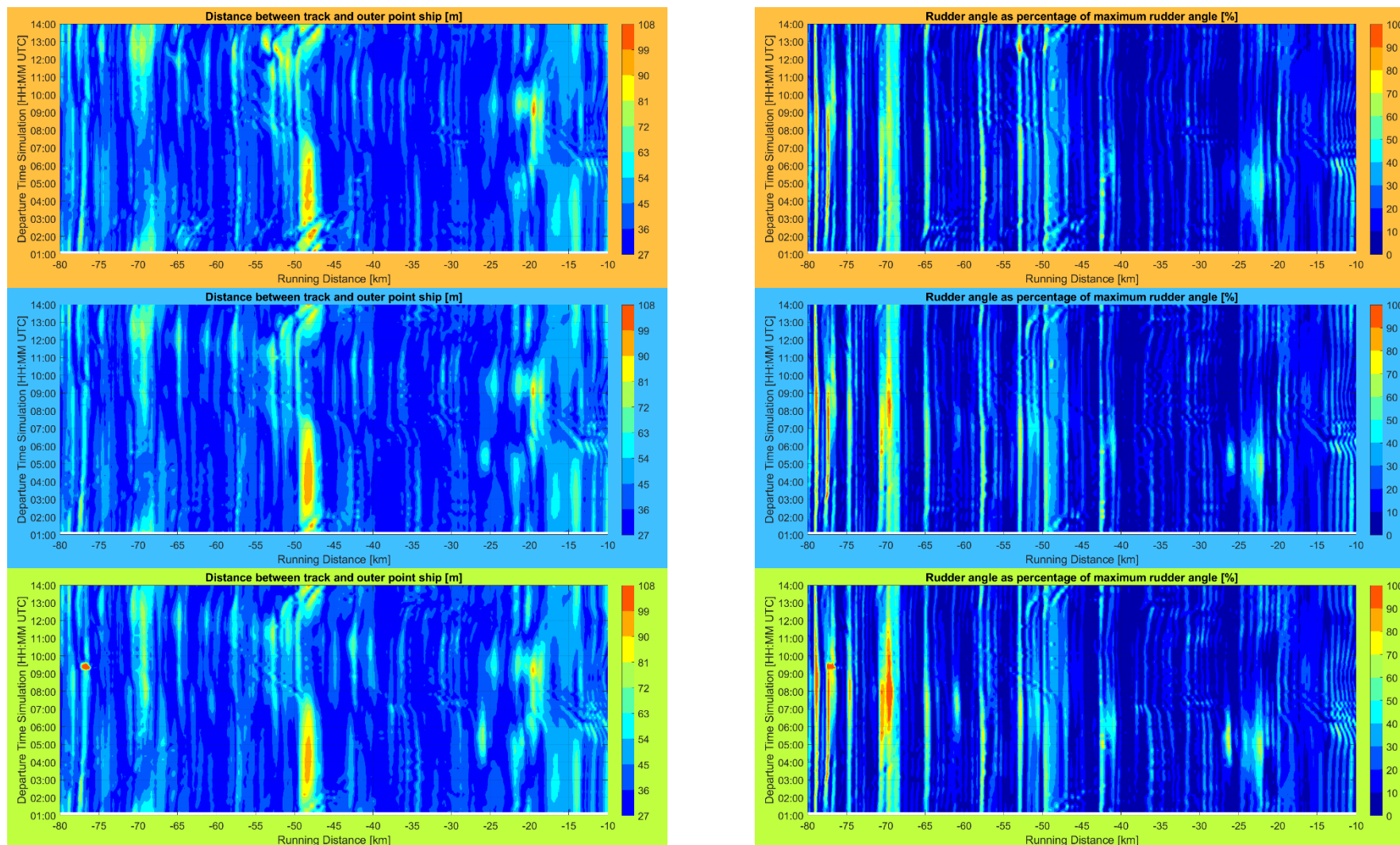
Ook in de bocht van Saeftinghe blijkt een verondieping in 2011 aanleiding te geven tot een groter roergebruik in dat jaar. Op deze locatie geeft de verondieping ook aanleiding tot een toename van de oevereffecten die op deze locatie ongunstig zijn voor het bochtmanoeuvre door afvaart (binnenbocht). Figuur 64 illustreert de ondiepere condities in 2011 en de (weliswaar beperkte) verruiming van de rechteroever tussen 2015 en 2019.

Te Hansweert (zie Figuur 65) vertonen de bevaarbaarheidparameters eveneens een belangrijke variatie voor de verschillende jaargangen. Gelijkaardig als bij opvaart treedt er in 2019 ook in afvaart een minder gunstige situatie op te Ossensisse bij hoog water (12h30, zie Figuur 67) ten gevolge van de belangrijke dwarsstromings situatie in dat jaar (zie Figuur 66 voor een overzicht van de historische evolutie in dwarsstroming). Bovendien blijkt er ook in de bocht (48.5 km) bij ebcondities een groter ruimtegebruik op te treden in het jaar 2015, waarvan opnieuw Figuur 66 illustreert dat deze het gevolg is van een grotere dwarsstroming. Uit de vaarbaanplots voor de simulaties met aanvangstijdstip 04h00 (zie Figuur 68) blijkt dat er in 2015 een belangrijker ebcomponent richting het Middelgat georiënteerd was.

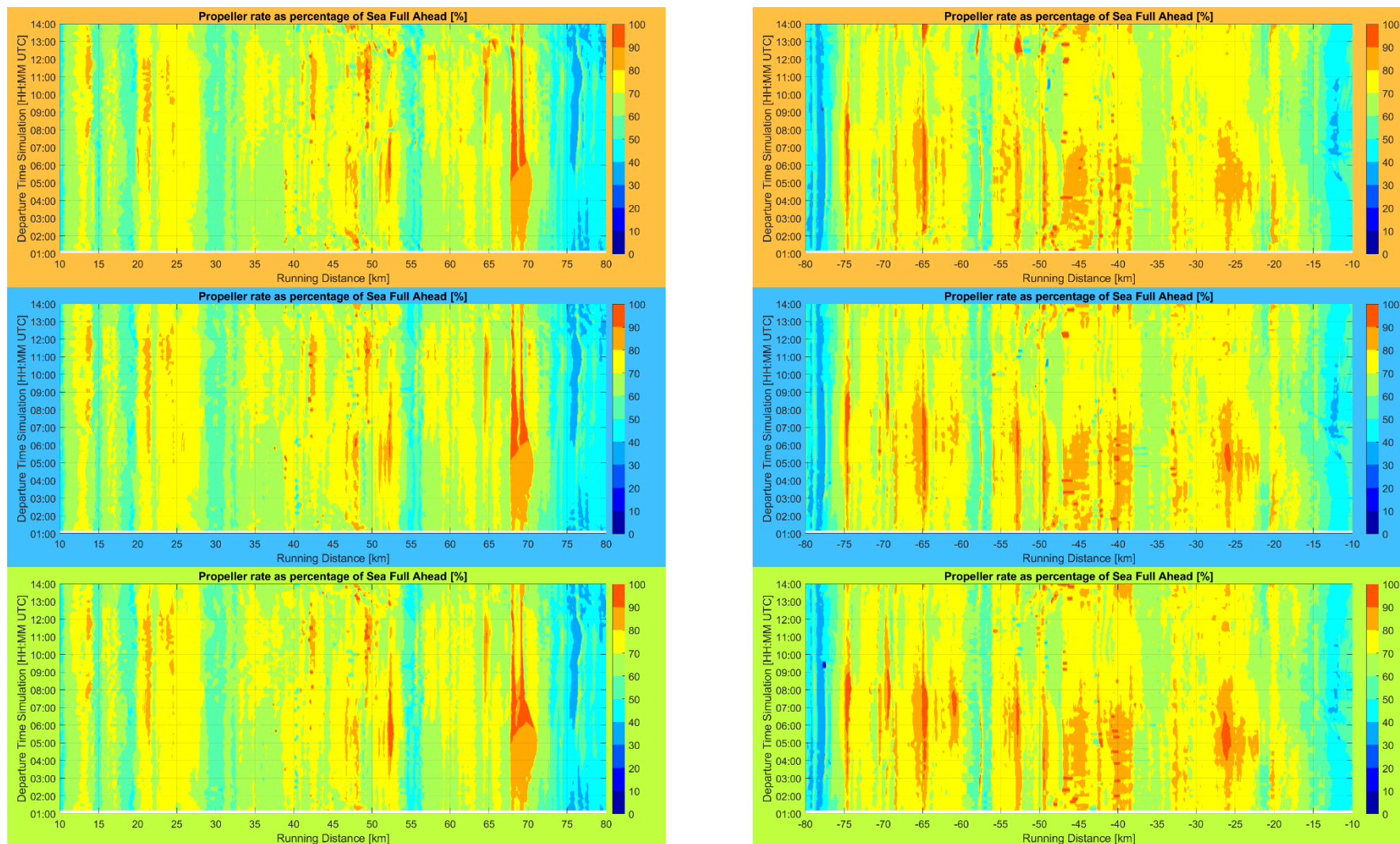
Ter hoogte van Boei 12A (-26.7 km, Braakmanpolder) bij laag water/ebstroom (05h00) bleek er een groter (doch niet maximaal) roergebruik en ruimtegebruik nodig in 2011 dan in 2019 met tussenliggende waarden voor 2015. De bijhorende vaarbaanplots worden weergegeven in Figuur 69. De afwijkende resultaten in 2011 worden toegeschreven aan de belangrijke oevereffecten op deze locatie (mede door hoge vaarsnelheid) waarvoor in 2011 de oever zich op kortere afstand van het schip bevond.

Een laatste locatie die de nodige aandacht verdient, is de Pas van Borssele. Dit is de meest ondiepe zone van de Westerschelde. Te Borssele wordt opgemerkt dat de bevaarbaarheid in 2019 ongunstig evolueerde. De vernauwing van de pas van Borssele geeft aanleiding tot een toename van de oevereffecten bij de passage van Borssele (-20.5 km) wat invloed heeft op het roergebruik (zie Figuur 70) en een toename van de dwarsstroming afwaarts Borssele bij vloed (09h00, zie Figuur 71) wat een invloed heeft op het ruimtegebruik door afvaart in 2019. Het roergebruik onder invloed van oevereffecten blijkt beïnvloed te worden door de kielspeling (laag water) en door de dwarsstroming (vloed). Deze laatste verzet de afvarende schepen in de richting van de oever waardoor er kleine oeverafstanden optreden.

