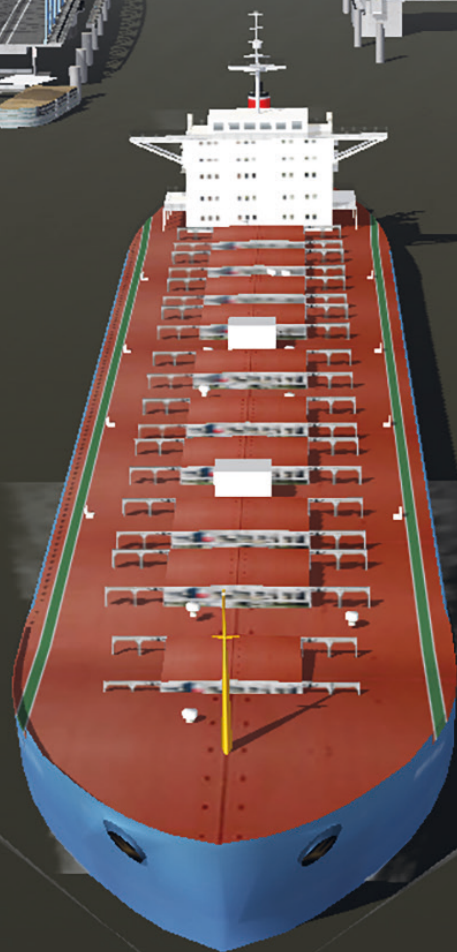




Vlaanderen
is wetenschap



23_116_1
WL rapporten

Nautische toegankelijkheid Kanaal Gent-Terneuzen voor scheepsbreedte tot 38.5 m

Eindrapport – Impactstudie bodemprofiel
en Full Mission Bridge simulaties

DEPARTEMENT
**MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN**

waterbouwkundiglaboratorium.be

Nautische toegankelijkheid Kanaal Gent-Terneuzen voor scheepsbreedte tot 38.5 m

Eindrapport – Impactstudie bodemprofiel
en Full Mission Bridge simulaties

Verwilligen, J.; Mansuy, M.; Eloot, K.; Lataire, E.

Juridische kennisgeving

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

Copyright en wijze van citeren

© Vlaamse overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Waterbouwkundig Laboratorium 2024
D/2024/3241/097

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Verwilligen, J.; Mansuy, M.; Eloot, K.; Lataire, E. (2024). Nautische toegankelijkheid Kanaal Gent-Terneuzen voor scheepsbreedte tot 38.5 m: Eindrapport – Impactstudie bodemprofiel en Full Mission Bridge simulaties. Versie 4.0. WL Rapporten, 23_116_01. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

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

Documentidentificatie

Oprachtgever:	Vlaams-Nederlandse Schelde commissie (VNSC)	Ref.:	WL2024R23_116_1
Trefwoorden (3-5):	Kanaal Gent-Terneuzen, Bulk carrier, tanker, oevereffecten, bathymetrie, vaarsimulaties		
Kennisdomeinen:	Havens en vaarwegen > Manoeuvreergedrag > Oevereffecten > simulaties Havens en vaarwegen > Manoeuvreergedrag > Wind > simulaties		
Tekst (p.):	129	Bijlagen (p.):	49
Vertrouwelijk:	<input checked="" type="checkbox"/> Nee	<input checked="" type="checkbox"/> Online beschikbaar	

Auteur(s):	Verwilligen, J. (WL); Mansuy, M. (UGent)
------------	--

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Eloot, K. (WL) Lataire, E. (UGent)	Getekend door:Katrien Eloot (Signature) Getekend op:2024-09-03 16:13:44 +02:00 Reden:Ik keur dit document goed <i>Eloot Katrien</i>  Digitally signed by Evert Lataire (Signature) Date: 2024.09.04 15:46:46 +02'00'
Projectleider:	Verwilligen, J.	Getekend door:Jeroen Verwilligen (Signat) Getekend op:2024-09-03 15:57:20 +02:0 Reden:Ik keur dit document goed <i>Verwilligen Jeroen</i> 

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Bellafkih, K.	Getekend door:Abdelkarim Bellafkih (Sign Getekend op:2024-09-04 09:33:56 +02:0 Reden:Ik keur dit document goed <i>Bellafkih Abdelkarim</i> 
-----------------	---------------	---

Abstract

In opdracht van de Vlaams-Nederlandse Schelde Commissie onderzochten het Waterbouwkundig Laboratorium en de Universiteit Gent, afdeling Maritieme Techniek de toegankelijkheid van het Kanaal Gent-Terneuzen voor bulk carriers en windgevoelige tankers met afmetingen 240 m x 38.5 m. De te onderzoeken ladingscondities betroffen de maximale kanaaldiepgang ($T_A = 12.5$ m; $T_F = 12.5$ m) en een heavy ballast ladingsconditie ($T_A = 8.8$ m; $T_F = 7.7$ m).

Het onderzoek bestond enerzijds uit een theoretische analyse van de bodemprofielen van het Kanaal Gent-Terneuzen en de bijhorende impact op het vaargedrag van de studieschepen en anderzijds uit een driedaagse simulatiestudie op een Full Mission Bridge Simulator (FMBS).

Op basis van het gevoerde onderzoek worden de meest kritische secties langsheen het kanaal inzichtelijke gemaakt en worden de verwachte oevereffecten op de studieschepen begroot. De ontwikkelde oevereffecten-modellering werd toegepast in de impactstudie van de bodemsecties zowel als in de realtime simulaties met kanaalloodsens.

De vaarsimulaties lieten toe om de randvoorwaarden voor proefvaarten met de studieschepen te bepalen. Hierbij werden ten opzichte van de bestaande regelgeving voor 37.0 m brede schepen bijkomende beperkingen opgelegd wat betreft de vaarsnelheid op het kanaal en de beloodsing en werden voor de windgevoelige tankers bijkomende beperkingen opgelegd met betrekking tot de windcondities en de sleepbootvereisten.

Tenslotte werden ook aanbevelingen geformuleerd met betrekking tot het gebruik van de Full SNMS PPU, de beloodsing en inzet van wielmannen op de grotere schepen op het kanaal en de uitvoering van bijkomend onderzoek naar oevereffecten op de maatgevende schepen op het Kanaal Gent-Terneuzen.

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de tabellen.....	VIII
Lijst van de figuren	IX
1 Inleiding	1
1.1 Sluizencomplex Terneuzen	1
1.2 Kanaal Gent-Terneuzen (KGT).....	1
1.3 Onderzoeksvraag	3
1.3.1 Impactstudie bodemprofiel KGT.....	3
1.3.2 Full mission bridge simulaties (FMBS)	3
2 Studieschepen	4
2.1 Manoeuvreermodel in ondiep water.....	4
2.1.1 Manoeuvreermodellen op basis van sleeptankproeven	4
2.1.2 Validatie van manoeuvreermodellen op basis van scheepsgegevens AM Point Lisas.....	6
2.1.3 Pilot card simulatieschepen.....	7
2.2 Oevereffectenmodellering in beperkt water	7
2.2.1 d2b-modellering Lataire (2014).....	8
2.2.2 Bepaling oevercoëfficiënten op basis van sleeptankproeven	14
2.2.3 Toepassing oevermodellering op typeprofiel.....	25
2.3 Modellering van windkrachten	28
2.3.1 3D-modellen schepen.....	28
2.3.2 Windoppervlaktes.....	29
3 Bathymetrie en omgevingsdata	30
3.1 Aslijn KGT en boogstralen	30
3.2 Bodemmesh	32
3.3 Theoretisch profiel (TP).....	36
3.3.1 Typeprofielen KGT	36
3.3.2 Nederlands theoretisch profiel.....	41
3.3.3 Vlaams theoretisch profiel.....	41
3.4 Historische Peilingen	42

4	Impactstudie bodemprofiel	45
4.1	Analyse van de bodem	45
4.1.1	Algemene analyse bodembreedte op h= 13.5 m KP	45
4.1.2	Algemene analyse bodembreedte op h= 12.5 m KP	60
4.1.3	Algemene analyse maximale waterdiepte	62
4.2	Analyse van de oevereffecten.....	64
4.2.1	Dubins-pad berekening van het vaarpad.....	64
4.2.2	Analyse langskracht ten gevolge van oever.....	68
4.2.3	Analyse inzinking boeg (maximale squat).....	73
4.2.4	Analyse oeverkracht achterschip.....	75
4.2.5	Analyse oeverkracht voorschip.....	77
4.3	Samenvatting en bepaling oeverprofiel simulatiestudie	80
5	Vaarsimulaties	82
5.1	Simulatieomgeving.....	82
5.1.1	Studieschepen	82
5.1.2	Bathymetrie	82
5.1.3	Wind.....	83
5.1.4	Sleepboten	86
5.1.5	Full SNMS	86
5.1.6	Wielmannen.....	87
5.1.7	3D-model	87
5.2	Simulatieprogramma en analyse	88
5.2.1	Organisatie.....	88
5.2.2	Analyse en verwerking.....	90
5.2.3	Resultaten simulaties bij diepgang 12.5 m	96
5.2.4	Resultaten simulaties bij ladingsconditie heavy ballast	112
6	Samenvatting en conclusies	122
6.1	Samenvatting en conclusies.....	122
6.1.1	Bodemprofielen Kanaal Gent-Terneuzen	122
6.1.2	Modellering van de studieschepen.....	123
6.1.3	Oevereffecten studieschip op typeprofiel KGT	123
6.1.4	Impactstudie van de bodem Kanaal Gent-Terneuzen	124
6.1.5	Vaarsimulaties	125
6.1.6	Randvoorwaarden voor proefvaarten	126
6.2	Aanbevelingen voor verder onderzoek.....	128

Referenties	129
Bijlage 1 Pilot Cards studieschepen.....	B1
Bijlage 2 Grafieken tijdreeksen simulaties	B9
Bijlage 3 Hittekaarten parameters simulaties.....	38
Bijlage 4 Handleiding KMZ in Google Earth.....	45

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Beschikbare ladingscondities en kielspelingen beproefd voor het schaalmodel T01, geëvalueerd bij schaal 1/70	5
Tabel 2 – Beschikbare ladingscondities en kielspelingen beproefd voor het schaalmodel T01, geëvalueerd bij schaal 1/59.9	5
Tabel 3 – Vergelijking van de snelheidstabel voor het simulatiemodel bij maximale diepgangen 12.5 m en 8.8 m geëvalueerd in diep water en zoals verzameld voor het schip AM Point Lisas.....	6
Tabel 4 – Vergelijking van draaicirkelproeven voor het simulatiemodel bij maximale diepgangen 12.5 m en 8.8 m geëvalueerd in diep water en zoals verzameld voor het schip AM Point Lisas.....	6
Tabel 5 – Vergelijking van zigzagproeven (10/10) voor het simulatiemodel bij maximale diepgangen 12.5 m en 8.8 m geëvalueerd in diep water en zoals verzameld voor het schip AM Point Lisas.....	7
Tabel 6 – Vergelijking van zigzagproeven (20/20) voor het simulatiemodel bij maximale diepgangen 12.5 m en 8.8 m geëvalueerd in diep water en zoals verzameld voor het schip AM Point Lisas.....	7
Tabel 7 – Overzicht van het aantal coëfficiënten uit Lataire (2014) voor de berekening van de verschillende oevereffecten	14
Tabel 8 – Afmetingen schaalmodel T0Z overeenkomstig het benchmarkschip KVLCC2 en opgeschaalde afmetingen voor breedte 38.5 m	14
Tabel 9 – Windoppervlaktes van scheepstypes bulk carrier en tanker bij ladingscondities beschikbaar in simulator.....	29
Tabel 10 – Locaties langs het Kanaal Gent-Terneuzen met overeenkomstige baanafstand langsheen aslijn KGT	31
Tabel 11 – Metadata bochten op het kanaal Gent-Terneuzen (Verwilligen <i>et al.</i> , 2021).....	32
Tabel 12 – Eenduidige definitie van typeprofielen op basis van de vaarwegbreedte (W) bij verschillende waterdieptes (h)	37
Tabel 13 – Vaarwegbreedte (W) bij verschillende waterdieptes (h) voor de typeprofielen van KGT	37
Tabel 14 – oppervlakte typeprofielen van KGT en bijhorende blockage voor studieschepen.....	38
Tabel 15 – Overzicht van de uitgevoerde FMB-simulaties	89
Tabel 16 – Kleurenschaal voor de inkleuring van het simulatieschip op basis van de dichtste afstand tussen het schip en de dieptelijn overeenkomstig de maximale diepgang van het schip.....	92
Tabel 17 – Kleurenschaal voor de inkleuring van de sleepboten en de schroefpijl op basis van respectievelijk de stuwkracht (percentage van de bollard pull van de sleepboot) en het schroeftoerental (percentage tot het toerental Harbour Full).....	92
Tabel 18 – Colour scale for horizontal distance relative to ship beam applied in KMZ-generation (linear interpolation).....	B47

Lijst van de figuren

Figuur 1 – Kanaal Gent Terneuzen met enkele ijkpunten ter verduidelijking.....	2
Figuur 2 – Theoretische dwarsprofiel van het Kanaal Gent-Terneuzen geldig voor respectievelijk het Nederlandse kanaaltraject, het kanaaltraject te Zelzate en het kanaaltraject opwaarts Zelzate.....	2
Figuur 3 – Visuele weergave van het <i>gewicht</i> van het omringende water in de d2b-modellering (Evert Lataire & Vantorre, 2008).....	9
Figuur 4 – Visuele weergave van het gewogen oppervlakte voor de stuurboord sectie (χ_S , boven) en voor de bakboord sectie (χ_P , onder)	9
Figuur 5 – Vergelijking sleeptankproeven en modellering voor langskracht voor TOZ bij hoge blockages	17
Figuur 6 – Vergelijking sleeptankproeven en modellering voor inzinking aan boeg voor TOZ bij hoge blockages	18
Figuur 7 – Vergelijking sleeptankproeven en modellering voor de dwarskracht aan het achterschip voor TOZ bij hoge blockages	19
Figuur 8 – Vergelijking sleeptankproeven en modellering voor de dwarskracht aan de boeg voor TOZ bij hoge blockages	20
Figuur 9 – Vergelijking sleeptankproeven en modellering voor de dwarskracht aan de boeg en achterschip voor TOZ bij kleine blockages en oeverhelling 1/3 of 1/4	21
Figuur 10 – Vergelijking sleeptankproeven en modellering voor de dwarskracht aan het achterschip voor T01 bij T=12.5 m bij kleine blockages en verticale oevers	22
Figuur 11 – Vergelijking sleeptankproeven en modellering voor de dwarskracht aan de boeg voor T01 bij T=12.5 m bij kleine blockages en verticale oevers	23
Figuur 12 – Vergelijking sleeptankproeven en modellering voor de dwarskracht aan het achterschip voor T01 bij $T_A=9.0$ m en $T_F=7.0$ m bij kleine blockages en verticale oevers.....	24
Figuur 13 – Vergelijking sleeptankproeven en modellering voor de dwarskracht aan de boeg voor T01 bij $T_A=9.0$ m en $T_F=7.0$ m bij kleine blockages en verticale oevers.....	24
Figuur 14 – Evaluatie van oevermodellering in tweezijdig typeprofiel NL-KGT voor studieschip 240 m x 38.5 m bij diepgang 12.5 m	26
Figuur 15 – Evaluatie van oevermodellering in eenzijdig typeprofiel NL-KGT voor studieschip 240 m x 38.5 m bij diepgang 12.5 m	26
Figuur 16 – Evaluatie van oevermodellering in tweezijdig typeprofiel NL-KGT voor studieschip 240 m x 38.5 m in heavy ballast	27
Figuur 17 – Evaluatie van oevermodellering in eenzijdig typeprofiel NL-KGT voor studieschip 240 m x 38.5 m in heavy ballast.....	27
Figuur 18 – Zijaanzichten van 3D-modellen van studieschepen voor bulk carrier (links) en tanker (rechts) zoals toegepast in de simulatiestudie	28
Figuur 19 – Visualisatie van de aslijn van het kanaal met bijhorende baanafstanden (km)	30
Figuur 20 – Boogstralen van de bochten op het Kanaal Gent-Terneuzen (Verwilligen <i>et al.</i> , 2021).	31
Figuur 21 – Illustratie van de bodemmesh voor de simulatieomgeving KGT.....	33

Figuur 22 – Bodemmesh in kanaalsectie tussen Sluiskil en Sas van Gent (celgrootte 1.0 tot 2.0m)	34
Figuur 23: Bodemmesh te Sluiskil -Autriche-haven (celgrootte 1.0 tot 25 m).....	35
Figuur 24 – Vergelijking tussen dwarssectie van het TP te baanafstand -10 km voor een mesh met cel grootte 8 m (rood) en voor de mesh gedefinieerd voor de huidige studie (celgrootte 1.0 m tot 2.0 m).....	36
Figuur 25 – Typeprofielen KGT zoals aangeleverd door de opdrachtgever (bronbestand onbekend).....	39
Figuur 26 – Typeprofiel voor Nederlands grondgebied zoals beschreven in Ministerie van Openbare Werken & Ministerie van Verkeer en Waterstaat (1968)	40
Figuur 27 – Typeprofiel voor Vlaamse grondgebied zoals beschreven in Ministerie van Openbare Werken & Ministerie van Verkeer en Waterstaat (1968).....	40
Figuur 28 – Typeprofiel voor passage Zelzate zoals beschreven in Ministerie van Openbare Werken & Ministerie van Verkeer en Waterstaat (1968).....	40
Figuur 29 – Illustratie van definitie van dieptelijnen in RWSZL-2009-02756.DWG (links) vergeleken met de resulterende dieptelijnen in de bodemmesh gebruikt in de studie (rechts)	41
Figuur 30 – Weergave van baggercontouren voor het Vlaamse gedeelte van het KGT zoals gehanteerd door afdeling Maritieme Toegang (Zelzate: paars, Opwaarts Zelzate: blauw).....	42
Figuur 31 – Illustratie van het aantal beschikbare peilingen langsheen het kanaal (verticale as) en in functie van de tijd (horizontale as).....	43
Figuur 32 – Illustratie van evolutie van dieptelijnen te Sluiskil voor de onderzochte periode (steeds vroegste tijdstip beschikbaar per jaar).....	44
Figuur 33 – Hittekaart voor de bodembreedte van het kanaal op diepte 13.5 m	47
Figuur 34 – Evolutie van de kanaalbreedte op diepte 13.5 m langsheen het kanaal voor de conditie op 24/02/2024 en voor het theoretische profiel (TP)	48
Figuur 35 – Positie van sectie -9.95 km te Brug Sluiskil ten opzichte van bathymetrie 24/02/2024 (links) en weergave van historische dwarssecties (rechts).....	48
Figuur 36 – Tijdsevolutie van de breedte van sectie -9.95 km te Brug Sluiskil op diepte 13.5 m.....	49
Figuur 37 – Tijdsevolutie van de breedte van sectie -9.95 km te Brug Sluiskil op diepte 12.5 m.....	49
Figuur 38 – Positie van sectie -6.85 km te Bocht Sluiskil ten opzichte van bathymetrie 24/02/2024 (links) en weergave van historische dwarssecties (rechts).....	50
Figuur 39 – Tijdsevolutie van de breedte van sectie -6.85 km te Bocht Sluiskil op diepte 13.5 m.....	50
Figuur 40 – Tijdsevolutie van de breedte van sectie -6.85 km te Bocht Sluiskil op diepte 12.5 m.....	50
Figuur 41 – Positie van sectie -6.00 km te Sluiskil (opwaarts Autriche) ten opzichte van bathymetrie 24/02/2024 (links) en weergave van historische dwarssecties (rechts)	51
Figuur 42 – Tijdsevolutie van de breedte van sectie -6.00 km te Sluiskil (opwaarts Autriche) op diepte 13.5 m	51
Figuur 43 – Tijdsevolutie van de breedte van sectie -6.00 km te Sluiskil (opwaarts Autriche) op diepte 12.5 m	51
Figuur 44 – Positie van sectie -2.20 km te Brug Sas van Gent ten opzichte van bathymetrie 24/02/2024 (links) en weergave van historische dwarssecties (rechts).....	52
Figuur 45 – Tijdsevolutie van de breedte van sectie -2.20 km te Brug Sas van Gent op diepte 13.5 m	52
Figuur 46 – Tijdsevolutie van de breedte van sectie -2.20 km te Brug Sas van Gent op diepte 12.5 m	52

Figuur 47 – Illustratie van de verschillende positie van de landsgrens op linkeroever en rechteroever op basis van Google Earth in combinatie met het meest afwaartse baggervak van afdeling Maritieme Toegang.....	53
Figuur 48 – Positie van sectie -0.15 km te Grens ten opzichte van bathymetrie 24/02/2024 (links) en weergave van historische dwarssecties (rechts).....	54
Figuur 49 – Tijdsevolutie van de breedte van sectie -0.15 km te Grens op diepte 13.5 m.....	54
Figuur 50 – Tijdsevolutie van de breedte van sectie -0.15 km te Grens op diepte 12.5 m.....	54
Figuur 51 – Positie van sectie 2.05 km te Tunnel Zelzate ten opzichte van bathymetrie 14/01/2021 (links) en weergave van historische dwarssecties (rechts).....	55
Figuur 52 – Tijdsevolutie van de breedte van sectie 2.05 km te Tunnel Zelzate op diepte 13.5 m.....	55
Figuur 53 – Tijdsevolutie van de breedte van sectie 2.05 km te Tunnel Zelzate op diepte 12.5 m.....	55
Figuur 54 – Positie van sectie 2.00 km te Tunnel Zelzate ten opzichte van bathymetrie 14/01/2021 (links) en weergave van historische dwarssecties (rechts).....	56
Figuur 55 – Tijdsevolutie van de breedte van sectie 2.00 km te Tunnel Zelzate op diepte 13.5 m.....	56
Figuur 56 – Tijdsevolutie van de breedte van sectie 2.00 km te Tunnel Zelzate op diepte 12.5 m.....	56
Figuur 57 – Positie van sectie 8.35 km opwaarts Moervaart ten opzichte van bathymetrie 14/01/2021 (links) en weergave van historische dwarssecties (rechts).....	57
Figuur 58 – Tijdsevolutie van de breedte van sectie 8.35 km opwaarts Moervaart op diepte 13.5 m.....	57
Figuur 59 – Tijdsevolutie van de breedte van sectie 8.35 km opwaarts Moervaart op diepte 12.5 m.....	57
Figuur 60 – Positie van sectie 9.75 km te Ghent Commodity Terminal ten opzichte van bathymetrie 14/01/2021 (links) en weergave van historische dwarssecties (rechts).....	58
Figuur 61 – Tijdsevolutie van de breedte van sectie 9.75 km te Ghent Commodity Terminal op diepte 13.5 m.....	58
Figuur 62 – Tijdsevolutie van de breedte van sectie 9.75 km te Ghent Commodity Terminal op diepte 12.5 m.....	58
Figuur 63 – Positie van sectie 11.75 km tussen Mercator en Sifferdok ten opzichte van bathymetrie 14/01/2021 (links) en weergave van historische dwarssecties (rechts).....	59
Figuur 64 – Tijdsevolutie van de breedte van sectie 11.75 km tussen Mercator en Sifferdok op diepte 13.5 m.....	59
Figuur 65 – Tijdsevolutie van de breedte van sectie 11.75 km tussen Mercator en Sifferdok op diepte 12.5 m.....	59
Figuur 66 – Hittekaart voor de bodembreedte van het kanaal op diepte 12.5 m.....	61
Figuur 67 – Evolutie van de kanaalbreedte op diepte 12.5 m langsheen het kanaal voor de conditie op 24/02/2024.....	62
Figuur 68 – Hittekaart voor de maximale waterdiepte in de secties.....	63
Figuur 69 – Evolutie van de maximale diepte langsheen het kanaal voor de conditie op 24/02/2024.....	64
Figuur 70 – Positie van sectie -3.20 km te Bocht Sas van Gent ten opzichte van bathymetrie 24/02/2024 (links) en weergave van historische dwarssecties (rechts).....	65
Figuur 71 – Weergaven van de aslijn van het kanaal (wit), het Dubins vaarpad voor het theoretische profiel (lichtblauw) en het Dubins vaarpad voor de peiling van 24/02/204 (blauw) ten opzichte van de dieptelijnen overeenkomstig dezelfde peiling.....	67

Figuur 72 – Spreiding van de vaarpaden bekomen voor de 71 peilingen (blauw) ten opzichte van het vaarpad voor de theoretische sectie (lichtblauw) en de aslijn van het kanaal (wit).....	67
Figuur 73 – Hittekaart voor de bijkomende langskracht die veroorzaakt wordt door de oever in de secties en het theoretische profiel.....	69
Figuur 74 – Evolutie van de bijkomende langskracht die veroorzaakt wordt door de oever langsheen het kanaal voor de conditie op 24/02/2024.....	70
Figuur 75 – Positie van sectie -9.50 km te Tunnel Sluiskil ten opzichte van bathymetrie 24/02/2024 (links) en weergave van historische dwarssecties (rechts).....	71
Figuur 76 – Tijdsevolutie van de breedte van sectie -9.50 km te Tunnel Sluiskil op diepte 13.5 m	71
Figuur 77 – Tijdsevolutie van de breedte van sectie -9.50 km te Tunnel Sluiskil op diepte 12.5 m	71
Figuur 78 – Tijdsevolutie van de langskracht te sectie -9.50 km te Tunnel Sluiskil.....	71
Figuur 79 – Tijdsevolutie van de langskracht te sectie -6.85 km te Bocht Sluiskil	72
Figuur 80 – Tijdsevolutie van de langskracht te sectie 2.05 km te Tunnel Zelzate	72
Figuur 81 – Hittekaart voor de inzinking ter hoogte van de boeg in de secties en het theoretische profiel..	74
Figuur 82 – Evolutie van de inzinking ter hoogte van de boeg langsheen het kanaal voor de conditie op 24/02/2024.....	75
Figuur 83 – Hittekaart voor de dwarskracht ter hoogte van het achterschip in de secties en het theoretische profiel	76
Figuur 84 – Evolutie van de dwarskracht ter hoogte van het achterschip langsheen het kanaal voor de conditie op 24/02/2024.....	77
Figuur 85 – Verschillende vaarwegpaden aangenomen voor TP (lichtblauw) als voor peiling 24/02/2024 (blauw).....	77
Figuur 86 – Hittekaart voor de dwarskracht ter hoogte van de boeg in de secties en het theoretische profiel	79
Figuur 87 – Evolutie van de dwarskracht ter hoogte van de boeg langsheen het kanaal voor de conditie op 24/02/2024.....	80
Figuur 88 – Illustratie weergave bodemprofiel op basis van dieptelijnen (Sluiskil).....	83
Figuur 92 – Statistische variatie van het gesimuleerde windspectrum over verschillende Beaufortklassen voor verschillende gemiddelde windsnelheden (ruwheidsklasse 3)	84
Figuur 89 – Windroos voor windmetingen ter hoogte van Westsluis Terneuzen voor alle windcondities (links) en voor windkrachten vanaf 5 Bft (rechts).....	85
Figuur 90 – Vlagerigheid van de wind bij simulatie 5 Bft (ruwheidsklasse 3)	85
Figuur 91 – Vlagerigheid van de wind bij simulatie 6 Bft (ruwheidsklasse 3)	85
Figuur 93 – Weergave van studieschip bulk carrier ten opzichte van brug Sluiskil	87
Figuur 94 – KMZ-visualisatie van simulatie 01 bij nadering bocht van Sluiskil zoals weergegeven in Google Earth Pro™	91
Figuur 95 – Onderverdeling Kanaal Gent-Terneuzen in deelgebieden (Verwilligen <i>et al.</i> , 2021).....	93
Figuur 96 – Hittekaart voor de langskracht ten gevolge van de oever voor de simulaties uitgevoerd bij diepgang 12.5 m	95

Figuur 97 – Hittekaart voor de langskracht ten gevolge van de oever voor de simulaties uitgevoerd bij ladingsconditie Heavy Ballast	95
Figuur 98 – Hittekaart voor de langssnelheid voor de simulaties uitgevoerd bij diepgang 12.5 m.....	97
Figuur 99 – Hittekaart voor de dwarskracht door oevereffecten op het achterschip voor de simulaties uitgevoerd bij diepgang 12.5 m.....	99
Figuur 100 – Hittekaart voor de horizontale afstand tussen het schip en de 12.5 m dieptelijn voor de simulaties uitgevoerd bij diepgang 12.5 m.....	99
Figuur 101 – Hittekaart voor de dwarskracht door wind voor de simulaties uitgevoerd bij diepgang 12.5 m	99
Figuur 102 – Positie van het schip in de buitenbocht bij de aanloop van de bocht van Sluiskil in simulatie 01 resulterend in een belangrijk oevereffect waardoor het schip verzet wordt naar de binnenbocht	100
Figuur 103 – Positie van het schip in de binnenbocht ten gevolge van een eerdere afstoting door de bakboord oever in de bocht van Sluiskil in simulatie 01 resulterend in een belangrijk oevereffect dat het schip naar bakboord doet gieren.....	101
Figuur 104 – Belangrijke oostelijke positie van de tanker in simulatie 05 bij invaart kanaal door een combinatie van wind en oevereffecten.....	101
Figuur 105 – Belangrijke inzet van sleepboten om de gierbeweging van het schip naar stuurboord (geïnduceerd door eerdere oevereffecten) te compenseren in simulatie 05.....	102
Figuur 106 – Hittekaart voor de bruto kielspeling voor de simulaties uitgevoerd bij diepgang 12.5 m.....	103
Figuur 107 – Korte afstand tussen schip en 12.5 m dieptelijn (donkerblauw) in simulatie 05 bij passage brug Zelzate	103
Figuur 108 – Korte afstand tussen schip en 12.5 m dieptelijn in simulatie 05 bij passage tunnel Zelzate ...	104
Figuur 109 – Korte afstand tussen schip en 12.5 m dieptelijn in simulatie 05 ter hoogte van de opwaartse aansluiting van het straatje van Zelzate	104
Figuur 110 – Dwarsafstanden tussen de scheepscontour en de 12.5 m dieptelijn voor passage Zelzate in simulatie 05	105
Figuur 111 – Minimale kielspelingen tussen de scheepscontour op diepte 12.5 m en de kanaalbodem voor passage Zelzate in simulatie 05	105
Figuur 112 – Dwarsafstanden tussen de scheepscontour en de 12.5 m dieptelijn voor passage Sas van Gent in simulatie 05	105
Figuur 113 – Minimale kielspelingen tussen de scheepscontour op diepte 12.5 m en de kanaalbodem voor passage Sas van Gent in simulatie 05.....	105
Figuur 114 – Illustratie van kleine afstanden gerespecteerd tussen schip in oever in simulatie 10 voor het deeltraject Mercatordok	108
Figuur 115 – Passage van de Ghent Commodity Terminal in simulatie 10	108
Figuur 116 – Asymmetrische positie van het schip na passage Ghent Commodity Terminal in simulatie 10 die aanleiding gaf tot belangrijke oevereffecten	109
Figuur 117 – Illustratie van relatief ruime afstanden gerespecteerd tussen schip in oever in simulatie 11 voor het deeltraject Mercatordok.....	109

Figuur 118 – Hittekaart voor de dwarskracht op het achterschip door wind voor de simulaties uitgevoerd bij diepgang 12.5 m	110
Figuur 119 – Passage van oostelijke oever door tanker bij maximale diepgang te Zuid-Chemie Sas van Gent (aankomst).....	110
Figuur 120 – Passage van oostelijke oever door tanker bij maximale diepgang te Zuid-Chemie Sas van Gent (tijdstip van maximaal oevereffect).....	111
Figuur 121 – Belangrijke oevereffecten in bocht van Sluiskil in simulatie 13	111
Figuur 122 – Hittekaart voor de langssnelheid voor de simulaties uitgevoerd bij ladingsconditie Heavy Ballast	112
Figuur 123 – Erg excentrische aanloop van het kanaal in simulatie 07	113
Figuur 124 – Excentrische vaarpositie bij de passage van de tunnel van Zelzate in simulatie 08	113
Figuur 125 – Hittekaart voor de dwarskracht op het achterschip door oever voor de simulaties uitgevoerd bij heavy ballast.....	116
Figuur 126 – Hittekaart voor de dwarskracht op het achterschip door wind voor de simulaties uitgevoerd bij heavy ballast.....	116
Figuur 127 – Hittekaart voor roergebruik voor de simulaties uitgevoerd bij heavy ballast	116
Figuur 128 – Belangrijkste oevereffecten bij het naderen van de brug te Sas van Gent in simulatie 03	117
Figuur 129 – Scheepspositie bij nadering brug van Sas van Gent in simulatie 09	117
Figuur 130 – Kortstondig gebruik van maximale roerhoek ter compensatie van oevereffecten bij passage Autriche-haven.	118
Figuur 131 – Combinatie van belangrijke oeverzuiging en windkrachten op het achterschip bij het uitkomen van bocht Sluiskil in simulatie 09.....	118
Figuur 132 – Hittekaart voor de totale dwarskracht door wind voor de simulaties uitgevoerd bij heavy ballast	119
Figuur 133 – Vereiste inzet van sleepboten bij de passage van brug Sluiskil in simulatie 14.....	120
Figuur 134 – Vereiste inzet van sleepboten bij de passage van brug Sas van Gent in simulatie 14	120
Figuur 135 – Vereiste inzet van voorste sleepboot bij de passage van brug Zelzate in simulatie 14	121
Figuur 136 – Illustratie van positie van schip in buitenbocht (lage wal) van Sluiskil en bijhorende roerhoeken naar bakboord in simulatie 14.....	121
Figuur 137 – Presentation of simulation 01 with overlay graphs in KMZ-format.....	B46
Figuur 138 – Colour code and depth lines presented in KMZ-file.....	B46
Figuur 139 – Time slider functionality KMZ.....	47
Figuur 140 – Pull-down menu Google Earth Explorer	B48
Figuur 141 – PLAY functionality in KMZ that keeps the ship centered on the screen and to present a replay tour	B49

1 Inleiding

Voorliggend document betreft het studierapport voor een full mission bridge simulatiestudie (FMBS) naar de toegankelijkheid van schepen met afmetingen 240 m x 38.5 m op het Kanaal Gent-Terneuzen. De opdrachtbeschrijving vanuit de Vlaams-Nederlandse Scheldecommissie werd op 27/11/2023 overgemaakt aan het Waterbouwkundig Laboratorium (Vlaams-Nederlandse Scheldecommissie, 2023).

De opdracht bestaat uit twee onderdelen:

- impactanalyse bodemprofiel;
- full mission bridge simulaties (FMBS).

1.1 Sluizencomplex Terneuzen

Anno 2024 wordt de bouw van de Nieuwe Sluis Terneuzen (NST) uitgevoerd. De maximale scheepsafmetingen die via de Nieuwe Zeesluis versast kunnen worden, combineren een lengte van 366 m met een breedte van 49 m en een diepgang van 14.5 m¹ (12.5 m tijonafhankelijk). Het ontwerpschip voor de Nieuwe Zeesluis is gebaseerd op het ontwerpschip voor de nieuwe sluisen op het Panamakanaal (Neo-Panamax). Het ontwerpschip voor het Panamakanaal is echter een containerschip, terwijl op heden (en naar verwachting ook op middellange termijn) de marginale schepen op het Kanaal Gent-Terneuzen bulkcarriers en tankers (zullen) zijn.

Op heden is de Westsluis de grootste sluis te Terneuzen. De maximale schepen die via deze sluis het Kanaal Gent-Terneuzen kunnen bereiken zijn (Gemeenschappelijk Nautisch Beheer Scheldegebied, 2011):

- Bulkcarrier maximale lengte: **265 m** x 34.0 m x 12.5 m;
- Bulkcarrier maximale breedte: 230 m x **37.0 m** x 12.5 m.

1.2 Kanaal Gent-Terneuzen (KGT)

Het Kanaal Gent-Terneuzen verbindt het sluizencomplex te Terneuzen met de haven van Gent. Beide havens zijn onderdeel van het havenbedrijf North Sea Port (NSP). In voorliggend rapport is het studiegebied het Kanaal Gent-Terneuzen exclusief de sluisen. Dit stemt overeen met het kanaaltraject tussen de Massagoedhaven en het Sifferdok (zie Figuur 1).

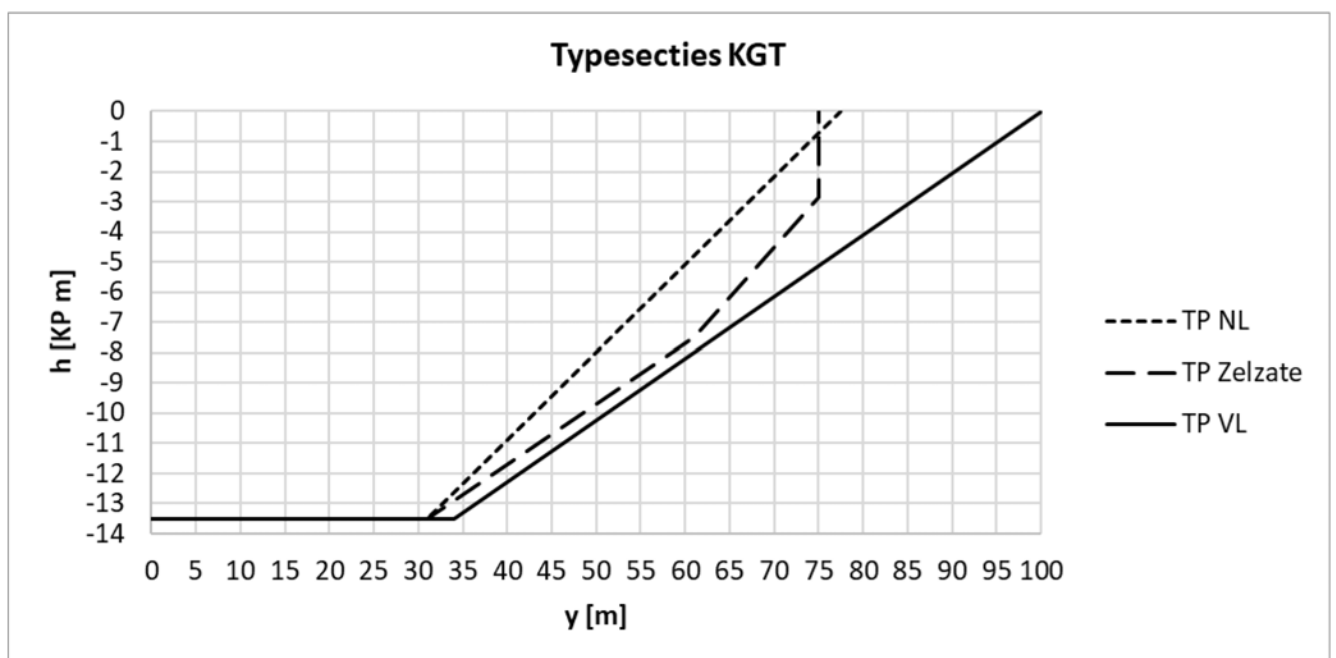
De theoretische diepte van het KGT tussen de sluisen in Terneuzen en het Sifferdok bedraagt 13.5 m. Echter op het Nederlandse en Vlaamse tracé verschilt het theoretische typeprofiel zoals aangegeven in Figuur 2. De typeprofielen gaan op het Nederlandse traject en te Zelzate gepaard met een bodembreedte gelijk aan 62 m en op het Vlaamse traject (opwaarts Zelzate) met een bodembreedte gelijk aan 68 m. Op verschillende locaties langsheen het kanaal ontstaan bovendien lokale verbredingen door de aanwezigheid van dokken of jachthavens of ook versmallingen zoals bij de bruggen (doorvaarbreedte 60 m).

Hoewel de Nieuwe Zeesluis Terneuzen (NST) zal toelaten dat grotere en diepere schepen het Kanaal Gent-Terneuzen bereiken, zijn er vooralsnog geen kanaalaanpassingen voorzien die grotere scheepsdiepgangen zouden faciliteren. De maximale diepgang voor het kanaal wordt derhalve behouden op 12.5 m.

¹ Dit is de maximale diepgang zoals beschreven in de uitgangspuntennota en in de bestekdocumenten voor de aanbesteding van de NST. De diepteligging van de sluis laat mogelijk ook grotere diepgangen toe.



Figuur 1 – Kanaal Gent Terneuzen met enkele ijkpunten ter verduidelijking (E Lataire *et al.*, 2016)



Figuur 2 – Theoretische dwarsprofiel van het Kanaal Gent-Terneuzen geldig voor respectievelijk het Nederlandse kanaaltraject, het kanaaltraject te Zelzate en het kanaaltraject opwaarts Zelzate

1.3 Onderzoeksvraag

In voorliggende opdracht werd de toegankelijkheid van het kanaal onderzocht voor schepen met breedte 38.5 m. De ontwerpschepen van de studie betreffen een bulk carrier en een tanker met afmetingen 240 m x 38.5 m. Beide schepen werden onderzocht bij een maximale ladingsconditie (T=12.5 m) en voor een heavy ballast ladingsconditie (H2).

Het uitgevoerde onderzoek laat toe om de randvoorwaarden vast te leggen voor de organisatie van proefvaarten met de onderzochte schepen. Het onderzoek formuleert bovendien aanbevelingen met betrekking tot vaarsnelheden, windlimieten, sleepbootassistentie en navigatiehulpmiddelen (in concreto Full SNMS).

1.3.1 Impactstudie bodemprofiel KGT

Een belangrijke parameter in de beoordeling van de nautische toegankelijkheid betreft de bathymetrie die voor het kanaal aangenomen wordt (H3). Zowel voor het Vlaamse als het Nederlandse grondgebied wordt het kanaal door de respectievelijke vaarwegbeheerders (Vlaamse Overheid, departement Mobiliteit en Openbare Werken, afdeling Maritieme Toegang en Rijkswaterstaat) onderhouden op basis van een theoretisch profiel. Voor het Nederlandse grondgebied is dit theoretische profiel gedefinieerd voor de volledige kanaalsectie (incl. oevers) terwijl op het Vlaamse grondgebied enkel het vaarpad (-13.5 m Kanaalpeil (KP)) onderhouden wordt op basis van de daar gedefinieerde baggervakken.

Doordat er op het kanaal niet gebaggerd kan worden met overdiepte ten opzichte van het theoretische profiel (-13.5 m KP) worden er geen veiligheidsmarges gehanteerd voor baggertolerantie of sedimentatie. In de feiten is het bijgevolg niet steeds mogelijk om te voldoen aan het theoretische profiel of aan de typeprofielen zoals getoond in Figuur 2.

Bij een beoordeling van de nautische toegankelijkheid van de studieschepen is het van belang om uit te gaan van een bodemprofiel dat aannemelijk en met realistische inspanningen onderhoudbaar is. Een eerste opdracht binnen de onderzoeksvraag betrof dan ook een impactstudie van verschillende bodemcondities voor het KGT(zie H4). Hierbij werd het theoretische bodemprofiel vergeleken met recente peilingen (2017-2023) voor een aantal karakteristieke parameters met betrekking tot zowel geometrische eigenschappen van het kanaal als voor de impact van de oevers op de schepen. Een belangrijk doel van de impactstudie betrof de bepaling van een geschikt bodemprofiel voor de uitvoering van de full mission bridge simulaties.

1.3.2 Full mission bridge simulaties (FMBS)

Een tweede opdracht binnen de onderzoeksvraag betrof de uitvoering van een driedaagse simulatiestudie op de full mission bridge simulator Sim360+ van het Waterbouwkundig Laboratorium in Antwerpen. Hierbij werden ervaren kanaalloodsen (zowel van het Vlaamse DAB Loodswezen als van het Nederlandse loodswezen) uitgenodigd om realtime simulaties uit te voeren met de studieschepen.

Een beschrijving van de simulatieomgeving, de uitgevoerde simulaties en de resultaten wordt weergegeven in H5.

2 Studieschepen

De horizontale scheepsafmetingen van de schepen die het onderwerp vormen van deze studie combineren een scheeps lengte gelijk aan 240 m met een scheepsbreedte gelijk aan 38.5 m. Deze afmetingen zijn conservatieve aannames voor een bestaande en/of geplande scheepsvloot waarvoor de scheepsbreedte 38.0 m bedraagt. Enkel de scheepstypes bulk carrier en CO₂-tanker werden in deze analyse onderzocht en dienden geëvalueerd te worden bij een maximale kanaaldiepgang (12.5 m) en een getrimde heavy ballast conditie.

De modellering van het scheepsgedrag van deze schepen op het kanaal Gent-Terneuzen kan opgesplitst worden in onderstaande onderdelen:

- modellering van het scheepsgedrag in open maar verticaal beperkt water (ondiep water);
- modellering van de oevereffecten (beperkt water);
- modellering van de windkrachten op schepen.

Aangezien de scheepstypes bulk carrier en tanker een gelijkaardige rompvorm, sturing en propulsie hebben werd voor beide schepen eenzelfde hydrodynamisch manoeuvreermodel gehanteerd (vanzelfsprekend verschillend voor de twee ladingscondities). De berekening van scheepskrachten op de twee scheepstypes onderscheidt zich bijgevolg enkel in de windkrachtberekening.

2.1 Manoevreermodel in ondiep water

In eerste instantie dient een modellering opgesteld te worden van het manoeuvreergedrag van de studieschepen in open water bij verschillende kielspelingen (ondiep water). Hiervoor werd gebruik gemaakt van een uitgebreide database aan manoeuvreerproeven beschikbaar bij WL.

2.1.1 Manoevreermodellen op basis van sleeptankproeven

In 2014 en 2022 werden in de sleeptank voor manoeuvres in ondiep water (samenwerking WL en UGent, afdeling Maritieme Techniek) gedwongen manoeuvreerproeven uitgevoerd met een schaalmodel (T01 op schaal 1/70) van een Dunkirk-max bulkcarrier (292 m x 45 m) bij diepgangen 16.5 m; 12.5 m en een getrimde heavy ballast conditie (T_F 7.0 m en T_A 9.0 m). Deze verschillende ladingscondities werden beproefd bij kielspelingen 10%, 20%, 40% en 100% voor de twee zwaarste ladingscondities en 42%, 80% en 212% voor de ballastconditie. Deze kielspelingen stemmen goed overeen met de condities op het KGT. Tabel 1 presenteert de condities waarvoor de sleeptankproeven beschikbaar zijn.

Voor elk van de condities weergegeven in Tabel 1 werd een volledig proevenprogramma uitgevoerd op basis waarvan een manoeuvreermodel afgeleid werd voor de simulator. Het totaal aantal unieke sleeptankproeven dat uitgevoerd werd met scheepsmodel T01 betreft ca. 5000 sleeptankproeven. Dit is een unieke database waarover WL beschikt voor het modelleren van het manoeuvreergedrag van dit scheepstype. Door de manoeuvreermodellen te interpoleren naar diepgang en waterdiepte kunnen alle condities binnen de beschikbare matrix geëvalueerd worden.

Tabel 1 – Beschikbare ladingscondities en kielspelingen beproefd voor het schaalmodel T01, geëvalueerd bij schaal 1/70

Test-naam	Cape size bulk carrier (292 m x 45.0 m)				
	TF[m]	TA[m]	TM[m]	h[m]	ukc [%]
T0101A01	16.5	16.5	16.5	33.04	100
T0101A02	16.5	16.5	16.5	23.128	40
T0101A03	16.5	16.5	16.5	19.824	20
T0101A04	16.5	16.5	16.5	18.172	10
T0102A01	12.5	12.5	12.5	25.0	100
T0102A02	12.5	12.5	12.5	15.6	25
T0102A03	12.5	12.5	12.5	13.8	10
T0103A01	7.0	9.0	8.0	25.0	212
T0103A02	7.0	9.0	8.0	14.4	80
T0103A03	7.0	9.0	8.0	11.3	42

Tabel 2 – Beschikbare ladingscondities en kielspelingen beproefd voor het schaalmodel T01, geëvalueerd bij schaal 1/59.9

Test-naam	Bulk carrier (250 m x 38.5 m)			
	TF[m]	TA[m]	TM[m]	h[m]
T0101A01	14.1	14.1	14.1	28.3
T0101A02	14.1	14.1	14.1	19.8
T0101A03	14.1	14.1	14.1	17.0
T0101A04	14.1	14.1	14.1	15.6
T0102A01	10.7	10.7	10.7	21.4
T0102A02	10.7	10.7	10.7	13.3
T0102A03	10.7	10.7	10.7	11.8
T0103A01	6.0	7.7	6.8	21.4
T0103A02	6.0	7.7	6.8	12.3
T0103A03	6.0	7.7	6.8	9.7

Door het schaalmodel T01 te evalueren bij een schaal 1/59.9 konden de manoeuvreermodellen omgerekend worden tot een bulk carrier met breedte 38.5 m in overeenstemming met de studiebreedte voor de voorliggende opdracht. De beschikbare testcondities voor deze schaal worden weergegeven in Tabel 2. Uit deze omrekeningstabel blijkt dat de te onderzoeken ladingscondities deel uitmaken van de beschikbare manoeuvreermodellen:

- Maximale ladingsconditie: een gelijklastige diepgang gelijk aan 12.5 m kon geïnterpoleerd worden uit de beschikbare manoeuvreermodellen bij de beschikbare gelijklastige diepgangen 10.7 m en 14.1 m.
- Heavy ballast conditie: in overleg met de WG toegankelijkheid KGT werd de maximale diepgang (achteraan) van een heavy ballast conditie 8.8 m verondersteld. Deze ladingsconditie werd geïnterpoleerd tussen de beschikbare midscheepse diepgangen gelijk aan 6.8 m (getrimd) en 10.7 m (gelijklastig). Hierdoor stemde de heavy ballast ladingsconditie in de simulatiestudie overeen met volgende diepgangen:
 - T_{achter}: 8.8 m;
 - T_{voor}: 7.7 m.

Dezelfde ballastconditie werd verondersteld voor beide scheepstypes.

Er kan opgemerkt worden dat de opschaling van het model T01 naar breedte 38.5 m gepaard gaat met een lengte gelijk aan 250 m die groter is dan de gevraagde studielengte gelijk aan 240 m om hieraan tegemoet te komen werden de massa en traagheidsmomenten van het schip aangepast (verkleind) aan dit lengteverschil.

2.1.2 Validatie van manoeuvreermodellen op basis van scheepsgegevens AM Point Lisas

In 2011 voerde WL een plaatsbezoek uit op de bulkcarrier AM Point Lisas met gelijkaardige afmetingen (229.2 m x 38.0 m x 12.5 m) als de studieschepen. Bij dit plaatsbezoek konden de resultaten van full scale trials van het schip verzameld worden. De resultaten van het manoeuvreermodel werden vergeleken met de verzamelde gegevens van de AM Point Lisas en tonen een goede overeenstemming.

Zo toont Tabel 3 de sloopssnelheden bij verschillende telegraafstanden voor de diep water conditie. De tabel toont een goede overeenstemming met de snelheden zoals bekomen voor de AM Point Lisas. Bij deze vergelijking dient wel opgemerkt te worden dat de ballast conditie voor AM Point Lisas niet overeenstemt met een heavy ballast conditie maar gepaard gaat met nog kleinere diepgangen en grotere vertrimming.

De vergelijking van draaicirkelproeven en zigzagproeven wordt weergegeven in de tabellen 4 tot 6. Ook deze resultaten tonen een aanvaardbare overeenstemming met de gegevens van AM Point Lisas.

Tabel 3 – Vergelijking van de snelheidstabel voor het simulatiemodel bij maximale diepgangen 12.5 m en 8.8 m geëvalueerd in diep water en zoals verzameld voor het schip AM Point Lisas

Telegraph	Bulk240_385 (Simulation)			AM Point Lisas		
	rpm	T=12.5 m [kn]	Heavy Ballast [kn]	rpm	T=12.5 m [kn]	Ballast [kn]
Full ahead	76	12.41	13.07	76	12.43	12.85
Half ahead	63.7	10.35	10.94	65	10.3	11.05
Slow ahead	51.4	8.23	8.8	54	8.7	9.1
Dead slow	39.1	6.01	6.59	36	6	6.6

Tabel 4 – Vergelijking van draaicirkelproeven voor het simulatiemodel bij maximale diepgangen 12.5 m en 8.8 m geëvalueerd in diep water en zoals verzameld voor het schip AM Point Lisas

Draaicirkels	Bulk240_385 (Simulation)			AM Point Lisas		
		T=12.5m	Heavy Ballast		T=12.5m	Ballast
Tactische diameter [m]	BB	955	922	BB	970	824
	SB	974	960	SB	980	782
Advance [m]	BB	889	861	BB	820	746
	SB	899	888	SB	850	773

Tabel 5 – Vergelijking van zigzagproeven (10/10) voor het simulatiemodel bij maximale diepgangen 12.5 m en 8.8 m geëvalueerd in diep water en zoals verzameld voor het schip AM Point Lisas

10/10 Zigzag	Bulk240_385 (Simulation)			AM Point Lisas		
		T=12.5m	Heavy Ballast		T=12.5m	Ballast
1ste overshoot- hoek [deg]	BB	10.9	6.7	BB	-	4.1
	SB	11.6	5.6	SB	-	-
2de overshoot- hoek [deg]	BB	21.0	7.9	BB	-	5.8
	SB	23.5	10.6	SB	-	-

Tabel 6 – Vergelijking van zigzagproeven (20/20) voor het simulatiemodel bij maximale diepgangen 12.5 m en 8.8 m geëvalueerd in diep water en zoals verzameld voor het schip AM Point Lisas

20/20 Zigzag	Bulk240_385 (Simulation)			AM Point Lisas		
		T=12.5m	Heavy Ballast		T=12.5m	Ballast
1ste overshoot- hoek [deg]	BB	19.3	12.2	BB	-	8.8
	SB	18.6	10.1	SB	-	-
2de overshoot- hoek [deg]	BB	18.2	10.1	BB	-	8.1
	SB	20.3	12.6	SB	-	-

2.1.3 Pilot card simulatieschepen

Een samenvatting van de (manoeuvrer-)eigenschappen van de schepen gemodelleerd voor deze studie wordt onder de vorm van pilot cards toegevoegd aan Bijlage 1. De pilot cards bevatten eveneens een samenvatting van enkele standaardproeven (versnelling, draaicirkels en zigzagproeven) bij verschillende kielspelingen.

Deze documenten werden eveneens beschikbaar gesteld aan de loodsen tijdens de uitvoering van de simulatiestudie.

2.2 Oevereffectenmodellering in beperkt water

De modellering van de oevereffecten zoals toegepast in deze studie is gebaseerd op de modellering ontwikkeld in Lataire (2014). De rapportering van de oevereffectenmodellering (verder d2b-modellering²) toegepast in de studie omvat volgende onderdelen:

1. wiskundige beschrijving van de d2b-modellering (§2.2.1);
2. bepaling van modelcoëfficiënten voor studieschepen op basis van sleeptankproeven (§2.2.2);
3. toepassing d2b-modellering voor typeprofielen KGT (§2.2.3).

² d2b: distance to bank

2.2.1 d2b-modellering Lataire (2014)

De d2b-modellering uit Lataire (2014) is gebaseerd op een groot aantal sleeptankproeven (meer dan 11'000) met grote variatie aan scheepstypes, oeversecties en operationele condities. Dit heeft geleid tot een wiskundige beschrijving van de oever op basis van een zogenaamde equivalente blockage (relatieve maat voor de ruimte die een schip inneemt in de vaarwegsectie) en een equivalente oeverafstand of *distance to bank* d2b (maat voor de excentriciteit van een schip in de sectie). In de volgende onderdelen worden de verschillende concepten en definities beschreven om uiteindelijk tot de wiskundige beschrijving te komen van onderstaande oevereffecten:

- bijkomende langskracht/weerstand ten gevolge van de blockage;
- dwarskracht op het voorschip ten gevolge van excentriciteit in een vaarweg;
- dwarskracht op het achterschip ten gevolge van excentriciteit in een vaarweg;
- dynamische inzinking (squat) van het voorschip in een beperkte sectie;
- dynamische inzinking (squat) van het achterschip in een beperkte sectie.

Exponentiële invloed van het omringende water (w)

De d2b-modellering uit Lataire (2014) gaat uit van een exponentieel dalend effect van het water dat de romp omringt in functie van toenemende horizontale (y) en verticale afstand (z) tot het schip. Hierbij wordt aan elk waterpartikel om het schip een gewicht tussen 0 en 1 toegekend dat exponentieel afneemt volgens beide richtingen. Dit gewicht heeft niets te maken met de massa maar toont aan hoe belangrijk dat waterpartikel is voor het schip. Heel diep en/of veraf van het schip is die waarde (bijna) 0, vlakbij is die bijvoorbeeld 0.7. Deze kan niet 1 worden omdat de partikels met die waarde zich in het schip bevinden.

De wiskundige vergelijking van dit gewicht, w , van een waterpartikel rond het schip is:

$$w = e^{-\left(\xi_y \frac{|y|}{y_{infl}} + \xi_z \frac{|z|}{T_M}\right)} \quad (1)$$

Hierbij zijn ξ_y en ξ_z scheepsafhankelijke coëfficiënten die verschillend gedefinieerd worden voor de te modelleren parameter (vb. langsafstand en inzinking). De noemers van de exponenten (y_{infl} en T_M) zijn referentieafstanden voor respectievelijk de horizontale en verticale dimensie waarbij T_M overeenstemt met de scheepsdiepgang midscheeps.

De horizontale referentieafstand (y_{infl}) wordt gedefinieerd als een invloedsbreedte waarbinnen het water een impact heeft op het schip. Deze invloedsbreedte is snelheidsafhankelijk en wordt bepaald door onderstaande formule die het resultaat is van systematische sleeptankproeven:

$$y_{infl} = B(5Fr_h + 5) \quad (2)$$

In deze formule zijn:

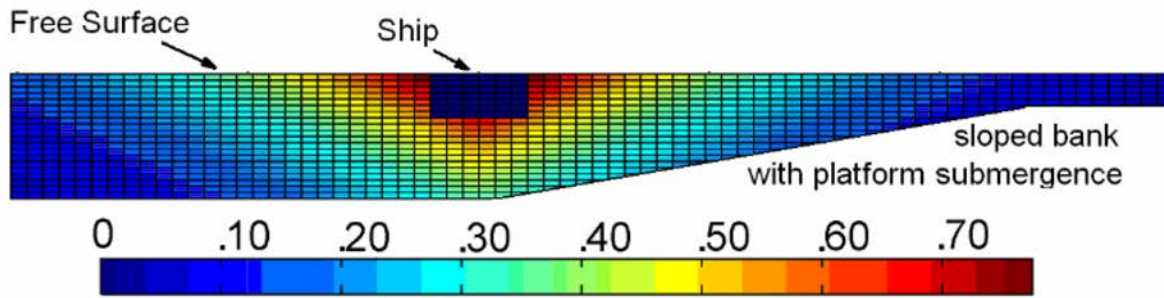
- B scheepsbreedte (m)
- Fr_h diepte Froudegetal (-) berekend als:

$$Fr_h(V) = \frac{V}{\sqrt{gh_{ship}}} \quad (3)$$

In deze formule zijn:

- V scheepssnelheid (m/s)
- g gravitaire constante of valversnelling (9.81 m/s²)
- h_{ship} gemiddelde waterdiepte onder het schip

Het exponentiële gewicht van het omringende water in een vaarwegsectie wordt conceptueel gevisualiseerd in Figuur 3.



Figuur 3 – Visuele weergave van het gewicht van het omringende water in de d2b-modellering (Evert Lataire & Vantorre, 2008)

Gewogen oppervlaktes (χ)

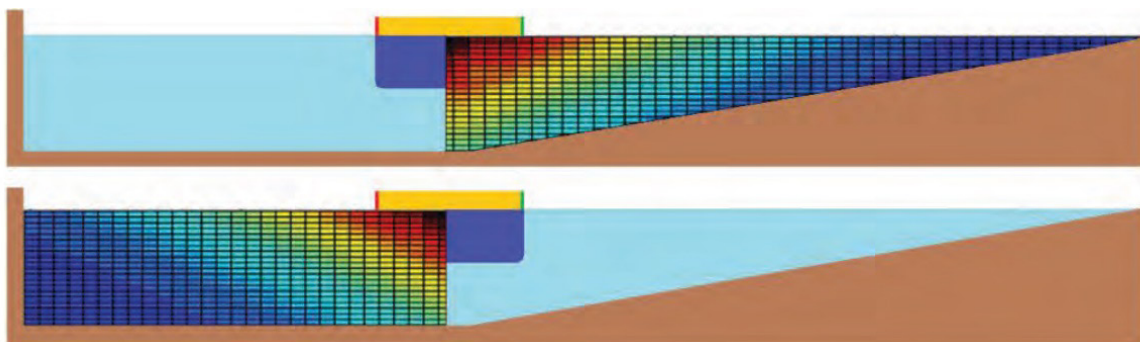
Op basis van het “gewicht” van het omringende water (1) kunnen gewogen oppervlaktes (χ) bekomen worden door (1) te integreren over een bepaalde dwarssectie:

$$\chi = \iint w dA \quad (4)$$

Deze evaluatie kan uitgevoerd worden op verschillende secties om onderstaande gewogen oppervlaktes te bekomen:

- χ_{ship} : de gewogen oppervlakte (4) over de scheepssectie horizontaal begrensd door $-B/2$ en $+B/2$ en horizontaal begrensd door T_M ;
- χ_{ocean} : de gewogen oppervlakte (4) voor een oneindig brede en diepe sectie;
- χ_P : de gewogen oppervlakte (4) voor de vaarwegsectie aan bakboord van het midden van het schip;
- χ_S : de gewogen oppervlakte (4) voor de vaarwegsectie aan stuurboord van het midden van het schip.

Figuur 4 toont een visualisatie van de gewogen oppervlaktes voor de stuurboord sectie en de bakboord sectie.



Figuur 4 – Visuele weergave van het gewogen oppervlakte voor de stuurboord sectie (χ_S , boven) en voor de bakboord sectie (χ_P , onder)

Equivalente blockage (m_{eq})

De basis voor de berekening van de oeverlangskracht en van de squat van het schip betreft de equivalente blockage die berekend wordt als:

$$m_{eq} = \frac{\chi_{ship}}{\chi_P + \chi_S} - \frac{\chi_{ship}}{\chi_{ocean}} \quad (5)$$

Er dient benadrukt te worden dat de equivalente blockage (m_{eq}) verschilt van de geometrische blockage (m) zoals berekend als de verhouding van de scheepssectie en de vaarwegsectie (Ω):

$$m = \frac{BT_M}{\Omega} \quad (6)$$

De equivalente blockage (5) heeft wel gemeen met de geometrische blockage is dat deze een waarde 0 bereikt indien de vaarwegsectie oneindig breed en diep is ($\chi_P + \chi_S = \chi_{ocean}$). Anderzijds zal de equivalente blockage toenemen indien het schip excentrisch vaart hetgeen niet het geval is bij de geometrische blockage.

Equivalente oeverafstand ($d2b$) en equivalente excentriciteit ($d2b^{-1}$)

De excentriciteit van het schip in de vaarweg wordt bepaald door het inverse van de equivalente oeverafstand ($d2b$) die bepaald wordt door:

$$d2b = \frac{2}{\chi_{ship}} \left(\frac{\chi_P \chi_S}{\chi_P - \chi_S} \right) \quad (7)$$

Op basis van de noemer krijgt $d2b$ een positief teken voor een oever aan stuurboord en een negatief teken voor een oever aan bakboord. Indien het schip zich centraal in de sectie bevindt dan gaat de equivalente oeverafstand naar oneindig. De inverse van $d2b$ ($\frac{1}{d2b}$), die een maat is voor de excentriciteit, wordt dan nul.

Equivalente scheepssnelheid

Behalve een beschrijving van de relatieve positie van een scheepssectie in een vaarwegsectie op basis van de equivalente blockage en de equivalente excentriciteit wordt er ook een equivalente scheepssnelheid gedefinieerd die behalve met de effectieve scheepssnelheid door het water ook rekening houdt met de versnelling van het water langs de romp door schroefwerking.

De effectieve scheepssnelheid wordt berekend als:

$$V_{eq} = V + \xi_{VT} V_T \quad (8)$$

en

$$V_T = \text{sign}(T_P) \sqrt{\frac{8|T_P|}{\rho \pi D^2}} \quad (9)$$

In deze formules zijn:

- ξ_{VT} scheepsafhankelijke coëfficiënt (-) die bepaald wordt per te modelleren variabele
- V_T Bijkomende snelheid (m/s) ten gevolge van schroefwerking
- T_P Stuwkracht gegenereerd door de schroef (N)
- $\text{sign}(T_P)$ teken van T_P (-)
- D Diameter van de schroef (m)
- ρ dichtheid van water (kg/m^3)

Blockage afhankelijke Froude getal ($Fr_{crit,lim}$)

Het diepte Froude-getal werd eerder gedefinieerd in (3) en definieert de verhouding van de scheepssnelheid tot de kritische snelheid in ondiep en horizontaal onbeperkt water.

Om de kritische vaarsnelheid te bepalen in een beperkte sectie wordt een bijkomend Froude getal (Delefortrie *et al.*, 2024) berekend op basis van de geometrische blockage³ (m_{lim}):

$$Fr_{crit,lim} = \left(2 \sin \left(\frac{\text{Arcsin}(1-m_{lim})}{3} \right) \right)^{\frac{3}{2}} \quad (10)$$

Tuck parameter (Tu_m)

De krachten op een romp verhouden zich in diep water tot het kwadraat van de vaarsnelheid. In ondiep water dient hiervoor rekening gehouden te worden met de bijkomende effecten door waterdiepte en blockage zoals beschreven door het diepte Froude getal en het blockage afhankelijke Froude getal. Bijkomend dient er echter ook rekening gehouden te worden met de inzinking van het schip waardoor de beschikbare vaarwegsectie nog meer beperkt wordt.

De Tuck parameter houdt rekening met dit bijkomende effect en wordt als volgt berekend op basis van de eerder genoemde Froude getallen:

$$Tu_m(V) = \frac{\left(\frac{Fr_h}{Fr_{crit,lim}} \right)^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{Fr_h}{Fr_{crit,lim}} \right)^2}} \quad (11)$$

Froude getal (Fr_r)

In diep water, waarbij de waterdiepte geen beperking vormt, wordt er een traditioneel Froude getal gedefinieerd op basis van de scheeps lengte volgens:

$$Fr_r(V) = \frac{V}{\sqrt{gL_{PP}}} \quad (12)$$

In deze formule is:

- L_{PP} scheeps lengte tussen de loodlijnen (m)

De langskracht

De bijkomende langskracht die een schip ervaart onder invloed van een horizontale beperking van de vaarweg wordt berekend als:

$$X = \xi_\rho \Delta m_{eq}^2 Tu_m(V_{eq}) \quad (13)$$

In deze formules zijn:

- X langskracht ten gevolge van oever (N)
- ξ_ρ scheepsafhankelijke coëfficiënt (-)
- Δ displacement van het schip (N)

De inzinking

De inzinking aan het voor- en achterschip wordt berekend op basis van onderstaande formules:

$$z_{ap} = \left(\frac{T^2}{h} \right) Fr(V_{eqz_{ap}})^2 \left(m_{z_{ap}} \left(\xi_{z_{ap1}} Fr(V_{eqz_{ap}})^2 + \xi_{z_{ap2}} \right) + \xi_{z_{ap3}} Fr(V_{eqz_{ap}})^2 + \xi_{z_{ap4}} \right) \quad (14)$$

³ In dit geval wordt de oppervlakte van de vaarwegsectie wel beperkt door de invloedsbreedte zoals gedefinieerd in (2).

$$z_{fp} = \left(\frac{T^2}{h}\right) Fr(V_{eqz_{fp}})^2 \left(m_{z_{fp}} \left(\xi_{z_{fp1}} Fr(V_{eqz_{fp}})^2 + \xi_{z_{fp2}}\right) + \xi_{z_{fp3}} Fr(V_{eqz_{fp}})^2 + \xi_{z_{fp4}}\right) \quad (15)$$

In deze formules zijn:

- z_{ap} totale squat van het schip ter hoogte van het achterschip (m)
- z_{fp} totale squat van het schip ter hoogte van het achterschip (m)
- $V_{eqz_{ap}}$ equivalente snelheid volgens (8) op basis van de scheepsafhankelijke coëfficiënt $\xi_{VT_{ap}}$ voor z_{ap} (m/s)
- $m_{z_{ap}}$ blockage (-) volgens (6) ter hoogte van de achterste loodlijn met vaarwegbreedte beperkt tot invloedsbreedte volgens (2)
- $m_{z_{fp}}$ blockage (-) volgens (6) ter hoogte van de voorste loodlijn met vaarwegbreedte beperkt tot invloedsbreedte volgens (2)
- $\xi_{z_{xx}}$ scheepsafhankelijke coëfficiënt (-)

De dwarskracht voor (Y_F)

De berekening van de dwarskracht Y_F is afhankelijk van de breedte van de grenslaag $\delta_{BLL,F}$ tussen de romp van het schip en de bodem van de vaarweg. In eerste instantie wordt een model voor de dikte van deze grenslaag bepaald:

$$\delta_{BLL,F} = \left(\frac{L_{PP}}{\sqrt[7]{Re_F}}\right) \left(\frac{T_F}{h_{ship}}\right) \left(\frac{V_T+2u}{u}\right) \xi_{BLL,F} \quad (16)$$

In deze formules zijn:

- $\delta_{BLL,F}$ dikte van de grenslaag rond het schip ter hoogte van het voorschip (m)
- u langssnelheid van het schip (m/s)
- T_F de diepgang voor van het schip (m)
- V_T bijkomende snelheid door het gebruik van de schroef zoals berekend in (9) (m/s)
- Re_F Reynoldsgetal als maat voor turbulentie ter hoogte van het voorschip volgens

$$Re_F = \max\left(\frac{u \cdot L_{PP}}{\nu}, 2300\right) \quad (17)$$

In deze formules is:

- ν kinematische viscositeit van water (0.00122 Pa s)

De impact van de grenslaag op de dwarskrachten en de bijhorende afhankelijkheid van het Reynoldsgetal maken dat de resultaten gemeten op modelschaal niet op de traditionele manier opgeschaald kunnen worden. Bij het uitvoeren van schaalmodelproeven wordt er aangenomen dat de dominante effecten bepaald worden door de generatie van zwaartekrachtgolven en worden de proefparameters geschaald op basis van het diepte Froudegetal (3). Deze keuze impliceert dat de turbulentie in een sleeptank onderschat wordt en de grenslagen (laminaire stroming) op modelschaal overschat worden. De turbulentie wordt immers geschaald volgens de bovenvermelde Reynoldswet.

De afhankelijkheid van het Reynoldsgetal maakt dat op modelschaal (tijdens sleeptankproeven) de grenslagen tussen schip en bodem sneller zullen interageren dan op ware grootte (in realiteit). Voor sleeptankproeven die uitgevoerd werden bij de laagste kielspeling (10%) wil dit zeggen dat de resultaten uit sleeptankproeven niet representatief zijn voor de werkelijke conditie.

Afhankelijk van de dikte van de grenslaag en de netto kielspeling ter hoogte van de boeg wordt een verschillende formule gehanteerd voor de berekening van de dwarskracht:

$$Y_F = \begin{cases} \xi_{\rho_f} \Delta d 2b^{-1} T u_m (V_{eq}) \left(1 - F_r^2 \frac{\frac{T_F^2}{(h-T_F)^2 \xi h T^2} + \left| \frac{T_F^2}{(h-T_F)^2 \xi h T^2} \right|}{2 \xi h^2} \right) & h_{ship} - C_M T_F - z_f \geq \delta_{BLLF} \\ \left(\frac{h_{ship} - C_M T_F - z_a}{\delta_{BLLF}} \right) \xi_{\rho_f} \Delta d 2b^{-1} T u_m (V_{eq}) \left(1 - F_r^2 \frac{\frac{T_F^2}{(h-T_F)^2 \xi h T^2} + \left| \frac{T_F^2}{(h-T_F)^2 \xi h T^2} \right|}{2 \xi h^2} \right) & h_{ship} - C_M T_F - z_f < \delta_{BLLF} \end{cases} \quad (18)$$

In deze formules zijn:

- z_f de inzinking aan het voorschip op basis van (15) (m)
- C_M midscheeps sectie coëfficiënt van het schip (-)

De dwarskracht achter (Y_A)

Voor de dwarskracht achteraan geldt een gelijkaardige formulering als voor de dwarskracht voor, waarbij in eerste instantie de dikte van de grenslaag berekend wordt.

$$\delta_{BLLA} = \left(\frac{L_{PP}}{\sqrt[7]{Re_A}} \right) \left(\frac{T_A}{h_{ship}} \right) \left(\frac{V_{T+2u}}{u} \right) \xi_{BLLA} \quad (19)$$

In deze formules is:

- Re_A Reynolds getal als maat voor turbulentie ter hoogte van het achterschip volgens

$$Re_A = \max \left(\frac{u L_{PP}}{\nu}, 2300 \right) \quad (20)$$

Vervolgens wordt de dwarskracht achter berekend als:

$$Y_A = \begin{cases} \xi_{\rho_a} \Delta d 2b^{-1} T u_m (V_{eq}) & h_{ship} - C_M T_A - z_a \geq \delta_{BLLA} \\ \left(\frac{h_{ship} - C_M T_A - z_a}{\delta_{BLLA}} \right) \xi_{\rho_a} \Delta d 2b^{-1} T u_m (V_{eq}) & h_{ship} - C_M T_A - z_a < \delta_{BLLA} \end{cases} \quad (21)$$

Dwarskracht en giermoment

Op basis van de bovenvermelde dwarskrachten ter hoogte van voor en achterschip kunnen door onderstaande formules respectievelijk de dwarskracht en het giermoment ten opzichte van het scheepsmidden berekend worden als:

$$Y_{Bank} = Y_F + Y_A \quad (22)$$

$$N_{Bank} = \frac{L_{PP}}{2} Y_F - \frac{L_{PP}}{2} Y_A \quad (23)$$

Coëfficiënten

In Tabel 7 wordt er een overzicht gegeven van de coëfficiënten die nodig zijn voor de modellering van de verschillende parameters:

Tabel 7 – Overzicht van het aantal coëfficiënten uit Lataire (2014) voor de berekening van de verschillende oevereffecten

Coëfficiënt	X	Y _F	Y _A	z _F	z _A
$\xi_{y_{\square}}$	1	1	1	1	1
$\xi_{z_{\square}}$	1	1	1	1	1
$\xi_{\rho_{\square}}$	1	1	1		
ξ_{VT}	1	1	1	1	1
$\xi_{hT_{\square}}$		1			
$\xi_{h_{\square}}$		1			
ξ_{BLI}		1	1		
ξ_{zxp}				4	4

2.2.2 Bepaling oevercoëfficiënten op basis van sleeptankproeven

Binnen dit project dienden oevercoëfficiënten bepaald te worden voor het studieschip bij twee ladingscondities. Als basis voor deze modellering werd gebruik gemaakt van sleeptankproeven die in het verleden uitgevoerd werden op volle scheepstypes (zoals bulk carriers en tankers).

De coëfficiënten werden in eerste instantie bepaald op basis van sleeptankproeven uitgevoerd met de tanker KVLCC2. Dit schip betreft een zogenaamd benchmark schip waarvoor het rompontwerp publiek beschikbaar (MOERI, 2008) is en dat door verschillende internationale onderzoeksinstituten toegepast wordt (Stern & Agdrup, 2008). Het Waterbouwkundig Laboratorium beschikt over een schaalmodel van dit schip (TOZ) dat beproefd werd bij een grote verscheidenheid aan oeversecties.

In Tabel 8 worden de afmetingen van het schaalmodel weergegeven. Bovendien worden de afmetingen van het schaalmodel opgeschaald naar een scheepsbreedte gelijk aan 38.5 m zoals het onderwerp vormt van voorliggende studie. Bij deze opschaling valt op dat de afmetingen van het schip KVLCC2 enigszins verschillen van de afmetingen van het studieschip van deze studie. Zo blijkt dat de lengte-breedte verhouding van het schaalmodel kleiner is dan voor het studieschip (getuige de lengte 216 m na opschaling) en dat de diepgang-breedte verhouding van het schaalmodel groter is dan de maximale diepgang op het Kanaal Gent-Terneuzen (getuige de diepgang 13.8 m na opschaling).

Tabel 8 – Afmetingen schaalmodel TOZ overeenkomstig het benchmarkschip KVLCC2 en opgeschaalde afmetingen voor breedte 38.5 m

Parameter	Eenheid	Model schaal (TOZ)	Schaal 1/49.8
L _{OA}	m	4.333	215.8
L _{PP}	m	4.267	212.5
B	m	0.773	38.5
T	m	0.277	13.8
C _B	-	0.81	0.81
C _M	-	0.998	0.998

Hoewel de afmetingen van het schaalmodel en het studieschip verschillen wordt de romp van de KVLCC2 representatief beschouwd voor de modellering van oevereffecten. De belangrijkste reden hiervoor is de ruime hoeveelheid aan oevercondities die voor dit schip beproefd werden in de sleeptank en dus de ruime beschikbare sleeptankgegevens.

In de zomer van 2022 werden er in de sleeptank van het Waterbouwkundig Laboratorium oeverproeven uitgevoerd met het schaalmodel T01 overeenkomstig een capesize bulk carrier (292 m x 45 m) voor de ladingscondities 12.5 m en heavy ballast zoals weergegeven in Tabel 1. Voor de uitvoering van deze proeven werd een bijkomende verticale oever ingebouwd in de sleeptank die toeliet om het schip te beproeven op korte afstand van de oever. De proeven werden allen uitgevoerd in een rechthoekig profiel met breedte 5.5 m. De proeven uitgevoerd met het schaalmodel T01 werden toegepast om het oevermodel afgeleid op basis van proeven met schaalmodel T0Z/KVLCC2 te valideren.

Sleeptankproeven KVLCC2/T0Z

Het schaalmodel T0Z werd beproefd bij een groot aantal verschillende oeverconfiguraties waarbij volgende variaties in acht genomen werden:

- kielspeling variërend tussen 10% en 50% van de diepgang;
- blockages variërend tussen 0.07 en 0.91
- oevers met verticale wanden en gehelde oevers (helling tussen 1/1 en 1/4)

Binnen deze oeverconfiguraties werd het schip beproefd aan verschillende snelheden en bij verschillende dwarsafstanden. Het totaal aantal beschikbare unieke oeverproeven uitgevoerd met het schip KVLCC2 bedraagt 724.

Op basis van een selectie aan modelproeven is een set coëfficiënten afgeleid die in dit rapport “KVLCC2 subset” wordt genoemd. De volgende filtering werd toegepast op de beschikbare modelproeven om een geschikte selectie/subset te bekomen:

- proeven waarvoor het schip zich buiten de grenslaag⁴ bevond (zie (18) en (21));
- proeven met blockage (6) lager dan 0.25;
- proeven met snelheid lager dan $F r_h < 0.85$.

In de volgende paragrafen worden de resultaten van de modellering vergeleken met de resultaten van relevante sleeptankproeven. Hierbij worden sleeptankproeven weergegeven voor verschillende dwarsafstanden in de sleeptank en voor één oeverprofiel en één vaarsnelheid. Het oeverprofiel wordt geïdentificeerd op basis van de overeenkomstige blockage (6) en kielspeling. De weergegeven vaarsnelheden betreffen de snelheden bij schaalfactor 49.8 (de schaal die het beste overeenkomt met het studieschip) . Om reden van confidentialiteit worden de resultaten gepresenteerd ten opzichte van non-dimensionale assen.

De excentriciteit van het schip in de tank wordt op de horizontale as weergegeven op basis van een non-dimensionale excentriciteit berekend als:

$$\frac{2y}{W-B} \quad (24)$$

In deze formules zijn:

- y de dwarspositie van het scheepsmidden ten opzichte van het midden van de waterlijn van de vaarwegsectie (m)
- W de breedte van de oeversectie op de waterlijn (m)

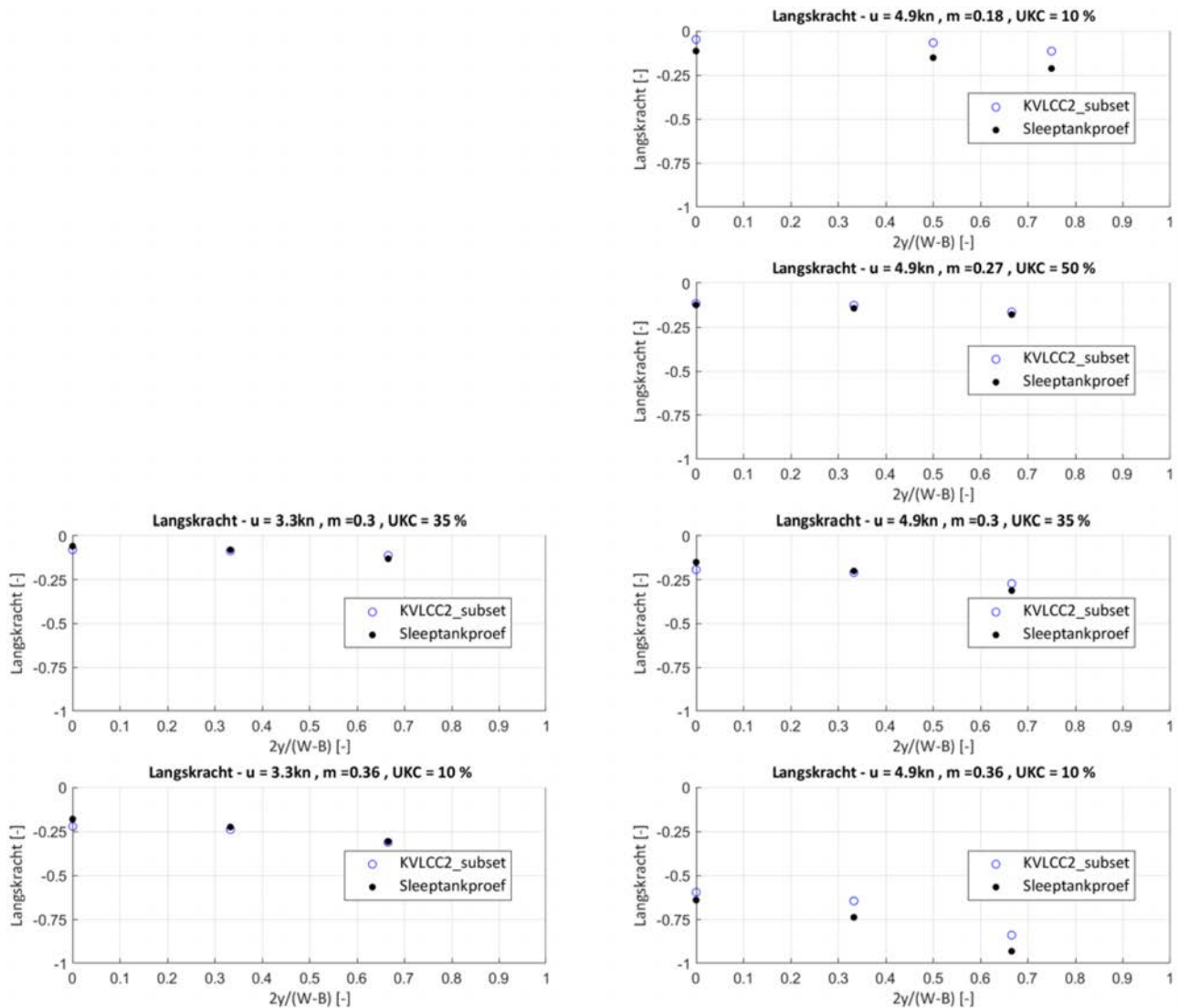
⁴ Dit impliceert de uitsluiting van alle sleeptankproeven uitgevoerd bij UKC 10%.

T0Z in smalle secties

In de volgende paragrafen worden de resultaten gepresenteerd voor sleeptankcondities in beperkte secties die gelijkaardig zijn met de vaarwegbreedtes op kanaalsecties. Deze sleeptankproeven werden allen uitgevoerd met verticale oevers. Voor de kleinste kielspeling (10%) worden resultaten voor twee verschillende kanaalbreedtes weergegeven.

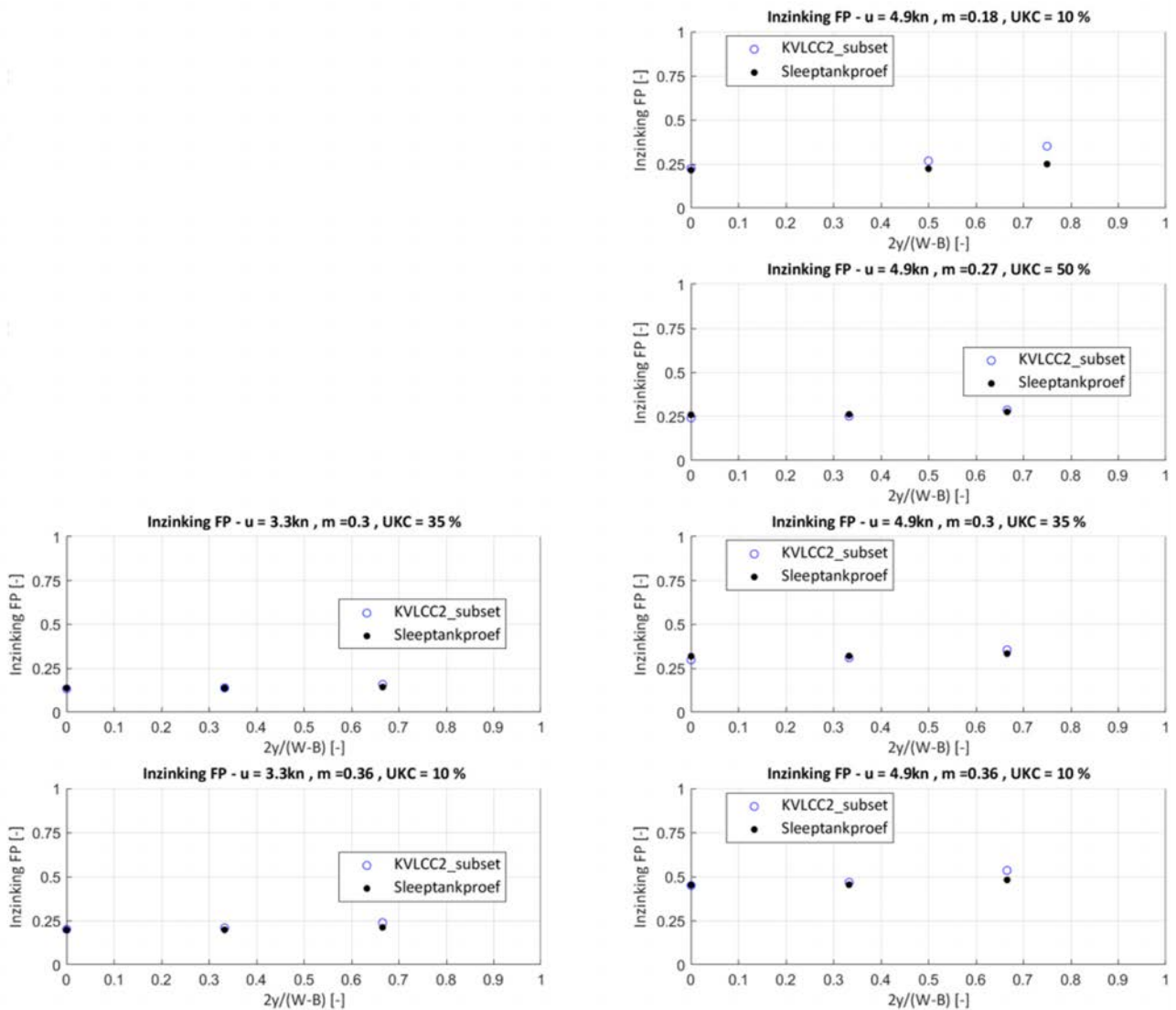
In eerste instantie wordt de bijkomende langskracht ten gevolge van oevereffecten zoals opgemeten in de sleeptank vergeleken met de modellering (zie Figuur 5) voor een aantal relatief nauwe secties waarvoor de vaarsnelheden en blockages overeen stemmen met de smallere secties op het kanaal. Bij de presentatie van deze resultaten dient opgemerkt te worden dat door de aanwezigheid van gehelde oevers op het kanaal de meest excentrische posities opgemeten bij verticale oevers niet relevant zijn voor het kanaal.

Desalnietemin blijkt het model de langskracht op het schaalmodel in alle condities goed weer te geven. De meest relevante condities betreffen metingen bij de hoogste blockage (0.36) en een beperkte excentriciteit. Voor deze condities blijkt het model een erg beperkte onderschatting te vertonen. Toch tonen de realtime simulaties een belangrijke vertraging van het schip in de smalste kanaalsecties. De totale weerstand die het schip ervoer tijdens de vaarsimulaties werd door de loodsen groter geacht dan wat optreedt bij de huidige 37.0 m schepen. Er kon niet beoordeeld worden of deze overschatting van de weerstand een overschatting van de weerstand is in het open water model (zie Tabel 3) of ten gevolge van de oeverlangskracht.



Figuur 5 – Vergelijking sleptankproeven en modellering voor langskracht voor TOZ bij hoge blockages

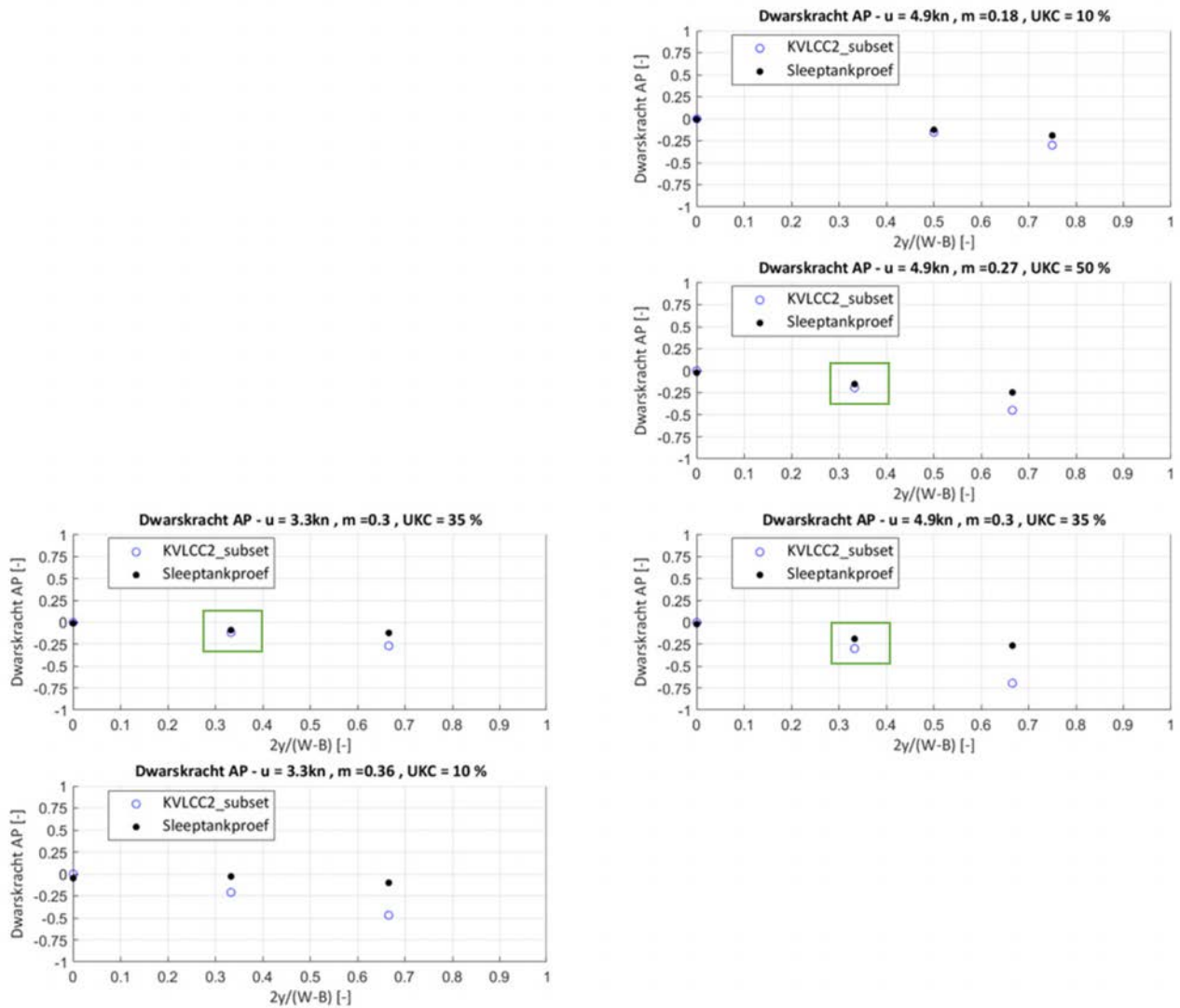
De maximale inzinking voor volle scheepsvormen treedt steeds op ter hoogte van de boeg, hetgeen zeer gebruikelijk is voor volle schepen. Bijgevolg worden in dit rapport enkel de inzinkingen ter hoogte van de boeg gerapporteerd. Figuur 6 toont aan dat het squatmodel goed overeenstemt met de gemeten waarden. Opnieuw geldt dat de sleptankproeven bij blockage 0.36 het meest relevant zijn voor de inzinking en in het bijzonder de kleine excentriciteiten. Voor deze condities vertoont het model een beperkte overschatting van de sleptankresultaten.



