



**Vlaanderen**  
is wetenschap

VAARGEUL GEO VLAANDEREN

18\_120\_3  
WL rapporten

## Advies Scheldebrug

Deelrapport 3 – Nautica

DEPARTEMENT  
MOBILITEIT &  
OPENBARE  
WERKEN

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

# Advies Scheldebrug

## Deelrapport 3 – Nautica

Eloot, K.; Verwilligen, J.; De Maerschallck, B.; Mostaert, F.



### 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 2019  
D/2019/3241/221

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

**Eloot, K.; Verwilligen, J.; De Maerschalc, B.; Mostaert, F.** (2019). Advies Scheldebrug: Deelrapport 3 – Nautica. Versie 4.0. WL Rapporten, 18\_120\_3. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

Tot en met de datum van vrijgave, kan overname uit en verwijzen naar deze publicatie enkel mits uitdrukkelijke en schriftelijke toestemming van de opdrachtgever of het Waterbouwkundig Laboratorium. Correcte bronvermelding is steeds noodzakelijk.

### Documentidentificatie

Opdrachtgever:	De Vlaamse Waterweg NV	Ref.:	WL2019R18_120_3
Keywords (3-5):	Fietsbrug, passage zeeschepen, realtime simulatie, operationaliteit		
Tekst (p.):	36	Bijlagen (p.):	5
Vertrouwelijk	<input checked="" type="checkbox"/> Ja	Vrijgegeven vanaf:	01/01/2025
		Uitzondering:	<input checked="" type="checkbox"/> Vlaamse overheid

Auteur(s):	Eloot, K.
------------	-----------

### Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Verwilligen, J.	Getekend door: Jeroen Verwilligen (Signatur) Getekend op: 2019-10-16 07:09:03 +01:00 Reden: Ik keur dit document goed  <b>Jeroen Verwilligen</b>
Projectleider:	De Maerschalc, B.	Getekend door: Bart De Maerschalc (Signa) Getekend op: 2019-10-15 15:32:40 +01:00 Reden: Ik keur dit document goed  <i>Bart De Maerschalc</i>

### Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Mostaert, F.	Getekend door: Frank Mostaert (Signature) Getekend op: 2019-10-15 15:33:25 +01:00 Reden: Ik keur dit document goed  <i>Frank Mostaert</i>
-----------------	--------------	---



# Abstract

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

In het derde deelrapport van dit advies wordt de passage van de fietsbrug met zeeschepen onderzocht door middel van bijkomend verkennend realtime simulatieonderzoek op de scheepsmanoeuvresimulator van het Waterbouwkundig Laboratorium, uitgevoerd op 26 juni 2019. De doorvaartbreedte werd vergroot tot 90 m en drie verschillende brugtypes, allen met een identieke locatie voor de doorvaart, werden beoordeeld: een basculebrug, een draaibrug bestaande uit één deel en een draaibrug bestaande uit twee delen. De operationele voorwaarden (wind, stroming) die volgens de Gezamenlijke Bekendmaking voor de toegankelijkheid tot Wintam gelden werden als basis genomen voor de evaluatie van de toegankelijkheid van de drie brugtypes op dezelfde locatie. De wind werd in meer richtingen gevarieerd in vergelijking met de voorgaande simulatiestudie en tussen 5 en 7 Bft. Bij deze windklassen is minstens één (achter)sleepboot noodzakelijk om de maximale doorvaartsnelheid van de brug beneden de 8 knopen over de grond te houden (bij voorstrooms varen) en de windinvloed te compenseren. Een afstand van 15 m tussen de pijler en het schip wordt als aanvaardbaar en veilig geëvalueerd door de loodsen wat gezien het brede vaarpad van het schip onder invloed van stroming, wind en bochten niet noodzakelijk gegarandeerd kan worden met een doorvaartbreedte van 90 m. Er worden voorstellen tot aanpassingen aan het ontwerp (locatie en oriëntatie) en bijkomend onderzoek geformuleerd.

*Kennisdomein: Interactie met constructies*

*Kennisdomein: Scheepsbeweging -> Ontwerp vaarweg en haven -> Simulaties*



# Inhoudstafel

Abstract .....	III
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de tabellen.....	VI
Lijst van de figuren .....	VII
1 Inleiding .....	1
2 Nautische impact op de zwaaizone .....	2
3 Simulatiestudie.....	9
3.1 Voorbereiding.....	9
3.1.1 Locatie van de fietsbrug met drie brugtypes.....	9
3.1.2 Ontwerpschip .....	12
3.1.3 Bathymetrie, wind en stroming.....	14
3.2 Simulatieprogramma .....	18
3.3 Analyse .....	20
3.3.1 Opvaart: aanloop vanaf afwaartse zijde van de brugtypes.....	20
3.3.2 Afvaart: opwaartse zijde van de brugtypes.....	26
4 Conclusies en bijkomend onderzoek.....	32
4.1 Conclusies simulatiestudie .....	32
4.2 Bijkomend onderzoek.....	35
Referenties .....	36
Bijlage 1: Feedback van de loodsen.....	B1
Bijlage 2: Manual voor de KMZ presentaties.....	B3



## Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Verband scheeps lengte en zwaailengte .....	4
Tabel 2 – Verband tussen diepgang, vereiste waterdiepte bij 10% UKC en de vereiste waterstand in m LAT	5
Tabel 3 – Samenvattende maximale scheeps lengtes afhankelijk van de dieptelijn of waterdiepte voor de zwaaizone aan de Rede .....	6
Tabel 4 – Verband tussen minimale vaarwegbreedte (Min VB) ter hoogte van de Rede en scheeps lengte over een rechthoek van 2.2 keren de scheeps lengte $L_{OA}$ (speling van 2 x 20 m) .....	7
Tabel 5 – Afmetingen ontwerpschepen voor simulatie .....	12
Tabel 6 – Toerental-snelheid voor de Stolt en Rhone in diep en ondiep water.....	13
Tabel 7 – Manoeuveereigenschappen voor een draaicirkel in diep water, Stolt en Rhone .....	14
Tabel 8 – Manoeuveereigenschappen voor een draaicirkel in ondiep water, Stolt en Rhone .....	14
Tabel 9 – Procentuele verdeling van de werkelijke wind over de Beaufortklassen voor terreinklasse 3.....	15
Tabel 10 – Overzicht simulaties.....	18
Tabel 11 – Verdeling van de parameters diepgang, stroom en sleepboothulp over de simulatieruns per brugtype .....	19
Tabel 12 – Verdeling van de windparameters over de simulatieruns per brugtype.....	19
Tabel 13 – Simulatieruns in opvaart: diepgang, brugtype, wind, sleepboot, speed over ground, rate of turn, heading en koersafwijking ten opzichte van de lichtenlijn .....	20
Tabel 14 – Simulatieruns in afvaart: diepgang, brugtype, wind, sleepboot, speed over ground, rate of turn, heading en koersafwijking ten opzichte van de lichtenlijn .....	26