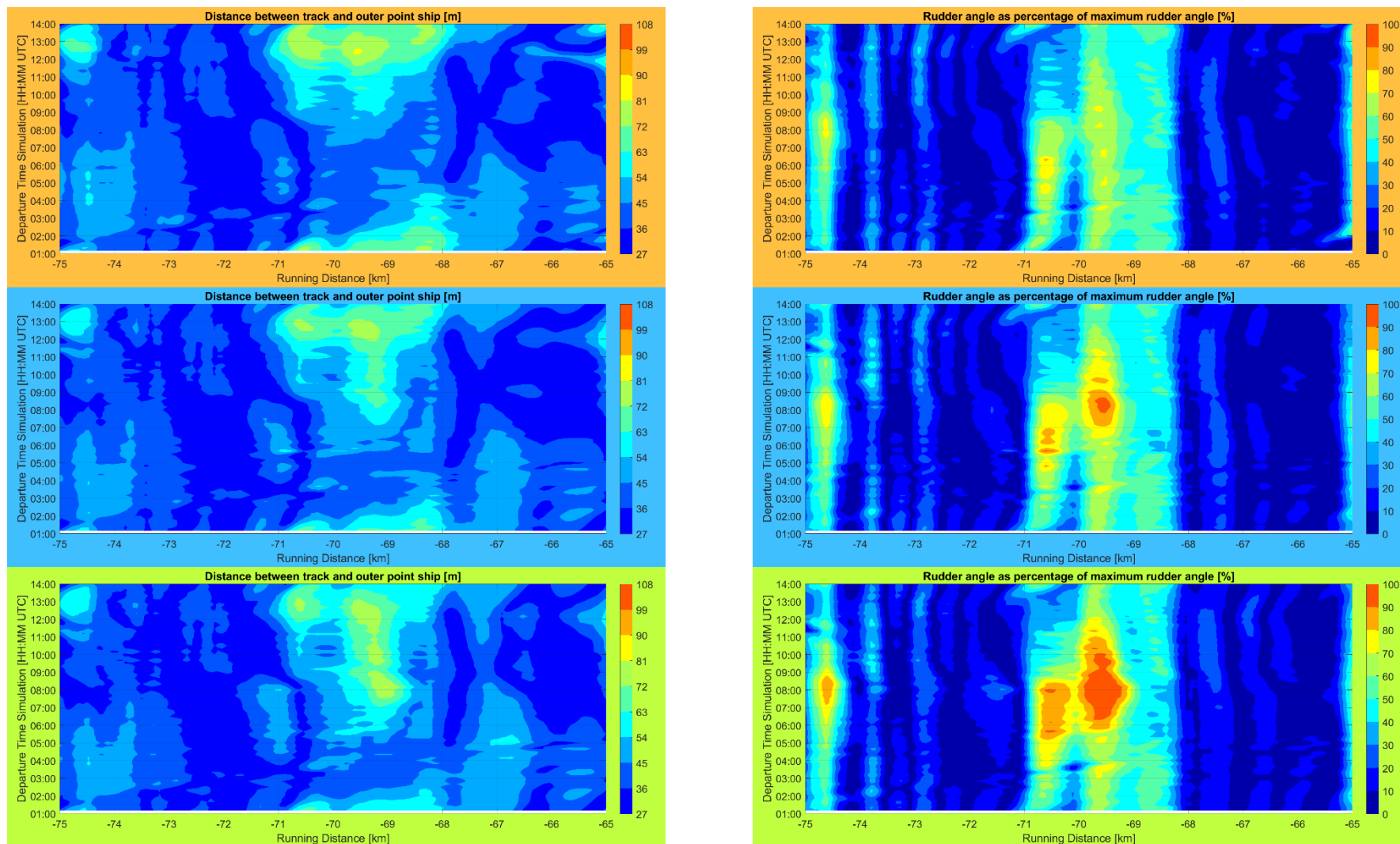
De vaarbaanplots bij vloedstroom te Pas van Borssele worden geïllustreerd in Figuur 72. Doordat de oevereffecten de boeg afstoten, compenseren de oevereffecten de drift door vloedstroom en worden er in de Pas van Borssele door de track-controller amper roerhoeken toegepast om de oevereffecten te compenseren. Wel blijkt er een toename van het roergebied bij het invaren van de Pas (-22 km, maximaal in 2011) en het uitvaren van de pas (-20 km, maximaal in 2019). De risico's verbonden aan de versmalling van de Pas van Borssele blijken dus niet rechtstreeks uit de gedefinieerde bevaarbaarheidsparameters. Toch worden de breedte en diepte van de Pas van Borssele als een aandachtspunt gezien voor de bevaarbaarheid van de Westerschelde.



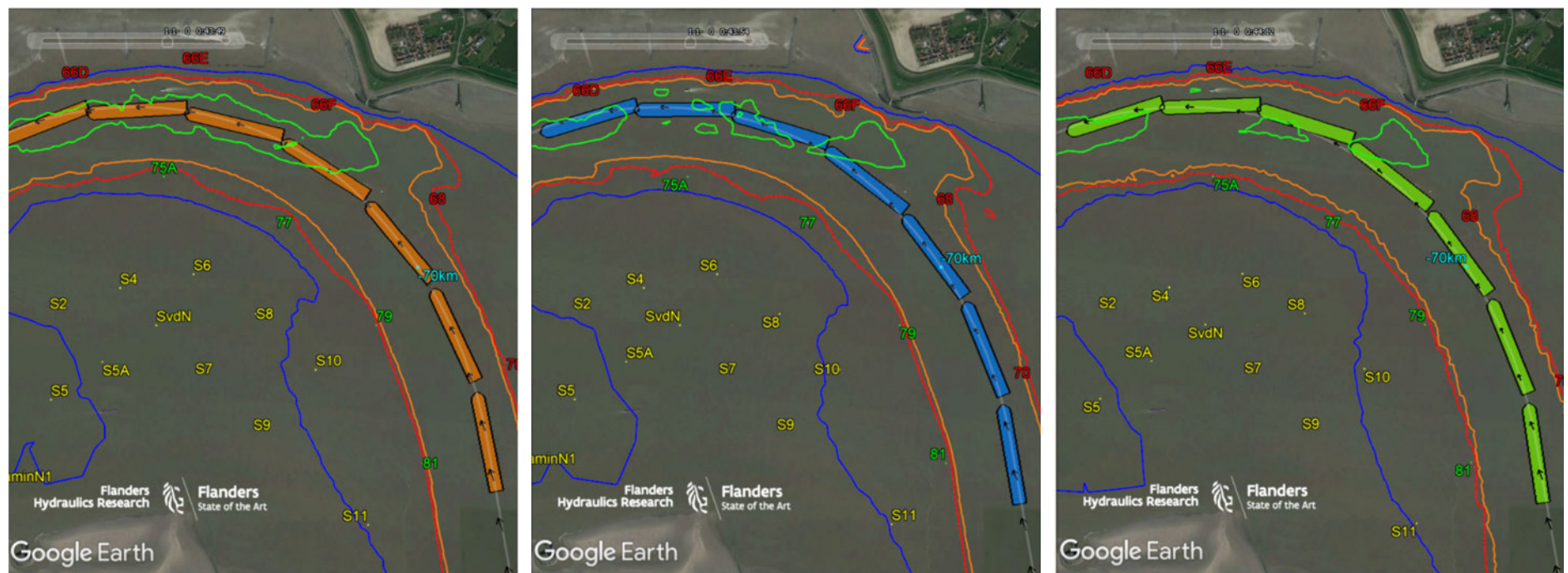
Figuur 59 – 2D-contourplots voor afstand tot referentietraject en roergebruik voor afvaart in 2019 (boven), 2015 (midden) en 2011 (onder)



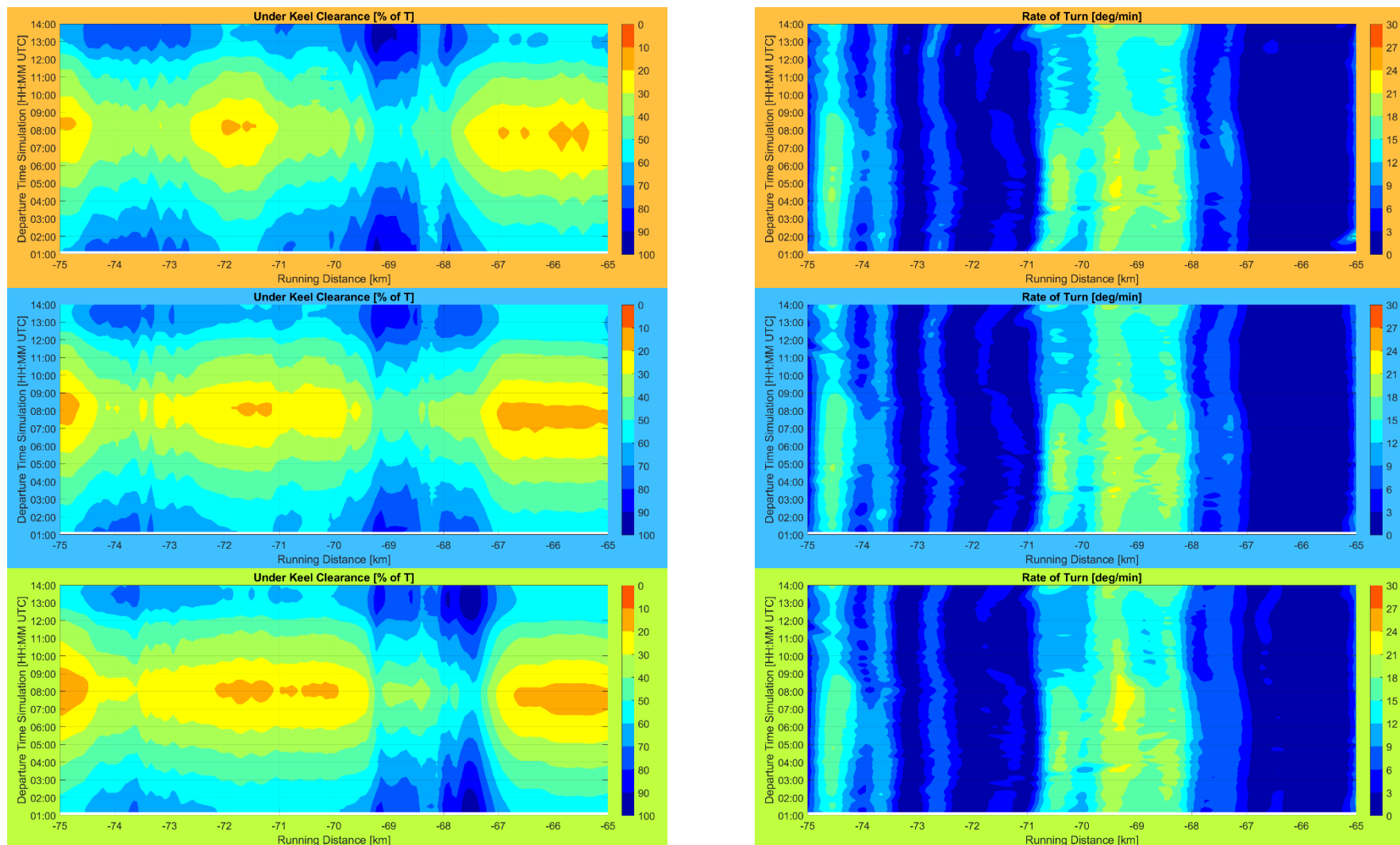
Figuur 60 – 2D-contourplots voor schroeftoerental voor opvaart en afvaart in 2019 (boven), 2015 (midden) en 2011 (onder)



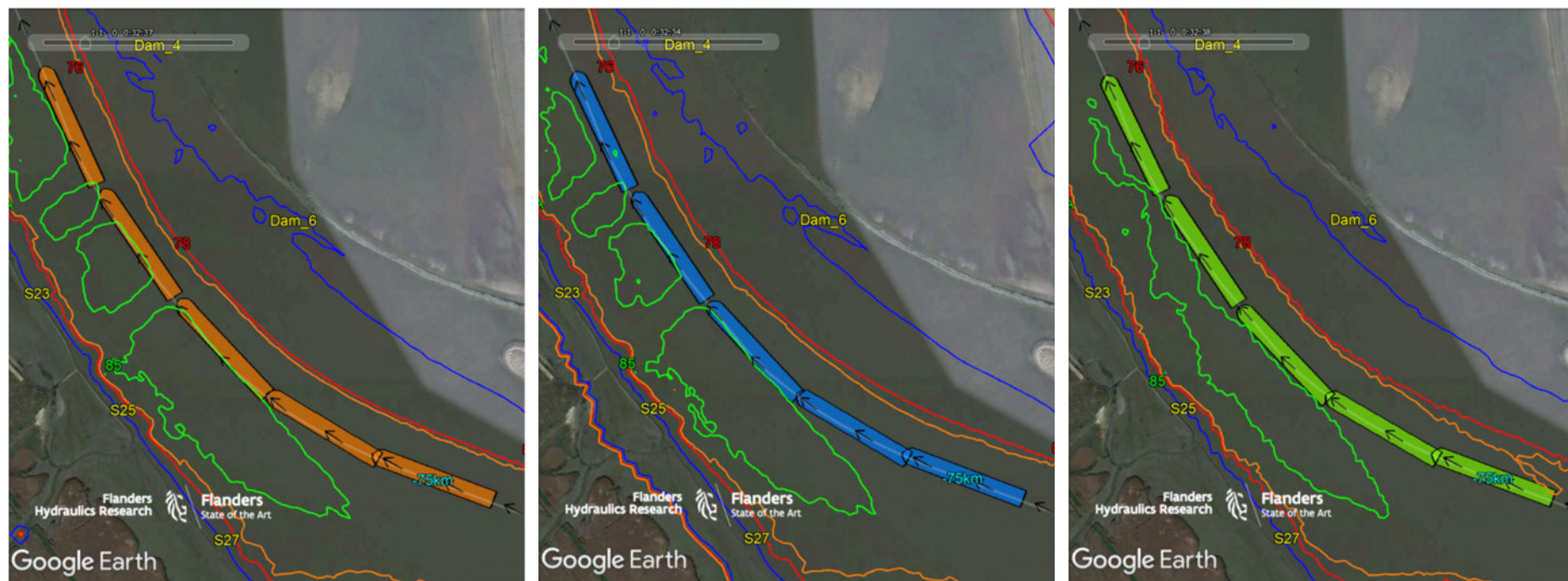
Figuur 61 – 2D-contourplots (detail Bath) voor afstand tot referentietraject en roergebruik voor afvaart in 2019 (boven), 2015 (midden) en 2011 (onder)