Figuur 6 – Vergelijking sleptankproeven en modellering voor inzinking aan boeg voor TOZ bij hoge blockages

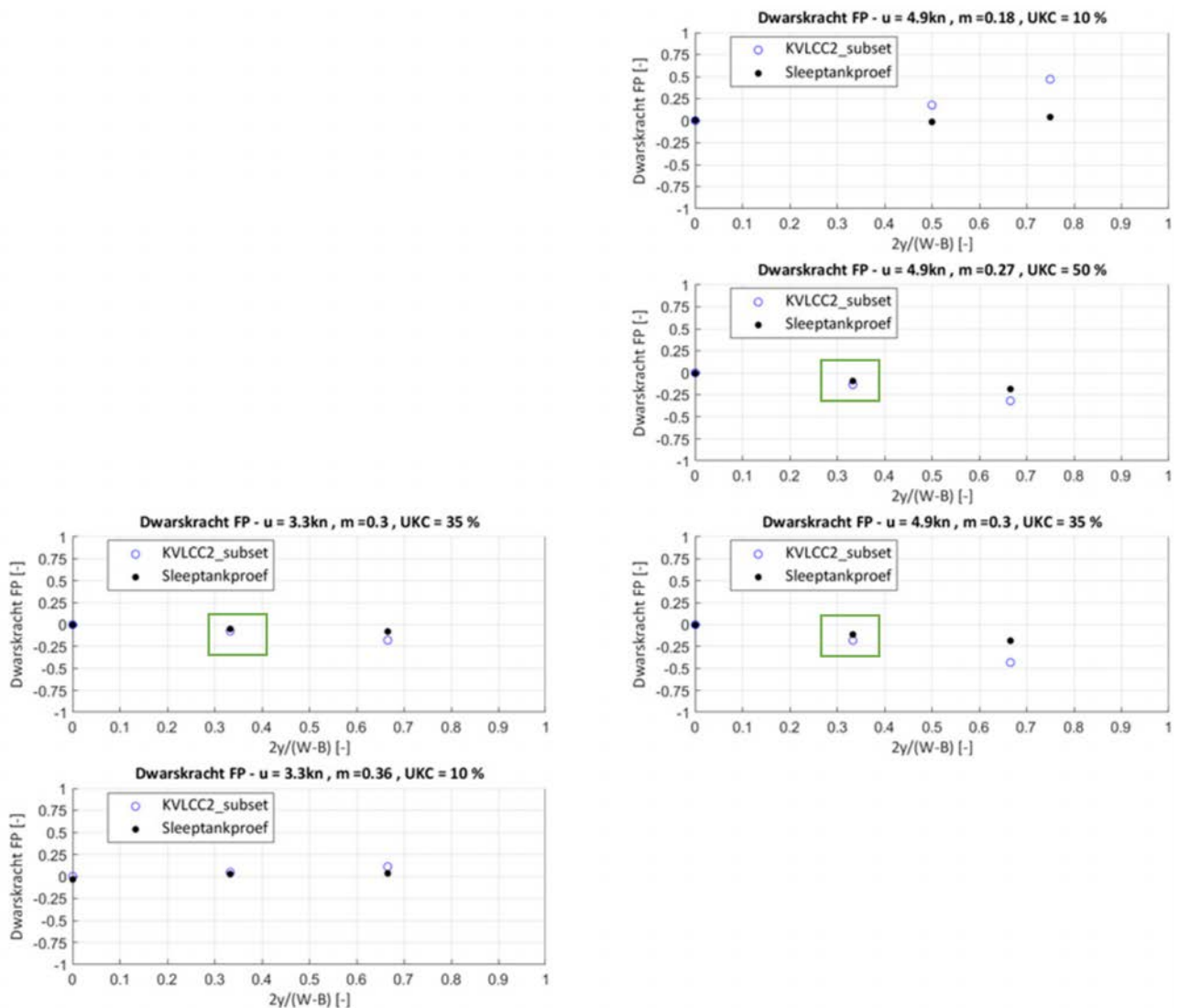
De dwarskracht ter hoogte van het achterschip wordt weergegeven in Figuur 7. Deze resultaten illustreren dat de oevereffecten steeds aanleiding geven tot een aantrekkings van het achterschip door de oever.

Hoewel eerder aangetoond werd dat een vergelijking van de dwarskrachten bemoeilijkt wordt door de opschalingsbeperkingen bij de laagste kielspelingen (zie §2.2.1 en (18)) worden de resultaten hier toch weergegeven voor de sleptankproeven die overeenkomen met de kanaalcondities. Er dient opgemerkt te worden dat de grootse excentriciteit in deze proeven niet optreedt op het Kanaal Gent-Terneuzen en dat enkel de eerste excentriciteit een relevant datapunt betreft. Voor dit datapunt blijkt de aantrekkings van het achterschip overschat te worden door het model. De overschatting is relatief beperkt voor de blockages 0.18 en 0.27 en voor de laagste vaarsnelheid (3.3 kn) bij blockage 0.3. Voor grotere blockages en hogere snelheden blijkt het model de dwarskracht in belangrijke mate te overschatten. Hierbij dient opnieuw opgemerkt te worden dat door de verschillende impact van grenslagen op ware grootte en op modelschaal de verwachting ook is dat de dwarskrachten in werkelijkheid groter zullen zijn dan wat opgemeten wordt in de sleptank. Er wordt bijgevolg aangenomen dat het oevermodel de dwarskracht achteraan realistisch weergeeft voor ware grootte.



Figuur 7 – Vergelijking sleeptankproeven en modellering voor de dwarskracht aan het achterschip voor TOZ bij hoge blockages

Figuur 8 biedt de resultaten voor de dwarskracht ter hoogte van de boeg. Voor deze dwarskracht treedt er een omslag op tussen aanzuiging en afstoting tussen de kielspelingen 35% en 10%. Het model blijkt deze omslag goed te reproduceren. Voor de relevante excentriciteit blijken de resultaten over het algemeen goed overeen te komen met de beschikbare sleeptankresultaten. Men kan stellen dat het model de dwarskracht in beperkte mate overschat. In één geval echter blijkt een erg grote overschatting berekend te worden. Het gaat om de hoogste vaarsnelheid (4.9 kn) bij de laagste kielspeling (10%) waarbij de afstoting van de boeg veel groter voorspeld wordt door het model dan opgemeten in de sleeptank. Deze conditie wordt in de volgende paragrafen verder onderzocht. Op basis van de huidige resultaten kan gesteld worden dat de voorspelling van de afstoting van de boeg bij de kleinste kielspelingen en relatief grote vaarsnelheden een aandachtspunt vormt voor het model.



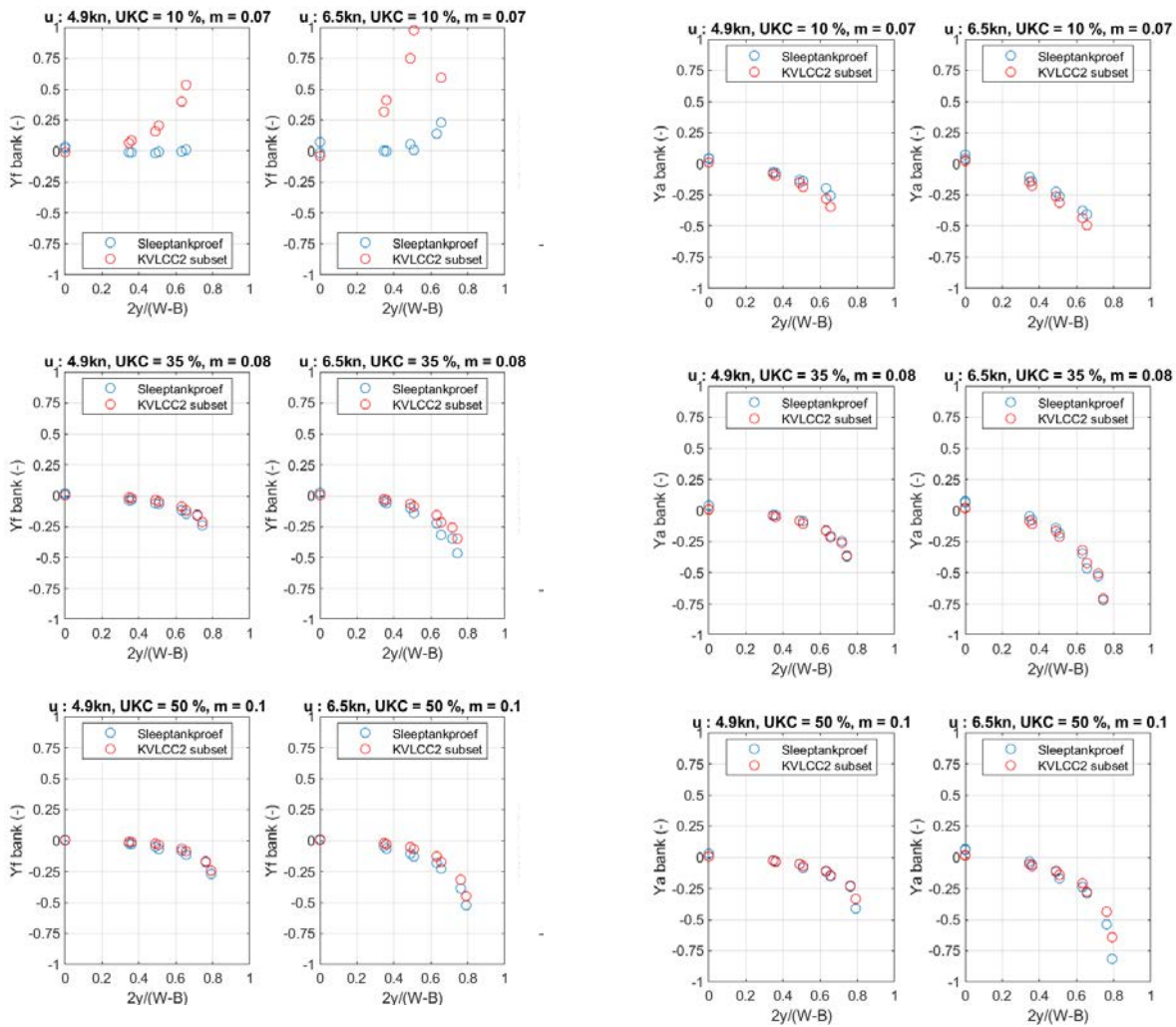
Figuur 8 – Vergelijking sleeptankproeven en modellering voor de dwarskracht aan de boeg voor TOZ bij hoge blockages

TOZ in bredere secties met taluds

In vorige secties werden de resultaten van het model geëvalueerd in smalle kanaalsecties. Deze condities zijn zeker maatgevend voor de langskracht en voor de inzinking. Voor de dwarskrachten echter zijn vaak de meer asymmetrische secties het belangrijkste. Deze gaan gepaard met kleinere blockages waarbij het schip een grote relatieve excentriciteit heeft (dus relatief dicht bij één van de oevers vaart).

Uit de beschikbare sleeptankgegevens voor KVLCC2 worden in Figuur 9 de proefresultaten getoond voor de proeven uitgevoerd in brede tanksecties waarbij de dichtste oever een helling gelijk aan 1/3 of 1/4 had (overeenkomstige de hellingen van de oevers op KGT).

De resultaten bevestigen de conclusies uit de vorige paragraaf, waarbij de simulatieresultaten de sleeptankgegevens goed benaderen voor de grotere kielspelingen en waarbij de dwarskracht achteraan ook opvallend goed overeenkomt voor de kielspeling 10%. Net als voor de blockage 0.18 weergegeven in Figuur 8 blijkt ook voor de ruimere secties in Figuur 9 de afstoting van de boeg belangrijk grotere waarden te bekomen voor het simulatiemodel dan opgemeten in de sleeptank bij relatief grote vaarsnelheden.



Figuur 9 – Vergelijking sleeptankproeven en modellering voor de dwarskracht aan de boeg en achterschip voor TO2 bij kleine blockages en oeverhelling 1/3 of 1/4

T01 in bredere secties met verticale oevers

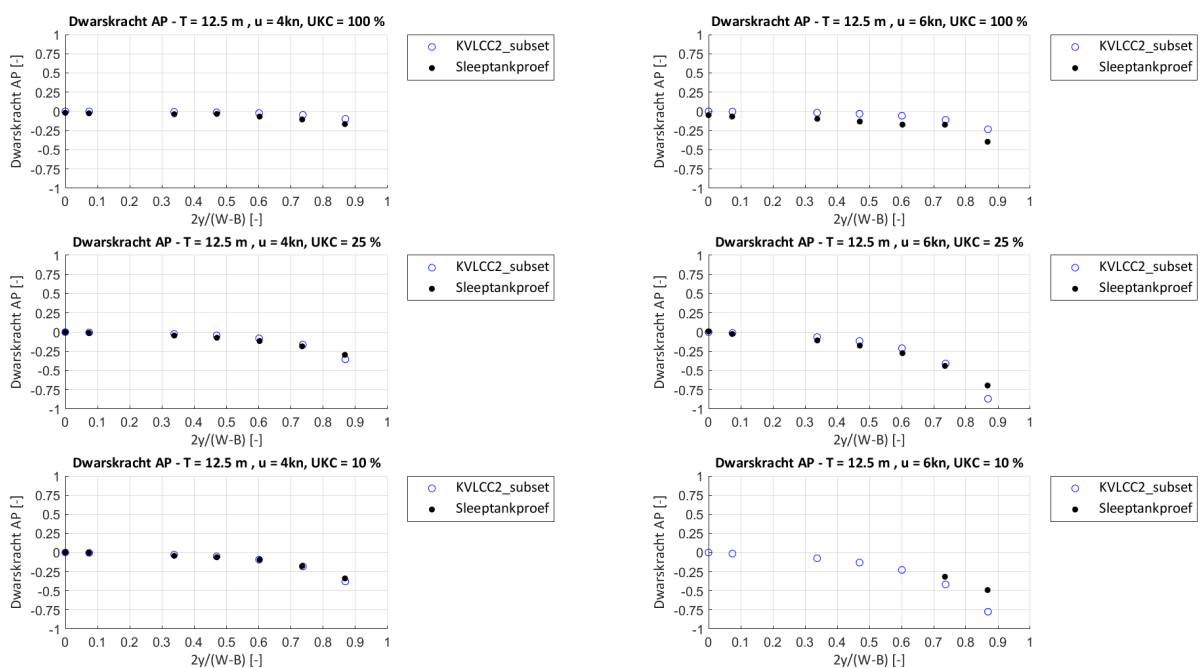
In een vorige simulatiestudie (Verwilligen *et al.*, 2021) waarbij de oevereffecten voor een bulk carrier op het Kanaal Gent-Terneuzen gesimuleerd werden op basis van de d2b-modellering uit Lataire (2014) werd opgemerkt dat de aantrekking van de oever op een cape size bulk carrier in ballast (292 mx 45 m x 8 m) erg belangrijk was. Om het model in deze condities te kunnen valideren werden hierom in 2022 bijkomende oeverproeven uitgevoerd met het schaalmodel T01 in de twee maatgevende ladingscondities voor het Kanaal Gent-Terneuzen.

De gegevens voor het schip T01 worden weergegeven voor de schaalfactor 70 en stemmen bijgevolg overeen met de resultaten van de cape size bulk carrier en niet met het studieschip (240 m x 38.5 m) in dit project. Dit wordt gemotiveerd doordat de schaalfactor 70 overeenstemt met de diepgang 12.5 m die maatgevend is voor het kanaal (er zijn met de cape size bulk carrier geen oeverproeven uitgevoerd met diepgangen groter dan 12.5 m die een evaluatie van het studieschip bij diepgang 12.5 m zouden toelaten). Er dient bij de interpretatie van deze resultaten rekening gehouden worden dat ook de gepresenteerde vaarsnelheden gelden voor de cape size bulk carrier. De overeenkomstige vaarsnelheden voor het studieschip (240 m x 38.5 m) kunnen berekend worden door de gepresenteerde snelheden te vermenigvuldigen met de factor 0.925.

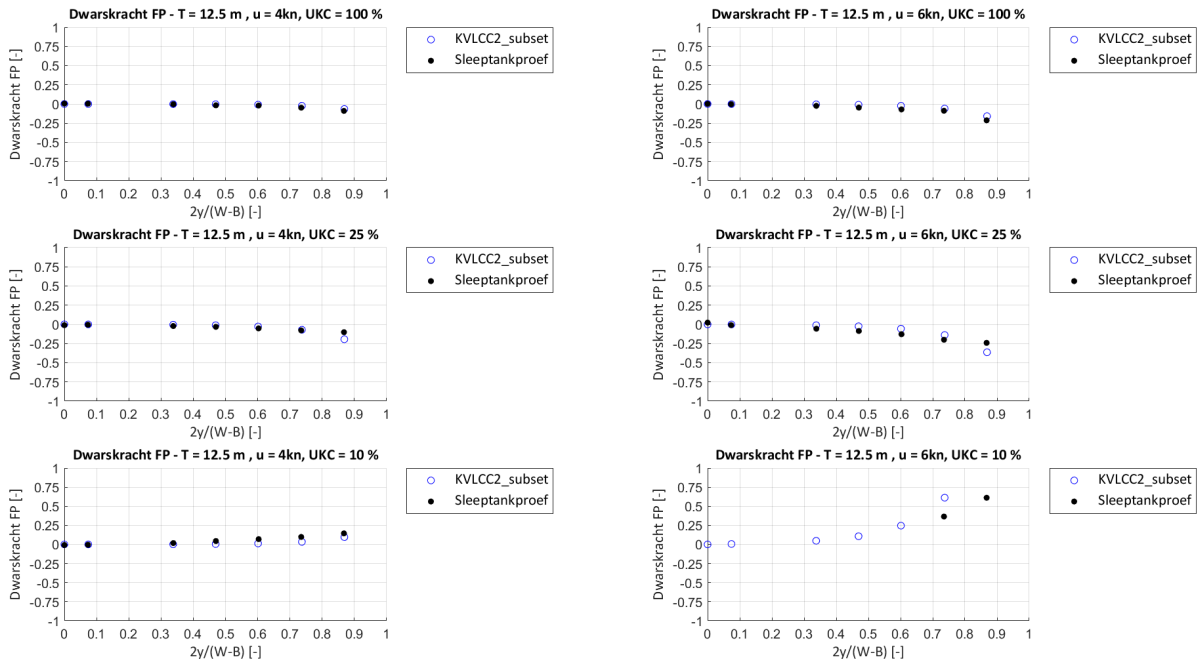
In Figures 10 en 11 worden de resultaten weergegeven voor de diepgang 12.5 m voor respectievelijk de dwarskracht op het achterschip en het voorschip. Voor de condities relevant voor KGT (kielspelingen 25% en 10%) blijkt het model de dwarskracht achteraan goed weer te geven en bij extreme excentriciteiten wat te overschatten.

Voor de dwarskracht vooraan vertoont het simulatiemodel een gelijkaardige overeenstemming met sleeptankproeven als voor de dwarskracht achteraan. De eerder opgemerkte overschatting van de oeverafstoting bij de kleinste kielspeling (10%) en grote vaarsnelheden (6 kn) is ook zichtbaar in Figuur 11. Echter toont de grafiek aan dat deze overschatting niet optreedt voor een vaarsnelheid gelijk aan 4 kn.

Er kan geconcludeerd worden dat het aannemelijk is dat de afstoting van de boeg bij de kleinste kielspeling en bij vaarsnelheid 6 kn door het model overschat wordt. Echter blijkt deze conditie in de simulatiestudie niet te hebben opgetreden aangezien deze vaarsnelheid niet toegepast werd bij de ladingsconditie met diepgang 12.5 m. Voor de andere condities geldt een goede overeenstemming tussen model en sleeptankproeven. Het model wordt toepasbaar geacht voor de vaarsnelheden die in de simulatiestudie gehanteerd werden aangezien deze steeds minder dan 4 kn bedroegen.

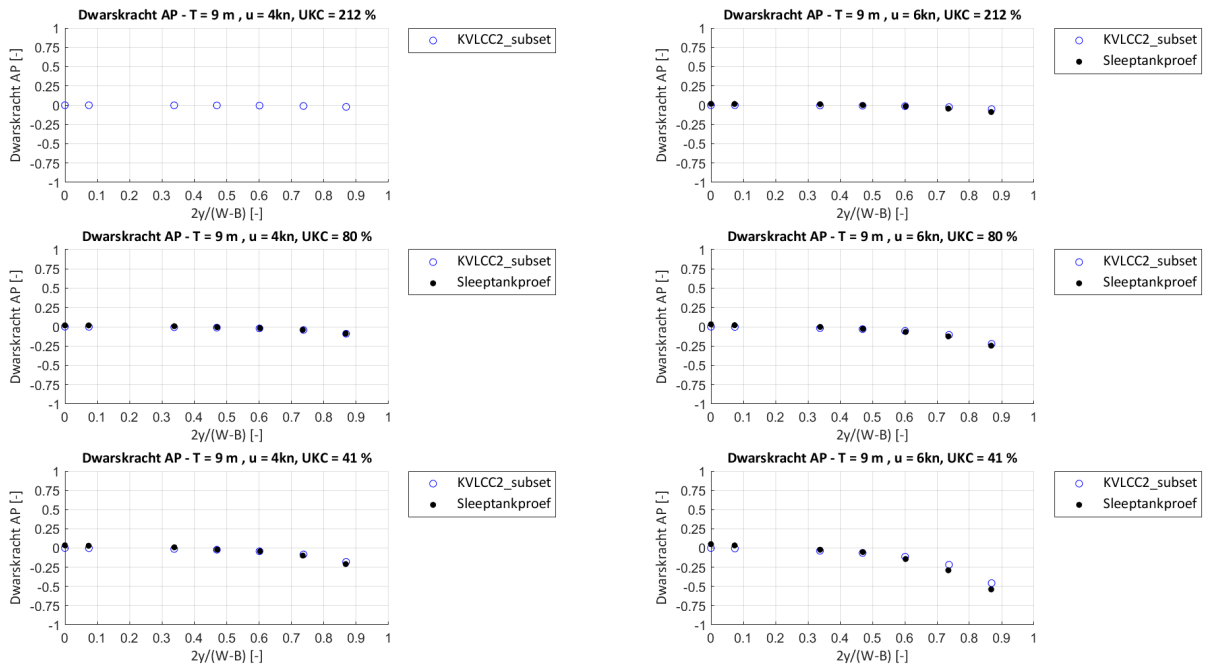


Figuur 10 – Vergelijking sleeptankproeven en modellering voor de dwarskracht aan het achterschip voor T01 bij T=12.5 m bij kleine blockages en verticale oevers

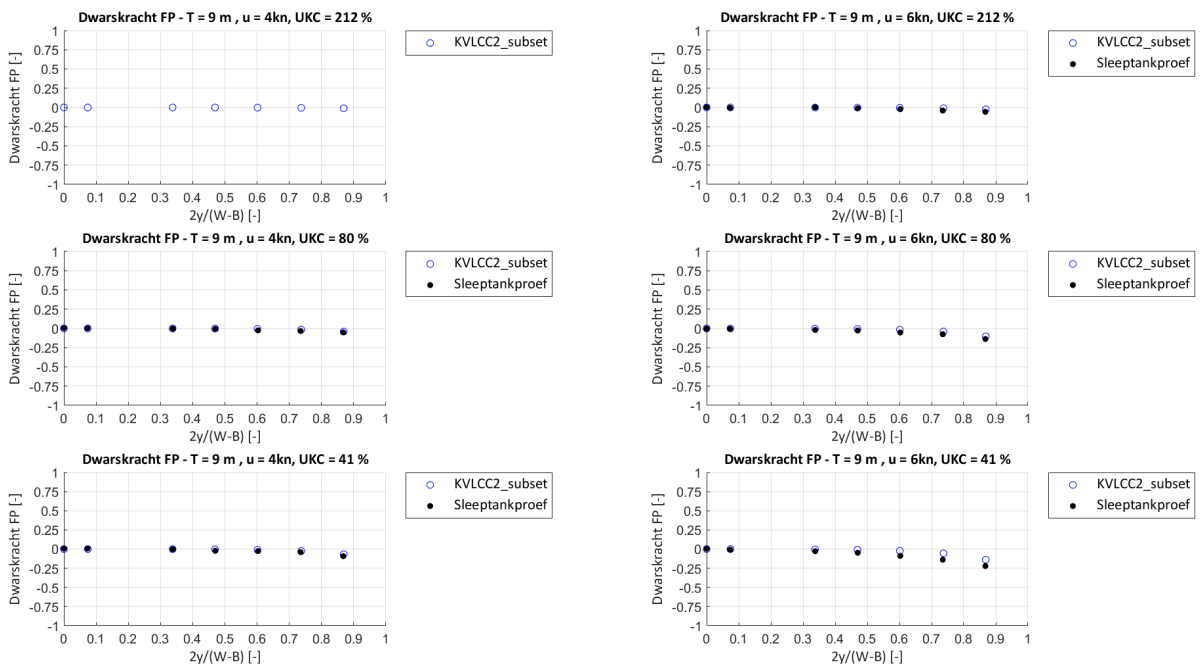


Figuur 11 – Vergelijking sleptankproeven en modellering voor de dwarskracht aan de boeg voor T01 bij T=12.5 m bij kleine blockages en verticale oevers

In Figures 12 en 13 wordt de vergelijking weergegeven voor de proeven uitgevoerd met het scheepsmodel T01 in ballastconditie. De figuren tonen een goede overeenstemming van het model aan met de sleptankproeven. Hierbij dient opgemerkt te worden dat dit model geoptimaliseerd werd op basis van de sleptankproeven in ballast met schip T01 en hierdoor verschilt van de modellering die toegepast werd in Verwilligen *et al.* (2021).



Figuur 12 – Vergelijking sleetankproeven en modellering voor de dwarskracht aan het achterschip voor T_A=9.0 m en T_F=7.0 m bij kleine blockages en verticale oevers



Figuur 13 – Vergelijking sleetankproeven en modellering voor de dwarskracht aan de boeg voor T_A=9.0 m en T_F=7.0 m bij kleine blockages en verticale oevers

2.2.3 Toepassing oevermodellering op typeprofiel

Om een eenduidige presentatie van de resultaten van het oevermodel mogelijk te maken werd het simulatiemodel toegepast op het studieschip voor het Nederlandse typeprofiel van het kanaal (zie §3.3.1). Hiervoor werden er systematische simulaties uitgevoerd waarbij het schip aan verschillende snelheden bij verschillende excentriciteiten door het kanaalprofiel voer. Hierbij worden onderstaande parameters gewijzigd:

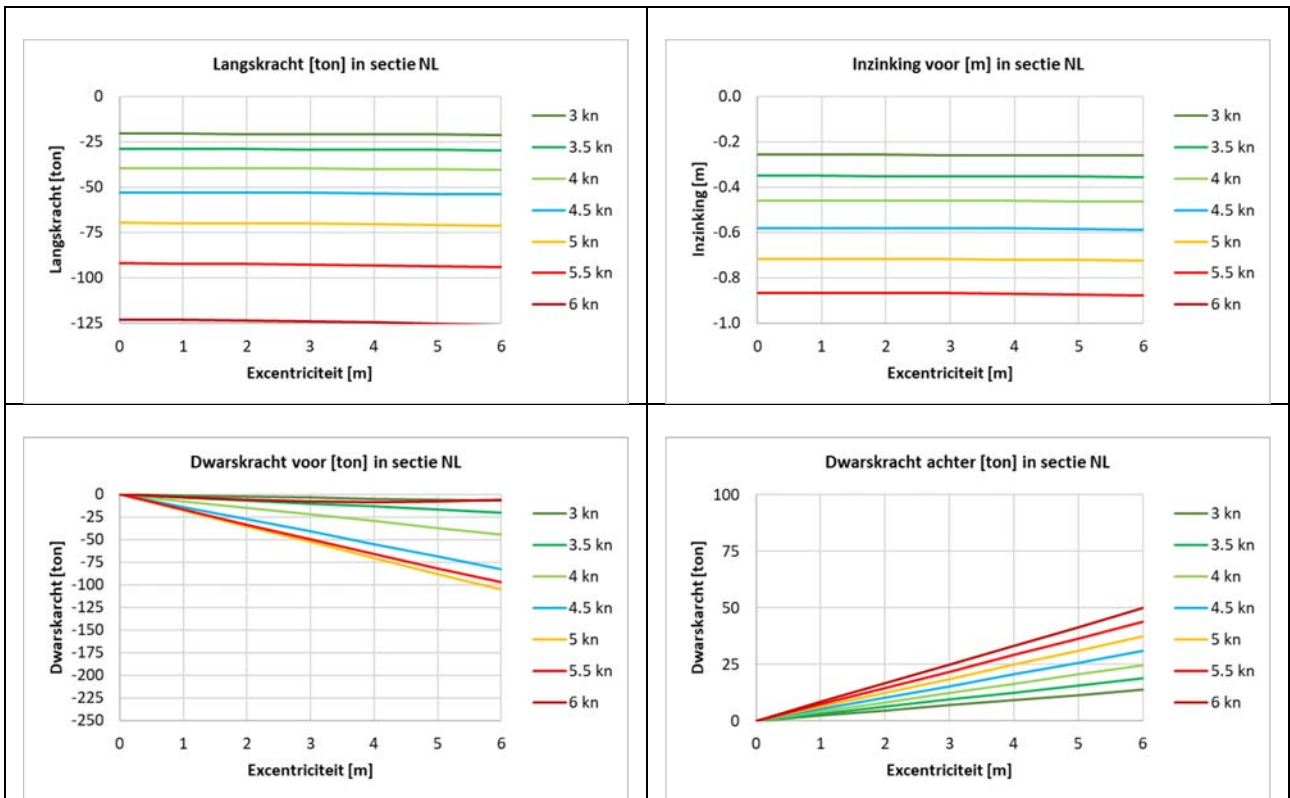
- het studieschip (240 m x 38.5 m) werd beproefd bij ladingscondities 12.5 m en heavy ballast ($T_A=8.8$ m en $T_F=7.7$ m)
- het kanaalprofiel werd zowel tweezijdig (grote blockage 0.33) als eenzijdig (kleine blockage) beproefd;
- de snelheden werden gevarieerd tussen 3 kn en 6 kn met tussenstap 0.5 kn
- de excentriciteit werd gevarieerd tussen 0 m en 6 m (in de richting van de dichtste oever).

Een eerste conditie die geëvalueerd wordt is de conditie bij de grootste blockage en betreft de simulatie van het studieschip bij diepgang 12.5 m in het Nederlandse typeprofiel van het kanaal (zie Figuur 14). De evaluatie toont een belangrijke langskracht ten gevolge van de oever met een belangrijke impact van de vaarsnelheid van de schepen. Zo blijkt de bijkomende weerstand die een schip ervaart bij een vaarsnelheid gelijk aan 4.5 kn meer dan 50 ton te bedragen. Bij dezelfde conditie bedraagt de inzinking van het schip bij de boeg, dus inclusief trim, reeds 0.6 m (van de 1.0 m die onder de kiel beschikbaar is in het typeprofiel). De langskracht en de inzinkingen vertonen in deze conditie slechts een beperkte toename in functie van de excentriciteit.

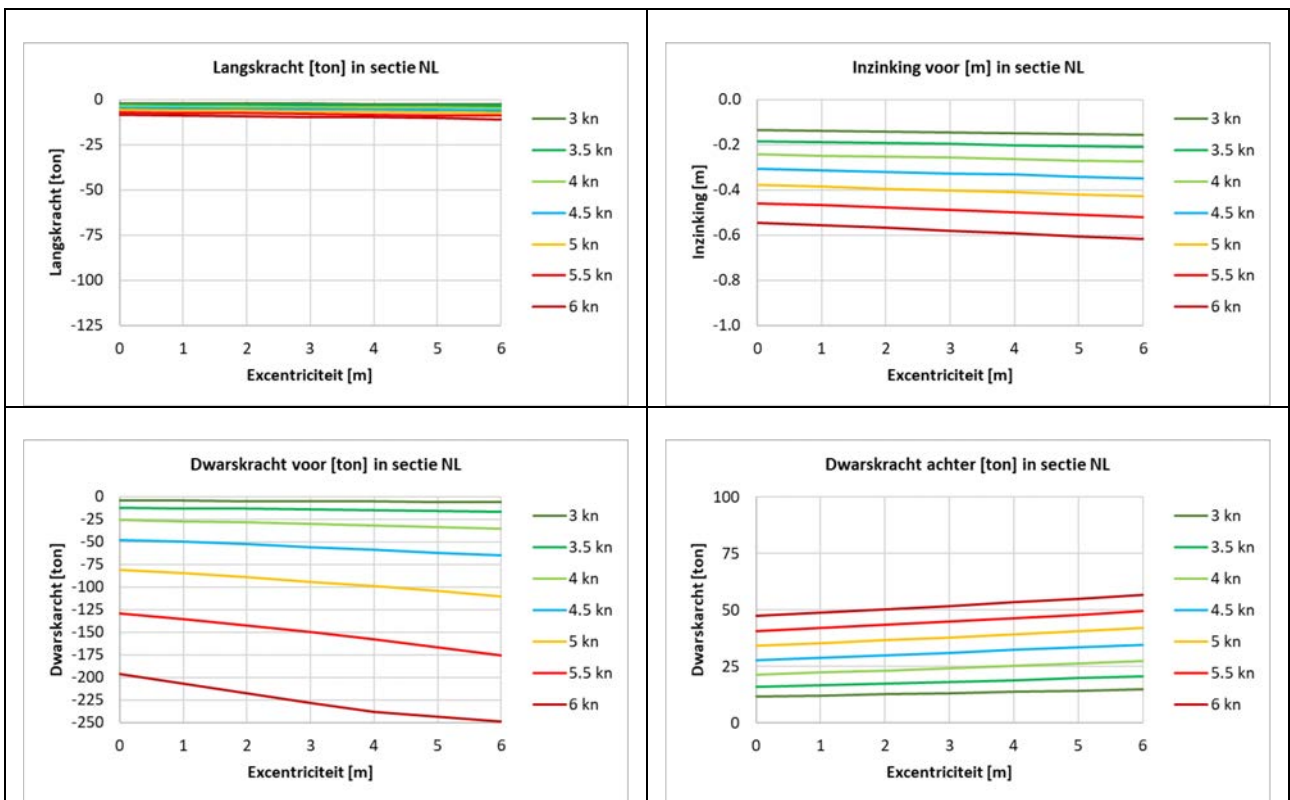
De dwarskrachten op het schip ten gevolge van oevereffecten zijn vanzelfsprekend onbestaand wanneer het schip in het midden van de tweezijdige sectie vaart. Voor relatief beperkte excentriciteiten blijkt er wel een belangrijke toename van de dwarskrachten op te treden. Zo blijkt bij een vaarsnelheid gelijk aan 4.5 kn en een excentriciteit gelijk aan 6 m het simulatiemodel een aantrekking van het achterschip van 31 ton te berekenen en een afstoting van het voorschip gelijk aan 82 ton.

Wanneer enkel een oever aan stuurboord gedefinieerd wordt (zie Figuur 15) dan blijkt de grote blockage aanleiding te geven tot veel kleinere invloeden van de oever op de weerstand van het schip. Ook de squat wordt in deze conditie met ca. 50% verminderd en bedraagt nog ca. 0.31 m voor een vaarsnelheid gelijk aan 4.5 kn. De dwarskrachten hebben nu wel een belangrijke waarde voor wanneer het schip zich op de aslijn van het kanaal bevindt (deze conditie stemt overeen met de passage van de Autriche-haven te Sluiskil). Voor een vaarsnelheid gelijk aan 4.5 kn wordt een afstoting van de boeg gelijk aan 50 ton en een aantrekking van het achterschip gelijk aan 28 ton berekend.

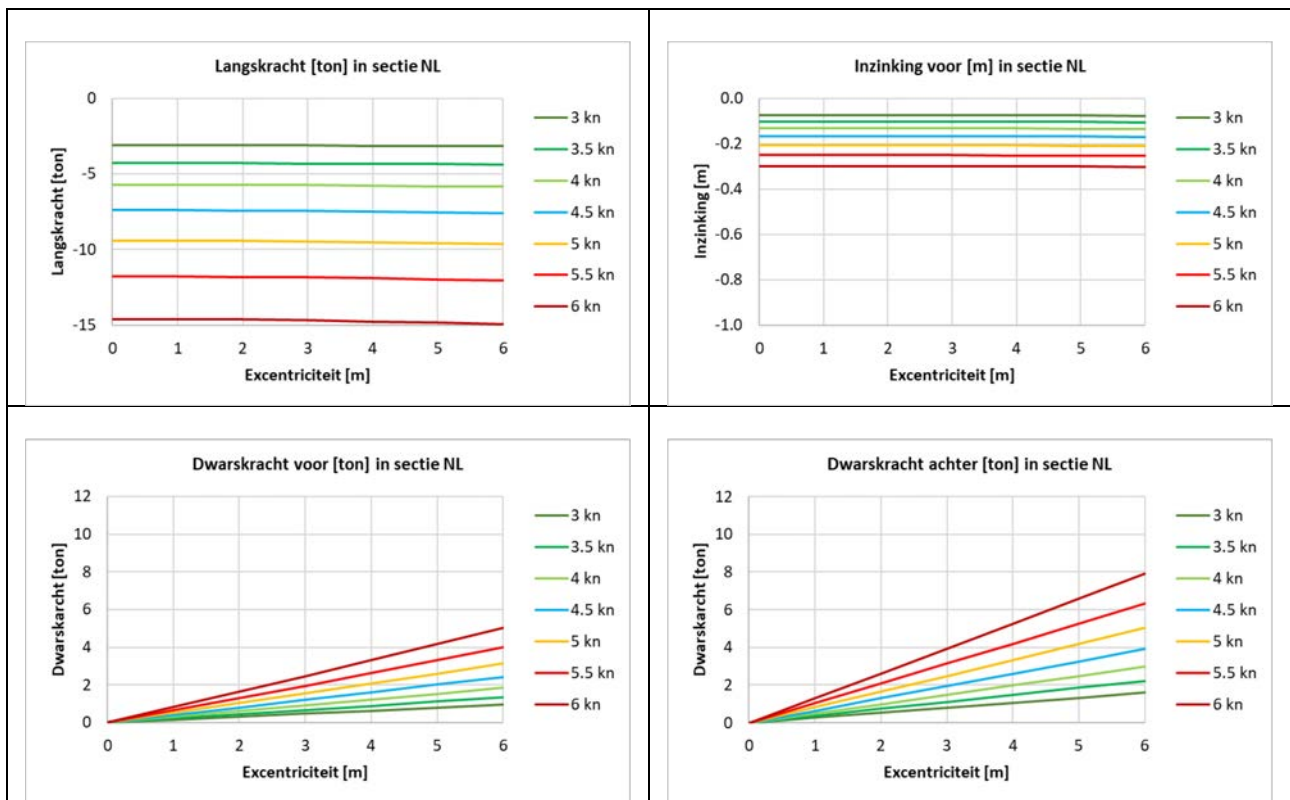
In Figuren 16 en 14 worden gelijkaardige resultaten gepresenteerd voor het schip in ballastconditie. De krachten en inzinkingen die voor deze ladingsconditie berekend worden zijn significant kleiner. Wel dient opgemerkt te worden dat een schip in ballast een belangrijkere excentriciteit kan hebben dan de 6 m die gepresenteerd wordt in de figuren. Voor eenzijdige oever aan stuurboord waarbij het schip 6 m excentrisch van de aslijn vaart aan een vaarsnelheid gelijk aan 6 kn dan berekent het model een aanzuiging van het achterschip van 11 ton en een aanzuiging van de boeg van 6 ton. Voor de kielspelingen die overeenstemmen met de ballastconditie blijkt de oever steeds een aantrekking van zowel het achterschip als de boeg te tonen.



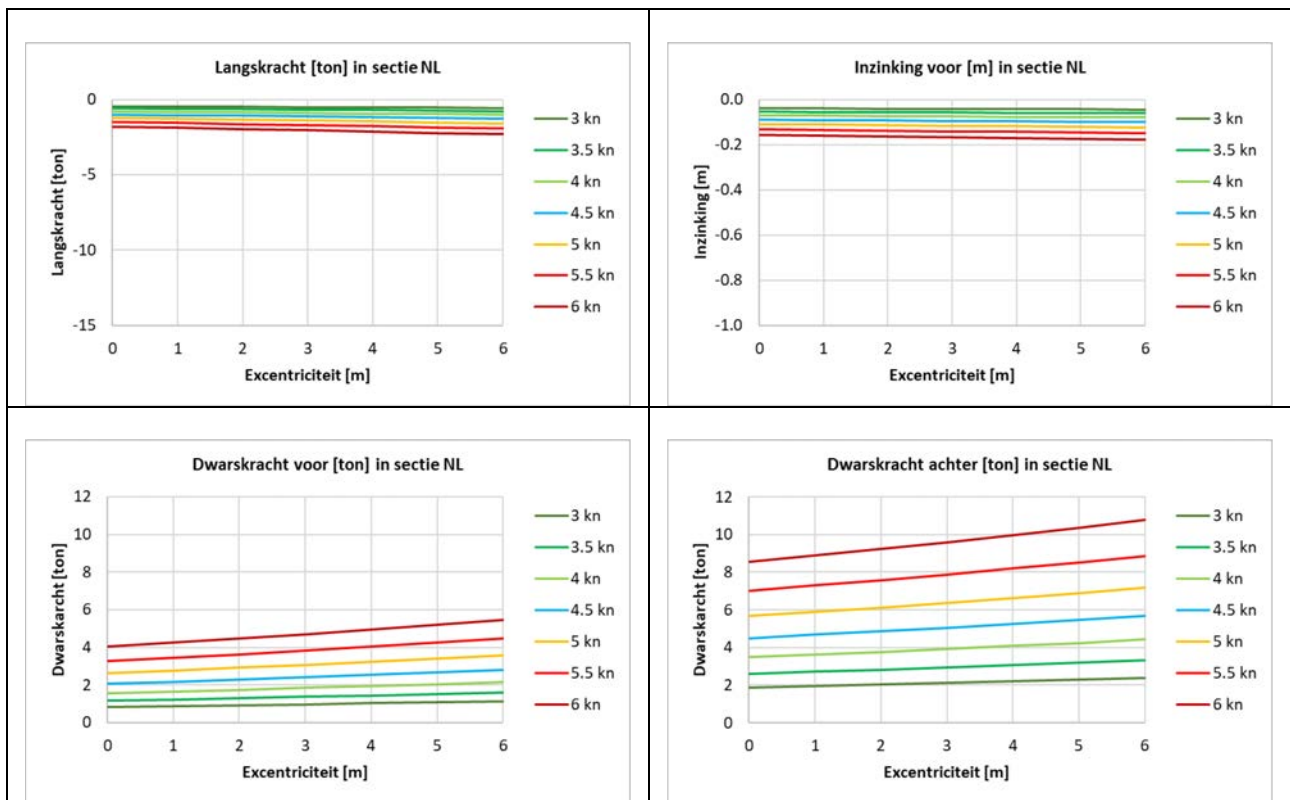
Figuur 14 – Evaluatie van oevermodellering in tweezijdig typeprofiel NL-KGT voor studieschip 240 m x 38.5 m bij diepgang 12.5 m



Figuur 15 – Evaluatie van oevermodellering in eenzijdig typeprofiel NL-KGT voor studieschip 240 m x 38.5 m bij diepgang 12.5 m



Figuur 16 – Evaluatie van oevermodellering in tweezijdig typeprofiel NL-KGT voor studieschip 240 m x 38.5 m in heavy ballast



Figuur 17 – Evaluatie van oevermodellering in eenzijdig typeprofiel NL-KGT voor studieschip 240 m x 38.5 m in heavy ballast

2.3 Modelling van windkrachten

Voor de modellering van windkrachten werd gebruik gemaakt van op WL beschikbare windcoëfficiënten waarmee de horizontale windkrachten en het giermoment ten gevolge van een relatieve windrichting geëvalueerd kunnen worden. Voor de beide scheepstypes (bulk en tanker) werden verschillende windcoëfficiënten toegepast en de windcoëfficiënten voor het giermoment werden voor de ballastconditie aangepast aan de getrimde ladingsconditie (grotere windvang op voorschip).

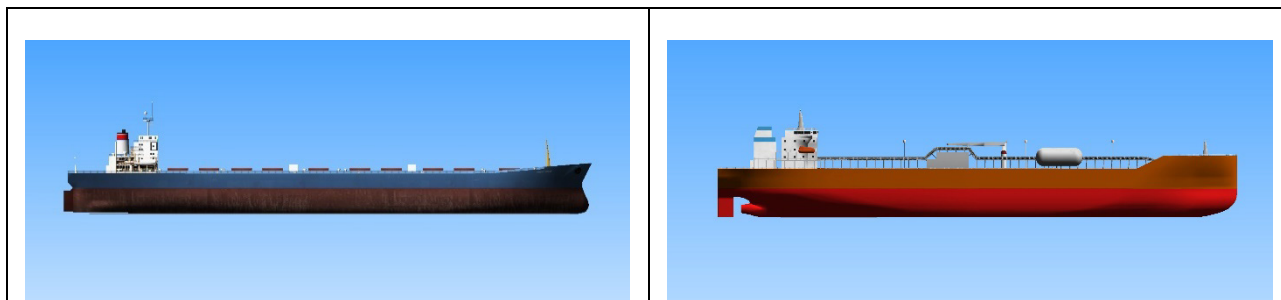
Voor de berekening van windkrachten dienen de windcoëfficiënten gecombineerd te worden met de frontale en laterale windoppervlakte van het bovenwaterschip. Deze oppervlaktes werden afgeleid uit de 3D-modellen van de studieschepen zoals ontwikkeld door WL.

2.3.1 3D-modellen schepen

Voor beide studieschepen waren er bij aanvang van de opdracht reeds erg gelijkaardige 3D-modellen beschikbaar in de simulatordatabase van WL. In overeenstemming met de WG toegankelijkheid KGT werden onderstaande 3D-modellen in rekening gebracht:

- Bulk carrier:
 - 3D-model voor AM Point Lisas geconstrueerd op basis van scheepsgegevens verzameld aan boord van het schip en reeds eerder uitgebreid tot een lengte gelijk aan 240 m
 - Aangepast volgens onderstaande schalingsfactoren in de drie dimensies:
 - Lengte: 240/240
 - Breedte: 38.5/38.0
 - Hoogte: 38.5/38.0
- CO₂-tanker
 - 3D-model voor schip tank_Co2_240_380 zoals gemodelleerd op basis van gegevens bekomen in het kader van Verwilligen & Eloit (2023)
 - Aangepast volgens onderstaande schalingsfactoren in de drie dimensies:
 - Lengte: 240/240
 - Breedte: 38.5/38.0
 - Hoogte: 38.5/38.0

De 3D-modellen van de schepen toegepast in de simulatiestudie worden weergegeven in Figuur 18.



Figuur 18 – Zijaanzichten van 3D-modellen van studieschepen voor bulk carrier (links) en tanker (rechts) zoals toegepast in de simulatiestudie

2.3.2 Windoppervlaktes

Door de 3D-modellen te combineren met de vooropgestelde ladingscondities konden de laterale en frontale windoppervlaktes van de schepen bekomen worden. Deze windoppervlaktes worden gepresenteerd in Tabel 9. Deze tabel toont aan dat de windoppervlaktes voor de tanker inderdaad significant hoger zijn dan voor de bulk carrier. Zo blijkt de windoppervlakte voor de tanker bij diepgang 12.5 m groter te zijn dan de windoppervlakte van de bulk carrier in heavy ballast conditie.

Tabel 9 – Windoppervlaktes van scheepstypes bulk carrier en tanker bij ladingscondities beschikbaar in simulator

Schip	Tvoor [m]	Tachter [m]	Trim [deg]	Ax [m ²]	Ay [m ²]
Bulk_240_385	12.5	12.5	0.00	736	2 353
Bulk_240_385	7.7	8.8	0.27	892	3 349
Tank_Co2_240_385	12.5	12.5	0.00	1 038	3 956
Tank_Co2_240_385	7.7	8.8	0.27	1 194	4 970

3 Bathymetrie en omgevingsdata

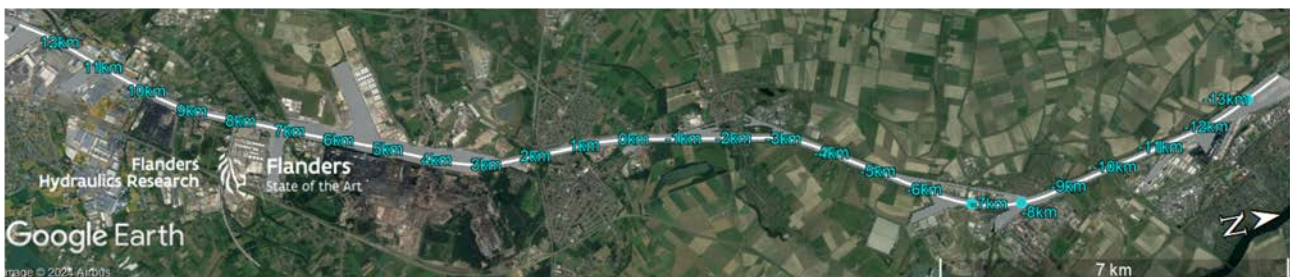
De modellering van de verschillende bodemprofielen die deel uitmaken van de impactstudie en de bathymetrie voor de simulator betrof een belangrijk onderdeel van voorliggende studie. Gegeven de beperkte afstanden tussen de schepen en de oevers was een accurate schematisatie van de bodem noodzakelijk. Vervolgens werden verschillende bodemprofielen gegenereerd overeenkomstig de verschillende historische peilingen en in overeenstemming met het theoretische profiel.

3.1 Aslijn KGT en boogstralen

In Verwilligen *et al.* (2021) werd op basis van plannen aangeleverd door de beide vaarwegbeheerders (Rijkswaterstaat en afdeling Maritieme Toegang) een doorlopende aslijn van het kanaal gegenereerd. Deze aslijn laat toe om de verschillende locaties langsheen het kanaal te refereren naar de baanafstand langsheen het traject. Hiervoor werd een afstands aanduiding uitgedrukt in kilometers toegepast welke gerefereerd werd ten opzichte van de Belgisch-Nederlandse grens (nulpunt). De locaties op Nederlands grondgebied hebben aldus een negatieve baanafstand en op Vlaams grondgebied een positieve baanafstand.

Een visualisatie van de baanafstanden langs de aslijn wordt weergegeven in Figuur 19. In Tabel 10 wordt voor de belangrijkste locaties langs het kanaal de baanafstand vermeld.

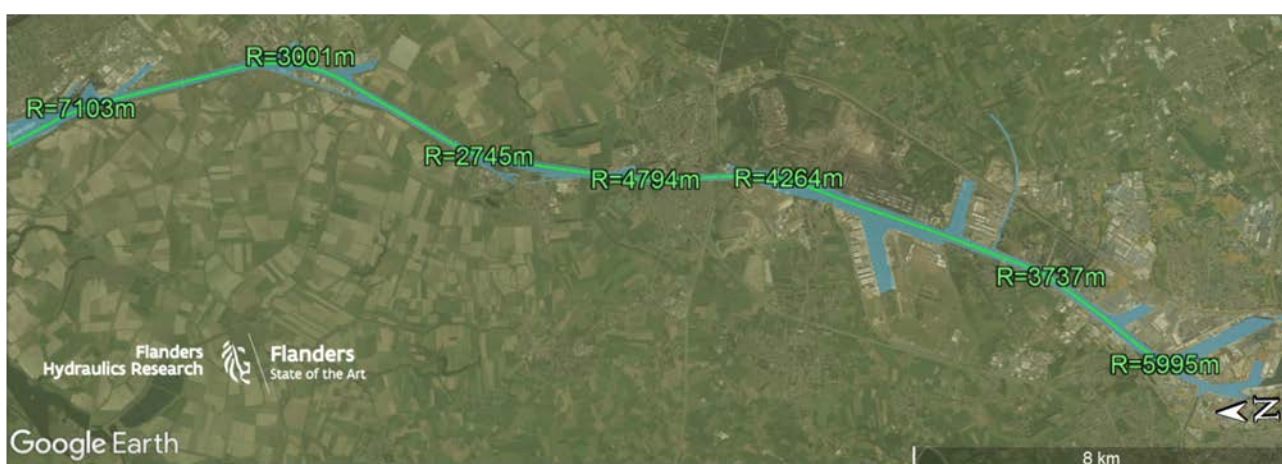
Op basis van de aslijn werd in Verwilligen *et al.* (2021) bovendien een inschatting gemaakt van de boogstralen en koerswijziging van de verschillende kanaalbochten (zie Figuur 20 en Tabel 11). Hieruit blijken de belangrijkste kanaalbochten zich te situeren ter hoogte van Sluiskil en Sas van Gent waarbij met name te Sluiskil een belangrijke koerswijziging gerealiseerd dient te worden.



Figuur 19 – Visualisatie van de aslijn van het kanaal met bijhorende baanafstanden (km)

Tabel 10 – Locaties langs het Kanaal Gent-Terneuzen met overeenkomstige baanafstand langsheen aslijn KGT

Baanafstand	Locatie
[km]	[-]
-12	Massagoedhaven
-11.2	Zevenaarhaven
-10	Brug Sluiskil
-8	HAS Haven en Zijkanaal B
-7	Driekwart (Sluiskil)
-6.5	Autriche haven
-5.8	Zijkanaal D
-4.0	Rust Roest
-4.3	Tweekwart
-3	Zijkanaal E / Bocht Sas van Gent
-2.1	Brug Sas van Gent
-1.5	Zijkanaal G
-1.2	Zijkanaal H / Zuid-Chemie
0	Grens Nederland en België
1	Brug Zelzate
2	Tunnel Zelzate
4	Arcelor-Mittal
5.3	Kluizendok
7.2	Rodenhuedok
8.1	Moervaart
9.5	Ghent Commodity Terminal
11	Mercatordok



Figuur 20 – Boogstralen van de bochten op het Kanaal Gent-Terneuzen (Verwilligen *et al.*, 2021).

Tabel 11 – Metadata bochten op het kanaal Gent-Terneuzen (Verwilligen *et al.*, 2021)

Locatie	Boogstraal [m]	Koerswijziging [°]
Massagoedhaven	7103	5.6
Sluiskil	3001	38.2
Sas van Gent	2745	16.6
Zelzate	4794	7.7
Arcelor-Mittal	4264	15.5
Ghent Coal Terminal	3737	11.7
Sifferdok	5995	7.3

3.2 Bodemmesh

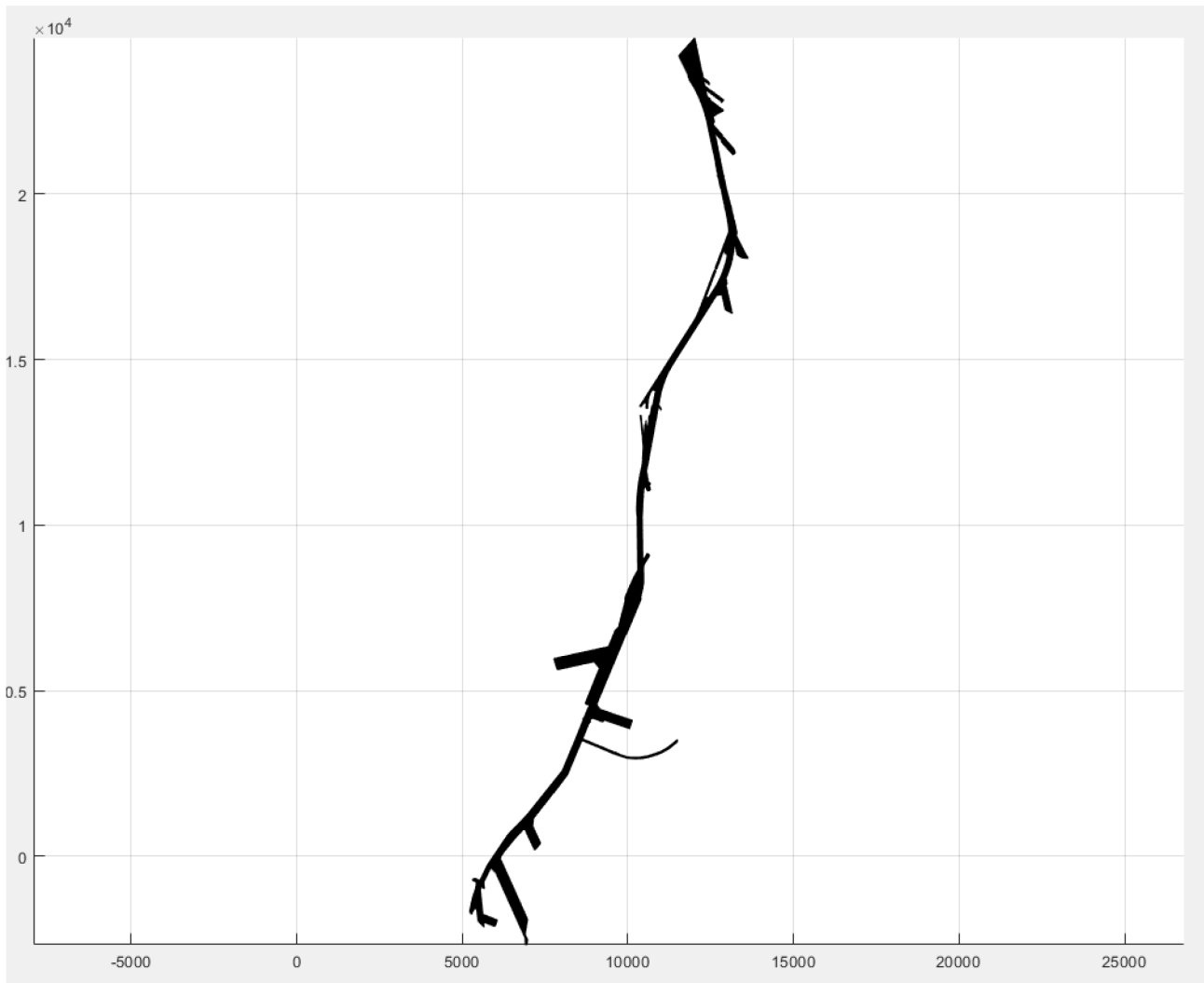
Voor de definitie van de bodem tijdens de impactanalyse van verschillende bodemcondities wordt gebruik gemaakt van een gebiedsdekkend triangulair grid met veranderlijke celgrootte naar gelang de afstand tot de aslijn van het kanaal. In de theoretische profielen gaat de 13.5 m dieptelijn gepaard met een discontinuïteit/knik (zie Figuur 2) in de oeverhelling (van een verticale bodem naar een talud). Om een dergelijke dieptelijn correct weer te geven is lokaal een hoge resolutie van de mesh nodig. Bijgevolg werden onderstaande celgroottes gedefinieerd in de bodemmesh:

- Voor afstanden tot de aslijn van het kanaal kleiner dan 40 m: celgrootte 1.0 m
- Voor afstanden tot de aslijn van het kanaal tussen 40 m en 90 m: celgrootte 1.0 m tot 2.0 m
- Voor afstanden tot de aslijn van het kanaal tussen 90 m en 150 m: celgrootte 2.0 m tot 25.0 m
- Voor afstanden tot de aslijn van het kanaal groter dan 150 m: celgrootte 25.0 m

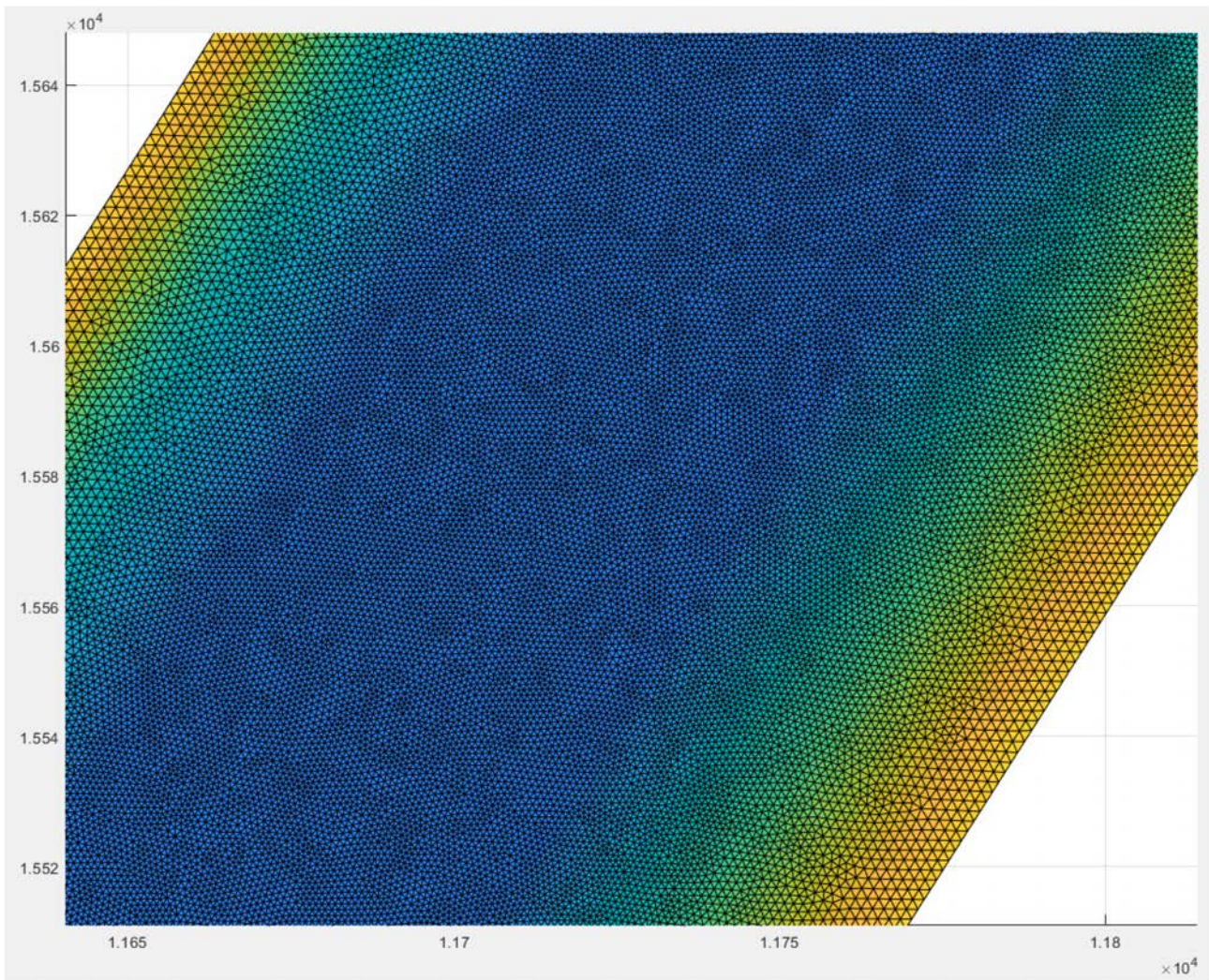
Met bovenstaande instelling wordt een bodemmesh bekomen met 3'998'315 knooppunten en 7'979'254 driehoeken. De bodemmesh wordt (net als de simulatieomgeving) gedefinieerd in Lambert72 coördinaten met offset (100'000; 200'000). De verticale referentie van de bodem betrof steeds TAW. Ten behoeve van de rapportering worden de waterdieptes gepresenteerd ten opzichte van kanaalpeil (KP). Waarbij KP verondersteld werd op +4.45 m TAW.

De bodemmesh werd gebruikt als basis om alle bathymetrieën die onderzocht werden in het kader van deze studie te definiëren.

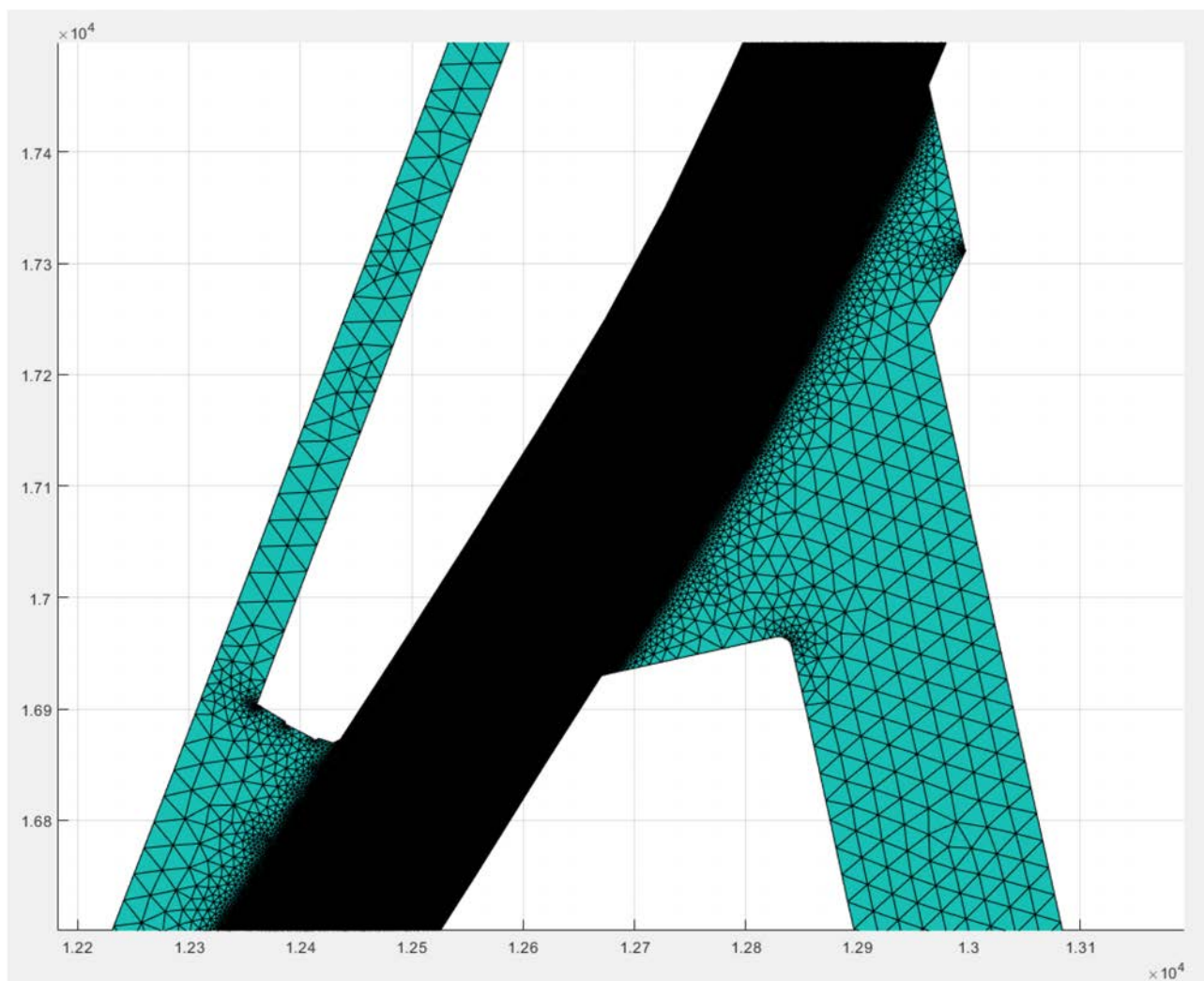
In onderstaande figuren worden enkele visualisaties van de bodemmesh weergegeven. Op basis van Figuur 24 wordt aangetoond dat de bodemmesh van het theoretische profiel (TP) de knik tussen bodem en oever goed representeert.



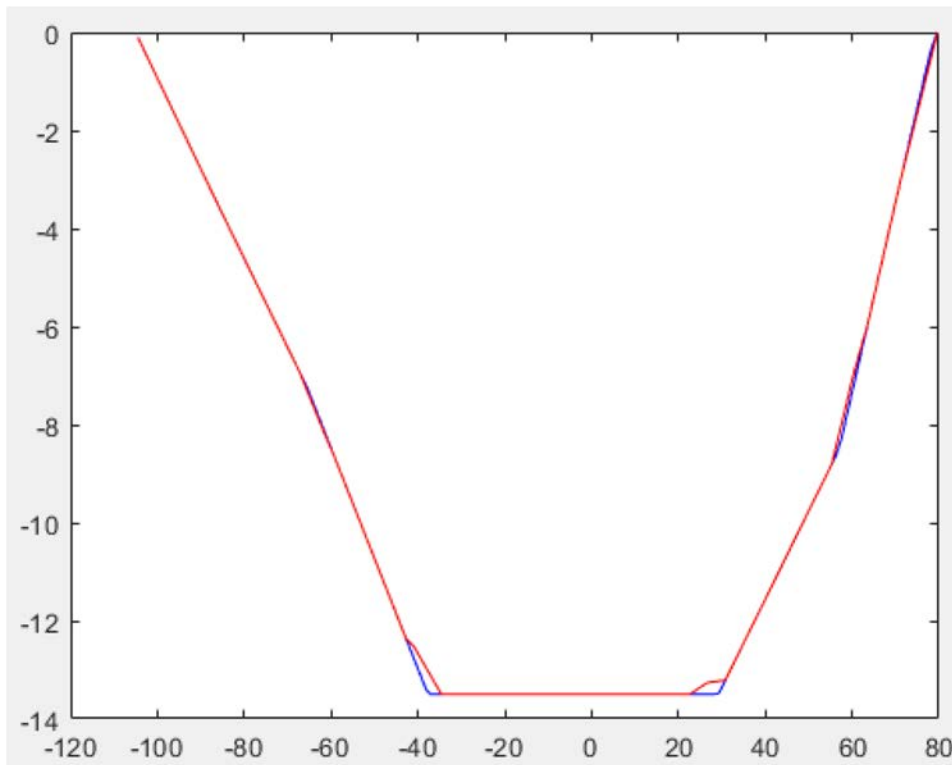
Figuur 21 – Illustratie van de bodemmesh voor de simulatieomgeving KGT



Figuur 22 – Bodemmesh in kanaalsectie tussen Sluiskil en Sas van Gent (celgrootte 1.0 tot 2.0m)



Figuur 23: Bodemmesh te Sluiskil -Autriche-haven (celgrootte 1.0 tot 25 m)



Figuur 24 – Vergelijking tussen dwarssectie van het TP te baanafstand -10 km voor een mesh met cel grootte 8 m (rood) en voor de mesh gedefinieerd voor de huidige studie (celgrootte 1.0 m tot 2.0 m).

3.3 Theoretisch profiel (TP)

Als referentie voor de peilingen werd een bathymetrie gemodelleerd in overeenstemming met het theoretische profiel. Het theoretische profiel wordt hier gedefinieerd als het profiel zoals door de vaarwegbeheerders gehanteerd als input voor het uit te voeren baggeronderhoud.

3.3.1 Typeprofielen KGT

Als input voor de studie leverde de opdrachtgever de typesecties voor het KGT zoals weergegeven in Figuur 25. Hoewel veelvuldig toegepast kon de bron van deze typesecties niet achterhaald worden.

Het huidige ontwerp van het kanaal Gent-Terneuzen stemt overeen met de verbreding en verdieping van het kanaal naar aanleiding van de inbouw van de Westsluis te Terneuzen in 1968. In de bibliotheek van het Waterbouwkundig Laboratorium kon een rapport (Ministerie van Openbare Werken & Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1968) teruggevonden worden waarin de ontwerpkeuzes voor het toenmalige (en huidige) ontwerp van het kanaal beschreven worden.

In deze rapporten worden eveneens de drie typeprofielen voor het kanaal beschreven zoals weergegeven in Figuur 2. De secties uit Ministerie van Openbare Werken & Ministerie van Verkeer en Waterstaat (1968) worden weergegeven in de Figuren 26 tot 28. Deze secties wijken in beperkte mate af van de secties zoals op heden gehanteerd (en welke door de opdrachtgever van de studie aangeboden werden):

- Voor de Nederlandse sectie wordt een breedte op de waterlijn gelijk aan 150 m weergegeven waarvoor op heden 155 m aangenomen wordt
- Voor de Vlaamse sectie wordt een breedte op diepte 13.5 m KP gelijk aan 67.7 m weergegeven waarvoor op heden 68 m aangenomen wordt.

- Voor de sectie Zelzate biedt de sectie in Ministerie van Openbare Werken & Ministerie van Verkeer en Waterstaat (1968) de maatvoering voor de geknikte oever welke afwezig is in de typesecties die aangeboden werden als input voor deze studie.

Op basis van de beschikbare gegevens werden de typeprofielen verondersteld overeen te stemmen met de eenduidige definitie gepresenteerd in Tabel 12. Deze definities stemmen overeen met de weergave van de typeprofielen in Figuur 2. Ter illustratie biedt Tabel 13 een overzicht van de vaarwegbreedtes voor verschillende waterdieptes. In Tabel 12 wordt voor deze typeprofielen de blockage (6) van het studieschip berekend op basis van de oppervlaktes van de typeprofielen. De maximale blockage betreft 0.33.

Behalve de verduidelijking van de typeprofielen bevat het rapport uit 1968 nog onderstaande relevante inhoud:

1. Het rapport definieert het ontwerpschip voor het huidige kanaal (en voor de Westsluis Terneuzen) als een zeeschip met DWT 50'000 ton (Panamax) en een duwkonvooi (vermoedelijk CEMT klasse VIb). De huidige studie onderzoekt de toegankelijkheid van het kanaal voor schepen met DWT 74'000 ton (zoals gedefinieerd voor AM Point Lisas bij diepgang 12.5 m).
2. Het rapport stelt dat de scherpste bochten op het kanaal een straal van 3000 m hebben en dat hiervoor op de bodem een bochtverbreding gelijk aan 7 m toegepast wordt (berekend als 20000 m/R). Deze bochtverbreding blijkt in de praktijk niet toegepast te worden (deze is niet aanwezig in de huidige theoretische profielen, zie §3.3.2). Op basis van de eigen analyse van de huidige aslijn van het kanaal blijkt de boogstraal te Sas van Gent kleiner te zijn dan 3000 m (zie Tabel 11). Deze afwijking is voornamelijk het gevolg dan de definitie van de aslijn van het kanaal die mogelijks verplaatst werd sinds 1968.

Tabel 12 – Eenduidige definitie van typeprofielen op basis van de vaarwegbreedte (W) bij verschillende waterdieptes (h)

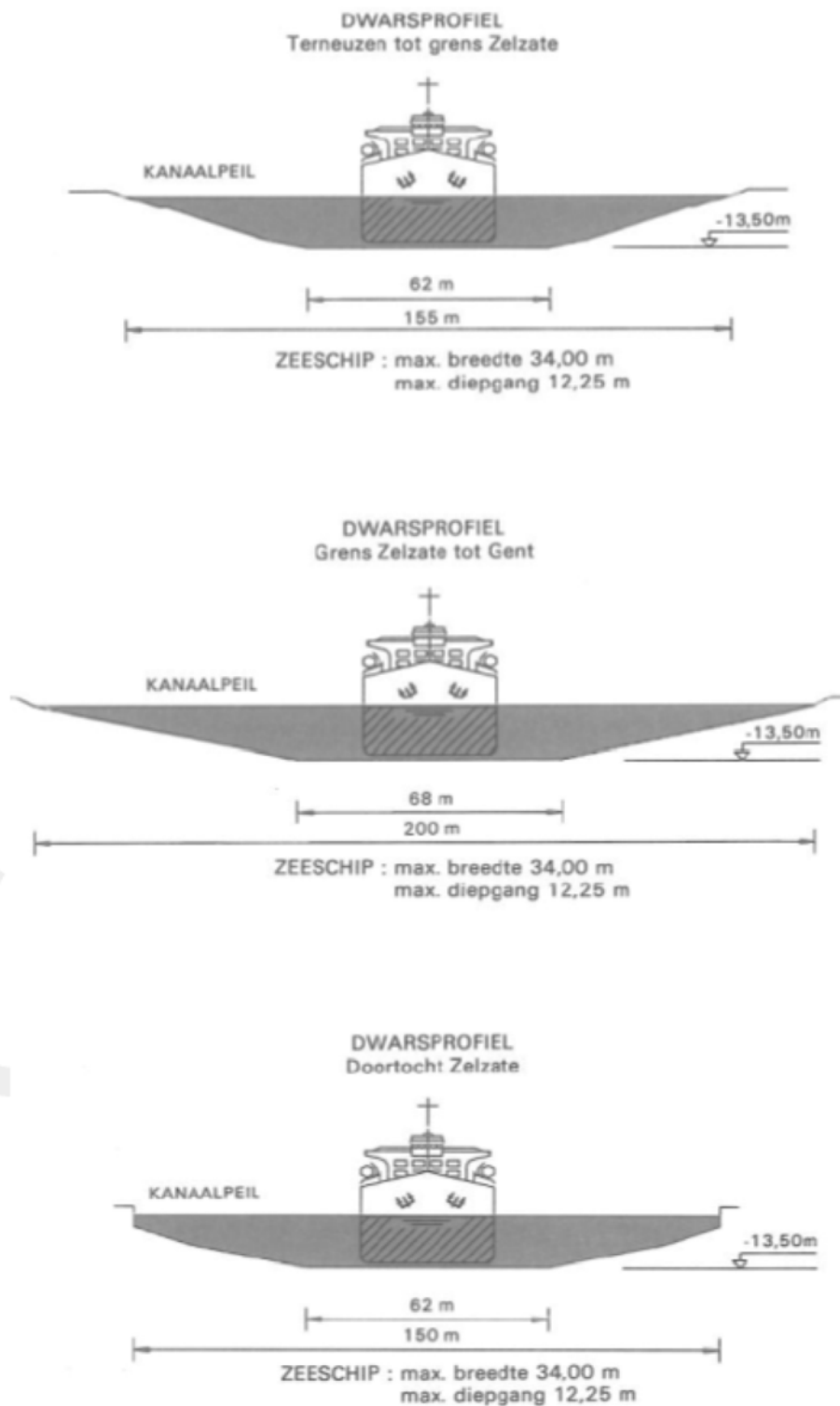
NL		Zelzate		VL	
h	W	h	W	h	W
[m KP]	[m]	[m KP]	[m]	[m KP]	[m]
0.0	155.0	0.0	150.0	0.0	200.0
13.5	62.0	2.8	150.0	13.5	68.0
		7.5	122.0		
		13.5	62.0		

Tabel 13 – Vaarwegbreedte (W) bij verschillende waterdieptes (h) voor de typeprofielen van KGT

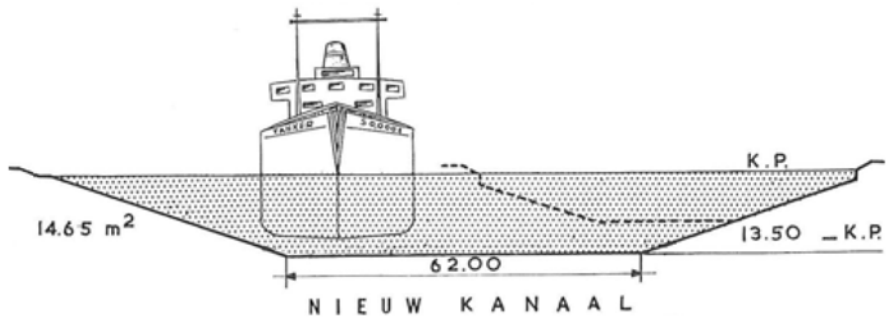
NL		Zelzate		VL	
h	W	h	W	h	W
[m KP]	[m]	[m KP]	[m]	[m KP]	[m]
0	155.0	0	150.0	0	200.0
4	127.4	4	143.0	4	160.9
6	113.7	6	131.0	6	141.3
8	99.9	8	117.0	8	121.8
10	86.1	10	97.0	10	102.2
12.5	68.9	12.5	72.0	12.5	77.8
13.5	62.0	13.5	62.0	13.5	68.0

Tabel 14 – oppervlakte typeprofielen van KGT en bijhorende blockage voor studieschepen

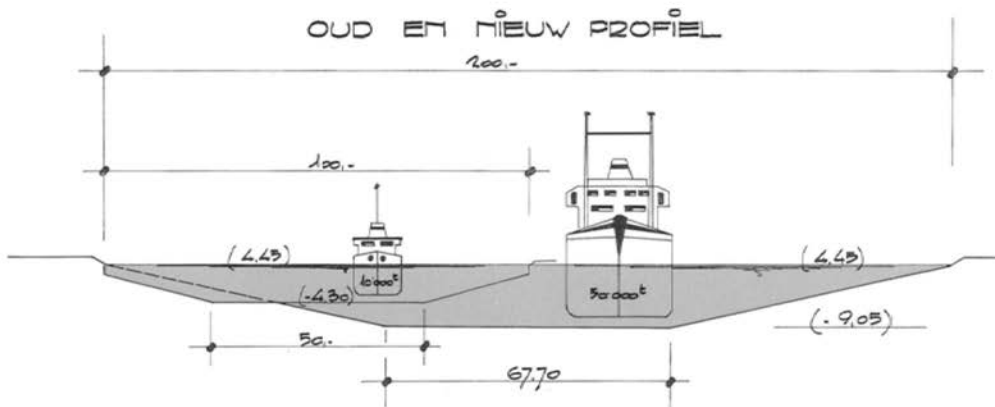
	NL		Zelzate		VL	
A [m²]	1465		1612		1809	
B [m]	38.5	38.5	38.5	38.5	38.5	38.5
T [m]	12.5	8	12.5	8	12.5	8
m [-]	0.33	0.21	0.30	0.19	0.27	0.17



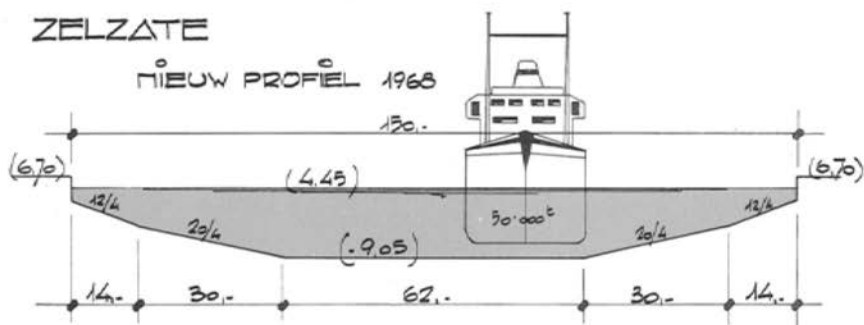
Figuur 25 – Typeprofielen KGT zoals aangeleverd door de opdrachtgever (bronbestand onbekend)



Figuur 26 – Typeprofiel voor Nederlands grondgebied zoals beschreven in Ministerie van Openbare Werken & Ministerie van Verkeer en Waterstaat (1968)



Figuur 27 – Typeprofiel voor Vlaamse grondgebied zoals beschreven in Ministerie van Openbare Werken & Ministerie van Verkeer en Waterstaat (1968)



Figuur 28 – Typeprofiel voor passage Zelzate zoals beschreven in Ministerie van Openbare Werken & Ministerie van Verkeer en Waterstaat (1968)

3.3.2 Nederlands theoretisch profiel

Voor het Nederlandse deel (NL) van het KGT is een volledige beschrijving van het TP beschikbaar op basis van een dwg-bestand (Rijkswaterstaat Directie Zeeland. Afdeling Water en Scheepvaart, 2009) gecombineerd met een ontwerpplan voor de Autriche-haven (Zeeland Seaports, 2013). Het dwg-bestand bevat de polylijnen op verschillende ontwerpdieptes (tussen 0 m en -13.5 m KP). Door triangulatie van deze lijnen werd een gebiedsdekkende bathymetrie bekomen (deze werd door WL reeds gemodelleerd in het kader van Lataire *et al.* (2016)). Voor het Nederlandse deel werd het getrianguleerde TP geprojecteerd op de bodemmesh om de gewenste bathymetrie te bekomen voor de huidige studie (zie Figuur 29).



Figuur 29 – Illustratie van definitie van dieptelijnen in RWSZL-2009-02756.DWG (links) vergeleken met de resulterende dieptelijnen in de bodemmesh gebruikt in de studie (rechts)

3.3.3 Vlaams theoretisch profiel

Voor het Vlaamse grondgebied werd door de afdeling Maritieme Toegang opgemerkt dat het theoretische profiel zoals gemodelleerd in eerdere simulatiestudies niet overeenstemt met het uitgevoerde baggeronderhoud. Een aangepaste definitie van het theoretische profiel op Vlaams grondgebied was noodzakelijk.

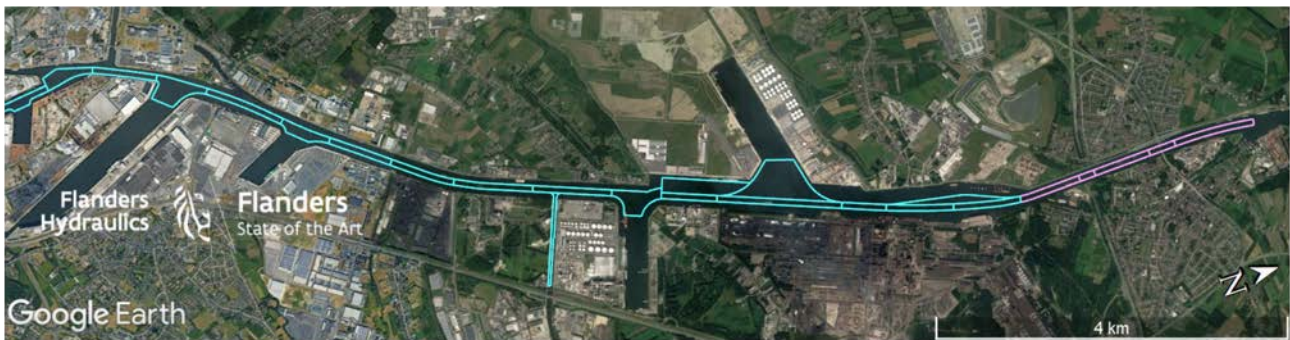
Het baggeronderhoud op Vlaams grondgebied is gebaseerd op baggercontouren met een bijhorende streefdiepte. Deze baggercontouren worden weergegeven in Figuur 30. Voor het theoretische profiel werd aangenomen dat de diepte binnen deze polygonen overeenstemde met de streefdiepte (13.5 m voor alle contouren exclusief Moervaart en opwaarts Sifferdok).

Voor de bodemligging buiten de baggercontouren werd aangenomen dat de helling van de oever in overeenstemming was met de gemiddelde helling van de typeprofielen (zie Figuur 2) voor Zelzate (1/4.125) en het Vlaamse gedeelte (1/4.88).

Vanzelfsprekend gaf bovenstaande aanname (taluds aansluitend op de baggercontouren) een sterke onderschatting van de beschikbare dieptes ter hoogte van de zijdokken. Bijgevolg werd het theoretische profiel op Vlaams grondgebied aangepast aan de minst diepe peiling die opgemeten werd sinds januari 2021. Indien deze conservatieve peiling dieper was dan het profiel op basis van baggercontouren en taluds, dan werd de waarde uit de peiling gehanteerd. Hierbij werd er wel over gewaakt dat er geen dieptes groter dan 13.5 m KP gedefinieerd werden in het theoretische profiel.

De definitie van het theoretische profiel op Vlaams grondgebied bleek bij latere analyses eerder ruim vergeleken met de werkelijke conditie bekomen op basis van peilingen. Hiervoor gelden de volgende redenen:

1. De baggercontouren te Zelzate gaan gepaard met een breedte gelijk aan 68 m waar het typeprofiel in deze zone slechts een breedte gelijk aan 62 m voorschrijft bij een diepte -13.5m KP.
2. De taluds aan de rand van de baggercontouren zijn meestal steiler dan de taluds uit de typeprofielen die als minimum aangenomen worden in bovenstaande definitie.



Figuur 30 – Weergave van baggercontouren voor het Vlaamse gedeelte van het KGT zoals gehanteerd door afdeling Maritieme Toegang (Zelzate: paars, Opwaarts Zelzate: blauw).

3.4 Historische Peilingen

Bij de start van het project werden bij de bevoegde diensten (Rijkswaterstaat voor het Nederlandse grondgebied en de Vlaamse Hydrografie voor het Vlaamse grondgebied) de beschikbare peilingen voor het Kanaal Gent-Terneuzen sinds januari 2017 opgevraagd. Na verwerking van de aangeleverde bestanden bleken de aangeleverde peilingen overeen te stemmen met volgende databeschikbaarheid voor het studiegebied:

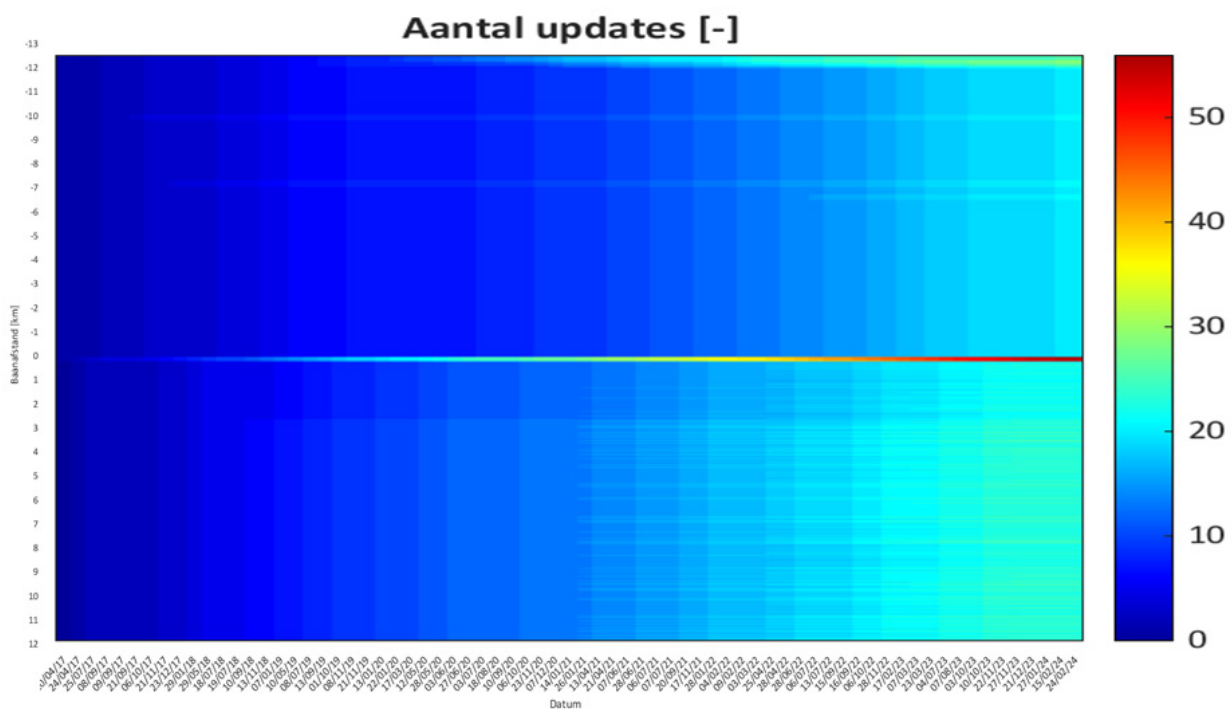
- Nederlands grondgebied: 53 updates van de bathymetrie tussen 03 november 2005 en 24 februari 2024 waarvan 45 sinds 20 april 2017.
- Vlaams grondgebied: 26 updates van de bathymetrie tussen 24 april 2017 en 27 november 2023

Door de twee databronnen te combineren werden er 71 dagen bekomen waarop op Nederlands of Vlaams grondgebied een nieuwe peiling beschikbaar was. Voor deze 71 dagen werd een bodemprofiel gegenereerd waarbij de Nederlandse peilingen geprojecteerd werden op het Nederlandse grondgebied en Vlaamse peilingen op het Vlaamse grondgebied. Indien echter de peilingen van het ene grondgebied ook data bevatten van het andere grondgebied dan werd deze tot maximaal 100 m buiten de landsgrens toegepast. Bij deze analyse werd als initiële conditie van de bodem het theoretische profiel gedefinieerd (zie §3.3). Doordat de eerste peiling op Vlaams grondgebied pas beschikbaar was op 24/04/2017 stemmen de bodemprofielen voor die datum (dus de eerste update overeenkomstig 20/04/2017) op het Vlaamse gebied niet overeen met peilingen maar met het theoretische profiel. Voor het Nederlandse grondgebied stemmen alle bodemprofielen overeen met peilingen.