# Lijst van de figuren

Figuur 1 – De gele en groene variant met beweegbaar brugdeel in de simulatieomgeving .....	1
Figuur 2 – Locatie van de zwaaizone ZZ1 en ZZ2 met visualisatie van de simulatierun 12_007_006 uit de studie .....	2
Figuur 3 – Zwaailengtes voor een schip met lengte 265 m uit project 12_007 .....	3
Figuur 4 – Beschikbare vaarwegbreedte en vaarweglengte ter plaatse van de Rede van Antwerpen bij verschillende dieptelijnen .....	5
Figuur 5 – Vergelijking met “groene” variant: projectie van de runs 003 tot en met 007 uit (Eloot <i>et al.</i> , 2019) op de nieuwe locatie van fietsbrug met drie brugtypes .....	9
Figuur 6 – Detail van Figuur 5: vergelijking met “groene” variant: projectie van de runs 003 tot en met 007 uit (Eloot <i>et al.</i> , 2019) op de nieuwe locatie van fietsbrug met drie brugtypes.....	10
Figuur 7 - Vergelijking met “gele” variant: projectie van de runs 008 tot en met 010 en 012 uit (Eloot <i>et al.</i> , 2019) op de nieuwe locatie van fietsbrug met drie brugtypes .....	10
Figuur 8 – Detail van Figuur 7: vergelijking met “gele” variant: projectie van de runs 008 tot en met 0010 en 012 uit (Eloot <i>et al.</i> , 2019) op de nieuwe locatie van fietsbrug met drie brugtypes .....	12
Figuur 9 – Vijf meetlocaties voor wind (rode ster) ten opzichte van de locatie van de fietsbrug (blauwe cirkel) .....	16
Figuur 10 – Analyse van de windsnelheid op de vijf meetlocaties uit Figuur 9 .....	17
Figuur 11 – Opvaart (T = 7.0 m): runs 021 en 022 bij windkracht 5 Bft met basculebrug, zonder sleepbootassistentie.....	21
Figuur 12 – Opvaart (T = 10.8 m): runs 014 en 015 bij windkracht 6 Bft met draaibrug met twee delen, 14 ton achtersleepboot .....	21
Figuur 13 – Opvaart (T = 7.0 m): run 016 bij windkracht NW 7 Bft met draaibrug met één deel, 14 ton achtersleepboot: overzicht en detail.....	22
Figuur 14 – Opvaart (T = 10.8 m): run 023, 024 en 025 bij windkracht 7 Bft met basculebrug, 65 ton achtersleepboot .....	23
Figuur 15 – Samengestelde tracks van de runs bij opvaart: 014, 015, 021, 022, 023 en 025.....	24
Figuur 16 – Afvaart (T = 7.0 m): run 026 en 027 bij windkracht 5 Bft met basculebrug of draaibrug met één deel, zonder sleepbootassistentie.....	26
Figuur 17 – Opvaart (T = 7.0 m): run 018 en 030 bij windkracht 6 Bft met draaibrug met één of twee delen, 14 of 65 ton achtersleepboot.....	27
Figuur 18 – Afvaart (T = 7.0 m): run 017, 019, 020, 028 en 029 bij windkracht 7 Bft met draaibrug met één deel, 14 of 65 ton achtersleepboot .....	28
Figuur 19 – Afvaart (T = 7.0 m): noordelijke (a) en zuidelijke (b) windrichtingen.....	29
Figuur 20 – Samengestelde tracks van de runs bij afvaart: 017, 019, 020 en 026.....	31
Figuur 21 – Samengestelde geselecteerde tracks in opvaart en afvaart: (a) ontwerp van draaibrug met twee delen van deze simulatiestudie, (b) voorstel met optimalisatie van de locatie voor een fietsbrug .....	33