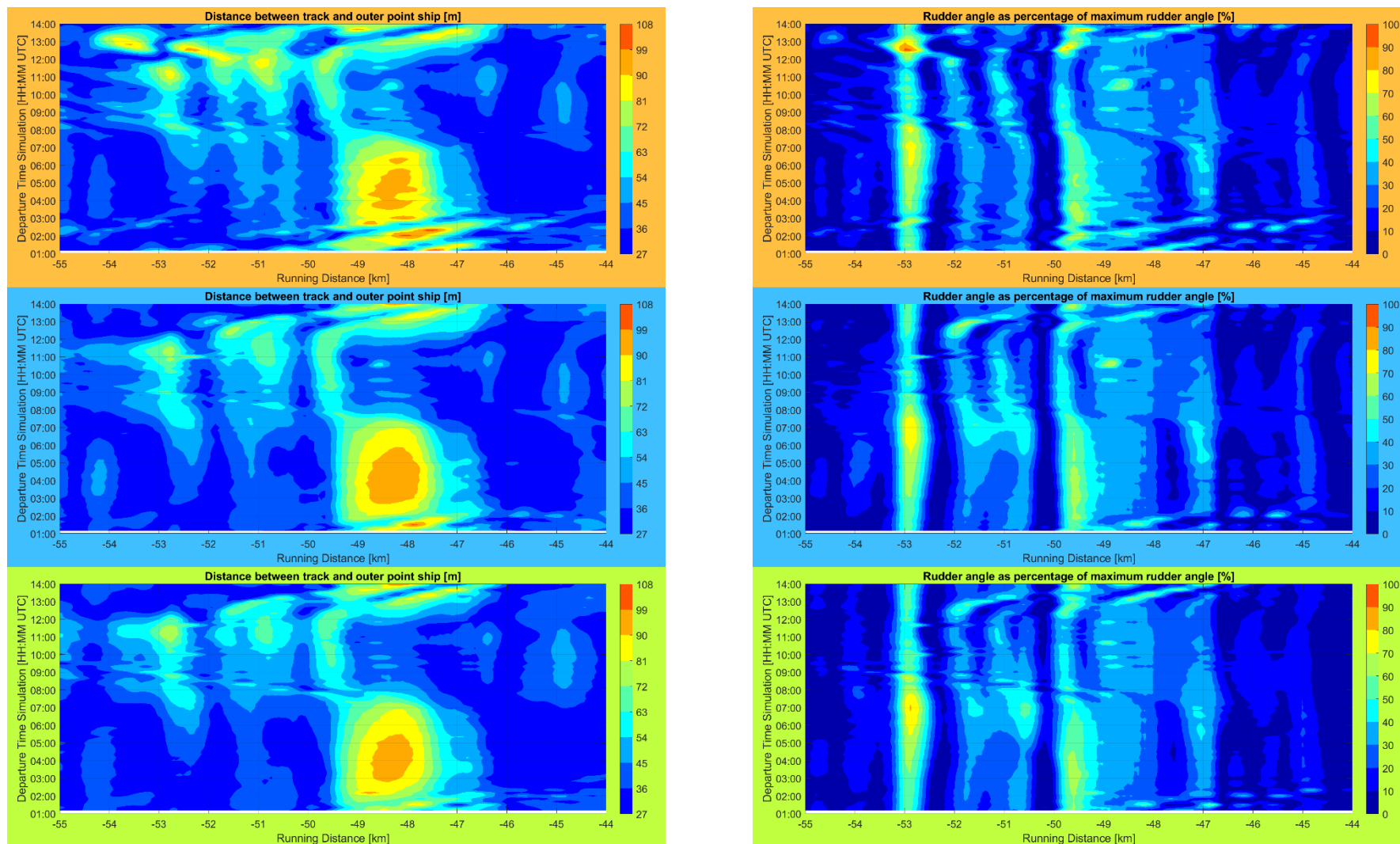
Figuur 62 – KMZ-weergave van vaarbaanplot in bocht van Bath bij laag water (08h10) voor afvaart in 2019 (links), 2015 (midden) en 2011 (rechts)



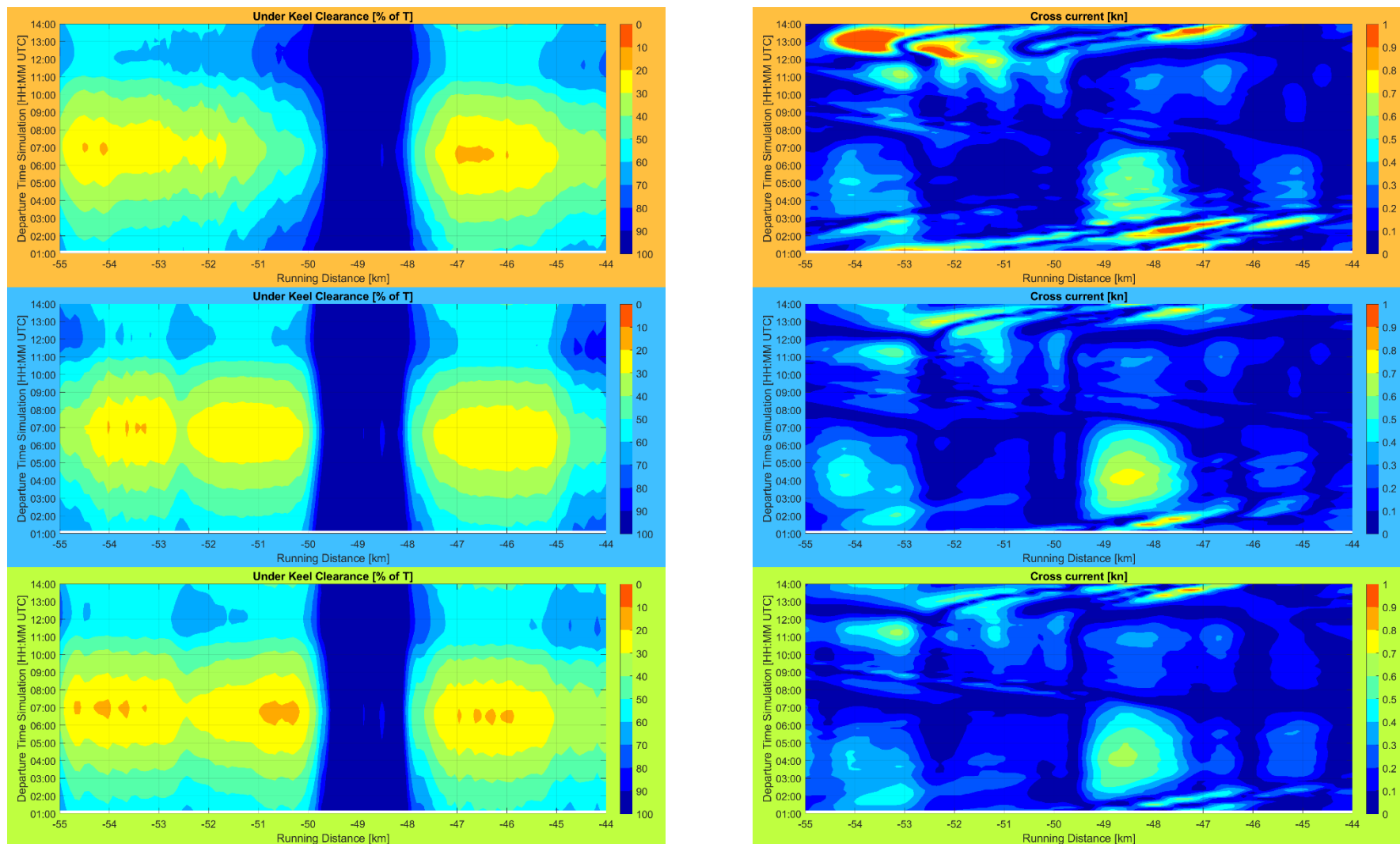
Figuur 63 – 2D-contourplots (detail Bath) voor kielspeling en giersonnelheid voor afvaart in 2019 (boven), 2015 (midden) en 2011 (onder)



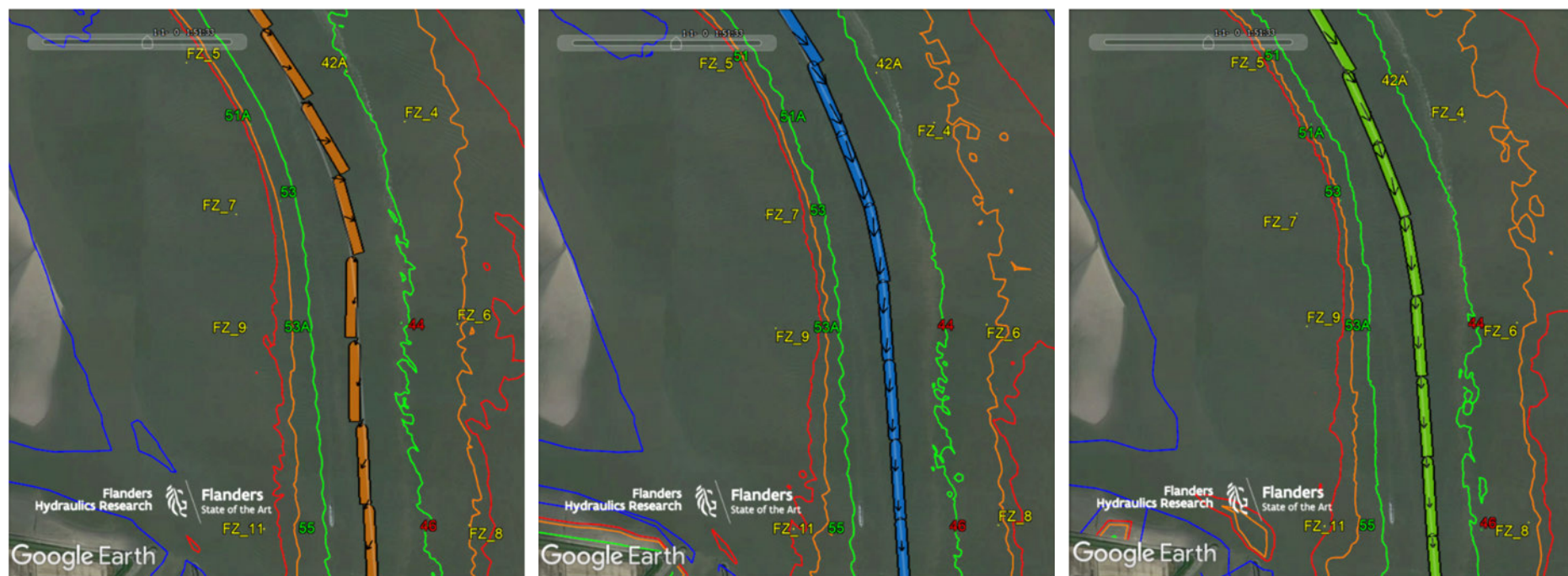
Figuur 64 – KMZ-weergave van vaarbaanplot te Bocht van Saeftinghe bij laag water (08h10) voor afvaart in 2019 (links), 2015 (midden) en 2011 (rechts)



Figuur 65 – 2D-contourplots (detail Hansweert) voor afstand tot referentietraject en roergebruik voor afvaart in 2019 (boven), 2015 (midden) en 2011 (onder)