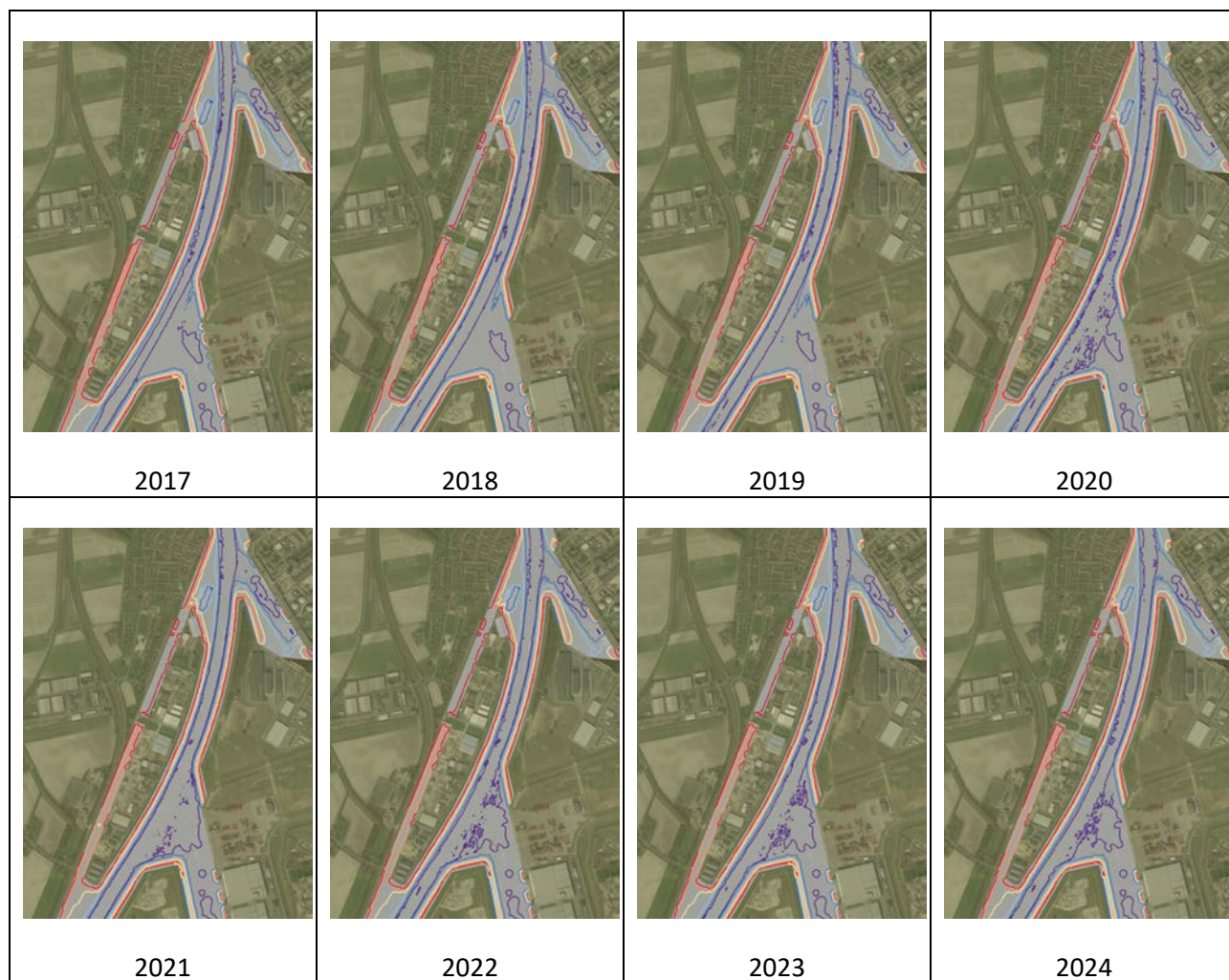
De projectie werd uitgevoerd op de bodemmesh beschreven in §3.2 en werd geëxporteerd in een formaat dat als input dient voor de simulatieomgeving. Dit liet toe om op deze bathymetrieën analyses uit te voeren met dezelfde softwaretools als deze toegepast in de simulator.

Figuur 31 illustreert het (cumulatieve) aantal peilingen beschikbaar langsheen het traject (verticale as) en doorheen de tijd (horizontale as). Deze weergave illustreert dat de beschikbare peilingen op het Nederlandse grondgebied niet steeds het volledige kanaaltracé bevatten. Zo blijken er meer updates beschikbaar te zijn voor de noordelijke zone (sluizencomplex Terneuzen). Toch blijken er voor zowel het Nederlandse als het Vlaamse grondgebied steeds meer dan 20 peilingen beschikbaar te zijn. Voor het Vlaamse grondgebied blijkt er ter hoogte van Zelzate iets minder gepeild te zijn dan opwaarts Zelzate. Ter hoogte van de grens is dan weer het grootste aantal updates zichtbaar omdat in de zone 100 m op- en afwaarts de grens zowel Vlaamse als Nederlandse peilingen aanvaard worden.

De 71 historische peilingen vormden de input voor de impactstudie van het bodemprofiel (zie H4). Om de gegevens inzichtelijk te maken werden de dieptelijnen bij verschillende karakteristieke dieptes (13.5 m, 12.5 m, 10 m, 8 m, 6 m en 4 m) geëxporteerd in een kmz-bestand met tijdsanimatie. Dit kmz-bestand (KGT_23_116_peilingen2017_2023.kmz) is digitaal toegevoegd aan dit rapport. Figuur 32 biedt een illustratie van de evolutie van deze dieptelijnen in de bocht van Sluiskil zoals vertoond door het kmz-bestand te openen in Google Earth™.



Figuur 31 – Illustratie van het aantal beschikbare peilingen langsheen het kanaal (verticale as) en in functie van de tijd (horizontale as)



Figuur 32 – Illustratie van evolutie van dieptelijnen te Sluiskil voor de onderzochte periode (steeds vroegste tijdstip beschikbaar per jaar).

4 Impactstudie bodemprofiel

Voor de impactstudie van het bodemprofiel werden het theoretische profiel en de peilingen geëvalueerd per sectie van 50 m langsheen de aslijn van het kanaal voor de baanafstanden -13 km (voorhaven sluisencomplex) tot en met +12 km (aanloop Sifferdok).

De analyse werd uitgevoerd voor onderstaande parameters van de bijhorende dwarssecties:

- Analyse van de bodem
 - De breedte van de bodem bij diepte -13.5 m KP;
 - De breedte van de bodem bij diepte -12.5 m KP;
 - De maximale diepte van de sectie.
- Analyse van de oevereffecten
 - De gemodelleerde langskracht ten gevolge van de oever voor het studieschip bij T=12.5 m en bij vaarsnelheid 9 km/h;
 - De gemodelleerde maximale inzinking voor het studieschip bij T=12.5 m en bij vaarsnelheid 9 km/h;
 - De gemodelleerde dwarskracht van het achterschip voor het studieschip bij T=12.5 m en bij vaarsnelheid 9 km/h;
 - De gemodelleerde dwarskracht van het voorschip voor het studieschip bij T=12.5 m en bij vaarsnelheid 9 km/h.

De resultaten van deze analyse worden weergegeven onder de vorm van hittekaarten (heatmaps) waarbij op de verticale as de baanafstand van de sectie langsheen de vaarwegas weergegeven wordt en op de horizontale as de tijd. Aan de linkerkant van de figuren wordt een afzonderlijke heatmap weergegeven voor het theoretische profiel (deze heatmap heeft geen tijdsvariatie en dus geen horizontale variatie).

Voor een aantal cases wordt een meer gedetailleerde analyse gepresenteerd waarbij onder andere de oeversecties weergegeven worden. Een voorbeeld hiervan wordt weergegeven in Figuur 35. De oeversecties worden steeds weergegeven vanuit het perspectief van een opvarend schip. Hierbij stemt de oostelijke oever (rechteroever) van het kanaal overeen met de negatieve dwarsafstanden en dus de linkerkant van het weergegeven profiel en de westelijke oever met de rechterzijde van de figuren.

4.1 Analyse van de bodem

De analyse van de bodem wordt uitgevoerd door de beschikbare breedte van de vaarweg te evalueren op de dieptes 13.5 m en 12.5 m en op basis van de maximale diepte van de sectie. Voor enkele karakteristieke secties waarbij afwijkende resultaten waargenomen worden, wordt de sectie in meer detail geanalyseerd.

4.1.1 Algemene analyse bodembreedte op h= 13.5 m KP

De hittekaart voor de bodembreedte op -13.5 m wordt weergegeven in Figuur 33 en wordt bekomen door de afstand van de aslijn tot de bakboord en stuurboord dieptelijn bij elkaar op te tellen.

Figuur 33 illustreert dat voor het theoretische profiel op Nederlands grondgebied de breedte van de bodem op 13.5 m diepte inderdaad vrij goed overeenstemt met de minimale breedte gelijk aan 62 m. Om dit beter te evalueren biedt **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.** een grafiek van deze parameter langsheen het kanaal voor het theoretische profiel. Uit deze figuur blijkt dat er op het Nederlandse grondgebied drie locaties blijken te zijn waarop het theoretische profiel smaller wordt dan 62 m (maar wel steeds groter dan 60 m).

Deze locaties stemmen overeen met de brug Sluiskil (-9.8 km), de Bocht van Sluiskil (-7 km) en afwaarts de brug Sas van Gent (-2.5 km). Rekening houdend met de melding in Ministerie van Openbare Werken & Ministerie van Verkeer en Waterstaat (1968) dat er een bochtverbreding van 7 m dient toegepast te worden in de bochten is het opmerkelijk dat het theoretische profiel in de bocht van Sluiskil smaller blijkt dan 62 m.

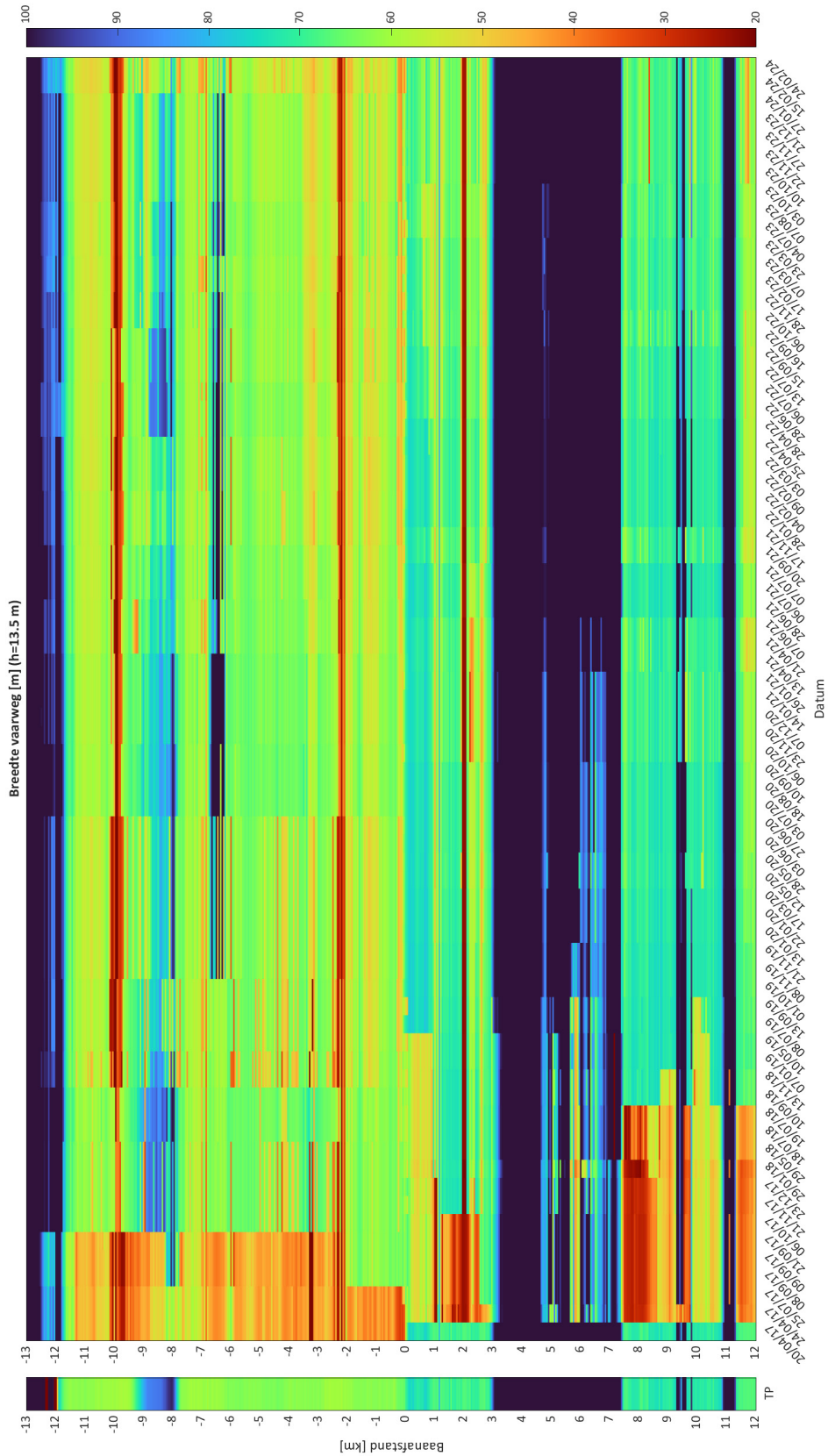
Voor het Vlaamse deel van het kanaal blijkt de bodembreedte op diepte 13.5 m steeds groter te zijn dan 68 m. Dit is logisch aangezien dit profiel gegeneerd werd op basis van de baggercontouren die overal een minimale breedte gelijk aan 68 m hebben. Dit is ook het geval voor de baggercontouren te Zelzate waar volgens de typeprofielen uitgegaan wordt van een breedte gelijk aan 62 m.

Wanneer in Figuur 33 de hittekaarten voor de historische peilingen beschouwd worden dan blijkt al snel dat de beschikbare breedte op diepte 13.5 m op verschillende locaties belangrijk kleinere waarden vertoonde dan de 62 m of 68 m die gedefinieerd werden in de typeprofielen. Bovendien blijkt voor het Nederlandse grondgebied de toestand in de eerste helft van 2017 merkelijk ongunstiger dan bij latere peilingen. Voor het Vlaamse grondgebied is een gelijkaardige verbetering zichtbaar sinds ca. zomer 2018.

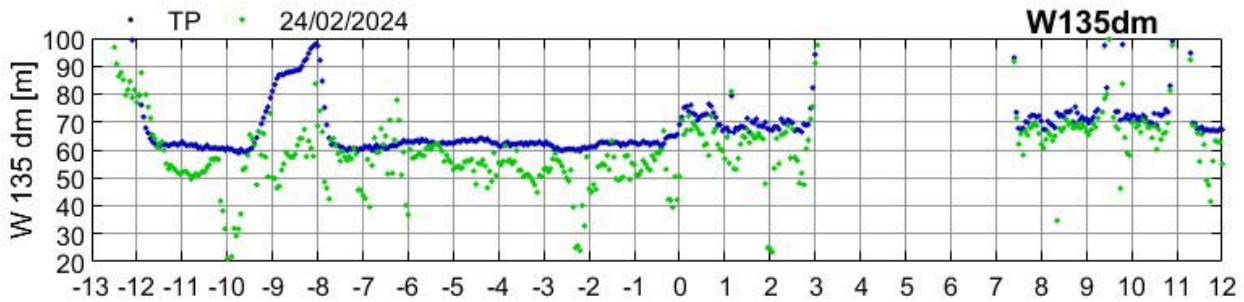
Zo wordt bijvoorbeeld in Figuur 34 de evolutie van deze parameter over het kanaal weergegeven voor de meest recente peilingen (conditie op 24/02/2024) die deel uitmaakten van de historische analyse. Op basis van deze figuur (en mede op basis van de heatmap) blijkt dat er verschillende locaties zijn waarop de bodembreedte slechts ca. 20 m bedroeg. Onderstaande locaties kunnen geïdentificeerd waarvoor de bodembreedte in belangrijke mate afweek van de minimale waarden uit het theoretische profiel:

- -9.95 km: Brug Sluiskil;
- -6.85 km: Bocht Sluiskil (Driekwart, afwaarts Autriche)
- -6.00 km: Sluiskil (opwaarts Autriche)
- -2.20 km: Brug Sas van Gent
- -0.15 km: Grens
- +2.05 km: Tunnel Zelzate
- +8.35 km: Opwaarts Moervaart
- +9.75 km: Ghent Commodity Terminal
- 11.75 km: Aanloop Sifferdok

Voor de bovenvermelde plaatsen wordt in de volgende paragrafen de bodemconditie meer in detail besproken. Hiervoor worden een aantal tijdsmomenten van het dwarsprofiel gepresenteerd net als de tijdsevolutie van de sectie op de waterdieptes 12.5 m en 13.5 m.



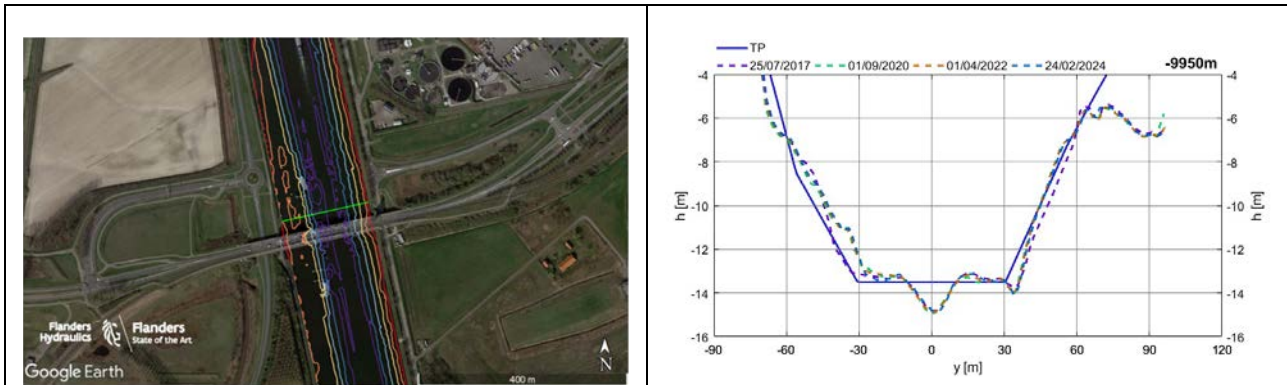
Figuur 33 – Hittekaart voor de bodembreedte van het kanaal op diepte 13.5 m



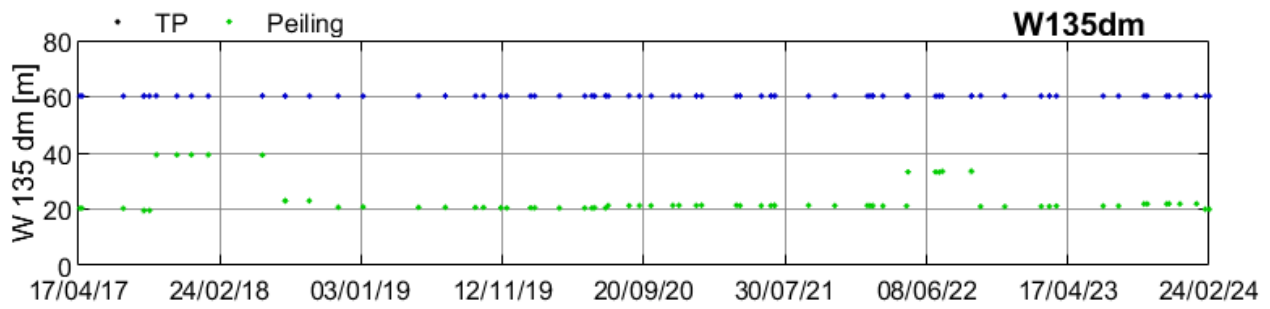
Figuur 34 – Evolutie van de kanaalbreedte op diepte 13.5 m langsheen het kanaal voor de conditie op 24/02/2024 en voor het theoretische profiel (TP)

-9.95 km: Brug Sluiskil

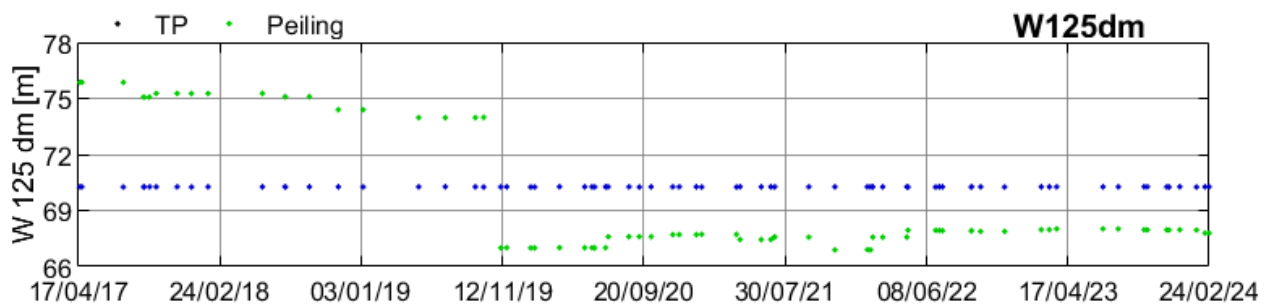
Voor de brug passages spreekt het voor zich dat de schepen steeds op een centrale positie door de 60 m brede doorvaartopening zullen varen. Hierdoor ontstaat een belangrijke erosie in het midden van de brug waar waterdieptes tot ca. 15.0 m zichtbaar zijn (zie Figuur 35). Een bijkomend gevolg is de sedimentatie van de oeverknikken waardoor de beschikbare breedte op een waterdiepte gelijk aan 13.5 m (met uitzondering van een korte periode in 2017-2018) steeds beperkt is tot ca. 20 m (zie Figuur 36). Ook voor wat betreft de vaarwegbreedte op diepte 12.5 m blijkt deze sinds 2020 smaller is dan wat gedefinieerd is in het theoretische profiel. Het verschil is op deze diepte wel beperkt tot ca. 4 m.



Figuur 35 – Positie van sectie -9.95 km te Brug Sluiskil ten opzichte van bathymetrie 24/02/2024 (links) en weergave van historische dwarssecties (rechts)



Figuur 36 – Tijdsevolutie van de breedte van sectie -9.95 km te Brug Sluiskil op diepte 13.5 m



Figuur 37 – Tijdsevolutie van de breedte van sectie -9.95 km te Brug Sluiskil op diepte 12.5 m

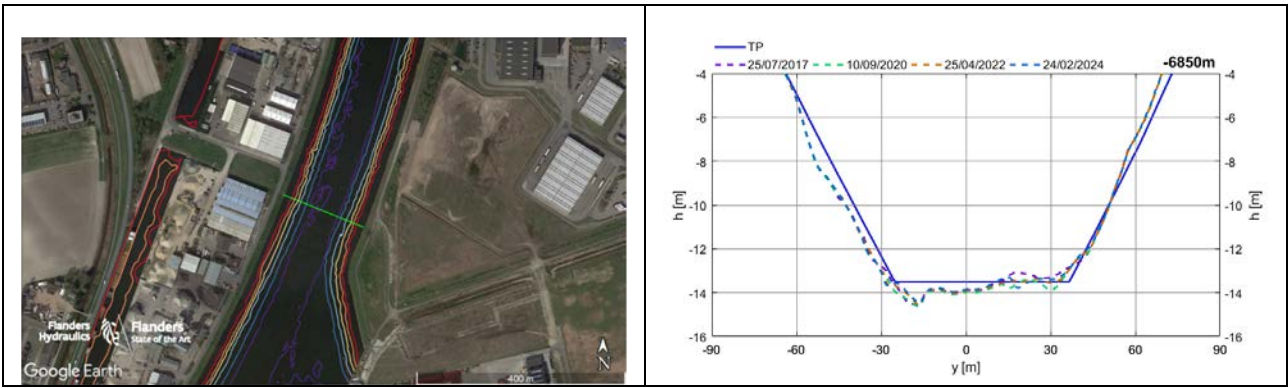
-6.85 km: Bocht Sluiskil (Driekwart, afwaarts Autriche)

In het meest opwaartse deel van de Bocht van Sluiskil (Figuur 38) blijkt er een doorheen de tijd vrij constante vernauwing van de vaarweg plaats te vinden op diepte 13.5 m (Figuur 39). Sinds 2017 varieert de breedte op 13.5 m tussen 37 m en 49 m. Deze versmalling van de vaarweg op diepte 13.5 m is het gevolg van een verondieping van de binnenbocht in deze zone.

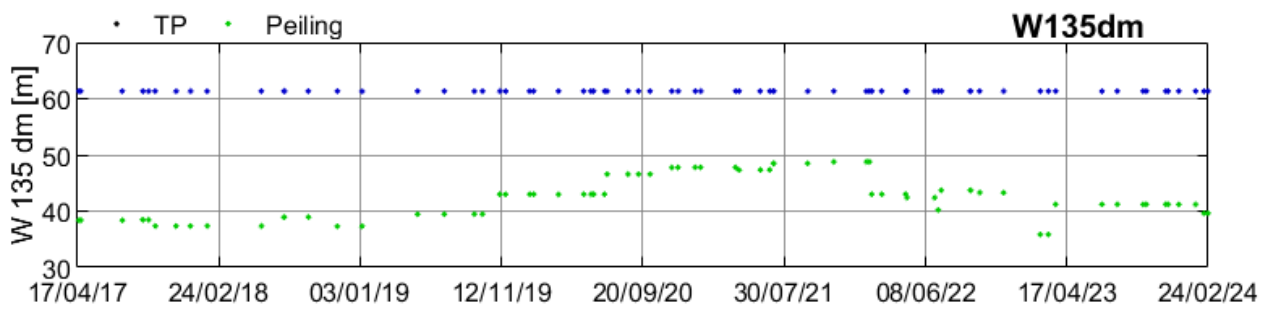
Op basis van de diepste zone in de gemeten profielen kan aangenomen worden dat maatgevende scheepvaart op deze locatie eerder in het oostelijke deel van de bocht zal varen. De oostelijke erosie (verdieping) van de sectie kan ook bepaald worden door de drifthoek van de schepen bij het bochten waarbij het achterschip in de richting van de oostelijke oever gericht zal zijn en de schroefstraal mogelijks in deze zone een grotere erosie veroorzaakt. Over het algemeen dient wel opgemerkt worden dat de verdieping van de sectie door erosie in deze zone relatief beperkt is (waterdiepte tot ca. 14.0 m).

Op basis van Figuur 40 blijkt dat de breedte van de vaarweg op diepte 12.5 m dan weer steeds beperkt ruimer is dan deze gedefinieerd in het theoretische profiel.

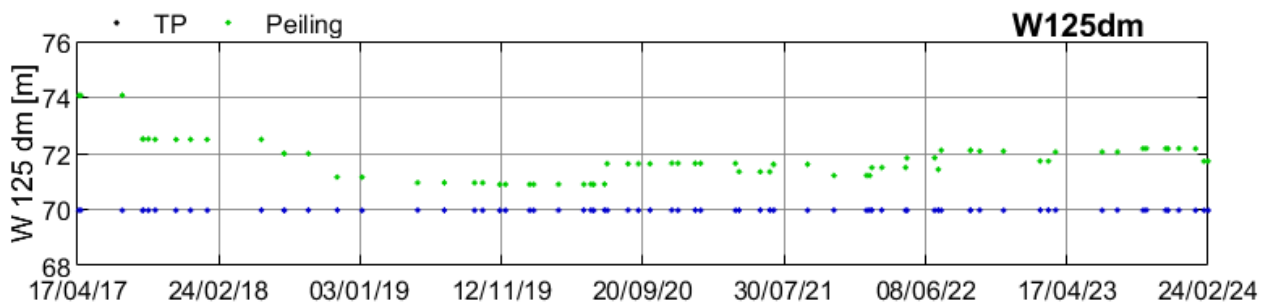
De bocht van Sluiskil (al dan niet gecombineerd met de zuidelijke Autriche-haven) kan beschouwd worden als een van de belangrijkste knelpunten voor de toegankelijkheid van het kanaal. Het is hierbij opmerkelijk dat net op deze nautisch uitdagende locatie (aansluiting tussen bocht en dok) de secties een versmalde vaarwegbreedte vertonen (dit zou het gevolg zijn van kabels aan de westelijke oever).



Figuur 38 – Positie van sectie -6.85 km te Bocht Sluiskil ten opzichte van bathymetrie 24/02/2024 (links) en weergave van historische dwarssecties (rechts)



Figuur 39 – Tijdsevolutie van de breedte van sectie -6.85 km te Bocht Sluiskil op diepte 13.5 m

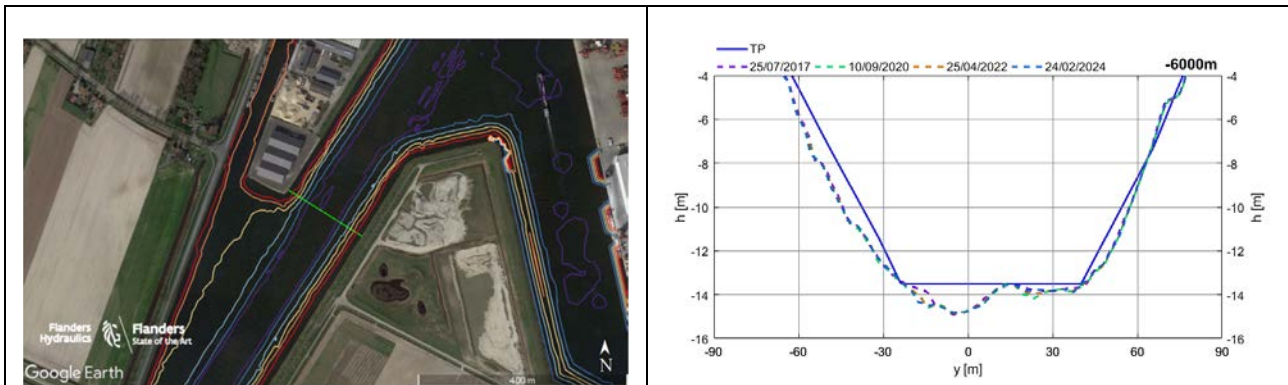


Figuur 40 – Tijdsevolutie van de breedte van sectie -6.85 km te Bocht Sluiskil op diepte 12.5 m

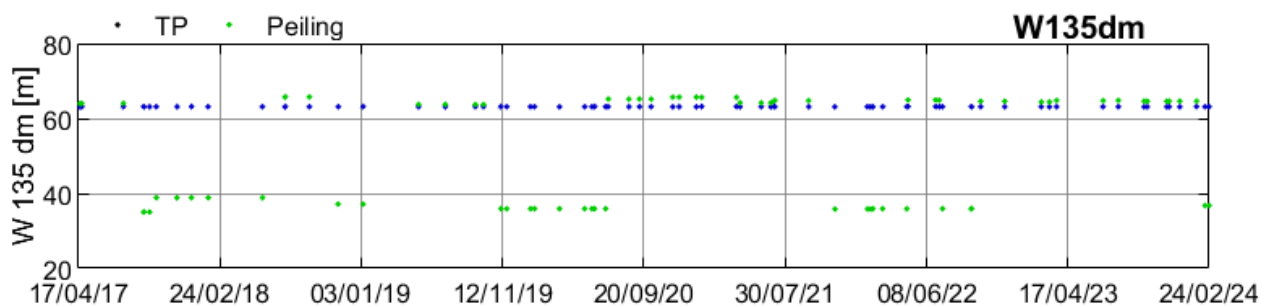
-6.00 km: Sluiskil (opwaarts Autriche)

Ook opwaarts de Autriche-haven (zie Figuur 41) is er een korte smalle kanaalsectie waarbij gebeurlijk erg kleine vaarwegbreedtes (tot 35 m) op diepte 13.5 m opgemeten werden (zie Figuur 42). Daar tegenover staat dat de vaarwegbreedtes op diepte 12.5 m eerder ruim zijn in deze zone (ca. 80 m).

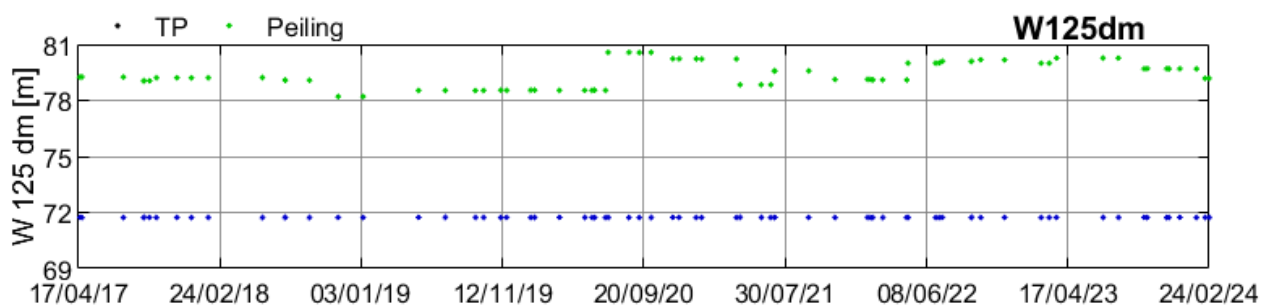
Er wordt geconcludeerd dat de kleine vaarwegbreedtes op diepte 13.5 m vermoedelijk een beperkte impact hebben op de manoeuvreerbaarheid van de schepen aangezien de versmalling het gevolg is van erg kleine afwijkingen van de 13.5 m diepte, doordat de sectie een belangrijke overdiepte vertoont en door de ruime vaarwegbreedte op diepte 12.5 m. Deze conclusie zal later bevestigd worden bij de analyse van de oevereffecten.



Figuur 41 – Positie van sectie -6.00 km te Sluiskil (opwaarts Autriche) ten opzichte van bathymetrie 24/02/2024 (links) en weergave van historische dwarssecties (rechts)



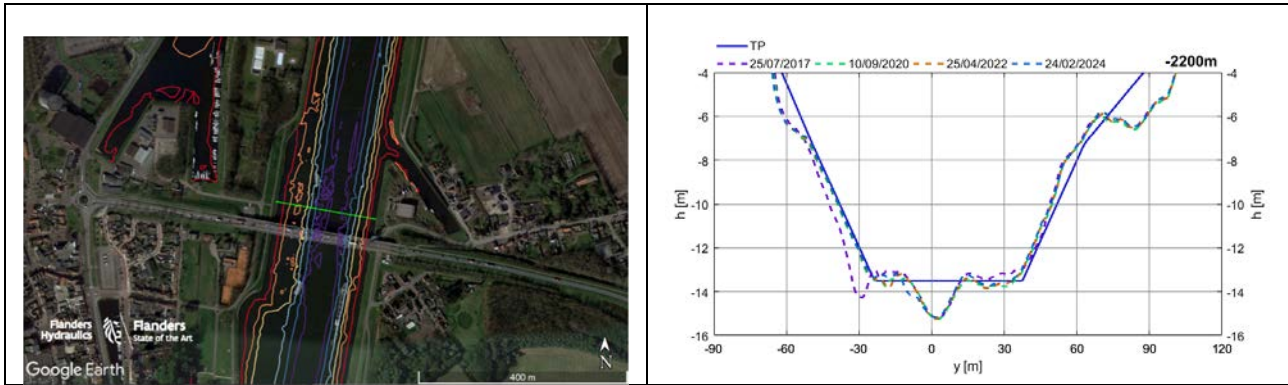
Figuur 42 – Tijdsevolutie van de breedte van sectie -6.00 km te Sluiskil (opwaarts Autriche) op diepte 13.5 m



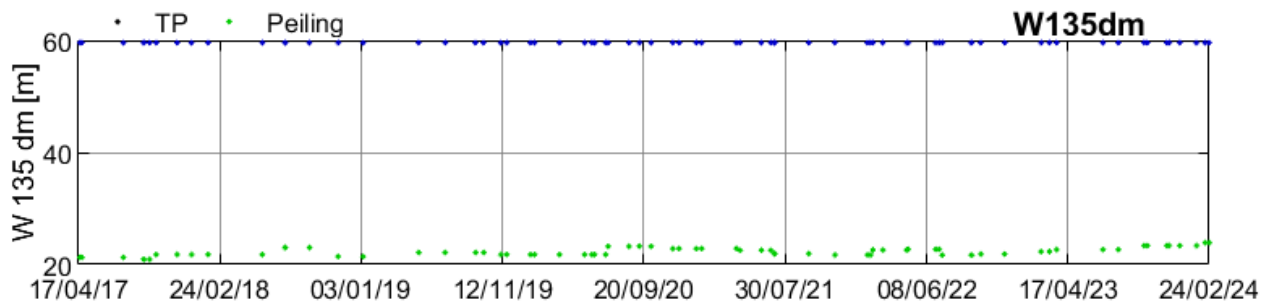
Figuur 43 – Tijdsevolutie van de breedte van sectie -6.00 km te Sluiskil (opwaarts Autriche) op diepte 12.5 m

-2.20 km: Brug Sas van Gent

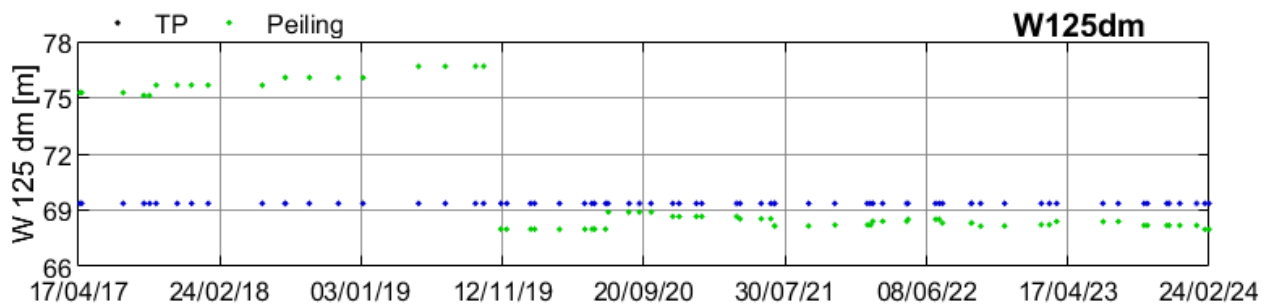
Voor de brug te Sas van Gent geldt een gelijkaardige analyse als voor de brug te Sluiskil, waarbij de scheepvaart een belangrijke erosie en verdieping veroorzaakt centraal in de brugopening (Figuur 44) waardoor de vaarwegbreedte op diepte 13.5 m in belangrijke mate afwijkt van de ontwerpwaarde (Figuur 45). Te Sas van Gent blijkt ook de vaarwegbreedte op diepte 12.5 m (Figuur 46) sinds ca. 2020 niet langer te voldoen aan de ontwerpwaarde. Dit lijkt met name veroorzaakt door een westelijke afwijking van het theoretische profiel.



Figuur 44 – Positie van sectie -2.20 km te Brug Sas van Gent ten opzichte van bathymetrie 24/02/2024 (links) en weergave van historische dwarssecties (rechts)



Figuur 45 – Tijdsevolutie van de breedte van sectie -2.20 km te Brug Sas van Gent op diepte 13.5 m



Figuur 46 – Tijdsevolutie van de breedte van sectie -2.20 km te Brug Sas van Gent op diepte 12.5 m

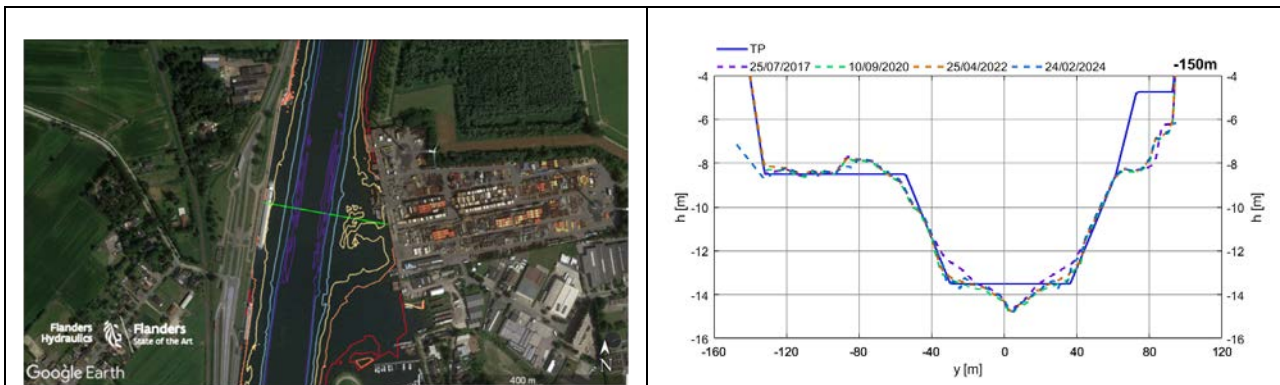
-0.15 km: Grens

Ter hoogte van de grens kent het kanaal een relatief grote breedte (Figuur 48). Toch blijkt de vaarwegbreedte op diepte -13.5 m stelselmatig af te nemen sinds 2018 (Figuur 49). In 2017 bleek de vaarwegbreedte op diepte -13.5 m nog te voldoen aan de ontwerpwaarde gelijk aan 62 m waarbij in de meeste recente peiling deze vaarwegbreedte nog slechts 40 m bedraagt. Een gelijkaardige tendens kan waargenomen worden voor de vaarwegbreedtes bij diepte 12.5 m (Figuur 50). Ook op deze diepte blijkt de vaarwegbreedte sinds 2023 niet langer te voldoen aan de ontwerpwaarde en slechts 73 m te bedragen.

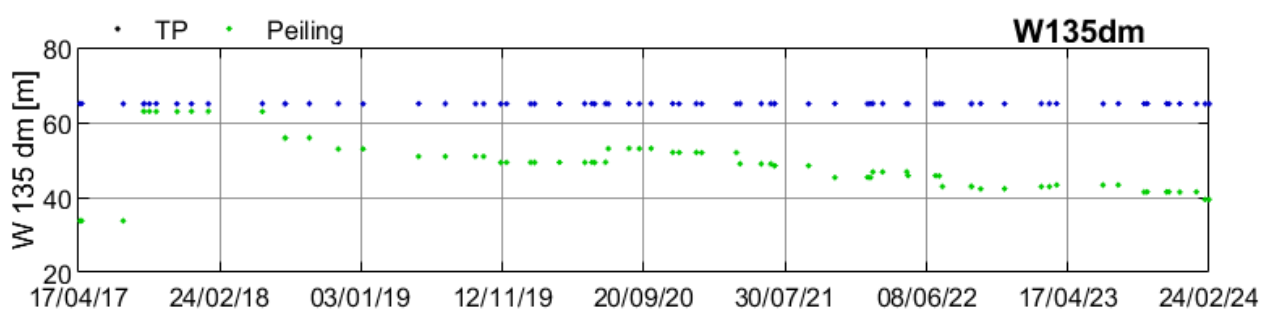
Figuur 48 toont door middel van de paarse dieptelijn (13.5 m) aan dat de versmalling van de vaargeul zich over een relatief kleine afstand manifesteert. Deze zone bevindt zich precies benoorden de Vlaamse baggercontouren (overeenkomstig de grenspaal op linkeroever, zie **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.**). De noordzijde van de zone lijkt overeen te stemmen met de grenspaal op de rechteroever. Mogelijks is de verminderde vaarwegbreedte in deze zone het gevolg van een verminderd onderhoud door een verschillende interpretatie van de grens door beide vaarwegbeheerders.



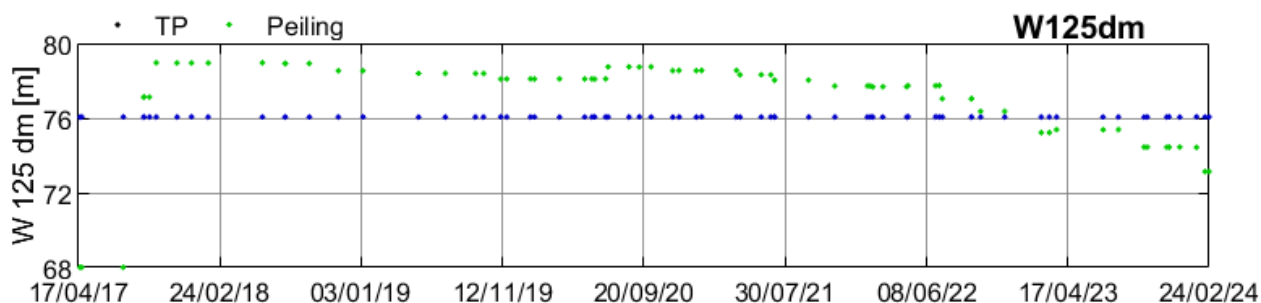
Figuur 47 – Illustratie van de verschillende positie van de landsgrens op linkeroever en rechteroever op basis van Google Earth in combinatie met het meest afwaartse baggervak van afdeling Maritieme Toegang



Figuur 48 – Positie van sectie -0.15 km te Grens ten opzichte van bathymetrie 24/02/2024 (links) en weergave van historische dwarssecties (rechts)



Figuur 49 – Tijdsevolutie van de breedte van sectie -0.15 km te Grens op diepte 13.5 m



Figuur 50 – Tijdsevolutie van de breedte van sectie -0.15 km te Grens op diepte 12.5 m

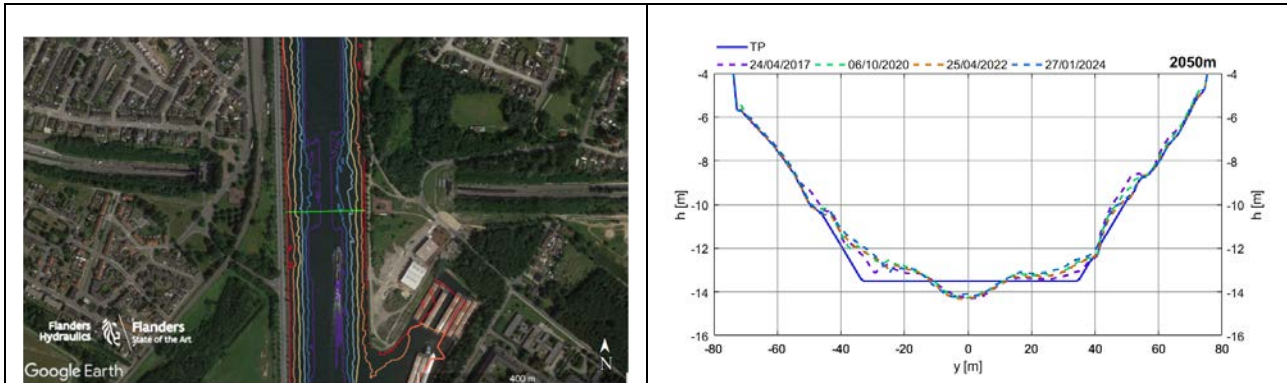
+2.05 km en 2.00 km: Tunnel Zelzate

Bij de bespreking van de Tunnel van Zelzate dient opnieuw opgemerkt te worden dat het Vlaamse theoretische profiel zoals opgesteld op basis van de baggercontouren ruimer is dan het typeprofiel waarvoor het kanaal te Zelzate ontworpen is (zie Tabel 13). Op basis van het typeprofiel voor Zelzate geldt een minimale vaarwegbreedte gelijk aan 62 m op diepte 13.5 m en 72 m op diepte 12.5 m.

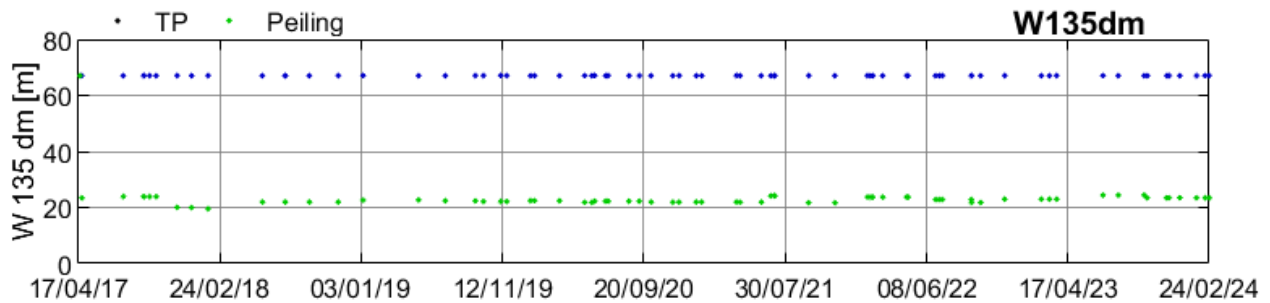
De tunnel van Zelzate blijkt een erg nauwe sectie (Figuur 51) waar de kanaaldiepte slechts over een erg beperkte breedte gegarandeerd wordt (Figuur 52). De breedte op diepte 13.5 m is bovendien erg constant in de tijd en bedraagt steeds slechts ca. 20 m.

Voor de analyse van de vaarwegbreedte op diepte 12.5 m worden er twee secties ter hoogte van Zelzate gepresenteerd. De secties die overeenstemden met de laagste vaarwegbreedte op 13.5 m (2.05 km) en de met de laagste vaarwegbreedte op 12.5 m (2.00 km) bleken immers verschillend.

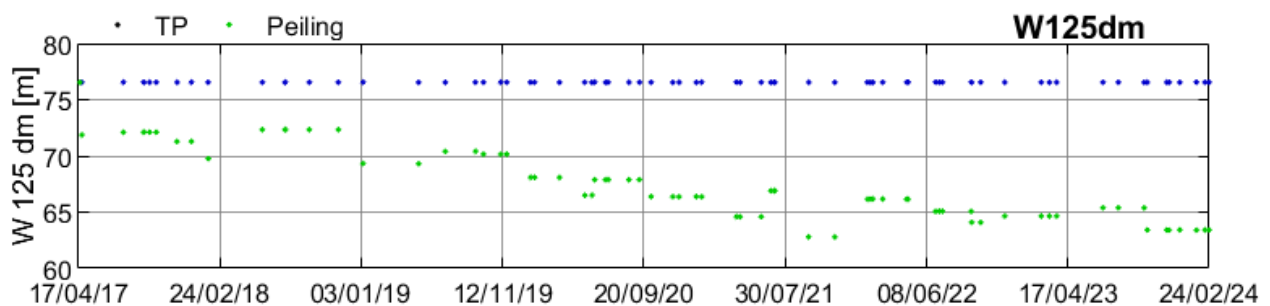
Voor de sectie 2.05 km blijkt de breedte van de vaarweg op diepte 12.5 m doorheen de jaren stelselmatig af te nemen (Figuur 53). Waar deze breedte tot en met 2018 voldeed aan de minimale breedte gelijk aan 72 m blijkt deze sinds 2019 stelselmatig te dalen tot ca. 64 m op vandaag. Voor de sectie centraal boven de tunnel echter (sectie 2.00 km) blijkt de breedte op diepte 12.5 m constant doorheen de tijd en gemiddeld ca. 55 m te bedragen. Dit is de smalste kanaalconditie op diepte 12.5 m die op basis van de historische analyse waargenomen werd. Rekening houdend met de verwachte squat van schepen met diepgang 12.5 m is contact met de bodem op deze locatie een belangrijk aandachtspunt.



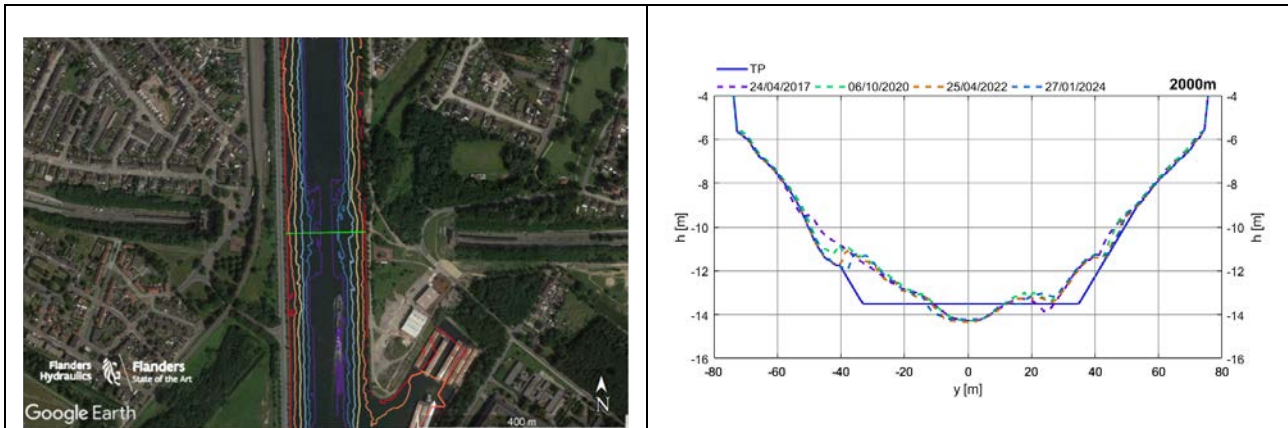
Figuur 51 – Positie van sectie 2.05 km te Tunnel Zelzate ten opzichte van bathymetrie 14/01/2021 (links) en weergave van historische dwarssecties (rechts)



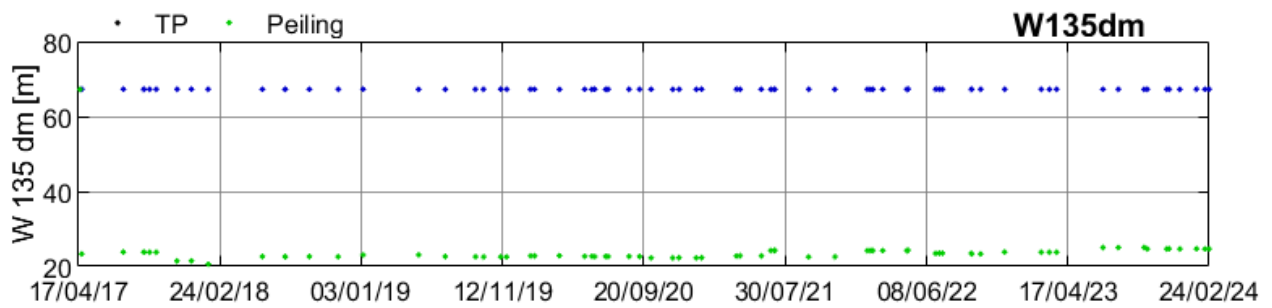
Figuur 52 – Tijdsevolutie van de breedte van sectie 2.05 km te Tunnel Zelzate op diepte 13.5 m



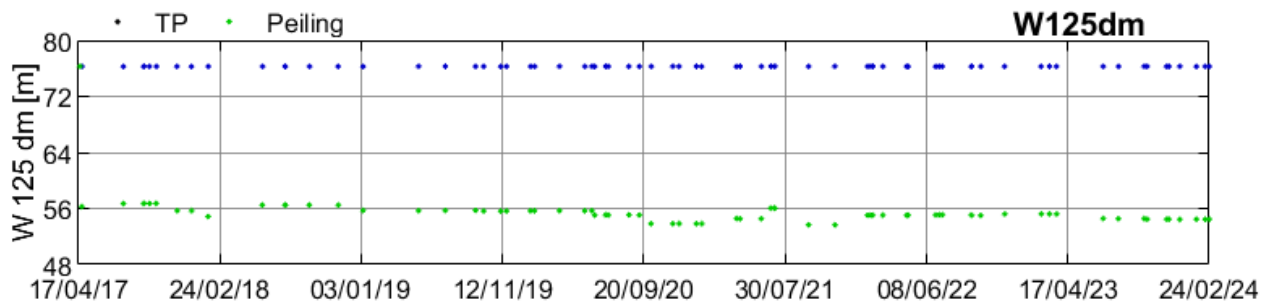
Figuur 53 – Tijdsevolutie van de breedte van sectie 2.05 km te Tunnel Zelzate op diepte 12.5 m



Figuur 54 – Positie van sectie 2.00 km te Tunnel Zelzate ten opzichte van bathymetrie 14/01/2021 (links) en weergave van historische dwarssecties (rechts)



Figuur 55 – Tijdsevolutie van de breedte van sectie 2.00 km te Tunnel Zelzate op diepte 13.5 m



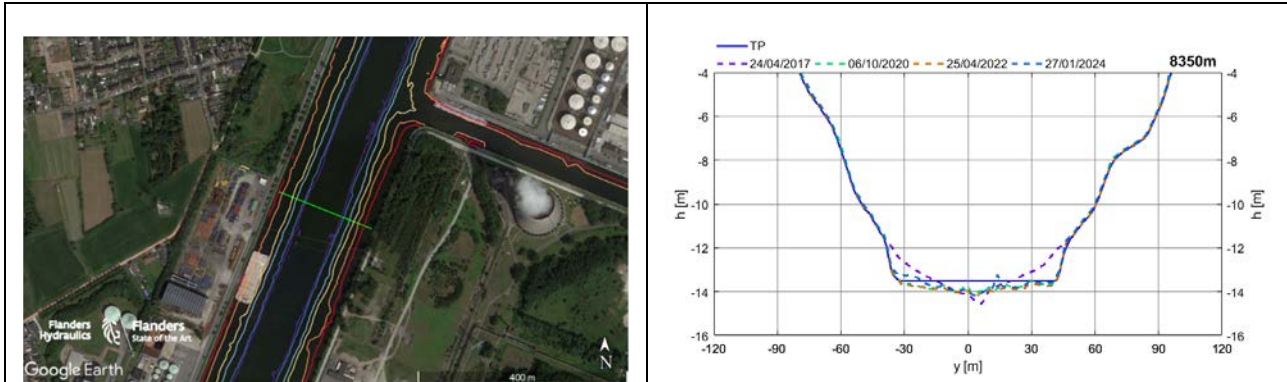
Figuur 56 – Tijdsevolutie van de breedte van sectie 2.00 km te Tunnel Zelzate op diepte 12.5 m

+8.35 km: Opwaarts Moervaart

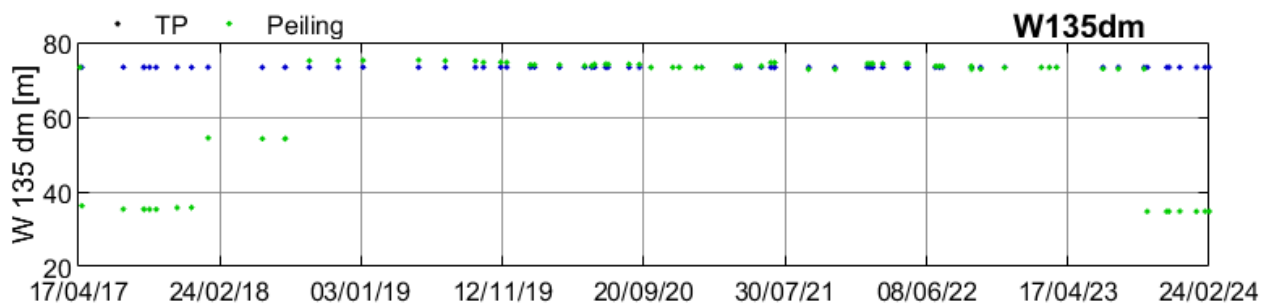
Voor de kanaalsectie opwaarts de Moervaart blijkt er voor 2019 een belangrijke afwijking van de vaarwegbreedtes op beide onderzochte dieptes waarneembaar. Sinds 2019 blijkt deze zone echter goed onderhouden te worden getuige de gemeten vaarwegbreedtes die goed overeenstemmen met de vaarwegbreedtes in het theoretische profiel.

In de meest recente peilingen echter blijkt een versmalling van de vaarwegbreedte op diepte 13.5 m die niet langer 68 m bedraagt, maar slechts 38 m. Deze belangrijke verandering blijkt echter veroorzaakt door een erg beperkte afwijking van de ontwerpdiepte (13.5 m) opgemeten in de meest recente peiling op Vlaams grondgebied.

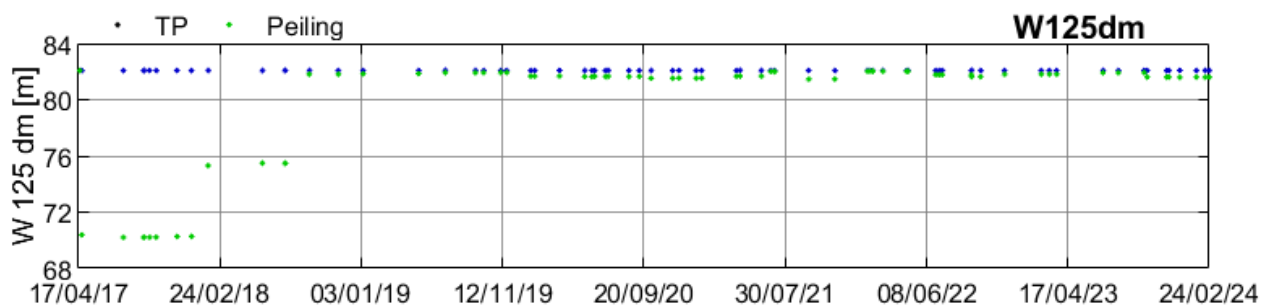
De vaarwegbreedte op diepte 12.5 m blijkt sinds 2019 goed overeen te stemmen met de ontwerpwaarde uit het opgestelde theoretische profiel. Op basis hiervan en mede door de eerder beperkte verondieping van de bodembreedte op diepte 13.5 m wordt aangenomen dat de verminderde vaarwegbreedte die vastgesteld werd op diepte 13.5 m geen significante verslechtering van het vaarcomfort zal meebrengen.



Figuur 57 – Positie van sectie 8.35 km opwaarts Moervaart ten opzichte van bathymetrie 14/01/2021 (links) en weergave van historische dwarssecties (rechts)



Figuur 58 – Tijdsevolutie van de breedte van sectie 8.35 km opwaarts Moervaart op diepte 13.5 m

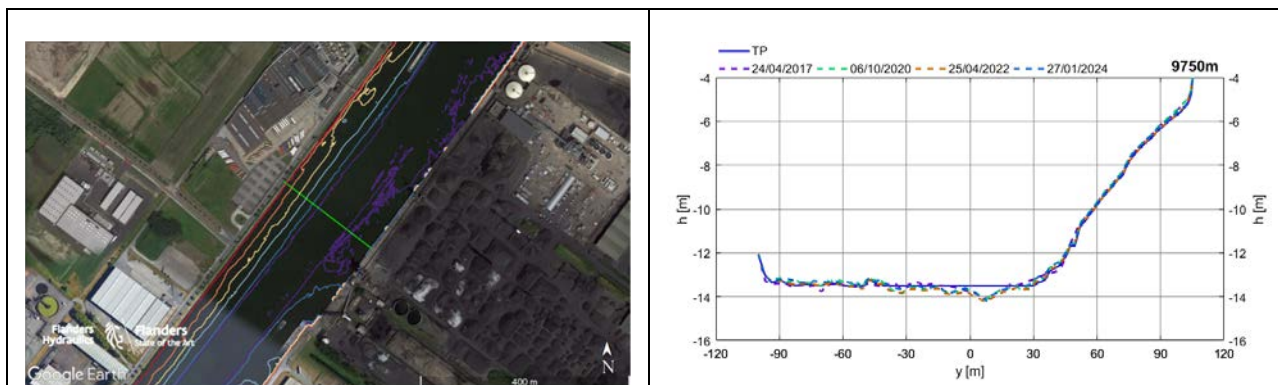


Figuur 59 – Tijdsevolutie van de breedte van sectie 8.35 km opwaarts Moervaart op diepte 12.5 m

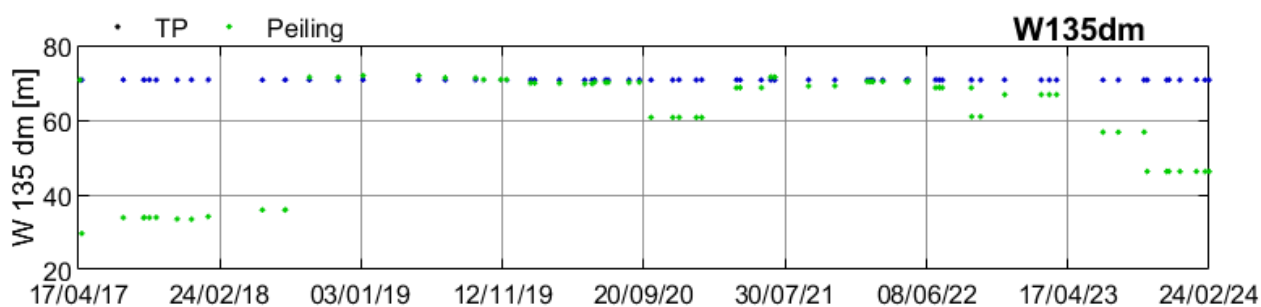
+9.75 km: Ghent Commodity Terminal

Ook te Ghent Commodity Terminal (Figuur 60) blijkt de verminderde vaarwegbreedte op diepte 13.5 m zoals waargenomen in de meest recente peilingen (tot ca. 45 m, zie Figuur 61) het gevolg van een erg beperkte verondieping in deze zone (waarbij de bodem slechts heel beperkt boven de 13.5 m diepte uitkomt). De breedtes op 12.5 m diepte zijn in deze zone erg ruim en blijken ook steeds goed benaderd te worden door de werkelijke condities (Figuur 62).

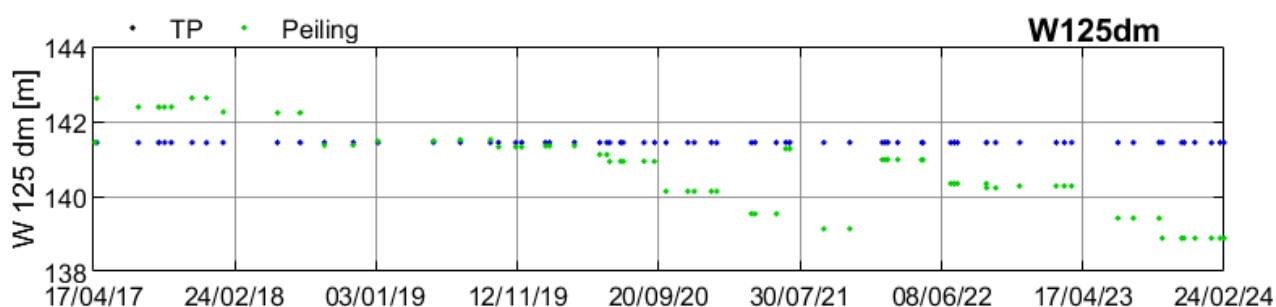
De waargenomen versmalling van de vaarweg op -13.5 m wordt in deze zone niet relevant geacht.



Figuur 60 – Positie van sectie 9.75 km te Ghent Commodity Terminal ten opzichte van bathymetrie 14/01/2021 (links) en weergave van historische dwarssecties (rechts)



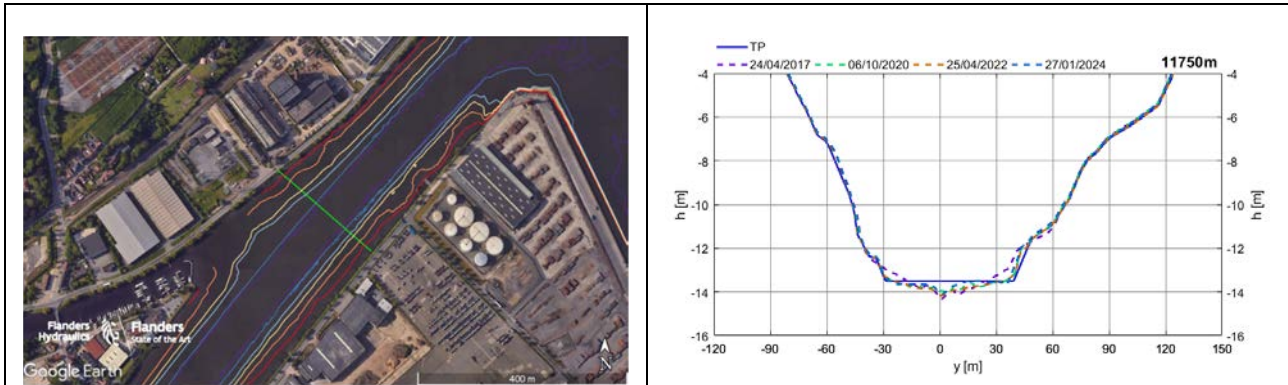
Figuur 61 – Tijdsevolutie van de breedte van sectie 9.75 km te Ghent Commodity Terminal op diepte 13.5 m



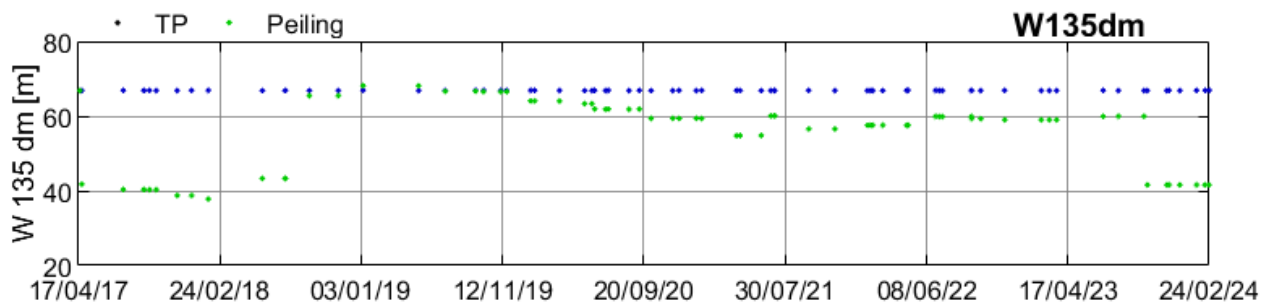
Figuur 62 – Tijdsevolutie van de breedte van sectie 9.75 km te Ghent Commodity Terminal op diepte 12.5 m

11.75 km: Aanloop Sifferdok

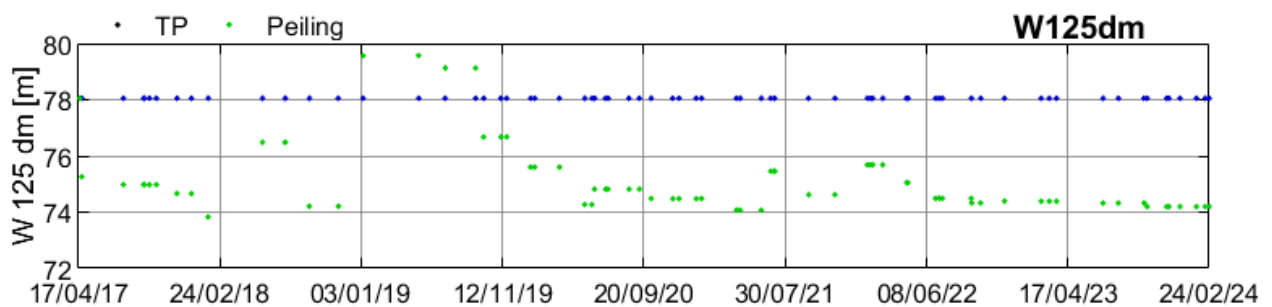
Halverwege het Mercator- en Sifferdok blijkt de vaarwegbreedte sinds 2020 zowel op diepte 13.5 m als op diepte 12.5 m stelselmatig smaller dan de ontwerpwaarden op basis van het typeprofiel voor het Vlaamse grondgebied. De uitschieter voor de erg beperkte vaarwegbreedte op diepte 13.5 voor meest recente peiling is opnieuw het gevolg van een erg beperkte schending van de ontwerpdiepte aan de westelijke oever en is niet significant.



Figuur 63 – Positie van sectie 11.75 km tussen Mercator en Sifferdok ten opzichte van bathymetrie 14/01/2021 (links) en weergave van historische dwarssecties (rechts)



Figuur 64 – Tijdsevolutie van de breedte van sectie 11.75 km tussen Mercator en Sifferdok op diepte 13.5 m



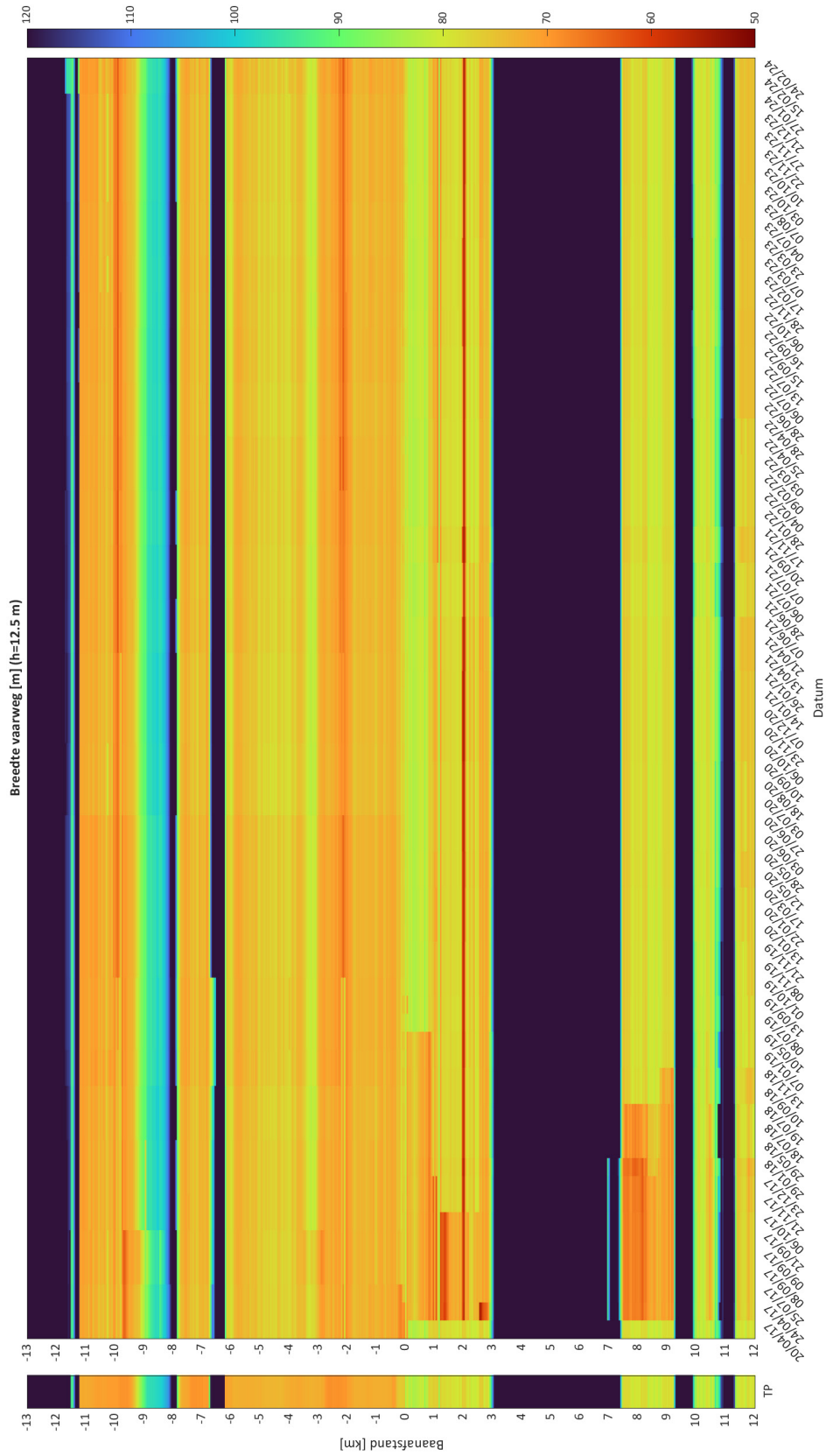
Figuur 65 – Tijdsevolutie van de breedte van sectie 11.75 km tussen Mercator en Sifferdok op diepte 12.5 m

4.1.2 Algemene analyse bodembreedte op h= 12.5 m KP

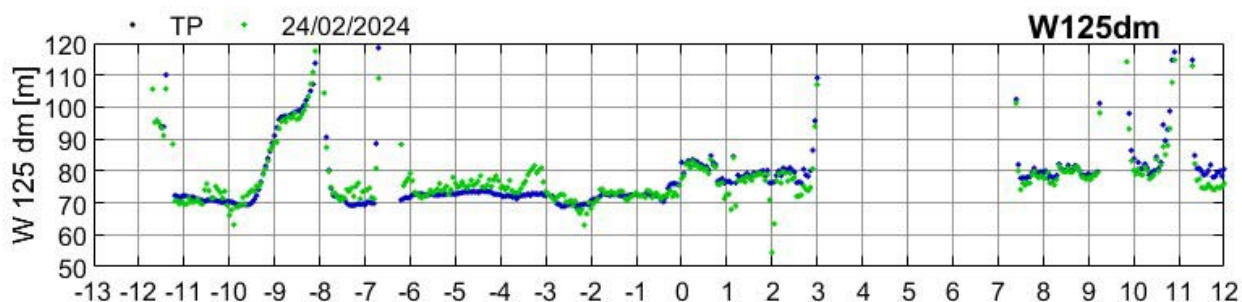
In voorgaande analyse van de vaarwegbreedte op diepte 13.5 m blijkt dat deze vaarwegbreedte vaak sterk beïnvloedt wordt door de kleine verondiepingen (soms enkele centimeters) ten opzichte van de streefdiepte. Om hieraan tegemoet te komen wordt in Figuur 66 de hittekaart weergegeven voor de vaarwegbreedte op diepte 12.5 m. In Figuur 67 wordt deze parameter weergegeven langs het kanaal en enerzijds voor het theoretische profiel en anderzijds voor de meest recente onderzochte peiling.

Deze figuren illustreren de opmerkingen die ook eerder reeds gemaakt werden op basis van de gedetailleerde analyse van enkele locaties langsheen het kanaal:

- De heersende breedtes van de vaarweg op diepte 12.5 m komen over het algemeen goed overeen met de minimale waardes uit de typeprofielen. Dit zijn respectievelijk 69 m, 72 m en 78 m voor het traject te Nederland, Zelzate of Vlaanderen.
- Ter hoogte van de bruggen van Sluiskil (-9.95 km), Sas van Gent (-2.20 km) en Zelzate (+1.1 km) zijn versmallingen van de vaarwegbreedte waarneembaar.
- De meeste beperkte sectie voor wat betreft de vaarwegbreedte op diepte 12.5 m betreft de tunnel te Zelzate (+2.00 km, ca. 55 m)
- Opwaarts het Rodenhuizedok blijkt lokaal (+7.4 km) een versmalling van de vaarwegbreedte waarneembaar. Ook voor de vaarweg tussen Mercatordok en Sifferdok blijkt de vaarwegbreedte op diepte 12.5 m kleiner dan de 78 m overeenkomstig het Vlaamse ontwerpprofiel. Deze breedtes zijn wel ruimer dan de ontwerpprofielen te Nederland of Zelzate.
- Voor 2019 blijken de vaarwegbreedtes op het Vlaamse grondgebied (opwaarts Rodenhuizedok) minder ruim dan vanaf 2020.



Figuur 66 – Hittekaart voor de bodembreedte van het kanaal op diepte 12.5 m

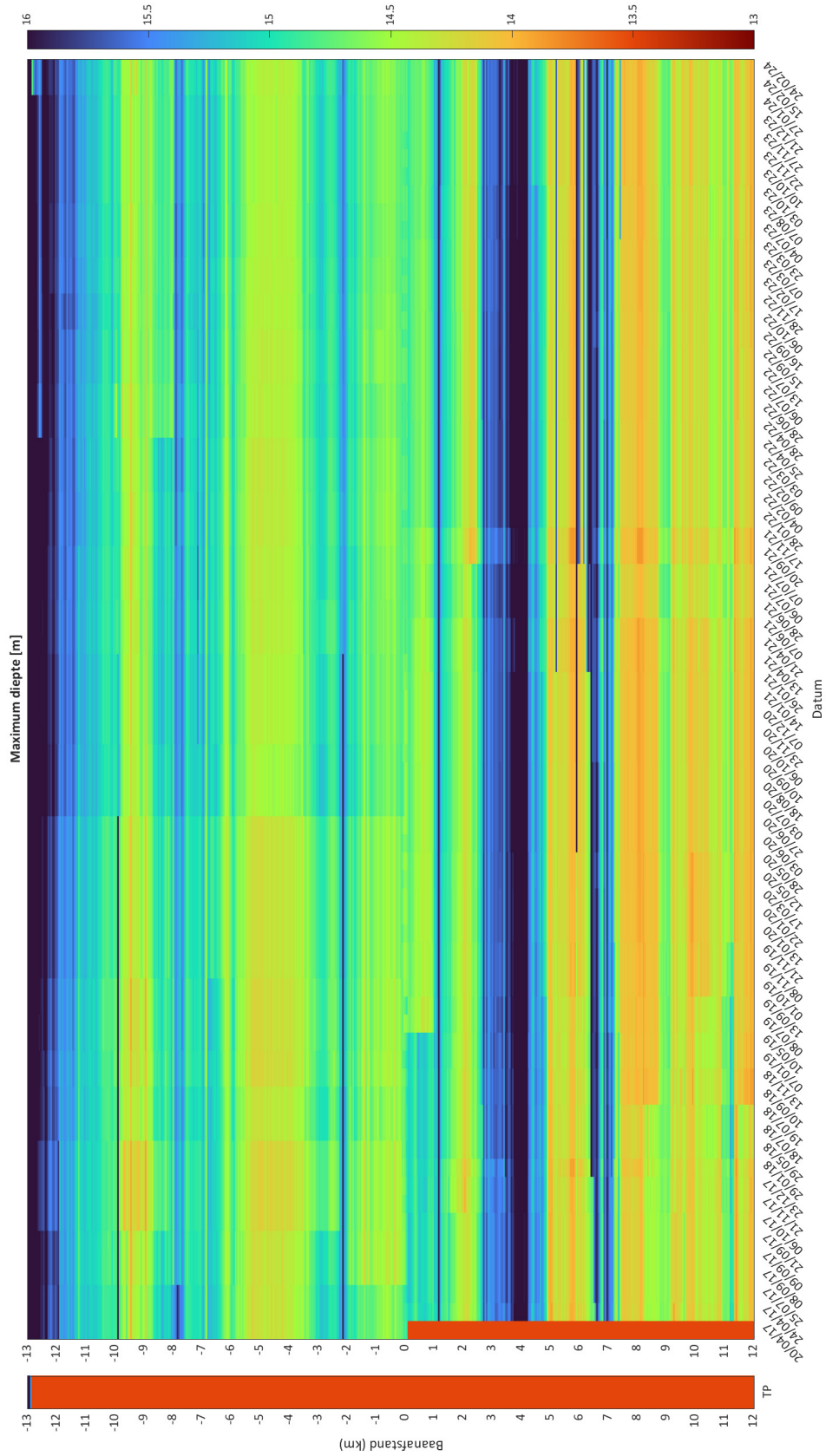


Figuur 67 – Evolutie van de kanaalbreedte op diepte 12.5 m langsheen het kanaal voor de conditie op 24/02/2024

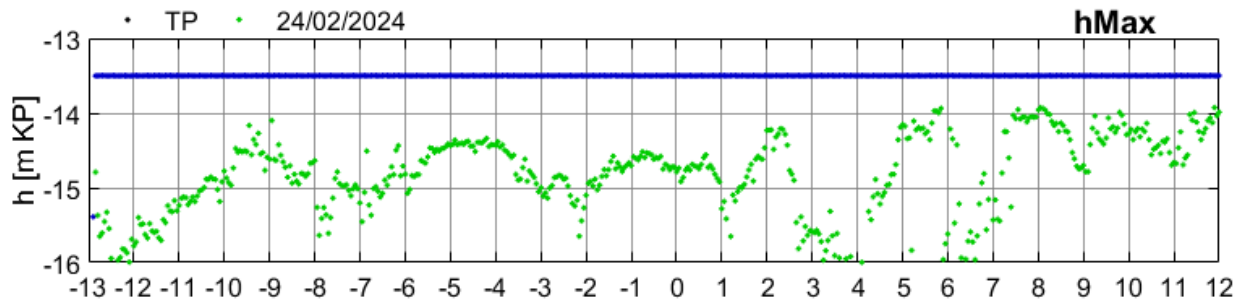
4.1.3 Algemene analyse maximale waterdiepte

In Figuur 68 wordt de hittekaart weergegeven van de maximale waterdiepte die doorheen de onderzochte periode aanwezig was in de verschillende kanaalsecties. Voor het theoretische profiel is deze waarde vanzelfsprekend steeds gelijk aan -13.5 m KP. In Figuur 69 wordt de evolutie van deze parameter langsheen het kanaal weergegeven voor de meest recente peiling die onderzocht werd.

Beide figuren illustreren dat de maximale waterdiepte over de breedte van het kanaal steeds groter is dan de streefdiepte (-13.5 m KP). De verminderde vaarwegbreedte die in de vorige paragrafen opgemerkt werd bij dieptes -12.5 m KP en -13.5 m KP worden bijgevolg gecompenseerd door een grotere kielspeling in het vaarpad van de schepen zoals geïllustreerd voor verschillende voorbeelden weergegeven in §4.1.3. Dit effect blijkt groter op het Nederlandse grondgebied dan op het Vlaamse grondgebied. Dit kan mogelijks verklaard worden door de smallere secties in Nederland waardoor het beschikbare vaarpad voor de schepen ruimer is en door een kleiner aantal diepliggende schepen op het traject opwaarts het Kluzendok.



Figuur 68 – Hittekaart voor de maximale waterdiepte in de secties



Figuur 69 – Evolutie van de maximale diepte langsheen het kanaal voor de conditie op 24/02/2024

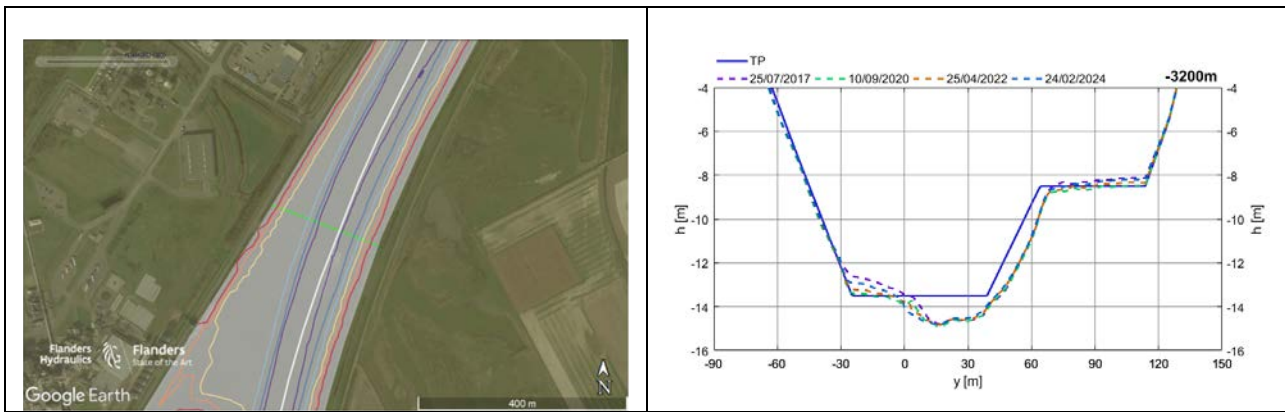
4.2 Analyse van de oevereffecten

In §4.1 werden een aantal geometrische parameters van de oeversecties gepresenteerd en vergeleken met de theoretische profielen die vooropgesteld worden langsheen het kanaal.

Om de impact van de oeversecties op het scheepsgedrag te beoordelen wordt nu de oevereffectenmodellering voor het studieschip met diepgang 12.5 m (zie §2.2) toegepast op de verschillende oeversecties. Dit wordt uitgevoerd door de oever te evalueren voor een aanneembare positie van een schip in de vaarweg. Hiertoe wordt voor elk van de onderzochte bathymetrieën automatisch een optimaal vaartraject berekend op basis van het middelpunt van de vaarwegbreedte op diepte 13.5 m KP. Langsheen dit zogenaamd Dubins-pad worden de oevereffecten van het schip berekend voor een vaarsnelheid gelijk aan 9 km/h (4.8 kn).

4.2.1 Dubins-pad berekening van het vaarpad

In §3.1 werd de aslijn van het kanaal geïntroduceerd. De aslijn is een officiële referentielijn op basis waarvan de baanafstand (of kilometeraanduiding) langsheen het kanaal berekend wordt. Op basis van de analyse bleek echter dat de aslijn niet steeds overeen komt de diepste zone in een sectie en bijgevolg niet overeenkomt met de locatie waar de schepen in realiteit varen. Bovendien blijkt dat de positie van de sectie doorheen de jaren op sommige locatie migreert naar één zijde of in enkele gevallen in belangrijke mate afwijkt van het theoretische profiel. Een voorbeeld van een dergelijke sectie betreft de bocht van Sas van Gent (Figuur 70). Op deze locatie is het vaarwater op de waterlijn relatief ruim maar blijkt de sectie doorheen de jaren te evolueren en bovendien in belangrijke mate af te wijken van het theoretische profiel. Zo blijkt aan de westelijke zijde de oever in realiteit steeds meer naar buiten (westelijker) te liggen dan in het theoretische profiel en blijkt er bovendien aan de oostelijke zijde (de binnenbocht) een verondieping plaats te vinden (met name in de jaren 2017 en 2024). In Figuur 35 worden de verschillende dwarssecties gerefereerd ten opzicht van de aslijn zoals gedefinieerd in §3.1. Hierbij blijkt dat deze aslijn niet overeenkomt met het midden van het theoretische profiel en ook allerminst overeenkomt met de diepe geul die aanwezig is in de verschillende peilingen en waarvan aangenomen kan worden dat daar de schepen in realiteit varen. Dit voorbeeld toont aan dat het beoordelen van de oevereffecten op de aslijn ($y=0$ in Figuur 35) niet altijd gepaard gaat met een realistische beoordeling.



Figuur 70 – Positie van sectie -3.20 km te Bocht Sas van Gent ten opzichte van bathymetrie 24/02/2024 (links) en weergave van historische dwarssecties (rechts)

Om de oevereffecten te evalueren op de locatie waarop verwacht wordt dat het schip zal varen, wordt er per beschikbare bathymetrie een vaarpad bepaald. Deze vaarpadbepaling werd uitgevoerd op basis van de Dubins-methodologie waarbij er elke 50 m langs de aslijn, waypoints gedefinieerd werden in overeenstemming met het midden van de vaarweg op diepte 13.5 m. Hierbij werden enkel deze waypoints weerhouden die zich min of meer in de doorgaande aslijn van het kanaal bevonden (deels manuele selectie).

De Dubins methode (Dubins, 1957) genereert een vaarpad op basis van een set aan opeenvolgende waypoints en hierbij zal men bewaken dat het vaarpad overeenstemt met de verwachte manoeuvreerbaarheid van een schip. Hiervoor wordt weliswaar gebruik gemaakt van een sterk vereenvoudigd manoeuvreermodel dat ontleent wordt aan de robotica. In het Dubins model worden onderstaande beperkingen gedefinieerd:

- L1: minimale boogstraal (m) van het traject (R_{\min});
- L2: minimale afstand (m) tussen twee opeenvolgende bochten (d_{TP}) om oscillaties in het traject te vermijden (optioneel).