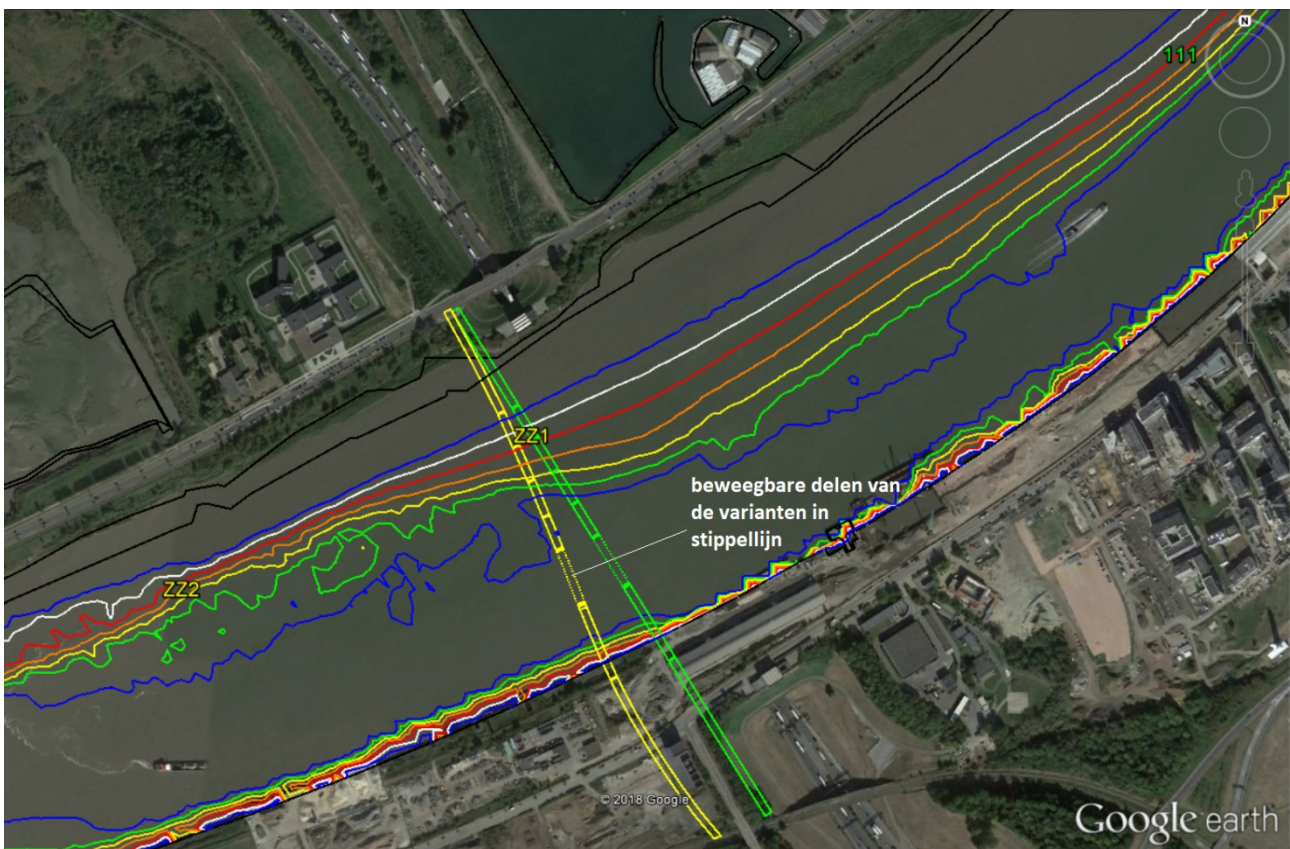


# 1 Inleiding

De Scheldebrug (fietsbrug) maakt deel uit van de leefbaarheidsprojecten van het project “OVER DE RING” ([www.overdering.be](http://www.overdering.be)) en is gepland opwaarts de Kennedytunnel. In een eerste nautische voorstudie met verschillende locaties voor de fietsbrug (Eloot *et al.*, 2019) werd besloten dat in bijkomend nautisch onderzoek een ontwerp met een buiging zoals in de “gele” variant of een ontwerp opwaarts de “gele” variant de voorkeur zou moeten krijgen (Figuur 1). Uiteindelijk werd in dit deelrapport echter één ontwerplocatie met drie verschillende brugtypes gekozen waarbij met de conclusie uit het voorgaande deelrapport geen rekening werd gehouden omwille van de wens van andere partijen voor een directe, rechte aansluiting van de geplande fietssnelwegen op de fietsbrug.

Met betrekking tot het bepalen van de nautische randvoorwaarden voor het ontwerp heeft het nautische team van het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) een bijkomende simulatiedag georganiseerd op 26 juni 2019 in samenwerking met twee loodsen van de DAB Loodswezen en een sleepbootkapitein van een sleepbedrijf actief op de Schelde. Dit derde deelrapport (en tweede nautische rapport) beschrijft de bevindingen van alle betrokken partijen in het nautische onderzoek. Het deelrapport is opgedeeld in een beschrijving van de beperkingen voor zwaaien van cruiseschepen door de locatie van de fietsbrug (Hoofdstuk 2) en de analyse van de simulaties van 26 juni 2019 (Hoofdstuk 3). In Hoofdstuk 4 worden de conclusies van dit onderzoek geformuleerd en een voorstel tot bijkomend onderzoek.

Figuur 1 – De gele en groene variant met beweegbaar brugdeel in de simulatieomgeving (Eloot *et al.*, 2019)



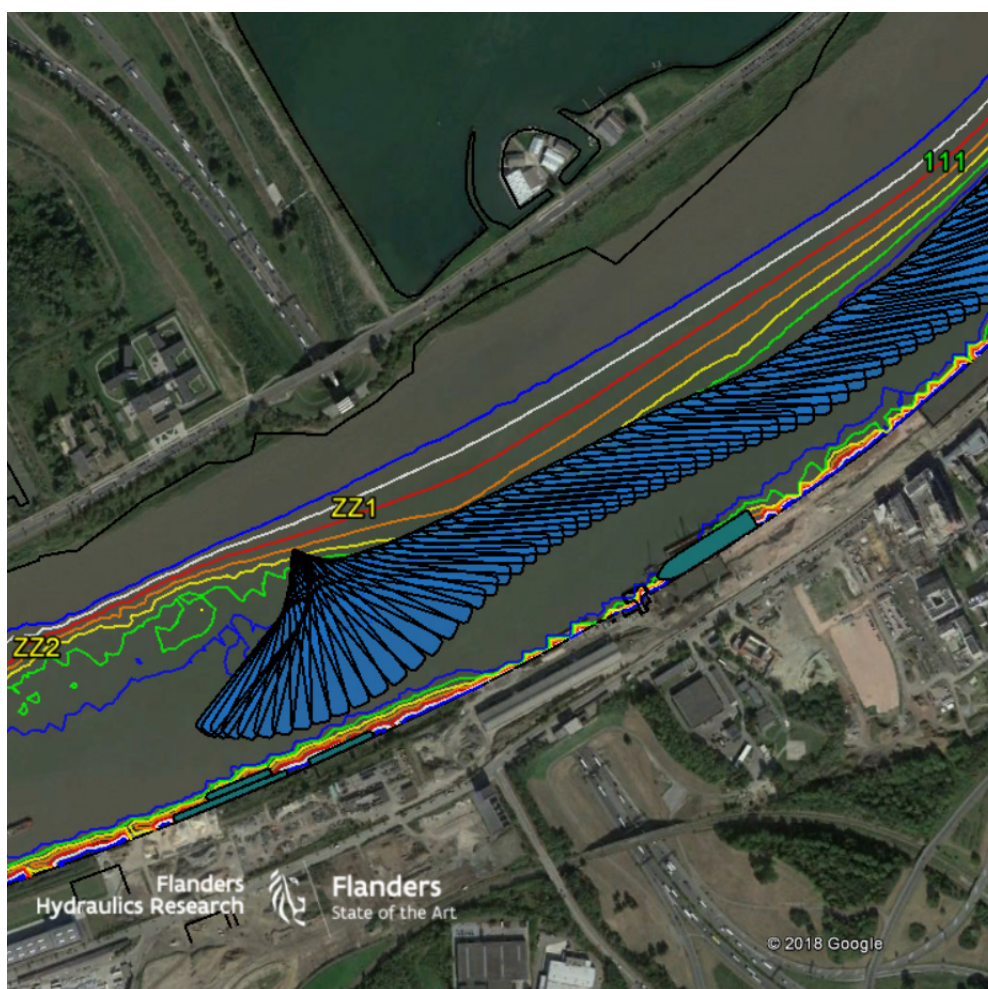


## 2 Nautische impact op de zwaaizone

De Gezamenlijke Bekendmaking voor cruiseschepen tot de Rede van Antwerpen laat een maximale scheepslengte van 265 m toe. Deze lengte is er gekomen naar aanleiding van de aanlopen van cruiseschepen van de AIDA cruisereederij. Om met deze 265 m lange cruiseschepen tijdens de verblijftijd van het schip (dus niet alleen bij aankomst of vertrek) te kunnen zwaaien bij elke getij/stroomconditie en tot en met windkracht 6 Bft (voor schepen van 200 m tot 265 m lengte), is de zwaaizone ZZ1-ZZ2 ingesteld (Figuur 2, (Eloot *et al.*, 2012)). Door het plaatsen van de fietsbrug vervalt deze zwaaizone.

Er moet op zoek gegaan worden naar een nieuwe maximale lengte waarbij cruiseschepen met de huidige heersende operationele condities kunnen zwaaien, maar nu enkel ter hoogte van de Rede zelf.