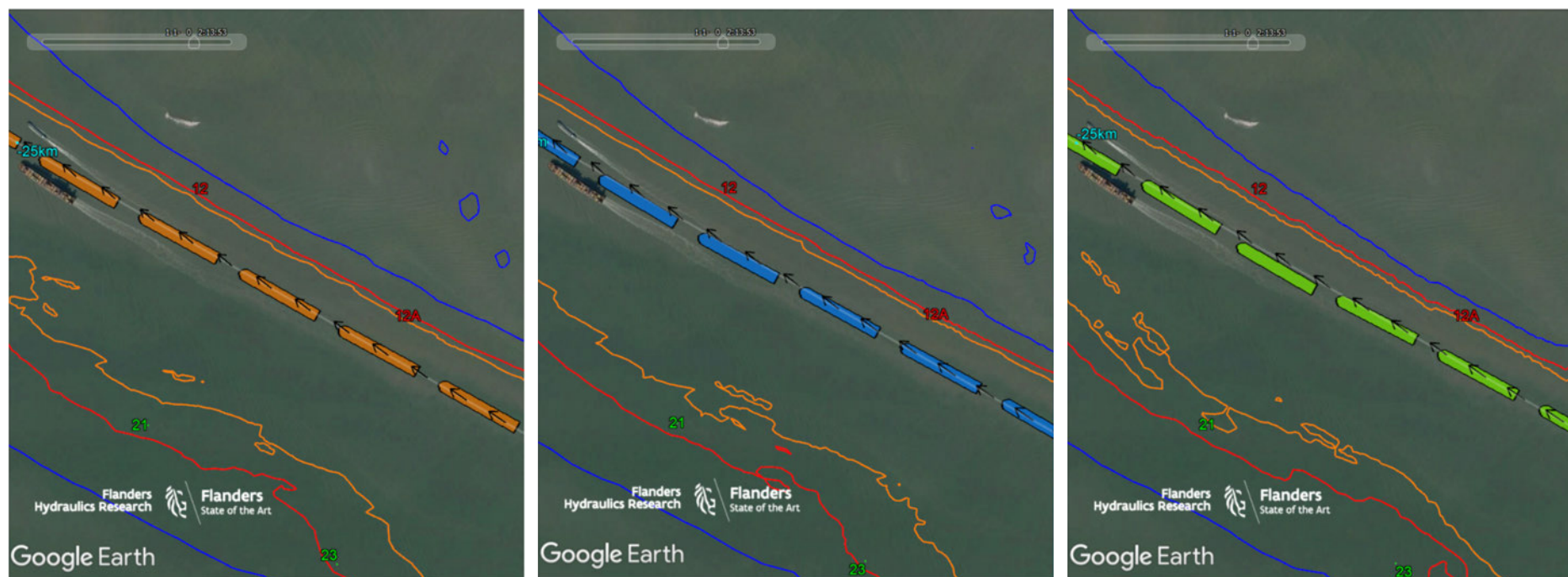
Figuur 66 – 2D-contourplots (detail Hansweert) voor kielspeling en dwarsstrooming voor afvaart in 2019 (boven), 2015 (midden) en 2011 (onder)



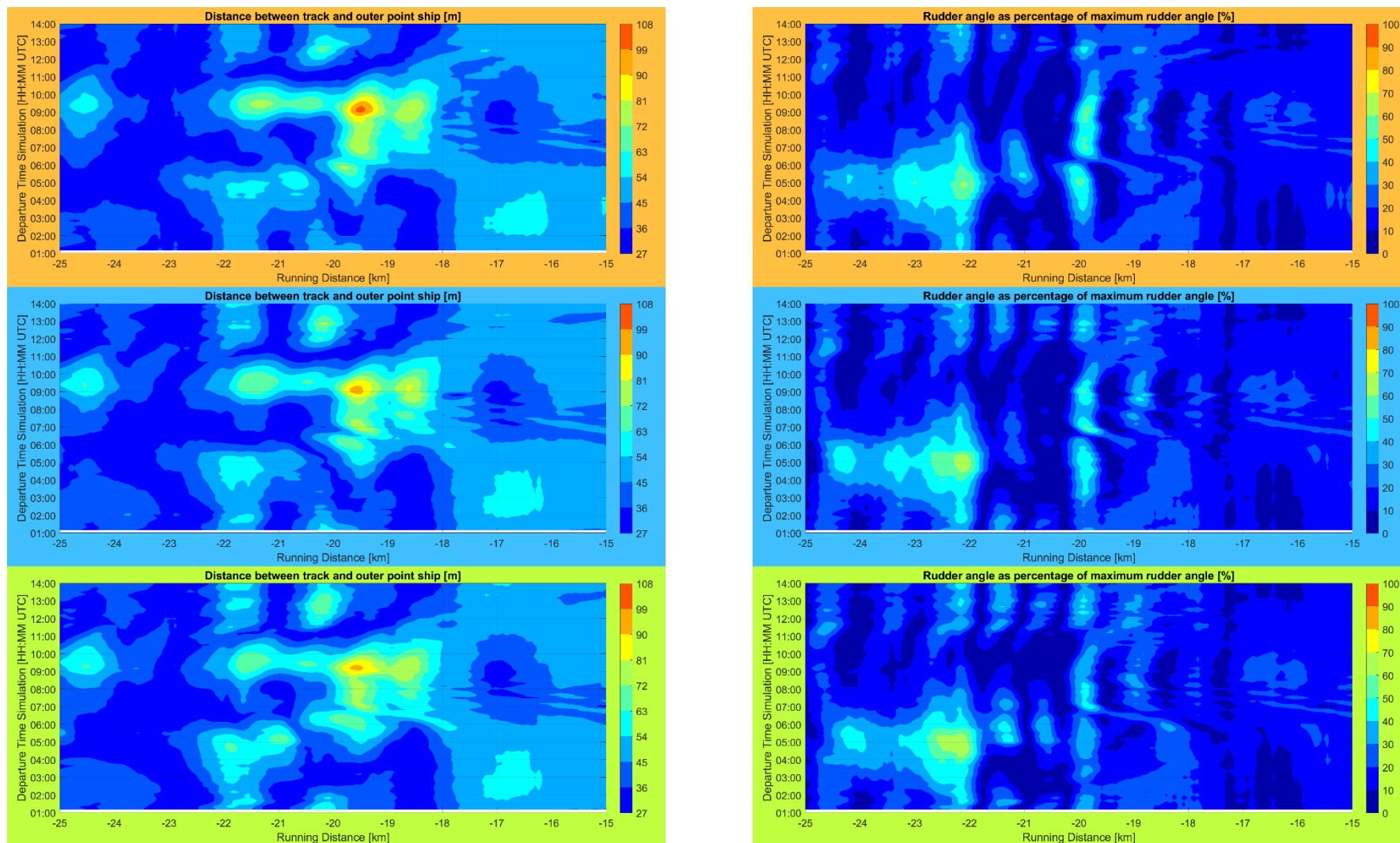
Figuur 67 – KMZ-weergave van vaarbaanplot te Ossenisse bij hoog water (12h30) voor afvaart in 2019 (links), 2015 (midden) en 2011 (rechts)



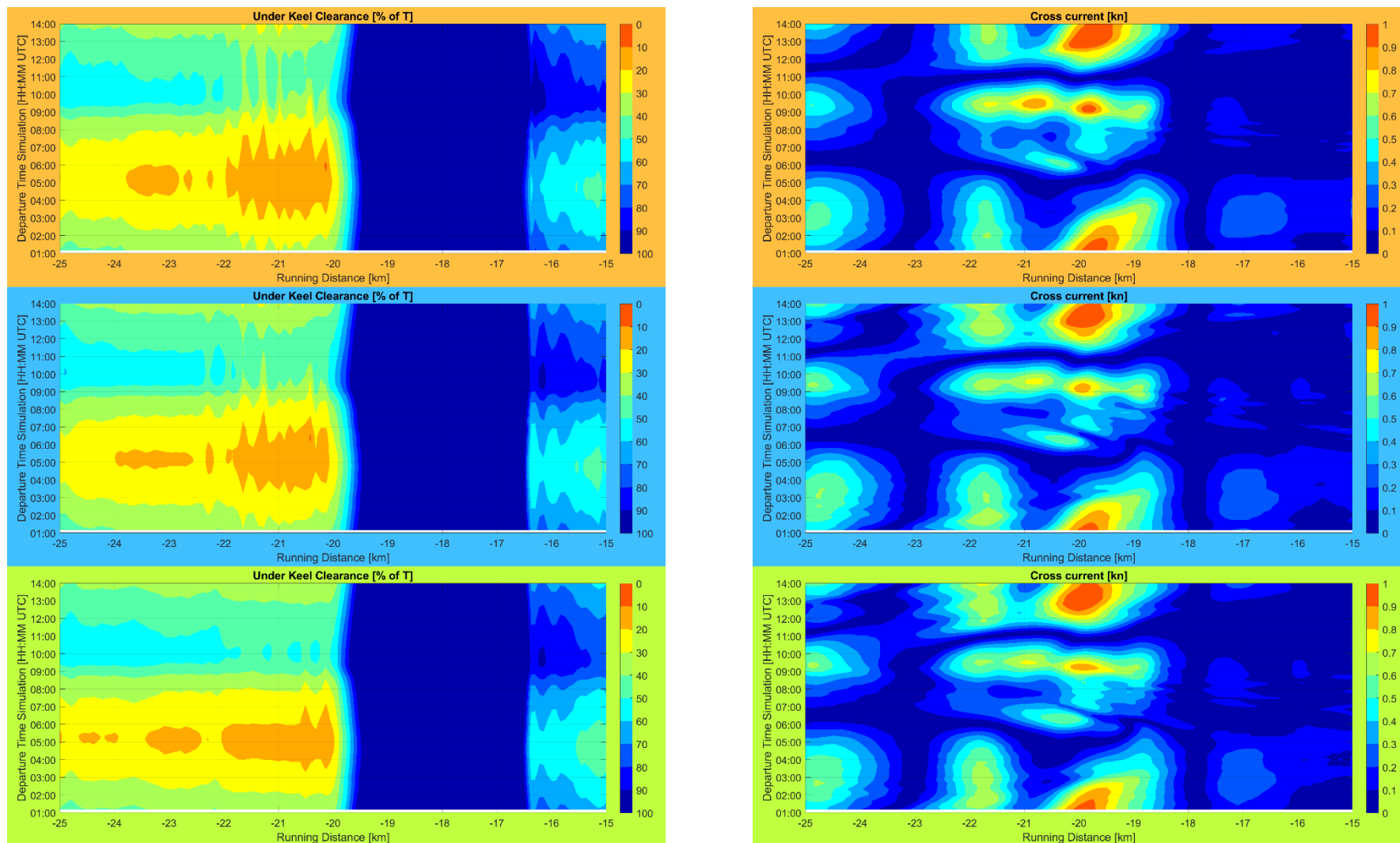
Figuur 68 – KMZ-weergave van vaarbaanplot te Hansweert bij ebstroom (04h00) voor afvaart in 2019 (links), 2015 (midden) en 2011 (rechts)



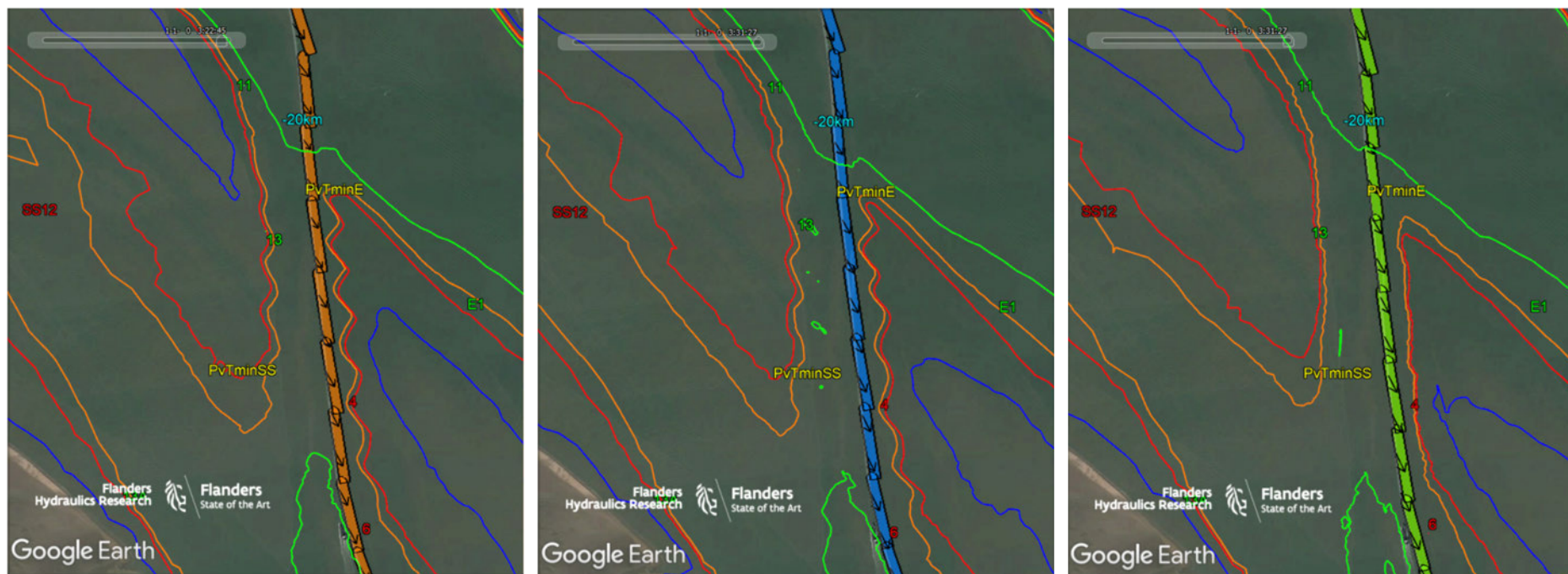
Figuur 69 – KMZ-weergave van vaarbaanplot te Boei12A bij laag water (05h00) voor afvaart in 2019 (links), 2015 (midden) en 2011 (rechts)



Figuur 70 – 2D-contourplots (detail Borsselle) voor afstand tot referentietraject en roergebruik voor afvaart in 2019 (boven), 2015 (midden) en 2011 (onder)



Figuur 71 – 2D-contourplots (detail Borssele) voor kielspeling en dwarsstrooming voor afvaart in 2019 (boven), 2015 (midden) en 2011 (onder)



Figuur 72 – KMZ-weergave van vaarbaanplot te Borssele bij vloedstroom (09h00) voor afvaart in 2019 (links), 2015 (midden) en 2011 (rechts)

6 Samenvatting

Het Waterbouwkundig Laboratorium ontwikkelde een methodologie om de bevaarbaarheid van een vaarweg te beoordelen op basis van fasttime vaarsimulaties met een track controller. De signaalparameters afstand tot referentietraject (als maat voor het ruimtegebruik door het schip) en roergebruik (als maat voor de manoeuvreerreserve van het schip) worden hierbij toegepast als maat voor de bevaarbaarheid. De methode laat toe om een kwalitatieve beoordeling van de bevaarbaarheid van een vaaromgeving uit te voeren en is aldus toepasbaar voor het vergelijken van verschillende scenario's (historische evolutie, toekomstige morfologische ontwikkelingen, stort- en baggerstrategieën). De methode heeft niet als doel om de aanvaardbaarheid van een bepaalde conditie te beoordelen en laat met andere woorden geen kwantitatieve beoordeling toe.