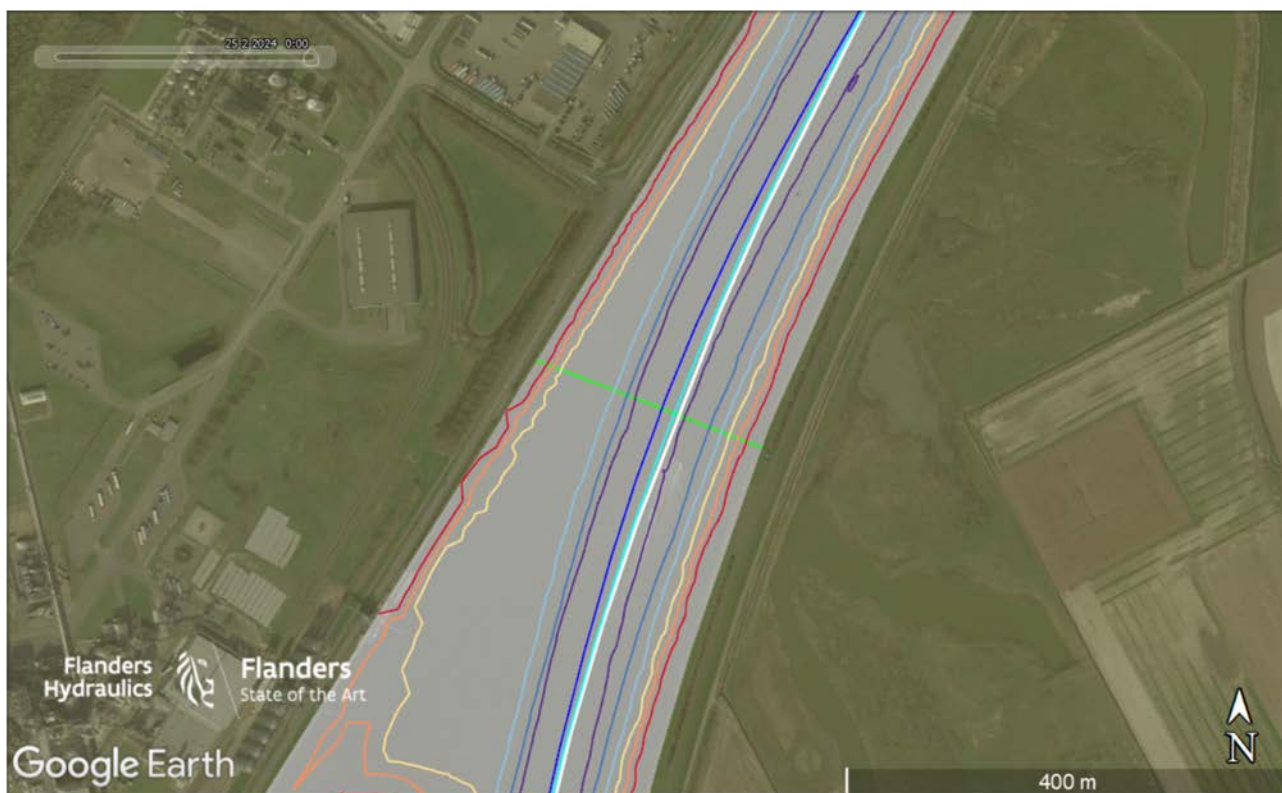
Voor de toepassing in deze studie werd enkel een beperking op de boogstraal gedefinieerd en gelijk gesteld aan 1000 m (ca. vier maal de scheeps lengte).

Door toepassing van de Dubins methode worden de waypoints omgezet in vaarpaden die bestaan uit rechte stukken en bochten waarbij de boogstraal van de bochten steeds groter is dan 1000 m. Het resultaat van de Dubins methode is een vaartraject opgebouwd uit een groot aantal punten. Om deze polylijn te reduceren werd vervolgens een geometrisch vereenvoudiging met minimale afwijking 1 m uitgevoerd door middel van het DP-algoritme (Douglas & Peucker, 1973).

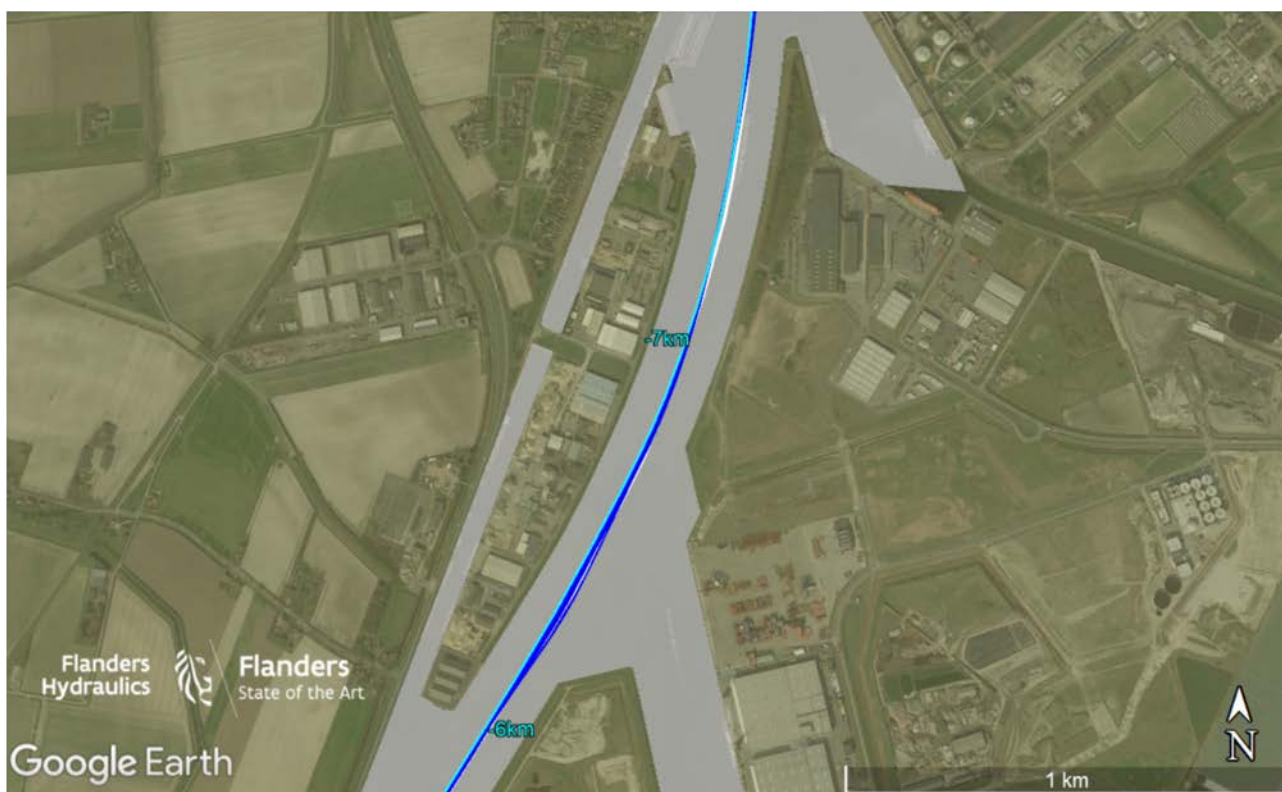
De Dubins methodologie zoals hierboven beschreven werd toegepast op alle bathymetrieën die deel uitmaken van de impactstudie. Dit zijn enerzijds het theoretische profiel en anderzijds de 71 peilingen. Voor het bovenvermelde voorbeeld te bocht Sas van Gent worden de berekende vaarpaden voor het theoretische profiel en voor de meest recente onderzochte peiling weergegeven in Figuur 71. Hieruit blijkt dat het veronderstelde vaarpad voor het theoretische profiel 4.5 m westelijk van de aslijn ligt en voor de peiling (24/02/2024) 16.5 m westelijk van de aslijn.

Over het algemeen variëren de vaarpaden slechts in beperkte mate doorheen de tijd. Toch zijn er locaties waar er een relatief belangrijke evolutie van de vaarpaden waargenomen wordt. Zo wordt in Figuur 72 de spreiding van de vaarpaden weergegeven bij de passage Sluiskil, waarbij ter hoogte van de Autrichehaven een belangrijke variatie waarneembaar is.

Doordat de oevereffecten voor de verschillende peilingen op verschillende posities geëvalueerd worden is en directe historische vergelijking van de (dwarse) oevereffecten moeilijker. Immers kunnen verschillende resultaten tussen twee peilingen zowel verklaard worden door een verandering in de sectie als door een veranderde aangenomen vaarpositie (die vaak het gevolg is van evoluties van de bathymetrie op grotere schaal). Daar tegenover staat dat de berekende vaarpaden geacht worden goed overeen te komen met de werkelijke positie van het schip in de vaarweg en bijgevolg aanleiding geven tot een realistische berekening van de oevereffecten die toelaat om de verwachte magnitude van de oeverkrachten te beoordelen.



Figuur 71 – Weergaven van de aslijn van het kanaal (wit), het Dubins vaarpad voor het theoretische profiel (lichtblauw) en het Dubins vaarpad voor de peiling van 24/02/204 (blauw) ten opzichte van de dieptelijnen overeenkomstig dezelfde peiling



Figuur 72 – Spreiding van de vaarpaden bekomen voor de 71 peilingen (blauw) ten opzichte van het vaarpad voor de theoretische sectie (lichtblauw) en de aslijn van het kanaal (wit)

4.2.2 Analyse langskracht ten gevolge van oever

In Figuur 73 wordt de hittekaart weergegeven voor de bijkomende langskracht die het studieschip met diepgang 12.5 m ervaart in zowel het theoretische profiel als in de geanalyseerde peilingen.

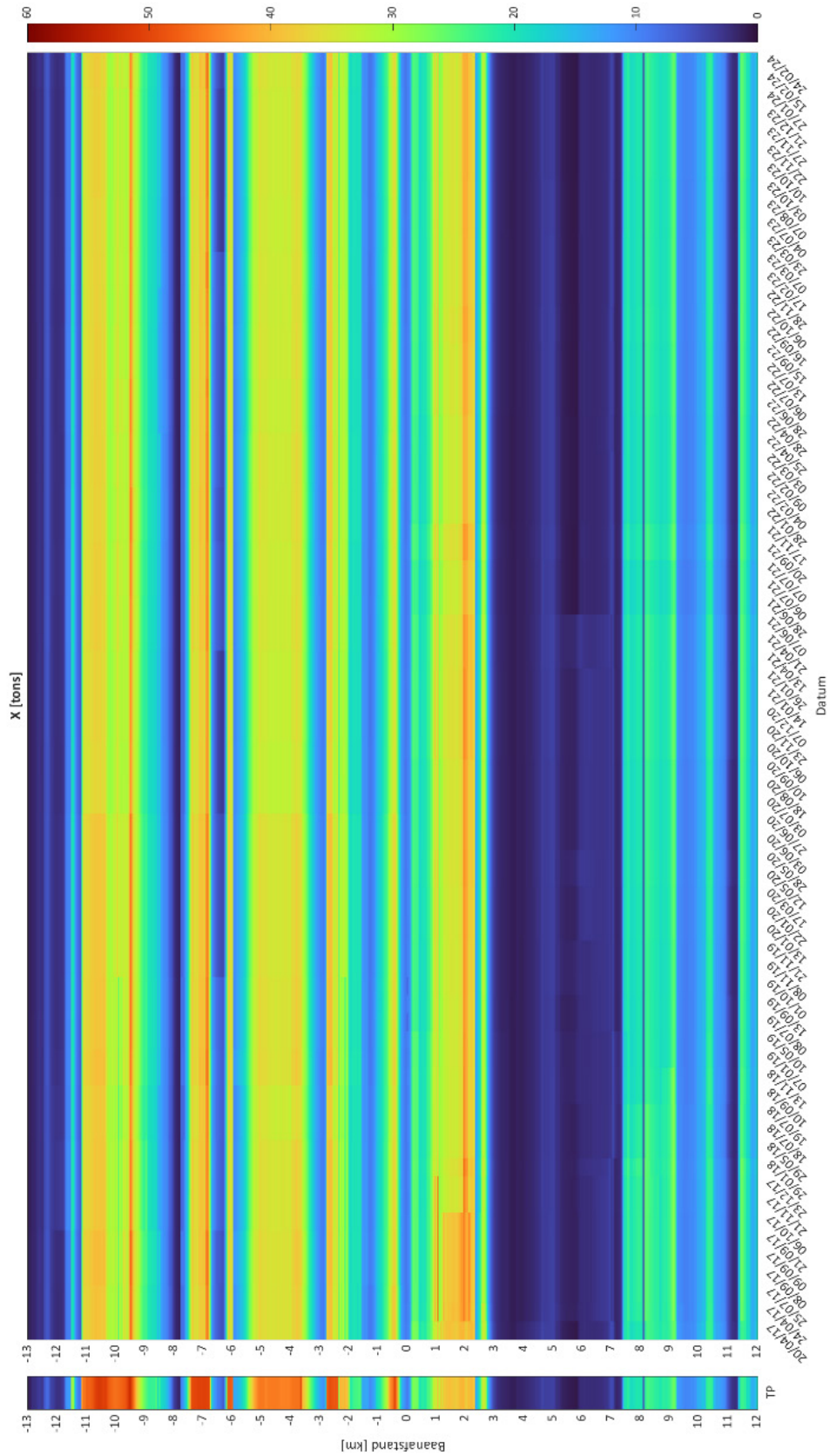
De historische evolutie van deze parameter blijkt sinds 2022 relatief beperkt. Op het Nederlandse grondgebied kan er opgemerkt worden dat de langskracht die in werkelijkheid veroorzaakt wordt door de oever steeds kleiner is dan de langskracht die berekend wordt voor het theoretische profiel. Dit heeft te maken met het feit dat er in werkelijkheid op het vaarpad een grotere kielspeling dan 1.0 m beschikbaar is.

Voor het Vlaamse gedeelte blijkt de langskracht te Zelzate groter te zijn op basis van de peilingen dan ten opzichte van het theoretische profiel. Dit heeft echter voornamelijk te maken met de eerder ruime aannames voor het theoretische profiel op Vlaams grondgebied zoals beschreven in §3.3.3. De langskrachten te Zelzate blijken steeds kleiner dan de langskracht berekend op basis van het theoretische profiel op Nederlands grondgebied (of zoals zou resulteren uit het typeprofiel voor Zelzate).

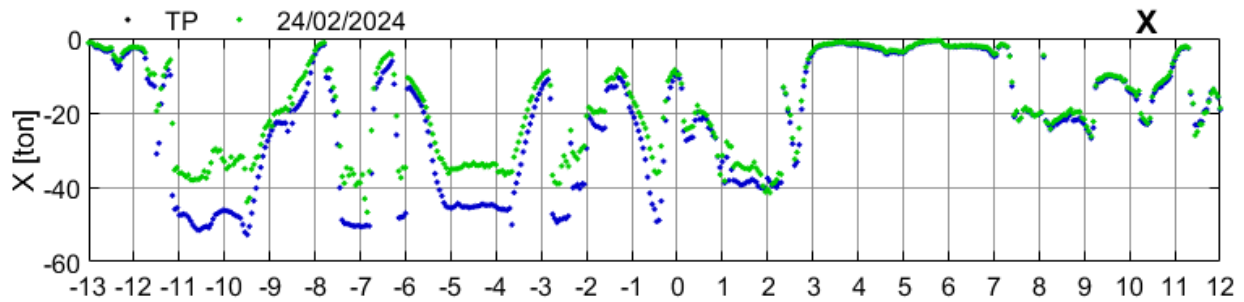
Een duidelijkere evaluatie van de langskrachten wordt aangeboden door middel van Figuur 74. Uit deze figuur blijkt dat er drie locaties zijn waarop in de meest recente peiling de dwarskracht meer dan 40 ton bedraagt. Deze locaties komen overeen met:

- -9.5 km: Tunnel Sluiskil;
- -6.85 km: Bocht Sluiskil (Driekwart, afwaarts Autriche)
- +2.05 km: Tunnel Zelzate

Twee van deze locaties werden eerder reeds geïdentificeerd op basis van de analyse van de vaarwegbreedte (§4.1.1). Echter voor de locatie -9.5 km werden geen sterk afwijkende waarden waargenomen voor de vaarwegbreedte op 13.5 m. In volgende paragrafen worden deze locaties meer in detail besproken.



Figuur 73 – Hittekaart voor de bijkomende langskracht die veroorzaakt wordt door de oever in de secties en het theoretische profiel

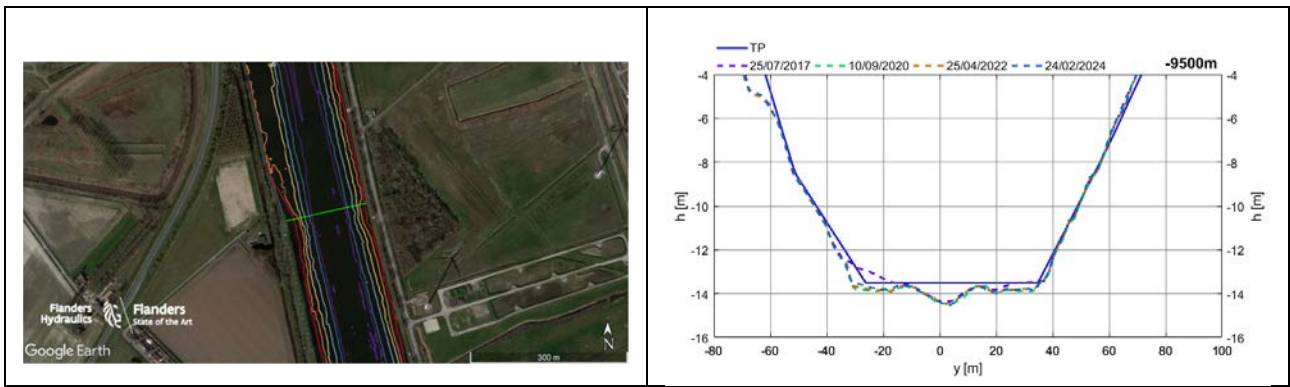


Figuur 74 – Evolutie van de bijkomende langskracht die veroorzaakt wordt door de oever langsheen het kanaal voor de conditie op 24/02/2024

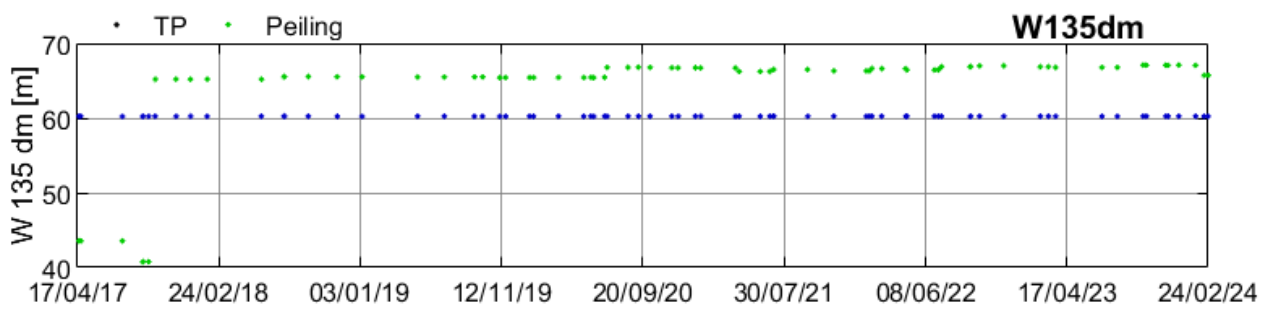
-9.50 km: Tunnel Sluiskil

De locatie -9.5 km bevindt zich 130 m opwaarts van de Tunnel van Sluiskil. Op deze locatie vertoont de westelijke oever een versmalling zoals geïllustreerd in Figuur 75. Hierdoor komt het dwarsprofiel van het kanaal op deze locatie goed overeen met het theoretische profiel. Het is bijgevolg niet verwonderlijk dat ook de langskracht die voorspeld wordt op deze locatie de langskracht op basis van het theoretische profiel benadert (zie Figuur 78). Door de grotere kielspeling ter hoogte van het vaarpad is de langskracht op het schip in de werkelijke bodemprofielen wel meer gematigd dan op basis van het theoretische profiel.

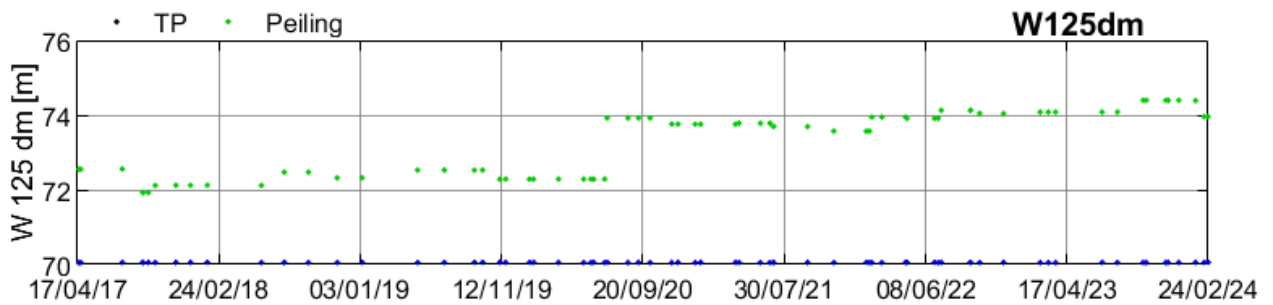
Ondanks het feit dat deze locatie één van de meest beperkende secties is, blijken de vaarwegbreedtes op 13.5 m (Figuur 76) en op 12.5 m (Figuur 77) wel te voldoen aan de breedtes overeenkomstig het theoretische profiel. Dit geeft nogmaals aan dat de vaarwegbreedte op diepte 13.5 m niet noodzakelijk een goede parameter is voor het bepalen van de oevereffecten.



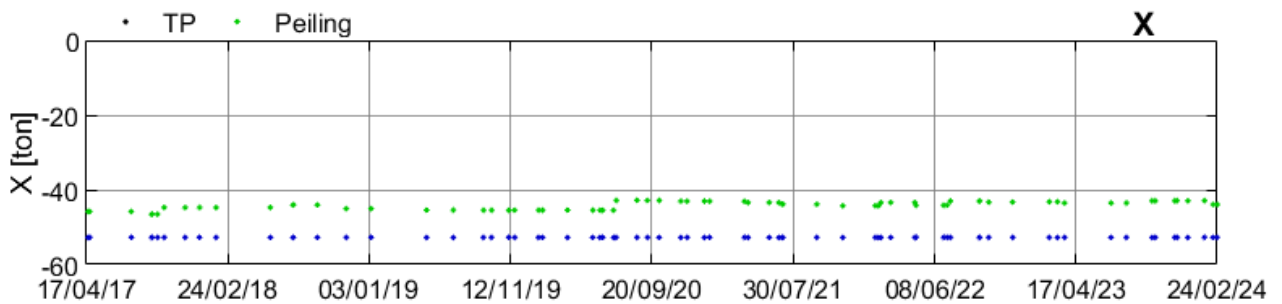
Figuur 75 – Positie van sectie -9.50 km te Tunnel Sluiskil ten opzichte van bathymetrie 24/02/2024 (links) en weergave van historische dwarssecties (rechts)



Figuur 76 – Tijdsevolutie van de breedte van sectie -9.50 km te Tunnel Sluiskil op diepte 13.5 m



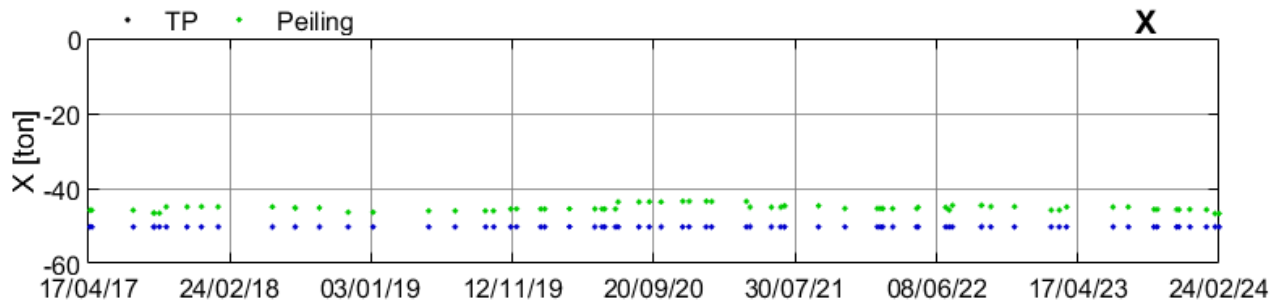
Figuur 77 – Tijdsevolutie van de breedte van sectie -9.50 km te Tunnel Sluiskil op diepte 12.5 m



Figuur 78 – Tijdsevolutie van de langskracht te sectie -9.50 km te Tunnel Sluiskil

-6.85 km: Bocht Sluiskil (Driekwart, afwaarts Autriche)

De locatie waar in de meest recente peiling de grootste langskracht (47 ton) berekend wordt betreft de sectie te -6.85 km. Deze sectie werd eerder al geïdentificeerd als een sectie met een beperkte vaarwegbreedte (zie Figuur 38). De tijdsevolutie van de langskracht te -6.85 km wordt weergegeven in Figuur 79 en vertoont een beperkte historische variatie. De langskracht blijkt op deze locatie sinds de zomer van 2020 stelselmatig toe te nemen met de meest ongunstige conditie aanwezig in de meest recente peiling.

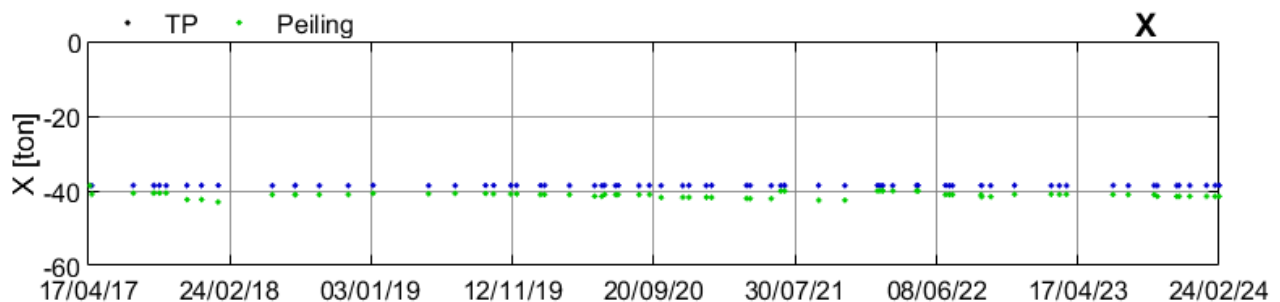


Figuur 79 – Tijdsevolutie van de langskracht te sectie -6.85 km te Bocht Sluiskil

+2.05: Tunnel Zelzate

De tunnel van Zelzate was de sectie waarbij op basis van de vaarwegbreedtes bij dieptes 12.5 m (Figuur 53) en 13.5 m (Figuur 52) belangrijke afwijkingen waargenomen werden ten opzichte van het theoretische profiel op Vlaams grondgebied of ten opzichte van het typeprofiel voor de passage Zelzate. De dwarssectie te tunnel Zelzate (Figuur 51) toont echter aan dat op deze locatie de oever op kleinere dieptes wel ruimer is dan de secties op het Nederlandse grondgebied.

Bijgevolg blijkt de tunnel van Zelzate gepaard te gaan met kleinere langskrachten op het schip dan de locaties te tunnel Sluiskil en bocht Sluiskil op het Nederlandse grondgebied.



Figuur 80 – Tijdsevolutie van de langskracht te sectie 2.05 km te Tunnel Zelzate

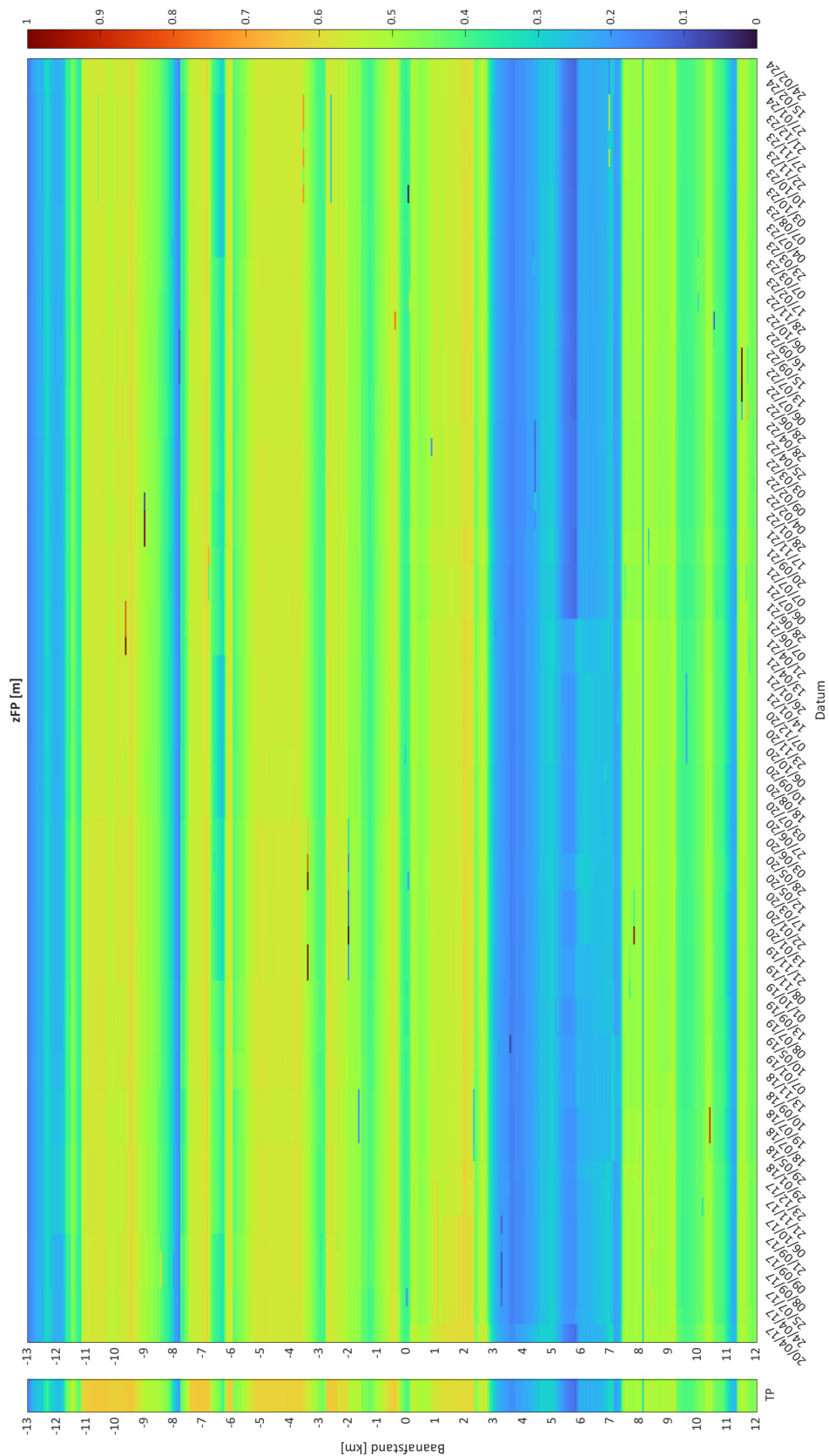
4.2.3 Analyse inzinking boeg (maximale squat)

In Figuur 81 en Figuur 82 worden de visualisaties weergegeven voor de maximale inzinking van het studieschip met diepgang 12.5 m. Over het algemeen vertoont de squat van het schip eenzelfde trend als de langskracht op het schip. Echter blijken in Figuur 81 soms afwijkende resultaten berekend te worden voor de inzinking ter hoogte van de boeg. Deze afwijkingen blijken veroorzaakt door een onstabiele in de modellering en dienen genegeerd te worden.

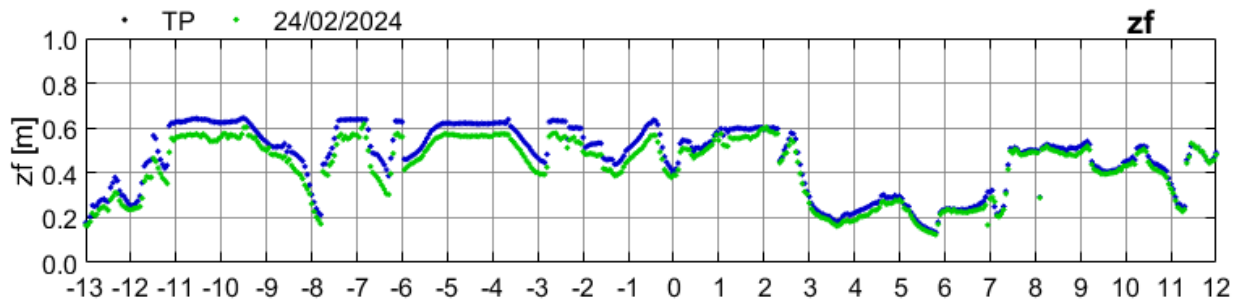
Op basis van Figuur 82 blijkt dat de inzinking die verwacht wordt wanneer het studieschip met diepgang 12.5 m aan 4.9 kn door het kanaal vaart maximaal 0.645 m bedraagt wanneer het theoretische profiel aangenomen wordt. Deze inzinking neemt een belangrijk aandeel van de beschikbare kielspeling in het theoretische profiel (1.0 m) in. Wanneer uitgegaan wordt van de gepeilde bathymetrieën dan blijken er iets kleinere inzinkingen voorspeld te worden. Toch voorspelt het model voor de locaties Tunnel Sluiskil (-9.50 km) en Tunnel Zelzate (+2.05 km) een inzinking groter dan 0.6 m.

Ook in eerder uitgevoerde ware-grootte metingen op bulk carriers met breedte 37.0 m en diepgang 12.5 m (Tello Ruiz *et al.*, 2021) werd reeds opgemerkt dat de inzinking van deze schepen op de smalste kanaalsecties kan oplopen tot 0.5 m en dit bij lagere vaarsnelheden, in ruimere secties dan het theoretische profiel en dus voor een smaller schip. De resultaten uit de huidige theoretische analyse zijn dus in lijn met reële observaties.

De vaarsnelheid is een erg belangrijke parameter in de berekening van de squat van het schip. In de huidige analyse werd het schip geëvalueerd bij de huidige maximale vaarsnelheid op het kanaal (4.9 kn). In realiteit wordt de snelheid in de smalste kanaalsecties beperkt door de langskracht die de oever uitoefent op het schip (zie §4.2.2) en zullen de schepen de smalste kanaalsecties normaal niet aan de maximale kanaalsnelheid passeren. Toch wordt op basis van deze resultaten aangeraden om de vaarsnelheid tijdens de proefvaarten te beperken tot lagere waarden dan 4.9 kn.



Figuur 81 – Hittekaart voor de inzinking ter hoogte van de boeg in de secties en het theoretische profiel



Figuur 82 – Evolutie van de inzinking ter hoogte van de boeg langsheen het kanaal voor de conditie op 24/02/2024

4.2.4 Analyse oeverkracht achterschip

De oeverkracht ter hoogte van het achterschip is steeds gericht naar de dichtste oever (aanzuiging). Dit maakt de oeverkracht ter hoogte van het achterschip meer geschikt voor een beoordeling van de dwarse oevereffecten dan de dwarskracht ter hoogte van de boeg (die een wisselend teken kan hebben onder invloed van de kielspeling). De hittekaarten voor de dwarskrachten worden weergegeven voor de absolute waarden van deze krachten.

Bij de interpretatie van de resultaten dient in rekening gebracht te worden dat de analyse van de oevereffecten uitgevoerd werd voor vaarpaden die verschillend gedefinieerd werden per onderzochte bathymetrie (zie §4.2.1). Hierdoor is de onderlinge positie van schip en oever niet steeds dezelfde. Dit bemoeilijkt de vergelijking van de dwarse oevereffecten voor verschillende bathymetrieën en verklaart de grote historische variatie in de dwarse oevereffecten zoals weergegeven in Figuur 83.

Het resultaat voor de berekende aanzuiging van het achterschip voor het studieschip met diepgang 12.5 m wordt weergegeven in Figuur 83. De locaties waarop de dwarse oevereffecten het grootste zijn, blijken te verschillen van de locaties waarop de langskracht en de inzinking de grootste waarden vertoonden. Dit is niet verwonderlijk aangezien de langskracht en de inzinking voornamelijk beïnvloed worden door de blockage (en dus de breedte van de kanaalsectie) waar de dwarse oevereffecten beïnvloed worden door een combinatie van blockage en excentriciteit (of de asymmetrie van de kanaalsectie).

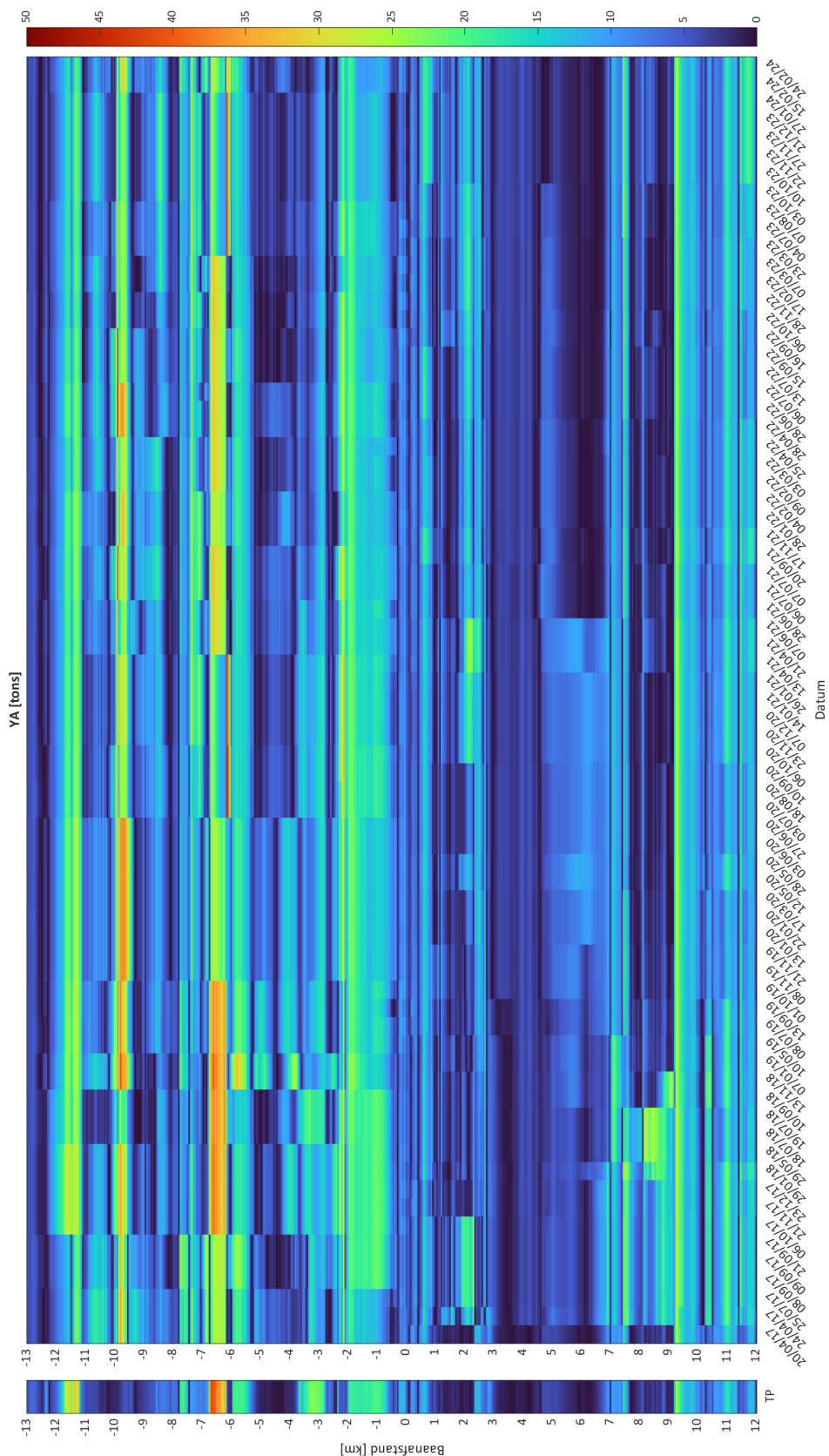
Zo blijkt op basis van het theoretische profiel de grootste aanzuiging van het achterschip op te treden ter hoogte van de Autriche-haven (Figuur 84). Doordat op deze locatie de vaarpaden voor de werkelijke peilingen op grotere afstand van de oever lagen (zie Figuur 72) zijn de dwarse oevereffecten die op deze locatie voorspeld worden voor de werkelijke peilingen kleiner dan voor het theoretische profiel.

Locaties waarbij grote dwarse oevereffecten berekend worden betreffen:

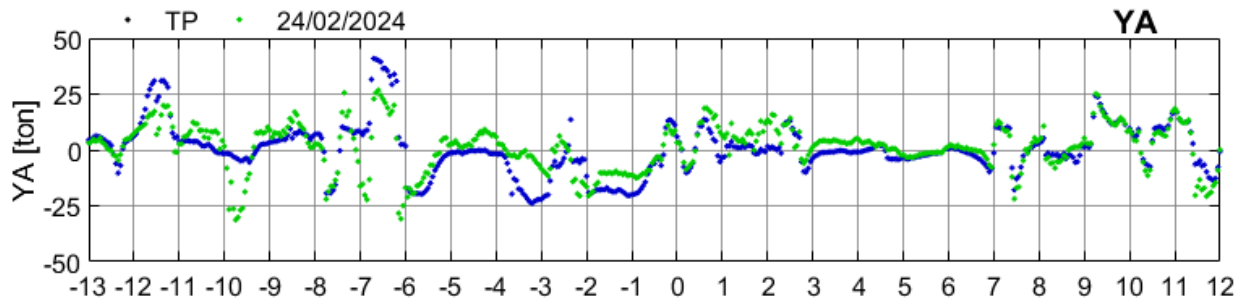
- -11.35 km: Zevenaarhaven
- -7.75 km: Sluiskil Boei KTG
- -6.70 km: Autriche-haven
- -5.65 km: Zijkanaal D
- -3.20 km: Zijkanaal E
- +9.25 km: Ghent Commodity Terminal

Bovenstaand overzicht is niet limitatief en werd gegenereerd op basis van de locaties die op basis van het theoretische profiel en/of de meeste recente peiling een dwarskracht groter dan 25 ton veroorzaakten. Figuur 84 toont echter aan dat er belangrijke dwarse oevereffecten optreden in alle kanaalsecties die een belangrijke asymmetrie vertonen.

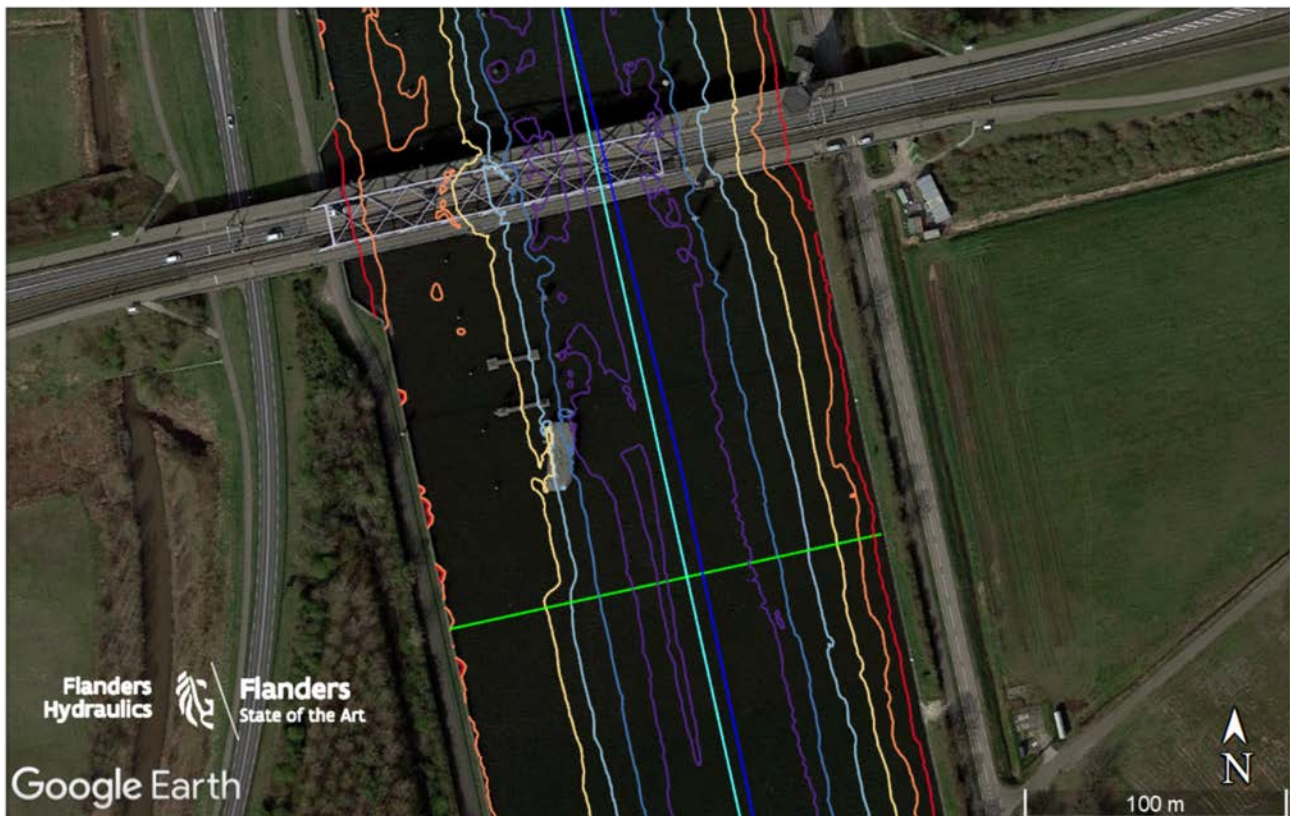
Een opvallende afwijking tussen de aanzuiging van het achterschip voorspeld op basis van het theoretische profiel vergeleken met de voorspelling op basis van de meest recente peiling betreft de locatie -9.75 km net opwaarts de brug te Sluiskil. Ook hier blijkt de afwijking veroorzaakt door een verschillend vaarpad dat in de peiling aangepast werd aan een lokale ondiepte in de 13.5 m dieptelijn (zie Figuur 85).



Figuur 83 – Hittekaart voor de dwarskracht ter hoogte van het achterschip in de secties en het theoretische profiel



Figuur 84 – Evolutie van de dwarskracht ter hoogte van het achterschip langsheen het kanaal voor de conditie op 24/02/2024



Figuur 85 – Verschillende vaarwegpaden aangenomen voor TP (lichtblauw) als voor peiling 24/02/2024 (blauw)

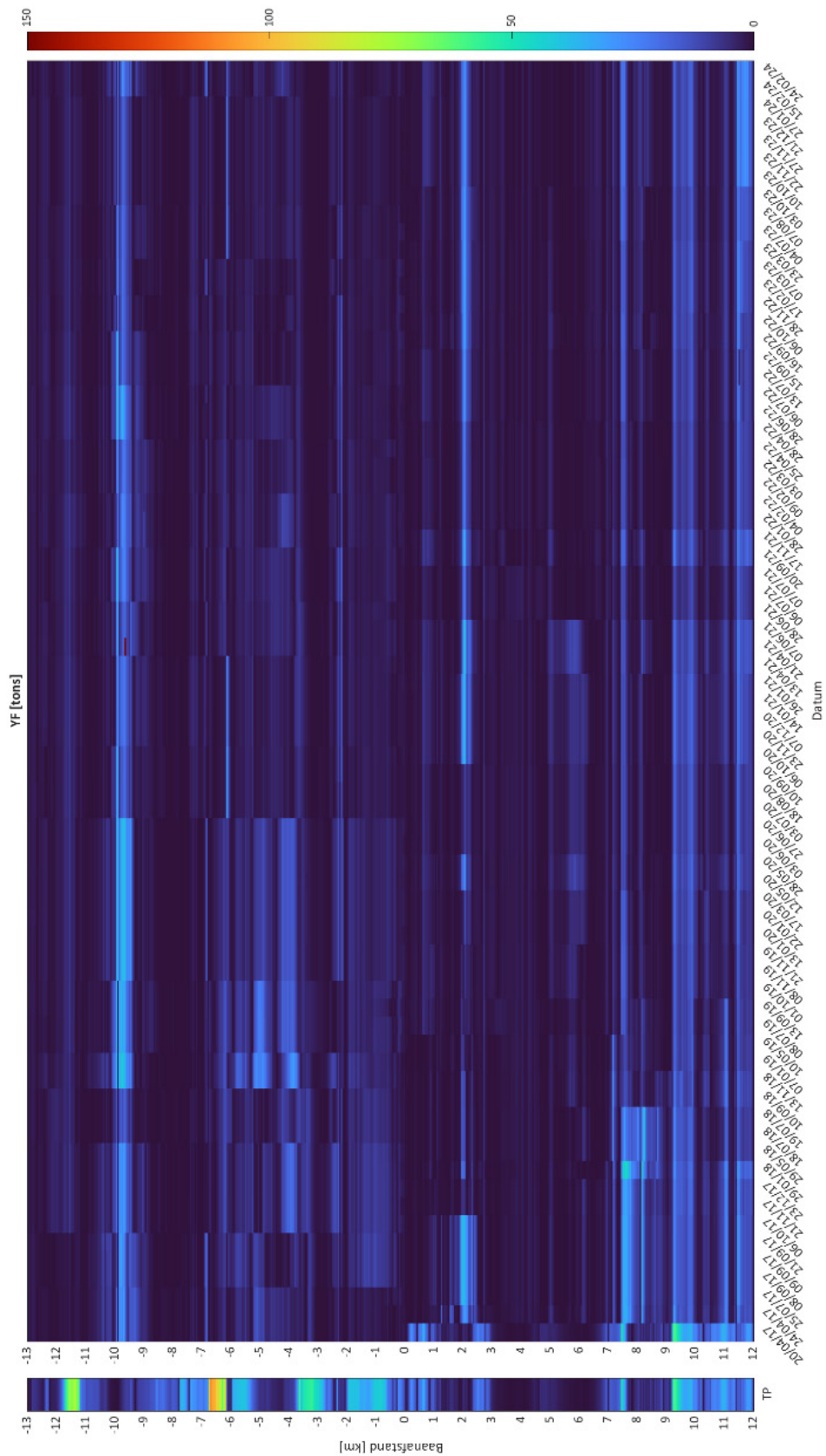
4.2.5 Analyse oeverkracht voorschip

In Figuur 86 en Figuur 87 worden respectievelijk de hittekaart met alle dwarskrachten ter hoogte van de boeg weergegeven en de evolutie langsheen het kanaal voor het theoretische profiel en de meest recente peiling. Beide visualisaties tonen een belangrijk verschil voor de oeverkracht aan de boeg voor de werkelijke condities en voor het theoretische profiel. De reden hiervoor betreft de verschillende kielspelingen in beide.

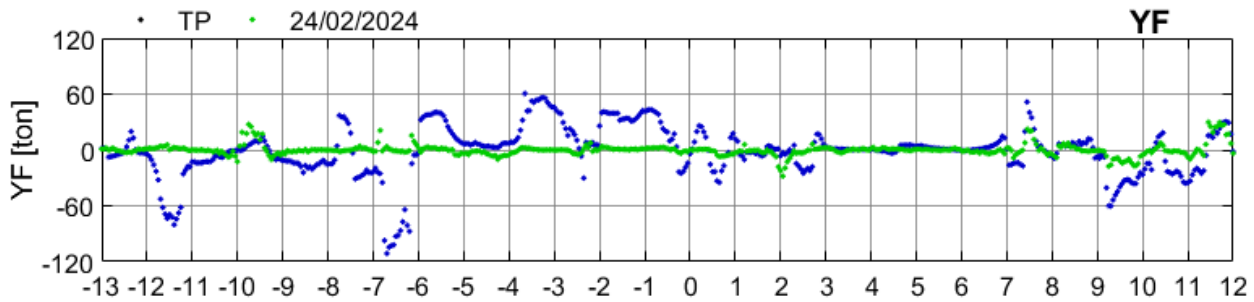
In §2.2 werd reeds aangetoond dat de kielspeling onder het schip de zin van de dwarskracht aan de boeg bepaald. Bij grote tot gematigde kielspelingen wordt de boeg aangezogen door de oever, terwijl bij erg kleine kielspelingen de boeg afgestoten wordt. Een belangrijk verschil tussen de werkelijke peilingen en het theoretische profiel betreft de overdiepte in het midden van het kanaal (of ter hoogte van het vaarpad). Deze overdiepte heeft tot gevolg dat de kielspeling in werkelijke secties ruimer zal zijn dan in het theoretische profiel waardoor de afstoting van de boeg in de werkelijke secties kleinere waarden vertoont.

De grote invloed van de kielspeling op de voorspelde resultaten voor de dwarskracht ter hoogte van de boeg bemoeilijkt de vergelijking. Wel dient opgemerkt dat er erg grote afstotende krachten op de boeg voorspeld worden voor de secties overeenkomstig het theoretische profiel waar deze effecten voor de werkelijke peilingen veel gematigder zijn. Zo worden ter hoogte van de Autriche-haven erg grote (onwaarschijnlijke) krachten van meer dan 100 ton gemodelleerd terwijl op basis van de meest recente peilingen er vrijwel geen afstoting van de boeg voorspeld wordt (opnieuw mede door een verschillend vaarpad).

Meer fundamenteel onderzoek over oevereffecten bij kleine kielspelingen en grote blockage is vereist om terdege de huidige modellering in deze omstandigheden te valideren. Een vergelijking van de oevereffecten opgemeten op de simulator en het opgemeten scheepsgedrag van het schip tijdens proefvaarten wordt hiervoor aangeraden.



Figuur 86 – Hittekaart voor de dwarskracht ter hoogte van de boeg in de secties en het theoretische profiel



Figuur 87 – Evolutie van de dwarskracht ter hoogte van de boeg langsheen het kanaal voor de conditie op 24/02/2024

4.3 Samenvatting en bepaling oeverprofiel simulatiestudie

In de voorgaande paragrafen werden de oevercondities vergeleken voor verschillende bathymetrieën. Het betroffen zowel een theoretisch profiel van het kanaal als de historische toestand van het kanaal tussen januari 2017 en februari 2024.

De beoordeling van de vaarwegbreedte op kanaaldiepte (-13.5 m) toont aan dat deze vaarwegbreedte in werkelijkheid vrijwel nooit gehaald wordt. De reden hiervoor is dat het kanaal slechts op deze streefdiepte onderhouden wordt, waardoor er vaak (soms heel beperkte) verondieping van deze diepte aanwezig zijn die een onmiddellijke impact hebben op de berekende breedte. Wanneer de breedte op diepte 12.5 m KP berekend wordt dan blijkt deze met uitzondering van enkele secties wel gerespecteerd te worden. Uitzonderingen hierop betreffen de brugpassages en vooral de passage van de tunnel te Zelzate. Ter hoogte van de tunnel is de breedte van de vaarweg op diepte 12.5 m slechts 55 m.

Een ander belangrijk verschil tussen de werkelijke condities op het kanaal en het theoretische profiel betreft de diepte van de vaarweg in het midden van het vaarpad. Doordat schepen met maatgevende diepgangen steeds hetzelfde traject bevaren op het kanaal, treedt er ter hoogte van dit vaarpad erosie op die resulteert in grotere waterdieptes dan de kanaaldiepte.

Samenvattend kan er gesteld worden dat de werkelijke secties smaller en dieper zijn dan het theoretische profiel. Bovendien blijkt de positie van de oever op sommige locaties belangrijk te verschillen ten opzichte van het theoretische profiel.

Wanneer de oevereffecten in de verschillende bathymetrieën vergeleken worden, dan blijken de langskracht en de inzinking die verwacht worden in de werkelijke profielen steeds kleiner te zijn dan deze ten opzichte van de theoretische profielen of de typeprofielen van het kanaal. Meest beperkende secties bevinden zich in de bocht van Sluiskil en bij de passage van de tunnel van Zelzate.

Een vergelijking op basis van dwarse oevereffecten is moeilijker doordat deze in belangrijke mate afhankelijk zijn van de dwarse scheepspositie die voor het schip aangenomen wordt en eveneens doordat de modellering van deze krachten erg afhankelijk is van de kielspelings ter hoogte van het schip.

De afwezigheid van de overdiepte in het theoretische profiel en de afwijking van de positie van de oever in het theoretische profiel ten opzichte van de werkelijke peilingen impliceren dat de oevereffecten in het theoretische profiel in belangrijke mate kunnen verschillen van de oevereffecten in werkelijkheid. Bijgevolg werd beslist om tijdens de simulatiestudie een bodemprofiel te hanteren overeenkomstig werkelijke condities.

Er werd besloten om per land de meest conservatieve conditie sinds 2021 te definiëren op basis van de grootste langskracht die voorspeld werd in deze condities. Voor het Nederlandse traject betreft dit de meest recente peiling die onderzocht werd (15/02/2024). Deze geeft een maximale langskracht ter hoogte van de bocht van Sluiskil (-6.85 km). Voor het Vlaamse grondgebied wordt de grootste langskracht voorspeld voor de passage van de tunnel te Zelzate. De minst gunstige conditie stemt hier overeen met de eerste peilingen uit 2021 (14/01/2021).

Het bodemprofiel toegepast in de simulatiestudie stemde bijgevolg overeen met de peiling van 15/02/2024 voor het Nederlandse traject en met de peiling van 14/01/2021 voor het Vlaamse traject.

5 Vaarsimulaties

Voor de bepaling van de randvoorwaarden voor de toegankelijkheid van een bulk carrier of tanker met breedte 38.5 m op het Kanaal Gent-Terneuzen werden drie simulatiedagen georganiseerd op de full mission bridge simulator van het Waterbouwkundig Laboratorium. In de volgende hoofdstukken wordt deze simulatorstudie in meer detail besproken.

5.1 Simulatieomgeving

Ten behoeve van de simulatiestudie werd een simulatieomgeving van het Kanaal Gent-Terneuzen en de bijhorende studieschepen ontwikkeld.

5.1.1 Studieschepen

De studieschepen van de simulatiestudie werden eerder geïntroduceerd in H2. Dezelfde studieschepen en modellering van het manoeuvreergedrag (§2.1), de oevereffecten (§2.2) en de windkrachten (§2.3) werden toegepast in de simulatiestudie als in de impactstudie van het bodemprofiel (H4).

De schepen die beoordeeld werden in de simulatiestudie betroffen:

- bulk carrier 240 m x 38.5 m
 - maximale ladingscondities KGT: $T_A=12.5$ m; $T_F=12.5$ m;
 - heavy ballast conditie: $T_A=8.8$ m; $T_F=7.7$ m;
- CO2-tanker 240 m x 38.5 m
 - maximale ladingscondities KGT: $T_A=12.5$ m; $T_F=12.5$ m;
 - heavy ballast conditie: $T_A=8.8$ m; $T_F=7.7$ m.

De huidige maximale schepen op het kanaal betreffen bulk carriers die doorgaans bij maximale diepgang aankomen en leeg vertrekken. Bijgevolg werd in het merendeel van de simulaties aangenomen dat de schepen in opvaart een maximale ladingsconditie hadden en afvoeren in heavy ballast conditie.

Voor de CO2-tankers is het echter aannemelijk dat deze leeg aankomen en bij maximale diepgang zullen vertrekken. Bijgevolg werden er met dit scheepstype ook simulaties uitgevoerd waarbij in heavy ballast opgevaren en met maximale diepgang afgevaren werd.

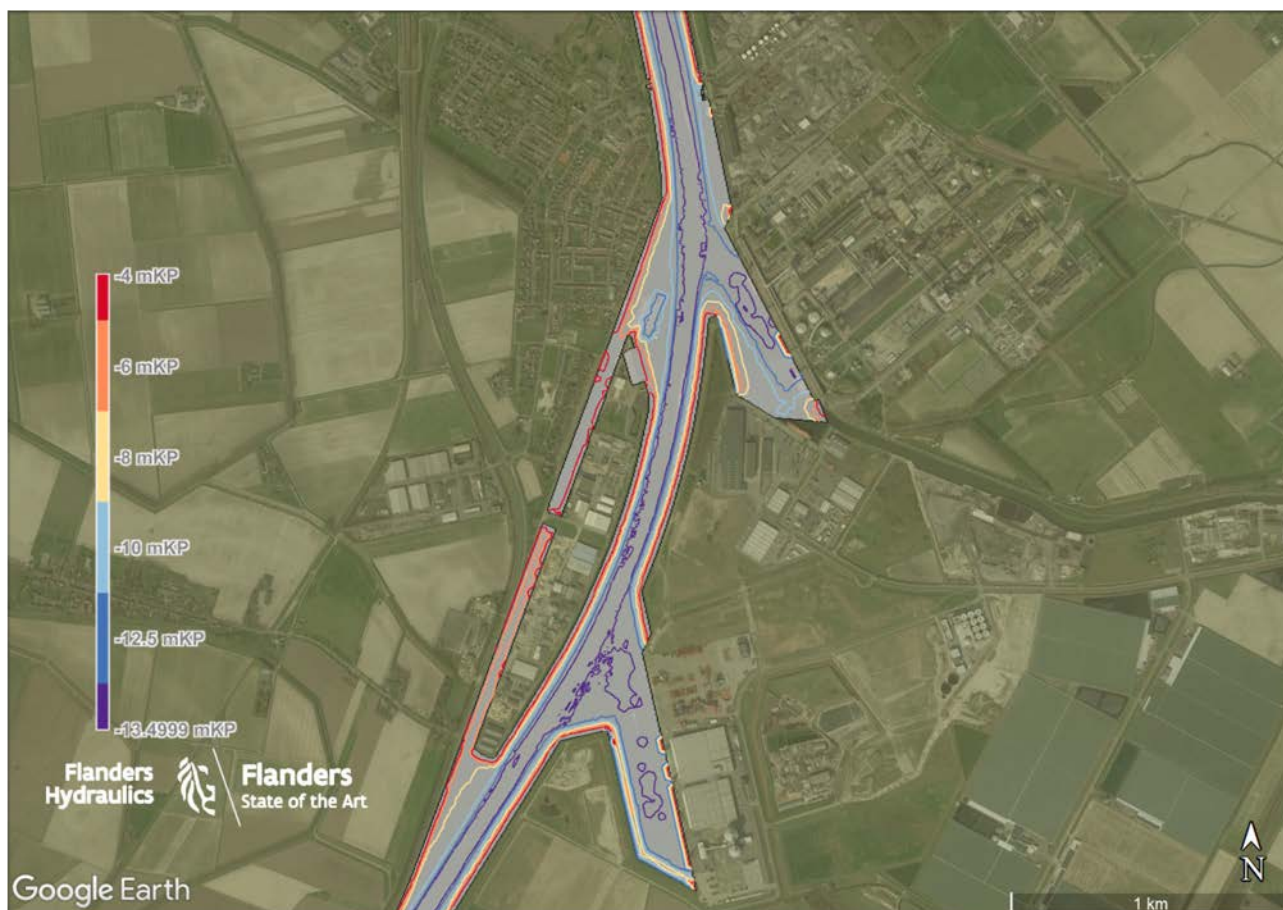
5.1.2 Bathymetrie

De bathymetrie van het kanaal zoals gemodelleerd voor deze studie werd reeds gepresenteerd in §3.2. De condities van de bodem die onderzocht werd in de simulatiestudie, werden als volgt gedefinieerd voor respectievelijk het Nederlandse en het Vlaamse grondgebied:

- Nederlands grondgebied: peiling 15/02/2024;
- Vlaams grondgebied: peiling 14/01/2021.

In §4.3 wordt de keuze voor deze bathymetrie gemotiveerd.

In de visuele output van de simulaties wordt de bathymetrie grafisch weergegeven door middel van dieptelijnen bij verschillende waterdieptes (zie Figuur 88).



Figuur 88 – Illustratie weergave bodemprofiel op basis van dieptelijnen (Sluiskil)

5.1.3 Wind

Als uitgangspunt voor de simulaties werd uitgegaan van de limiterende windcondities die ook vandaag de beperking vormen voor de toegankelijkheid van het Kanaal Gent-Terneuzen (Gemeenschappelijk Nautisch Beheer Scheldegebied, 2011). Deze limieten zijn bepaald als maximaal 6 Beaufort bij maximale diepgang en maximaal 5 Beaufort bij ballastdiepgang.

Figuur 89 toont aan dat met name voor de belangrijke windcondities de dominante windrichtingen overeenstemmen met zuidwestelijke tot west-zuidwestelijke windrichting. Het merendeel van de simulaties werd bijgevolg uitgevoerd bij een zuidwestelijke windrichting. In één simulatie werd de windrichting WZW gesimuleerd. Dit betrof de opvaart van een CO₂-tanker in heavy ballast conditie.

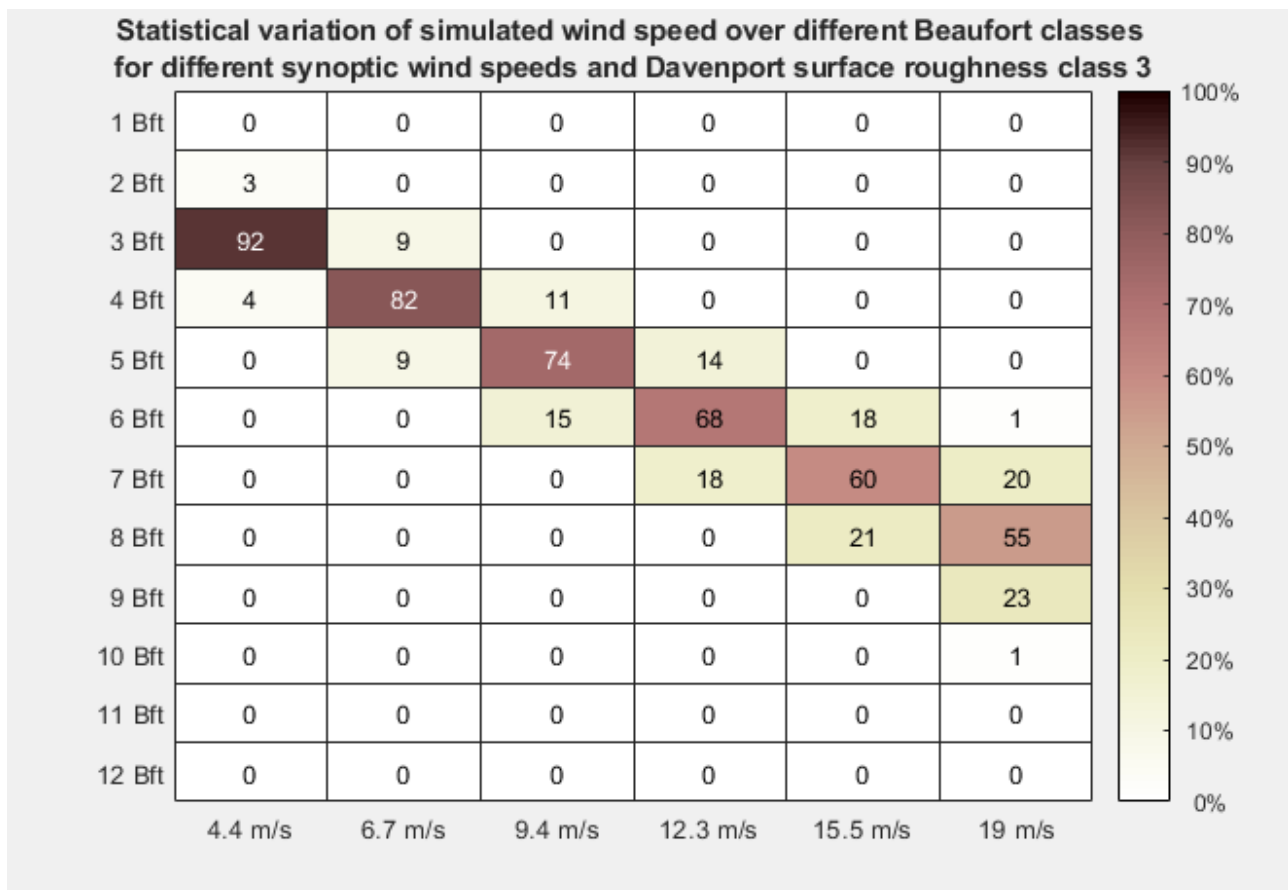
De wind werd gesimuleerd door middel van een uniform windveld (dus geen afscherming van bruggen, afgemeerde schepen of gebouwen) en met een variërende vlagerigheid toegepast op magnitude en richting. De windconditie werd gedefinieerd op basis van de synoptisch gemiddelde waarde voor de windsnelheid en de windrichting, gecombineerd met een ruwheidsfactor welke de vlagerigheid van het windveld bepaalt. De vlagerigheid werd berekend op basis van een Von Karmanspectrum, waarvan de spreiding afhankelijk is van de terreinruwheid volgens de ruwheidsklassen van Davenport (Davenport, 1967). Voor de simulatieomgeving KGT werd de ruwheidsklasse 3⁵ toegepast.

⁵ De Davenport ruwheidsklasse 3 wordt beschreven als: open ruimte, zeer korte begroeiing, enkele alleenstaande hindernissen (hoogte < 10% van de afstand tot het meetpunt). Vb. vliegveld.

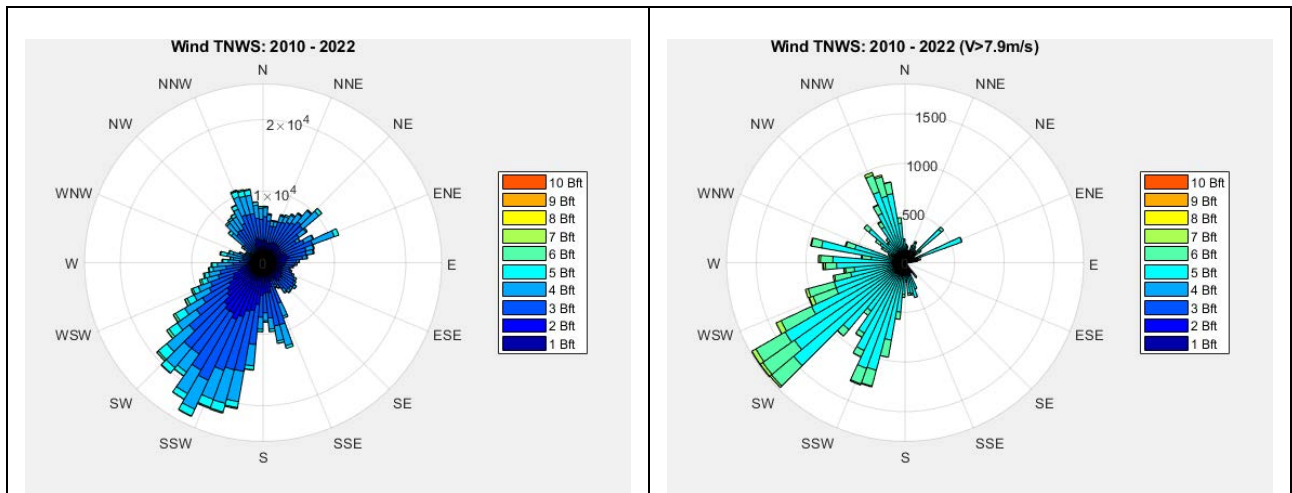
Om de windcondities te relateren aan de Beaufortschaal werd de synoptisch gemiddelde windsnelheid bepaald als de gemiddelde windsnelheid welke geldt voor de Beaufortklasse. Ten gevolge van de vlagerigheid echter zal de effectieve windsnelheid in de simulatieomgeving niet steeds overeenkomen met de ingestelde Beaufortklasse. Zo kan, bij het optreden van windvlagen, de windsnelheid kortstondig waarden aannemen overeenkomstig een hogere Beaufortklasse.

Voor Beaufortklassen 5 en 6 worden respectievelijk gemiddelde windsnelheden gelijk aan 9.4 m/s en 12.3 m/s ingesteld. Figuren 90 en 91 geven de tijdreeksen voor de ogenblikkelijke gesimuleerde windsnelheid voor deze condities.

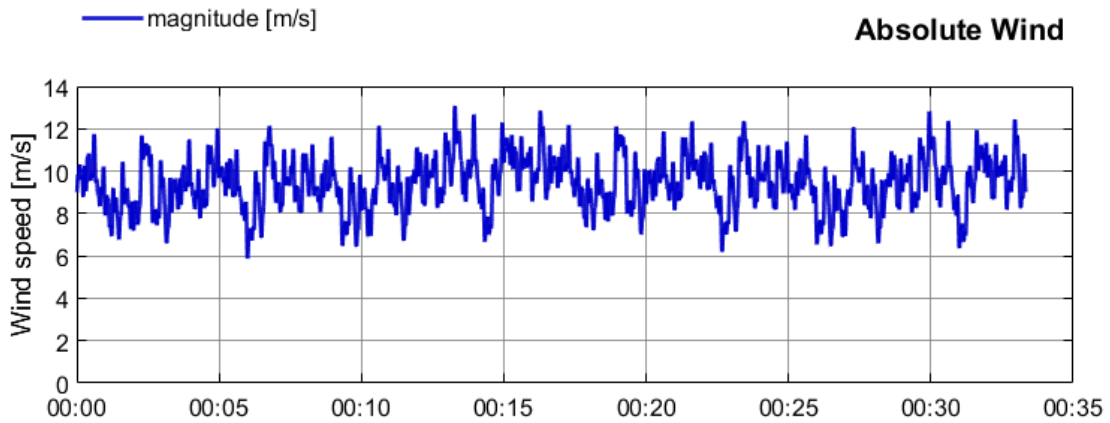
Meer algemeen wordt de procentuele verdeling van de werkelijke wind over de Beaufortklassen weergegeven in Figuur 92. Wanneer in de simulator de windconditie 6 Bft (12.3 m/s) gesimuleerd wordt, dan zal volgens Figuur 92 de windsnelheid gedurende 68% van de tijd daadwerkelijk overeenkomen met 6 Bft. Gedurende 18 % bedraagt de windsnelheid 7 Bft en gedurende 14% van de tijd bedraagt de windsnelheid 5 Bft.



Figuur 89 – Statistische variatie van het gesimuleerde windspectrum over verschillende Beaufortklassen voor verschillende gemiddelde windsnelheden (ruwheidsklasse 3)



Figuur 90 – Windroos voor windmetingen ter hoogte van Westsluis Terneuzen voor alle windcondities (links) en voor windkrachten vanaf 5 Bft (rechts)



Figuur 91 – Vlagerigheid van de wind bij simulatie 5 Bft (ruwheidsklasse 3)



Figuur 92 – Vlagerigheid van de wind bij simulatie 6 Bft (ruwheidsklasse 3)

5.1.4 Sleepboten

Sleepboten werden geselecteerd op basis van de beschikbare sleepbootvloot op het Kanaal Gent-Terneuzen. Net als in de huidige bepalingen (Gemeenschappelijk Nautisch Beheer Scheldegebied, 2011) werden er vooraan twee sleepboten vastgemaakt. Deze sleepboten hadden een bollard pull gelijk aan 45 ton. Achteraan werd één sleepboot met 60 ton bollard pull ingezet.

Doordat tijdens de kanaalvaart sleepboten slechts sporadisch ingezet werden, werden er geen sleepbootkapiteins ingezet voor deze studie. Tijdens de simulaties werden de sleepboten bediend door de projectleider op basis van VHF orders van de loodsen op de scheepsbrug.

5.1.5 Full SNMS

Eén van de randvoorwaarden voor de toegankelijkheid van 37m-schepen tot de Westsluis te Terneuzen en tot het kanaal betreft de beschikbaarheid over een Full SNMS⁶ positioneringssysteem (verder Full SNMS). De Full SNMS is de combinatie van positioneringsapparatuur (2 RTK-GPS'en) en ENC-software (Qastor). De loodsen nemen de apparatuur mee aan boord en installeren deze op ingemeten referentieposities op het schip. Door deze referenties op te geven in de Qastor-software kan de positie van de scheepscontour nauwkeurig weergegeven worden op een digitale ENC-kaart. Wanneer een schip Full SNMS-plichtig is, dan geldt ook de verplichting voor een tweede loods. Bij het Vlaamse loodswezen dient deze tweede loods een specifiek opgeleide F-loods te zijn. De tweede loods of F-loods dient niet gekwalificeerd te zijn om ook als eerste loods van het schip op te treden (de zogenaamde super-loodsen gekwalificeerd voor het beloodsen van superschepen).

De Qastor-software voorziet in een aantal assistentiemodes voor specifieke manoeuvres. Bij toepassing op het Kanaal Gent-Terneuzen is de lock-approach mode de belangrijkste assistentiemode. Deze is bedoeld om het schip op te lijnen tussen een smalle tweezijdige parallelle begrenzing (zoals een sluis begrensd door twee sluismuren of een brug begrensd door de brugfendering aan beide zijden van de brugopening). De lock approach mode geeft informatie over de schouderafstanden van het schip (aan boeg en hek) ten opzichte van de verlengde begrenzing (bvb. sluismuren) en de naderingssnelheden tot deze lijnen.

De Qastor-software biedt ook een predictie aan van de scheepspositie. Uitgaande van de meest recente positie en de geldende horizontale snelheden van het schip, wordt een voorspelling gemaakt van de positie van het schip voor een periode van één minuut met een horizon van vijf minuten.

Via een laptop op de simulatorbrug werd de Qastor-software ook tijdens de simulatiestudie ter beschikking gesteld van de loodsen. Deze stond ingesteld op het project 'XR2 Lite Kanaal' waardoor de laptop op dezelfde manier ingesteld was als in realiteit. Tijdens de simulatiestudie werden op de scheepsbrug twee Qastor-laptops voorzien die onafhankelijk van elkaar opereerden. Hierdoor hadden beide loodsen toegang tot een eigen laptop en kon desgewenst de laptop ook uitgelezen worden wanneer, tijdens de brugpassages, de loods zich verplaatste naar de brugvleugel van de brug.

Alle loodsen die deelnamen aan de studie maakten gebruik van de Full SNMS. De mate waarin versilde wel van loods tot loods. Voor de brugpassages maakten alle loodsen gebruik van de lock approach mode. Het merendeel van de loodsen maakten ook voor de kanaalvaart intensief gebruik van de PPU en werd het schip mede op basis van de positiepredictie centraal in de vaarweg gehouden. Gegeven de lage vaarsnelheden en grote scheepsafmetingen bleek de predictie in Qastor nuttige informatie om de giersnelheid te bepalen welke het schip diende aan te houden. Op één van de simulatiedagen (dag 2) werden de loodsorders inderdaad door middel van giercommando's doorgegeven aan de wielman. Op de eerste dag werd een combinatie van koers- en gierorders toegepast en op de laatste simulatiedag werden voornamelijk roerorders gegeven.

Gedurende de simulatiestudie werden er verschillende aanbevelingen geformuleerd in verband met de verdere optimalisatie van de Full SNMS ondersteuning. Deze aanbevelingen worden opgenomen in H6.

⁶ SNMS: Scheldt Navigator Marginal Ships

5.1.6 Wielmannen

Nog een randvoorwaarde voor de kanaalvaart met marginale schepen op het kanaal betreft de assistentie van een wielman. De wielman neemt de taak van de roerganger waar aan boord van het schip en zal het schip door het kanaal sturen op aanwijzingen van de loods. Er werden in deze studie geen wielmannen rechtstreeks betrokken. De tweede loods nam de rol van wielman op zich tijdens de simulaties.

5.1.7 3D-model

De simulaties werden uitgevoerd in een digitaal 3D-model dat overeenstemde met de huidige toestand van het kanaal. In Figuur 93 wordt een afbeelding weergegeven van het studieschip in de simulatieomgeving.



Figuur 93 – Weergave van studieschip bulk carrier ten opzichte van brug Sluiskil

5.2 Simulatieprogramma en analyse

5.2.1 Organisatie

Op 27/05, 03/06 en 10/06/2024 werd een simulatiedag georganiseerd op Sim360+ te Waterbouwkundig Laboratorium te Antwerpen.

Op elke simulatiedag was er tegelijk één Vlaamse en één Nederlandse kanaalloods aanwezig voor de uitvoering van de simulaties. Elke simulatiedag werden een ander paar loodsen uitgenodigd, waardoor er zes verschillende loodsen rechtstreeks betrokken waren bij de simulatiestudie.

De loodsen namen afwisselend de rol van eerste loods waar. De eerste loods voerde het commando over het schip. De tweede loods was eveneens aanwezig op de brug en fungeerde als wielman. De beide loodsen hadden toegang tot een Qastor-console. In sommige simulaties wisselden de loodsen tijdens de simulatie van rol om voldoende geconcentreerd te kunnen blijven.

Doordat de toepassing van sleepboten op het Kanaal Gent-Terneuzen beperkt geacht werd, werd in deze simulatiestudie (in tegenstelling tot bijvoorbeeld sluisstudies) geen sleepbootkapitein ingezet. Indien sleepboten toegepast werden tijdens de simulatiestudie, dan werd de bediening van sleepboten uitgevoerd door de projectleider van WL.

Ook leden van de werkgroep Toegankelijkheid Kanaal Gent-Terneuzen werden uitgenodigd om de simulaties bij te wonen. Zo was er op elke dag een nautisch adviseur van het havenbedrijf North Sea Port aanwezig net als andere geïnteresseerden.

Een simulatiedag werd aangevat met een inleidende presentatie door de projectleider van WL. In deze presentatie werd onderstaande informatie gecommuniceerd aan de deelnemers:

- samenvatting vooronderzoek impactstudie bodemprofiel (nadruk op impact van oevereffecten op de studieschepen);
- overzicht van de te simuleren scenario's;
- Pilot Card van de simulatieschepen (zie Bijlage 1);
- ervaring eerdere simulatiedagen (indien beschikbaar).

Er werden over het algemeen langdurige simulaties uitgevoerd waarbij een relatief lang doorgaand kanaaltraject onderzocht werd. Bijgevolg is het aantal simulaties dat binnen de studie uitgevoerd werd eerder beperkt. Er werden in totaal 14 simulaties uitgevoerd waarvan negen uitgevoerd bij de maximale ladingsconditie en vijf bij ladingsconditie heavy ballast. Een overzicht van de condities en de beoordeling van de uitgevoerde simulaties wordt weergegeven in Tabel 15.

De simulaties werden chronologisch genummerd. De naam van de simulaties werd gegenereerd als combinatie van het projectnummer, het simulatienummer en de aanduiding OP/AF voor op- of afvaart (vb. 23_116_01_OP).

Tabel 15 – Overzicht van de uitgevoerde FMB-simulaties

Datum	Simulatie	Schip		Reis			Wind		Beoordeling		
		Type	T [m]	Opvaart/ afvaart	Van	Naar	Wind- kracht [Bft]	Wind- richting [-]	Reserves	Moeilijk- heids- graad	Aanvaard- baarheid
27/05/24	01	Bulk	12.5	OP	Massagoed	Sas van Gent	6	ZW	2	3	Ja
27/05/24	02	Bulk	12.5	OP	Sas van Gent	Arcelor	6	ZW	2	3	Ja
27/05/24	03	Bulk	8.8	AF	Arcelor	Sluiskil	5	ZW	2	2	Ja
27/05/24	04	Tank	12.5	OP	Sluiskil	Sas van Gent	6	ZW	3	3	Ja
3/06/24	05	Tank	12.5	OP	Massagoed	Arcelor	6	ZW	2	3	Ja
3/06/24	06	Tank	12.5	OP	Kluizendok	Sifferdok	6	ZW	2	2	Ja
3/06/24	07	Tank	8.8	AF	Kluizendok	Zelzate	5	ZW	-	-	-
3/06/24	08	Tank	8.8	AF	Kluizendok	Zelzate	5	ZW	-	-	-
3/06/24	09	Tank	8.8	AF	Kluizendok	Sluiskil	5	ZW	2	3	Ja
10/06/24	10	Tank	12.5	AF	Sifferdok	Commodity	6	ZW	-	-	-
10/06/24	11	Tank	12.5	AF	Sifferdok	Kluizendok	6	ZW	1	3	Ja
10/06/24	12	Tank	12.5	AF	Arcelor	Sas van Gent	6	ZW	3	3	Neen
10/06/24	13	Tank	12.5	AF	Sas van Gent	Sluiskil	5	ZW	2	3	Ja
10/06/24	14	Tank	8.8	OP	Sluiskil	Zelzate	5	WZW	3	4	Neen

5.2.2 Analyse en verwerking

Na iedere simulatie werden de resultaten van de simulaties besproken met de deelnemende loodsen. De opmerkingen van de loodsen werden door de projectleider genoteerd en worden opgenomen in de rapportering van de simulaties in §5.2.3 en §5.2.4.

De simulaties werden geanalyseerd en verwerkt tot volgende rapporteringsformaten:

- KMZ-weergave voor geanimeerde replay van simulatie;
- overzichtsgrafieken met tijdsevolutie van de belangrijkste parameters;
- rapportering van de beoordelingscijfers bepaald door de uitvoerende loodsen;
- hittekaarten van de belangrijkste parameters voor een combinatie van simulaties.

Behalve de resultaten die rechtstreeks beschikbaar waren uit de logging van de simulatoren werden nog onderstaande bijkomende verwerkingen uitgevoerd:

1. Analyse van de minimale horizontale dwarsafstand (m) tussen de rand van de dekcontour en de dieptelijn overeenkomstig de maximale diepgang van het schip
2. Analyse van de minimale kielspeling (m) onder de dekcontour van het schip rekening houdend met de diepgangen voor en achter en al dan niet rekening houdend met de inzinking van het schip.

KMZ-weergave

De meeste intuïtieve manier om het verloop van de simulaties voor te stellen is een presentatie van de simulaties in Google Earth™ door middel van de KMZ-bestanden (zie Figuur 94) die digitaal toegevoegd werden aan dit rapport. In deze KMZ-bestanden wordt het vaartraject weergegeven samen met grafieken van tijdreeksen voor onderstaande parameters:

- Snelheid:
 - primaire as
 - langsscheepse snelheid schip (kn)
 - dwarsscheepse snelheid schip (kn)
 - secundaire as
 - giersnelheid schip (°/min, positief naar stuurboord)
- Roer:
 - roerhoek van het schip (°, positief naar bakboord)
- Schroef:
 - schroeftoerental van het schip (% van rpm Harbour Full Ahead)
- Dwarskrachten op het schip (positief naar stuurboord):
 - dwarskracht op de boeg ten gevolge van wind (ton);
 - dwarskracht op het achterschip ten gevolge van wind (ton);
 - dwarskracht op de boeg ten gevolge van oevereffecten (ton);
 - dwarskracht op het achterschip ten gevolge van oevereffecten (ton);
- Sleepboten
 - stuwkracht (ton) toegepast door de sleepboten aanwezig in de simulatie.

De presentatie van de scheepscontouren van het studieschip en de sleepboten wordt bovendien op onderstaande wijze geanimeerd:

- de kleur van het studieschip wordt aangepast op basis van de minimale afstand tussen de contour van het schip en de dieptelijn overeenkomstig de maximale diepgang van het schip door middel van de kleurcode weergegeven in Tabel 16.

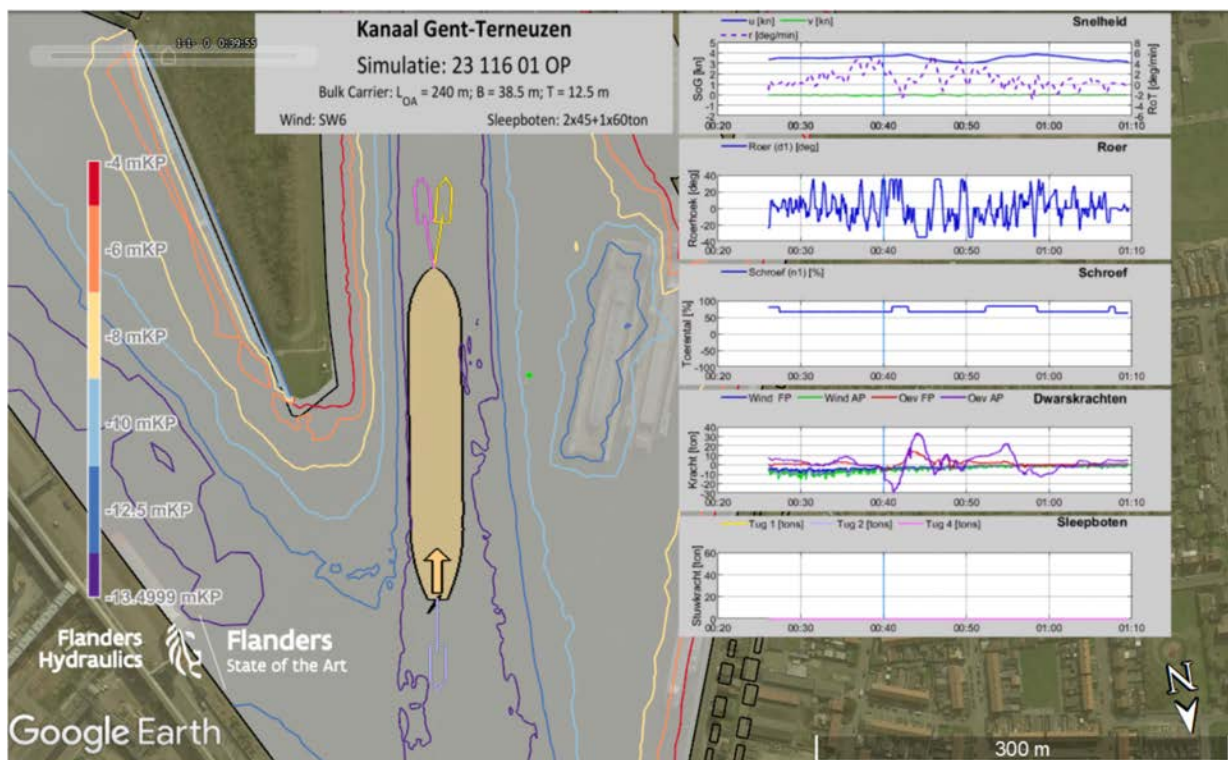
- een pijl ter hoogte van het achterschip geeft de werking van de schroef aan waarbij de richting van de pijl aangeeft of de schroef voor- of achteruit toegepast wordt en de kleur van de pijl overeenstemt met het gehanteerde toerental volgens de kleurschaal in Tabel 17;
- De contour van de sleepboten en de sleeplijnen worden weergegeven in dezelfde kleur als op de grafiek voor sleepboten. De sleepboten worden ingekleurd op basis van de gehanteerde stuwkracht volgens de kleurschaal in Tabel 17.

Door de lange duur van de simulaties werden er behalve één overzichtsbestand dat de volledige simulatie bevatte ook per simulatie verschillende KMZ-bestanden gegenereerd overeenkomstig onderstaande deeltrajecten van het Kanaal Gent-Terneuzen. Onderstaande deelgebieden werden gedefinieerd:

1. Massagoedhaven (lichtblauw)
2. Brug Sluiskil (donkerblauw)
3. Passage Sluiskil (donkergroen)
4. Kanaal Sluiskil tot Sas van Gent (lichtgroen)
5. Passage Sas van Gent (geel)
6. Straatje van Zelzate (oranje)
7. Rieme (Arcelor-Mittal) (rood)
8. Kluisdok en Rodenhuizedok (donkerrood)
9. Mercatordok (zwart)

De deelgebieden worden in de hierboven vermelde kleur weergegeven in Figuur 95.

Bijlage 4 biedt een handleiding bij het gebruik van de KMZ-bestanden in Google Earth™. Het georeferereerde KMZ-formaat (WGS84) wordt echter ook ondersteund door andere GIS-software (QGIS™; Global Mapper™; ArcGIS™; etc.) en laat de lezer toe om de vaarbaanplots uit de simulaties te converteren naar andere GIS-formaten.