Figuur 2 – Locatie van de zwaaizone ZZ1 en ZZ2 met visualisatie van de simulatierun 12\_007\_006 uit de studie (Eloot *et al.*, 2012)



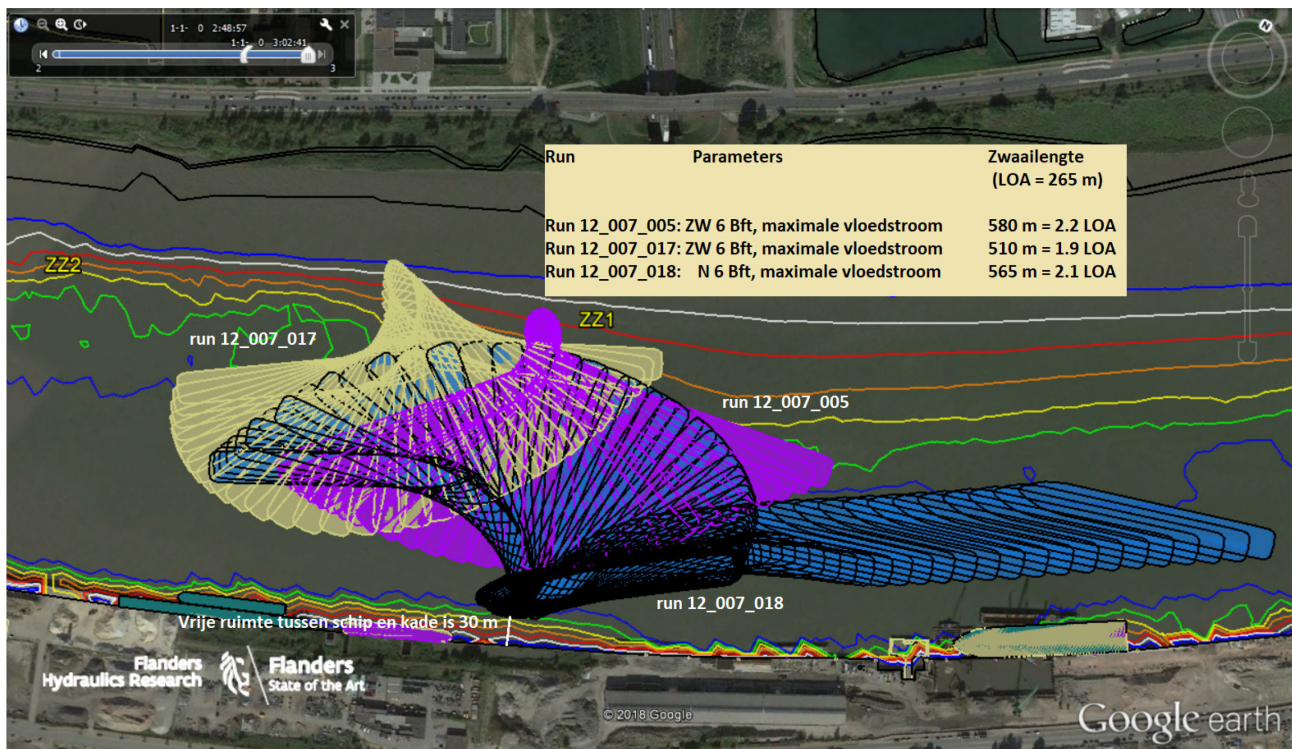
Het zwaaien van een cruiseschip op de Schelde wordt bepaald door het heersende getij met bijhorende stroom en door de wind, naast uiteraard de beschikbare ruimte voor dit manoeuvre. Het getij en de stroming zijn op voorhand te voorspellen. De wind is vooraf niet te voorspellen. Indien een zwaaimanoeuvre kan uitgevoerd worden bij verwaarloosbare stroom en wind, dan is het manoeuvre eerder cirkelvormig. Dit betekent dat op momenten rond LW en de kentering tussen vloed en eb na HW de stroom weinig invloed zal

hebben op het zwaaimanoeuvre. Bij vloed of eb wordt de invloed belangrijk en zal het zwaaimanoeuvre eerder een ellipsvorm dan een cirkelvorm beschrijven. Dit betekent dat een voldoende grote dwarssectie moet aanwezig zijn over een voldoende grote vaarlengthe. Verder zal de windinvloed dit pad nog bijkomend beïnvloeden.

Er werd een analyse uitgevoerd van de zwaaimanoeuvres ter plaatse van de zwaaizone ZZ1 en ZZ2 ((Eloot *et al.*, 2012), Figuur 3). Voor een schip met een scheepslengte over alles ( $L_{OA}$ ) van 265 m bedraagt de zwaailengte onder invloed van een maximale vloedstroom en een zuidwestelijke of noordelijke wind 1.9 tot 2.2<sup>1</sup> keren de  $L_{OA}$  van het schip. De maximale waarde kan gebruikt worden om de noodzakelijke, beschikbare zwaaizone voor het te allen tijde zwaaien ter plaatse van de Rede van Antwerpen te kunnen berekenen per scheepslengte. Indien de windkracht en de stroomsnelheid beperkt zijn, dan zal de zwaailengte kleiner zijn en kan deze theoretisch afnemen tot één keer de scheepslengte indien het schip perfect in de scheepscirkel zwaait.

In Tabel 1 worden de waarden gegeven van de scheepslengte enerzijds en de zwaailengte volgens 2.2 keren de  $L_{OA}$  van het schip. De scheepslengte kan ook geïnterpreteerd worden als de minimale zwaailengte.

Figuur 3 – Zwaailengtes voor een schip met lengte 265 m uit project 12\_007



<sup>1</sup> Er werd opgemerkt dat in geval van ebstroom de lengte van het zwaaimanoeuvre groter zou kunnen zijn dan 2.2 keren de scheepslengte. Er werd echter niet met een grotere waarde gewerkt omdat deze zwaailengte van 2.2 keren  $L_{OA}$  al aanleiding geeft tot beperkingen.

Tabel 1 – Verband scheepslenge en zwaailengte

Scheepslenge L <sub>OA</sub> (m)	Zwaailengte 2.2 L <sub>OA</sub> (m)
150	330
160	352
170	374
180	396
190	418
200	440
210	462
220	484
230	506
240	528
250	550
260	572
265	583