In een fasttime vaarsimulatie wordt het schip bestuurd op basis van een track-controller, ontleend aan Chen *et al.* (2020). In de hier uitgewerkte methodologie werd een eenvoudige model-vrije track-controller toegepast, waarbij de gewenste roerhoek bepaald werd op basis van de huidige koersafwijking tot een vooropgesteld traject en op basis van de eerste afgeleide van deze koersafwijking (d.i. de gierafwijking) door middel van een Fuzzy-controller. Onafhankelijk van de roerhoek-controller werd er ook een schroeftoerental-controller (PI-controller) toegepast die het schroeftoerental instelde om de vooropgestelde snelheid door het water te volgen.

De methodologie werd toegepast op de bevaarbaarheid van de Westerschelde met als doel om opgenomen te worden in de evaluatiemethodiek van het Schelde-estuarium die zesjaarlijks uitgevoerd wordt onder leiding van de Vlaams-Nederlandse Schelde-Commissie (Holzhauer *et al.*, 2011). Hiertoe werd de methodologie ingezet voor drie condities van het Schelde-estuarium overeenkomstig de jaren 2011, 2015 en 2019. Voor deze jaren werden de bathymetrie toegepast net als de bijhorende tijgegevens (waterstanden en stroomsnelheden) die bekomen werden door een hydrodynamische simulatie van een dieptegemiddelde 2D model bij een tijcyclus met getijfactor 1.17. Een tijcyclus duurt 12u25 maar om zeker te zijn van het omvatten van alle condities wordt een periode van 13u doorgerekend. Om deze volledig te omvatten met voldoende resolutie, werden er binnen de tijcyclus om de 10 minuten vaarsimulaties opgestart resulterend in 78 simulaties per scenario. Hierbij wordt een scenario gedefinieerd als een combinatie van een jaargang (2011, 2015 en 2019) en een vaarrichting (op- of afvaart). In de huidige evaluatie werden niet alle externe verstoringen meegenomen die een schip ervaart op de Westerschelde. De belangrijkste vereenvoudiging die hierin gemaakt werd is de afwezigheid van wind. De reden hiertoe is dat de methodologie in eerste instantie bedoeld is om de impact van de rivier op de bevaarbaarheid te beoordelen en dat wind eerder gezien wordt als een externe factor. Hoewel in deze studie niet als dusdanig toegepast, laat de methodologie toe om ook de invloed van (extreme) weercondities (wind en golven) mee te nemen in de bevaarbaarheidsbeoordeling. In realiteit zal de scheepvaart op de Westerschelde ook anticiperen op de aanwezigheid van ander scheepvaartverkeer. Ook deze externe verstoring werd niet in rekening gebracht in de huidige evaluatie. De resultaten uit dit rapport dienen dan ook geïnterpreteerd te worden als de bevaarbaarheid van een schip bij afwezigheid van wind en bij een onverstoorde vaart langs de stuurboordoever van de vaarweg.

In voorliggend rapport werden de andere operationele inputparameters (referentietraject en vaarsnelheid) identiek gekozen voor de verschillende jaargangen maar vanzelfsprekend verschillend voor op- en afvaart. Echter bij toepassing van de evaluatiemethodiek wordt voorgesteld om deze parameters af te leiden uit historische vaarttrajecten (AIS) in een periode overeenkomstig de onderzochte jaargang. De referentietrajecten worden dan bepaald als een dwarspositie in de vaarweg overeenkomstig een percentielwaarde van de historische vloot (dit om af te dwingen dat het schip voldoende dicht bij de stuurboordoever vaart). De vaarsnelheden worden gedefinieerd als de mediaan van de vaarsnelheden van de tijonafhankelijke vloot ($T \leq 13.1$ m) van grote containerschepen ($L > 350$ m). Deze vaarsnelheden worden als snelheden door het water opgelegd in de simulatie en worden bijgevolg aangepast aan de stroomsnelheid om de snelheden over de grond te bekomen die de input vormen van de schroeftoerental-controller. De

resultaten uit scenario 2019 tonen aan dat de spreiding van vaarsnelheden over de grond die zo bekomen wordt uit de onbemande vaarsimulaties goed overeen komt met de spreiding van vaarsnelheden op basis van AIS-gegevens.

De vaarsimulaties werden uitgevoerd met een simulatieschip dat overeenstemt met de afmetingen van de grotere containerschepen die op heden de Westerschelde bevaren en combineerde een lengte gelijk aan 399 m met een breedte gelijk aan 54 m. De scheepsdiepgang bedroeg 13.5 m wat beperkt meer is dan de tijonafhankelijke diepgang op de Schelde (dit om te garanderen dat de Schelddrempels met minimale maar realistische kielspeling bereikt worden). Het Waterbouwkundig Laboratorium beschikt over gevalideerde manoeuvreermodellen voor het simulatieschip in ondiep (d.i. beperkte kielspeling) en beperkt (d.i. beperkte vaarwegsectie en oevereffecten) water.

De resultaten van de simulaties tonen aan dat de combinatie van bodemprofiel en tijconditie slechts op erg beperkte locaties de kielspelingsvoorwaarde op de Westerschelde schenden voor een schip met diepgang 13.5 m. Het gaat om twee 100 m-lange segmenten in de Pas van Borssele.

Voor de jaargangen 2011, 2015 en 2019 werden contourplots gegenereerd van de twee signaalparameters: afstand tot referentietraject en roergebruik. Op basis van deze contourplots konden evoluties in bevaarbaarheid inzichtelijk gemaakt worden en kon de oorzaak van de afwijkingen gerelateerd worden aan de bijhorende oorzaak. Zo bleek de signaalparameter afstand tot referentietraject voornamelijk beïnvloed te worden door dwarsstroming, bochtmanoeuvres en door de belangrijke overschrijding in manoeuvreerreserves. Een meer gedetailleerd inzicht in de manoeuvreerreserves, wordt geboden door de tweede signaalparameter roergebruik. Deze bleek voornamelijk beïnvloed door de kielspeling, oevereffecten en langsstroming maar ook hier kon de invloed van dwarsstroming en de stromingsgradiënt waargenomen worden.

De meest opvallende evoluties doorheen de jaren betreffen:

- Diepte Bocht van Bath: tussen 2011 en 2019 werd een verdieping van de bocht van Bath vastgesteld:
 - Voor de opvaart in 2011 bleek het bij laag water (kleine kielspeling) niet mogelijk om het vooropgestelde pad te volgen. De invloed van kielspeling en oevereffecten op het roergebruik was maximaal. Dit resultaat illustreert de noodzaak van voldoende diepte in de Bocht van Bath
 - In de buitenbocht van Bath bleek er een belangrijke verdieping plaats te vinden tussen 2011 en 2019 die een gunstig effect had op de bevaarbaarheid van de bocht van Bath. Eenzelfde effect trad op in de bocht van Saeftinghe waarvoor een afvarend schip tegen de oevereffecten dient te bochten.
- Dwarsstroming: de tijberekeningen tonen een variatie van de dwarsstroming op de Westerschelde voor verschillende jaargangen (zie Figuur 55)
 - Het meest opvallende voorbeeld betreft de dwarsstroming te Hansweert/Ossenissee omstreeks hoog water. Deze zogenaamde neervorming is merkbaar meer uitgesproken in het scenario 2019 dan in de andere jaargangen met een duidelijke impact op de bevaarbaarheid van deze conditie in zowel op- als afvaart. Ook te Valkenisse treedt een afwijkend stroomprofiel op voor de jaargang 2019.
 - Een voorstrooms schip dat in de buitenbocht vaart, zal vaak een dwarsstroming in de richting van de buitenbocht ervaren, waardoor het schip in de richting van de boeienlijn verzet wordt. Dit treedt in opvaart op bij vloed in de bocht van Valkenisse en Saeftinghe en bij afvaart bij eb in de bocht van Hansweert. Ook hier treden soms beperkte verschillen op doorheen de tijd. Zo is het ruimtegebruik door opvaart bij vloed te Saeftinghe het grootst voor jaargang 2019 en is het ruimtegebruik door afvaart bij eb te Hansweert het grootst voor jaargang 2011.
 - Afwaarts de Pas van Borssele treedt in 2019 een belangrijkere dwarscomponent bij vloedstroom op die het schip verzet in de richting van de Everingen. Deze locatie is erg diep waardoor hier geen risico tot stranding aanwezig is.

- Oevereffecten: met name rond laag water blijken relatief kleine verschillen in oeverconfiguratie aanleiding te geven tot afwijkende oevereffecten die een belangrijke impact hebben op het roergebruik.
 - Zo blijkt in opvaart te Hansweert (halverwege boei 53 en 51A) en in afvaart te Terneuzen (boei 12) de jaargang 2011 gepaard te gaan met een minder gunstige oeverpositie, wat aanleiding gaf tot een belangrijk roergebruik om deze te compenseren.
 - De smalste en meest ondiepe zone bevindt zich in de Pas van Borssele, doordat dit een rechte en symmetrische vaarweg betreft is het roergebruik in deze zone beperkt en treden er enkel grote roerhoeken op bij het begin en einde van de pas, waar de oevers asymmetrisch zijn. Dit geeft aan de opwaartse rand aanleiding tot het grootste roergebruik in 2011 (afvaart) en aan de afwaartse rand voor het jaar 2019 (afvaart). De beperkte beschikbare vaarwegbreedte in de Pas van Borssele is een aandachtspunt dat niet rechtstreeks tot uiting komt in de signaalparameters voor bevaarbaarheid (aangezien deze geen rekening houden met de breedte van de vaarweg).

De signaalparameters voor bevaarbaarheid blijken gunstig toegepast te kunnen worden voor het identificeren van de evolutie van de bevaarbaarheid van het Schelde-estuarium. Een meer diepgaande analyse is nodig om de oorzaak van de verschillen in bevaarbaarheid te doorgronden, maar deze kon steeds gevonden worden.

De belangrijkste nadelige evolutie in het Schelde-estuarium tussen 2011 en 2019 voor wat betreft bevaarbaarheid blijkt de toename van de dwarsstroming omstreeks hoog water. Deze invloed blijkt het hoogst in de vaarweg tussen Hansweert en Walsoorden maar treedt ook op ander locaties op (zoals Valkenisse). Een gunstige evolutie is waarneembaar te Bath, waar echter de conditie uit 2011 aantoont dat voldoende diepte in de bocht van Bath noodzakelijk is voor een veilige bevaarbaarheid van deze bocht. Verder is het onderhoud van de vaarwegbreedte in de Pas van Borssele een aandachtspunt.