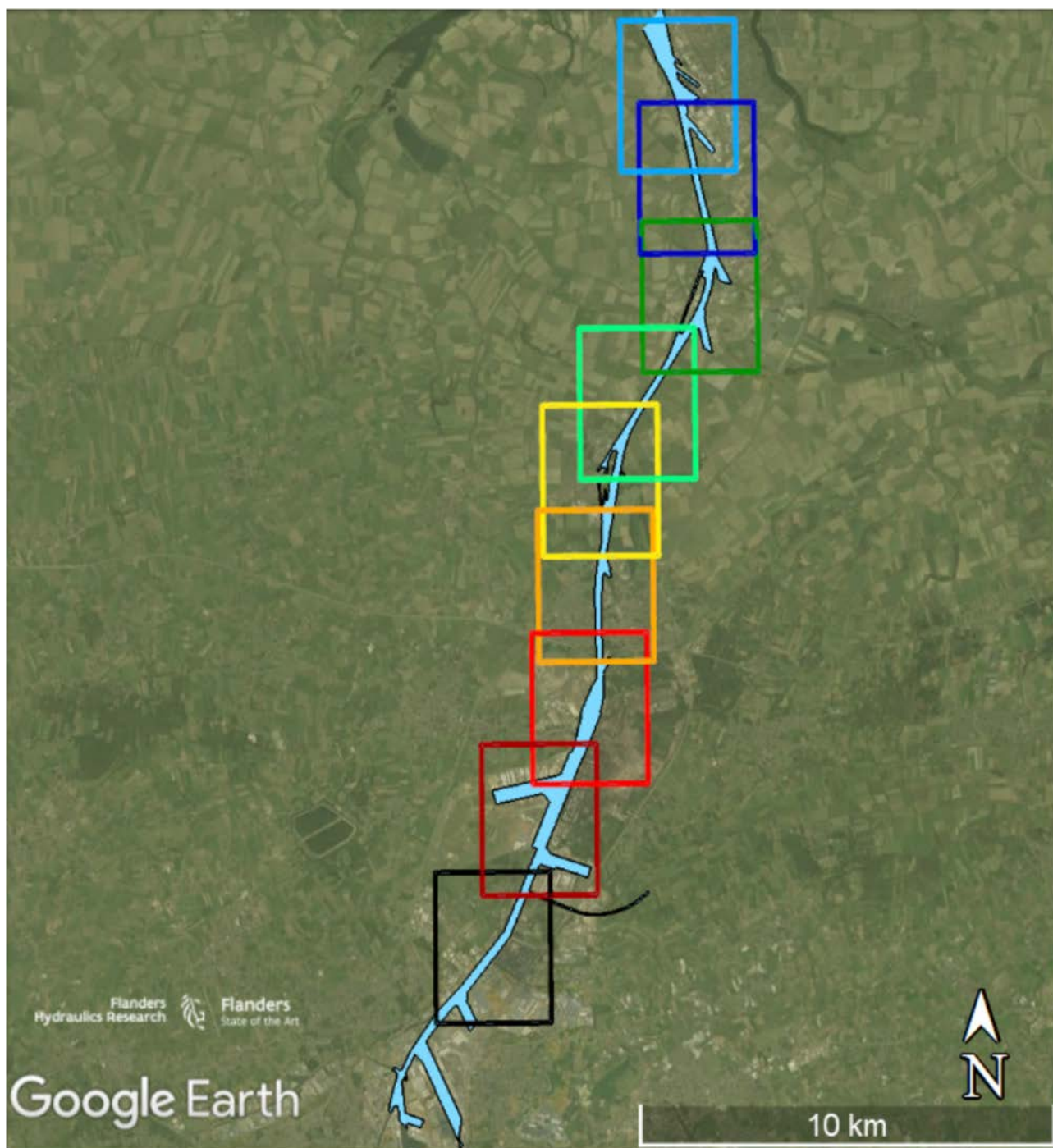
Figuur 94 – KMZ-visualisatie van simulatie 01 bij nadering bocht van Sluiskil zoals weergegeven in Google Earth Pro™

Tabel 16 – Kleurenschaal voor de inkleuring van het simulatieschip op basis van de dichtste afstand tussen het schip en de dieptelijlijn overeenkomstig de maximale diepgang van het schip

Horizontale afstand	Kleur [RGB]
0	[0.843 0.098 0.11]
B/8	[0.992 0.682 0.38]
B/4	[1 1 0.749]
B/2	[0.671 0.867 0.643]
B	[0.169 0.514 0.729]

Tabel 17 – Kleurenschaal voor de inkleuring van de sleepboten en de schroefpijl op basis van respectievelijk de stuwkracht (percentage van de bollard pull van de sleepboot) en het schroeftoerental (percentage tot het toerental Harbour Full)

Sleepboot of schroeftoerental	Transparantie	Kleur [RGB]
0%	0%	[0.169 0.514 0.729]
11%	25%	[0.389 0.669 0.691]
22%	35%	[0.61 0.824 0.653]
33%	45%	[0.776 0.909 0.677]
44%	55%	[0.921 0.968 0.724]
56%	65%	[0.998 0.936 0.675]
67%	75%	[0.995 0.797 0.513]
78%	75%	[0.98 0.634 0.358]
89%	75%	[0.911 0.366 0.234]
100%	75%	[0.843 0.098 0.11]



Figuur 95 – Onderverdeling Kanaal Gent-Terneuzen in deelgebieden (Verwilligen *et al.*, 2021)

Grafieken

De tijdreeksen voor de belangrijkste parameters worden gerapporteerd op basis van twee pagina's.

Onderstaande grafieken worden weergegeven:

- Navigatieparameters:
 - Snelheid:
 - primaire as
 - langsscheepse snelheid schip (kn)
 - dwarsscheepse snelheid schip (kn)
 - secundaire as
 - giersnelheid schip (°/min, positief naar stuurboord)
 - Roer:
 - roerhoek van het schip (°, positief naar bakboord)
 - Schroef:
 - schroeftoerental van het schip (% van rpm Harbour Full Ahead)
 - Sleepboten
 - stuwkracht (ton) toegepast door de sleepboten aanwezig in de simulatie.
- Oever- en windeffecten
 - Dwarsafstanden (m) tussen de contour van het schip en de dieptelijn overeenkomstig de maximale diepgang van het schip
 - Kielspeling (m) ten opzichte van de contour van het schip:
 - UKC Bruto: zonder rekening te houden met de squat van het schip
 - UKC Netto: rekening houdend met de bijkomende inzinking door squat
 - Dwarskrachten op het schip (positief naar stuurboord):
 - dwarskracht op de boeg ten gevolge van wind (ton);
 - dwarskracht op het achterschip ten gevolge van wind (ton);
 - dwarskracht op de boeg ten gevolge van oevereffecten (ton);
 - dwarskracht op het achterschip ten gevolge van oevereffecten (ton);
 - Langskrachten op het schip
 - Langskracht ten gevolge van wind (ton)
 - Langskracht ten gevolge van oevers (ton)

De overzichtsgrafieken van de simulaties worden weergegeven in Bijlage 2.

Hittekaarten belangrijkste parameters

Voor de simulaties uitgevoerd voor de beide ladingscondities werden er voor de belangrijkste parameters hittekaarten weergegeven waarin per 50 m kanaallengte de minst gunstige waarde van de parameter weergegeven wordt.

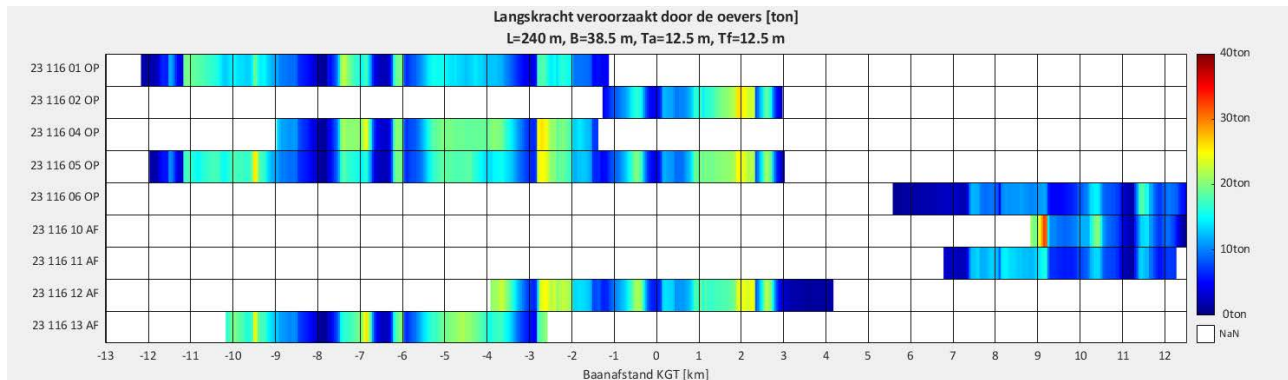
De verwerkte parameters betreffen:

- de langsscheepse vaarsnelheid van het schip (kn);
- de absolute waarde van de giersnelheid van het schip (°/min);
- het procentueel gebruik van de absolute roerhoek ten opzichte van de maximale roerhoek (%);
- het procentueel gebruik van het toerental ten opzichte van het toerental voor Harbour Full Ahead (%);
- de minimale afstand tussen de contour van het schip en de dieptelijn overeenkomstig de maximale diepgang van het schip (m);
- de minimale bruto kielspeling ter hoogte van de scheepscontour van het schip (m);
- de langskracht veroorzaakt door de oever (ton)
- de totale dwarskracht ten gevolge van wind (ton)
- de dwarskracht op het achterschip ten gevolge van wind (ton)

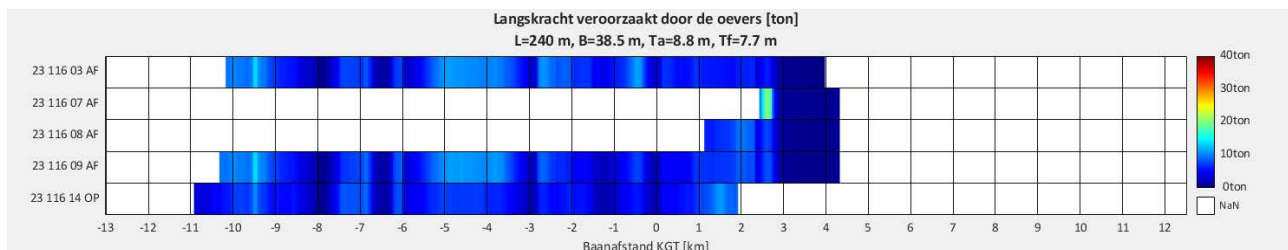
- de dwarskracht op het achterschip ten gevolge van de oever (ton)
- de dwarskracht op de boeg ten gevolge van wind (ton)
- de dwarskracht op het voorschip ten gevolge van de oever (ton).

De hittekaarten werden voor de beide ladingscondities gegeneerd op basis van eenzelfde kleurenschaal en voor de totale afstand van het kanaal tussen de Massagoedhaven en het Sifferdok. Als voorbeeld worden in Figuren 96 en 97 de hittekaarten weergegeven voor de langskracht ten gevolge van de oever zoals berekend tijdens respectievelijk de simulaties bij maximale diepgang en de simulaties bij heavy ballast ladingsconditie.

Een volledig overzicht van de hittekaarten van de vaarsimulaties wordt weergegeven in Bijlage 3.



Figuur 96 – Hittekaart voor de langskracht ten gevolge van de oever voor de simulaties uitgevoerd bij diepgang 12.5 m



Figuur 97 – Hittekaart voor de langskracht ten gevolge van de oever voor de simulaties uitgevoerd bij ladingsconditie Heavy Ballast

Beoordeling door loodsen

Na elke simulatie werd door de onderzoeker een nabespreking gehouden met de loodsen waarbij het uitgevoerde manoeuvre geëvalueerd werd. Behalve een mondelinge bespreking van het manoeuvre werd de simulatie cijfermatig beoordeeld op reserve en moeilijkheidsgraad. Hiervoor werd onderstaande waardeschaal gehanteerd:

- Reserves:
 1. gelukt met veel reserve;
 2. gelukt met voldoende reserve;
 3. gelukt met weinig reserve;
 4. ten einde gebracht met incidenten (geen schade)
 5. niet gelukt met schade;
 6. niet gelukt/opgegeven.

- Moeilijkheidsgraad:
 1. het werd vlot uitgevoerd;
 2. het werd normaal uitgevoerd;
 3. meer dan normale moeilijkheid;
 4. het was moeilijk;
 5. het was uiterst moeilijk;
 6. onuitvoerbaar.

Bovendien werd een ja/nee vraag gesteld of het gesimuleerde manoeuvre ook in realiteit uitgevoerd zou worden.

Deze beoordelingen zijn toegevoegd aan Tabel 15.

5.2.3 Resultaten simulaties bij diepgang 12.5 m

Zoals weergegeven in Tabel 15 werden negen van de veertien simulaties uitgevoerd bij de maximale ladingsconditie voor het kanaal. Op de eerste simulatiedag werden de eerste twee simulaties uitgevoerd met het scheepstype bulk carrier. Hierbij lag de nadruk op de beoordeling van de oevereffecten. In de volgende simulaties werd steeds het scheepstype tanker onderzocht aangezien dit scheepstype maatgevender was wat betreft de windeffecten en eenzelfde modellering van de oevereffecten kende. De simulaties uitgevoerd met de tanker tonen een belangrijke impact van zowel oevereffecten als windeffecten.

De simulaties uitgevoerd op de laatste simulatiedag (simulaties 10, 11, 12 en 13) stemmen overeen met afvaarten met de tanker.

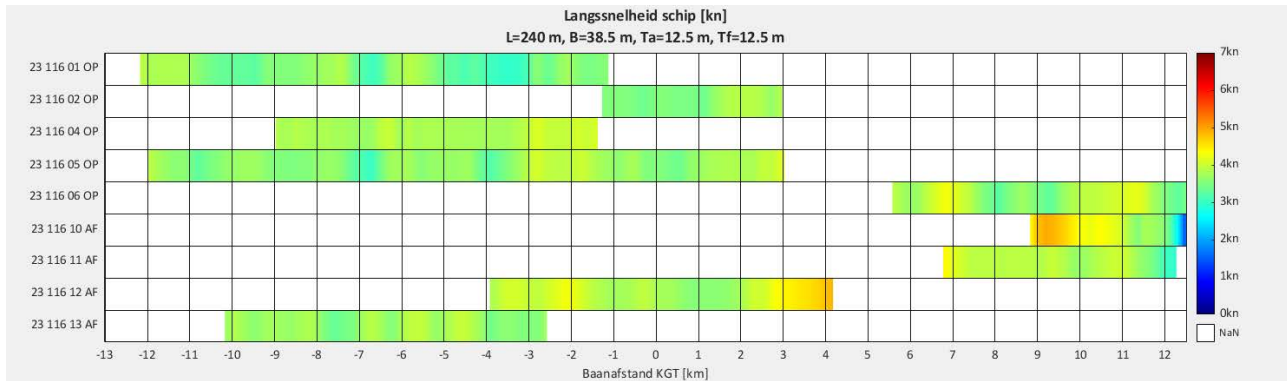
Opvaart met T=12.5 m

In Figuur 98 wordt de hittekaart voor de langssnelheid weergegeven van de simulaties die uitgevoerd werden met de studieschepen bij maximale diepgang. In eerste instantie toont deze grafiek aan dat de uitgevoerde simulaties het volledige kanaaltraject dekken (met uitzondering van het brede kanaalgebied te Kluizendok (+4 km tot +6 km)) en dit zowel voor de simulaties in opvaart als in afvaart. Bovendien tonen deze simulaties de relatief lage vaarsnelheden die gehanteerd werden bij de maximale ladingsconditie. Hoewel de maximale vaarsnelheid op heden 4.8 kn bedraagt, blijkt de vaarsnelheid in de smalle kanaalsecties doorgaans tussen 3.5 kn en 4 kn te bevinden. Deze vaarsnelheden waren het gevolg van de belangrijke langskracht die in de simulator berekend werd ten gevolge van de oever.

De oevereffecten worden in belangrijke mate bepaald door de vaarsnelheid in het kanaal. Op basis van de uitgevoerde simulaties wordt dan ook aangeraden om de vaarsnelheden op de meest uitdagende locaties langsheen het kanaal te beperken tot 4 kn. Dit houdt in dat de vaarsnelheid in de ruimere delen van het kanaal hogere waarden kan bereiken maar dat de vaarsnelheid in die gevallen actief (door gebruik achterste sleepboot) teruggebracht dient te worden tot snelheden lager dan 4 kn wanneer één van de uitdagende locaties genaderd wordt. Onder de uitdagende locaties worden verstaan:

1. -11.5 km tot -11 km: de aanloop van het kanaal ter hoogte van de Zevenaarhaven (voor opvaart);
2. -9.9 km: de nadering en passage van de brug te Sluiskil
3. -8.0 km tot -7.5 km: de nadering van de bocht van Sluiskil ter hoogte van de Yara-haven (voor opvaart)
4. -7.5 km tot -6.0 km: de bocht van Sluiskil, de passage van de Autriche-haven en de op- en afwaartse kanaalversmallingen
5. -6.0 km tot -5.7 km: de passage van het zijkanaal D (voor afvaart)
6. -3.7 km tot -2.7 km: de bocht van Sas van Gent
7. -2.2 km: de passage van de brug te Sas van Gent

8. -2.1 km tot -1.3 km: de passage van Zijkanaal G, Zijkanaal H en zuid-Chemie (voor afvaart)
9. 0 km tot 1.1 km: de passage van de grens tot brug Zelzate
10. 1.1 km tot 2.7 km: de passage van straatje van Zelzate (tot en met de verbreding aan Arcelor-Mittal
11. 6.8 km tot 7.5 km: de passage van het Rodenhuizedok
12. 9.2 km tot 10.0 km: de passage van Ghent Commodity Terminal
13. 10.8 km tot 11.4 km de passage van Mercatordok.



Figuur 98 – Hittekaart voor de langssnelheid voor de simulaties uitgevoerd bij diepgang 12.5 m

De hittekaart voor de dwarskracht op het achterschip veroorzaakt door oevereffecten (zie Figuur 99) biedt een goed overzicht van de maatgevende locaties voor oevereffecten. Bovendien geeft Figuur 100 de hittekaarten weer voor de dwarsafstanden tot de oever als de dwarsafstand tussen de contour van het schip en de 12.5 m-dieptelij. De combinatie van deze twee hittekaarten geeft een goede illustratie van de meest uitdagende trajecten langsheen het kanaal.

Vanuit manoeuvreer-technisch oogpunt geldt voor een opvarend schip de passage van de bocht van Sluiskil als een belangrijk knelpunt. Dit wordt geïllustreerd door de kleinere oeverafstanden (Figuur 100) die optreden in de zones -8 km tot -6.7 km en eveneens de belangrijke oevereffecten die in deze zone waargenomen worden. Voor een opvarend schip dient de bocht van Sluiskil ingezet te worden in een erg asymmetrisch kanaaltraject (s -7.7 km) zoals geïllustreerd in Figuur 94. De aanwezigheid van de oever aan bakboord veroorzaakt een gierbeweging van het schip naar stuurboord die hoewel gunstig voor het bochten te Sluiskil gecompenseerd dient te worden door een belangrijke roerhoek naar bakboord. De verschillende loodsen voeren de nadering van de bocht van Sluiskil op verschillende manieren uit. Sommige loodsen verkiezen om de bocht aan te vatten in de buitenbocht zodat het oevermoment de gierbeweging helpt en er vermeden wordt dat de gierbeweging gestut wordt, wanneer er te veel in de binnenbocht gevaren wordt (dit was het geval in simulatie 01 resulterend in grote oeverkrachten in de bocht van Sluiskil). In andere simulaties verkoos de loodsen om dicht bij de binnenbocht te varen omdat hij op die manier een goede controle had over de oevermomenten die wel het bochten van het schip tegenwerkten, maar die (behoudens een te korte positie in de binnenbocht) gecompenseerd konden worden door het roer. Figuur 102 toont de positie van het schip in simulatie 01 bij het bereiken van de bocht van Sluiskil. De positie in de buitenbocht doet het schip naar stuurboord gieren waardoor het vervolgens in de binnenbocht terechtkomt (zie Figuur 103). Het schip ervaart achtereenvolgens een belangrijk oevereffect naar stuurboord en bakboord waarbij een belangrijk roergebruik nodig is om de gierbeweging naar stuurboord opnieuw op te bouwen.

In simulaties 04 en 05 zijn de oevereffecten bij de passage van bocht Sluiskil meer gematigd. Dit heeft deels te maken met het feit dat deze simulaties uitgevoerd werden met de tanker, waarbij de loodsen anticipeerden op de windeffecten door de zuidwestelijke wind door een meer westelijke vaarpositie aan te nemen en hierdoor minder dicht bij de buitenbocht te varen. Deze vaarpositie blijkt vanuit het standpunt van de oevereffecten gunstiger te zijn.

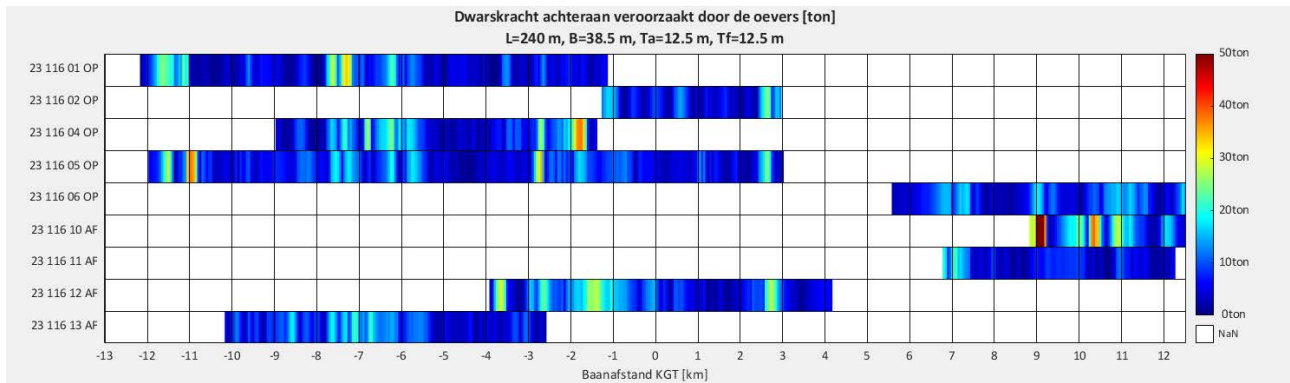
Een goede visualisatie van de sterk verschillende windinvloed voor de opvaarsimulaties uitgevoerd met de bulk carrier (01 en 02) vergeleken met de tanker (04, 05 en 06) wordt weergegeven in de hittekaart voor de dwarskracht ten gevolge van wind in Figuur 101. Bij de simulaties bleken er belangrijke roerhoeken (en gebeurlijk ook toename van het schroeftoerental) noodzakelijk wanneer de westelijke wind gecombineerd werd met een oostelijke oever. Bovendien gaf de zuidwestelijke windrichting aanleiding tot beperkt lagere vaarsnelheden in opvaart door de kopwind.

Na de bocht van Sluiskil geldt de passage van de Autriche-haven als een volgende knelpunt waarbij de oevereffecten het bochten naar stuurboord bemoeilijken. Doordat in de simulaties de vaarsnelheid beperkt werd, waren de oevereffecten ter hoogte van de Autriche-haven beheersbaar en kon het schip de stuurboord oever goed volgen.

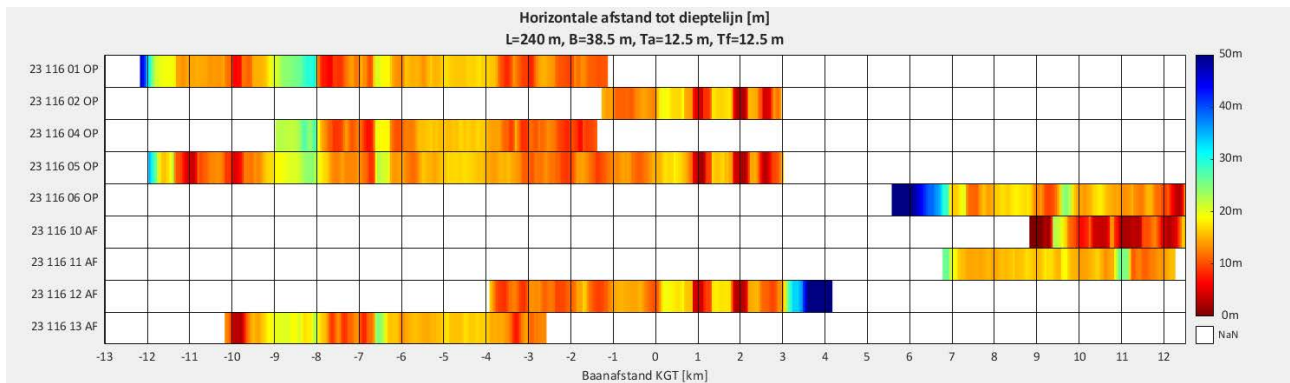
Een volgende knelpunt betrof de bocht van Sas van Gent. De bathymetrie in de bocht van Sas van Gent is wat ruimer dan te Sluiskil en bovendien is het vaarwater ook breder waardoor de oevereffecten meer gematigd zijn. Daar tegenover staat dat de bocht van Sas van Gent voor een opvarend schip deel uitmaakt van de brugnadering en bijgevolg erg nauwgezet uitgevoerd dient te worden. In de simulaties blijken de effecten te bocht van Sas van Gent eerder gematigd en worden deze manoeuvres aan ca. 4 kn uitgevoerd.

In simulatie 06 werd een opvaart uitgevoerd voor het kanaaltraject opwaarts het Kluizendok. Dit deel van het kanaal is merkbaar ruimer en bleek geen bijkomende beperkingen mee te brengen. De invaart van het Sifferdok werd op erg korte afstand van de bakboord oever uitgevoerd waardoor op deze locatie de afstand tussen schip en oever rode kleuren vertoont in Figuur 100. De loodsen gaven echter aan dat op deze locatie er ook op grotere afstand van de oever gevaren kon worden en dat in realiteit het invaren van het dok op een centralere positie en met de assistentie van sleepboten uitgevoerd zou worden. De opvaart van het Vlaamse traject opwaarts Kluizendok werd door de loodsen positiever beoordeeld dan het kanaaltraject afwaarts het Kluizendok.

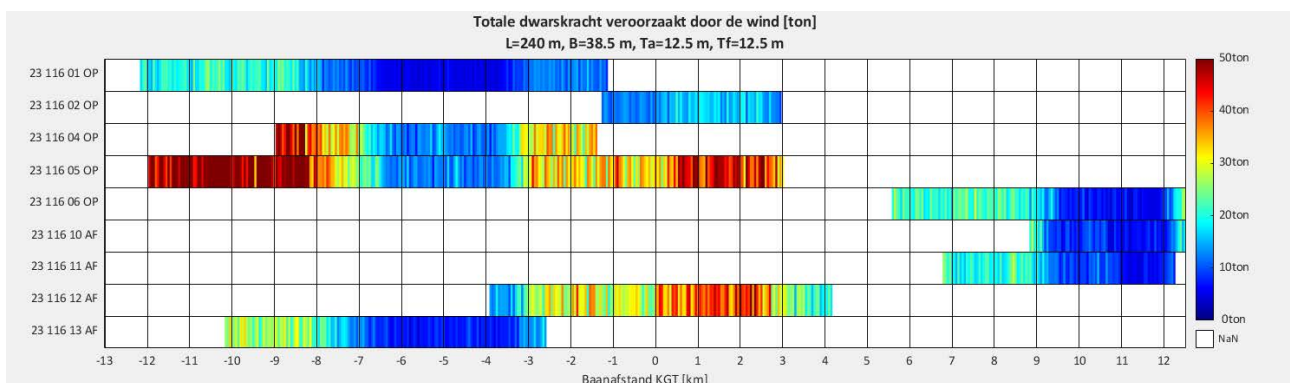
Vanaf simulatie 04 werden alle simulaties uitgevoerd met het scheepstype tanker. Zo betrof Simulatie 05 de eerste simulatie van de tweede simulatiedag en waren de loodsen in het begin van de simulatie nog verrast door de grote windeffecten op het schip (op heden varen deze scheepstypes niet op het kanaal). Hierdoor verlijerde het schip bij het begin van het kanaaltraject tot de oostelijke oever waarbij de aanzuiging van het achterschip door oevereffecten de windeffecten versterkte en een belangrijke oevermoment naar stuurboord veroorzaakte (zie Figuur 104). Uiteindelijk was een belangrijk gebruik van de achterste sleepboot (zie Figuur 105) noodzakelijk om het achterschip te verwijderen van de oever. Om de gierbeweging van het schip te compenseren werd bovendien de voorboot tot maximaal 50% ingezet. Er wordt aangenomen dat deze compensatie met sleepboten deels ingegeven is door de gewenning tijdens de opstart van de eerste simulatie van de dag. Toch kan ook meer algemeen opgemerkt worden dat voor de opvaarten met de tanker een combinatie van een oostelijke oever en de zuidwestelijke windconditie een belangrijke compensatie met het roer vereist en dat de windeffecten een merkbare impact hadden op het vaargedrag van de tanker bij maximale diepgang. Op de eerste simulatiedag gaf de bijkomende hinder door windeffecten aanleiding tot een minder goede beoordeling voor de simulaties uitgevoerd met de tanker dan met de bulk carrier. Op zowel de eerste als de tweede simulatiedag werden de simulaties met het scheepstype tanker aanvaardbaar geacht voor opvaarten bij windcondities ZW6. Toch wordt op basis van latere simulaties uitgevoerd in afvaart bij ZW6 en in opvaart bij WZW5 maar bij heavy ballast conditie beslist om in eerste instantie de windlimieten voor tankvaart met één Beaufortklasse te verstrengen ten opzichte van de huidige limieten.



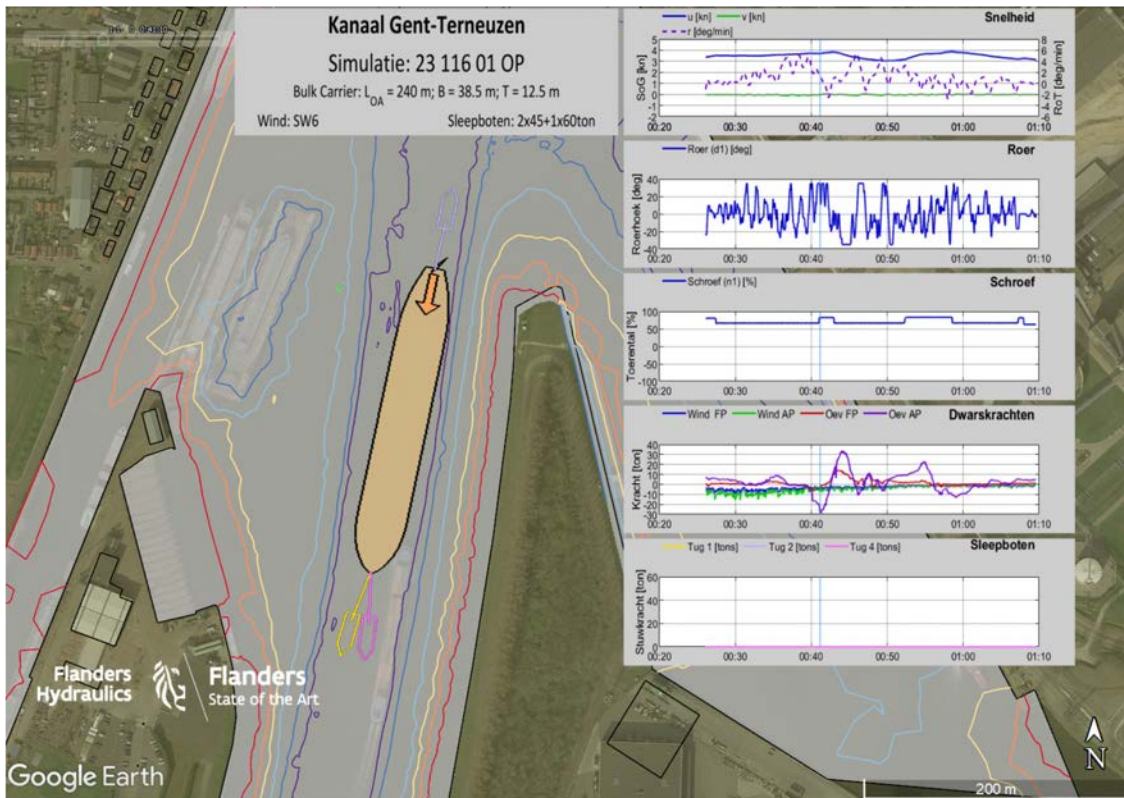
Figuur 99 – Hittekaart voor de dwarskracht door oevereffecten op het achterschip voor de simulaties uitgevoerd bij diepgang 12.5 m



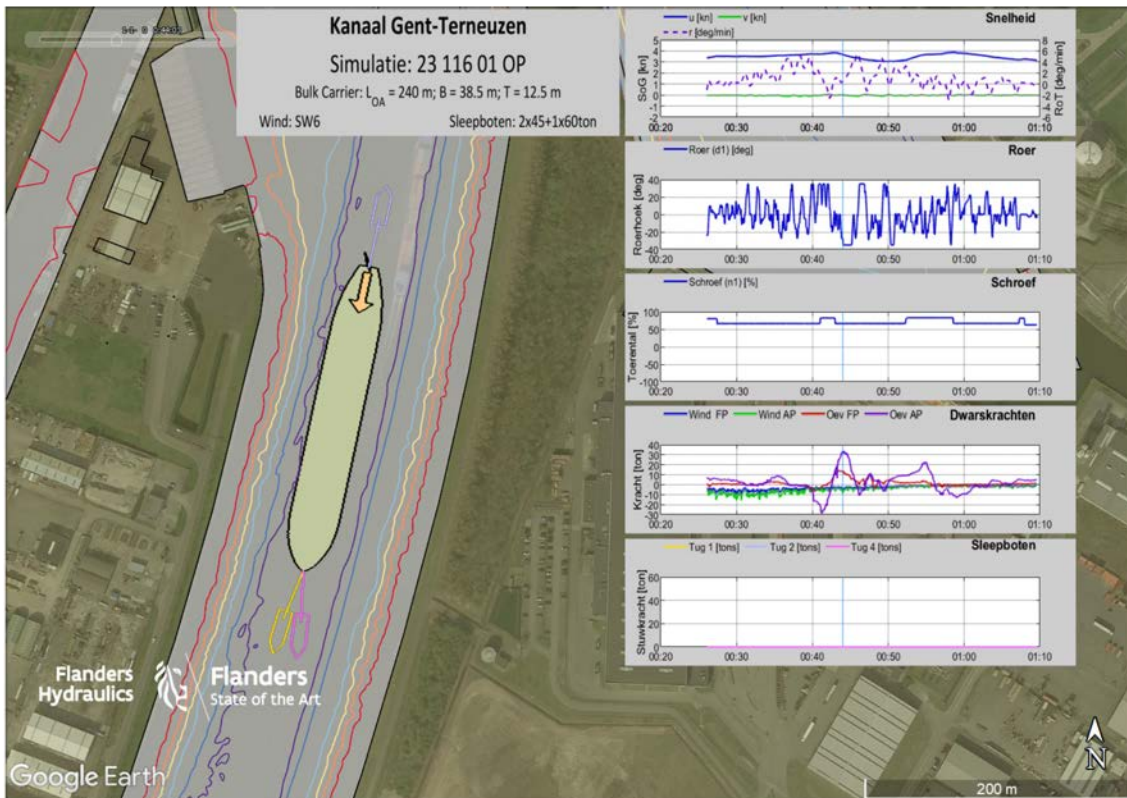
Figuur 100 – Hittekaart voor de horizontale afstand tussen het schip en de 12.5 m dieptelijn voor de simulaties uitgevoerd bij diepgang 12.5 m



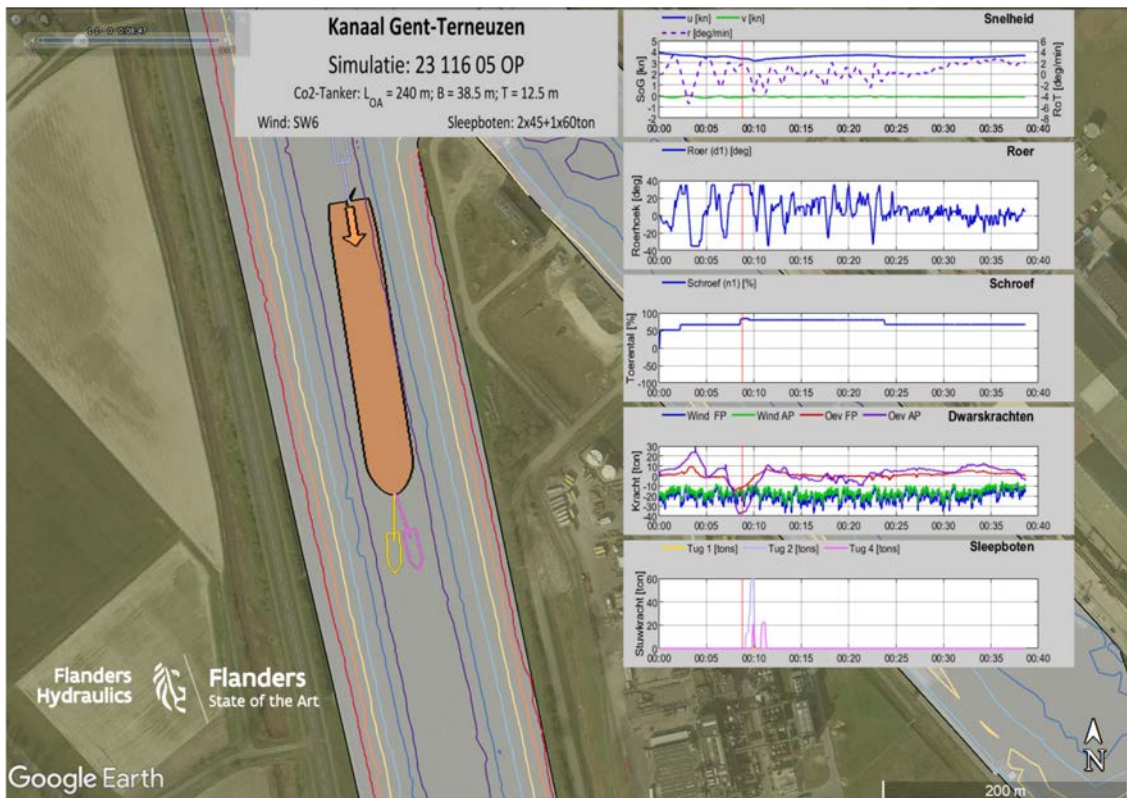
Figuur 101 – Hittekaart voor de dwarskracht door wind voor de simulaties uitgevoerd bij diepgang 12.5 m



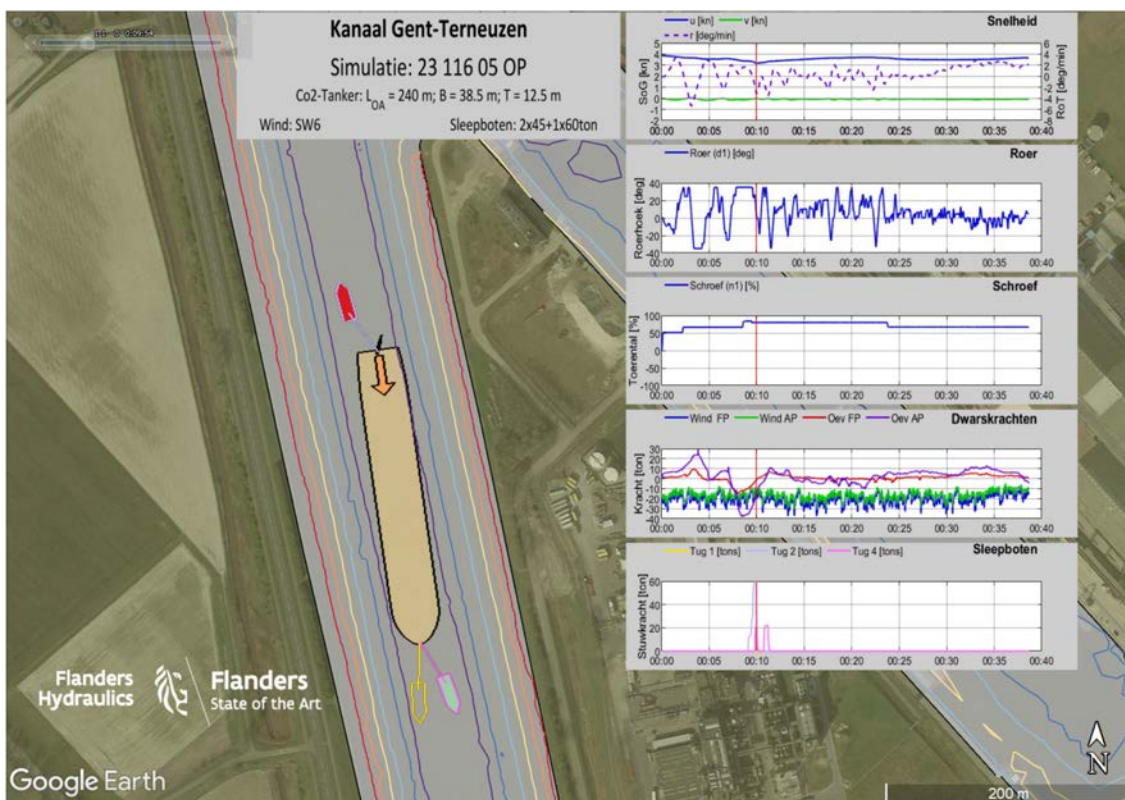
Figuur 102 – Positie van het schip in de buitenbocht bij de aanloop van de bocht van Sluiskil in simulatie 01 resulterend in een belangrijk oevereffect waardoor het schip verzet wordt naar de binnenbocht



Figuur 103 – Positie van het schip in de binnenbocht ten gevolge van een eerdere afstoting door de bakboord oever in de bocht van Sluiskil in simulatie 01 resulterend in een belangrijk oevereffect dat het schip naar bakboord doet gieren



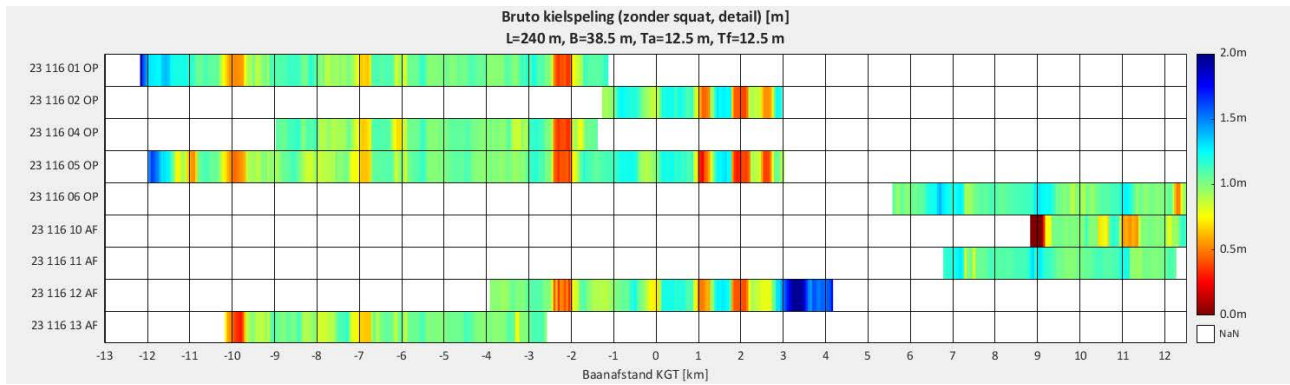
Figuur 104 – Belangrijke oostelijke positie van de tanker in simulatie 05 bij invaart kanaal door een combinatie van wind en oevereffecten



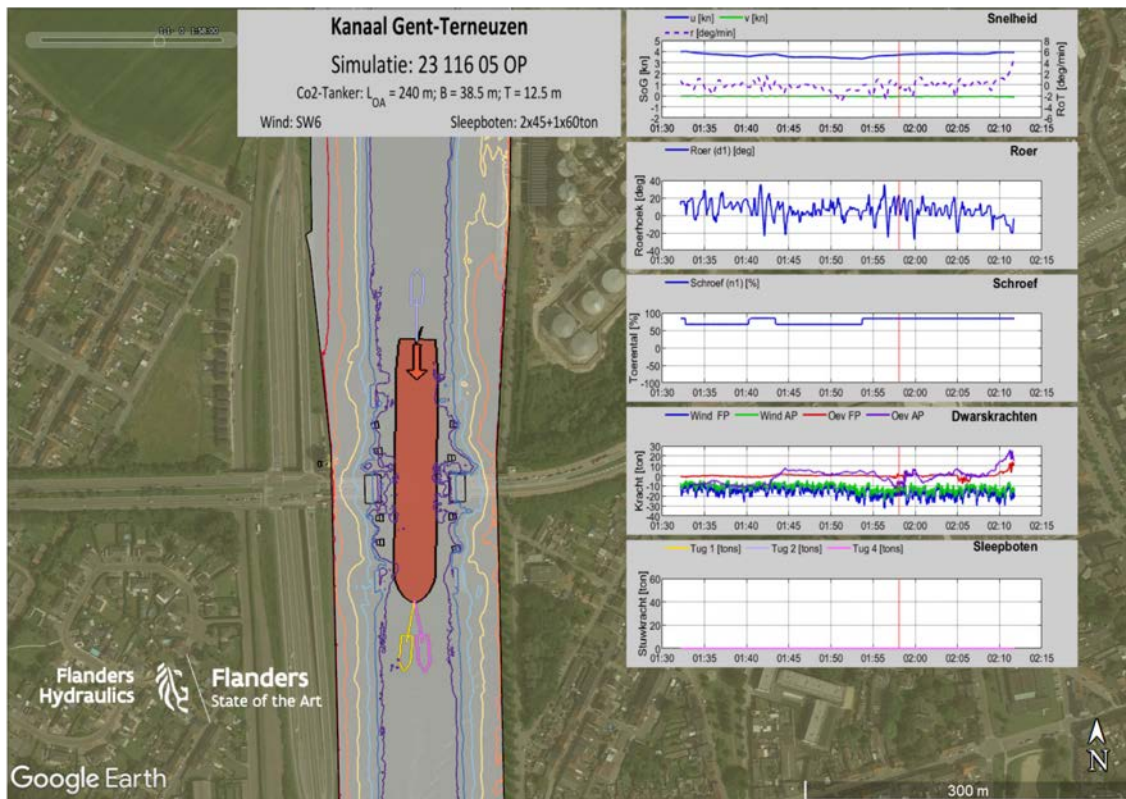
Figuur 105 – Belangrijke inzet van sleepboten om de gierbeweging van het schip naar stuurboord (geïnduceerd door eerdere oevereffecten) te compenseren in simulatie 05

Kielspelingen en bodemafstanden

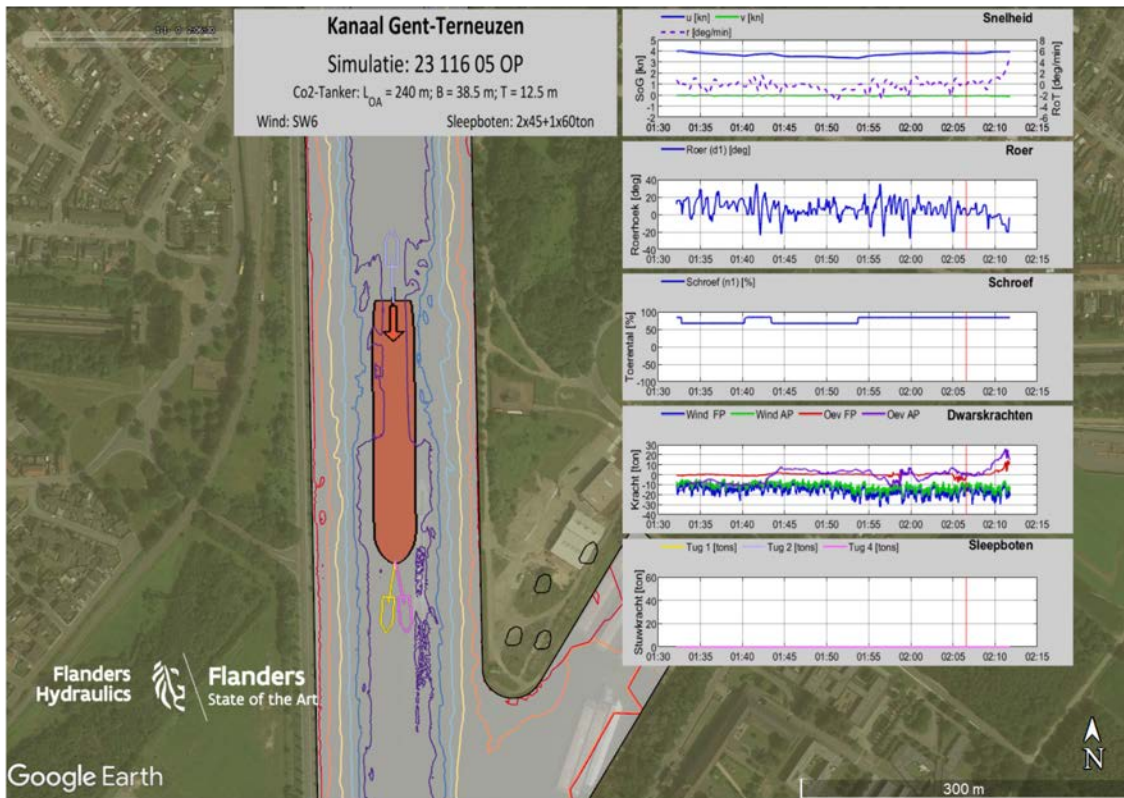
Op basis van de afstanden tot de dieptelijn (Figuur 100) en de minimale bruto kielspelingen (Figuur 106) blijken er onder andere erg korte afstanden tussen schip en bodem voor de brugpassages (-9.95 km; -2.20 km en +1.10 km). Voor de passage Zelzate blijken er drie locaties waarvoor een belangrijke kleine kielspeling waargenomen wordt. Het betreffen de passage van de brug (+1.10 km), de passage van de tunnel (+2.00 km) en de passage van de opwaartse aansluiting van het straatje van Zelzate (2.60 km). De positie van de schepen op deze locaties worden weergegeven in Figures 107 tot 109 en illustreren inderdaad de korte afstand tussen schip en oever (of 12.5 m dieptelijn). Figuur 110 en Figuur 111 geven respectievelijk de figuur voor de oeverafstanden en de kielspeling voor deze simulatie te Zelzate weer. De bruto kielspelingen onder de scheepscontour bedragen minder dan 0.4 m en wanneer rekening gehouden wordt met de verwachte inzinking van de schepen dan naderen (of overschrijden) de kielspelingen de waarde nul wat aangeeft dat op deze locaties een contact tussen schip en bodem aannemelijk is (de analyse houdt wel geen rekening met de effectieve rompvorm onder water die in het kielvlak wel smaller zal zijn dan op dekhoogte). Gelijkaardige figuren worden in Figuur 112 en Figuur 113 aangeboden voor de passage Sas van Gent voor simulatie 05. Hoewel de afstanden tot de -12.5 m-dieptelijn te Sas van Gent ruimer zijn (tussen 18 m en 10 m) blijkt bij de passage van de brug ook hier een erg kleine afstand tussen schip en bodem, die rekening houdend met de squat van het schip erg kleine positieve waarden bereikt (0 tot 10 cm).



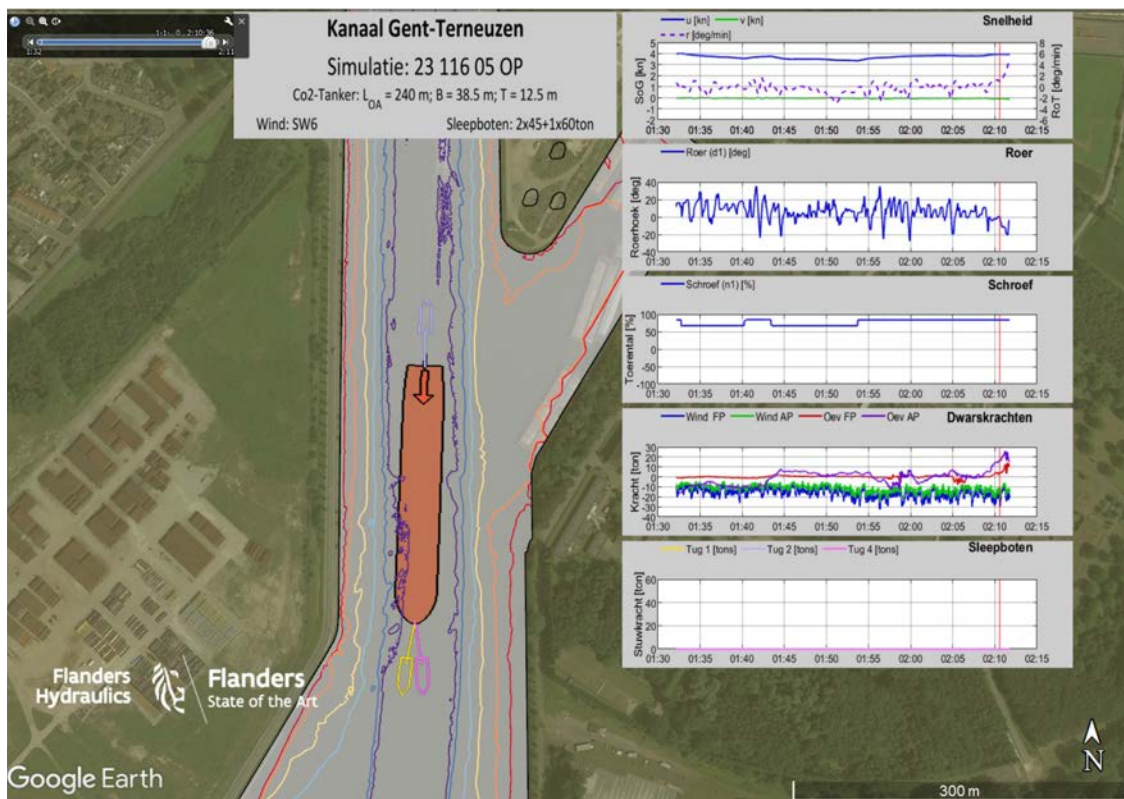
Figuur 106 – Hittekaart voor de bruto kielspeling voor de simulaties uitgevoerd bij diepgang 12.5 m



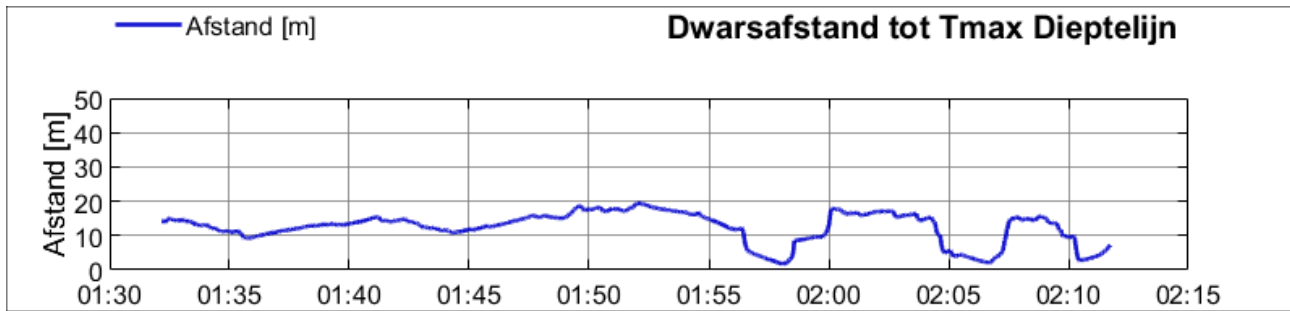
Figuur 107 – Korte afstand tussen schip en 12.5 m dieptelijn (donkerblauw) in simulatie 05 bij passage brug Zelzate



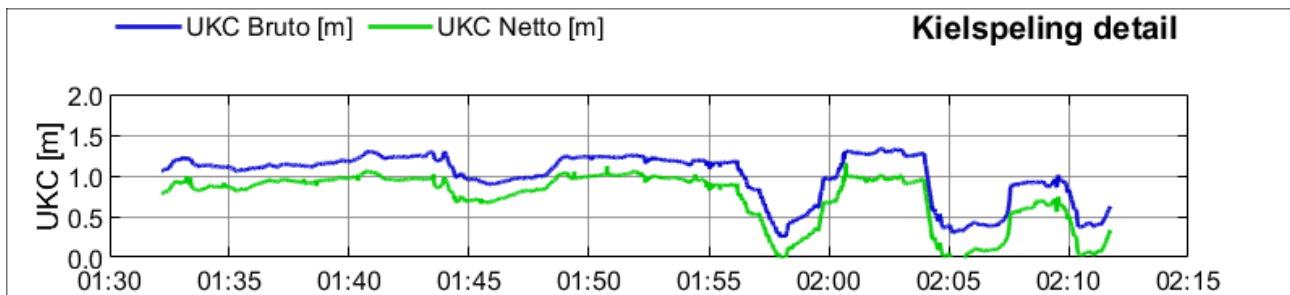
Figuur 108 – Korte afstand tussen schip en 12.5 m dieptelijn in simulatie 05 bij passage tunnel Zelzate



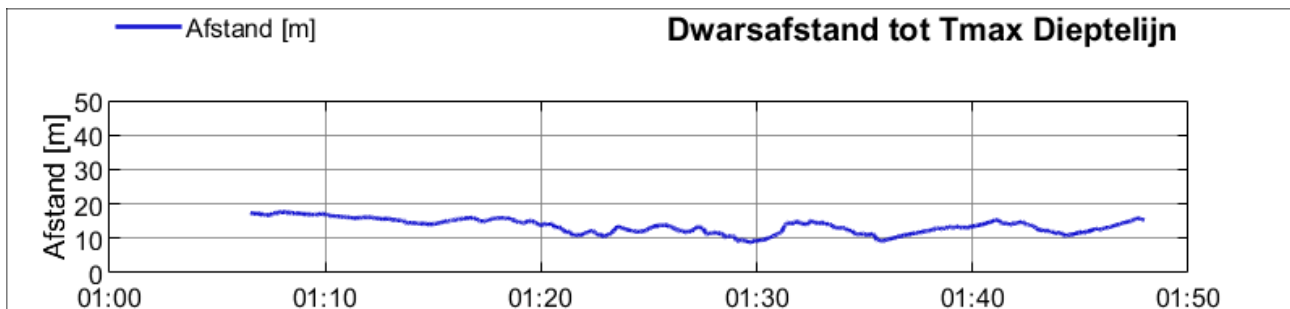
Figuur 109 – Korte afstand tussen schip en 12.5 m dieptelijn in simulatie 05 ter hoogte van de opwaartse aansluiting van het straatje van Zelzate



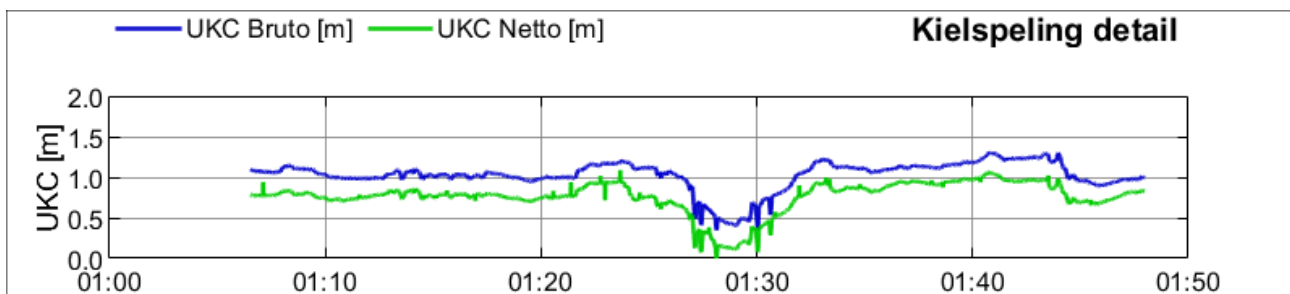
Figuur 110 – Dwarsafstanden tussen de scheepscontour en de 12.5 m dieptelijn voor passage Zelzate in simulatie 05



Figuur 111 – Minimale kielspelingen tussen de scheepscontour op diepte 12.5 m en de kanaalbodem voor passage Zelzate in simulatie 05



Figuur 112 – Dwarsafstanden tussen de scheepscontour en de 12.5 m dieptelijn voor passage Sas van Gent in simulatie 05



Figuur 113 – Minimale kielspelingen tussen de scheepscontour op diepte 12.5 m en de kanaalbodem voor passage Sas van Gent in simulatie 05

Afvaart met T=12.5 m

Op de laatste simulatiedag werden de omgekeerde vaarrichtingen onderzocht voor de tanker. De reden hiervoor is dat voor CO2-tankers aangenomen kan worden dat deze ledig aankomen en bij maximale diepgang zullen vertrekken.

De afvaarten met maximale diepgang is, net als met het beloodsen van bovenmaatse CO2-tankers, een manoeuvre waarmee de loodsen weinig ervaring hebben en tijdens de simulaties gepaard bleek te gaan met enkele belangrijke uitdagingen.

De eerste simulaties op de derde simulatiedag werden aangevat in het Sifferdok. De eerste simulatie ging gepaard met wat afwijkende opstartcondities die te wijten waren aan de gewenning aan de simulatie (in het begin van de simulatie was de taakverdeling tussen de loodsen nog niet duidelijk) en een te hoge startsnelheid. Het relevante deel van de simulatie 10 start na 15 minuten. Echter ook tijdens het volgende verloop van simulatie 10 blijkt de loods moeilijkheden te hebben met het schip centraal in de vaarweg te houden zoals blijkt uit de oeverafstanden die voor deze simulatie in Figuur 100 weergegeven voor het traject tussen kanaalafstanden 12 km en 10 km en waarvan het tijdsverloop aangeboden wordt in Figuur 114. In simulatie 10 bleek de loods het schip voornamelijk te positioneren op basis van het buitenbeeld en consulteerde de loods de PPU minder. Hoewel de loods een ruime ervaring heeft met de beloodsing van 37m-schepen bleek de loods bij deze eerste simulatie moeilijkheden te hebben met het respecteren van een aanvaardbare oeverafstand. Bovendien liet de loods in deze simulatie de snelheid oplopen tot kanaalsnelheid door gebruik te maken van de telegraafstand Harbour Full Ahead (en de rugwind SW6). Bij de passage van de Ghent Commodity Terminal bereikte het schip een vaarsnelheid gelijk aan 5 kn en werd de gierbeweging naar bakboord ondanks de afwezigheid van belangrijke oevereffecten onvoldoende snel opgebouwd (zie Figuur 115) waardoor het schip de smallere kanaalsectie afwaarts de terminal op een erg excentrische positie bereikte aan een hoge vaarsnelheid (zie Figuur 116) wat aanleiding gaf tot belangrijke oevereffecten en uiteindelijk de stranding van het schip in de tegenovergestelde oever.

Op basis van deze simulatie werd geconcludeerd dat de kanaalvaart met 38.5 m schepen vereist dat het schip zich op een centrale positie in de vaarweg bevindt en dat de snelheid gecontroleerd moet worden tot minder dan 4 kn.

Met deze kennis werd de simulatie herhaald in simulatie 11 waarbij op basis van Figuur 117 aangetoond werd dat het schip op in deze simulatie een aanvaardbare afstand tot de oever kan realiseren. In simulatie 11 gebruikte de loods de Qastor intensief en werd de snelheid gecontroleerd tot maximaal 4 kn. Op het einde van de simulatie werd er wat meer snelheid opgebouwd na de passage van Rodenhuizedok. Simulatie 11 kende een opvallend gunstige beoordeling van de veiligheidsmarges, waarbij de loods stelde dat de simulatie uitgevoerd kon worden met veel reserves. Anderzijds werd wel aangehaald dat het manoeuvre gepaard ging met een meer dan normale moeilijkheid. Deze beoordeling was ingegeven door de grote concentratie die tijdens de simulatie nodig was en de nauwkeurige uitlezing van de Full SNMS PPU om een centrale vaarpositie aan te houden. Er kan gesteld worden dat mits het schip centraal in het kanaal gepositioneerd wordt en de snelheid beperkt wordt tot 4 kn de kanaalvaart op het Vlaamse traject opwaarts het Kluizendok aanvaardbaar is voor de tanker bij maximale diepgang en windconditie SW6.

In de volgende simulaties 12 en 13 werd de afvaart met de tanker bij diepgang 12.5 m verdergezet. In simulatie 12 werd het traject tussen Arcelor-Mittal en bocht Sas van Gent uitgevoerd en in simulatie 13 het traject tussen Sas van Gent en de brug van Sluiskil.

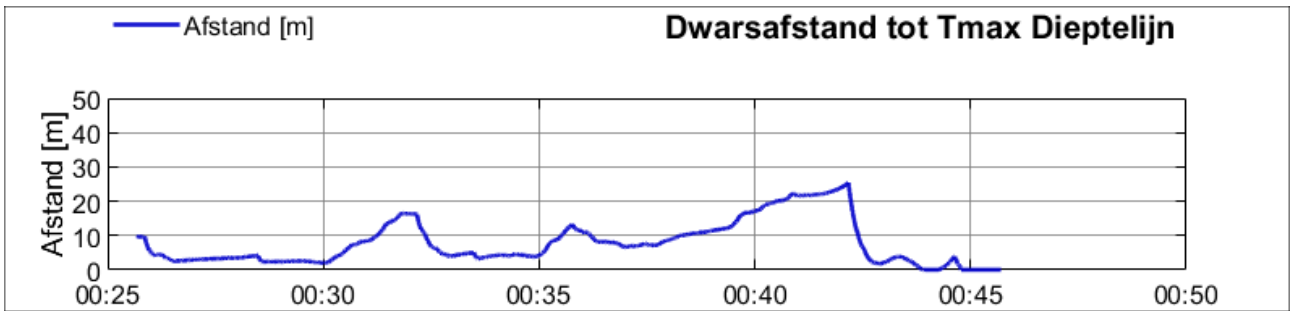
Voor een afvarend schip toont Figuur 118 aan dat de wind (meer dan voor een opvarend schip) een belangrijke dwarskracht op het achterschip genereert bij windconditie ZW6 (zie simulatie 12). Voor de passage Zelzate werden op het achterschip windkrachten ervaren tot 35 ton. De belangrijke wind op het achterschip vereiste een continu gebruik van de roerhoek naar stuurboord bij de passage van Zelzate.

Om de oevereffecten te beperken werd simulatie 12 uitgevoerd aan een maximale vaarsnelheid gelijk aan 4 kn waarbij een beperkte verlaging van de snelheid waargenomen werd in de smalste kanaalsecties (te Zelzate). Wanneer het schip de oever aan de oostzijde had,, dan werd de windkracht op het achterschip nog versterkt door een aanzuigende oeverkracht. Dit blijkt met name het geval bij de passage van het schip aan Zuid-Chemie (zie Figuur 119) en de daaropvolgende nadering van de brug te Sas van Gent (zie Figuur 120). Deze locatie gaat gepaard met een belangrijke kanaalassymmetrie waarbij het schip op korte afstand van de oostelijke oever dient te varen om op te lijnen naar de brug. In realiteit wordt dit manoeuvre uitgevoerd met maatgevende schepen in ballast en wordt de brug van een westelijke positie genaderd om de oever- en windeffecten te compenseren. In simulatie 12 kwam het schip op een oostelijke positie aan in deze zone (zie Figuur 119) en werd het schip nog verder opgestuurd naar het oosten. Hierdoor kwam het schip in een erg excentrische positie te liggen waarbij op het achterschip een belangrijke oeverzuiging waargenomen werd. Om het schip weg te krijgen van de oever diende er actief opgestuurd te worden naar bakboord en diende hierna het toerental verhoogd te worden tot Half Ahead om het achterschip weg te krijgen van de oostelijke oever (zie Figuur 120). De verdere nadering en passage van de brug werden bij deze telegraafstand uitgevoerd om het schip voldoende controleerbaar te houden tijdens de brugpassage. Hierdoor nam de snelheid toe tot 4.1 kn.

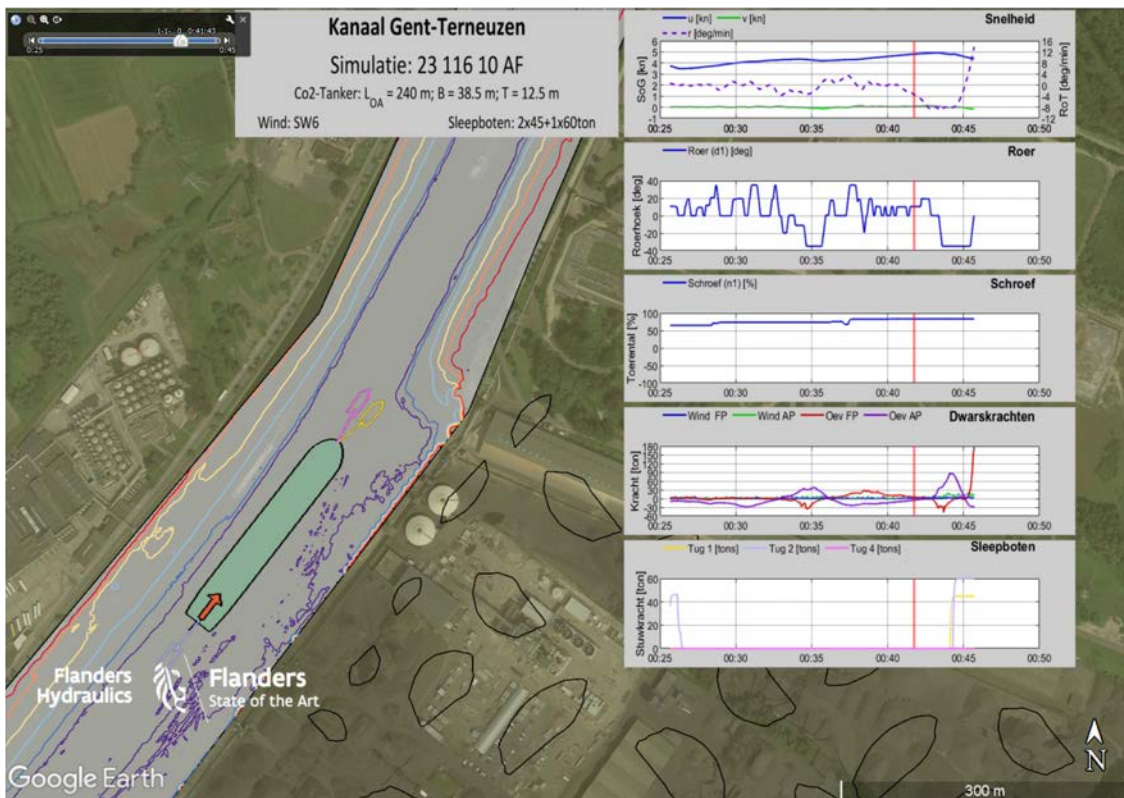
Op basis van de resultaten uit deze simulatie geven de loodsen aan dat op basis van de huidige ervaring de windconditie ZW6 te groot is voor de windgevoelige tanker en worden de condities onderzocht in simulatie 12 niet aanvaardbaar geacht in realiteit. Indien een maatgevende tanker bij maximale diepgang zich zou aanbieden met windoppervlaktes zoals aangenomen in de simulatiestudie dan dient de maximale windkracht tijdens de proefvaarten beperkt te worden tot 5 Bft. Deze limiet kan mogelijks naar boven bijgesteld worden mits de nodige training en ervaring met deze schepen. Bovendien werd er herhaald dat de vaarsnelheid beperkt dient te worden tot 4 kn en dat hiervoor de minimale kracht van de achterboot 70 ton dient te bedragen en op een conventionele manier dient te trekken (niet indirect slepen) opdat de sleepboot ook de vaarsnelheid van het schip kan verminderen zonder dat er dwarse effecten ontstaan.

Op basis van de ervaringen in simulatie 12 werd in simulatie 13 het afvarende traject verder gezet bij een windconditie ZW5. Figuur 101 en Figuur 118 tonen aan dat deze windbeperking een belangrijke impact heeft op de windkrachten ervaren door het schip. Simulatie 13 werd aan matige snelheid uitgevoerd waarbij de Autriche-haven bereikt werd aan 3.5 kn. Om het bochtmanoeuvre uit te voeren en de oevereffecten te compenseren wordt in deze zone de telegraafstand verhoogd van Dead Slow Ahead naar Slow Ahead waardoor de vaarsnelheid bij het bereiken van de bocht van Sluiskil toenam tot 4 kn. Tijdens de passage van de bocht van Sluiskil worden achtereenvolgens belangrijke oevereffecten ervaren naar bakboord en stuurboord die resulteerden in maximale roerhoeken naar stuurboord en bakboord (zie Figuur 121). De oevereffecten konden gecompenseerd worden door deze roerhoeken te combineren met kortstondig verhoogde toerentallen. De loods geeft aan dat bij telegraafstand Dead Slow Ahead de roereffectiviteit onvoldoende is om de oevereffecten te compenseren en dat hierdoor de telegraafstand herhaaldelijk verhoogd diende te worden. Hierdoor ontstond een zwalpend vaartraject. Er werd vermoed dat een constant gebruik van de telegraafstand Slow Ahead een stabielere vaargedrag zou opleveren waarbij het schip beter naar het roer zou luisteren.

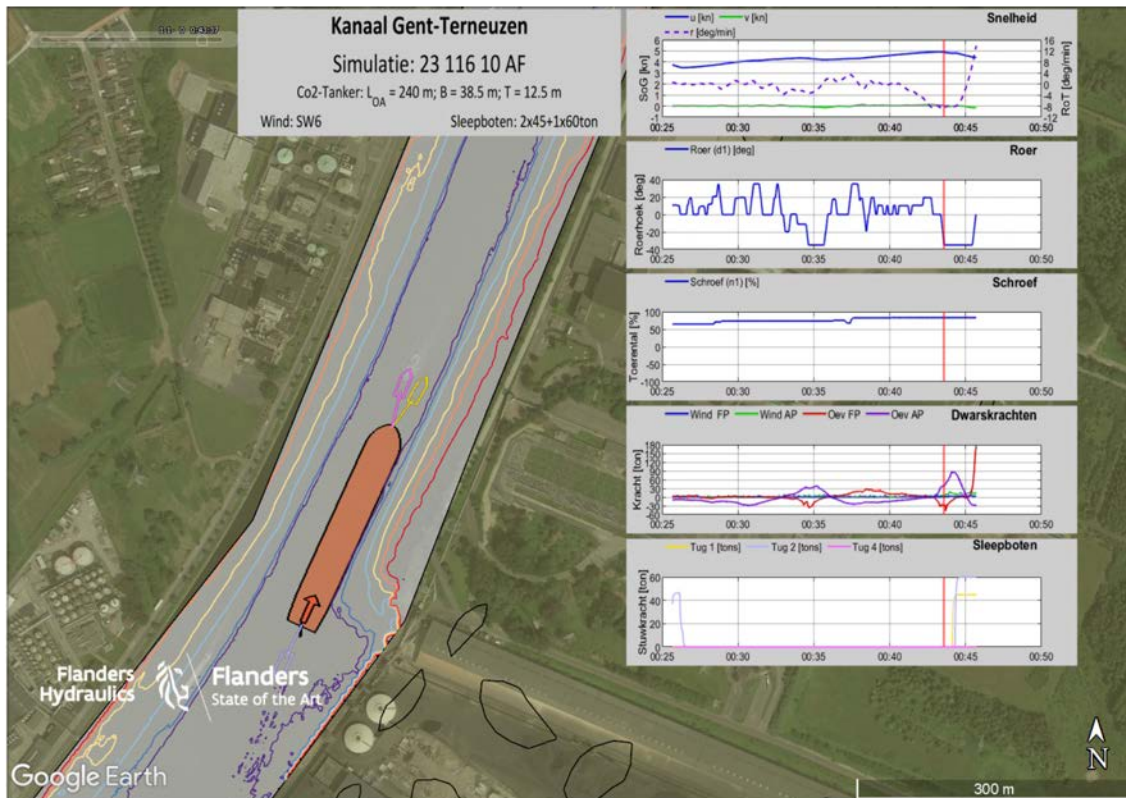
De loodsen concluderen dat de windkracht 5 Beaufort aanvaardbaar is voor de toegankelijkheid van het scheepstype tanker en dat mits een vaarsnelheid kleiner dan 4 kn de schepen met voldoende reserves op het kanaal kunnen varen.



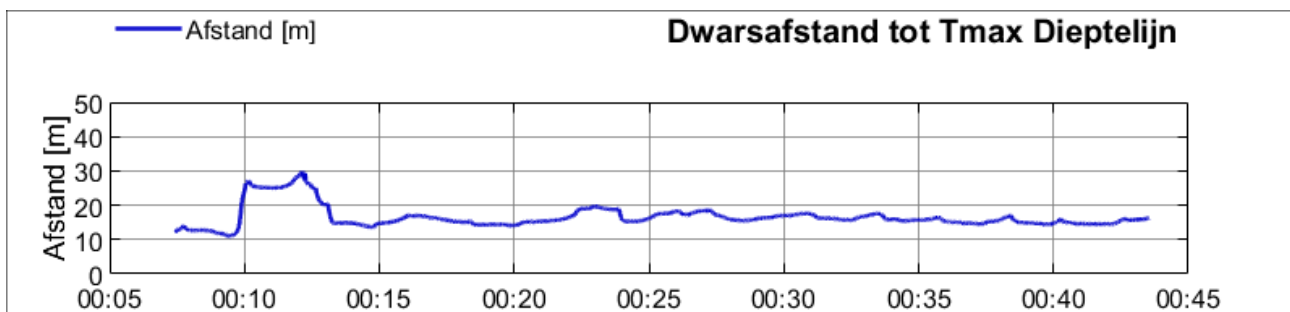
Figuur 114 – Illustratie van kleine afstanden gerespecteerd tussen schip in oever in simulatie 10 voor het deeltraject Mercatordok



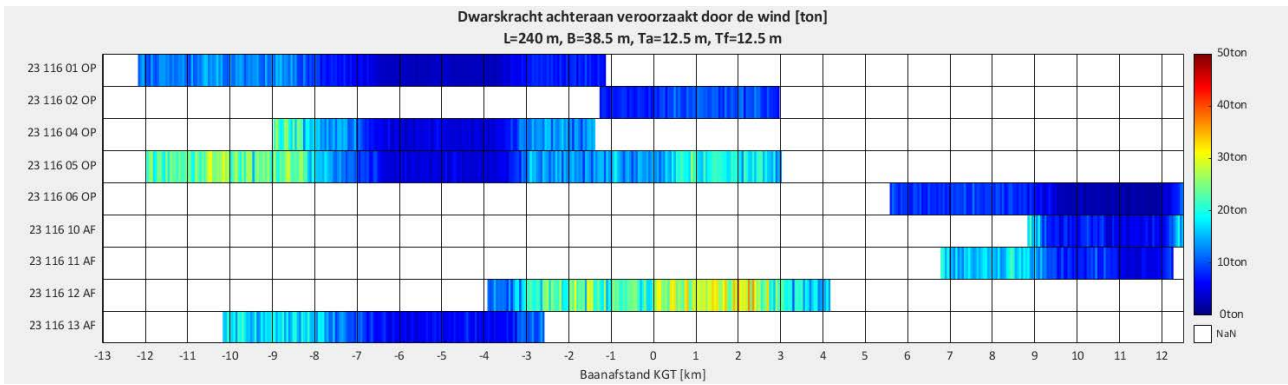
Figuur 115 – Passage van de Ghent Commodity Terminal in simulatie 10



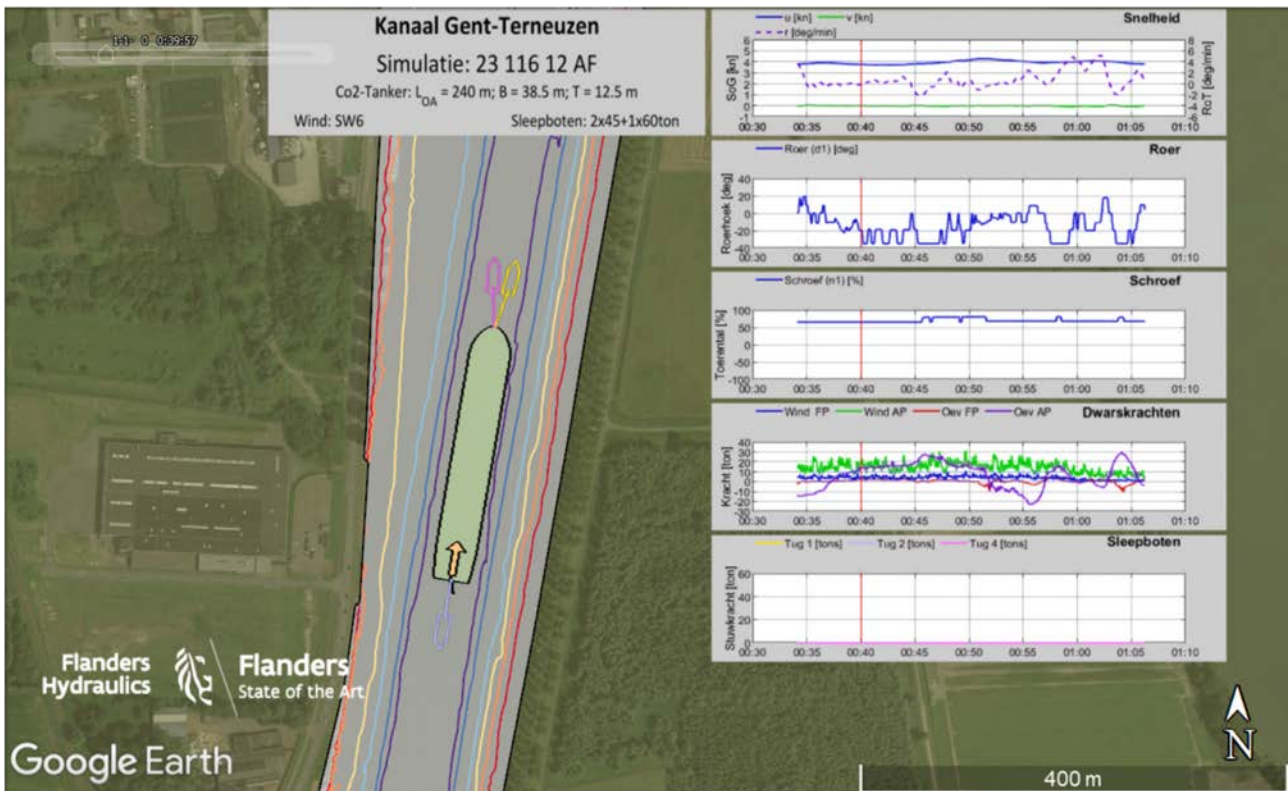
Figuur 116 – Asymmetrische positie van het schip na passage Ghent Commodity Terminal in simulatie 10 die aanleiding gaf tot belangrijke oevereffecten



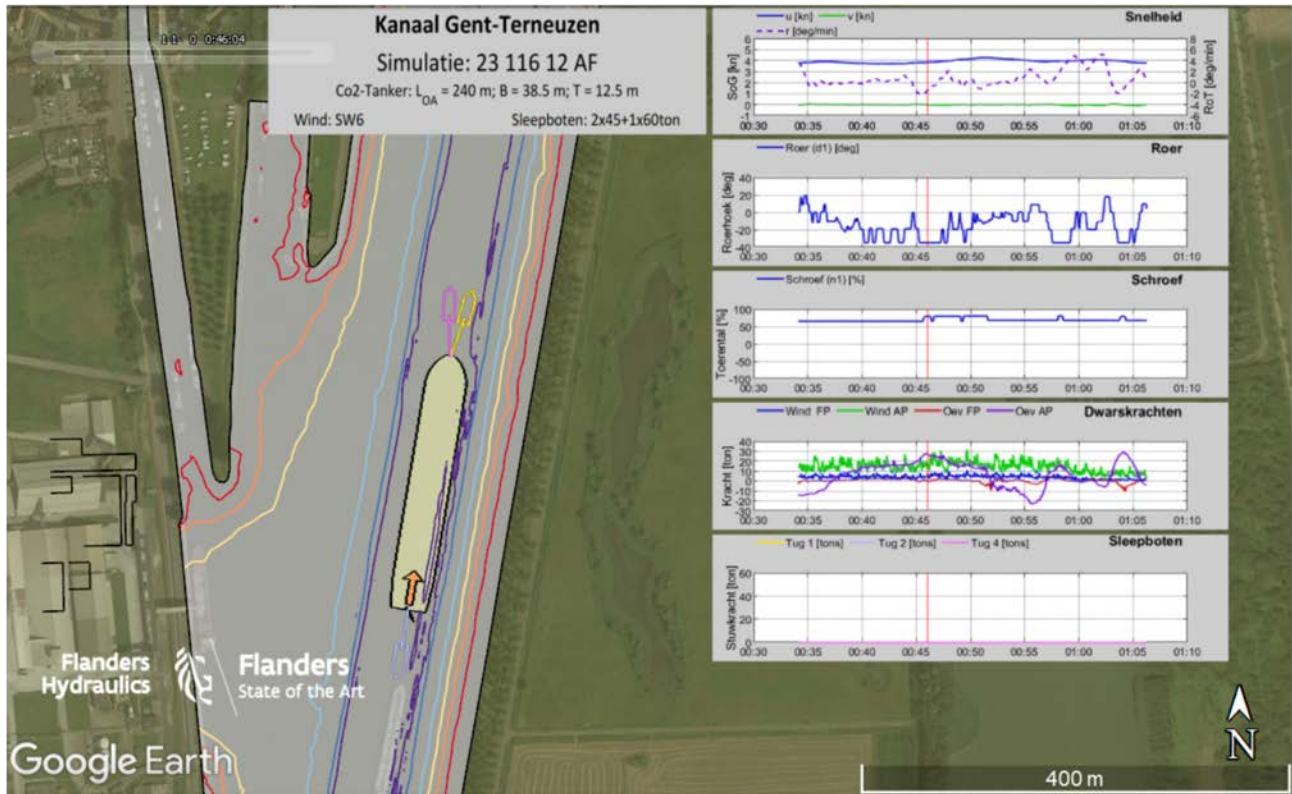
Figuur 117 – Illustratie van relatief ruime afstanden gerespecteerd tussen schip in oever in simulatie 11 voor het deeltraject Mercatordok



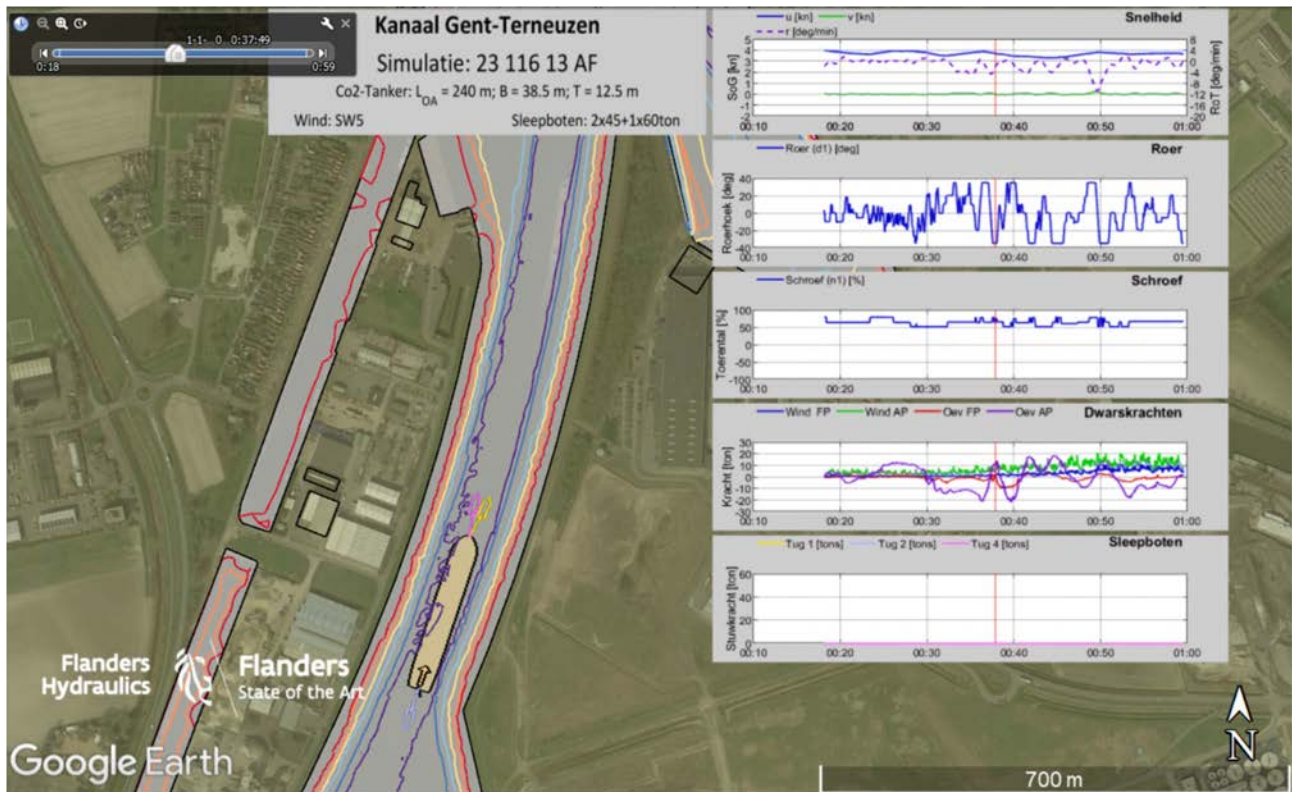
Figuur 118 – Hittekaart voor de dwarskracht op het achterschip door wind voor de simulaties uitgevoerd bij diepgang 12.5 m



Figuur 119 – Passage van oostelijke oever door tanker bij maximale diepgang te Zuid-Chemie Sas van Gent (aankomst)



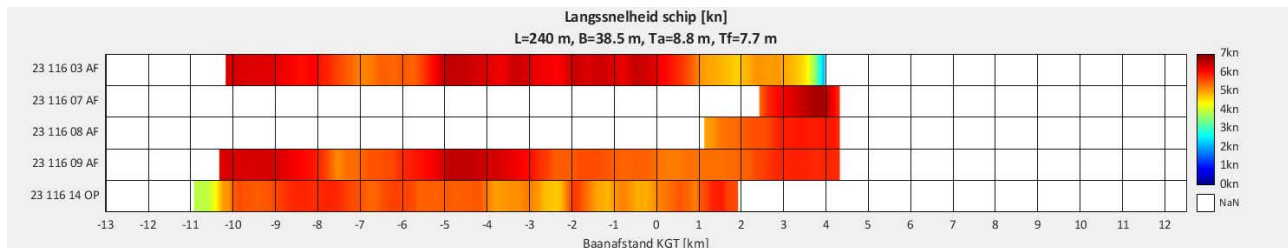
Figuur 120 – Passage van oostelijke oever door tanker bij maximale diepgang te Zuid-Chemie Sas van Gent (tijdstip van maximaal oevereffect)



Figuur 121 – Belangrijke oevereffecten in bocht van Sluiskil in simulatie 13

5.2.4 Resultaten simulaties bij ladingsconditie heavy ballast

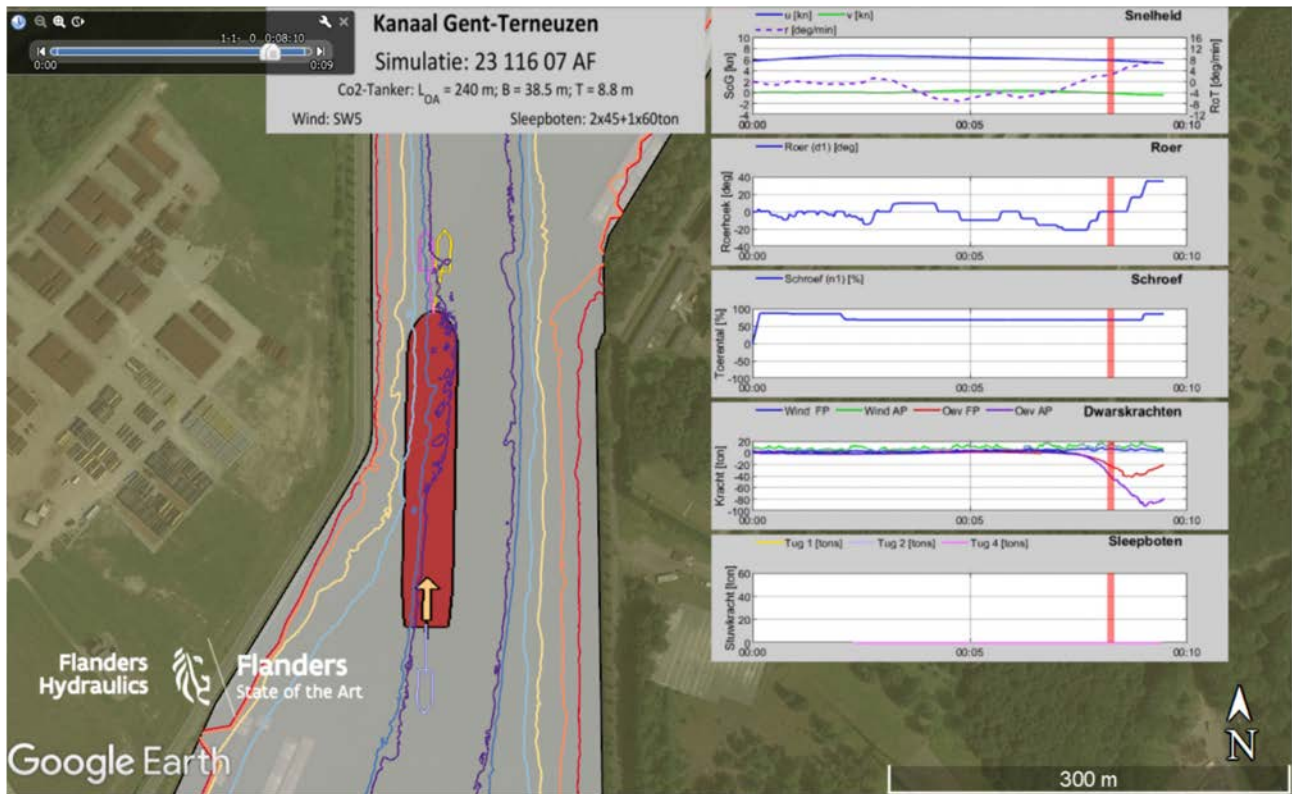
Op elke dag werd minstens één simulatie uitgevoerd bij de ladingsconditie heavy ballast. In Figuur 122 wordt de hittekaart voor de vaarsnelheid in deze simulaties weergegeven. Deze grafiek toont aan dat voor deze ladingsconditie enkel het kanaaltraject tussen de brug van Sluiskil en Arcelor-Mittal onderzocht werd. Bovendien toont Figuur 122 aan dat de vaarsnelheden die bij ladingsconditie heavy ballast gehanteerd werden belangrijk hoger waren dan de vaarsnelheden bij de maximale ladingsconditie (zie Figuur 98). Voor deze ladingsconditie bedraagt de maximale kanaalsnelheid 12 km/h (6.5 kn). Figuur 122 illustreert dat deze snelheid in meerdere simulaties benaderd werd.