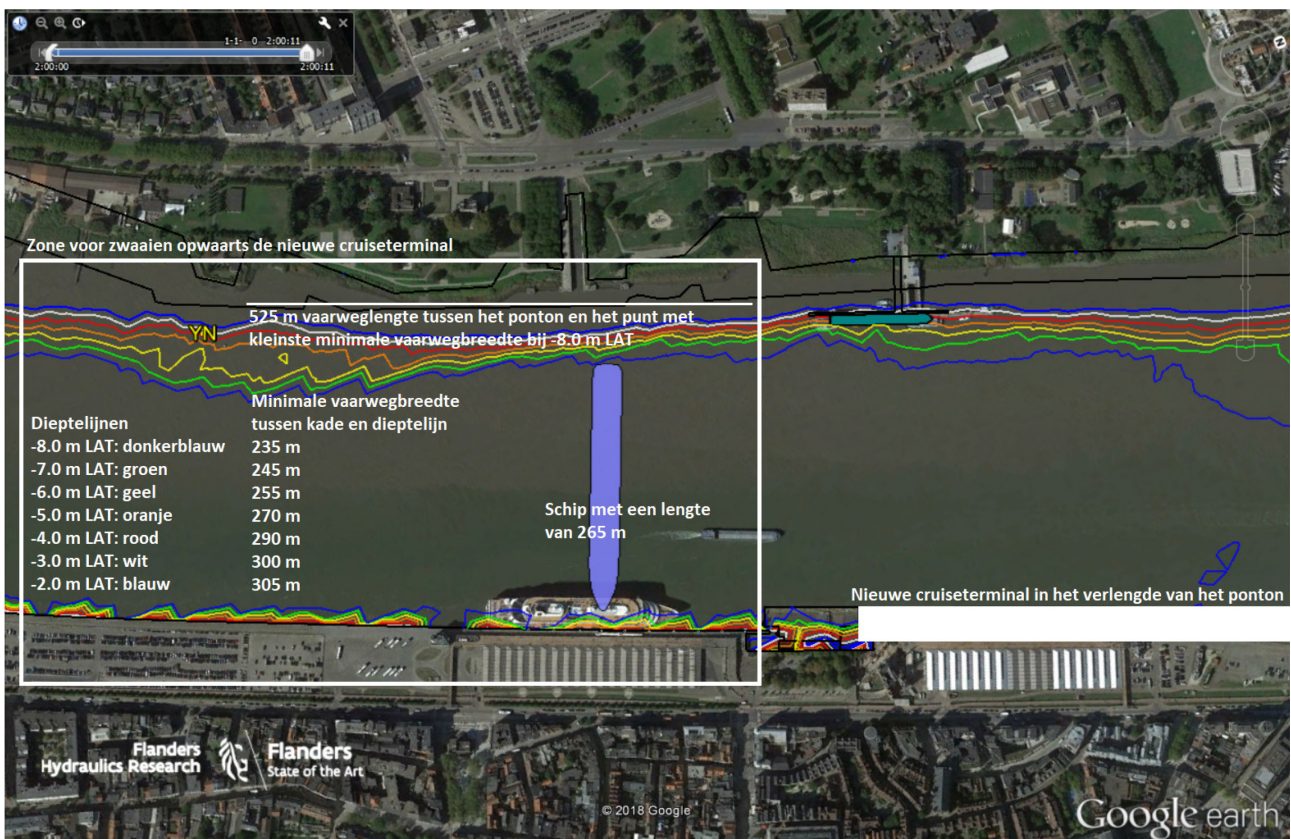
Indien men vervolgens de beschikbare bodemdiepte analyseert opwaarts de nieuwe cruiseterminal (Figuur 4, dieptelijnen van 30/06/2018), dan bestaat er een verband tussen de maximale scheepslenge en de waterstand voor cruiseschepen met verschillende diepgangen. Er wordt aangenomen dat de diepgang van de cruiseschepen kan variëren tussen 6.5 en 8.5 m met stappen van 0.5 m. Een minimale kielspeling van 10% van de diepgang geeft een variatie van de minimale waterdiepte voor deze diepgangen tussen 7.15 en 9.35 m. Het verband tussen de verschillende diepgangen, vereiste waterdieptes met 10% UKC en de vereiste waterstanden boven verschillende dieptelijnen is weergegeven in Tabel 2.



Tabel 2 – Verband tussen diepgang, vereiste waterdiepte bij 10% UKC en de vereiste waterstand in m LAT

Diepgang		m	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5
Waterdiepte (10% UKC)		m	7.15	7.7	8.25	8.8	9.35
Vereiste waterstand bij verschillende dieptelijnen	-8.0	m LAT	0	0	0.25	0.8	1.35
	-7.0	m LAT	0.15	0.7	1.25	1.8	2.35
	-6.0	m LAT	1.15	1.7	2.25	2.8	3.35
	-5.0	m LAT	2.15	2.7	3.25	3.8	4.35
	-4.0	m LAT	3.15	3.7	4.25	4.8	5.35
	-3.0	m LAT	4.15	4.7	5.25	5.8	6.35
	-2.0	m LAT	5.15	5.7	6.25	-	-

Figuur 4 – Beschikbare vaarwegbreedte en vaarweglengte ter plaatse van de Rede van Antwerpen bij verschillende dieptelijnen





Voor de gangbare diepgangen van cruiseschepen heeft men een rijs van het water nodig om 10% UKC te garanderen. Hoe groter de waterstand, hoe groter de beschikbare ruimte voor zwaaien zodat de maximale scheepslengte waarmee dan gezwaaid kan worden ook groter zal zijn. Als men verder de dieptelijnen op Figuur 4 bekijkt, dan ziet men dat de dieptelijnen van -8.0 tot -4.0 m LAT opwaarts het ponton aan het Steenplein een vernauwing van de vaarwegbreedte vertonen. Dit betekent dat men, afhankelijk van de omgevingscondities stroom en wind, of dus een zwaailengte tussen één of 2.2 keren de scheepslengte, men een bepaalde maximale scheepslengte zal kunnen toestaan.

Door het analyseren van het verloop van de dieptelijnen opwaarts het ponton aan het Steenplein werd Tabel 4 opgesteld. Deze tabel geeft aan hoe per de scheepslengte de zwaailengte als 2.2 keren  $L_{OA}$  wijzigt en ook de minimale beschikbare vaarwegbreedte op een bepaalde dieptelijn. De maximale scheepslengte per dieptelijn wordt dan afgelezen als de maximale lengte waarbij, rekening houdend met een speling van 20 m<sup>2</sup> aan beide zijden van het schip, een vaarwegbreedte beschikbaar is die de scheepslengte en de noodzakelijke speling omvat. In de onderste rij van Tabel 4 krijgt men dan de maximale scheepslengte per dieptelijn.

Indien men de maximale scheepslengtes samenbrengt voor een zwaailengte van één tot 2.2 keren de scheepslengte, dan bekomt men het resultaat zoals voorgesteld in Tabel 3. Door Tabel 3 en Tabel 2 te combineren kan men de maximale scheepslengte interpreteren met de diepgang van het cruiseschip en de vereiste minimale waterstand.