7 Referenties

- Barneveld, J.H.; Nicolai, R.P.; Boudewijn, T.J.; de Jong, J.W.; van Didderen, K.; van de Haterd, R.J.W.; Van De Moortel, I.; Velez, C.** (2018). Evaluatierapport. T2015-rapportage Schelde-estuarium. HKV Lijn in Water: Lelystad
- 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
- Delefortrie, G.; Eloot, K.; Lataire, E.; Van Hoydonck, W.; Vantorre, M.** (2016). Captive model tests based on 6 DOF shallow water manoeuvring model, *in*: (2016). *International conference on ship manoeuvring in shallow and confined water with special focus on ship bottom interaction (4th MASHCON)*: Hamburg, Germany. ISBN 9783939230380. doi:10.18451/978-3-939230-38-0
- Depreiter, D.; Cleveringa, J.; van der Laan, T.; Maris, T.; Ysebaert, T.; Wijnhoven, S.** (2014). T2009-rapport Schelde-estuarium. IMDC/Arcadis/Universiteit Antwerpen/Imares/NIOZ
- Holzhauser, H.; Maris, T.; Meire, P.; van Damme, S.; Nolte, A.; Kuijper, J.; Taal, M.; Jeuken, C.; Kromkamp, J.; van Wesenbeeck, B.; Van Ryckegem, G.; Van den Bergh, E.; Wijnhoven, S.** (2011). Evaluatiemethodiek Schelde-estuarium Fase 2
- Lataire, E.; Vantorre, M.; Laforce, E.; Eloot, K.; Delefortrie, G.** (2007). Navigation in confined waters influence of bank characteristics on ship-bank interaction, *in*: (2007). *2nd International Conference on Marine Research and Transportation (ICMRT'07)*: Ischia, Italy
- Maris, T.; Bruens, A.; van Duren, L.; Vroom, J.; Holzhauser, H.; De Jonge, M.; Van Damme, S.; Nolte, A.; Kuijper, K.; Taal, M.; Jeuken, C.; Kromkamp, J.; van Wesenbeeck, B.; Van Ryckegem, G.; Van den Bergh, E.; Wijnhoven, S.; Meire, P.** (2014). Evaluatiemethodiek Schelde-estuarium. *Update 2014*. Deltares
- Stark, J.; Vanlede, J.; Plancke, Y.; Mostaert, F.** (2020). Dwarsstroming Platen van Ossenis: Validatie Delft3D-NeVla model voor meetcampagne 12/03/2020. Versie 4.0. *WL Rapporten*, 20_036_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. Available at: <http://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=327364>
- Sugeno, M.** (1985). An introductory survey of fuzzy control. *Inf. Sci. (Ny)*. 36: 59–83
- Vanlede, J.; Chu, K.; Smolders, S.; Decrop, B.; Mostaert, F.** (2020). Update SCALDIS 2019: a 3D hydrodynamic model of the Scheldt Estuary: calibration report. Version 3.. *FHR reports*, PA016_1. Flanders Hydraulics Research: Antwerp. Available at: <http://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=334271>

Bijlage 1 Pilot Card

msc_atlantis_135_SeaFull PRINCIPLE CHARACTERISTICS

based on fast-time simulations

Name	msc_atlantis_135_SeaFull.shi
Project	19_065

Main Dimensions

LOA	[m]	399	
LPP	[m]	385	
B	[m]	54	
T	[m]	13.5	
m	[ton]	194144	
A _{wind frontal}	[m ²]	2152	
A _{wind lateral}	[m ²]	13247.5	

Propeller

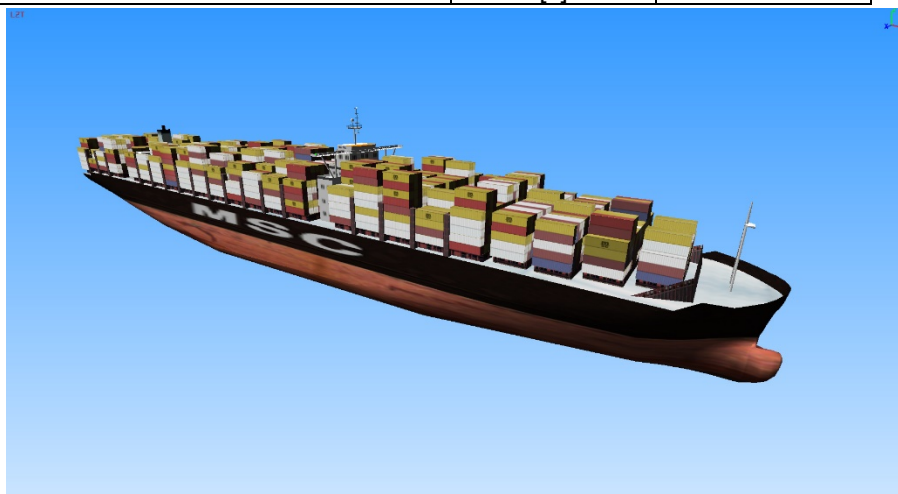
#	[-]	1	
n _{max}	[1/s]	1.4	
CPP		No	

Thruster

Bow thruster	[-]	1	
Total Power	[HP]	2722	
Max Propeller Rate	[°/min]	450	
Stern Thruster	[-]	1	
Total Power	[HP]	2722	
Max Propeller Rate	[°/min]	450	

Rudders

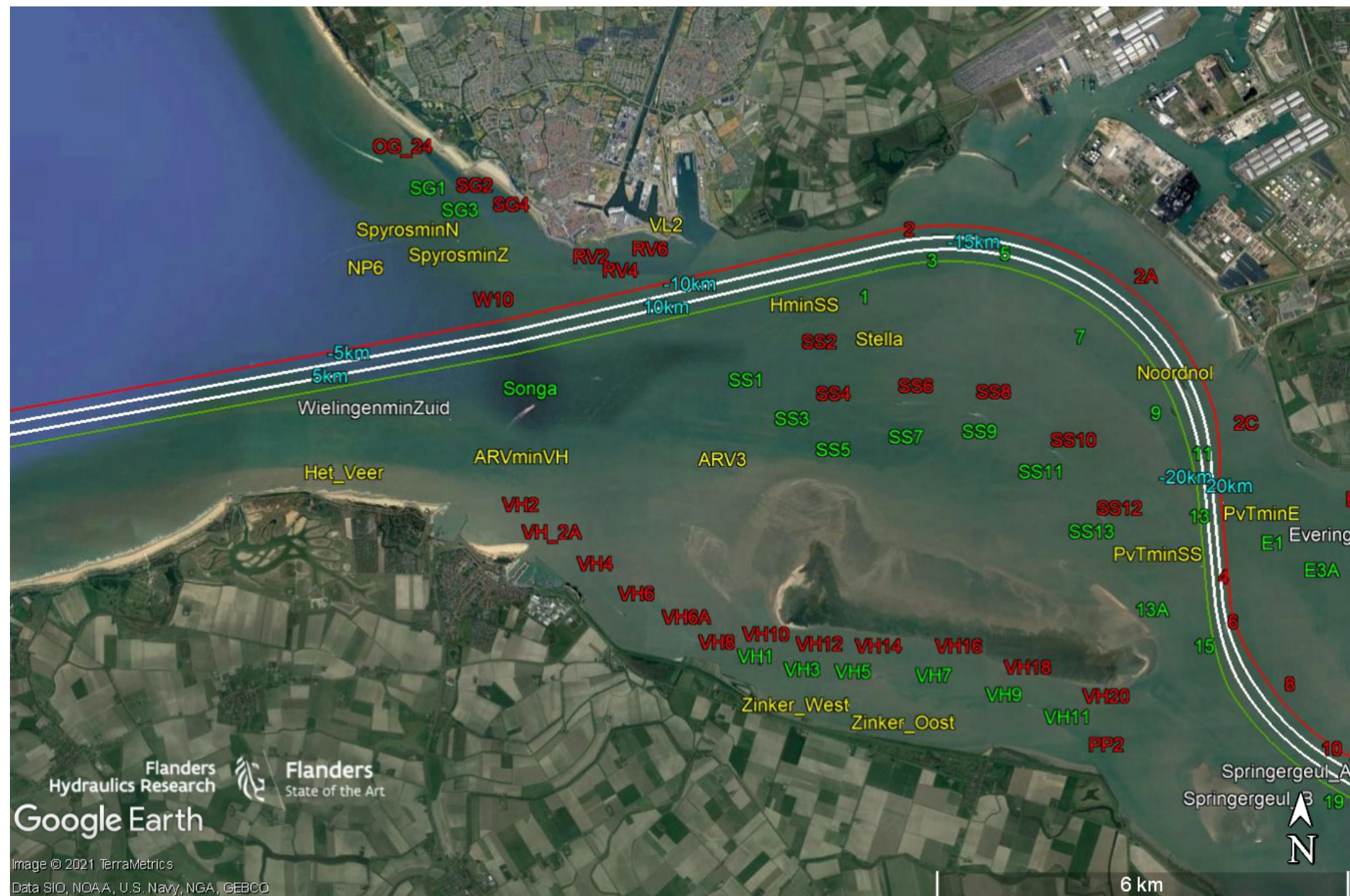
#	[-]	1	
d _{max}	[°]	35	
Time from +35 to -35	[s]	25	