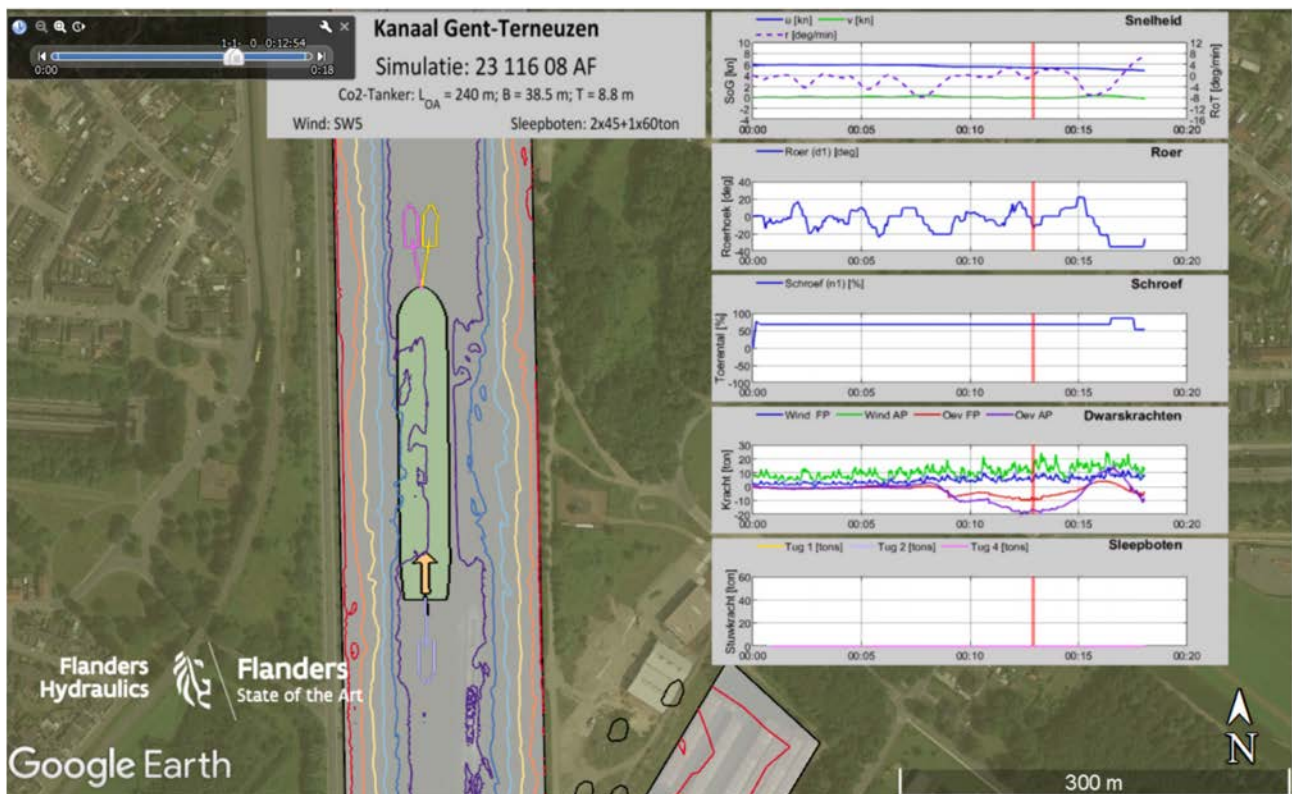
Figuur 122 – Hittekaart voor de langssnelheid voor de simulaties uitgevoerd bij ladingsconditie Heavy Ballast

Bij de eerste twee simulaties op de tweede simulatiedag trachtte de loods in simulaties 07 en 08 de tanker met deze ladingsconditie te beloodsen op een gelijkaardige manier als de grote RoRo-ferries op het kanaal. Hij paste hiervoor tijdens de passage van Zelzate een belangrijk excentrische vaarpositie toe zodat het schip aan de hoge kant ten opzichte van de wind voer. In simulatie 07 stuurde de loods het schip op een erg westelijke positie het kanaal op waardoor het schip op erg korte afstand van de oever voer en daar een belangrijke aanzuiging ervoer (zie Figuur 123). Het schip strandde waarop de simulatie afgebroken werd. In simulatie 08 werd het kanaal op een aanvaardbare manier ingevaren, maar werden tijdens de vaart door het straatje van Zelzate een westelijke vaarpositie gehanteerd. Deze positie gaf aanleiding tot aanzuiging van het achterschip tot 20 ton en van het voorschip tot 10 ton (zie Figuur 124). Deze oevereffecten waren belangrijker dan de windeffecten die op dat moment ervaren werden door het schip. Om de oevereffecten te compenseren werd het schip overgecompenseerd naar de oostelijke oever waar een giersnelheid tot 8 °/min naar bakboord opgebouwd wordt en deze giersnelheid mede door de combinatie van oeverzuiging en windkrachten niet tijdig gecompenseerd kon worden en aanleiding gaf tot een aanvaring van de brug van Zelzate. Er diende geconcludeerd te worden dat de tanker in ballast niet beschouwd kan worden als een RoRo-ferry (wegens grotere oevereffecten, mindere sturing, afwezigheid van boegschroeven etc.) en dat deze tankers centraal in de vaarweg gehouden dienen te worden en van daaruit de wind dienen te compenseren met een beperkte drifthoek.

De hierboven beschreven strategie werd toegepast in de andere drie simulaties die uitgevoerd werden bij heavy ballast conditie. Na uitvoering van alle simulaties met heavy ballast conditie werd geconcludeerd dat voor het scheepstype tanker de maximale windconditie 4 Bft dient te bedragen tijdens de proefvaarten.



Figuur 123 – Erg excentrische aanloop van het kanaal in simulatie 07



Figuur 124 – Excentrische vaarpositie bij de passage van de tunnel van Zelzate in simulatie 08

In simulaties 03, 09 en 14 werden simulaties uitgevoerd met de heavy ballast conditie waarbij het schip, mede met behulp van de Qastor, in het midden van de vaarweg gehouden werd.

Afvaart in heavy ballast

In simulatie 03 werd een afvaart onderzocht met het scheepstype bulk carrier. De simulatie werd uitgevoerd aan hoge snelheden doordat de loodsen gebruik maakten van telegraafstand Half Ahead. Wanneer de snelheid de maximale snelheid (12 km/h) bereikte werd de loodsen gevraagd om deze te respecteren en werd de snelheid teruggebracht.

Figuur 125 en Figuur 126 bieden een overzicht van de dwarskrachten op het achterschip ten gevolge van enerzijds oevereffecten en anderzijds windeffecten zoals berekend in de simulaties bij ladingsconditie heavy ballast. In simulatie 03 werd het scheepstype bulk carrier onderzocht bij een windconditie ZW5 wat resulteerde in relatief beperkte windkrachten (zie Figuur 126). De belangrijkste oevereffecten werden in deze simulatie waargenomen tijdens de aanloop van de brug van Sas van Gent. Zoals eerder opgemerkt werden in simulatie 03 hoge (maar reglementaire) vaarsnelheden toegepast welke tijdens de aanloop van de brug meer dan 6 kn bedroegen. Bij de bespreking van afvaarten met maximale diepgang (§5.2.3) werd bovendien reeds opgemerkt dat voor afvaart de aanloop tot de brug van Sas van Gent gepaard gaat met een erg asymmetrische kanaalsectie. De oevereffecten waren op deze locatie waarneembaar, maar anderzijds blijkt uit Figuur 128 dat er slechts relatief beperkte roerhoeken nodig waren om deze oevereffecten te compenseren.

De grootste roerhoeken blijken in simulatie 03 toegepast geweest te zijn in de bocht van Sluiskil en onmiddellijk afwaarts de bocht. Deze roerhoeken waren slechts in beperkte mate bepaald door de oevereffecten en waren voornamelijk bepaald door het uitvoeren van het bochtmanoeuvre.

De loodsen gaven aan dat de afvaart met een bulk carrier in heavy ballast conditie bij wind conditie ZW5 gepaard ging met een gelijkaardige moeilijkheid en reserve als de huidige afvaart met bulk carriers met scheepsbreedte 37 m.

In simulatie 09 werd de afvaart uitgevoerd met het scheepstype tanker in heavy ballast conditie. De windconditie bedroeg opnieuw ZW5. De zuidwestelijke windconditie werd ongunstig geacht voor de afvaart omdat deze de een belangrijke kracht op het achterschip veroorzaakte en doordat deze de vaarsnelheid van het schip verhoogde.

Op heden hebben de loodsen geen ervaring met dergelijke grote windgevoelige tankers op het kanaal waardoor er nog geen uniforme procedure is over de wijze waarop het schip door de bruggen dient te varen. Hierdoor trachtten de loodsen in eerste instantie om de brugpassages uit te voeren zonder sleepboothulp (zoals dit gebruikelijk is bij de brugpassages van de maatgevende bulk carriers). Eén van de conclusies van deze studie betreft de aanbeveling om de brugpassages met windgevoelige tankers te onderzoeken bij een actief gebruik van de sleepboten in zowel de aanloop als de doorvaart van de bruggen.

De simulatie werd uitgevoerd bij telegraafstand Slow Ahead waarbij bij de nadering van de bruggen de telegraafstand verhoogd werd tot Half Ahead om een betere controle over het schip te bekomen bij het passeren van de bruggen. Opnieuw werd bij simulatie 09 een belangrijke zuiging ervaren bij het naderen van de brug van Sas van Gent. Bovendien versterken op deze locatie de wind- en de oeverkrachten elkaar (zie Figuur 129). Op basis van Figuur 125 blijkt dat de oeverkrachten in simulatie 09 kleiner waren dan in simulatie 03. Dit was het gevolg van enerzijds de lagere vaarsnelheid van het schip maar anderzijds ook door een betere positionering van het schip. Met name in de aanloop naar de brug van Sas van Gent paste de loods in simulatie 09 (zie Figuur 129) een meer westelijke (gunstigere) positie toe dan in simulatie 03. Figuur 129 illustreert de gematigde oevereffecten die optraden tijdens de nadering van de brug van Sas van Gent. De beperkte zuiging die in deze simulatie ervaren wordt bij de nadering van Sas van Gent (in afvaart) wordt door de loodsen ook in realiteit ervaren en wordt gecompenseerd door een westelijke naderingspositie tot de brug.

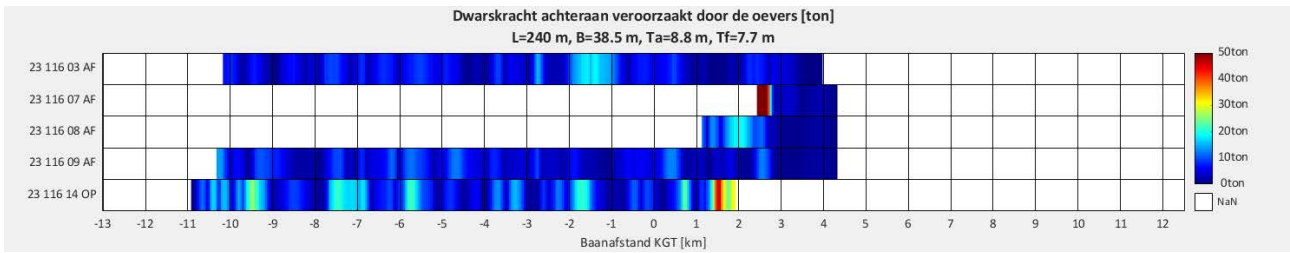
Bij het naderen van de Autriche-haven stemt de zuidwestelijke wind overeen met een rugwind met slechts een beperkt dwarseffect. Doordat in deze zone de telegraafstand beperkt wordt tot Slow Ahead neemt de vaarsnelheid in deze zone af tot minder dan 6 kn. De oevereffecten bij de passage van Zijkanaal D, Autriche-haven en de bocht van Sluiskil zijn beperkt tot ca. 10 ton aanzuiging van het achterschip. De wisseling van de oevereffecten door een initiële oever aan stuurboord (Zijkanaal D) en vervolgens een oever aan bakboord (Autriche-haven) vereisen een kortstondig gebruik van een maximale roerhoek bij het bereiken van de Autriche-haven (zie Figuur 130).

Bij het uitkomen van de bocht van Sluiskil geldt er opnieuw een combinatie van een oostelijke oever en een belangrijkere dwarscomponent van de wind (zie Figuur 131). Hierbij diende een maximale roerhoek (naar stuurboord) gecombineerd te worden met een verhoging van het toerental (tot Half ahead) vanaf dat ogenblik werd deze telegraafstand behouden.

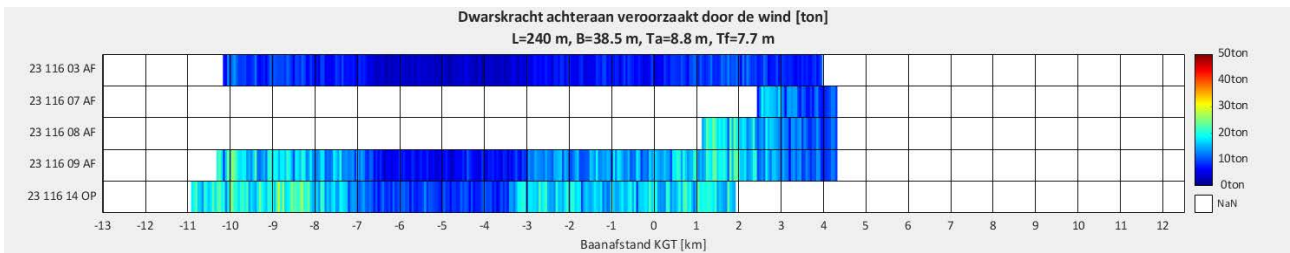
Bij het naderen van de brug van Sas van Gent werd geprobeerd om een wat westelijkere naderingspositie aan te nemen opdat de oeverzuiging de windeffecten zou compenseren. Het bleek moeilijk om op die manier een evenwicht te bekomen en er werd geconcludeerd dat de nadering van de brug van Sas van Gent vanuit een centrale positie op het kanaal uitgevoerd dient te worden.

Na uitvoering van deze simulatie oordeelden de loodsen dat een vaarsnelheid gelijk aan 6.5 kn te hoog geacht werd voor het schip in ballast en omdat er te weinig reserves overblijven om de oevereffecten te compenseren. De loodsen achtten een vaarsnelheid gelijk aan 5.5 kn als comfortabel en in deze conditie wordt de afvaart bij ZW5 in realiteit aanvaardbaar geacht met het scheepstype tanker.

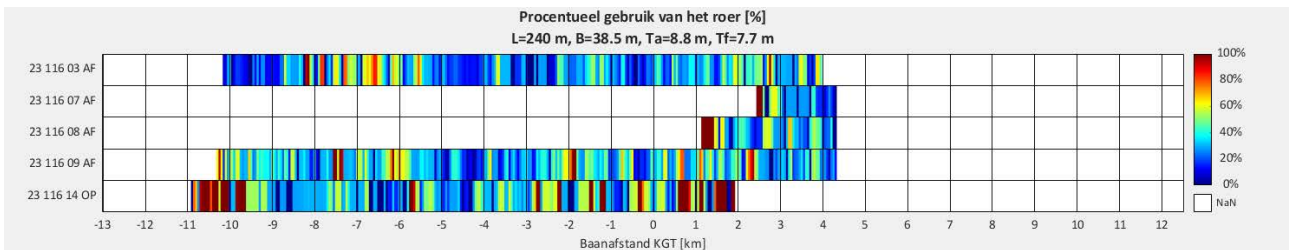
Een globaal overzicht van de roerhoeken die toegepast werden in de simulaties in ballast wordt weergegeven in Figuur 127. Hieruit blijkt dat voor de twee doorgaande simulaties in ballast (03 en 09) de roerhoeken in beperkte mate groter zijn in simulatie 09 ten gevolge van de windinvloed. Opvallend in deze figuur zijn de opvallend hogere roerhoeken die toegepast werden in de simulatie waarbij opgevaren werd bij windconditie WZW5.



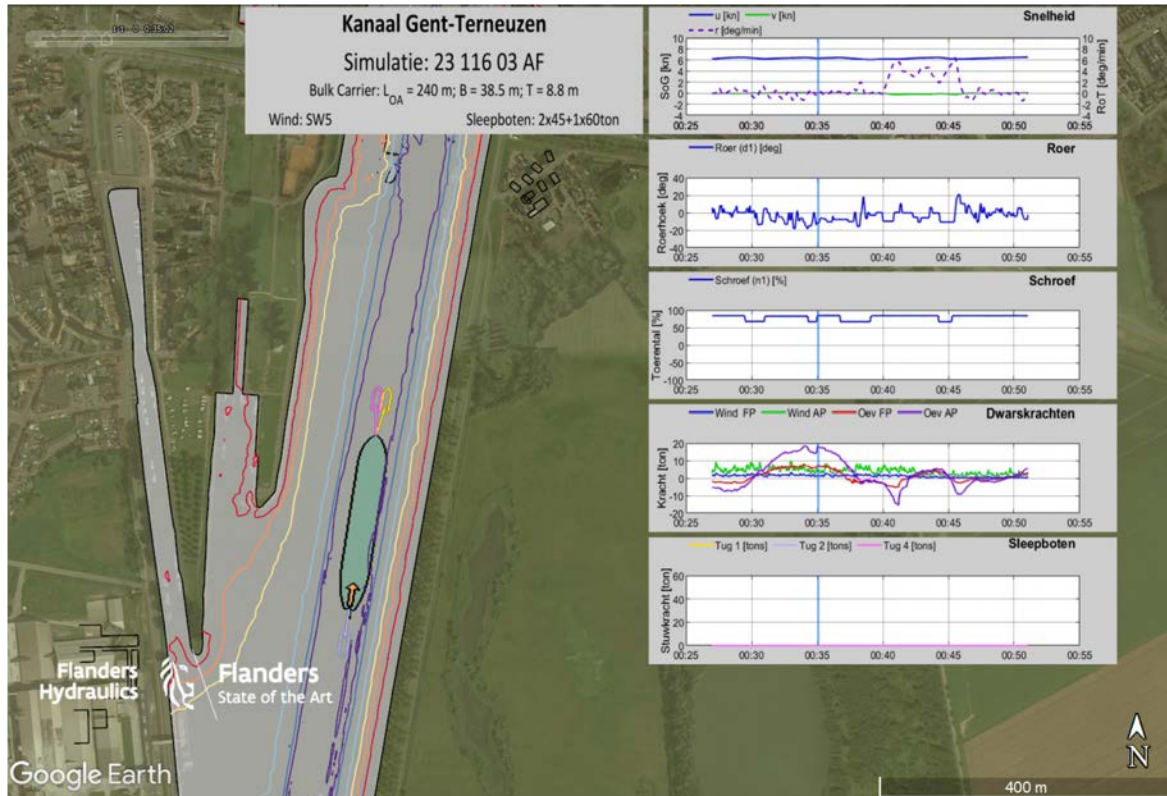
Figuur 125 – Hittekaart voor de dwarskracht op het achterschip door oever voor de simulaties uitgevoerd bij heavy ballast



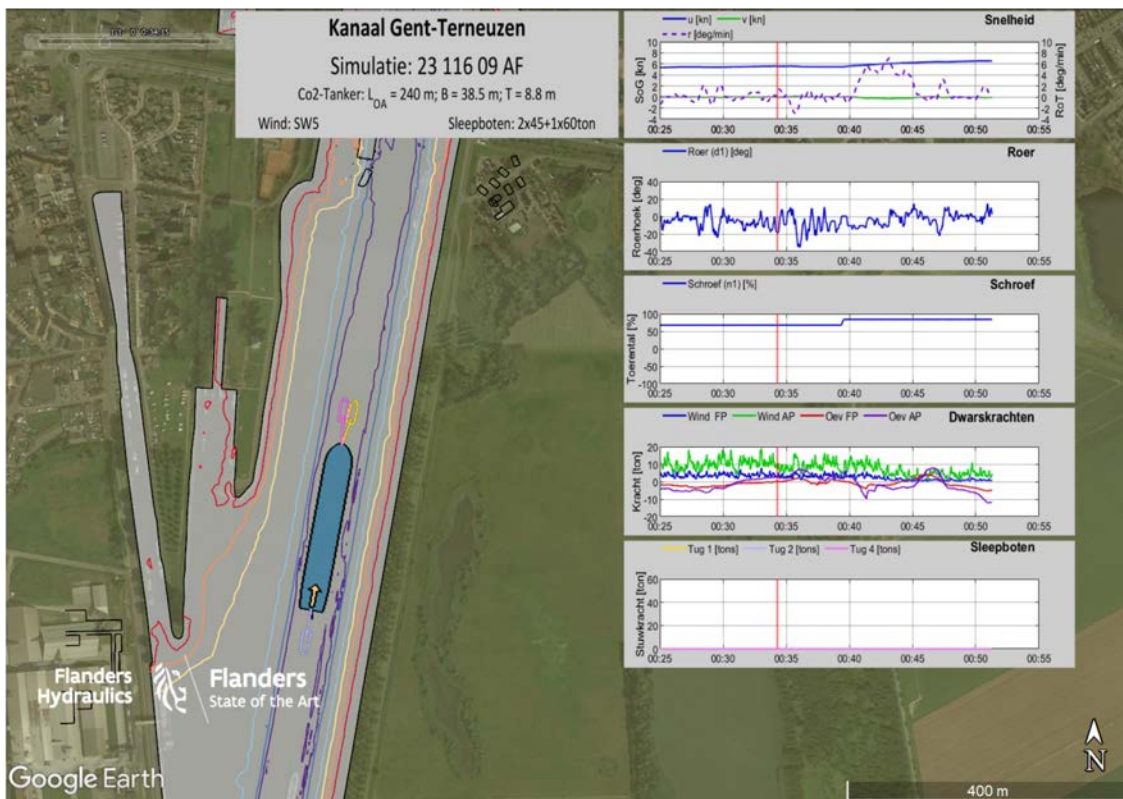
Figuur 126 – Hittekaart voor de dwarskracht op het achterschip door wind voor de simulaties uitgevoerd bij heavy ballast



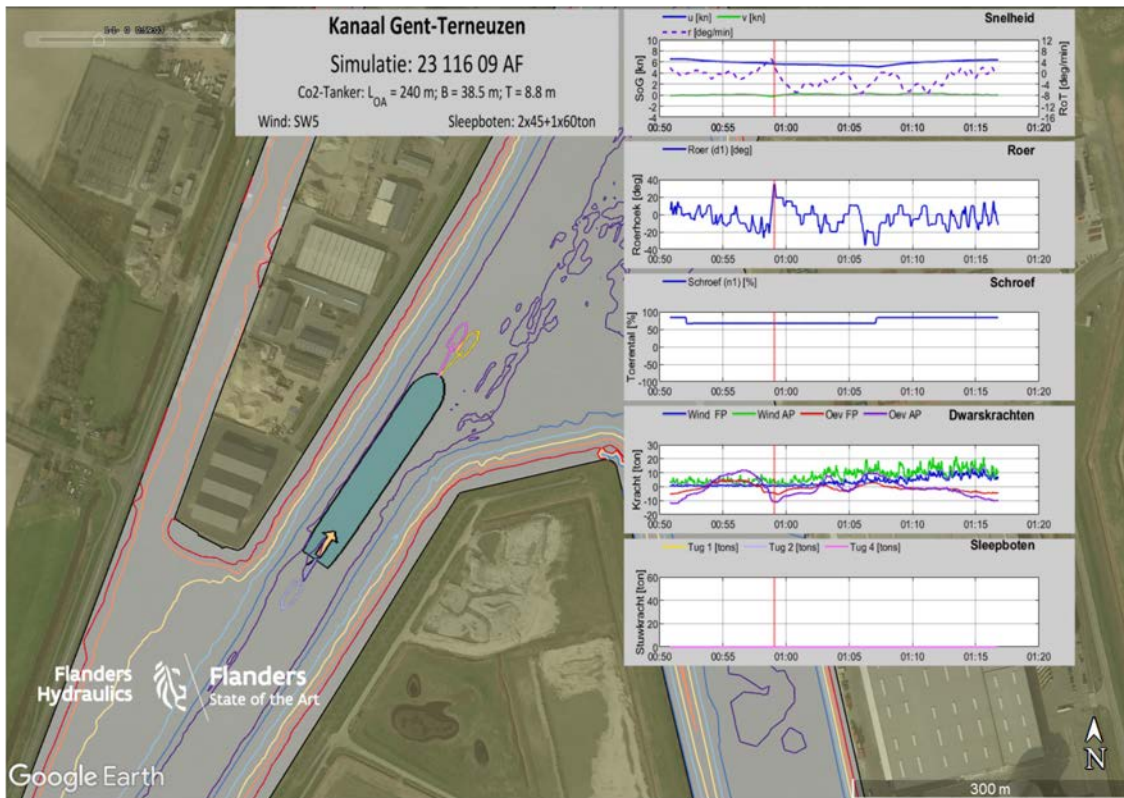
Figuur 127 – Hittekaart voor roergebruik voor de simulaties uitgevoerd bij heavy ballast



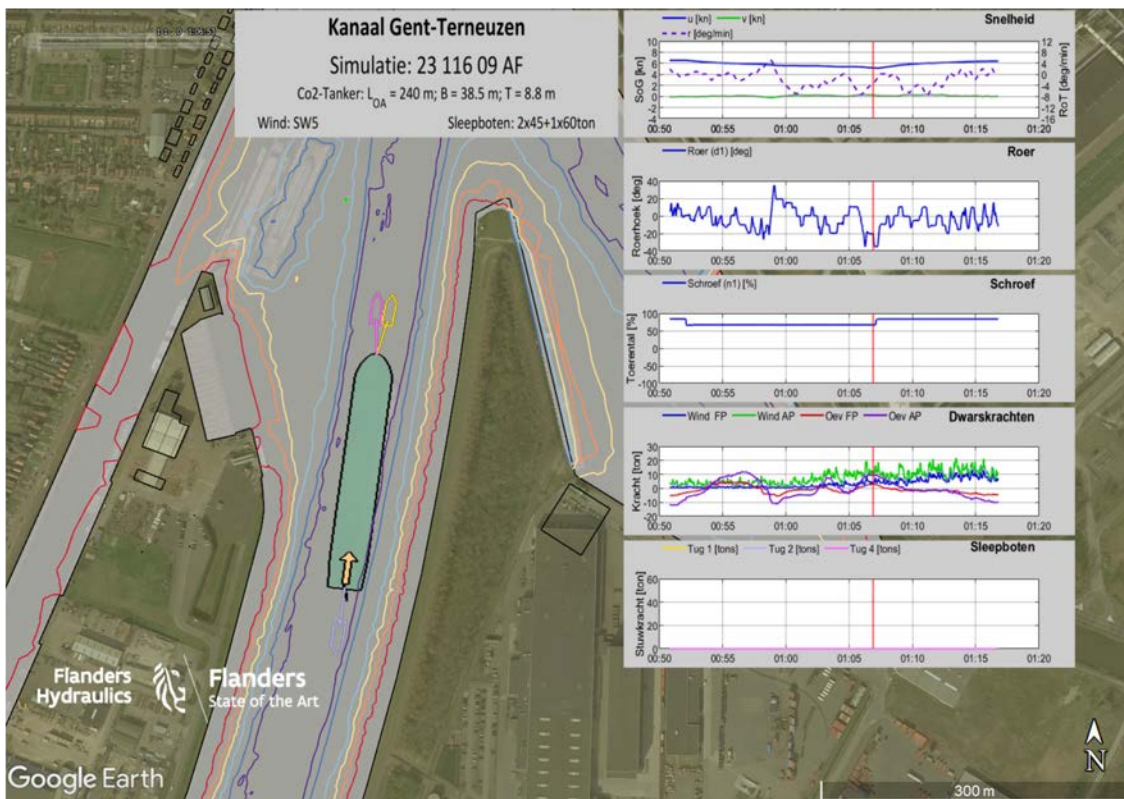
Figuur 128 – Belangrijkste oevereffecten bij het naderen van de brug te Sas van Gent in simulatie 03



Figuur 129 – Scheepspositie bij nadering brug van Sas van Gent in simulatie 09



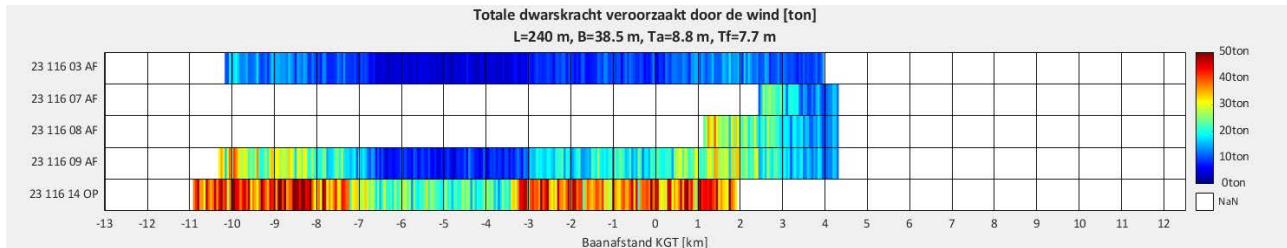
Figuur 130 – Kortstondig gebruik van maximale roerhoek ter compensatie van oevereffecten bij passage Autriche-haven.



Figuur 131 – Combinatie van belangrijke oeverzuiging en windkrachten op het achterschip bij het uitkomen van bocht Sluiskil in simulatie 09

Opvaart in heavy ballast

In een laatste simulatie op de derde simulatiedag werd de tanker met ladingsconditie heavy ballast onderzocht in opvaart. Rekening houdend met het gebeurlijke voorkomen van een westzuidwestelijke windrichting en de belangrijkste dwarscomponent voor deze windrichting, werd simulatie 14 uitgevoerd bij een windconditie WZW5. Figuur 132 illustreert dat deze combinatie van vaarrichting (opvaart) en windconditie (WZW5) inderdaad aanleiding geeft tot veel grotere dwarse windkrachten.



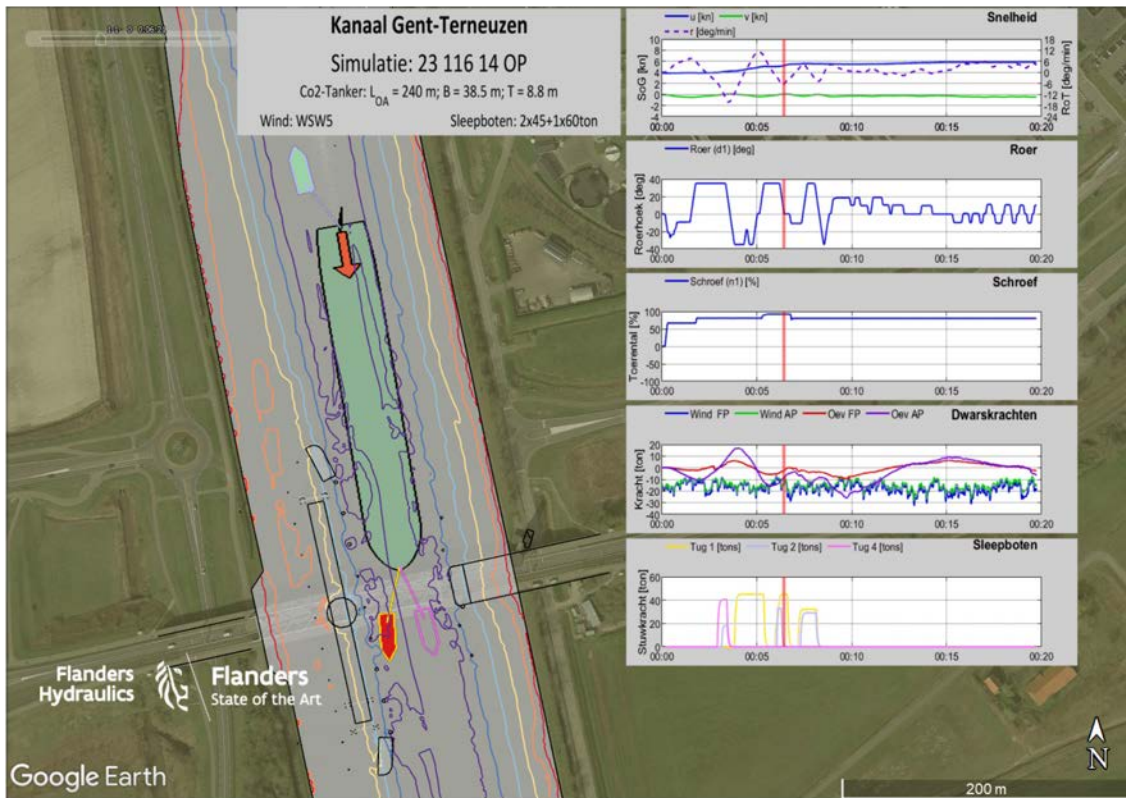
Figuur 132 – Hittekaart voor de totale dwarskracht door wind voor de simulaties uitgevoerd bij heavy ballast

Om tijd te besparen werd de simulatie aangevat op relatief korte afstand van de brug van Sas van Gent. Hierbij werd de opstart van de simulatie verstoord doordat het enige tijd duurde voordat er een evenwicht met de wind gevonden kon worden waarbij er ook een belangrijke inzet van de sleepboten noodzakelijk was om deze conditie te bereiken. Deze problemen zouden niet opgetreden hebben wanneer de simulatie op een meer afwaartse positie aangevat was en worden niet in detail beschreven.

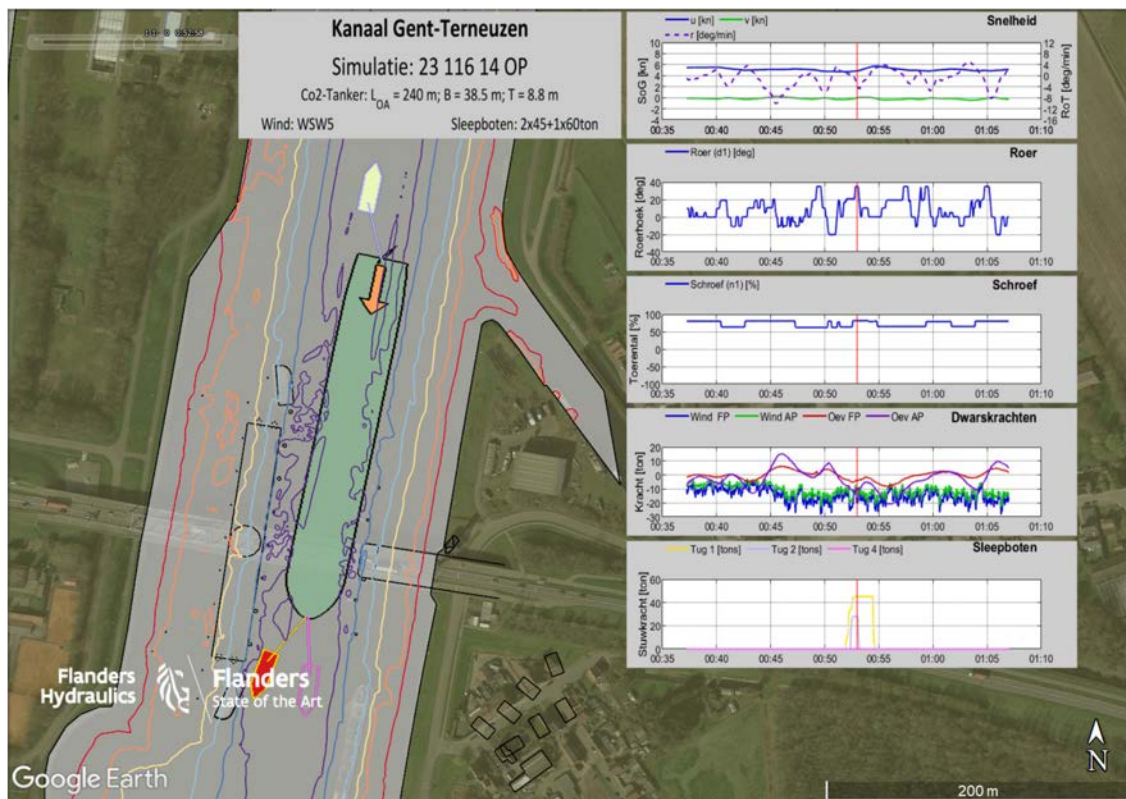
De aanloop van de brug van Sluiskil was eveneens verstoord door de problemen tijdens de opstart. Figuur 133 toont aan dat voor de passage van de brug van Sluiskil de achterste sleepboot en de voorste sleepboot aan stuurboord intensief gebruikte dienden te worden. Desondanks was de afstand tussen het achterschip en de oostelijke brugfendering op het einde van de passage slechts ca. 2 m. Ook bij de andere brug passages (waarbij de aanloop niet verstoord was door de opstart van de simulatie) bleek belangrijke assistentie van de sleepboten noodzakelijk zoals geïllustreerd in Figuur 134 voor Sas van Gent en Figuur 135 voor Zelzate.

In simulatie 14 werden vaarsnelheden tussen 5.5 kn en 6.0 kn toegepast. Bij deze vaarsnelheden bleek een belangrijke drifthoek noodzakelijk om de dwarswind te compenseren. In de bocht van Sluiskil diende voortdurend tegenroer gegeven te worden om de effecten van de oever (het schip voer in de buitenbocht) te compenseren (zie Figuur 136). De roerhoeken waren beperkt tot 20°.

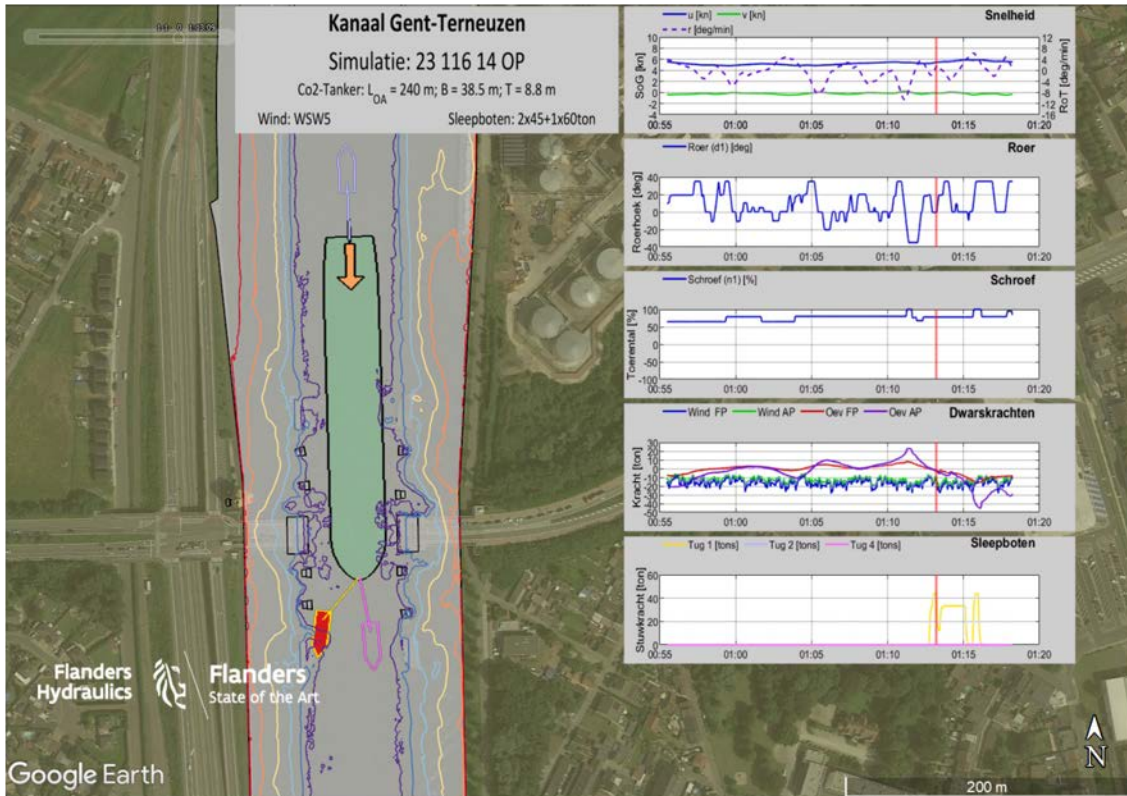
Na uitvoering van de simulatie werd opgemerkt dat de windeffecten op het schip te groot waren om een aanvaardbare kanaalvaart uit te voeren. Er werd gesteld dat voor het scheepstype tanker de windlimiet in eerste instantie met één Beaufortklasse verlaagd dient te worden ten opzichte van de limieten voor bulk carriers. Op basis van de ervaring in deze simulatie wordt gesteld dat voor deze windgevoelige schepen de brugpassages beter aan lagere snelheid zouden uitgevoerd worden met een performanter gebruik van de sleepboten. Een dergelijk manoeuvre vereist training maar zou de limieten voor windgevoelige tankers op het kanaal opnieuw kunnen oprekken.



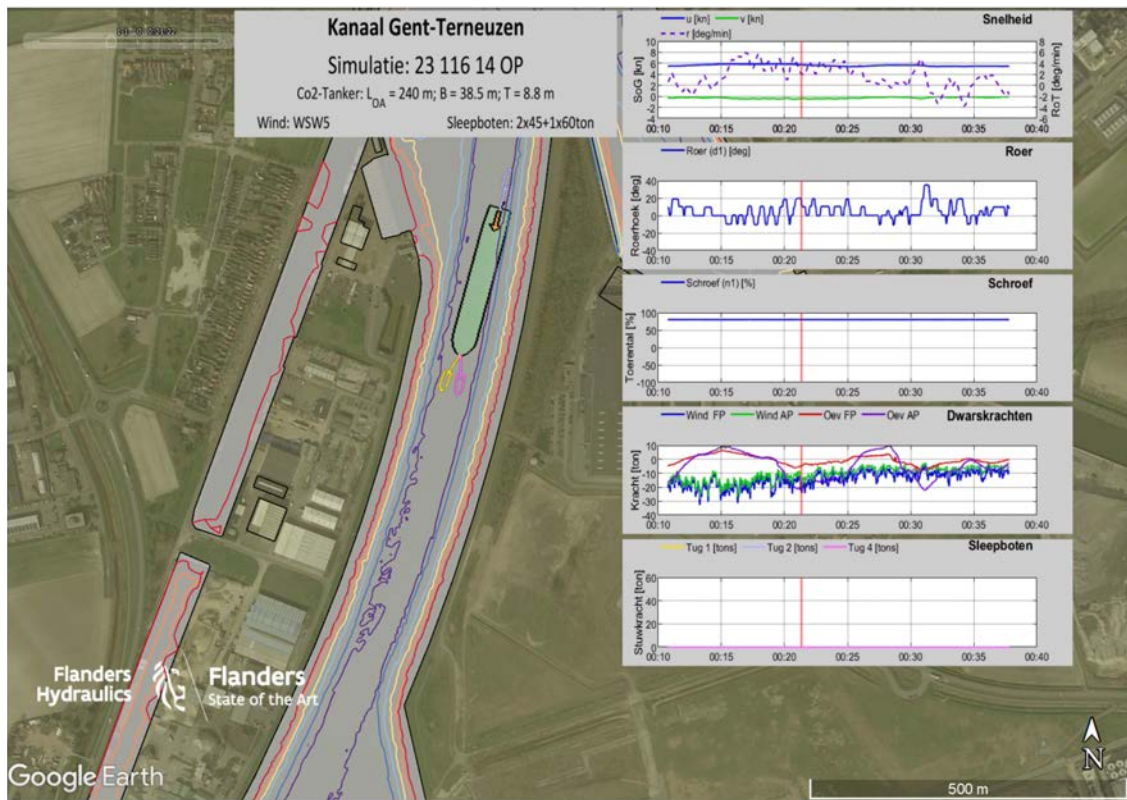
Figuur 133 – Vereiste inzet van sleepboten bij de passage van brug Sluiskil in simulatie 14



Figuur 134 – Vereiste inzet van sleepboten bij de passage van brug Sas van Gent in simulatie 14



Figuur 135 – Vereiste inzet van voorste sleepboot bij de passage van brug Zelzate in simulatie 14



Figuur 136 – Illustratie van positie van schip in buitenbocht (lage wal) van Sluiskil en bijhorende roerhoeken naar bakboord in simulatie 14

6 Samenvatting en conclusies

In opdracht van de Vlaams-Nederlandse Schelde Commissie onderzochten het Waterbouwkundig Laboratorium en de Universiteit Gent, afdeling Maritieme Techniek de toegankelijkheid van het Kanaal Gent-Terneuzen voor bulk carriers en windgevoelige tankers met afmetingen 240 m x 38.5 m. De te onderzoeken ladingscondities betroffen de maximale kanaaldiepgang ($T_A=12.5$ m; $T_F= 12.5$ m) en een heavy ballast ladingsconditie ($T_A=8.8$ m; $T_F= 7.7$ m).

Het onderzoek bestond enerzijds uit een theoretische analyse van de bodemprofielen van het Kanaal Gent-Terneuzen en de bijhorende impact op het vaargedrag van de studieschepen en anderzijds uit een driedaagse simulatiestudie op een Full Mission Bridge Simulator (FMBS).

6.1 Samenvatting en conclusies

6.1.1 Bodemprofielen Kanaal Gent-Terneuzen

Voor de uitvoering van de studie werden verschillende bodemprofielen voor het Kanaal Gent-Terneuzen onderzocht.

In eerste instantie werd een theoretisch profiel van het kanaal gedefinieerd. Dit theoretische profiel werd gedefinieerd in overeenstemming met de geldende streefdieptes voor het baggeronderhoud.

Voor het Nederlandse grondgebied zijn deze streefdieptes eenduidig bepaald over het volledige kanaaloppervlak. De bijhorende plannen bevatten dieptelijnen op verschillende dieptes en de bijhorende oevertaluds tot de waterlijn. Het theoretische profiel op het Nederlandse grondgebied werd omgezet tot een driedimensionaal bodemprofiel.

Op het Vlaamse grondgebied worden streefdieptes bepaald in baggercontouren die enkel voor de maximale kanaaldiepte gedefinieerd zijn. Voor het kanaaltraject dat in deze studie onderzocht werd (opwaarts begrensd tot het Sifferdok) bedraagt deze kanaaldiepte steeds 13.5 m. De baggercontouren op het Vlaamse grondgebied zijn steeds minimaal 68 m breed. Aangezien er op het Vlaamse grondgebied geen streefdieptes beschikbaar waren buiten de baggercontouren dienden daar aannames gedaan te worden voor de dieptes van het theoretische profiel. Hierbij werd uitgegaan van de taluds zoals gedefinieerd in de typeprofielen van het kanaal (Zelzate: 1/4.125; Vlaamse gedeelte: 1/4.88). Bovendien werd het theoretische profiel op Vlaams grondgebied aangepast aan de minst diepe peiling die opgemeten werd sinds januari 2021 indien dit resultaat dieper was dan de diepte op basis van de taluds.

Behalve een theoretisch profiel op basis van baggerlijnen zijn er voor het Kanaal Gent-Terneuzen ook drie typeprofielen of typesecties gedefinieerd. Deze typeprofielen stemmen overeen met de ontwerpsecties van het kanaal voor de trajecten Nederland, Zelzate en Vlaanderen zoals gedefinieerd in Ministerie van Openbare Werken & Ministerie van Verkeer en Waterstaat (1968).

De theoretische bodemprofielen werden vergeleken met de werkelijke condities op het Kanaal Gent-Terneuzen voor de periode januari 2017 tot februari 2024. Hiervoor werden bij de bevoegde waterwegbeheerders de kanaalpeilingen uit deze periodes bekomen en werden in totaal 71 verschillende historische condities gedefinieerd.

6.1.2 Modelling van de studieschepen

Het manoeuvreergedrag van de studieschepen werd gemodelleerd op basis van sleeptankproeven beschikbaar uit de sleeptank voor ondiep en beperkt water. De open water manoeuvreermodellering werd afgeleid uit een ruime database aan manoeuvreerproeven die beschikbaar waren voor een schaalmodel van een bulk carrier met gelijkaardige verhoudingen en onderwaterschip als het studieschip en dat beproefd werd bij verschillende ladingscondities die ook de ladingscondities uit voorliggende studie omvatten.

Voor de modellering van oevereffecten werd gebruik gemaakt van de modellering uit Lataire (2014) waarvoor de coëfficiënten afgeleid werden uit een testprogramma met een tanker beproefd in verschillende oeversecties met variërende blockages en overtaluds. Uit dit testprogramma werden die condities geselecteerd die relevant geacht werden voor het Kanaal Gent-Terneuzen en werd een modellering bekomen voor de horizontale krachten op een scheepsromp veroorzaakt door de horizontale begrenzing van de vaarweg en voor de inzinking van een schip (squat) voor het varen in beperkte secties.

De oevereffecten-modellering werd bijkomend gevalideerd op basis van recente sleeptankproeven (2022) die uitgevoerd werden met het eerder vernoemde schaalmodel van een bulk carrier. Deze sleeptankproeven zijn beschikbaar voor gelijkaardige ladingscondities en scheepscondities als voor het studieschip in deze studie maar waren enkel beschikbaar voor relatief brede kanaalsecties gecombineerd met verticale oevers of kaaimuren.

De oevereffecten-modellering werd gedefinieerd in de scheepsmanoeuvresimulatoren van het Waterbouwkundig Laboratorium en werd toegepast op de boven vermelde bodemprofielen om de verwachte impact van de kanaalbodem op het vaargedrag van de studieschepen te bepalen.

De oevermodellering op basis van sleeptankproeven wordt bemoeilijkt door de schaaffecten die impliceren dat de grenslagen rond de romp overschat worden op model schaal. Voor de kleinste kielspelingen (10%) impliceert dit dat de modelresultaten niet zomaar opgeschaald kunnen worden omdat die grenslaag zich op modelschaal anders gedraagt dan op ware grootte. De validatie van de modellering op basis van sleeptankproeven is dan niet rechtstreeks mogelijk. Anderzijds geldt er voor de dwarskracht ter hoogte van de boeg een omslag van aanzuiging naar afstoting bij een kielspeling gelijk aan 15%. De modellering voorspelt dan een belangrijke afstoting bij kielspelingen beneden dit omslagpunt. Meer fundamenteel onderzoek is nodig om de dwarskracht ter hoogte van de boeg te valideren bij deze zeer kleine kielspelingen. Toch wordt geconcludeerd dat de modellering de oevereffecten op het kanaal realistisch weergeeft. Dit werd bevestigd door de loodsen die deelnamen aan de realtime simulaties.

Voor de windmodellering werd voor de tanker uitgegaan van een windgevoelige tanker met grote windoppervlakken zoals bepaald op basis van de beschikbaar gestelde ontwerptekeningen voor een CO₂-tanker.

6.1.3 Oevereffecten studieschip op typeprofiel KGT

Een eerste toepassing van de oevereffecten-modellering werd bekomen door het studieschip bij beide ladingscondities te evalueren in een tweezijdig en eenzijdig typeprofiel voor het Nederlandse grondgebied. De studieschepen werden in deze secties gesimuleerd bij verschillende excentriciteiten en vaarsnelheden. Op basis van deze vergelijking konden onderstaande conclusies getrokken worden:

- Voor de studieschepen bij diepgang 12.5 m en vaarsnelheid 4.5 kn geldt
 - In de tweezijdige sectie een langskracht tot 50 ton en een inzinking aan de boeg gelijk aan 0.6 m
 - In de eenzijdige sectie een afstoting van de boeg aan 50 ton en een aanzuiging van het achterschip aan 28 ton
- Voor de studieschepen bij ladingsconditie heavy ballast en vaarsnelheid 6.0 kn
 - In de eenzijdige sectie een aanzuiging van de boeg aan 6 ton en een aanzuiging van het achterschip aan 11 ton.

Er dient opgemerkt te worden dat de belangrijke afstoting aan de boeg die voorspeld wordt bij de maximale diepgang het gevolg is van de kleiner kielspeling (8%) die bekomen wordt door de diepgang van het schip (12.5 m) te combineren met de theoretische kanaaldiepte (13.5 m). Wanneer uitgegaan wordt van peilingen dan blijkt de kielspeling in het vaarpad doorgaans groter dan deze 8% wat een belangrijk milderend effect heeft op deze dwarskracht aan de boeg.

6.1.4 Impactstudie van de bodem Kanaal Gent-Terneuzen

Voor de beschikbare peilingen tussen januari 2017 en februari 2024 enerzijds en voor de theoretische (type)profielen anderzijds werden verschillende parameters vergeleken voor dwarssecties om de 50 m langsheen het kanaal.

In eerste instantie werden enkele geometrische parameters uit de typeprofielen vergeleken met de beschikbare overeenkomstige gegevens in de peilingen. Hierbij werden de vaarwegbreedtes op diepte 13.5 m en 12.5 m onderzocht evenals de maximale waterdiepte in de secties. Op basis van deze analyse bleek dat de vaarwegbreedte op de onderhoudsdiepte en tevens streefdiepte (13.5 m) vaak niet beantwoordt aan de breedtes in de typeprofielen. Alle secties vertonen ter hoogte van het vaarpad van de maatgevende schepen een overdiepte ten opzichte van de streefdiepte en vaak gaat dit gepaard met een vermindering van de vaarbreedte bij 13.5 m. Dit effect is het meest uitgesproken in de zones waarbij de vaarpaden het meest geconcentreerd zijn zoals bij de passages van de bruggen en bij de passage van de tunnel van Zelzate. Bij deze laatste sectie geldt ook een belangrijke versmalling van de vaarweg op breedte 12.5 m tot slechts 55 m (ten opzichte van 72 m in het typeprofiel Zelzate).

In tweede instantie worden in de verschillende secties de oevereffecten onderzocht die ervaren zouden worden door een studieschip met maximale diepgang aan een vaarsnelheid gelijk aan 4.8 kn in een realistisch vaarpad. Hierbij wordt opgemerkt dat de langskrachten die opgewekt worden door de werkelijke secties steeds kleiner zijn dan in de theoretische secties. De overdiepte onder de kiel gaat bijgevolg gepaard met een groter gunstige impact op de langskrachten dan de beperking van de vaarwegbreedte op diepte 13.5 m.

De meest beperkende secties voor wat betreft de langskracht op een schip betreffen secties ter hoogte van de Brug van Sluiskil, in de Bocht van Sluiskil en de passage van de tunnel van Zelzate. Vooral de aanwezigheid van een versmalling in de bocht van Sluiskil is opmerkelijk aangezien de bocht een uitdagender manoeuvre betreft waarbij het schip een drift- of opstuurhoek zal vertonen en hierdoor een bredere padbreedte zal hebben. Bovendien is het in een bocht moeilijker om een centrale vaarpositie aan te nemen dan op de rechte kanaalstukken die overeenstemmen met de andere beperkende secties (zoals de bruggen en tunnels).

De afwezigheid van de overdiepte in het theoretische profiel en de afwijking van de positie van de oever in het theoretische profiel ten opzichte van de werkelijke peilingen impliceren dat de oevereffecten in het theoretische profiel in belangrijke mate kunnen verschillen van de oevereffecten in werkelijkheid. Dit is met name het geval voor de dwarskracht ter hoogte van de boeg waarvan eerder al opgemerkt werd dat deze in grote mate afhankelijk is van de kielspeling onder het schip.

Op basis van de impactstudie van de bodem werd het bodemprofiel gedefinieerd waarbij de vaarsimulaties uitgevoerd werden. In overeenstemming met de Werkgroep Toegankelijkheid KGT werd beslist om hiervoor een bodemprofiel op basis van peilingen te hanteren dat per land overeenstemde met de grootste langskracht die voorspeld werd sinds 2021. Voor het Nederlandse traject betreft dit de meest recente peiling die onderzocht werd (15/02/2024). Deze geeft een maximale langskracht ter hoogte van de bocht van Sluiskil (-6.85 km). Voor het Vlaamse grondgebied wordt de grootste langskracht voorspeld voor de passage van de tunnel te Zelzate. De minst gunstige conditie stemt hier overeen met de eerste peilingen uit 2021 (14/01/2021).

De squat van het studieschip blijkt op basis van de peilingen waarden tot 0.6 m te bereiken indien uitgegaan wordt van een vaarsnelheid gelijk aan 4.8 kn. Deze waarde ligt in lijn met de ware-grootte squatmetingen (tot 0.5 m) uitgevoerd op bulk carriers met breedte 37.0 m zoals de KMAX-Vision gerapporteerd in Tello Ruiz *et al.* (2021). Rekening houdend met de beperkte vaarwegbreedte op 13.5 m en 12.5 m in de smalste kanaalsecties ter hoogte van bruggen en tunnel kan verwacht worden dat de afstanden tussen de romp van het schip en de kanaalbodem op deze locaties erg beperkt zullen zijn.

6.1.5 Vaarsimulaties

Gedurende drie simulatiedagen werden er realtime vaarsimulaties met Vlaamse en Nederlandse kanaallootsen georganiseerd op de full mission bridge simulator 360+ van het Waterbouwkundig Laboratorium te Antwerpen.

De scheepstypes bulk carrier en tanker bij de beide ladingscondities werden gesimuleerd bij de maximale operationele limieten die vandaag gelden voor de bulk carriers met breedte 37 m. Deze limieten betreffen (Gemeenschappelijk Nautisch Beheer Scheldegebied, 2011):

- Maximale vaarsnelheid
 - Maximale diepgang: 4.8 kn;
 - Heavy ballast: 6.5 kn;
- Maximale windconditie
 - Maximale diepgang: 6 Bft
 - Heavy ballast: 5 Bft
- Sleepboten:
 - 2 x 45 ton BP vooraan
 - 1 x 60 ton BP achteraan

Het scheepstype bulk carrier werd verondersteld om bij maximale diepgang aan te komen (opvaart) en leeg (heavy ballast) te vertrekken (afvaart). Voor het scheepstype tanker werden de beide ladingscondities in beide richtingen geëvalueerd.

Een belangrijk hulpmiddel bij het beloodsen van maatgevende schepen op het Kanaal Gent-Terneuzen betreft de Full SNMS PPU waarvoor de kanaallootsen de Qastor-applicatie gebruiken en waarmee de actuele scheepspositie in hoge nauwkeurigheid gevisualiseerd wordt ten opzichte van de meest recente peilingen. De PPU werd ook in de simulatoren aangeboden op twee laptops die ter beschikking gesteld werden op de scheepsbrug.

De vaarsimulaties werden uitgevoerd voor het volledige kanaaltraject tussen de Massagoedhaven en het Sifferdok waarbij de nadruk gelegd werd op het traject tussen de brug van Sluiskil en het Kluizendok dat gepaard gaat met de belangrijkste knelpunten en de meest beperkende kanaalsecties.

De simulaties tonen de belangrijke impact van oevereffecten en wind op de studieschepen en laten toe om de randvoorwaarden voor de proefvaarten te bepalen. Bovendien toonden de simulaties het belang aan van een consequente en nauwkeurige uitlezing van de Full SNMS PPU. De wijze waarop de verschillende lootsen de PPU consulteerden en de manier waarop zij de orders tot de wielman formuleerden verschilde van loots tot loots. Hierbij kon opgemerkt worden dat de lootsen die het meest intensief gebruik maakten van de Full SNMS voor het positioneren van het schip op het kanaal gunstige resultaten bereikten. Hierbij werden onderstaande aanbevelingen geformuleerd met betrekking tot het gebruik van de PPU:

- Gebruik van de PPU in lock approach mode voor de passage van de bruggen
- Gebruik van de PPU en de bijhorende predictie (ca. 2 tot 3 minuten voorspelling) voor het positioneren van het schip tijdens de kanaalvaart
- Evaluatie van gierbeweging op basis van PPU en communicatie van orders onder de vorm van giersnelheden (hierbij dient opgemerkt te worden dat op heden de wielmannen geen ervaring hebben met het varen op gierorders en ook geen toegang hebben tot nauwkeurige indicatoren voor de rate of turn waardoor het beloodsen op gierorders in realiteit moeilijk uitvoerbaar is).

Bovendien toont aan dat de beloodsing van de studieschepen op het kanaal gepaard gaat met een constant hoog concentratieniveau van de loots (bijvoorbeeld met betrekking tot de interpretatie van de Full SNMS PPU). De mogelijkheid tot het toepassen van gierorders heeft als doel om de eerste loots te ontlasten maar is, zoals hierboven vermeld, moeilijk op korte termijn in praktijk te brengen.

6.1.6 Randvoorwaarden voor proefvaarten

Op basis van de simulaties kon gesteld worden dat de bestaande regelgeving voor maatgevende schepen op het Kanaal Gent-Terneuzen als volgt aangepast dient te worden voor de proefvaarten met schepen met breedte tot maximaal 38.5 m en lengte kleiner dan 240 m. Hierbij dient opgemerkt dat de beperkingen bepaald voor de tanker gebaseerd zijn op een beperkt aantal simulaties en mogelijk gemitigeerd kunnen worden op basis van ervaring, opleiding of op basis van het effectieve scheepsontwerp van deze schepen. Er wordt bij deze randvoorwaarden een onderscheid gemaakt tussen randvoorwaarden die rechtstreeks het gevolg zijn van de uitgevoerde simulaties en randvoorwaarden die benoemd zijn door de deelnemende loodsen.

- Randvoorwaarden op basis van simulatiestudie
 - Maximale vaarsnelheid
 - Maximale diepgang: 4.0 kn;
 - Heavy ballast: 5.5 kn;
 - Maximale windconditie
 - Bulk carrier
 - Maximale diepgang: 6 Bft
 - Heavy ballast: 5 Bft
 - Tanker (met windoppervlaktes zoals aangenomen in de huidige studie)
 - Maximale diepgang: 5 Bft
 - Heavy ballast: 4 Bft
 - Positie schip in vaarweg
 - Voor beide scheepstype en beide ladingscondities geldt dat het schip tijdens het kanaaltraject steeds op een centrale positie in de vaarweg gepositioneerd dient te worden. Compenseren van windeffecten wordt bij voorkeur uitgevoerd door toepassing van een drifthoek eerder dan het toepassen van een excentrische vaarpositie.
 - Gebruik van Full SNMS PPU
 - Sterke aanbeveling voor positionering van het schip in het midden van het vaarpad bij beide scheepstypes en beide ladingscondities door gebruik van de Full SNMS PPU
 - Sleepboten:
 - 2 x 45 ton BP vooraan
 - 1 x 60 ton BP achteraan⁷
- Randvoorwaarde op basis van nabespreking met deelnemende loodsen (niet steeds rechtstreeks te motiveren op basis van de simulatieresultaten)
 - Beloodsing
 - De accurate positionering van het schip in de vaarweg vereist een grote en constante concentratie van de uitvoerende loods. Aangezien ook de duur van een opvaart toeneemt (door de lager vaarsnelheid) kan deze spanningsboog niet langer door één loods geboden worden. Beloodsing door twee bevoegde loodsen en een wielman moet toelaten om het commando tijdens een kanaalvaart over te dragen bij concentratieverlies en om kennis uit te wisselen tussen verschillende loodsen (bijvoorbeeld in het gebruik van de Full SNMS PPU).

⁷ Tijdens de simulatiestudie achtte één loods het wenselijk om voor de tanker de bollard pull van de achterste sleepboot te verhogen tot minimaal 70 ton. In de WG Toegankelijkheid werd echter beslist om deze aanbeveling niet te weerhouden als randvoorwaarde voor de proefvaarten.

- Ontmoetingen
 - Er worden gelijkaardige begrenzingsen verwacht voor het uitvoeren van ontmoetingen als voor de huidige 37.0 m brede schepen maar door de kleinere vaarsnelheden is de globale impact op de verkeersafwikkeling op het kanaal wel groter.
 - Tijdens proefvaarten dienen ontmoetingen vermeden te worden waarvoor het studieschip haar positie in de vaarweg dient aan te passen. Schepen waarvoor de diepgang en afmetingen toelaten dat zij het vaarpad van het kanaal vrijhouden kunnen eventueel wel ontmoet worden⁸.
- Bruggen
 - Bij de proefvaarten dient stremming van de bruggen vermeden te worden (gegarandeerde doorvaart).
- Zichtbaarheid
 - Randvoorwaarden voor zichtbaarheid bij de proefvaarten konden niet bepaald worden op basis van de vaarsimulaties en dienen binnen de WG Toegankelijkheid KGT bepaald te worden.

Op heden sturen de wielmannen de 37.0 m brede schepen door het kanaal op basis van het zicht. Voor de 38.5 m schepen wordt dit niet langer realistisch geacht en wordt een positionering door de loods op basis van Full SNMS (en gecombineerd met roer- en koersorders) vereist geacht voor vrijwel de volledige kanaalvaart en met name voor onderstaande gedefinieerde knelpunten:

1. s -11.5 km tot -11 km: de aanloop van het kanaal ter hoogte van de Zevenaarshaven (voor opvaart);
2. s -9.9 km: de nadering en passage van de brug te Sluiskil
3. s -8.0 km tot -7.5 km: de nadering van de bocht van Sluiskil ter hoogte van de Yara-haven (voor opvaart)
4. s -7.5 km tot -6.0 km: de bocht van Sluiskil, de passage van de Autriche-haven en de op- en afwaartse kanaalversmallingen
5. s -6.0 km tot -5.7 km: de passage van het zijkanaal D (voor afvaart)
6. s -3.7 km tot -2.7 km: de bocht van Sas van Gent
7. s -2.2 km: de passage van de brug te Sas van Gent
8. s -2.1 km tot -1.3 km: de passage van Zijkanaal G, Zijkanaal H en zuid-Chemie (voor afvaart)
9. s 0 km tot 1.1 km: de passage van de grens tot brug Zelzate
10. s 1.1 km tot 2.7 km: de passage van straatje van Zelzate (tot en met de verbreding aan Arcelor-Mittal)
11. s 6.8 km tot 7.5 km: de passage van het Rodenhuizedok
12. s 9.2 km tot 10.0 km: de passage van Ghent Commodity Terminal
13. s 10.8 km tot 11.4 km de passage van Mercatordok.

Op basis van de simulaties blijkt het belangrijkste knelpunt in de kanaalvaart de bocht van Sluiskil waarbij een belangrijke koerswijziging gerealiseerd dient te worden in de meest beperkte secties van het kanaal. Ook de wisselende aanwezigheid van een eenzijdige oever op- en afwaarts de bocht (aan de westzijde te Autriche-haven en aan de oostzijde aan de Yara-haven) bemoeilijken de centrale positionering van een schip in de bocht van Sluiskil. In dit verband wordt opgemerkt dat in het ontwerprapport van het Kanaal Gent-Terneuzen (Ministerie van Openbare Werken & Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1968) een bochtverbreding van 7 m bepaald werd in de bochten van Sluiskil en Sas van Gent (en mogelijk ook aan de grens). Deze bochtverbreding blijkt in de feiten niet gerealiseerd geweest te zijn. Ook de nadering van Sas van Gent voor zowel opvaart (interactie met bochtmanoeuvre) en afvaart (belangrijke asymmetrie bij aanloop) en de invaart van het kanaal ter hoogte van de werf te Zelzate (voor afvaart) zijn belangrijke knelpunten.

⁸ Bepaling toelating en acceptatie van maximale scheepsafmetingen die ontmoet kunnen worden tijdens en na de proefvaarten dienen bepaald te worden wanneer meer informatie beschikbaar is over het schip waarmee de vaart uitgevoerd zal worden.

De simulatieresultaten tonen bovendien aan dat voor diepgang 12.5 m de kielspeling in de smalste secties erg beperkt is. Op enkele locaties geven de combinatie van het bodemprofiel en de verwachte inzinking van het schip aanleiding tot erg kleine kielspelingen. In een enkel geval wordt er ter hoogte van de tunnel van Zelzate een contact verwacht tussen het schip en de bodem (bodemraking werd niet rechtstreeks gesimuleerd). Anderzijds kan er, doordat de simulaties uitgevoerd werden aan lagere vaarsnelheden dan deze die op heden toegepast worden door de 37.0 m brede schepen, van uitgegaan worden dat de kans op bodemraking voor de 38.5 m brede schepen bij vaarsnelheid 4.0 kn gelijkaardig is aan de kans op bodemraking voor een 37.0 m breed schip bij vaarsnelheid 4.8 kn. Er dient opgemerkt te worden dat voor beide schepen (37.0 m of 38.5 m) de kans reëel is dat het schip ter hoogte van de tunnel van Zelzate contact zal maken met de top van de bodem. De risico's verbonden aan dergelijke events konden in het kader van voorliggende studie niet beoordeeld worden maar zijn mogelijks beperkend voor de toegankelijkheid van het kanaal voor grotere schepen.

6.2 Aanbevelingen voor verder onderzoek

Op basis van het gevoerde onderzoek kunnen onderstaande aanbevelingen geformuleerd worden voor verder onderzoek en voor een optimalisatie van de toegankelijkheid.

- Aanbevelingen voor de optimalisatie van de toegankelijkheid van het kanaal
 - Onderzoek naar de risico's met betrekking tot contacten tussen schip en bodem ter hoogte van de smalste kanaalsecties (en in het bijzonder de passage van de tunnel Zelzate);
 - Optimalisatie en harmonisatie in het gebruik van de Full SNMS PPU bij de beloodsing van bovenmaatse schepen op het Kanaal Gent-Terneuzen en in de ondersteuning van wielmannen door technologische hulpmiddelen;
 - Onderzoek naar de optimale vaarstrategie bij de brugpassages door windgevoelige tankers bij verschillende windcondities en het bijhorend gebruik van sleepboten tijdens de aanloop en doorvaart van de brug.
 - Onderzoek naar een beoordelingskader voor het bodemprofiel van het Kanaal Gent-Terneuzen met minimale geometrische eigenschappen in functie van de maximum toegelaten scheepsafmetingen;
 - Kanaalaanpassingen om de vlotheid van de kanaalvaart met grotere schepen te verhogen en om de ontmoetingen tussen schepen op het kanaal te faciliteren.
- Aanbeveling voor verder onderzoek met betrekking tot oevereffecten
 - De toepasbaarheid van sleeptankproeven van oevereffecten bij erg lage kielspelingen zoals aanwezig in het theoretische profiel van het Kanaal Gent-Terneuzen is beperkt. Er wordt aanbevolen om bijkomend onderzoek naar deze condities uit te voeren door onderstaande vervolgonderzoeken:
 - beoordeling van de oevereffecten modellering (zowel manoeuvreergedrag als squat) op basis van de ware-grootte metingen met maatgevende schepen op het kanaal met registratie van roer- en schroefgebruik;
 - numerieke berekening van oevereffecten door middel van RANSE-vergelijkingen op ware grootte voor verschillende karakteristieke kanaalsecties al dan niet met beperkte overdiepte;
 - uitvoering van schaalmodelproeven bij kleinere schaalverhoudingen (of dus met grotere schaalmodellen).

Referenties

- Davenport, A.** (1967). Gust Loading Factors. *J. Struct. Div. Proc. ASCE 93(ST3)*: 11–34
- Delefortrie, G.; Verwilligen, J.; Vantorre, M.; Lataire, E.** (2024). Exact and approximated solutions to the critical flow speeds in canals, *in*: (2024). *35th PIANC World Congress*: Cape Town (South-Africa)
- Douglas, D.H.; Peucker, T.K.** (1973). Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature. *Commun. ACM 10(2)*: 119–122. doi:10.1145/363067.363120
- Dubins, L.E.** (1957). On curves of minimal length with a constraint on average curvature, and with prescribed initial and terminal positions and tangents. *Am. J. Math.* 79(3): 497–516
- Gemeenschappelijk Nautisch Beheer Scheldegebied.** (2011). Gezamenlijke bekendmaking nr. 01-2011: Toegelaten afmetingen en diepgangen op het Kanaal van Gent naar Terneuzen: Brussel/Middelburg
- Lataire, E.** (2014). Experimentele bepaling en wiskundige modellering van oevereffecten op schepen, Experiment Based Mathematical Modelling of Ship-Bank Interaction. PhD thesis. Ghent University: Ghent, Belgium. ISBN 9789085787488. 269 pp.
- Lataire, E.; Vantorre, M.** (2008). Ship-Bank Interaction Induced by Irregular Bank Geometries, *in*: (2008). *27th Symposium on Naval Hydrodynamics*: Seoul, Korea. pp.5–10
- Lataire, E.; Verwilligen, J.; Vantorre, M.; Peeters, P.; Mostaert, F.** (2016). Kanaal Gent-Terneuzen: toegankelijkheid van KGT voor bulkcarriers van 240 m op 43 m. *WL Rapporten*, 14_170. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- Ministerie van Openbare Werken; Ministerie van Verkeer en Waterstaat.** (1968). Zeekanaal Gent-Terneuzen
- MOERI.** (2008). MOERI Tanker KVLCC2
- Rijkswaterstaat Directie Zeeland. Afdeling Water en Scheepvaart.** (2009). Kanaal Gent-Terneuzen - Theoretisch profiel kanaal Gent-Terneuzen, RWSZL-2009. Rijkswaterstaat
- Tello Ruiz, M.Á.; Verwilligen, J.; Lataire, E.; Eloot, K.; Mostaert, F.** (2021). Maximum ship dimensions accessible to the canal of Ghent-Terneuzen: report 1. Theoretical analysis. Version 3.. *FHR reports*, 17_031_1. Flanders Hydraulics Research: Antwerp
- Verwilligen, J.; Eloot, K.** (2023). Nautical assessment Rodenhuize-dock: Full-mission bridge simulation study (12.4-BE-S-M-22-GCH). Version 6.. *FH reports*, 22_086_1. Flanders Hydraulics: Antwerp
- Verwilligen, J.; Eloot, K.; Lataire, E.** (2021). Maximale scheepsafmetingen voor Kanaal Gent-Terneuzen: deelrapport 2. Realtime simulaties Dunkirk-max bulk carrier. Versie 5.0. *WL Rapporten*, 17_031_2. Universiteit Gent: Antwerpen
- Vlaams-Nederlandse Scheldec commissie.** (2023). Aanbesteding van de opdracht 'Full mission bridge simulatie' met het zaaknummer 31186665
- Zeeland Seaports.** (2013). Passeerplaats KGT FB 2013-072

Bijlage 1 Pilot Cards studieschepen

bulk240_385_125 PRINCIPLE CHARACTERISTICS			
based on fast-time simulations			
Name	bulk240_385_125.shi		
Project	23_088		
Main Dimensions			
LOA	[m]	240	
LPP	[m]	231.78	
B	[m]	38.5	
T _F	[m]	12.5	
T _A	[m]	12.5	
m	[ton]	9.33E+04	
A _{wind frontal}	[m ²]	735	
A _{wind lateral}	[m ²]	2353	
Propeller			
#	[-]	1	
n _{max}	[1/s]	1.266	
CPP		No	
Rotation of propeller		Right	
Thruster			
Bow thruster	[-]	0	
Total Power	[HP]	0	
Max Propeller Rate	[°/min]	0	
Stern Thruster	[-]	0	
Total Power	[HP]	0	
Max Propeller Rate	[°/min]	0	
Rudders			
#	[-]	1	
d _{max}	[°]	35	
Time from +35 to -35	[s]	28	

Manoeuvring speeds			
	RPM	UKC=100%	UKC=10%
	[-]	[kn]	[kn]
Manoeuvring Full Ahead	76	12.6	7.5
Half Ahead	64	10.5	6.3
Slow Ahead	51	8.4	5.1
Dead Slow Ahead	39	6.1	3.8
Stopping specifications			
	Time		Distance
UKC=100%	[s]	[mm:ss]	[m]
From Man. Full Ahead to Full Astern	1301	21:41	2618
From Slow Ahead to Full Astern	1078	17:58	1657
Turning specifications			
	Advance	Transfer	Tact Diam
UKC=100%	[m]	[m]	[m]
Manoeuvring Full Ahead	901	444	971
Slow Ahead	883	442	964
UKC=10%			
Manoeuvring Full Ahead	971	782	1596
Slow Ahead	964	782	1595
ZigZag 20/20			
	1st Overshoot	2nd Overshoot	Period
UKC=100%	[deg]	[deg]	[s]
Manoeuvring Full Ahead	-20.2	19.6	584
Slow Ahead	-18.9	18.6	848
UKC=10%			
Manoeuvring Full Ahead	-4.3	4.1	546
Slow Ahead	-3.9	3.8	795

bulk240_385_88 PRINCIPLE CHARACTERISTICS
based on fast-time simulations

Name	bulk240_385_88.shi
Project	23_088

Main Dimensions

LOA	[m]	240	
LPP	[m]	231.78	
B	[m]	38.5	
T _F	[m]	7.718	
T _A	[m]	8.8	
m	[ton]	5.96E+04	
A _{wind frontal}	[m ²]	891	
A _{wind lateral}	[m ²]	3349	

Propeller

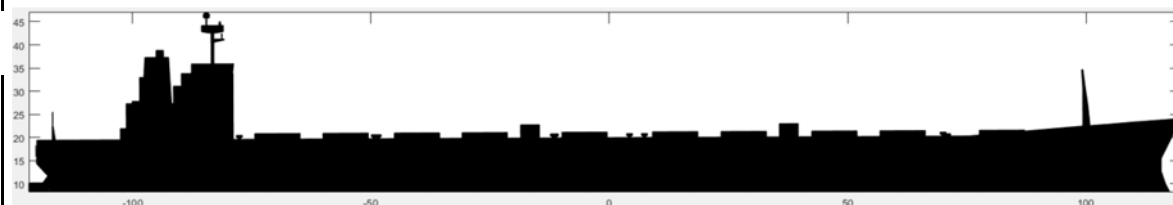
#	[-]	1	
n _{max}	[1/s]	1.266	
CPP		No	
Rotation of propeller		Right	

Thruster

Bow thruster	[-]	0	
Total Power	[HP]	0	
Max Propeller Rate	[°/min]	0	
Stern Thruster	[-]	0	
Total Power	[HP]	0	
Max Propeller Rate	[°/min]	0	

Rudders

#	[-]	1	
d _{max}	[°]	35	
Time from +35 to -35	[s]	28	



Manoeuvring speeds			
	RPM	UKC=212%	UKC=10%
	[-]	[kn]	[kn]
Manoeuvring Full Ahead	76	13.4	8.5
Half Ahead	64	11.2	7.2
Slow Ahead	51	9.0	5.8
Dead Slow Ahead	39	6.7	4.4
Stopping specifications			
	Time		Distance
UKC=212%	[s]	[mm:ss]	[m]
From Man. Full Ahead to Full Astern	1062	17:42	2537
From Slow Ahead to to Full Astern	944	15:44	1770
Turning specifications			
	Advance	Transfer	Tact Diam
UKC=212%	[m]	[m]	[m]
Manoeuvring Full Ahead	884	400	896
Slow Ahead	871	400	894
UKC=10%			
Manoeuvring Full Ahead	809	566	1146
Slow Ahead	802	566	1145
ZigZag 20/20			
	1st Overshoot	2nd Overshoot	Period
UKC=212%	[deg]	[deg]	[s]
Manoeuvring Full Ahead	-15.5	14.6	480
Slow Ahead	-14.4	13.7	694
UKC=10%			
Manoeuvring Full Ahead	-6.6	6.1	466
Slow Ahead	-6.1	5.6	678

tank_Co2_240_385_125 PRINCIPLE CHARACTERISTICS

based on fast-time simulations

Name	tank Co2 240 385 125.shi
Project	23_088

Main Dimensions

LOA	[m]	240	
LPP	[m]	231.78	
B	[m]	38.5	
T _F	[m]	12.5	
T _A	[m]	12.5	
m	[ton]	9.33E+04	
A _{wind frontal}	[m ²]	1038	
A _{wind lateral}	[m ²]	3956	

Propeller

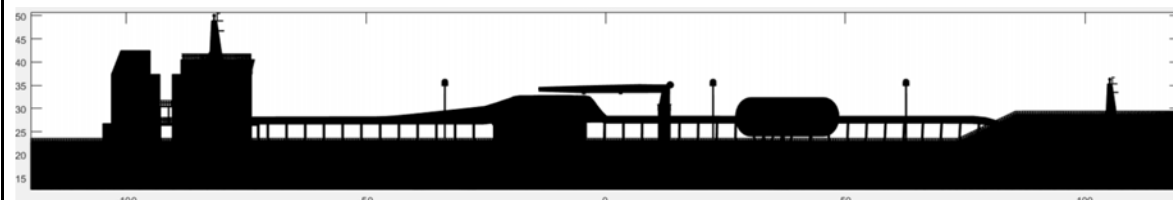
#	[-]	1	
n _{max}	[1/s]	1.266	
CPP		No	
Rotation of propeller		Right	

Thruster

Bow thruster	[-]	0	
Total Power	[HP]	0	
Max Propeller Rate	[°/min]	0	
Stern Thruster	[-]	0	
Total Power	[HP]	0	
Max Propeller Rate	[°/min]	0	

Rudders

#	[-]	1	
d _{max}	[°]	35	
Time from +35 to -35	[s]	28	



Manoeuvring speeds			
	RPM	UKC=100%	UKC=10%
	[-]	[kn]	[kn]
Manoeuvring Full Ahead	76	12.6	7.5
Half Ahead	64	10.5	6.3
Slow Ahead	51	8.4	5.1
Dead Slow Ahead	39	6.1	3.8
Stopping specifications			
	Time		Distance
UKC=100%	[s]	[mm:ss]	[m]
From Man. Full Ahead to Full Astern	1301	21:41	2618
From Slow Ahead to to Full Astern	1078	17:58	1657
Turning specifications			
	Advance	Transfer	Tact Diam
UKC=100%	[m]	[m]	[m]
Manoeuvring Full Ahead	901	444	971
Slow Ahead	883	442	964
UKC=10%			
Manoeuvring Full Ahead	971	782	1596
Slow Ahead	964	782	1595
ZigZag 20/20			
	1st Overshoot	2nd Overshoot	Period
UKC=100%	[deg]	[deg]	[s]
Manoeuvring Full Ahead	-20.2	19.6	584
Slow Ahead	-18.9	18.6	848
UKC=10%			
Manoeuvring Full Ahead	-4.3	4.1	546
Slow Ahead	-3.9	3.8	795

tank_Co2_240_385_88 PRINCIPLE CHARACTERISTICS
based on fast-time simulations

Name	tank_Co2_240_385_88.shi
Project	23_088

Main Dimensions

LOA	[m]	240	
LPP	[m]	231.78	
B	[m]	38.5	
T _F	[m]	7.718	
T _A	[m]	8.8	
m	[ton]	5.96E+04	
A _{wind frontal}	[m ²]	1194	
A _{wind lateral}	[m ²]	4970	

Propeller

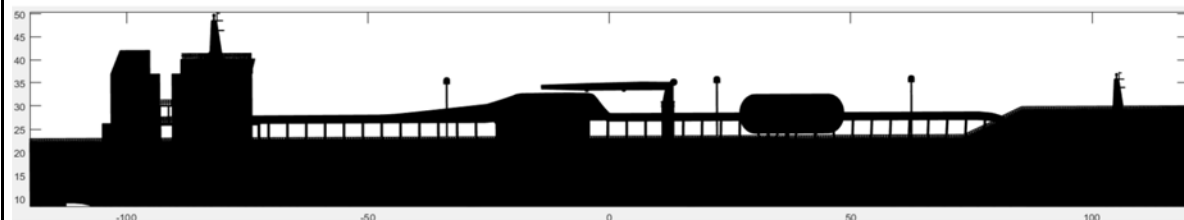
#	[-]	1	
n _{max}	[1/s]	1.266	
CPP		No	
Rotation of propeller		Right	

Thruster

Bow thruster	[-]	0	
Total Power	[HP]	0	
Max Propeller Rate	[°/min]	0	
Stern Thruster	[-]	0	
Total Power	[HP]	0	
Max Propeller Rate	[°/min]	0	

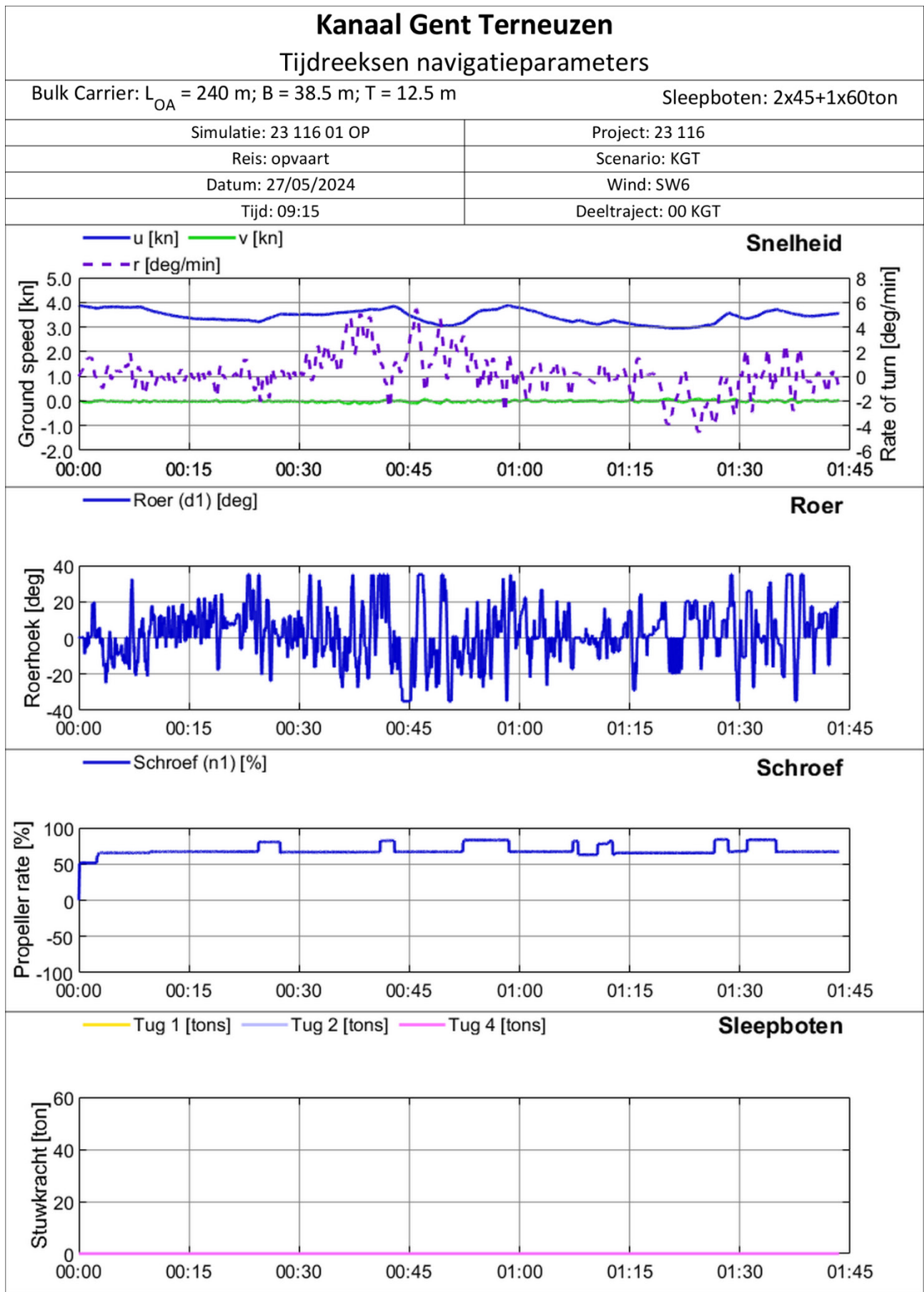
Rudders

#	[-]	1	
d _{max}	[°]	35	
Time from +35 to -35	[s]	28	



Manoeuvring speeds			
	RPM	UKC=212%	UKC=10%
	[-]	[kn]	[kn]
Manoeuvring Full Ahead	76	13.4	8.5
Half Ahead	64	11.2	7.2
Slow Ahead	51	9.0	5.8
Dead Slow Ahead	39	6.7	4.4
Stopping specifications			
	Time		Distance
UKC=212%	[s]	[mm:ss]	[m]
From Man. Full Ahead to Full Astern	1062	17:42	2537
From Slow Ahead to to Full Astern	944	15:44	1770
Turning specifications			
	Advance	Transfer	Tact Diam
UKC=212%	[m]	[m]	[m]
Manoeuvring Full Ahead	884	400	896
Slow Ahead	871	400	894
UKC=10%			
Manoeuvring Full Ahead	809	566	1146
Slow Ahead	802	566	1145
ZigZag 20/20			
	1st Overshoot	2nd Overshoot	Period
UKC=212%	[deg]	[deg]	[s]
Manoeuvring Full Ahead	-15.5	14.6	480
Slow Ahead	-14.4	13.7	694
UKC=10%			
Manoeuvring Full Ahead	-6.6	6.1	466
Slow Ahead	-6.1	5.6	678

Bijlage 2 Grafieken tijdreeksen simulaties



Kanaal Gent Terneuzen

Tijdreeksen oever- en windeffecten

Bulk Carrier: $L_{OA} = 240$ m; $B = 38.5$ m; $T = 12.5$ m

Sleepboten: 2x45+1x60ton

Simulatie: 23 116 01 OP

Project: 23 116

Reis: opvaart

Scenario: KGT

Datum: 27/05/2024

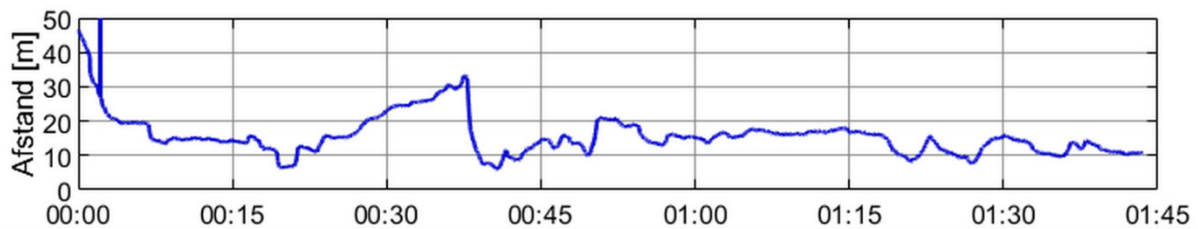
Wind: SW6

Tijd: 09:15

Deeltraject: 00 KGT

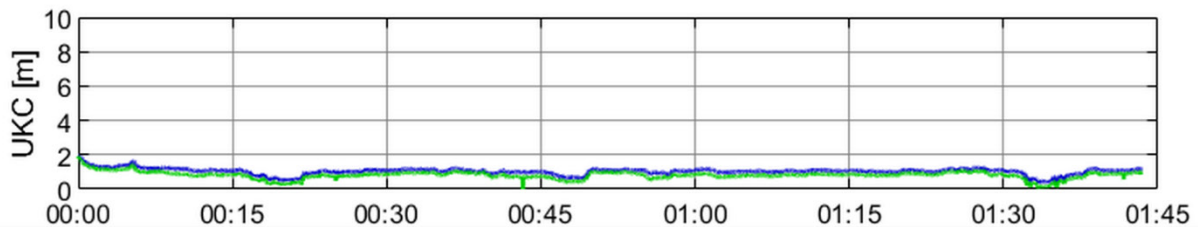
Afstand [m]