Tabel 3 – Samenvattende maximale scheepslengtes afhankelijk van de dieptelijn of waterdiepte voor de zwaaizone aan de Rede

Dieptelijn	Maximale scheepslengte	
	Minimale vaarbreedte bij 1 $L_{OA}$ - 2 x 20 m	Minimale vaarbreedte bij 2.2 $L_{OA}$ - 2 x 20 m
-8 m LAT	<b>240</b>	<b>210</b>
-7 m LAT	<b>245</b>	<b>210</b>
-6 m LAT	<b>250</b>	<b>220</b>
-5 m LAT	<b>252.5</b>	<b>230</b>
-4 m LAT	<b>257.5</b>	<b>250</b>
-3 m LAT	<b>265</b>	<b>260</b>
-2 m LAT	<b>270</b>	<b>265</b>

Enkele voorbeelden:

- Indien de waterstand theoretisch 0 m LAT is, dan varieert op basis van Tabel 3 voor een waterdiepte van 8.0 m (of een dieptelijn van -8.0 m LAT) de maximale toegelaten scheepslengte bij een speling van 20 m aan beide zijden van het schip tussen 210 en 240 m.
- Indien de waterstand +5 m LAT is of rond hoog water, dan zal voor een cruiseschip met een diepgang van 8.0 m de maximale scheepslengte gegeven worden door de waarden bij -4.0 m LAT in Tabel 3, dus tussen 250 en 257.5 m.
- De maximale toegelaten scheepslengte van 265 m in de huidige Gezamenlijke Bekendmaking voor cruiseschepen wordt bekomen voor waterstanden tussen de 4.15 m en eerder 6.25 m, wat een uitzonderlijk hoge waterstand is, en een maximale diepgang van 7.5 m.

<sup>2</sup> Een speling van 20 m aan beide zijden van het schip werd als een minimale waarde beschouwd om een variërende snelheid van het schip nog enigszins te kunnen opvangen. Indien deze waarde voor de speling te klein wordt bevonden, zal dit uiteraard leiden tot nog kleinere maximale scheepslengtes voor het zwaaien.

Tabel 4 – Verband tussen minimale vaarwegbreedte (Min VB) ter hoogte van de Rede en scheepslengte over een rechthoek van 2.2 keren de scheepslengte L<sub>OA</sub> (speling van 2 x 20 m)

Dieptelijn		-8.0 m LAT		-7.0 m LAT		-6.0 m LAT		-5.0 m LAT		-4.0 m LAT		-3.0 m LAT		-2.0 m LAT	
Scheepslengte LOA	2.2 LOA	Min VB	Min VB -speling	Min VB	Min VB -speling	Min VB	Min VB -speling	Min VB	Min VB -speling	Min VB	Min VB -speling	Min VB	Min VB -speling	Min VB	Min VB -speling
150	330	270	230	275	235	285	245	287.5	247.5	297.5	257.5	305	265	307.5	267.5
160	352	270	230	275	235	282.5	242.5	287.5	247.5	295	255	300	260	305	265
170	374	265	225	267.5	227.5	272.5	232.5	280	240	290	250	300	260	305	265
180	396	255	215	260	220	267.5	227.5	275	235	290	250	300	260	305	265
190	418	250	210	255	215	262.5	222.5	275	235	290	250	300	260	305	265
200	440	250	210	255	215	262.5	222.5	275	235	290	250	300	260	305	265
210	462	250	210	252.5	212.5	260	220	275	235	290	250	300	260	305	265
220	484		-		-	260	220	275	235	290	250	300	260	305	265
230	506		-		-		-	275	235	290	250	300	260	305	265
240	528		-		-		-		-	290	250	300	260	305	265
250	550		-		-		-		-	290	250	300	260	305	265
260	572		-		-		-		-		-	300	260	305	265
265	583		-		-		-		-		-		-	305	265
Maximale scheepslengte		-8.0 m LAT	<b>210</b>	-7.0 m LAT	<b>210</b>	-6.0 m LAT	<b>220</b>	-5.0 m LAT	<b>230</b>	-4.0 m LAT	<b>250</b>	-3.0 m LAT	<b>260</b>	-2.0 m LAT	<b>265</b>

Indien men de beschikbare vaarbaanbreedte onderzoekt ter hoogte van de zwaaizone ZZ1 en ZZ2 die door de locatie van de fietsbrug moet opgegeven worden, dan kan men stellen dat zonder baggeren de zwaaizone opwaarts de Kennedytunnel niet gunstig is voor de dieptelijnen van -8.0 m tot -6.0 m LAT omdat deze door de ondiepe plaat afwaarts de ZZ1 boei een kleinere beschikbare vaarwegbreedte geeft dan ter plaatse van de Rede. Vanaf dieptelijnen van -5.0 m LAT en kleiner heeft men wel meer ruimte beschikbare in breedte dan ter plaatse van de Rede en zouden de schepen afhankelijk van de dieptelijn 10, 15 tot 20 m langer kunnen zijn dan de maximale toegelaten scheeps lengte voor een zwaaimanoeuvre aan de Rede. De zwaaizone ZZ1 en ZZ2 bevat dus meer potentieel voor het zwaaien van (grotere) cruiseschepen omdat men door baggeren de zwaairuimte nog zou kunnen uitbreiden zodat deze ook bij de dieptelijnen van -8.0 m tot -6.0 m LAT groter wordt dan de zwaaizone aan de Rede. Ter plaats van de Rede kan men door de reeds steile linkeroever niet bijkomend baggeren omdat de oever dan zou instorten.

Met betrekking tot de impact van de fietsbrug op de zwaaizone voor cruiseschepen opwaarts de Kennedytunnel ter hoogte van boeien ZZ1 en ZZ2 kan men besluiten:

- De maximale toegelaten scheeps lengte voor zwaaien ter hoogte van de Rede van Antwerpen hangt af van de waterstand tijdens het moment van zwaaien. De maximale scheeps lengte varieert tussen 210 m bij laag water en 265 m bij zeer hoog water. Deze maximale scheeps lengtes houden maar rekening met een speling van de scheepsboeg of het hek tot de kade of de linkeroever van 20 m elk en een kielspeling van 10% van de diepgang. Het zwaaimanoeuvre moet onder alle wind- en stroomcondities kunnen uitgevoerd worden binnen een rechthoek met een maximale zwaailengte van 2.2 keren de scheeps lengte. Indien tijdens het zwaaimanoeuvre deze manoeuvreerruimte wordt overschreden dan loopt het schip aan de grond.
- Dankzij de ruimere zone opwaarts de Kennedytunnel met een lengte van 540 m tussen de boeien ZZ1 en ZZ2 en een vaarwegbreedte die tot 20 m groter is voor dieptelijnen kleiner dan -5.0 m LAT in vergelijking met de zwaaizone aan de Rede, is het opheffen van deze zwaaizone door de locatie van de fietsbrug een beperkende factor voor de maximale scheeps lengte waarbij het risico op aan de grond lopen van het schip zoveel mogelijk binnen de perken blijft.
- Er werd door DVW aangegeven dat in 2018 slechts 2 van de 30 aanlopen gepaard gingen met een zwaaimanoeuvre ter hoogte van de Kennedytunnel (schepen met lengtes van 218 en 247 m). De analyse van de zwaaizones voor cruiseschepen te Antwerpen leert dat beide zwaaizones hun voor- en nadelen hebben en dat het opzoeken van de meer opwaarts gelegen zwaaizone opwaarts de Kennedytunnel voordelen biedt vanaf voldoende rijs van het water door de ruimere zwaaizone die dan ontstaat in vergelijking met de zwaaizone aan de Rede. De nadelen van de zwaaizone aan de Rede zijn de aanwezigheid van pontons en jetties aan beide oevers met een groter gevaar van aanvaring en de steilere oevers (verticaal aan de kade, steil aan de linkeroever) waardoor bij een zwaaimanoeuvre dat te dicht bij de linkeroever wordt uitgevoerd het schip vlugger aan de grond zal lopen in vergelijking met de flauwere oever opwaarts de Kennedytunnel (minimale horizontale afstand van 40 m tussen de -6.0 en -2.0 m LAT lijn voor de zwaaizone ZZ1 en ZZ2 en slechts 20 m tussen deze dieptelijnen aan de Rede).