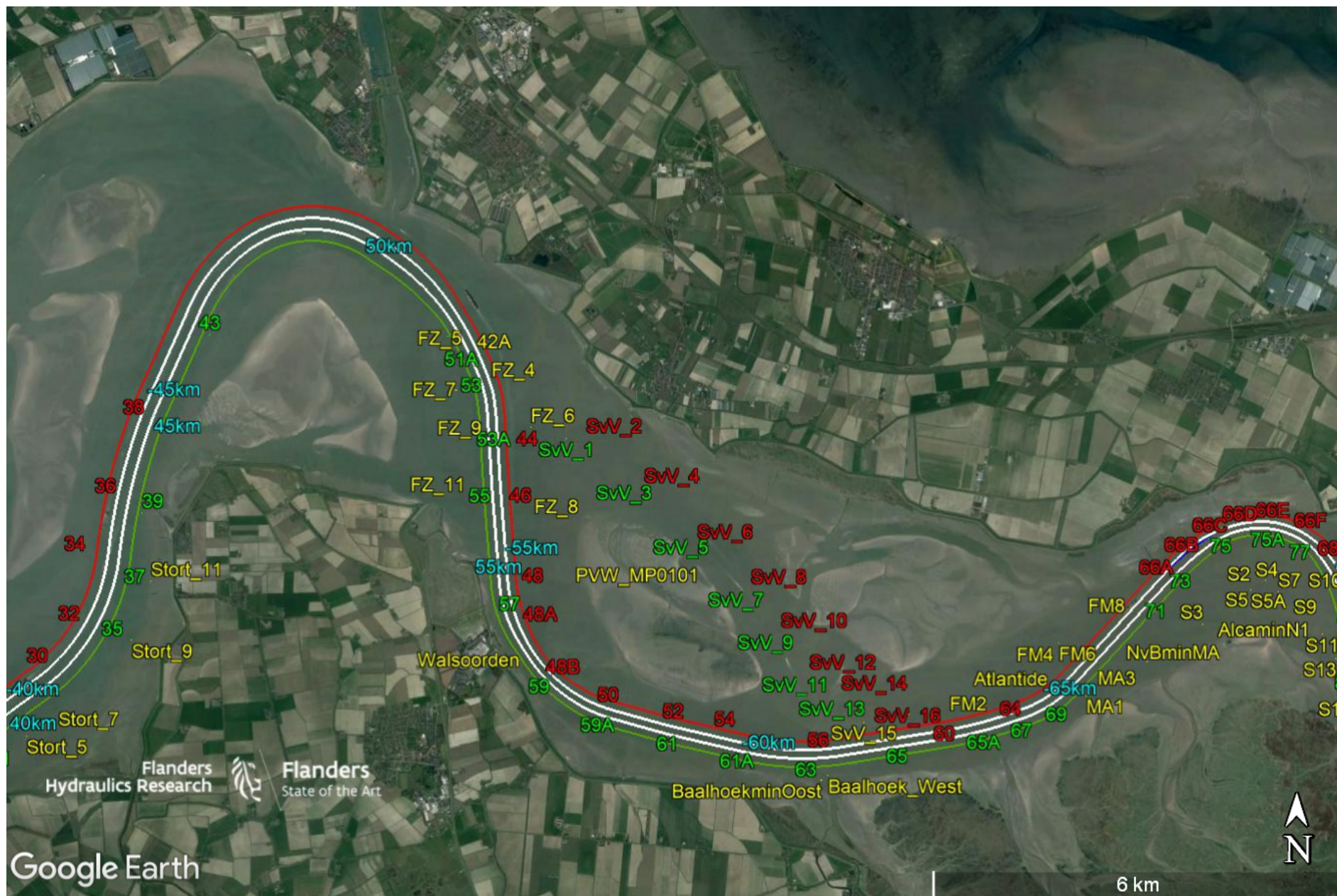


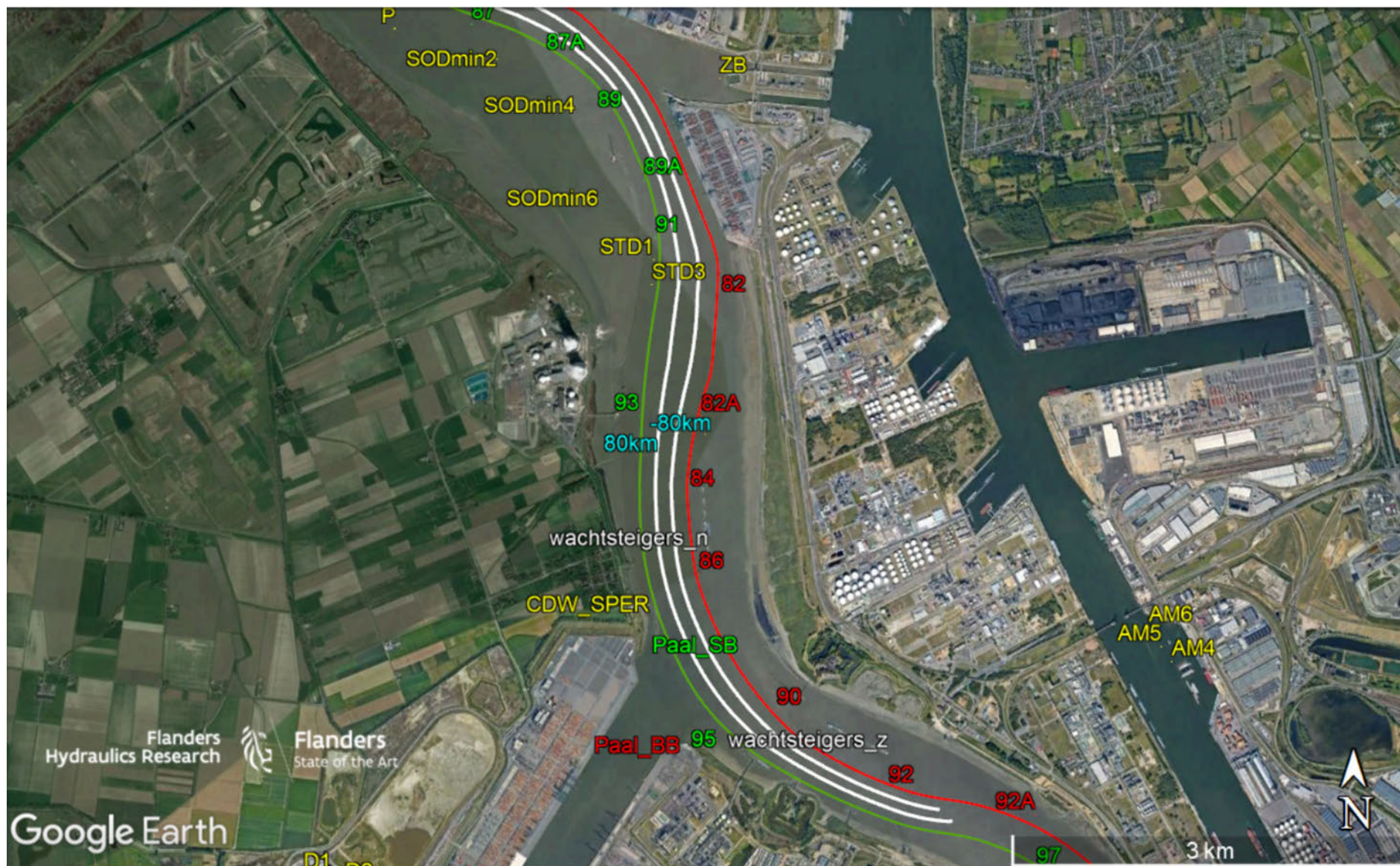
Manoeuvring speeds				
	RPM	UKC=100%	UKC=10%	
	[-]	[kn]	[kn]	
Manoeuvring Full Ahead	84	21.6	16.5	
Half Ahead	64	16.6	12.6	
Slow Ahead	45	11.5	8.8	
Dead Slow Ahead	25	6.3	4.9	
Stopping specifications				
	Time		Distance	
UKC=100%	[s]	[mm:ss]	[m]	
From Man. Full Ahead to Full Astern	578	09:38	3283	
From Slow Ahead to Full Astern	326	05:26	920	
Turning specifications				
	Advance	Transfer	Tact Diam	
UKC=100%	[m]	[m]	[m]	
Manoeuvring Full Ahead	1234	722	1419	
Slow Ahead	1246	731	1399	
UKC=10%				
Manoeuvring Full Ahead	2573	2242	4360	
Slow Ahead	2258	1898	3706	

ZigZag 20/20				
	1st Overshoot	2nd Overshoot	Period	
UKC=100%	[deg]	[deg]	[s]	
Manoeuvring Full Ahead	7.1	6.4	308	
Slow Ahead	5.4	4.7	563	
UKC=10%				
Manoeuvring Full Ahead	1.5	1.5	708	
Slow Ahead	1.3	1.3	1185	

Bijlage 2 Baanafstanden langsheen referentietraject



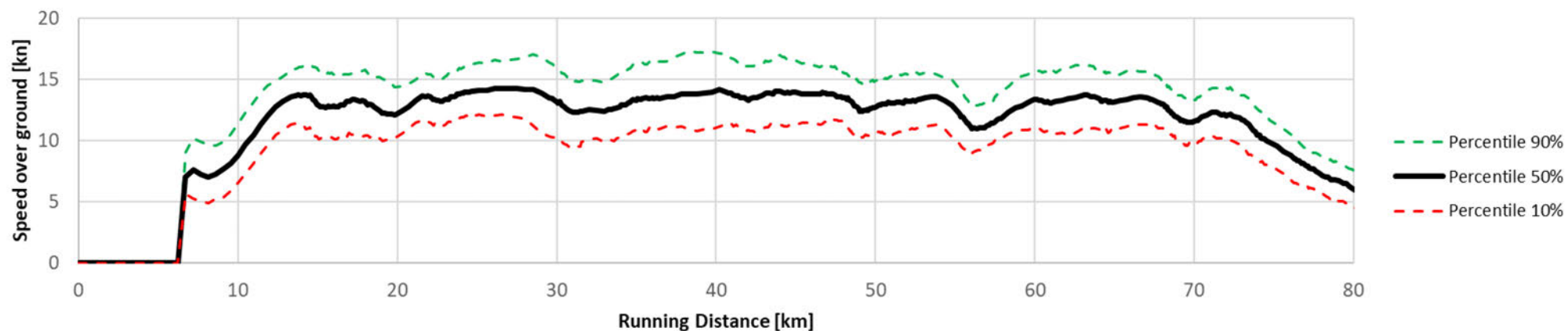




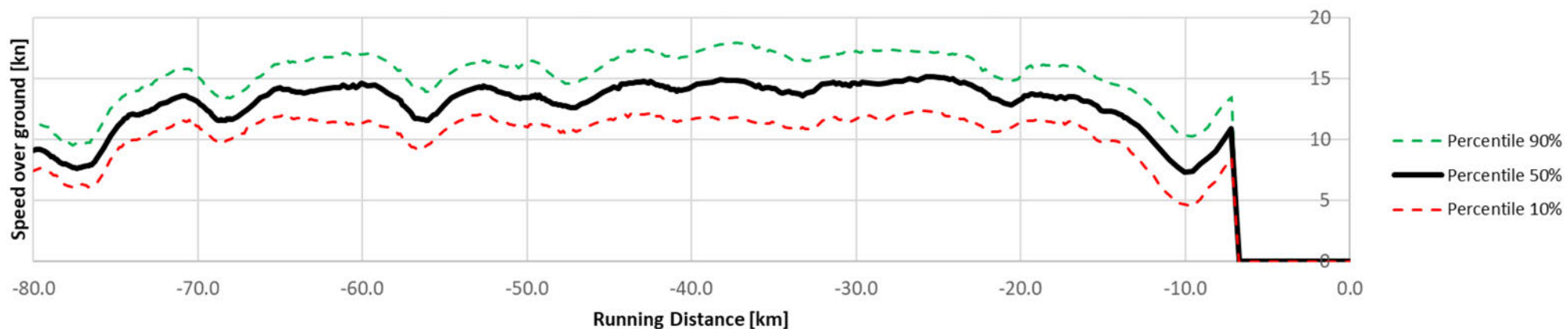
Bijlage 3 AIS-analyse opvaart en afvaart

Onderstaande figuren geven een statistische analyse weer van de vaarsnelheden zoals toegepast door op- en afvarende containerschepen naar en uit Deurganckdok met lengte groter dan 350 m en diepgang kleiner dan 13.1 m. De snelheden worden gerefereerd naar de baanafstand van de respectievelijke referentietrajecten (zie Bijlage 2)

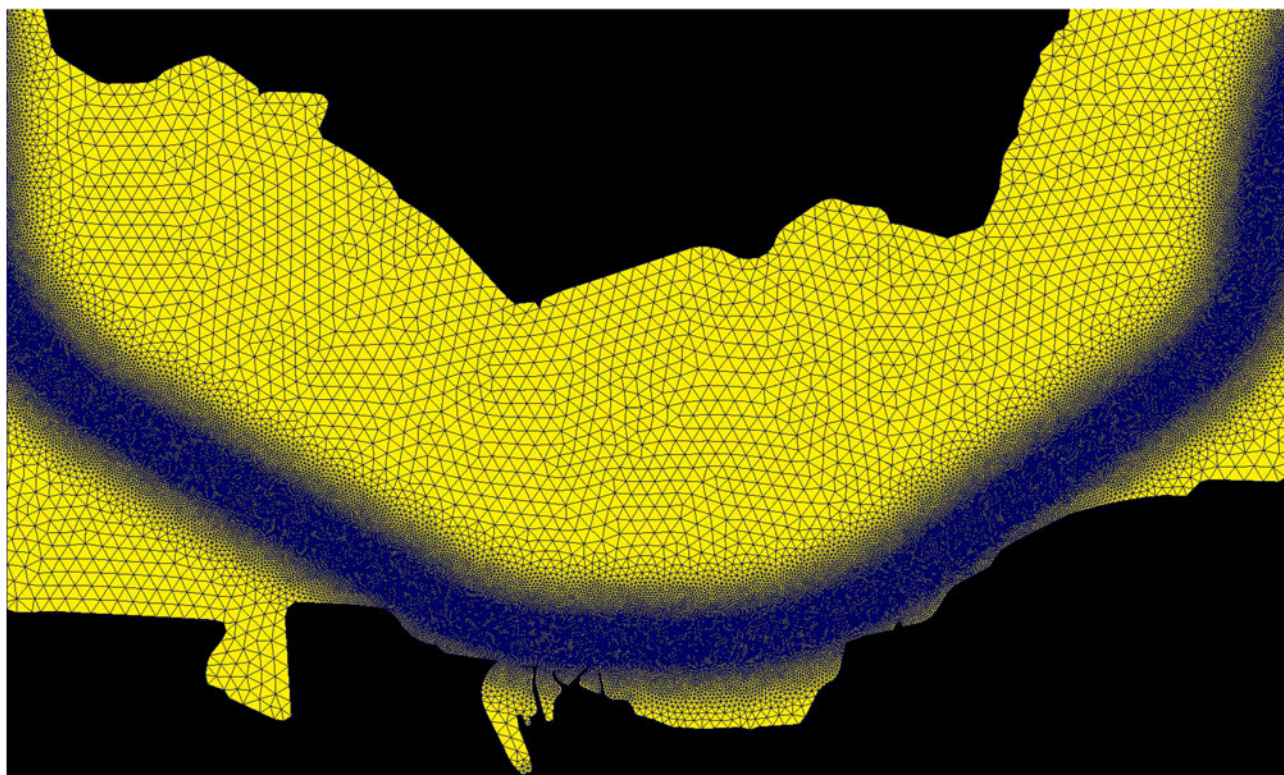
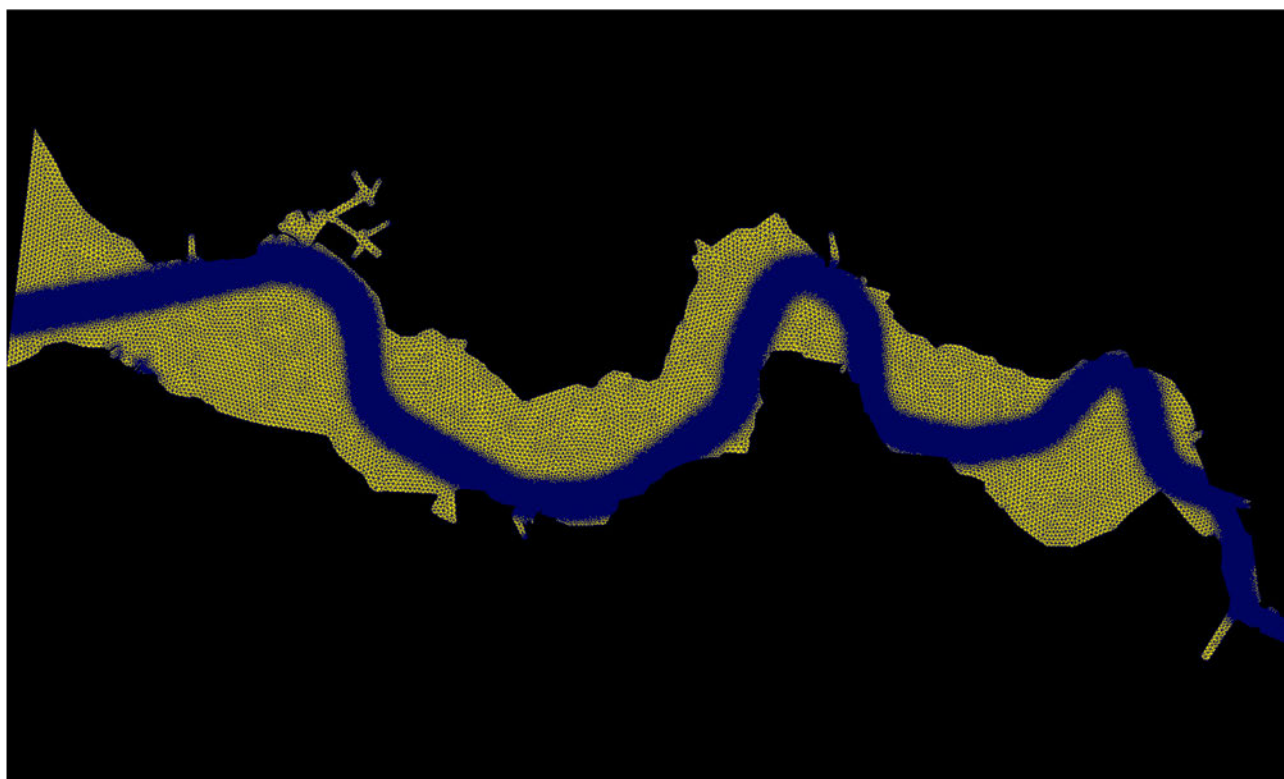
Speed over ground from Vlissingen to Deurganckdok based on 252 AIS-trajectories (exclude errors)