Dwarsafstand tot Tmax Dieptelij



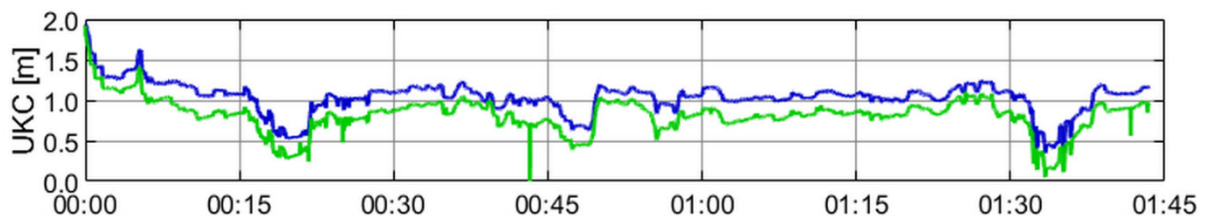
UKC Bruto [m] UKC Netto [m]

Kielspeling



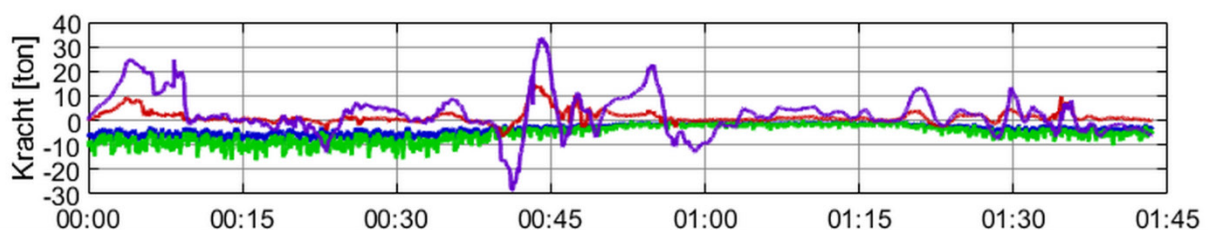
UKC Bruto [m] UKC Netto [m]

Kielspeling detail



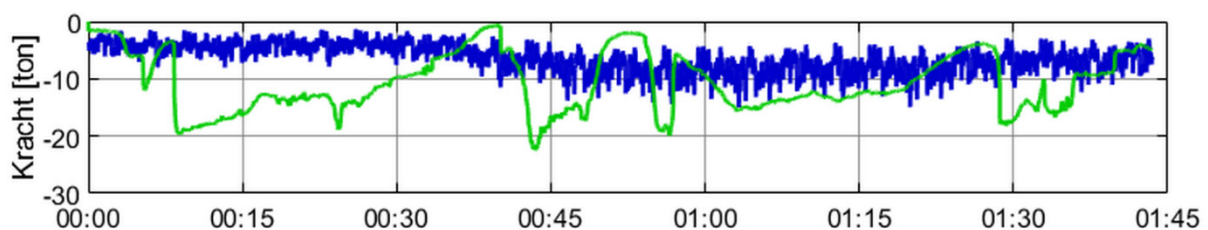
Wind FP Wind AP Oev FP Oev AP

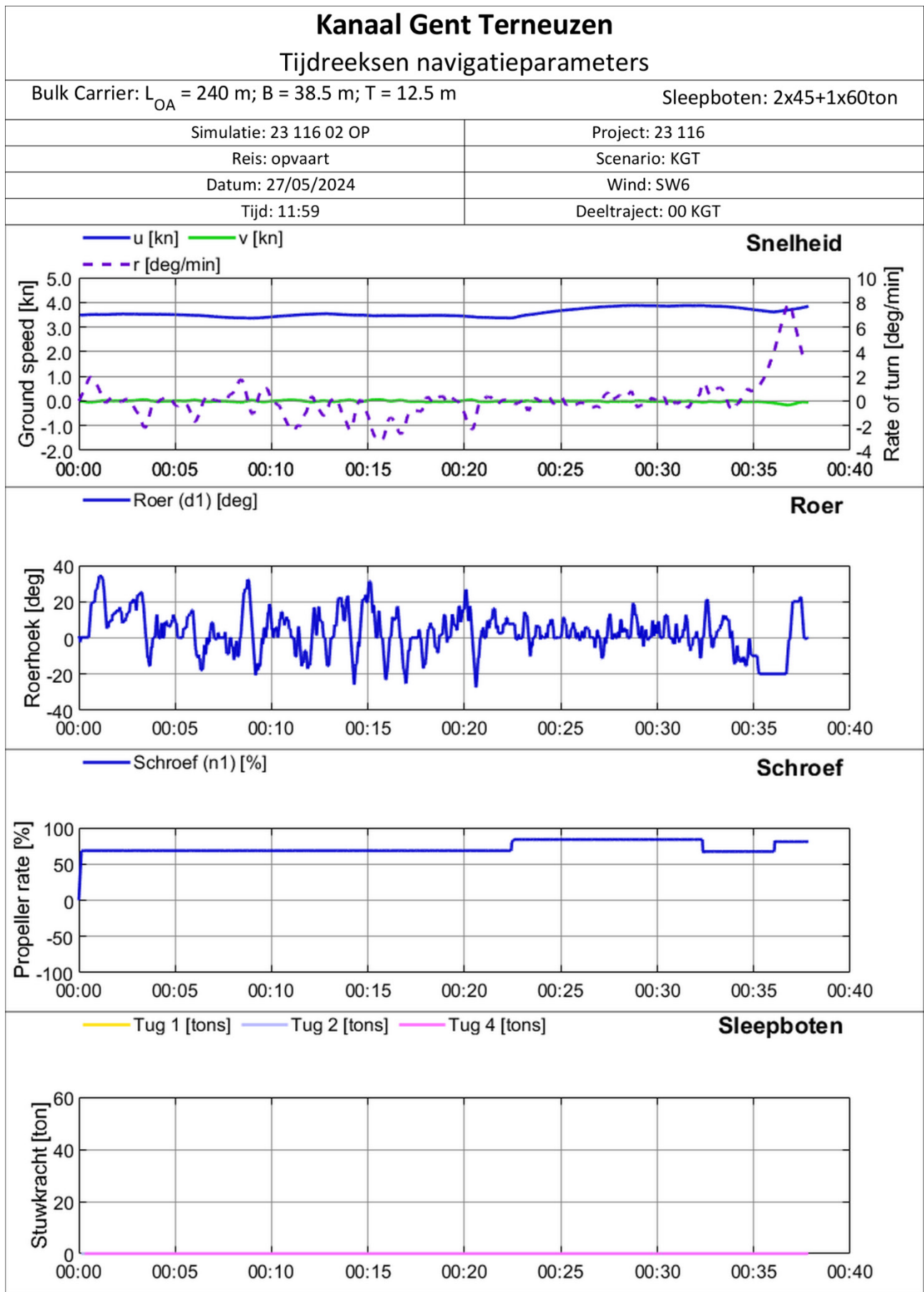
Dwarskrachten



Xwind [ton] Xbank [ton]

Langskrachten





Kanaal Gent Terneuzen

Tijdreeksen oever- en windeffecten

Bulk Carrier: $L_{OA} = 240$ m; $B = 38.5$ m; $T = 12.5$ m

Sleepboten: 2x45+1x60ton

Simulatie: 23 116 02 OP

Project: 23 116

Reis: opvaart

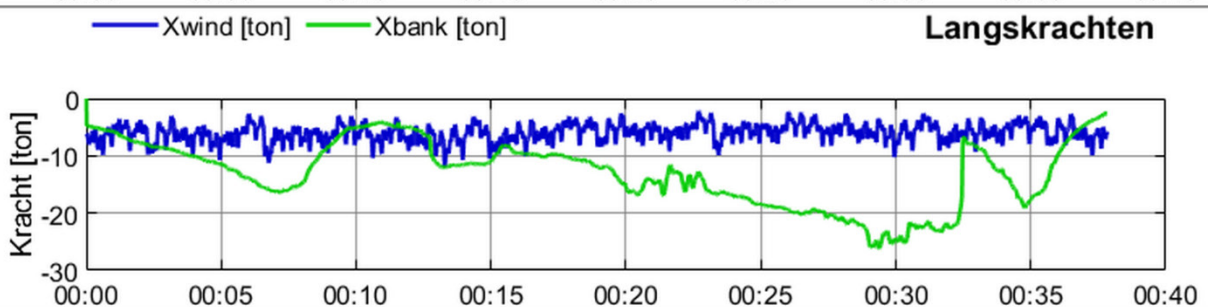
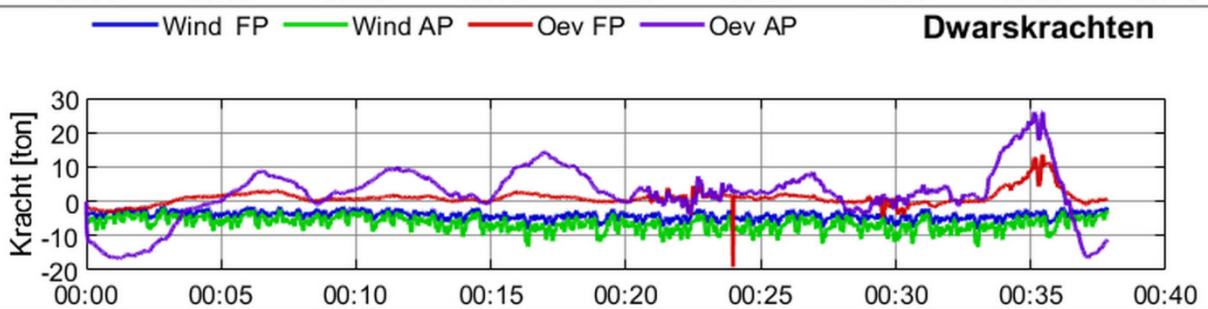
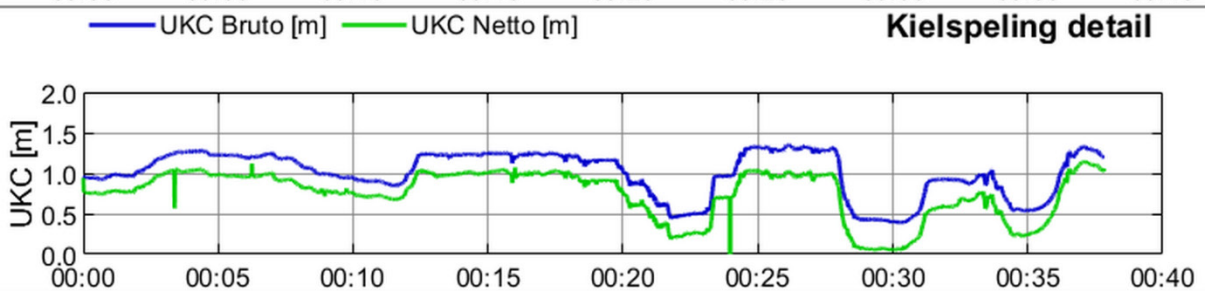
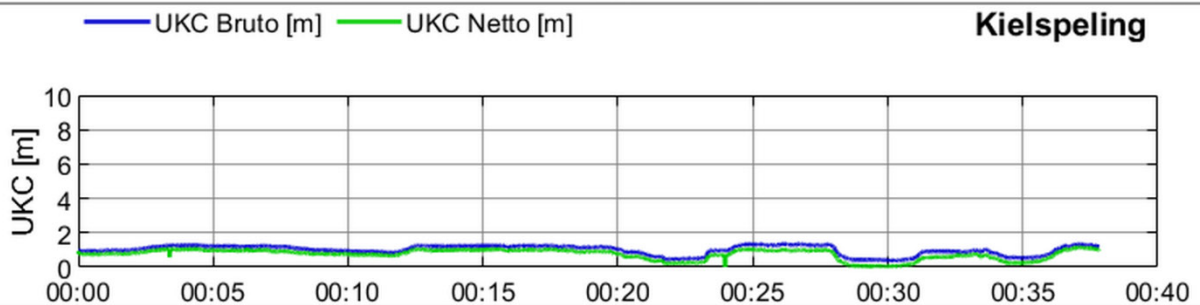
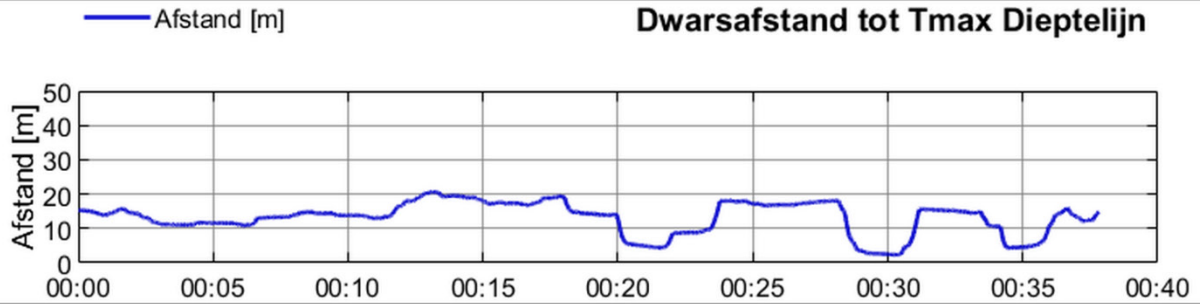
Scenario: KGT

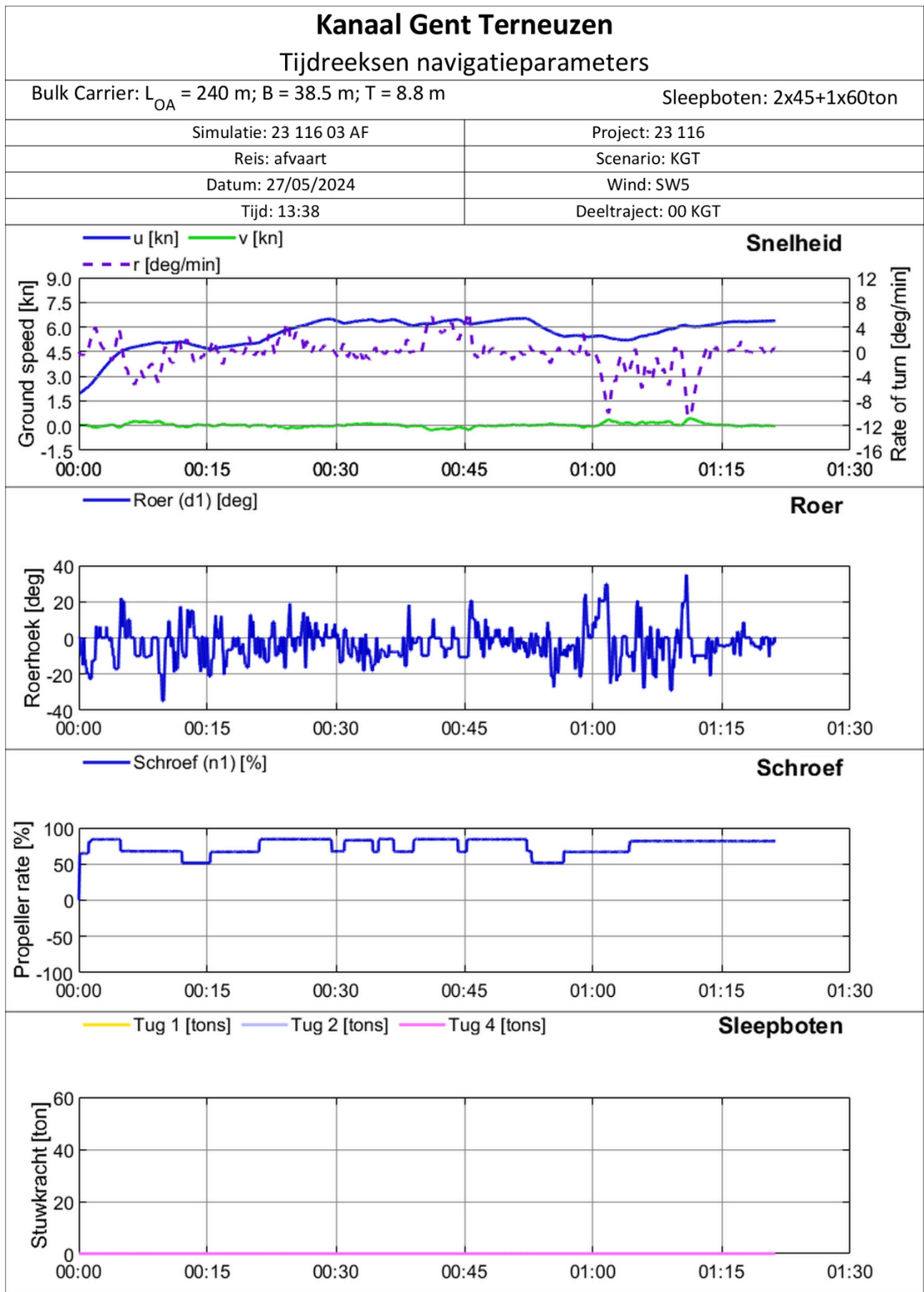
Datum: 27/05/2024

Wind: SW6

Tijd: 11:59

Deeltraject: 00 KGT





Kanaal Gent Terneuzen

Tijdreeksen oever- en windeffecten

Bulk Carrier: $L_{OA} = 240$ m; $B = 38.5$ m; $T = 8.8$ m

Sleepboten: 2x45+1x60ton

Simulatie: 23 116 03 AF

Project: 23 116

Reis: afvaart

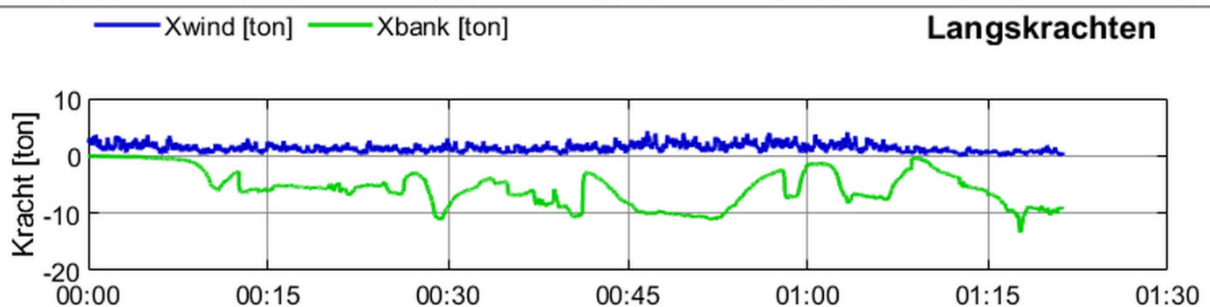
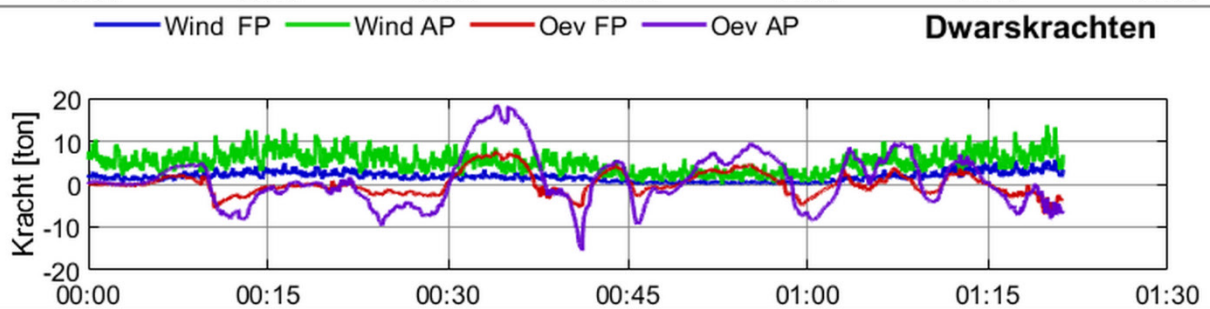
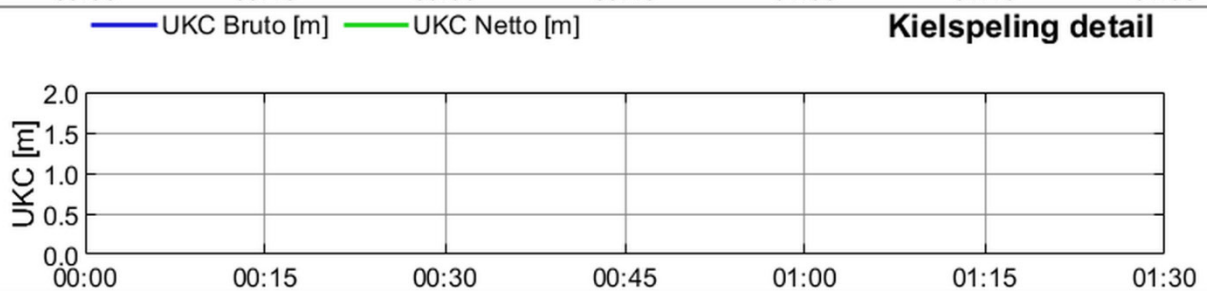
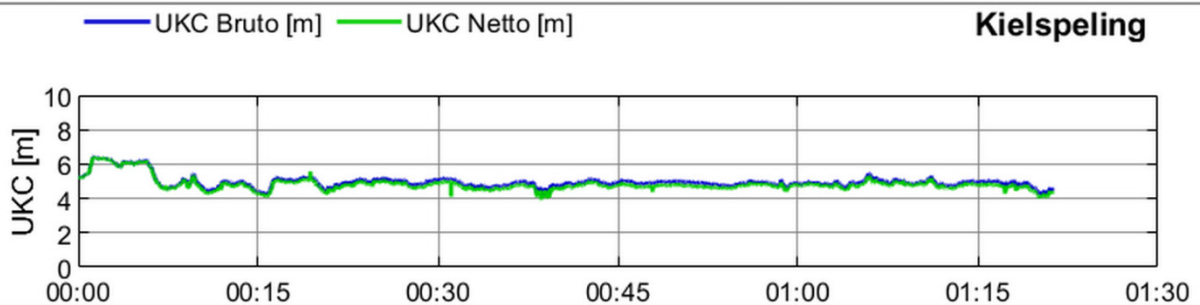
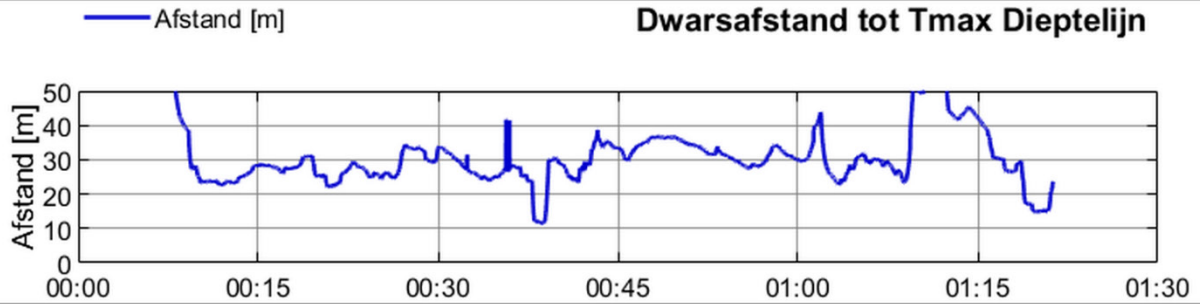
Scenario: KGT

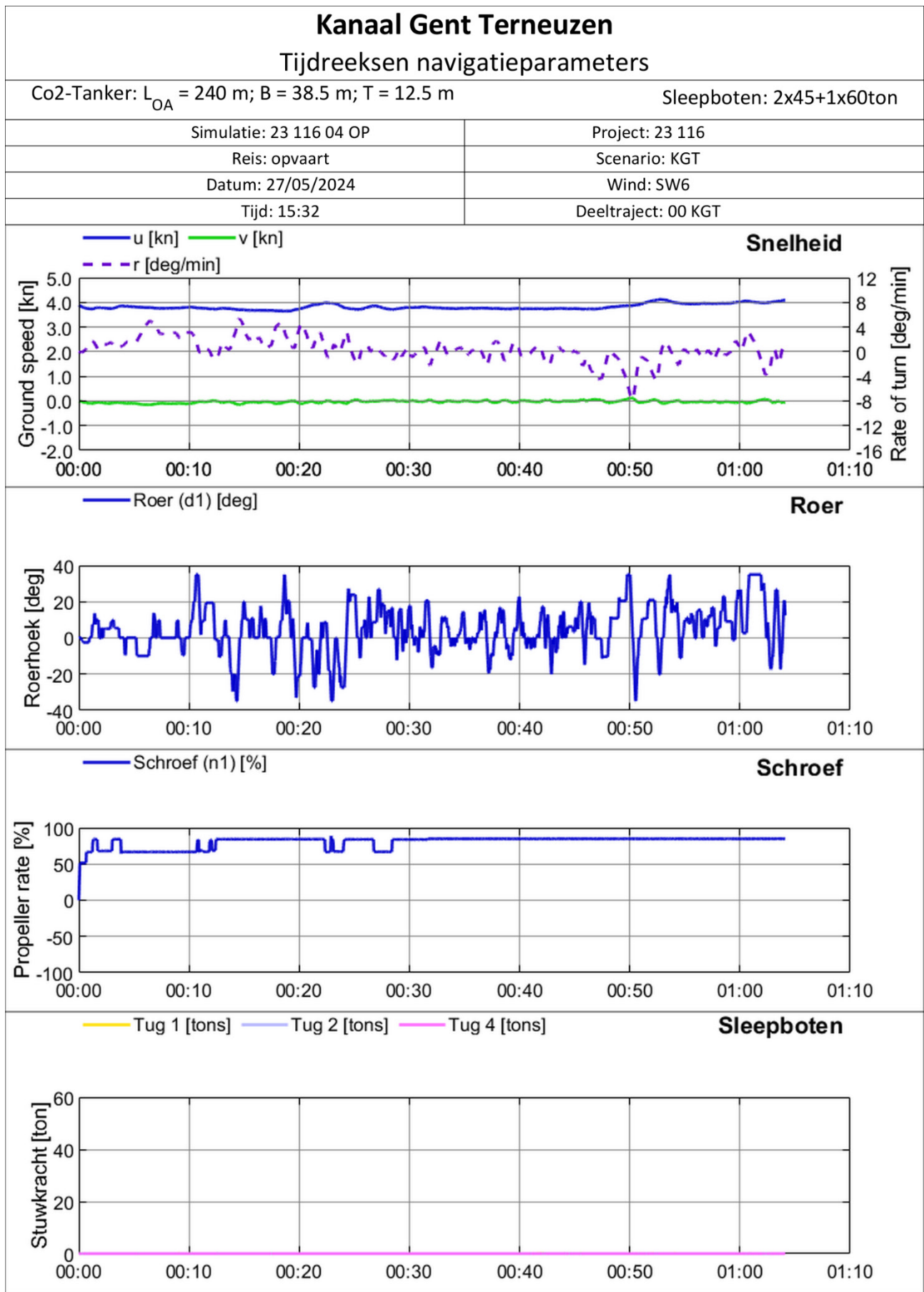
Datum: 27/05/2024

Wind: SW5

Tijd: 13:38

Deeltraject: 00 KGT





Kanaal Gent Terneuzen

Tijdreeksen oever- en windeffecten

Co2-Tanker: $L_{OA} = 240$ m; $B = 38.5$ m; $T = 12.5$ m

Sleepboten: 2x45+1x60ton

Simulatie: 23 116 04 OP

Project: 23 116

Reis: opvaart

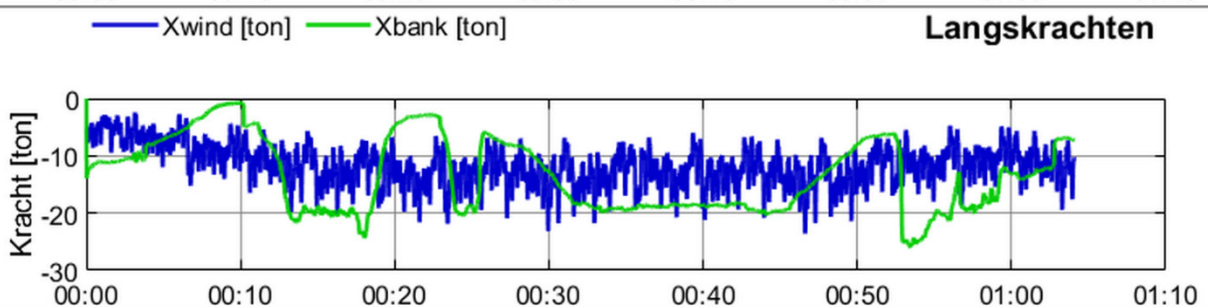
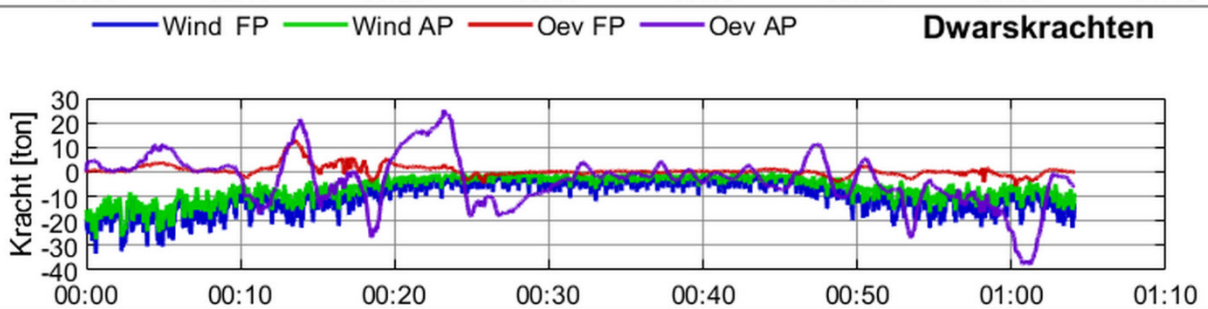
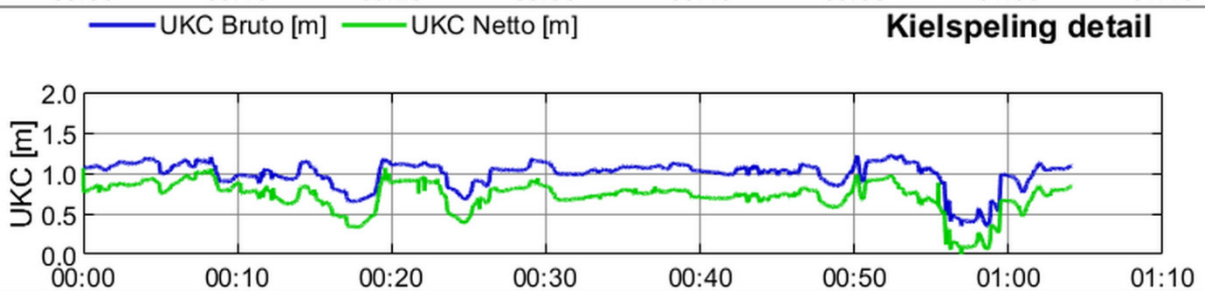
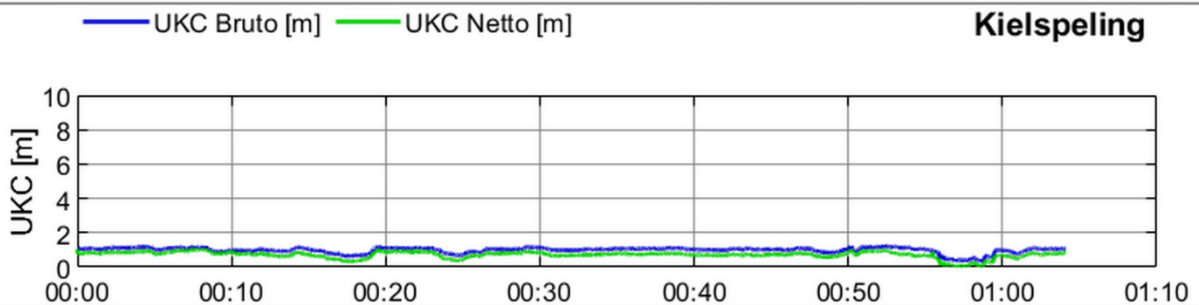
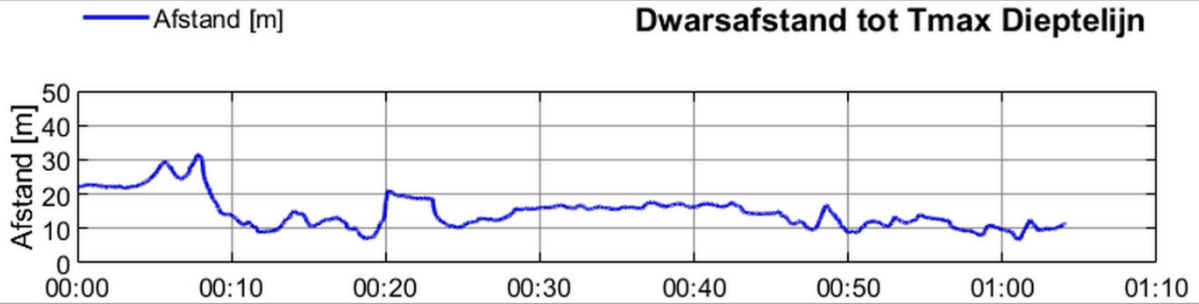
Scenario: KGT

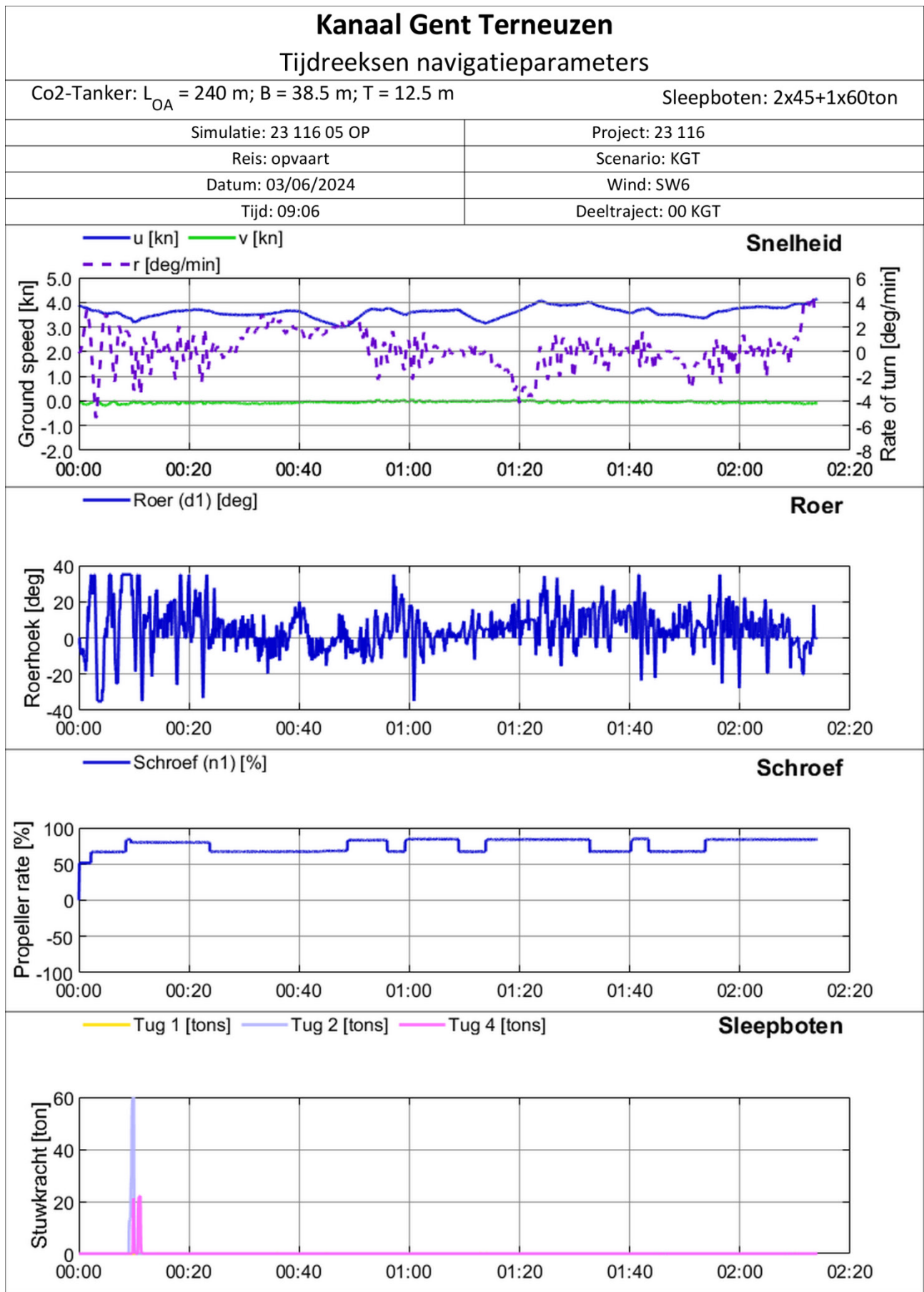
Datum: 27/05/2024

Wind: SW6

Tijd: 15:32

Deeltraject: 00 KGT





Kanaal Gent Terneuzen

Tijdreeksen oever- en windeffecten

Co2-Tanker: $L_{OA} = 240$ m; $B = 38.5$ m; $T = 12.5$ m

Sleepboten: 2x45+1x60ton

Simulatie: 23 116 05 OP

Project: 23 116

Reis: opvaart

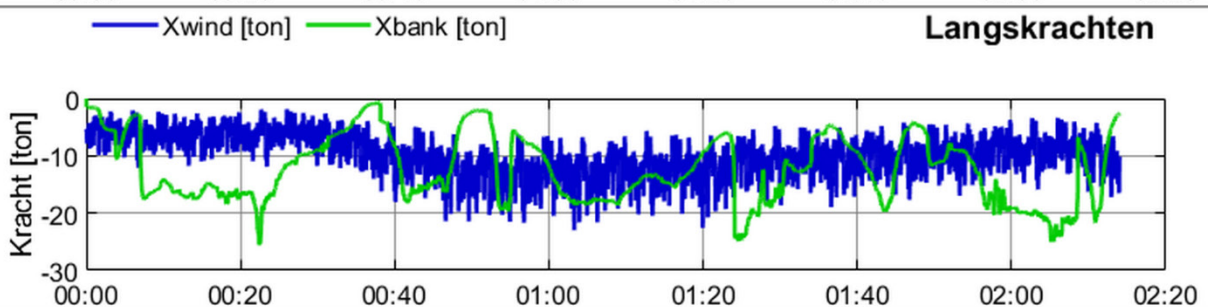
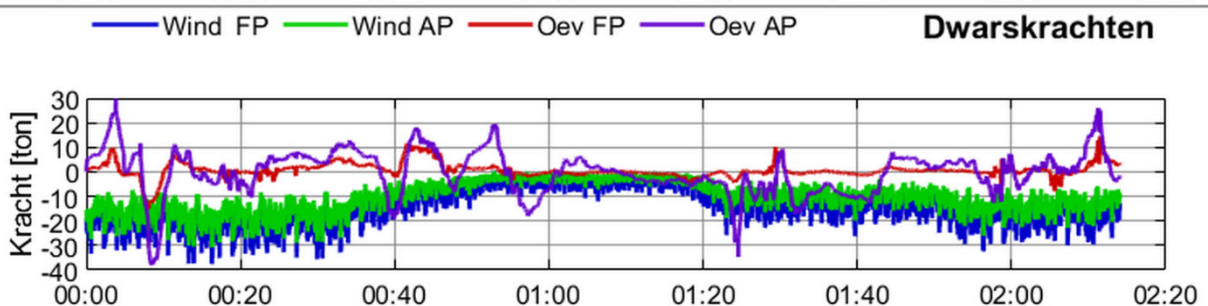
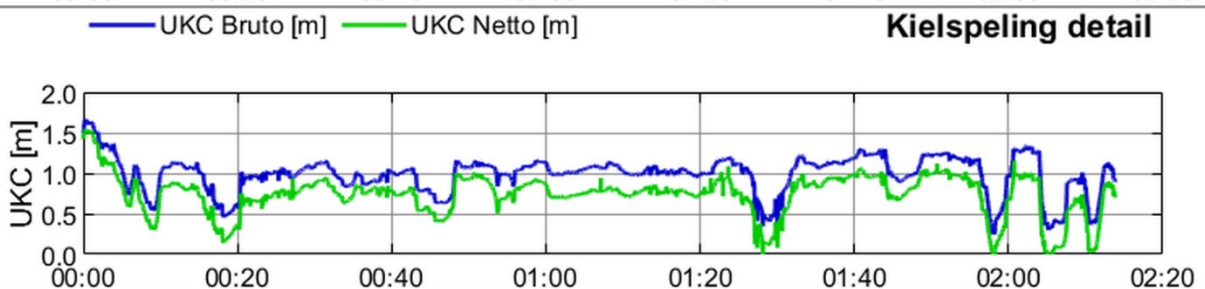
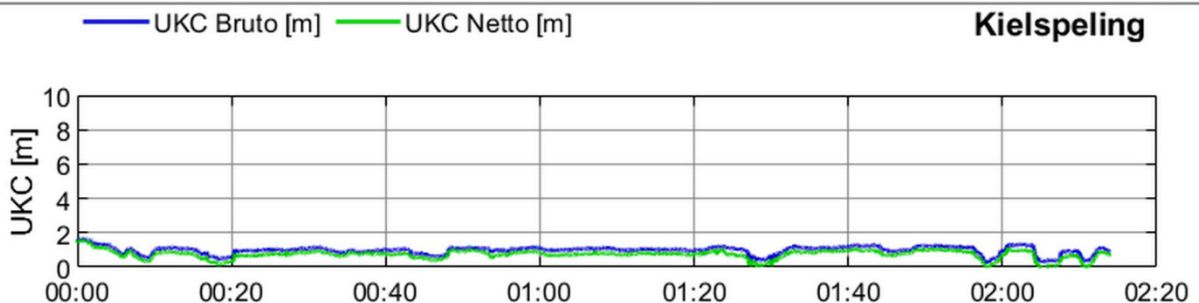
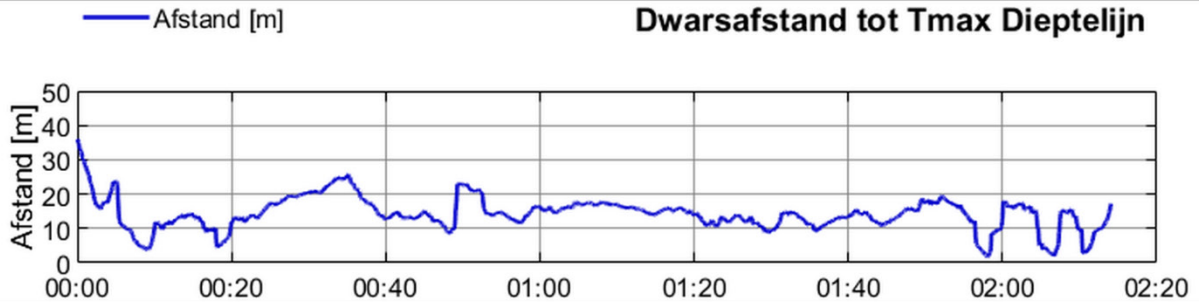
Scenario: KGT

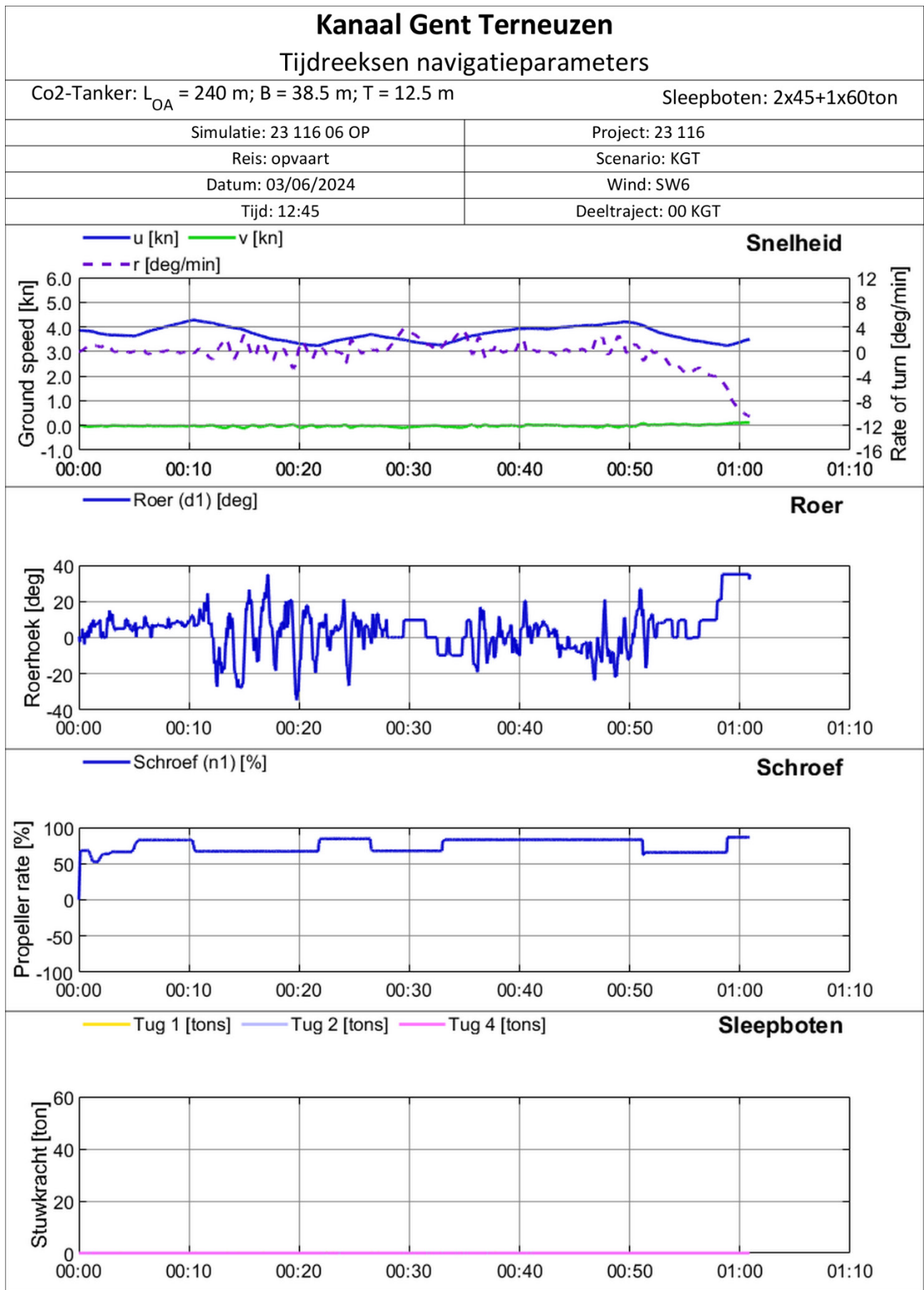
Datum: 03/06/2024

Wind: SW6

Tijd: 09:06

Deeltraject: 00 KGT





Kanaal Gent Terneuzen

Tijdreeksen oever- en windeffecten

Co2-Tanker: $L_{OA} = 240$ m; $B = 38.5$ m; $T = 12.5$ m

Sleepboten: 2x45+1x60ton

Simulatie: 23 116 06 OP

Project: 23 116

Reis: opvaart

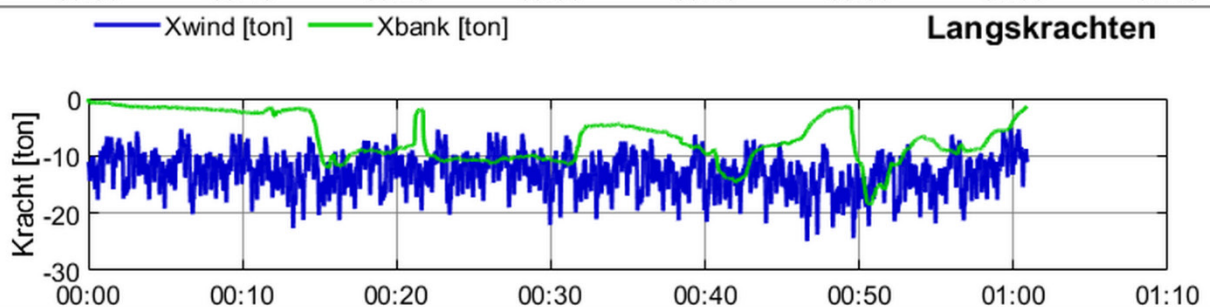
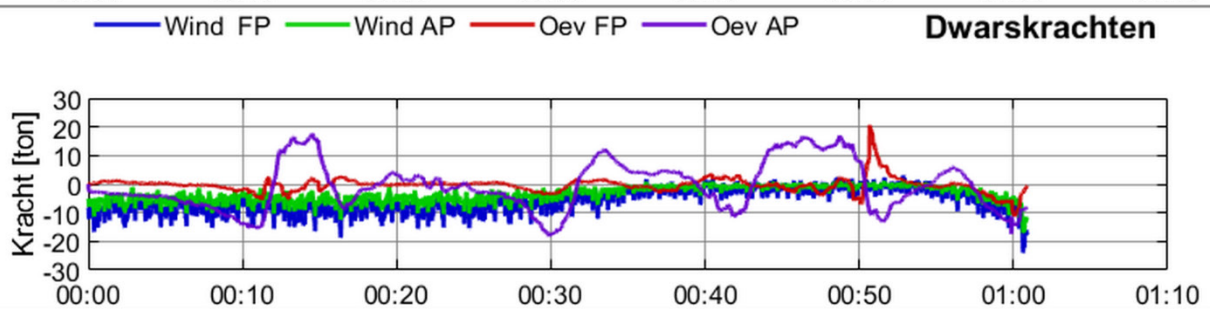
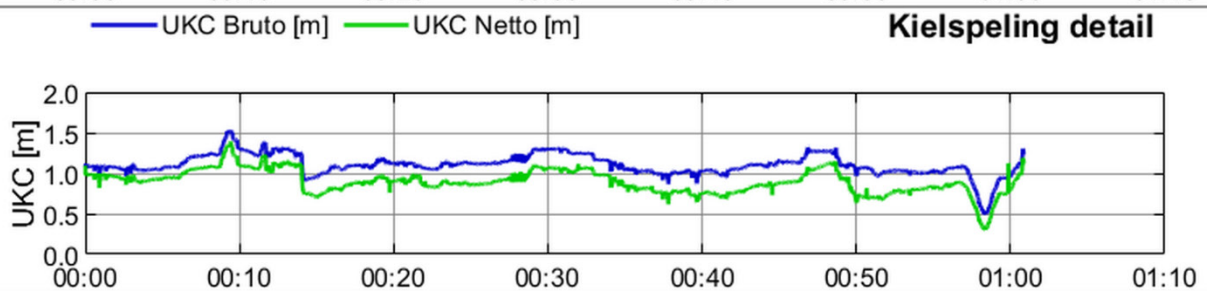
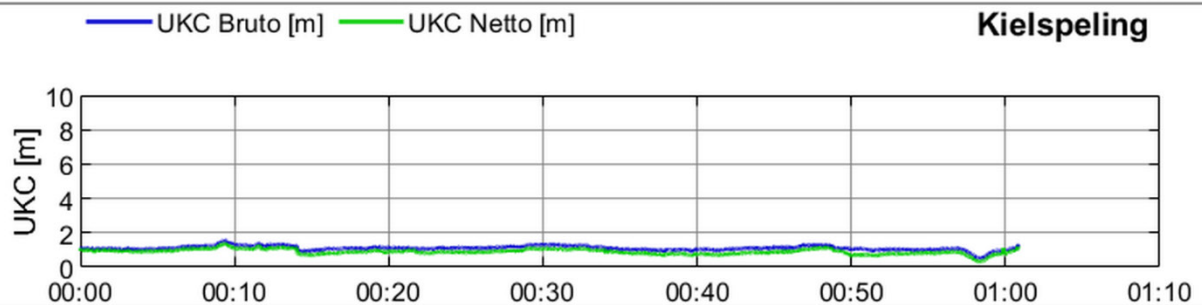
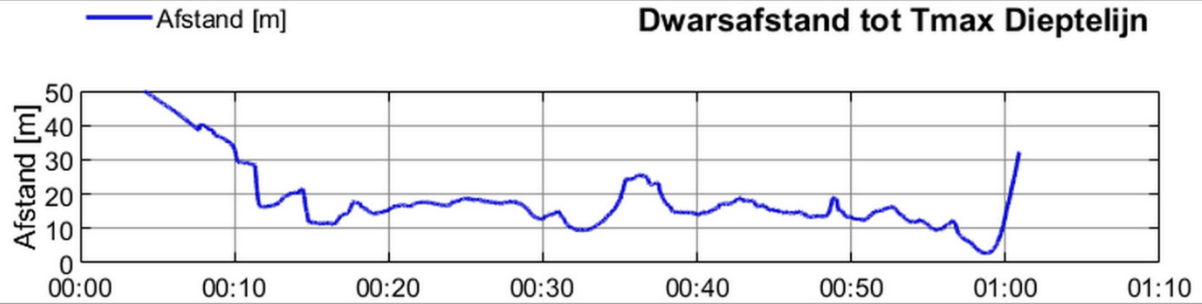
Scenario: KGT

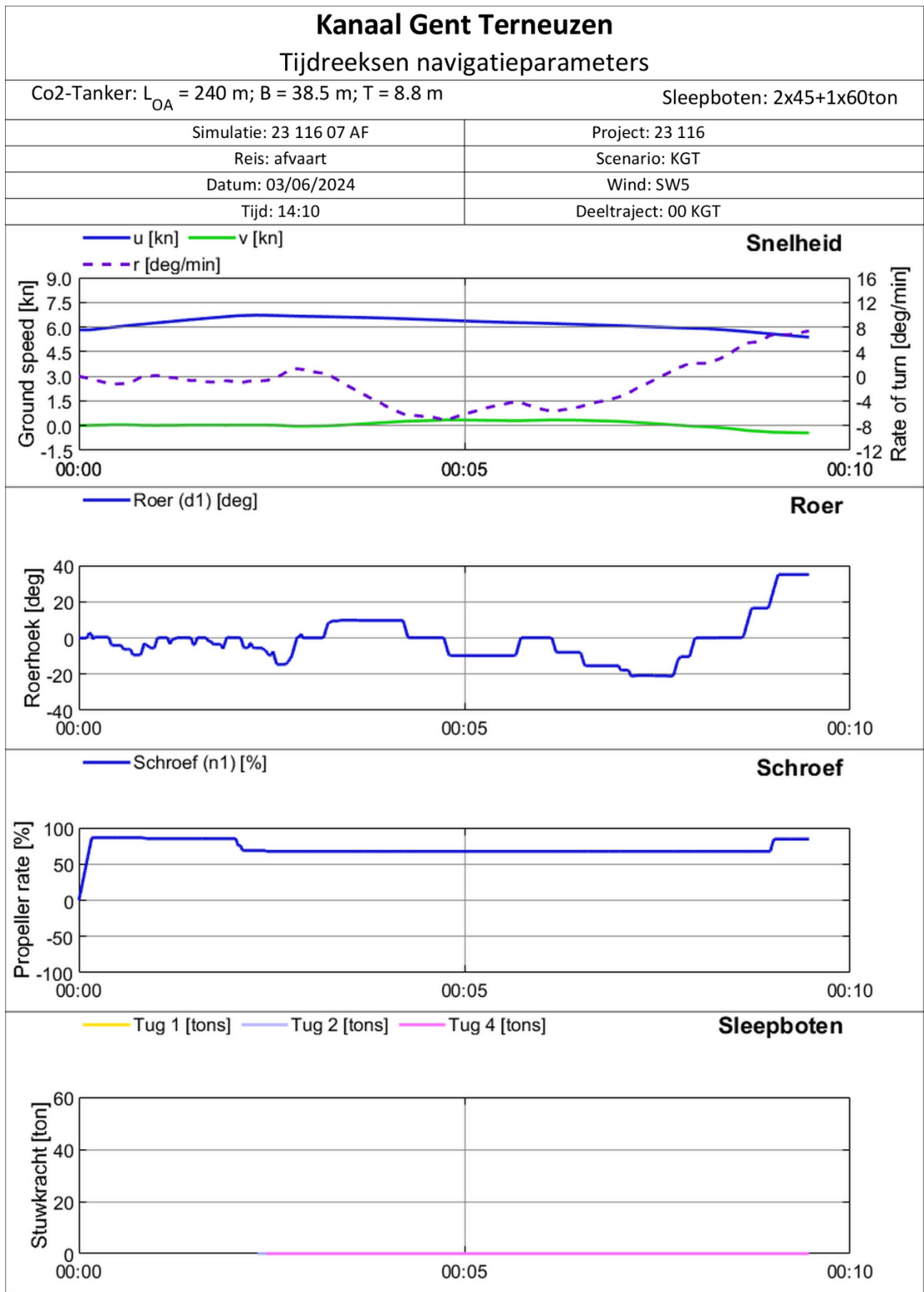
Datum: 03/06/2024

Wind: SW6

Tijd: 12:45

Deeltraject: 00 KGT





Kanaal Gent Terneuzen

Tijdreeksen oever- en windeffecten

Co2-Tanker: $L_{OA} = 240$ m; $B = 38.5$ m; $T = 8.8$ m

Sleepboten: 2x45+1x60ton

Simulatie: 23 116 07 AF

Project: 23 116

Reis: afvaart

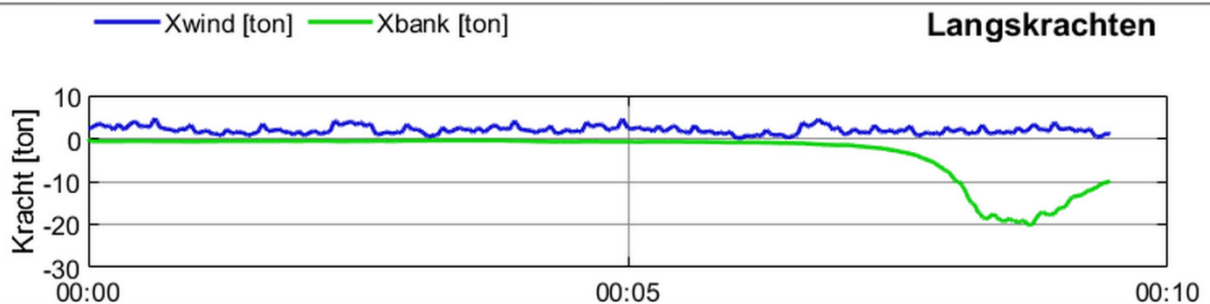
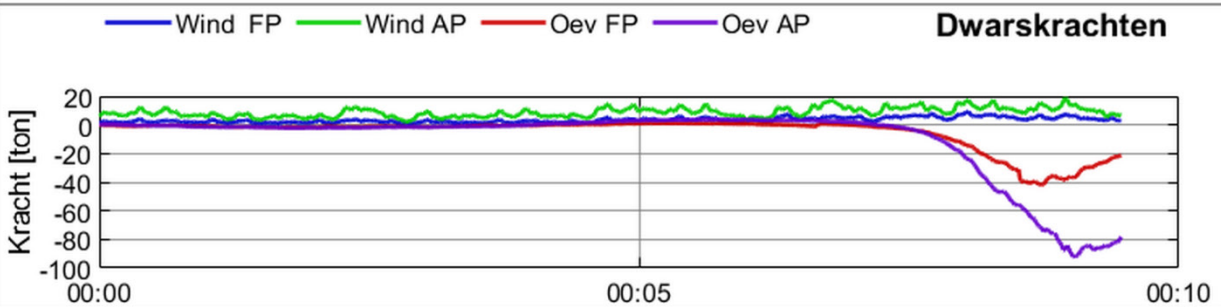
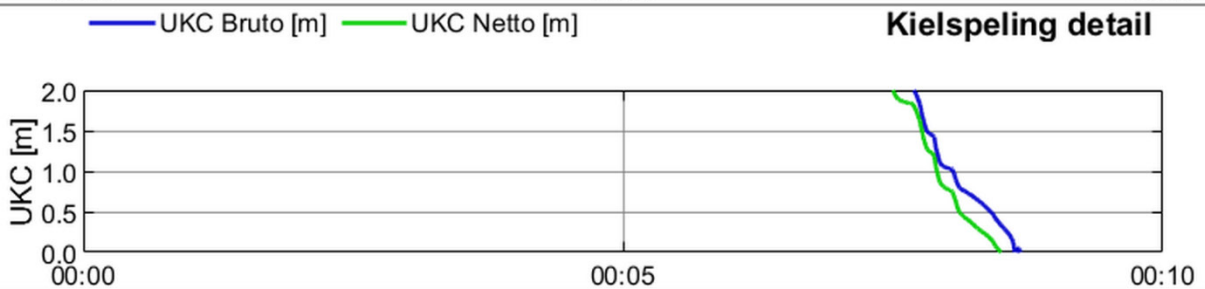
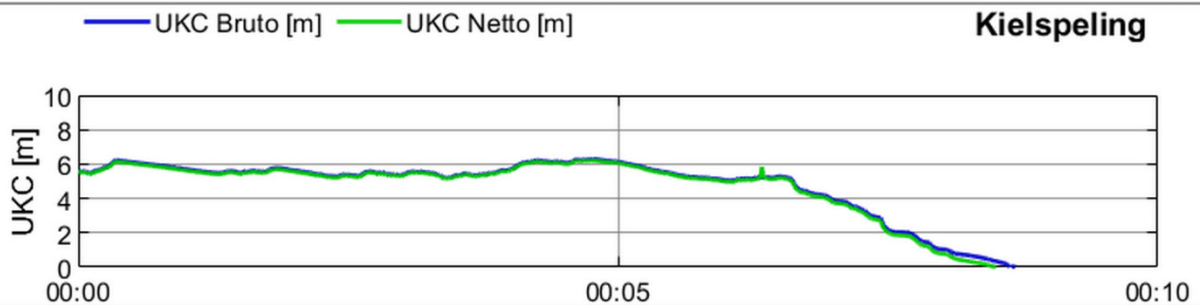
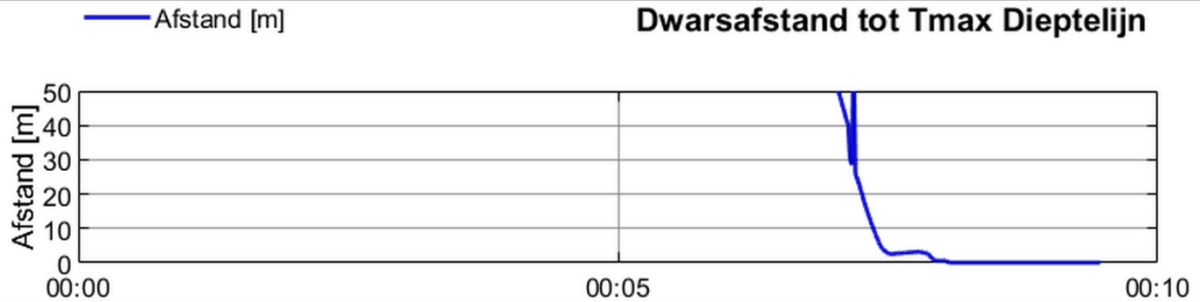
Scenario: KGT

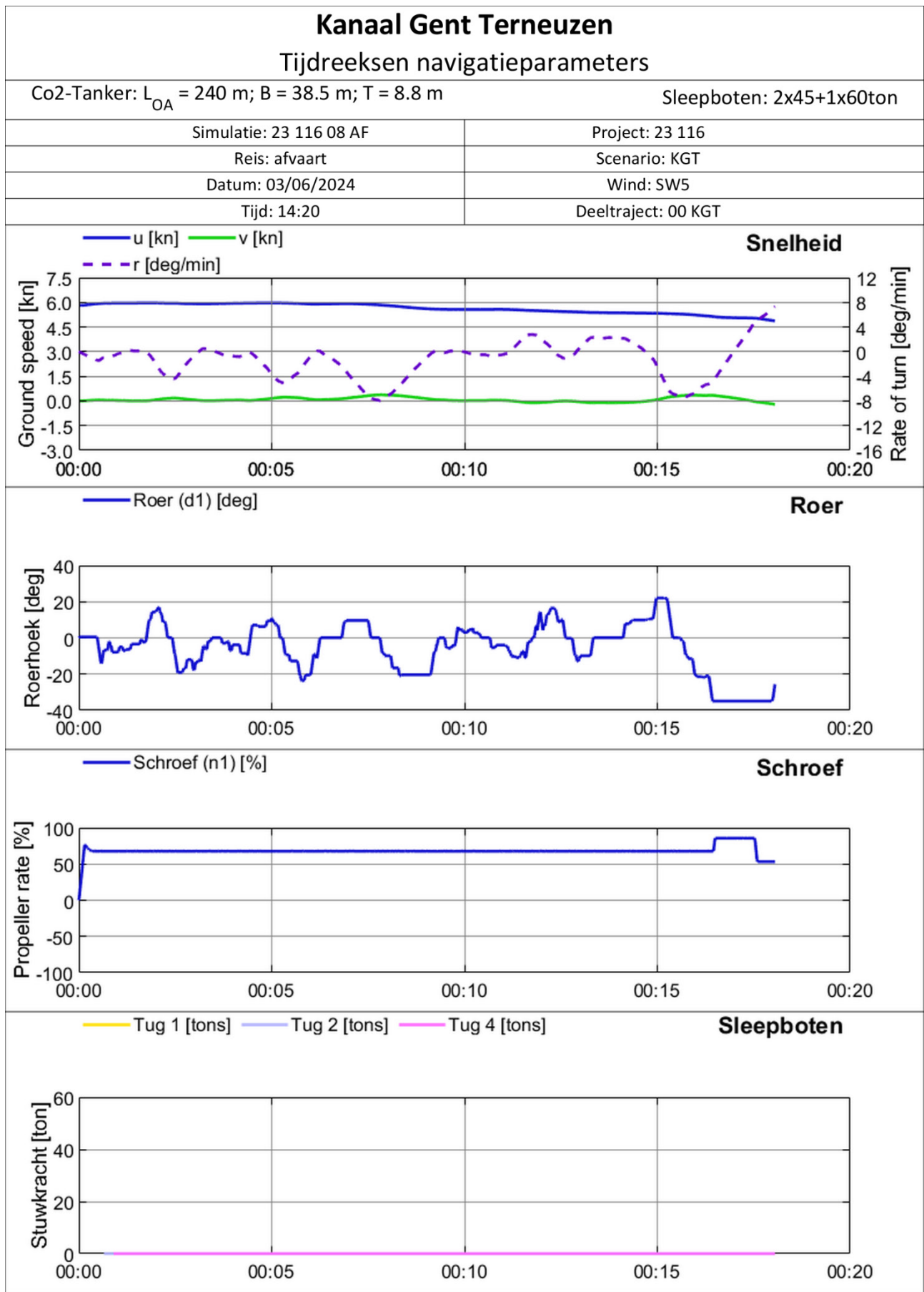
Datum: 03/06/2024

Wind: SW5

Tijd: 14:10

Deeltraject: 00 KGT





Kanaal Gent Terneuzen

Tijdreeksen oever- en windeffecten

Co2-Tanker: $L_{OA} = 240$ m; $B = 38.5$ m; $T = 8.8$ m

Sleepboten: 2x45+1x60ton

Simulatie: 23 116 08 AF

Project: 23 116

Reis: afvaart

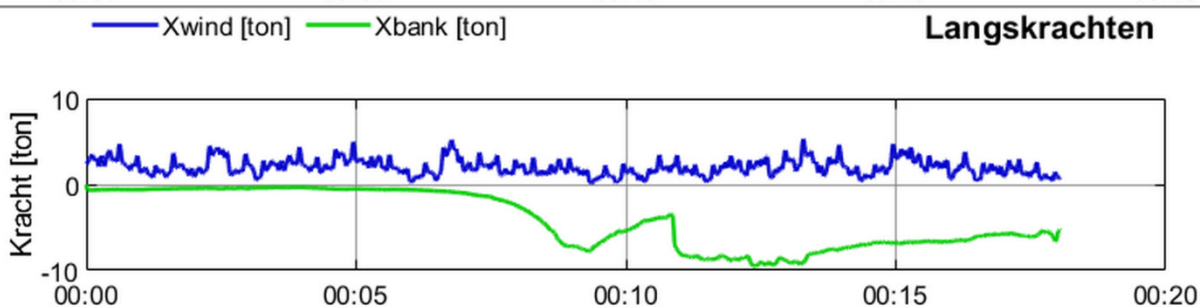
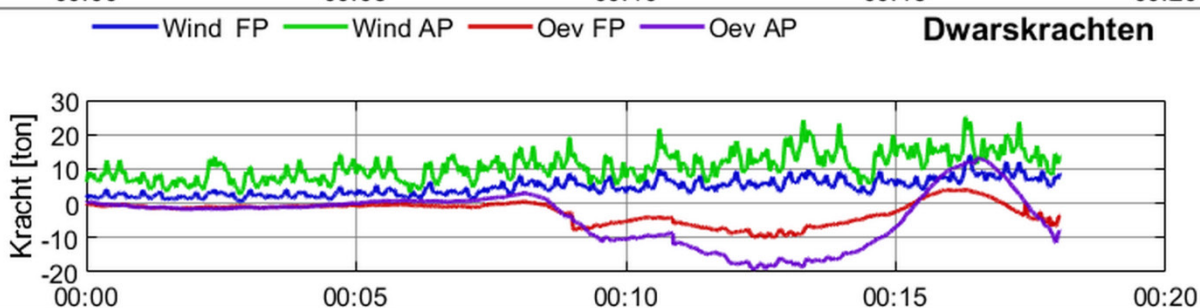
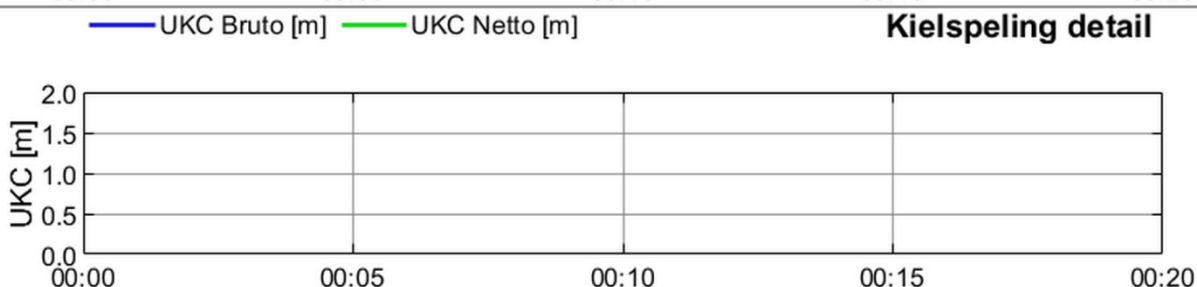
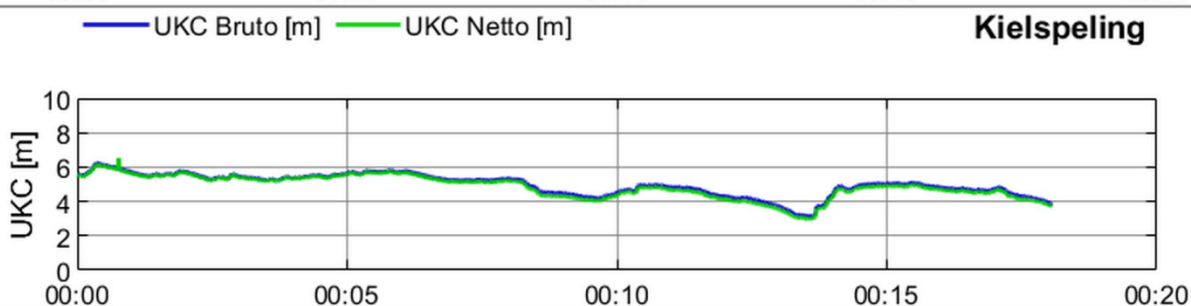
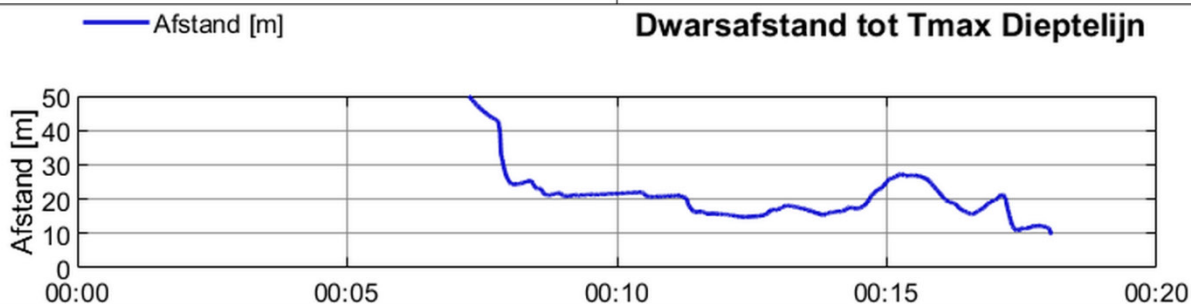
Scenario: KGT

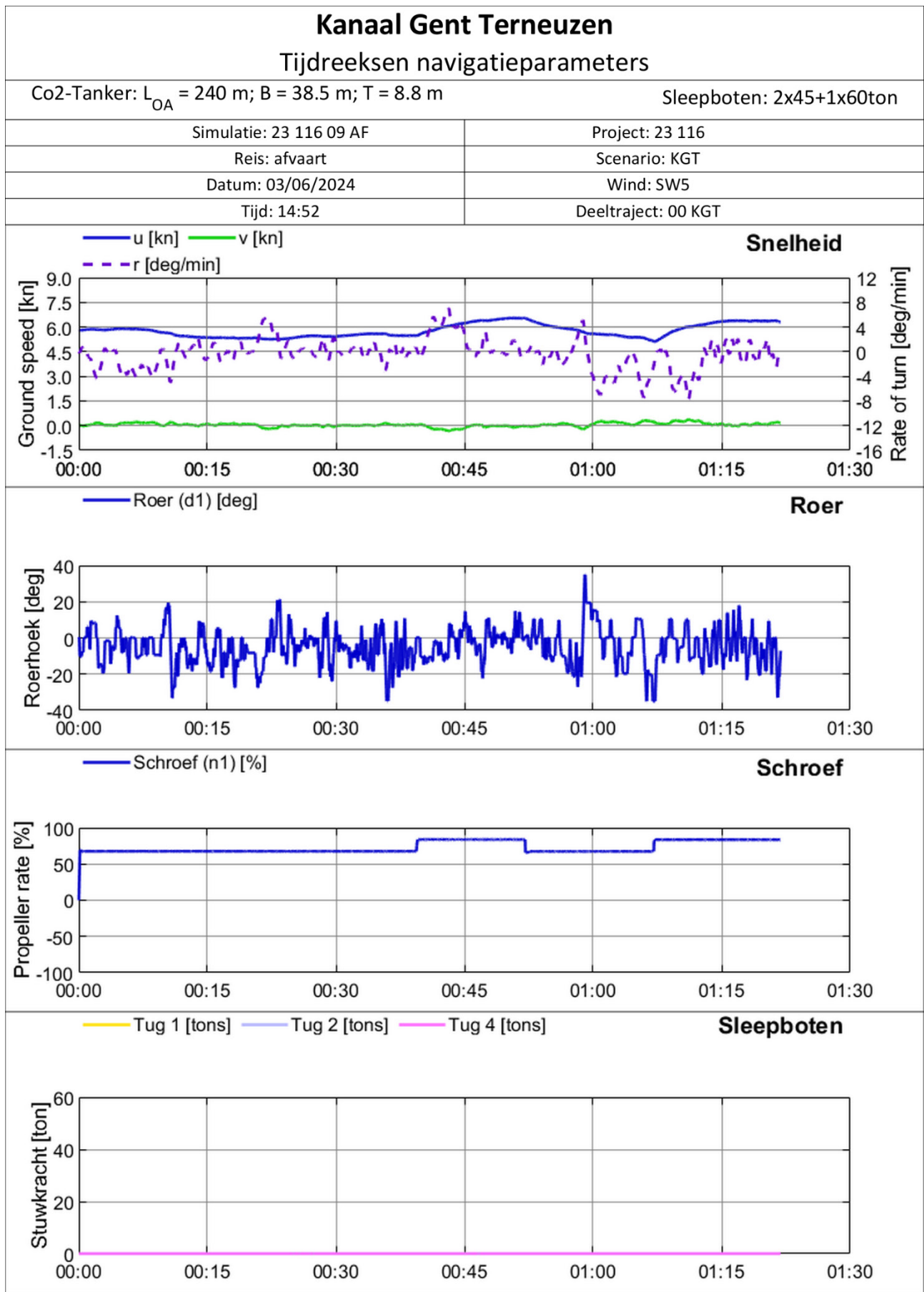
Datum: 03/06/2024

Wind: SW5

Tijd: 14:20

Deeltraject: 00 KGT





Kanaal Gent Terneuzen

Tijdreeksen oever- en windeffecten

Co2-Tanker: $L_{OA} = 240$ m; $B = 38.5$ m; $T = 8.8$ m

Sleepboten: 2x45+1x60ton

Simulatie: 23 116 09 AF

Project: 23 116

Reis: afvaart

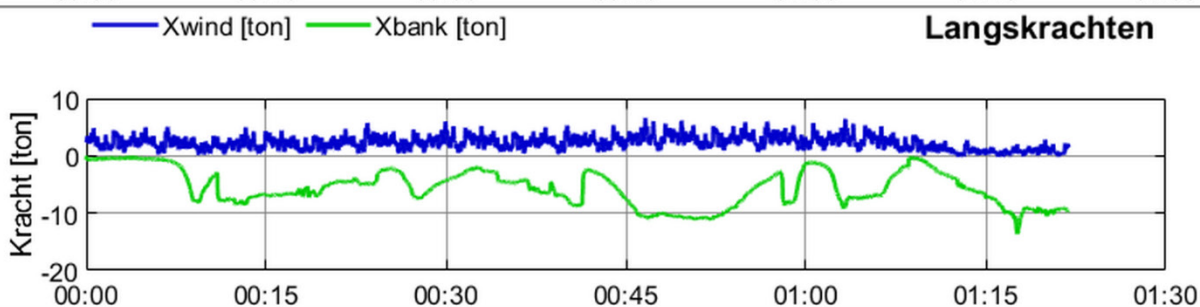
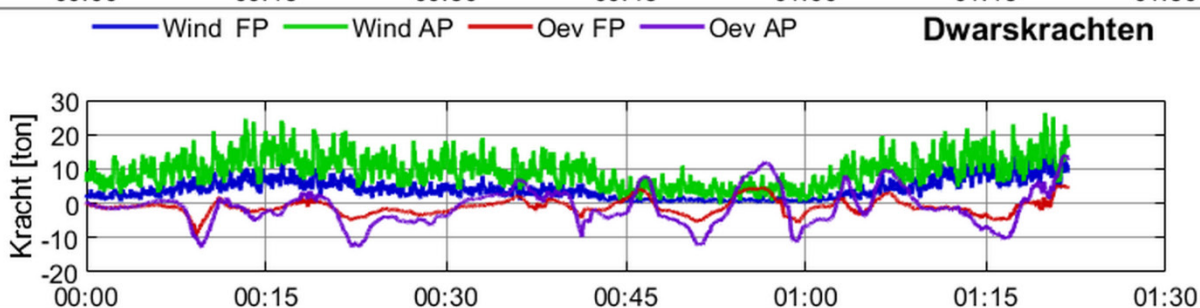
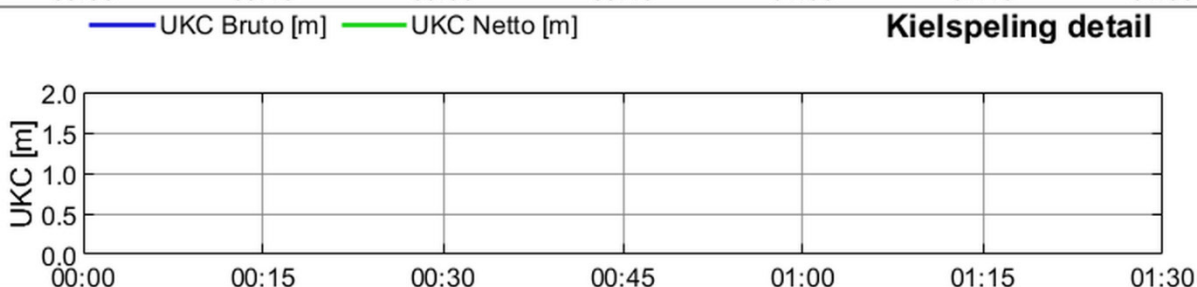
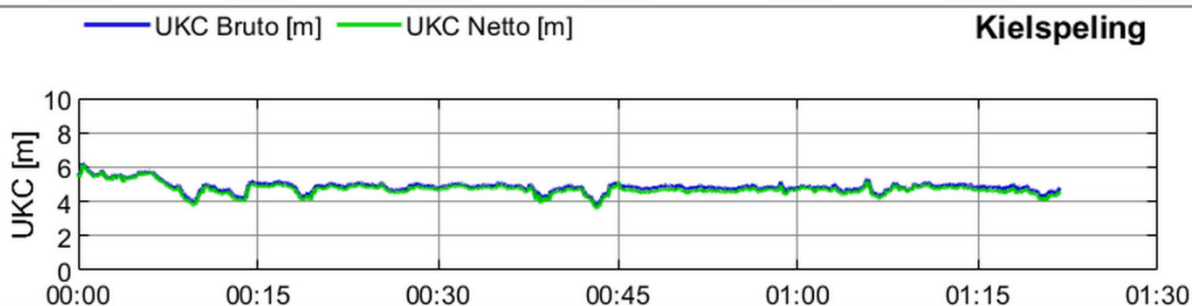
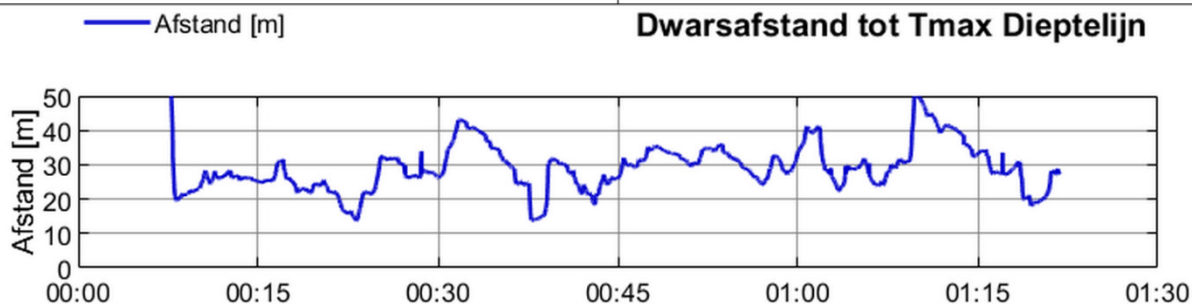
Scenario: KGT

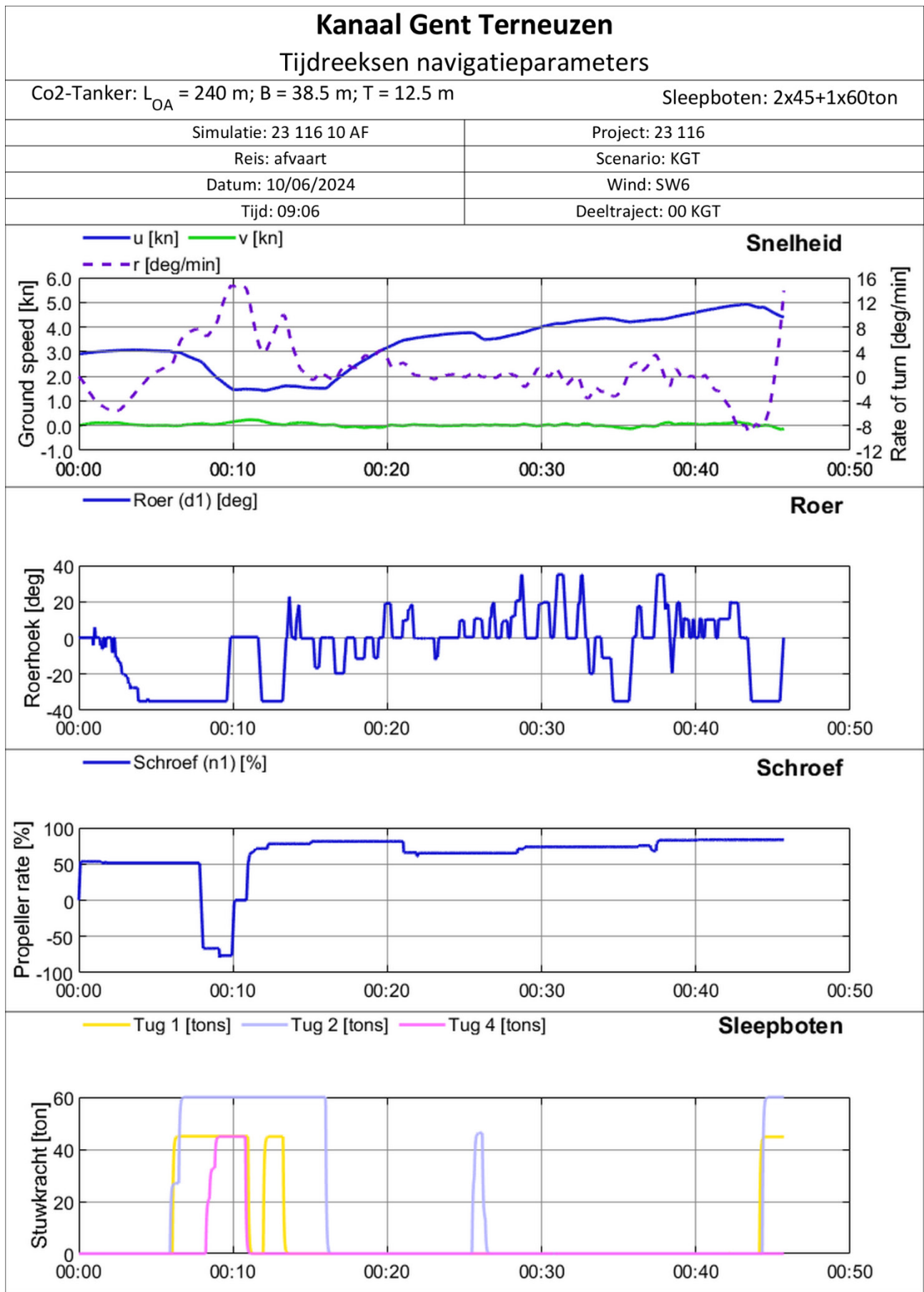
Datum: 03/06/2024

Wind: SW5

Tijd: 14:52

Deeltraject: 00 KGT





Kanaal Gent Terneuzen

Tijdreeksen oever- en windeffecten

Co2-Tanker: $L_{OA} = 240$ m; $B = 38.5$ m; $T = 12.5$ m

Sleepboten: 2x45+1x60ton

Simulatie: 23 116 10 AF

Project: 23 116

Reis: afvaart

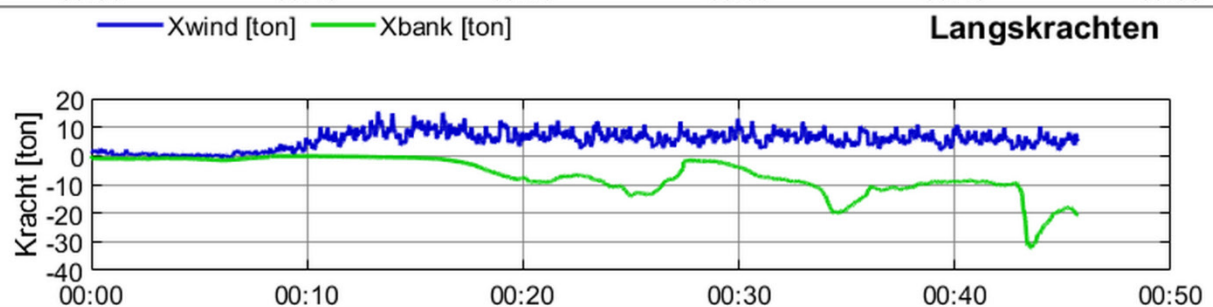
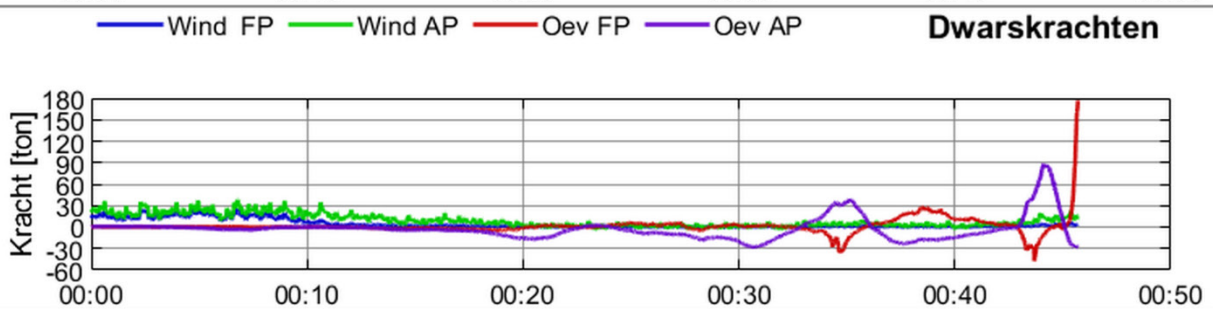
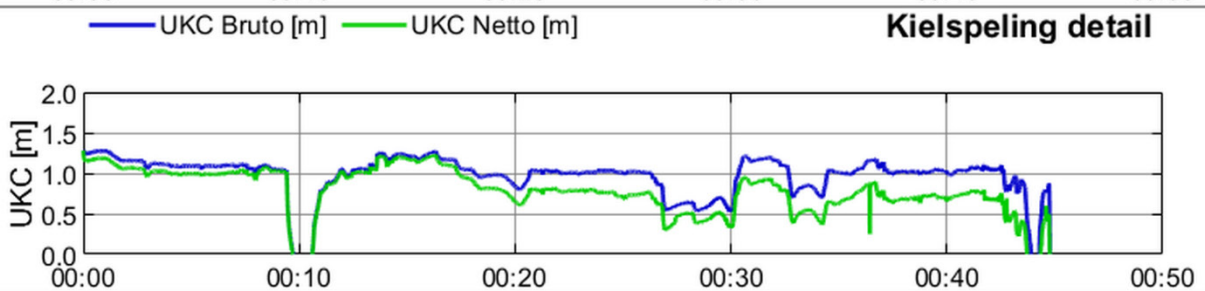
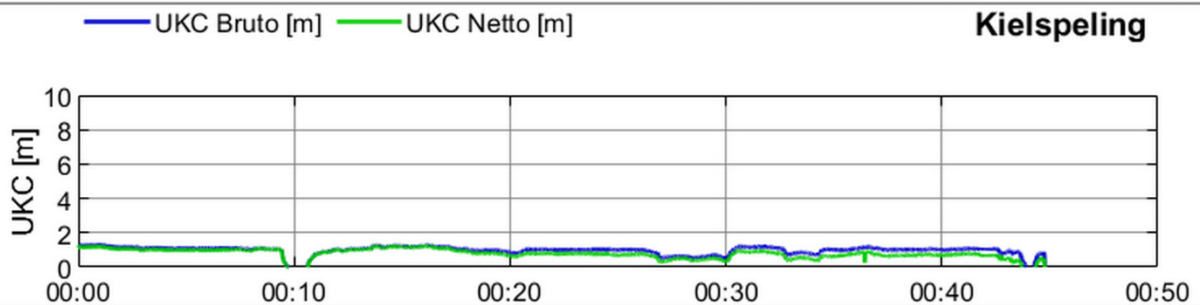
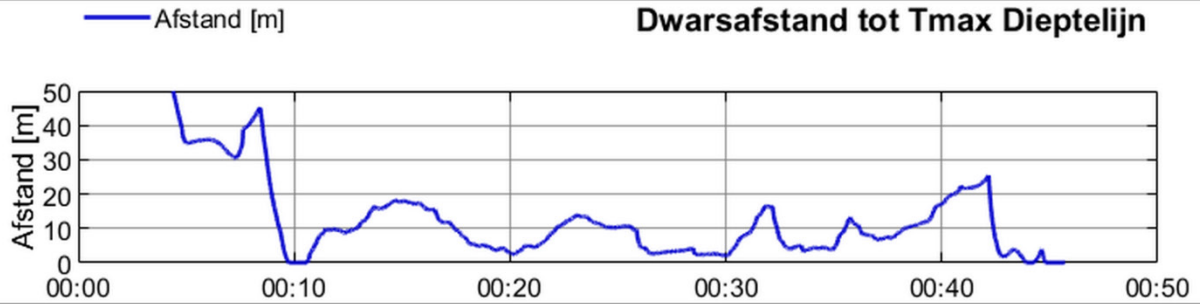
Scenario: KGT