Voor de toegankelijkheid van cruiseschepen tot de Rede met enkel zwaaien ter plaatse van de Rede na opheffen van de zwaaizone ZZ1 en ZZ2, moet men afhankelijk van de scheeps lengte en de diepgang van het cruiseschip en de aankomst- en vertrektijd nagaan of er voldoende ruimte is om het schip te zwaaien. Indien er niet voldoende ruimte is, zal men ofwel tijdens de verblijftijd van het schip moeten zwaaien of zal men het aankomst- of vertrekuur moeten aanpassen zodat wel veilig gezwaaid kan worden.

## 3 Simulatiestudie

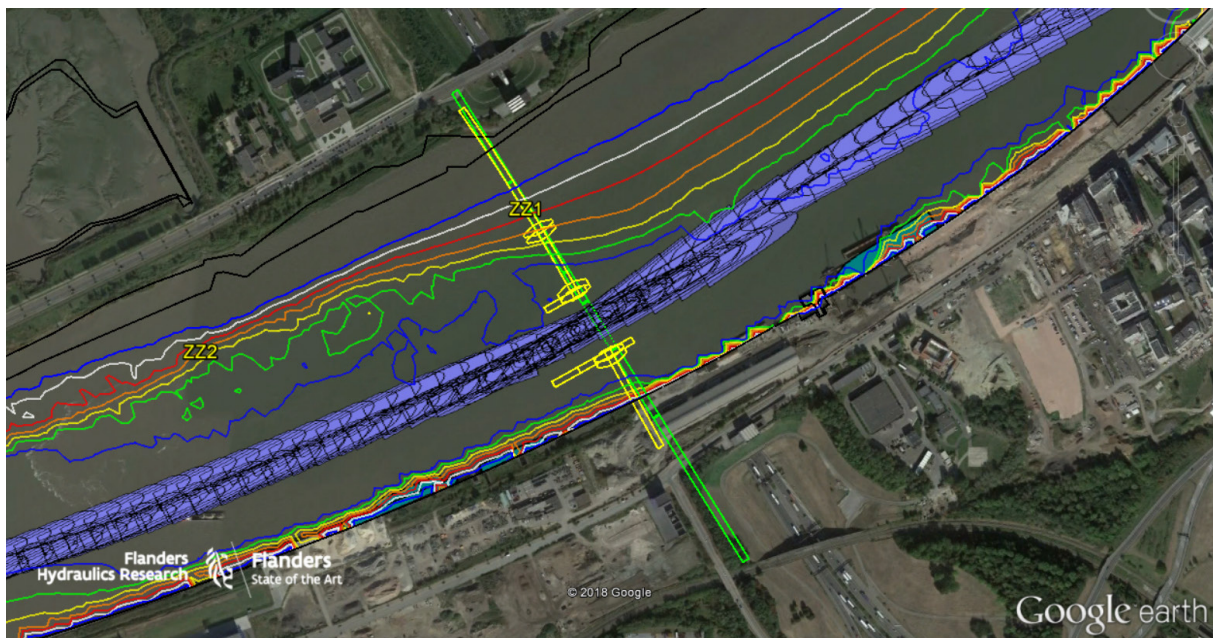
### 3.1 Voorbereiding

Bij de voorbereiding van de simulatiestudie van 26 juni 2019 wordt de nieuwe te onderzoeken locatie van de fietsbrug vergeleken met de voorgaande “gele” en “groene” variant van de fietsbrug in (Eloot *et al.*, 2019). Verder wordt ook de keuze van het ontwerpschip nog geduid en worden de omgevingsparameters zoals bathymetrie, wind en stroming toegelicht.

#### 3.1.1 Locatie van de fietsbrug met drie brugtypes

De nieuwe locatie van het ontwerp van de fietsbrug bevindt zich dichterbij de “groene” (Figuur 5) dan bij de “gele” variant (Figuur 7) van de eerste nautische studie. Dit wordt geïllustreerd door tracks van simulatieruns van de voorgaande simulatiestudie (Eloot *et al.*, 2019) te projecteren op de variant uit de voorgaande studie en de nieuwe locatie uit het huidige deelrapport. In (Figuur 5) wordt zo een vergelijking gemaakt tussen de nieuwe brugtypes op de nieuwe locatie, allen in het geel voorgesteld<sup>3</sup>, en de “groene” variant uit de vorige studie op basis van de runs 003 tot en met 007. Deze runs werden allen uitgevoerd bij een noordwestelijke wind van 7 Bft met het ontwerpschip Rhone zowel in afvaart als opvaart zonder sleepbootassistentie. De diepgang werd ook gevarieerd tussen de geladen diepgang van 10.8 m en de ongeladen diepgang van 7.0 m. Er werd steeds voorstrooms gevaren.

Figuur 5 – Vergelijking met “groene” variant: projectie van de runs 003 tot en met 007 uit (Eloot *et al.*, 2019) op de nieuwe locatie van fietsbrug met drie brugtypes (variant in geel met verschillende brugpijlers en brugdelen)