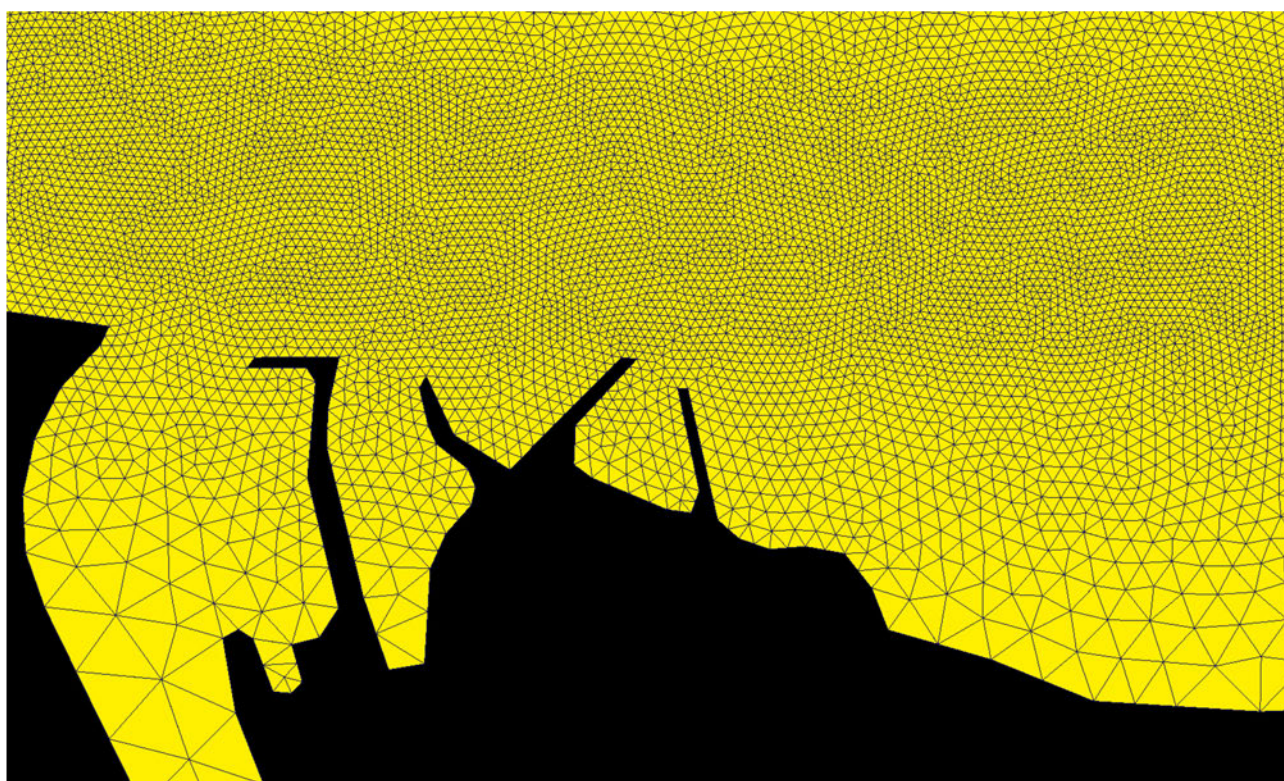
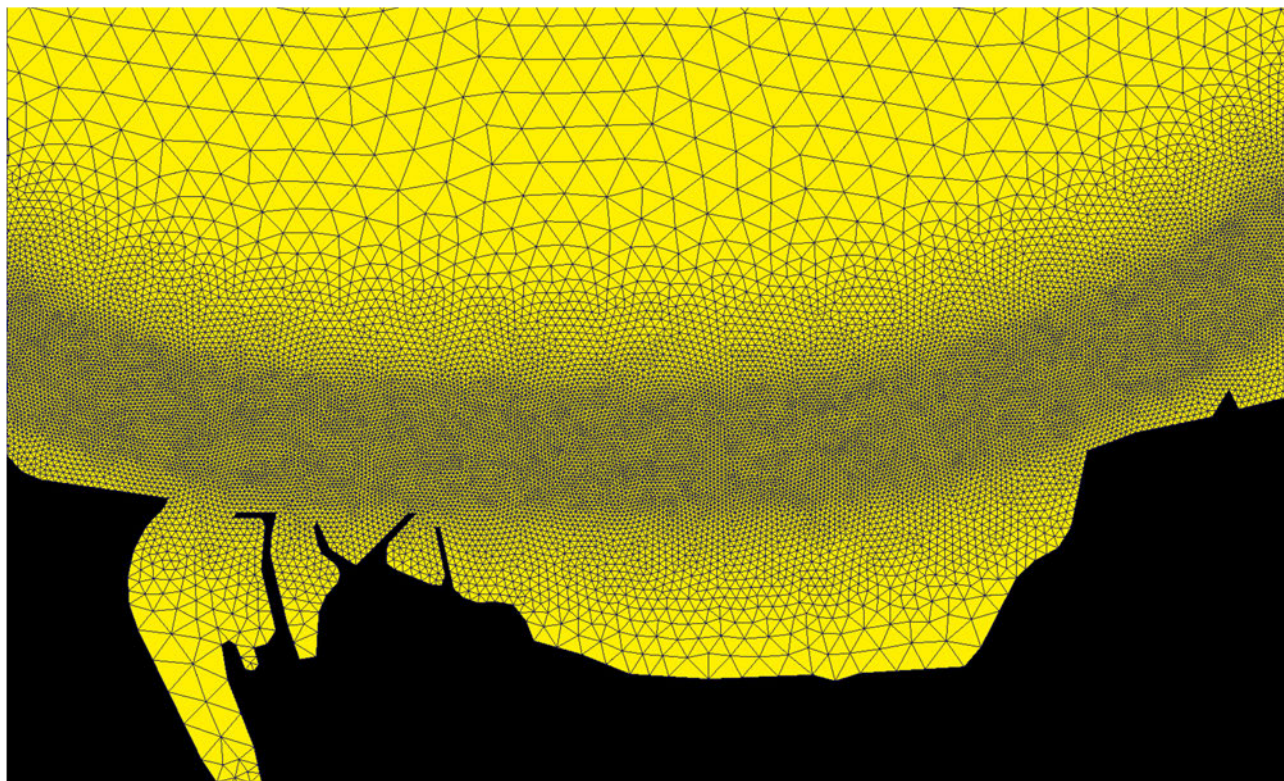


Speed over ground from Deurganckdok to Vlissingen based on 200 AIS-trajectories (exclude errors)



Bijlage 4 Visualisatie bodemmesh





Bijlage 5 Benodigde simulaties

Onderstaande lijst geeft een opsomming van inputparameters die nodig zijn voor het uitvoeren van de voorgestelde methodiek binnen de evaluatiemethodiek en welke output

INPUT

Het uitvoeren van de nautische simulaties vergt de input van een aantal parameters. Deze worden hieronder opgelijst:

1. Bathymetrie

Opgemeten bathymetrie van Westerschelde en Beneden – Zeeschelde.

2. Stroomsnelheden en waterstanden:

Met behulp van een numeriek simulatiemodel, met de beschouwde bathymetrie als input, worden gebiedsdekkende stroomvelden opgeleverd voor een volledige tijcyclus volgens een vaste methodiek m.b.t. randvoorwaarden. Deze output wordt gegenereerd elke 10 min, voor deze tijcyclus.

3. Keuze scheepskarakteristieken

Voor de simulaties wordt een schip gebruikt met een lengte * breedte van 399 m * 54 m, welke representatief is voor een groot containerschip. De diepgang van het schip bedraagt 13.5 m. Deze diepgang gaat gepaard met minimale tijpoortbeperkingen en garandeert dat maatgevende locaties bij de kleinste toegelaten kielspeling bereikt worden. Het wiskundige manoeuvreermodel van het studieschip houdt rekening met kielspelings-, stroom- en oevereffecten en werd gevalideerd door realtime simulaties met loodsen.

4. Keuze vaarsnelheden & traject

Het beschouwde vaargebied betreft de Westerschelde tussen Vlissingen (afwaarts) en Drempe van Frederik (opwaarts) en wordt geëvalueerd voor zowel opvaart als afvaart. De opgelegde snelheden van het schip worden gedefinieerd als vaarsnelheden door het water en worden afgeleid uit AIS-data ("Automatic Identification System") voor een representatieve tijdsperiode voor beschouwde simulatie (2 jaar voorafgaand) en voor een representatieve vloot. Het opgelegde vaartraject wordt bepaald door de AIS-data te verwerken tot statistische spreiding van de horizontale positie van het scheepsmidden.

5. Track controller

De track controller is het controle algoritme dat het roer- en schroefgebruik van het schip stuurt opdat het schip zo goed als mogelijk het opgelegde vaartraject aflegt aan de opgelegde vaarsnelheid. Er wordt een model-vrije track controller (Chen et al., 2020) ingezet (dit wil zeggen dat de track controller geen of slechts zeer beperkte kennis heeft over de manoeuvreereigenschappen van het schip).

OUTPUT

De fasttime simulaties worden zowel in op- als afvaart uitgevoerd, waarbij een schip om de 10 minuten vertrekt over een volledige tijcyclus van 13h. Dit resulteert in 78 op- en afvaarten vanaf de startlocatie. Voor elke simulatie wordt over het volledige traject de roerwerking en de afstand tot het vooropgestelde vaartraject bijgehouden, wat resulteert in een ruimtelijk – temporeel beeld van deze outputparameters. Voor de roerwerking wordt het % van de maximale roerhoek gebruikt als eenheid, voor de afstand tot het voorgestelde vaartraject de afstand in meter.

DEPARTEMENT **MOBILITEIT & OPENBARE WERKEN**
Waterbouwkundig Laboratorium

Berchemlei 115, 2140 Antwerpen

T +32 (0)3 224 60 35

F +32 (0)3 224 60 36

waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be

www.waterbouwkundiglaboratorium.be