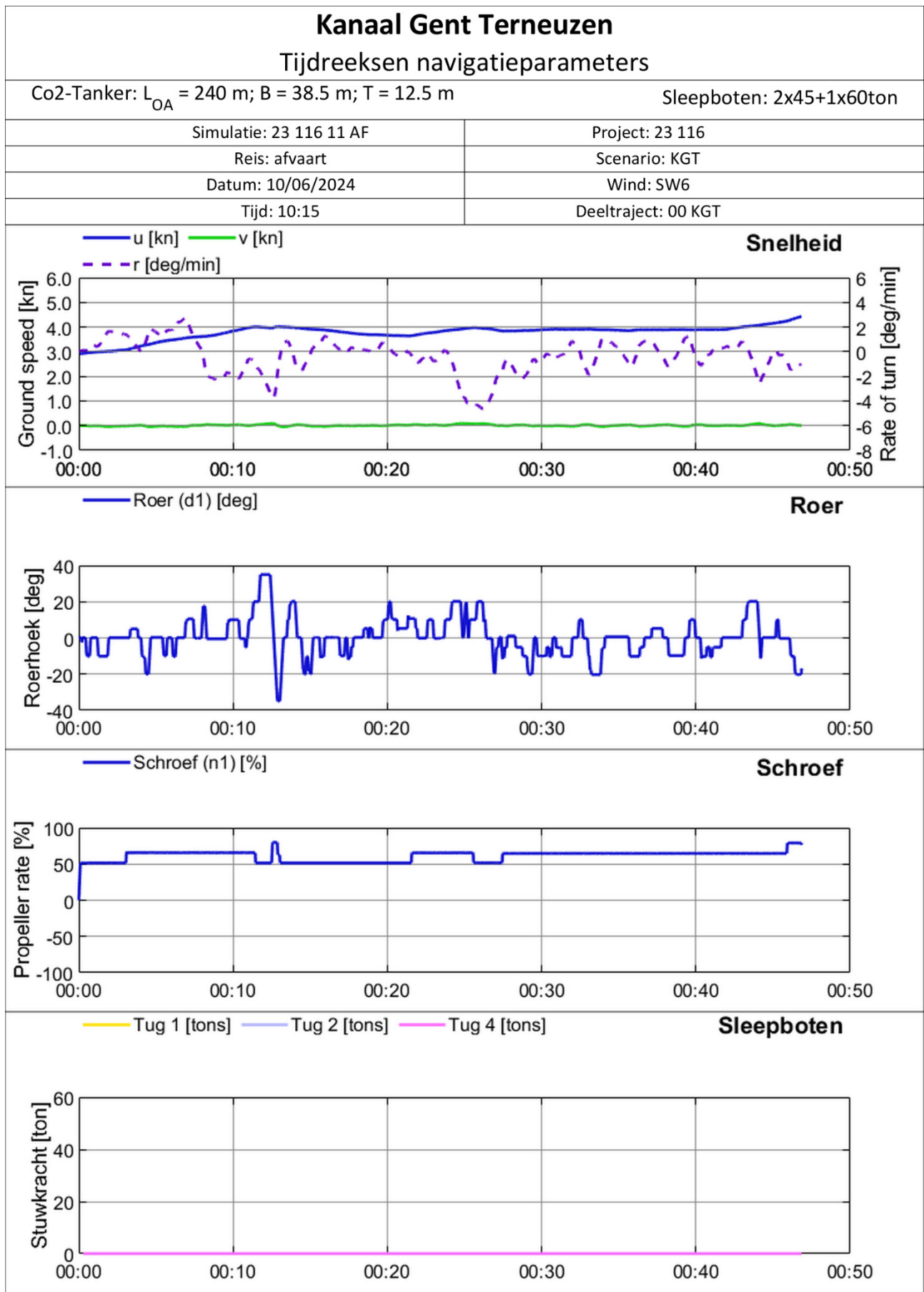
Datum: 10/06/2024

Wind: SW6

Tijd: 09:06

Deeltraject: 00 KGT





Kanaal Gent Terneuzen

Tijdreeksen oever- en windeffecten

Co2-Tanker: $L_{OA} = 240$ m; $B = 38.5$ m; $T = 12.5$ m

Sleepboten: 2x45+1x60ton

Simulatie: 23 116 11 AF

Project: 23 116

Reis: afvaart

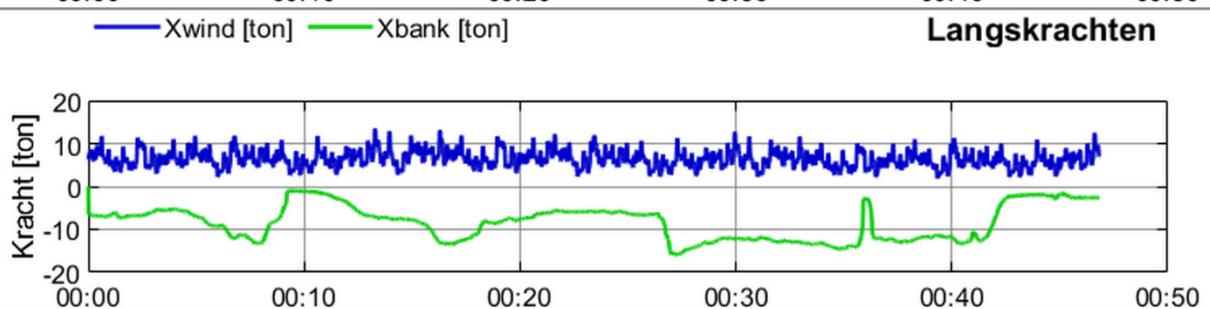
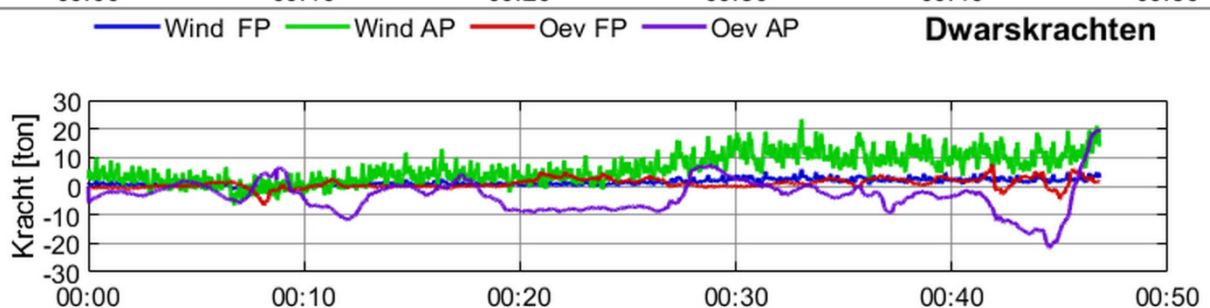
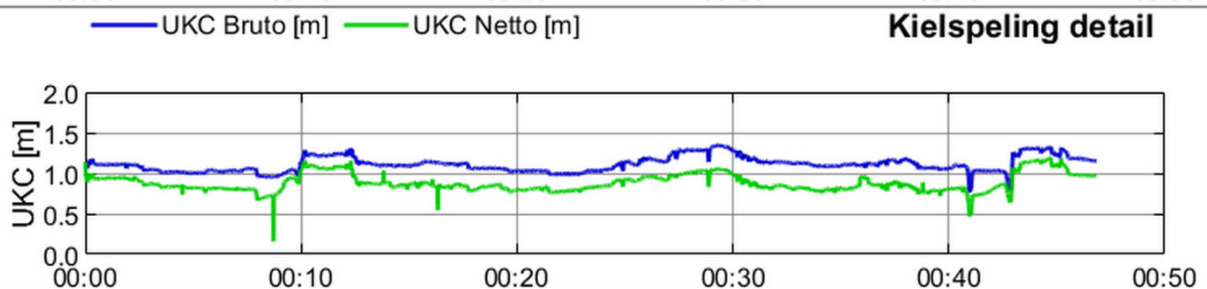
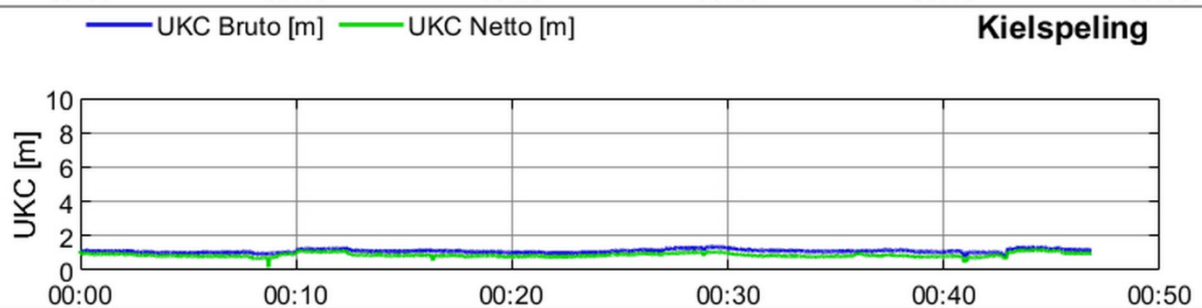
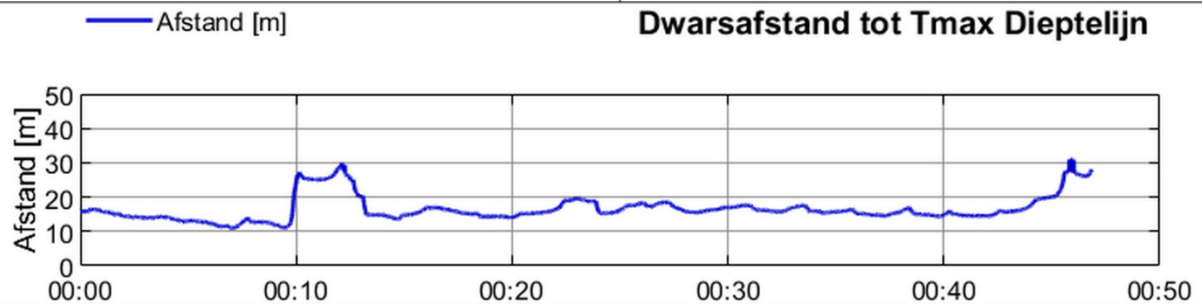
Scenario: KGT

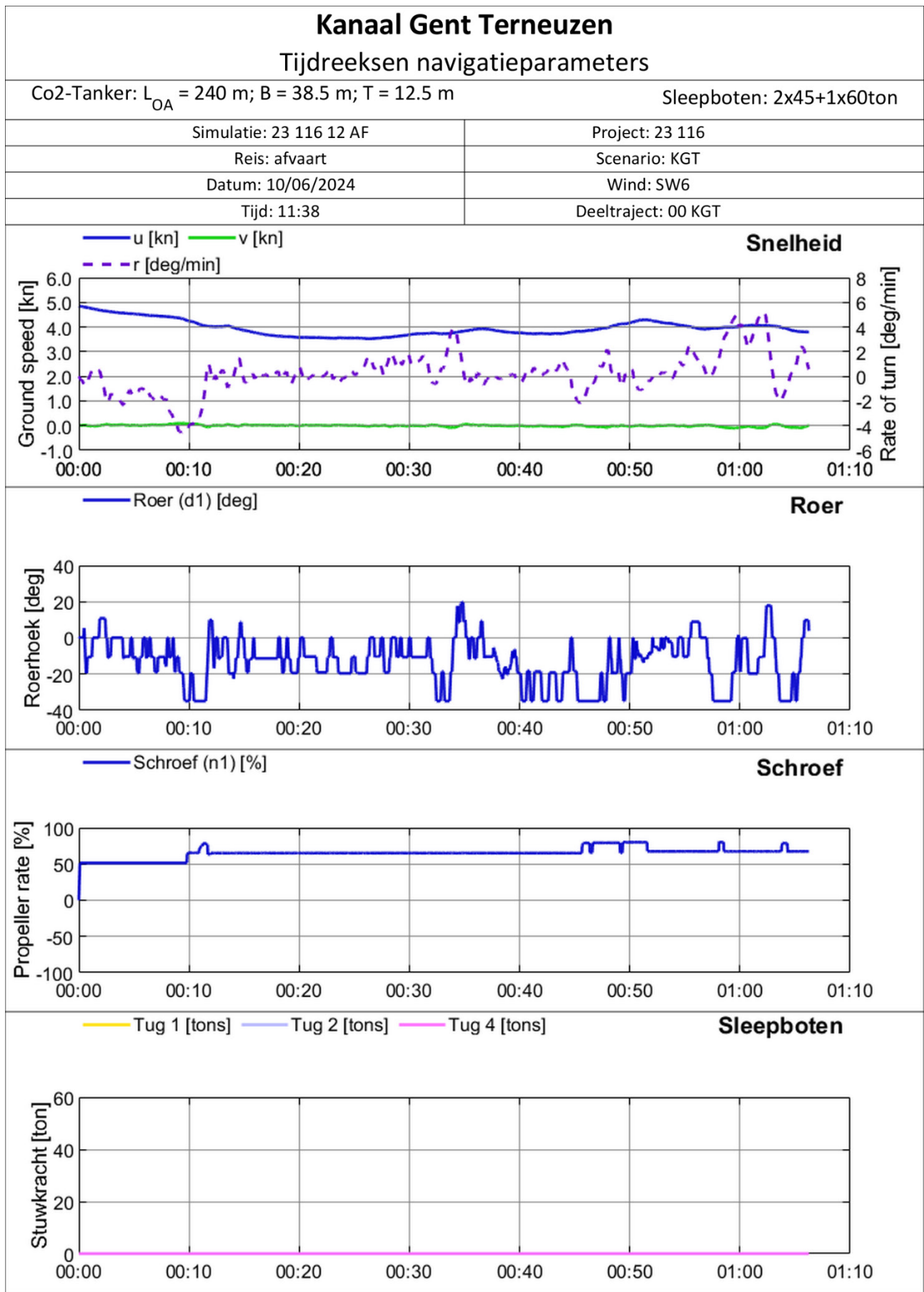
Datum: 10/06/2024

Wind: SW6

Tijd: 10:15

Deeltraject: 00 KGT





Kanaal Gent Terneuzen

Tijdreeksen oever- en windeffecten

Co2-Tanker: $L_{OA} = 240$ m; $B = 38.5$ m; $T = 12.5$ m

Sleepboten: 2x45+1x60ton

Simulatie: 23 116 12 AF

Project: 23 116

Reis: afvaart

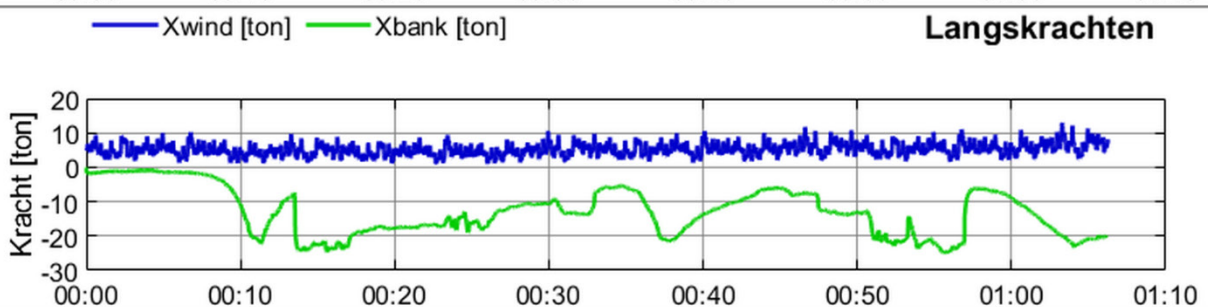
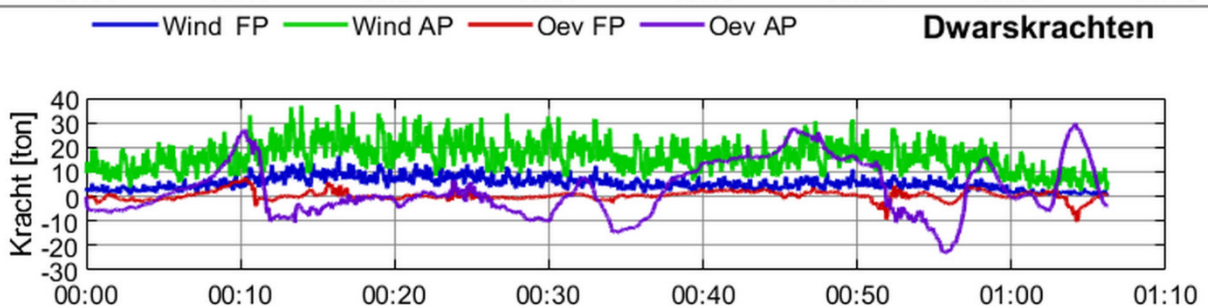
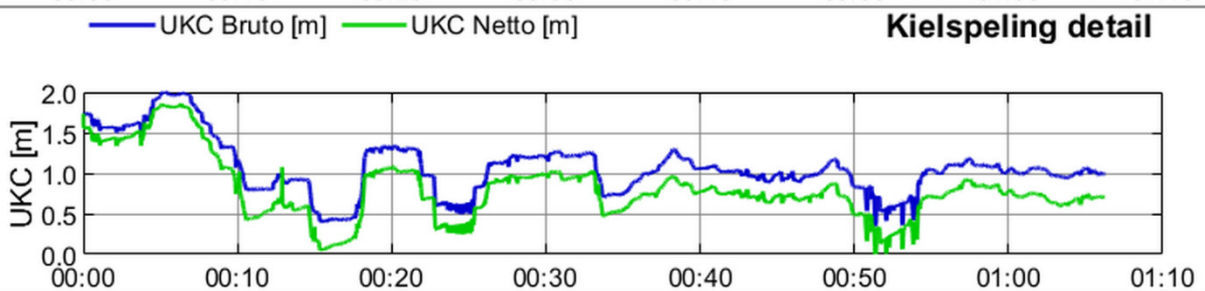
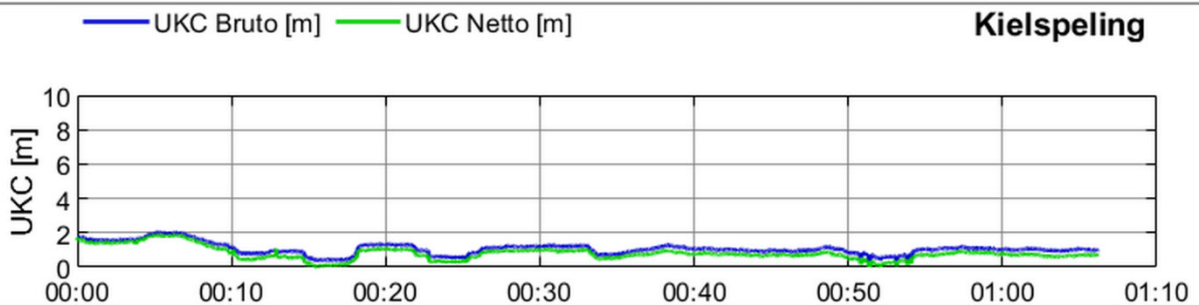
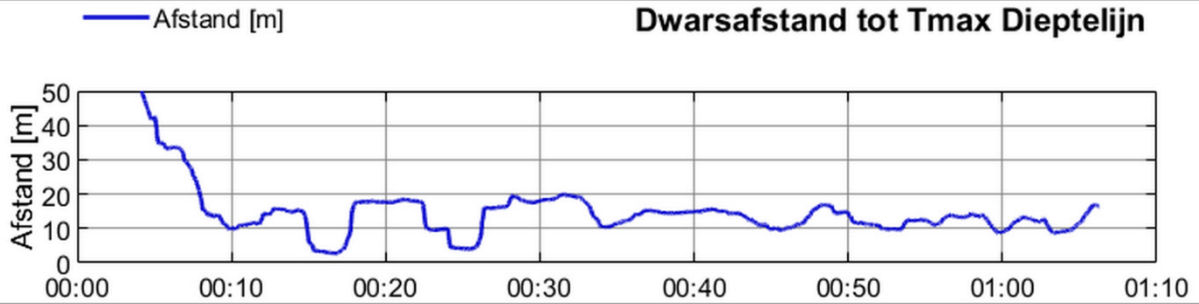
Scenario: KGT

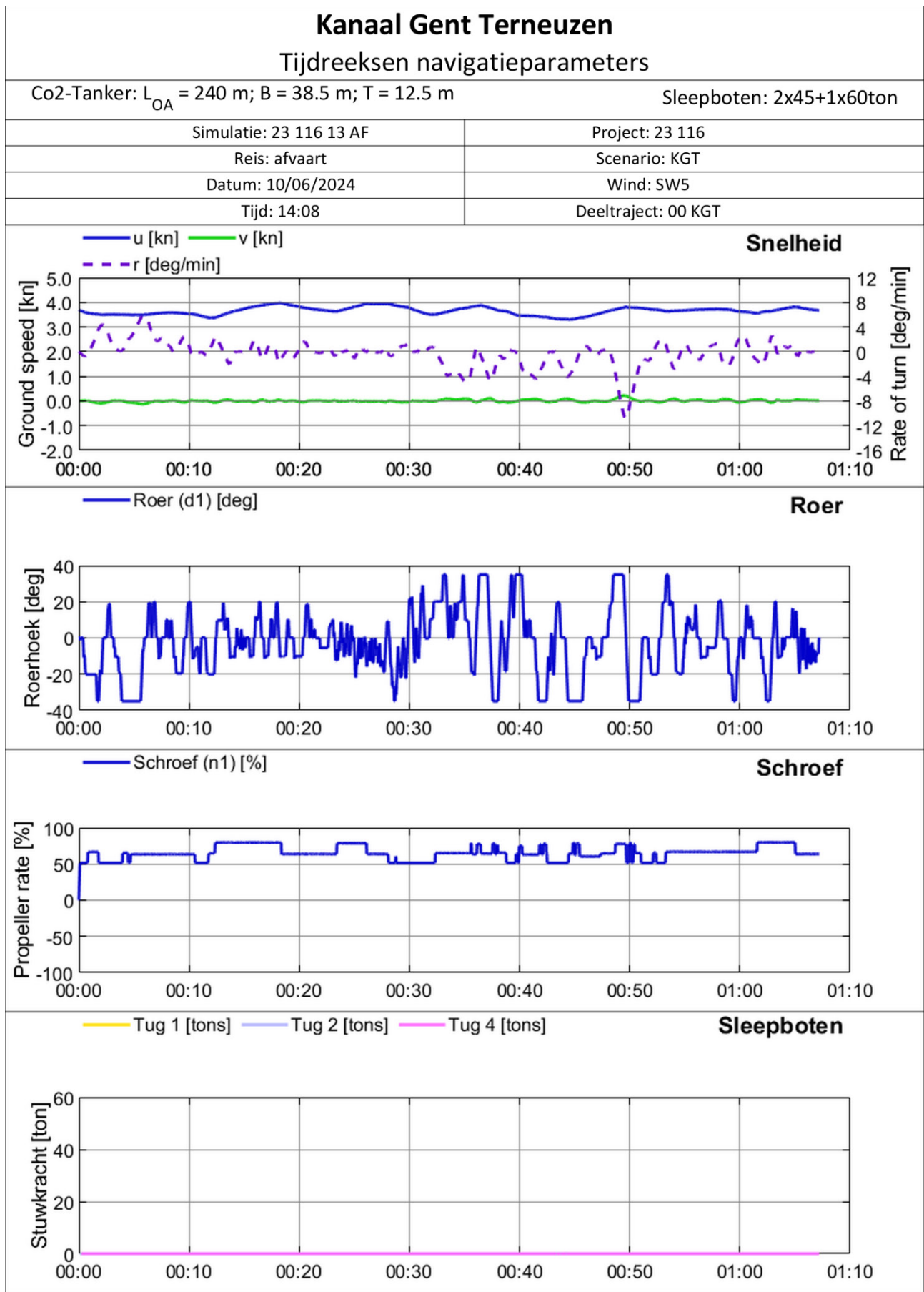
Datum: 10/06/2024

Wind: SW6

Tijd: 11:38

Deeltraject: 00 KGT





Kanaal Gent Terneuzen

Tijdreeksen oever- en windeffecten

Co2-Tanker: $L_{OA} = 240$ m; $B = 38.5$ m; $T = 12.5$ m

Sleepboten: 2x45+1x60ton

Simulatie: 23 116 13 AF

Project: 23 116

Reis: afvaart

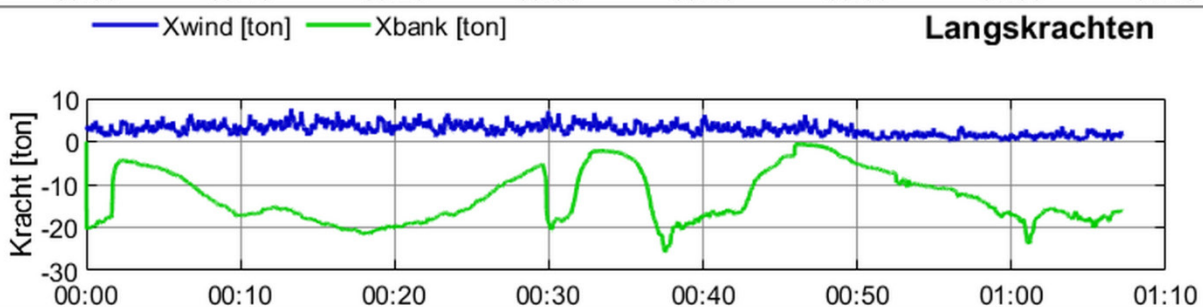
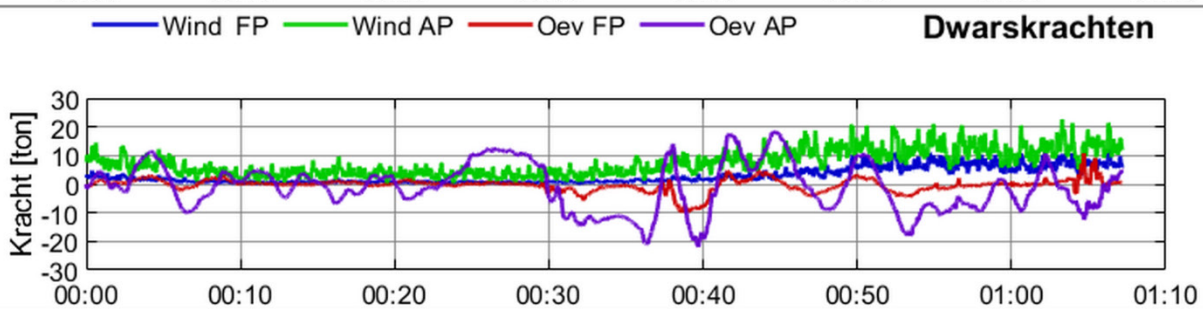
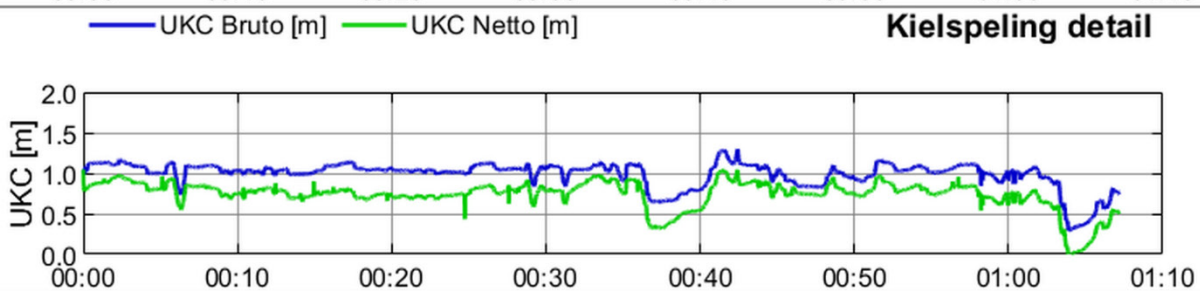
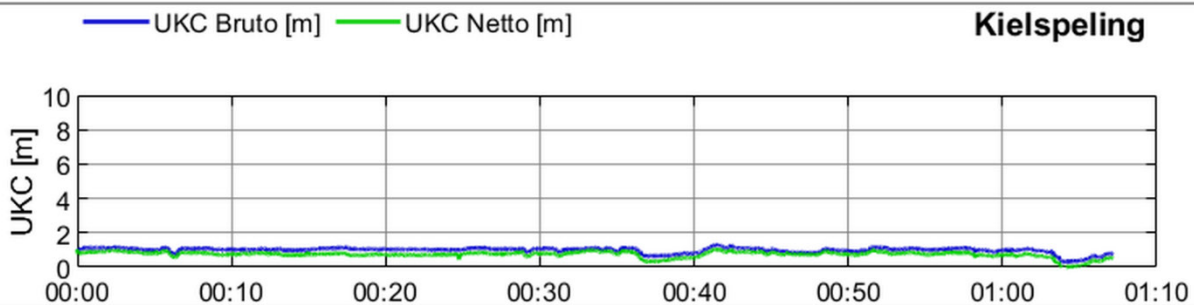
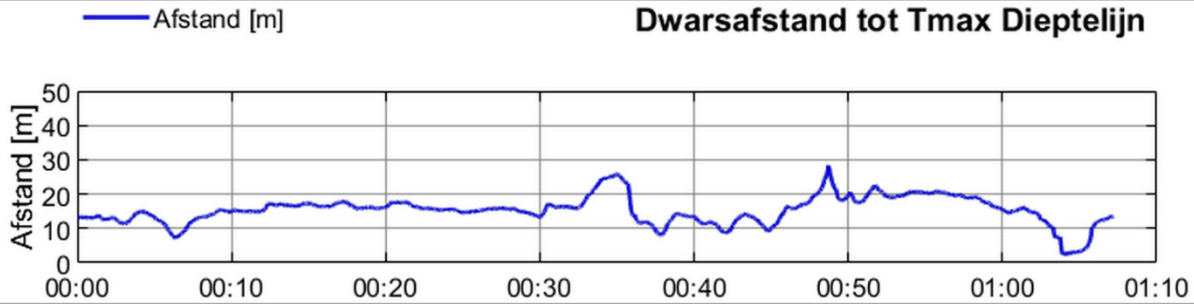
Scenario: KGT

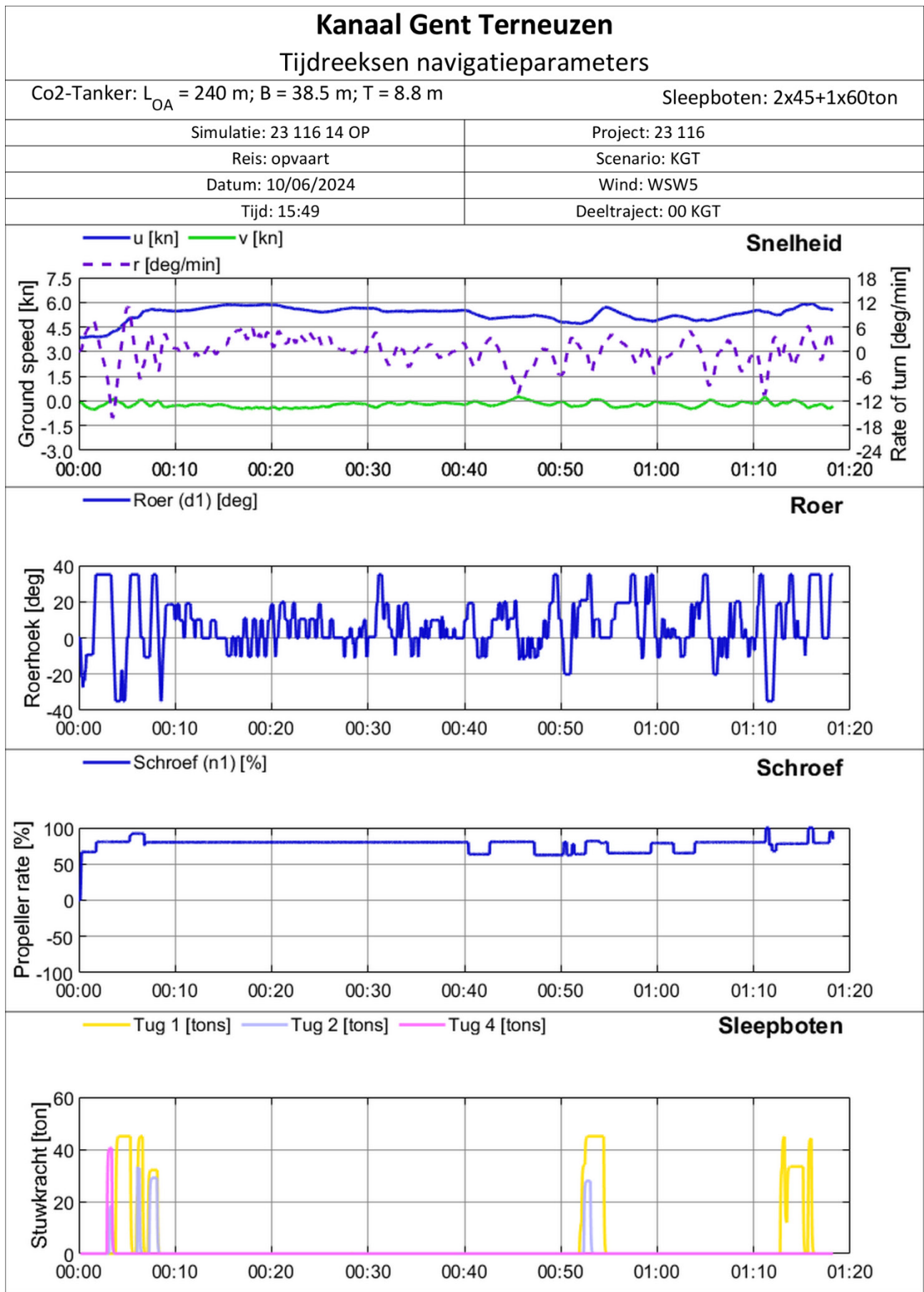
Datum: 10/06/2024

Wind: SW5

Tijd: 14:08

Deeltraject: 00 KGT





Kanaal Gent Terneuzen

Tijdreeksen oever- en windeffecten

Co2-Tanker: $L_{OA} = 240$ m; $B = 38.5$ m; $T = 8.8$ m

Sleepboten: 2x45+1x60ton

Simulatie: 23 116 14 OP

Project: 23 116

Reis: opvaart

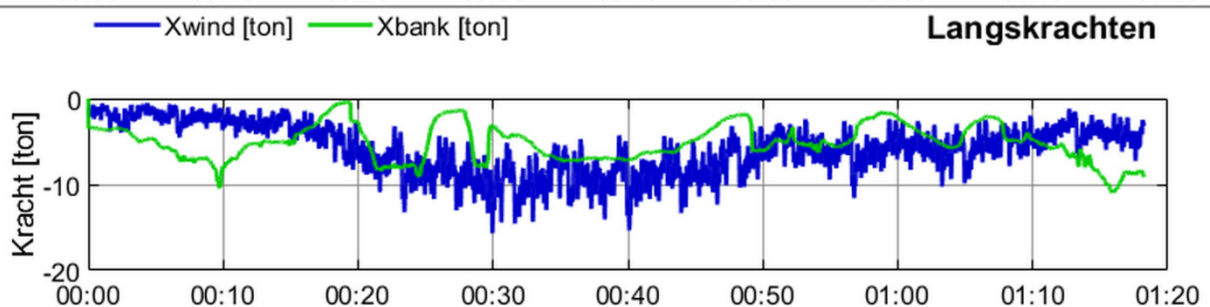
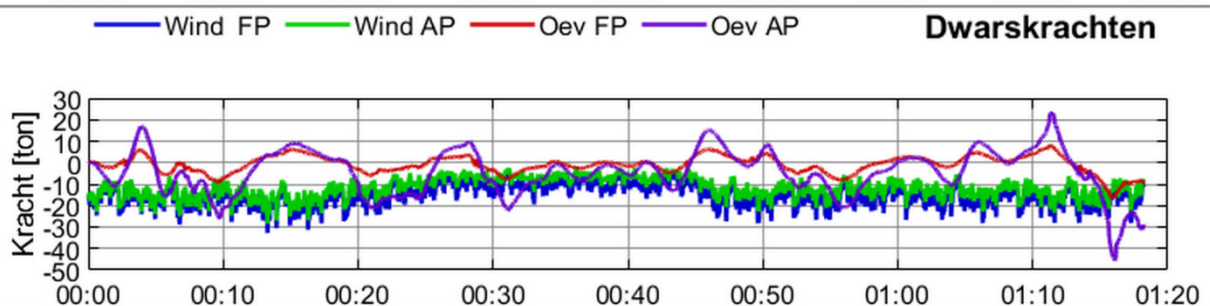
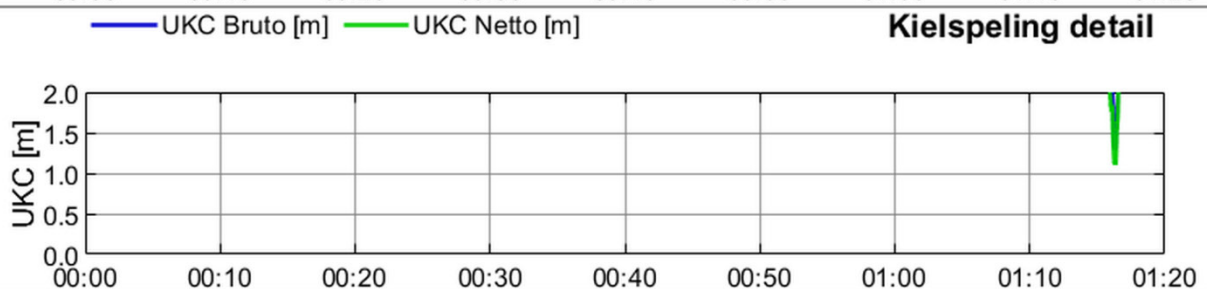
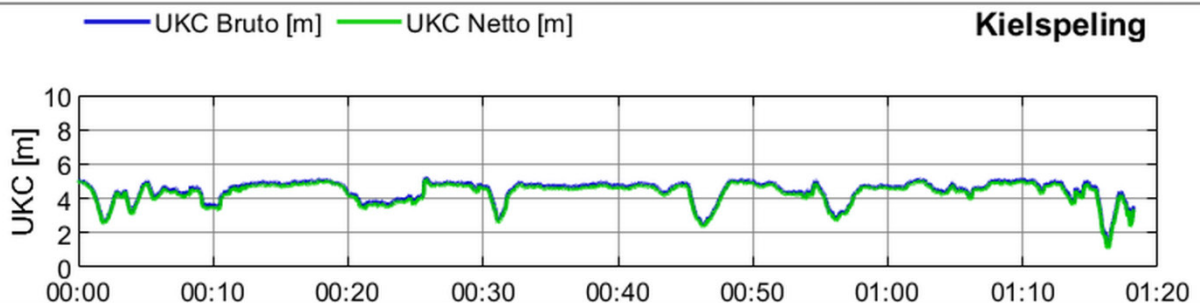
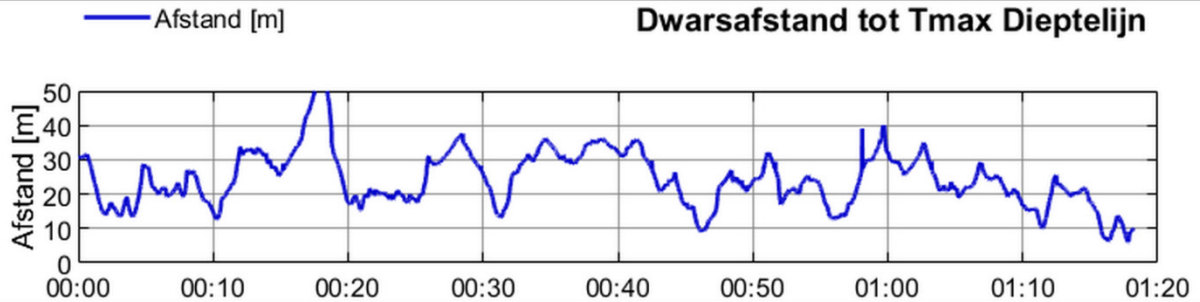
Scenario: KGT

Datum: 10/06/2024

Wind: WSW5

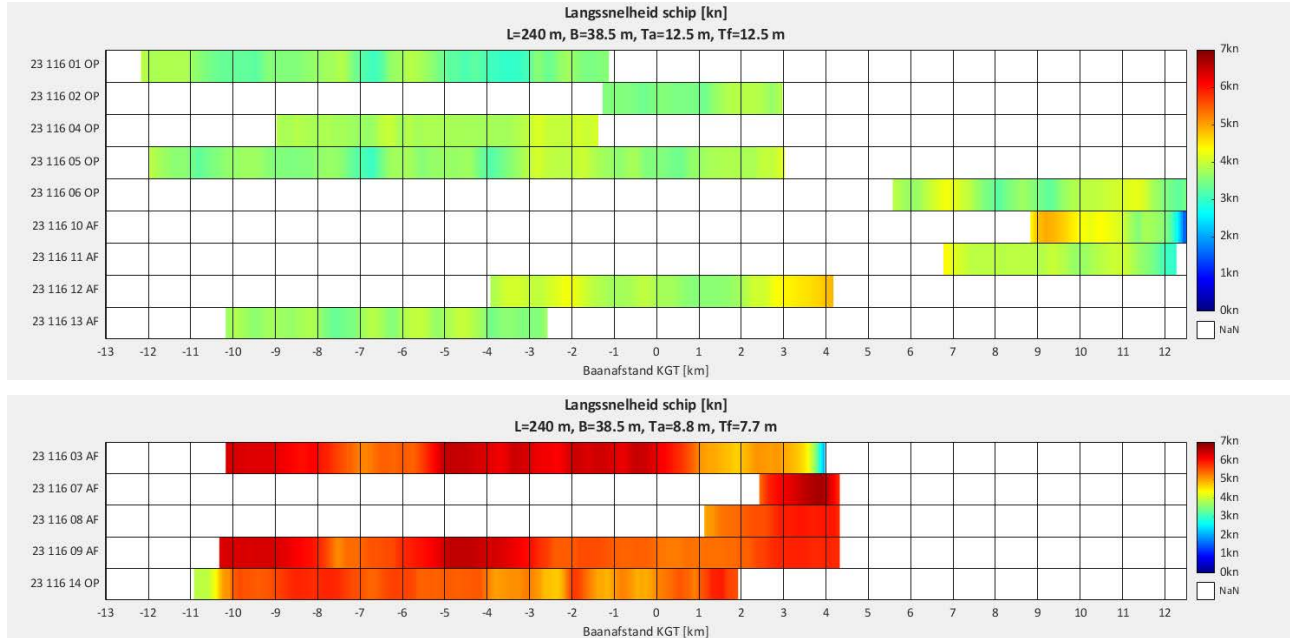
Tijd: 15:49

Deeltraject: 00 KGT

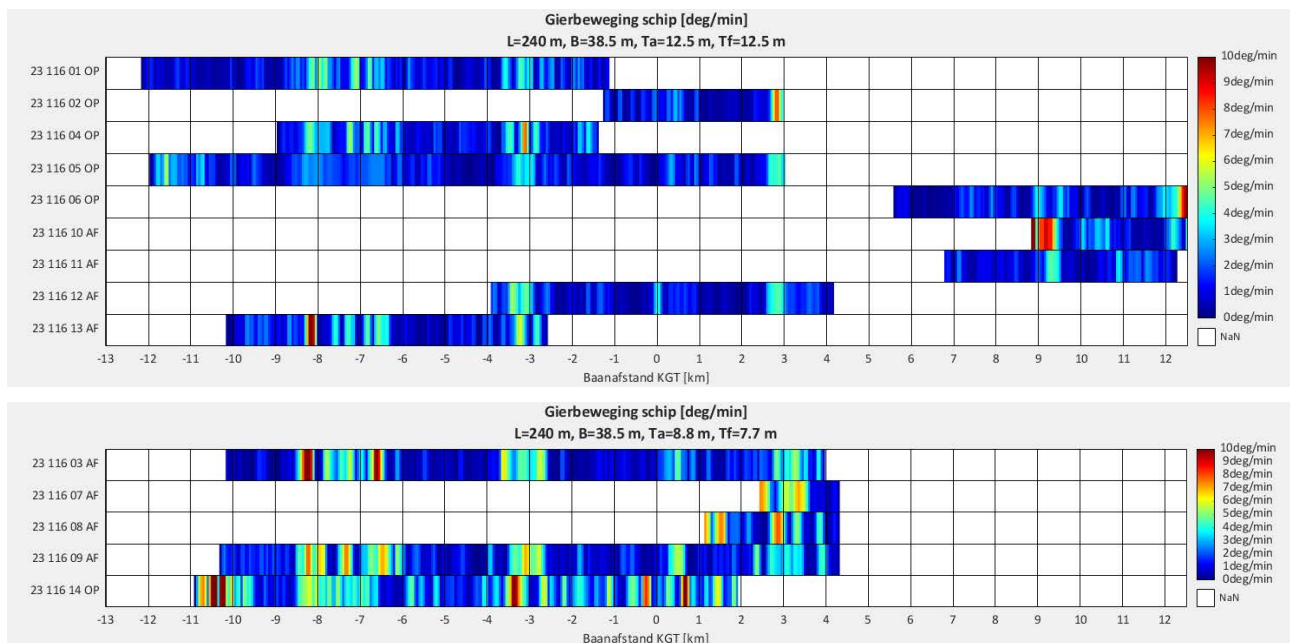


Bijlage 3 Hittekaarten parameters simulaties

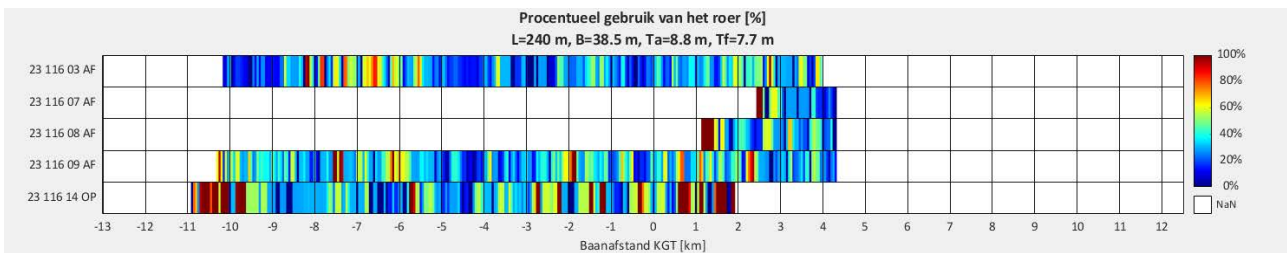
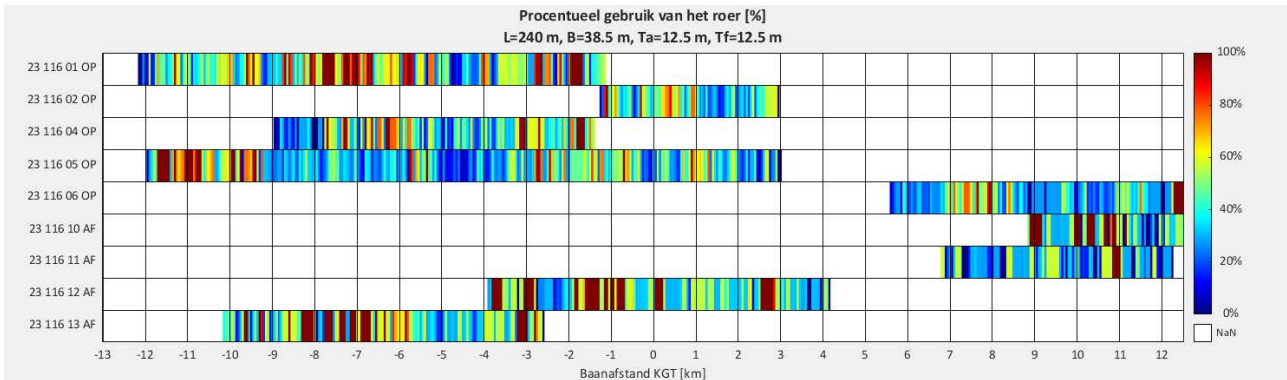
Langsscheepse vaarsnelheid van het schip (kn)



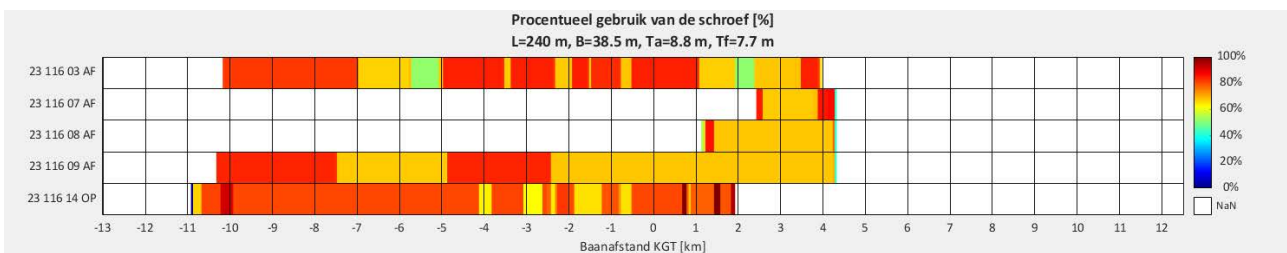
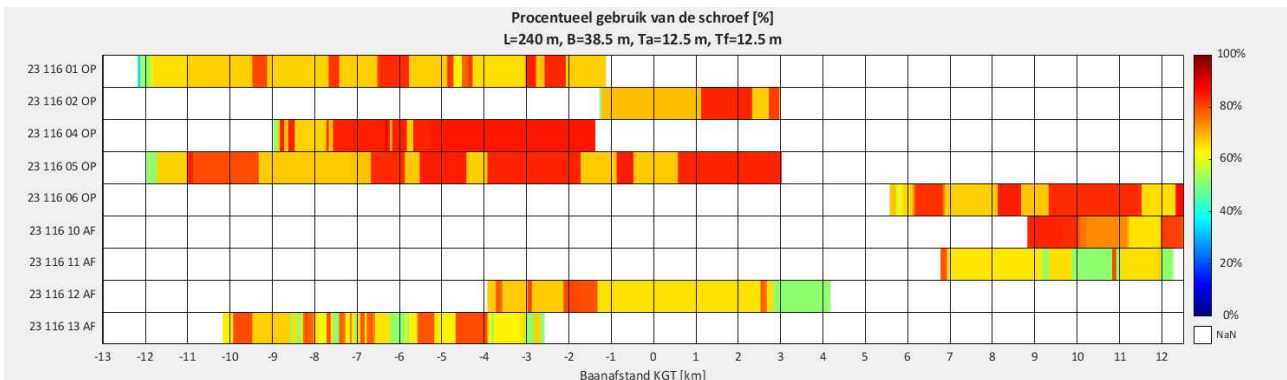
Absolute waarde van de giersnelheid van het schip (°/min)



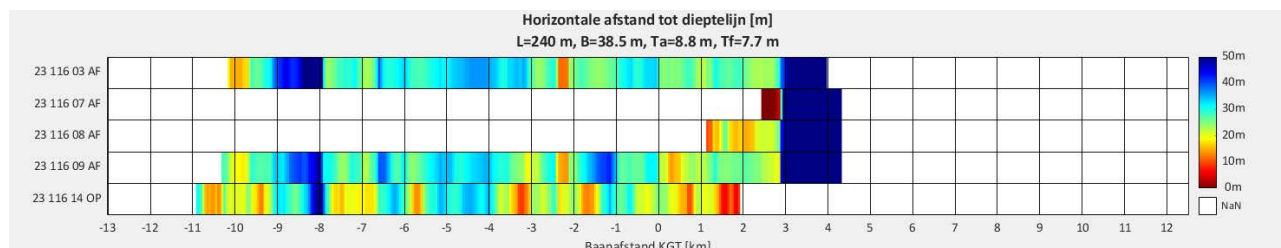
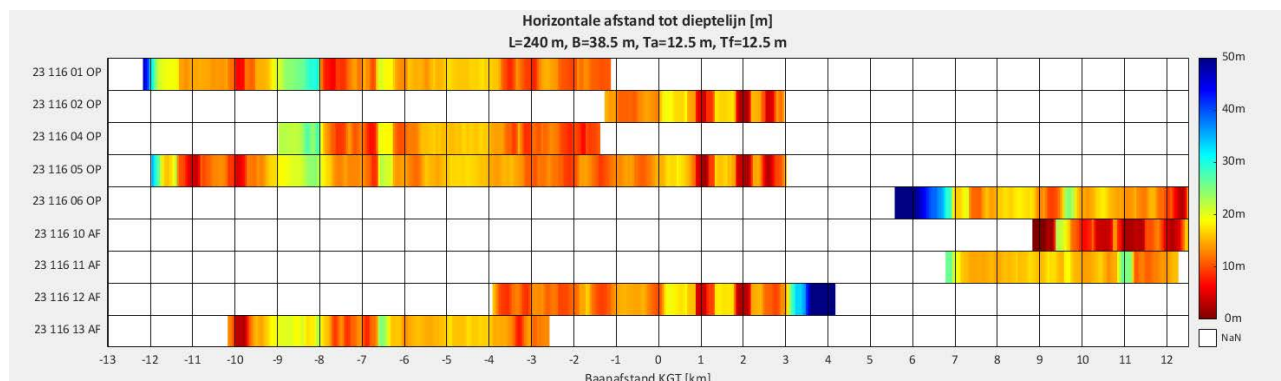
Procentueel gebruik van de absolute roerhoek ten opzichte van de maximale roerhoek (%)



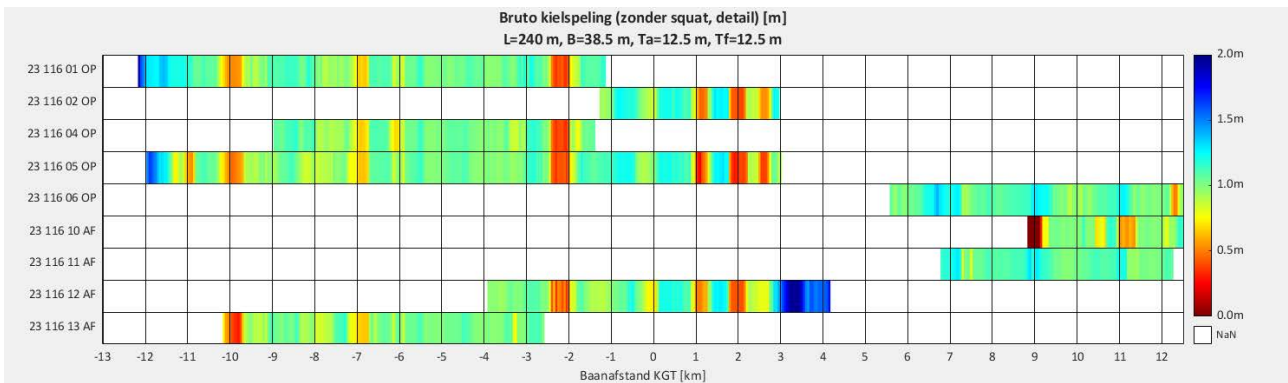
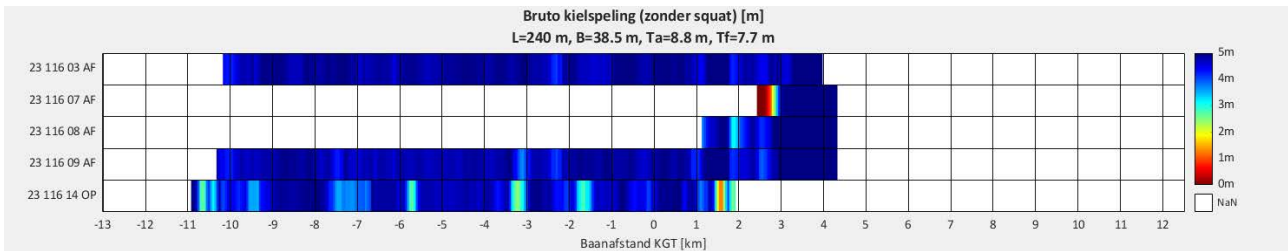
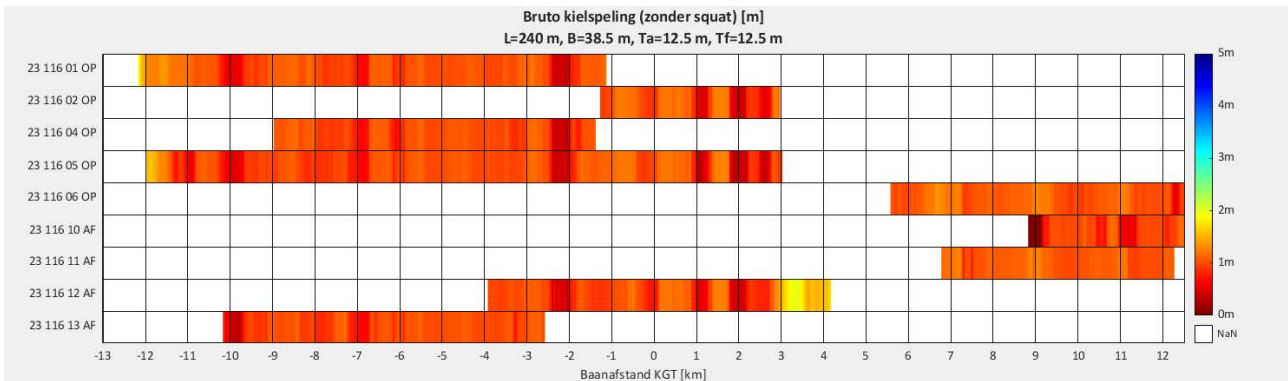
Procentueel gebruik van het toerental ten opzichte van het toerental voor Harbour Full Ahead (%)



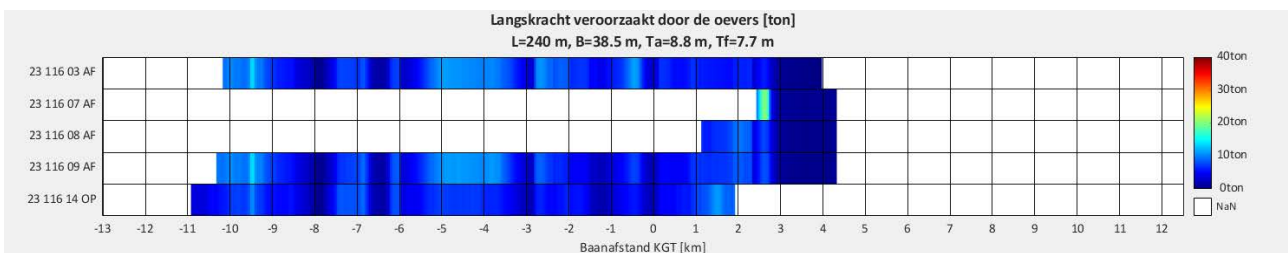
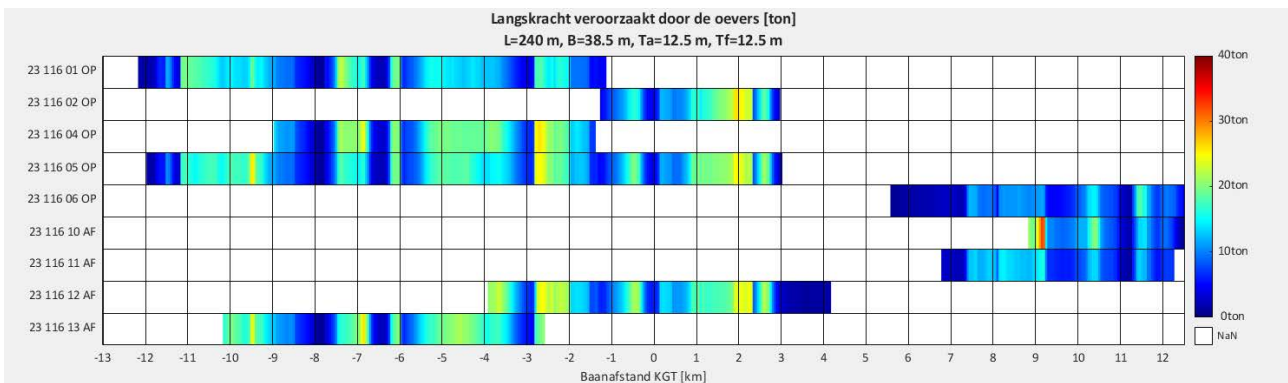
Minimale afstand tussen de contour van het schip en de dieptelijn overeenkomstig de maximale diepgang van het schip (m)



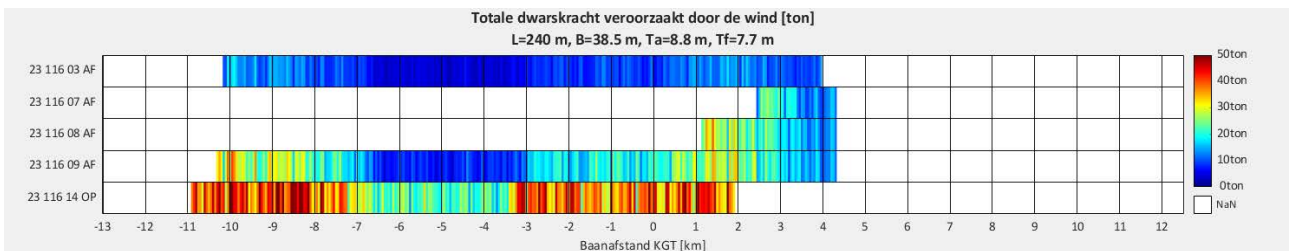
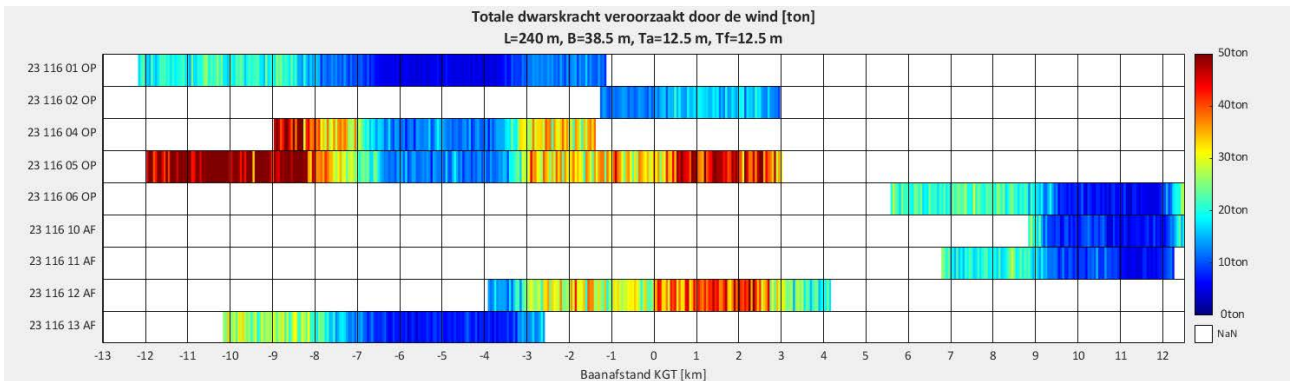
Minimale bruto kielspeling ter hoogte van de scheepscontour van het schip (m)



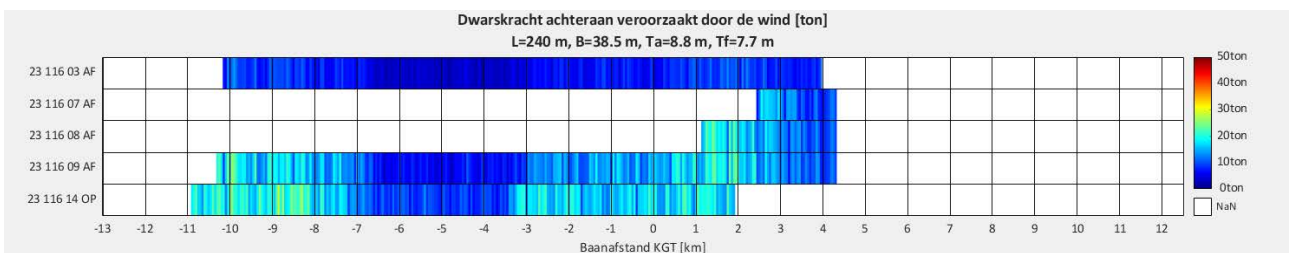
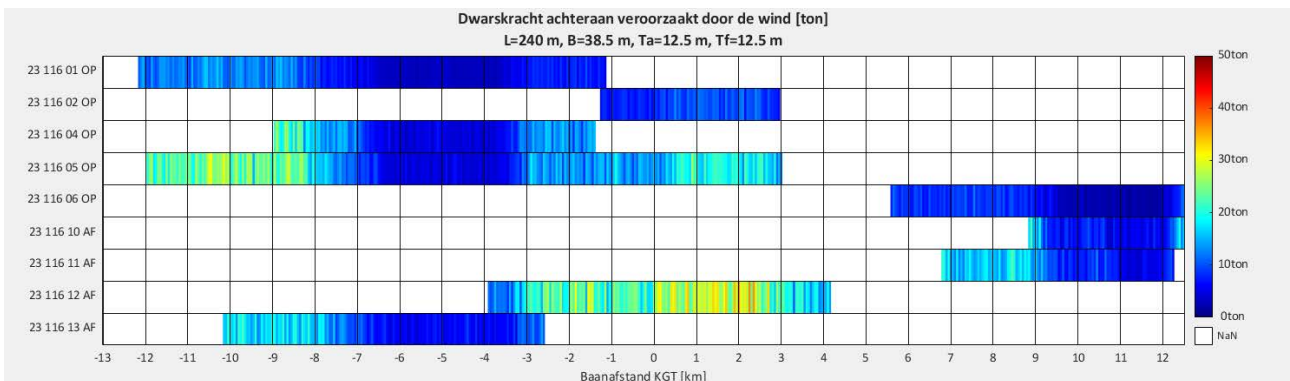
Langskracht veroorzaakt door de oever (ton)



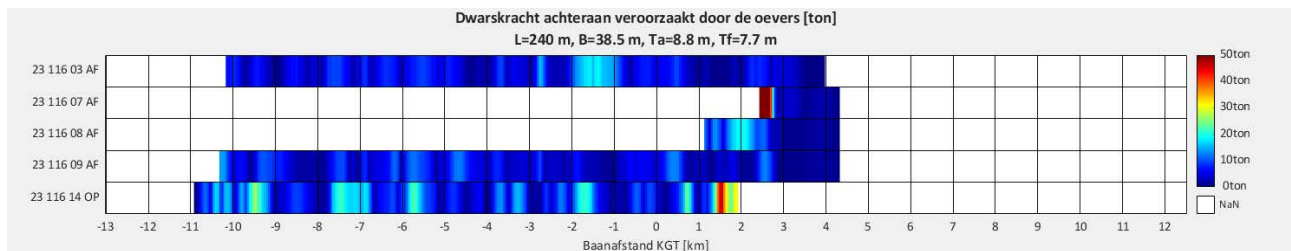
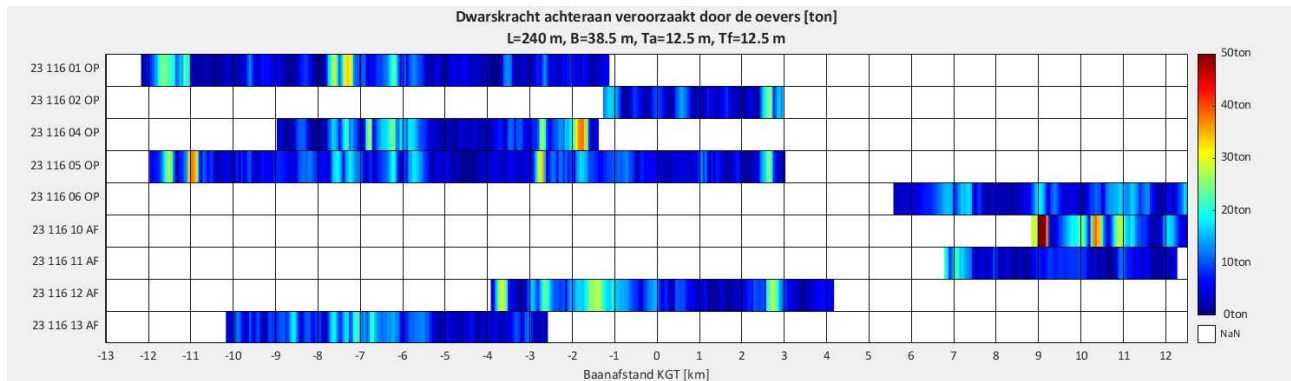
Totale dwarskracht ten gevolge van wind (ton)



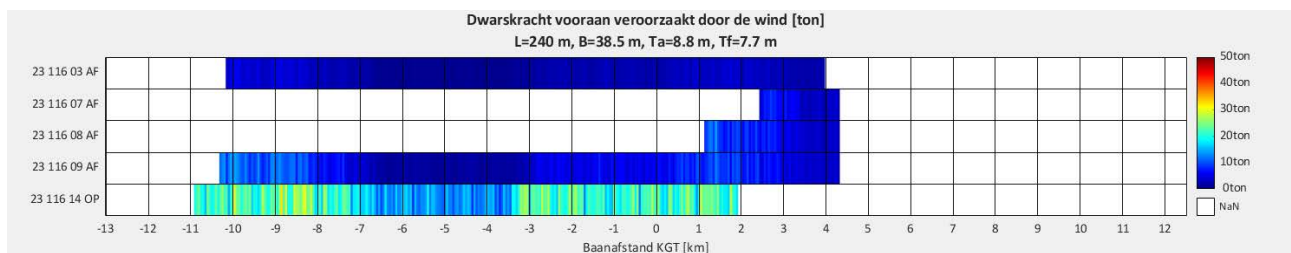
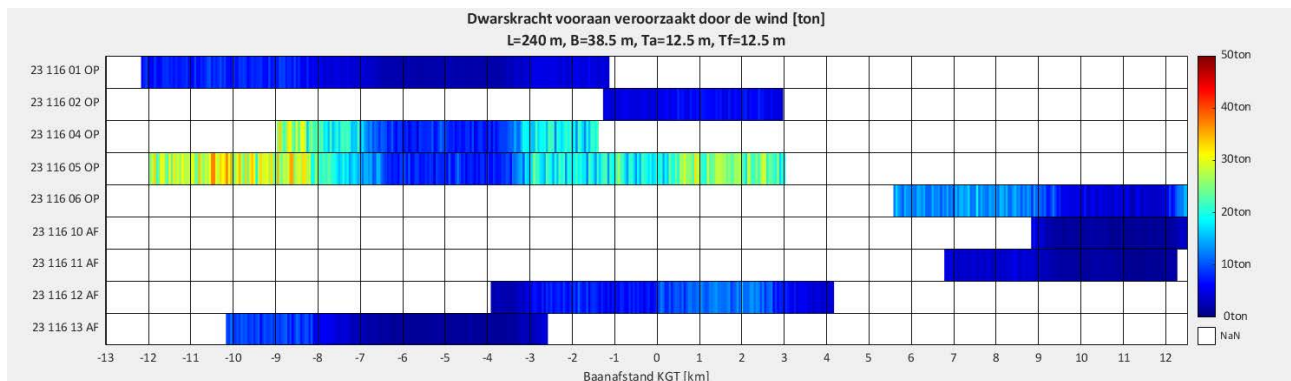
Dwarskracht op het achterschip ten gevolge van wind (ton)



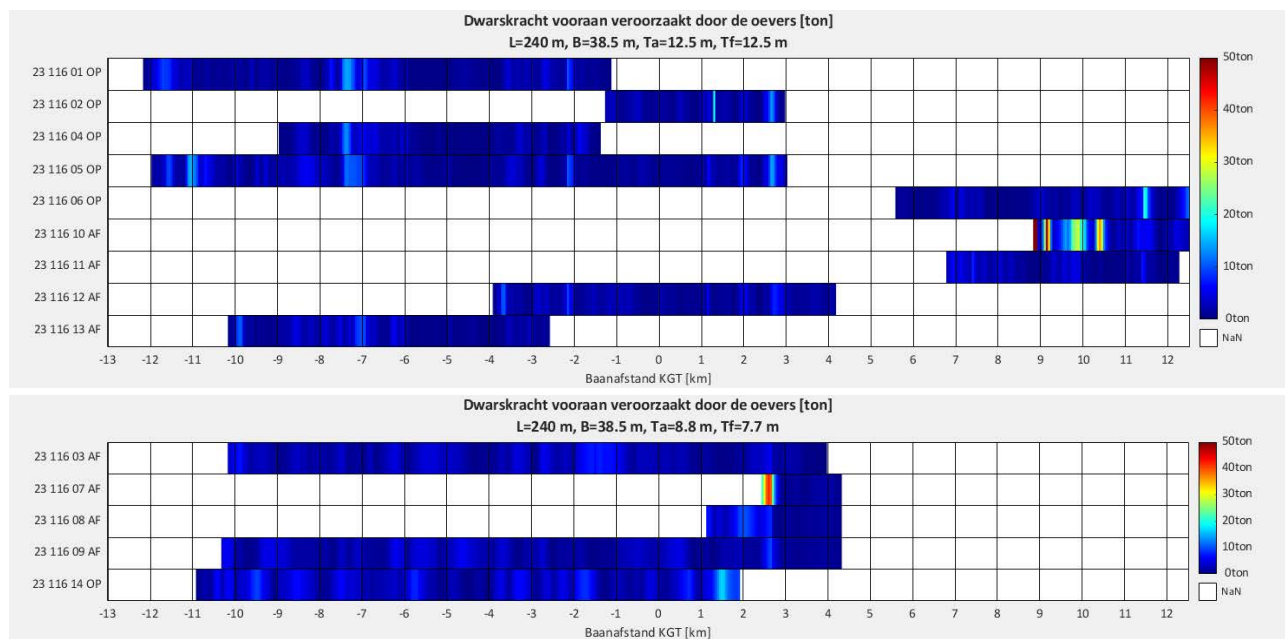
Dwarskracht op het achterschip ten gevolge van de oever (ton)



Dwarskracht op de boeg ten gevolge van wind (ton)



Dwarskracht op de boeg ten gevolge van de oever (ton)



Bijlage 4 Handleiding KMZ in Google Earth

Animated track plots of the simulations in KMZ-format are attached digitally to this report. The KMZ-files also present the time-evolution of most important parameters such as rudder angle, propeller rate, tug assistance and lateral ship forces due to wind and banks.

In order to visualize the KMZ-files the following manual is provided:

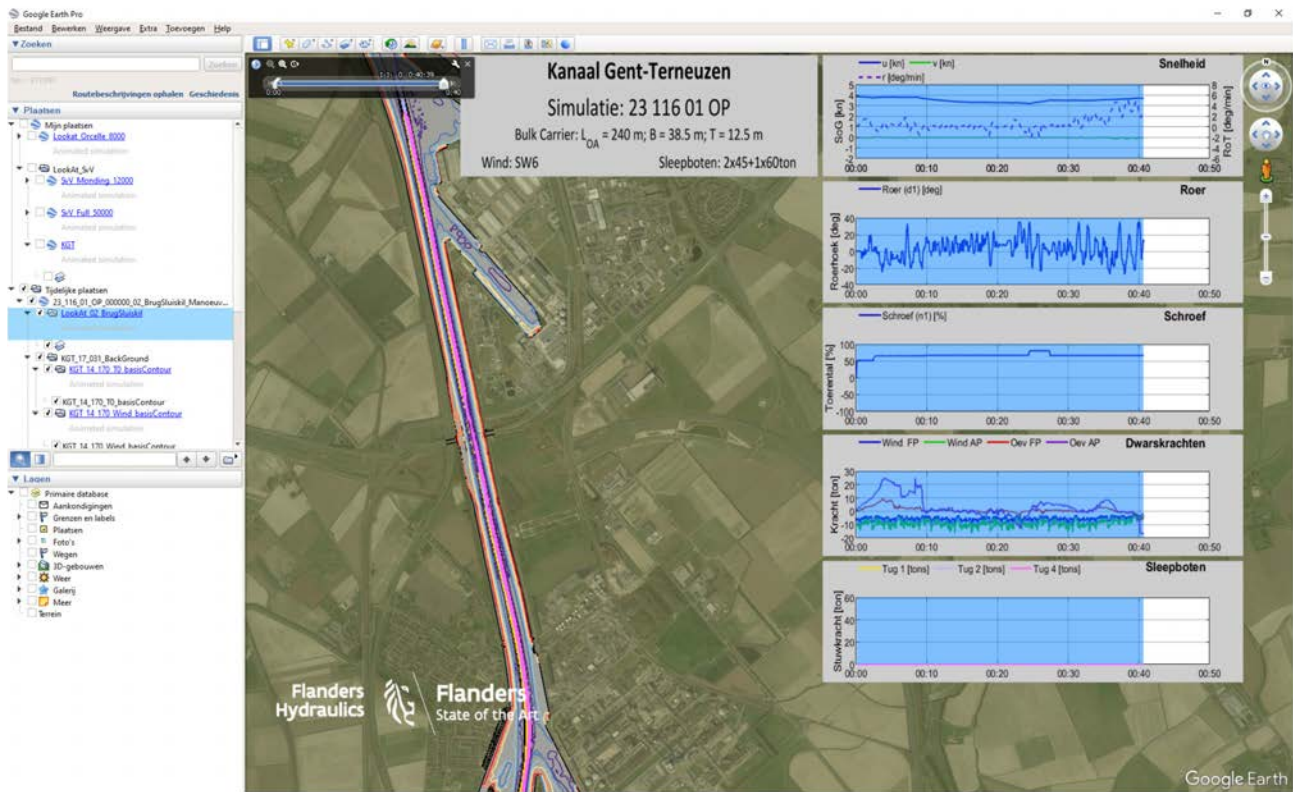
1. Install Google Earth (the version used for the images in this manual is a Dutch version)
2. Go to Windows Explorer and double click on a selected KMZ file (or open the kmz-file embedded in the pdf of the report):

e.g. 23_116_01_OP_000000_02_BrugSluiskil_Manoeuving.kmz

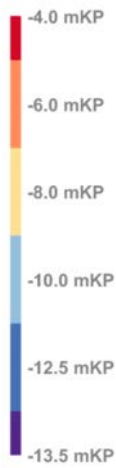
The KMZ file with animated graphs and animated simulation can be seen in the temporary locations at the left pull down menu (see Figure 1). On the main screen the simulation area is presented with track plot and the overlay graphs (right column with time series). You can tick on or off the different overlay graphs in the left pull down menu. In order to zoom the view to the corresponding sub trajectory (in this case “BrugSluiskil”) you can double click the first item in the pull down menu of the kmz-file (in this case “LookAt_02_BrugSluiskil”).

In the simulation area the bathymetry is presented by means of the depth lines and colour code as presented in Figure 2. The inner polygon of the ship contour is coloured based on the distance between the ship and the depth line corresponding to the maximum draft of the ship (for simulation 01 this is the depth line at draft 12.5 m). The colour code for this passing distance is defined in Table 1. For each simulation different KMZ-files are provided corresponding to different sub trajectories corresponding to Figuur 95.

Nautische toegankelijkheid Kanaal Gent-Terneuzen voor scheepsbreedte tot 38.5 m
Eindrapport – Impactstudie bodemprofiel en Full Mission Bridge simulaties



Figuur 137 – Presentation of simulation 01 with overlay graphs in KMZ-format (viewer: Google Earth Pro™)

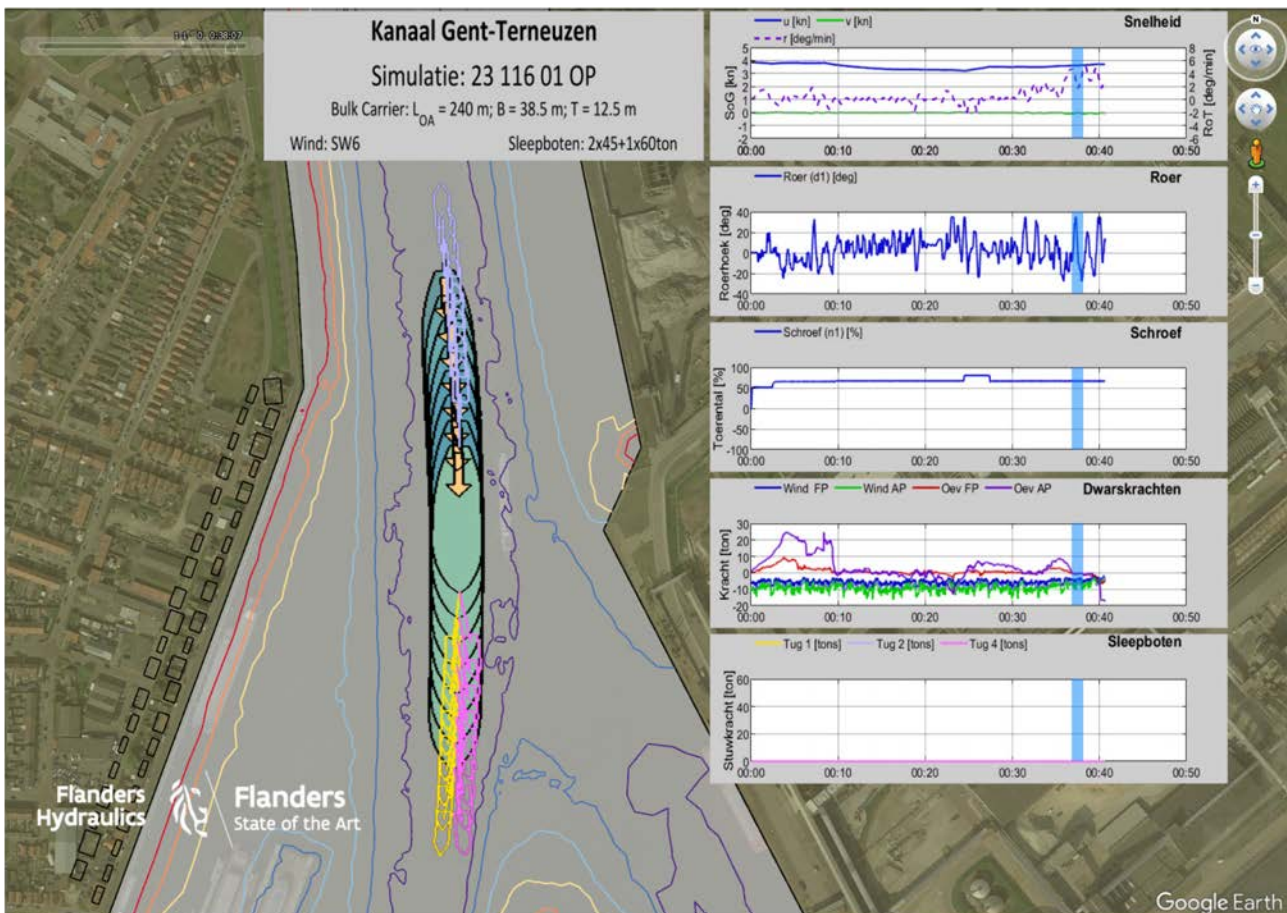


Figuur 138 – Colour code and depth lines presented in KMZ-file

Tabel 18 – Colour scale for horizontal distance relative to ship beam applied in KMZ-generation (linear interpolation)

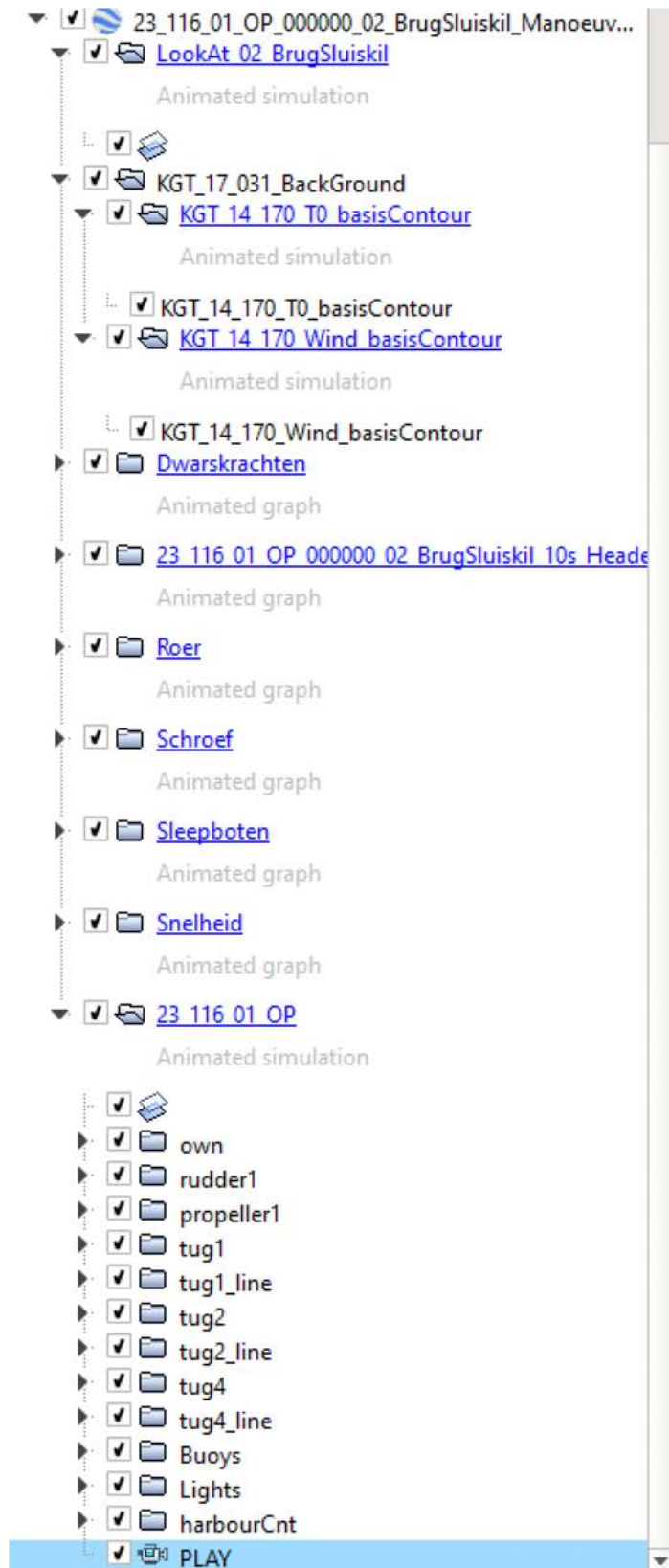
Horizontal distance	Colour [RGB]
0	[0.843 0.098 0.11]
B/8	[0.992 0.682 0.38]
B/4	[1 1 0.749]
B/2	[0.671 0.867 0.643]
B	[0.169 0.514 0.729]

In Figure 1 the overlay graphs are coloured (blue or red depending on the ship type bulk carrier or tanker) on top of the different series in the graphs because the animation is presented from the start to the end of the simulation. If you use the slider on the top left location you can go back and forward in the simulation and both the track plot and the time indicators on the graphs will adapt (see Figure 3).



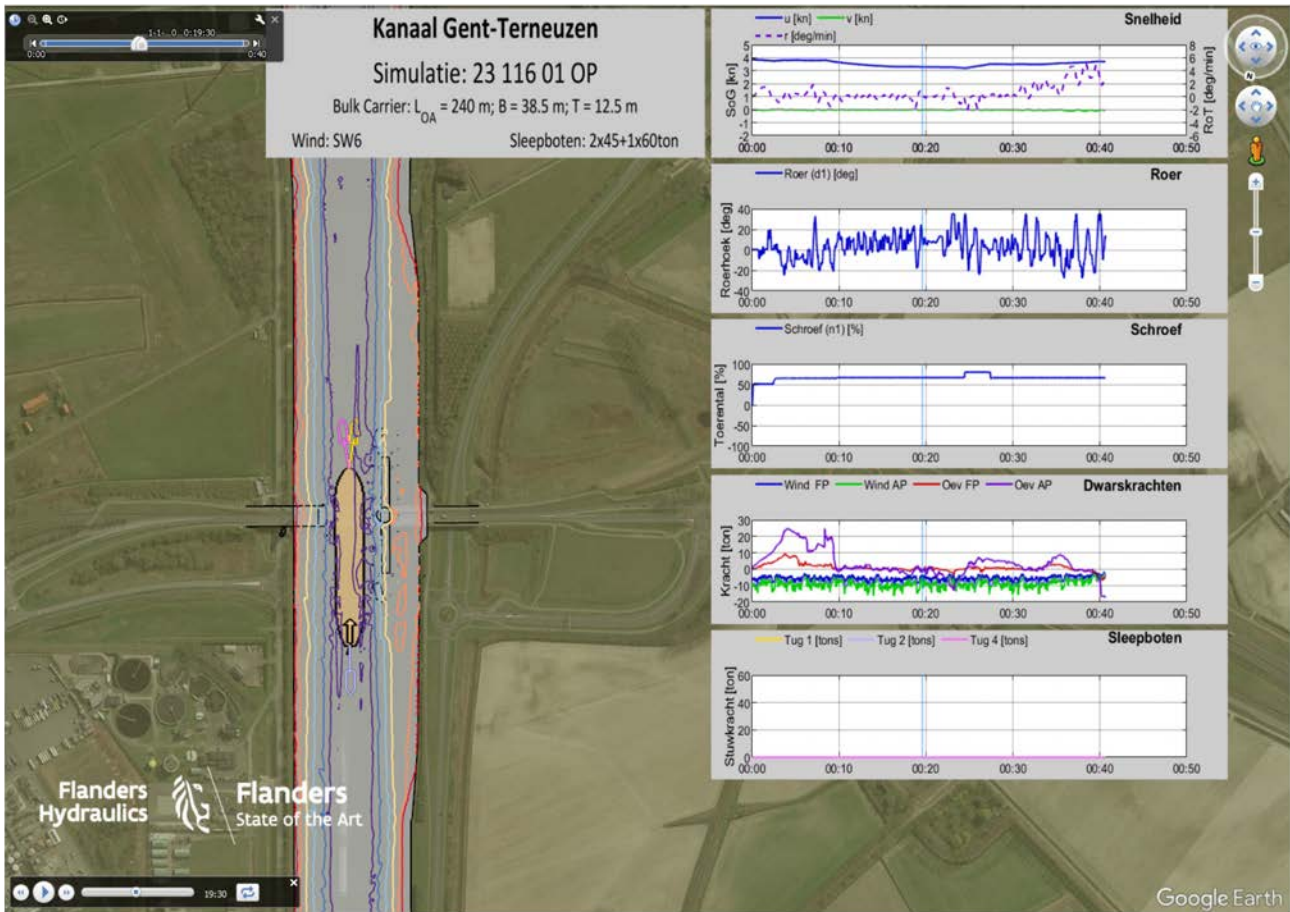
Figuur 139 – Time slider functionality KMZ

To clearly focus on the track of the own ship you can select the pull down list of the animated simulation and double click on “own”. Then the Google Earth presentation zooms to the track of the own ship. You can once again use the slider to go back and forward in the simulation.



Figuur 140 – Pull-down menu Google Earth Explorer

In the pull down list of the animated simulation there is also a PLAY button (see Figure 4); by double clicking on this button the simulation replays the simulation with the ship centered in the screen. In the left corner below, the play button is presented and can be used for increasing the replay speed.



Figuur 141 – PLAY functionaliteit in KMZ die het schip gecentreerd houdt op het scherm en een replay toert te presenteren

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