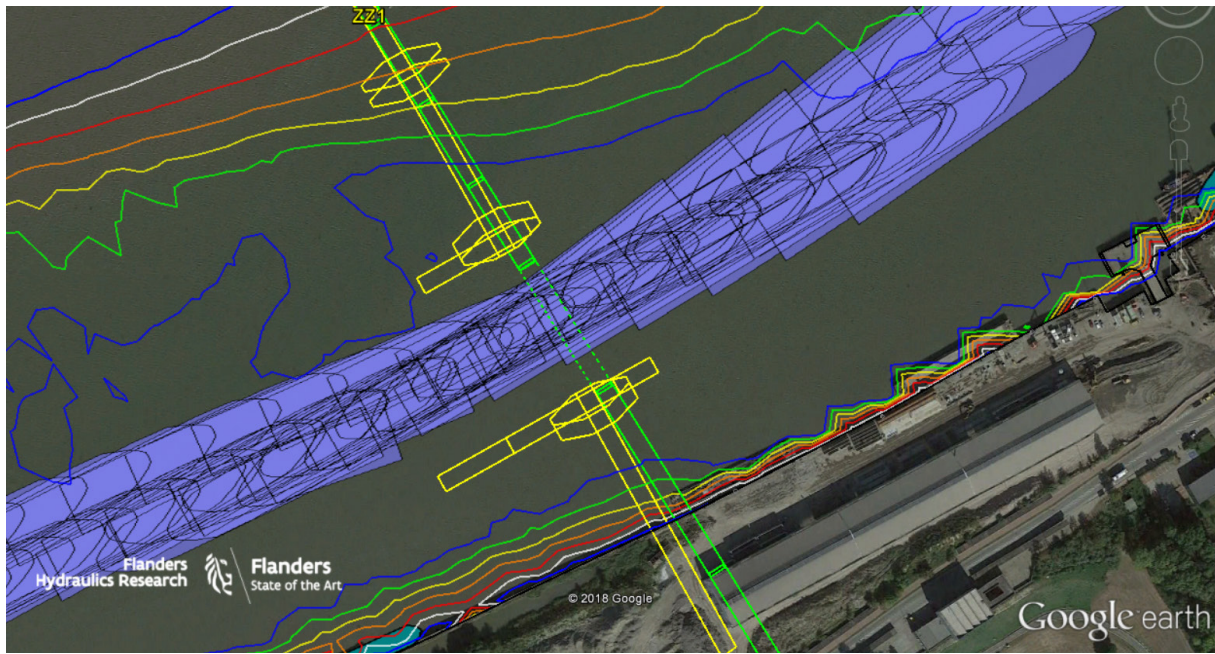


<sup>3</sup> De keuze om de drie brugtypes in dezelfde kleur voor te stellen is om duidelijk aan te geven dat de brugtypes door hun identieke locatie slechts in beperkte mate verschillen van elkaar en ook van de “groene” variant die in de studie (Eloot *et al.*, 2019) als de minst gunstige locatie werd bestempeld.

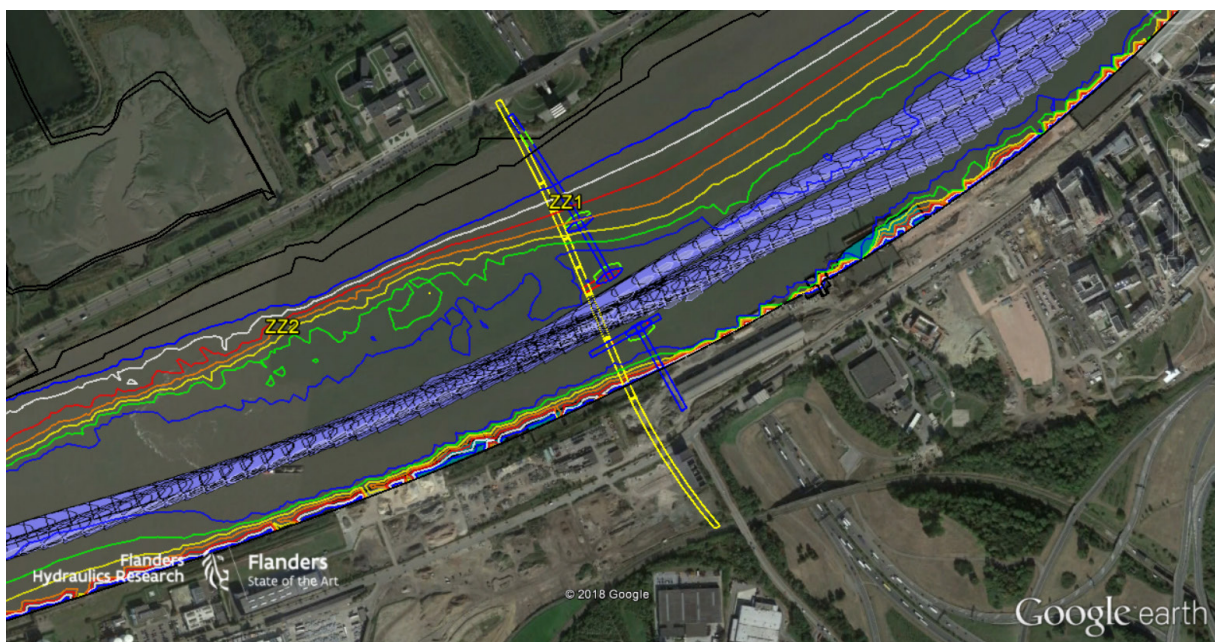


De afstanden van de tracks van simulatieruns tot de pijlers en brugdelen op Figuur 6 bedragen ongeveer minimaal 15 m. De positieve evolutie van de toename van de doorvaartbreedte van 80 m in de voorgaande simulatiestudie (Eloot *et al.*, 2019) naar 90 m in het huidige voorstel van ontwerp is duidelijk zichtbaar.

Figuur 6 – Detail van Figuur 5: vergelijking met “groene” variant: projectie van de runs 003 tot en met 007 uit (Eloot *et al.*, 2019) op de nieuwe locatie van fietsbrug met drie brugtypes (alleen in geel met verschillende brugpijlers en brugdelen)



Figuur 7 - Vergelijking met “gele” variant: projectie van de runs 008 tot en met 012 uit (Eloot *et al.*, 2019) op de nieuwe locatie van fietsbrug met drie brugtypes (groen: basculebrug, blauw: draaibrug met één deel, rood: draaibrug met twee delen)



Eenzelfde vergelijking wordt gemaakt tussen de “gele” variant uit de voorgaande studie en de nieuwe bruglocatie met drie brugtypes door een projectie van de simulatieruns 008, 009, 010 en 012 uit (Eloot *et al.*, 2019) op deze varianten in Figuur 7. De drie brugtypes worden nu onderscheiden door een verschillende kleur toe te passen in Figuur 7 waarbij grote delen van de brug uiteraard identiek zijn (brugdek, positie van de pijlers langs het open gedeelte):

- groen: basculebrug
- blauw: draaibrug met één deel
- rood: draaibrug met twee delen.

De draaibrug met één deel (blauw in Figuur 7 met verschillende overlappende delen met de andere brugtypes) is het brugtype met de grootste beperkende lengte volgens de vaaras door het langere opendraaiende brugdeel. Voor de andere twee brugtypes zijn door de belangrijke lengte van de pijlers zelf de bijkomende delen van de draaibrug in twee delen voor de draaibrug (horizontaal) ten opzichte van de basculebrug (verticaal) minder onderscheidend. Bij een passage van een brug moet men vooral de verhouding van de lengte van het obstakel (de brug) tot de scheepslengte van het ontwerpschip als leidraad nemen. Voor een scheepslengte van 175 m voor het ontwerpschip en lengtes van 140, 77 en 50 m voor respectievelijk de brug met één deel, twee delen en de basculebrug, geeft de brug met één deel een lengte die 80% van de scheepslengte bedraagt terwijl de lengtes van de andere bruggen minder dan 50% van de scheepslengte zijn (44 en 29%).

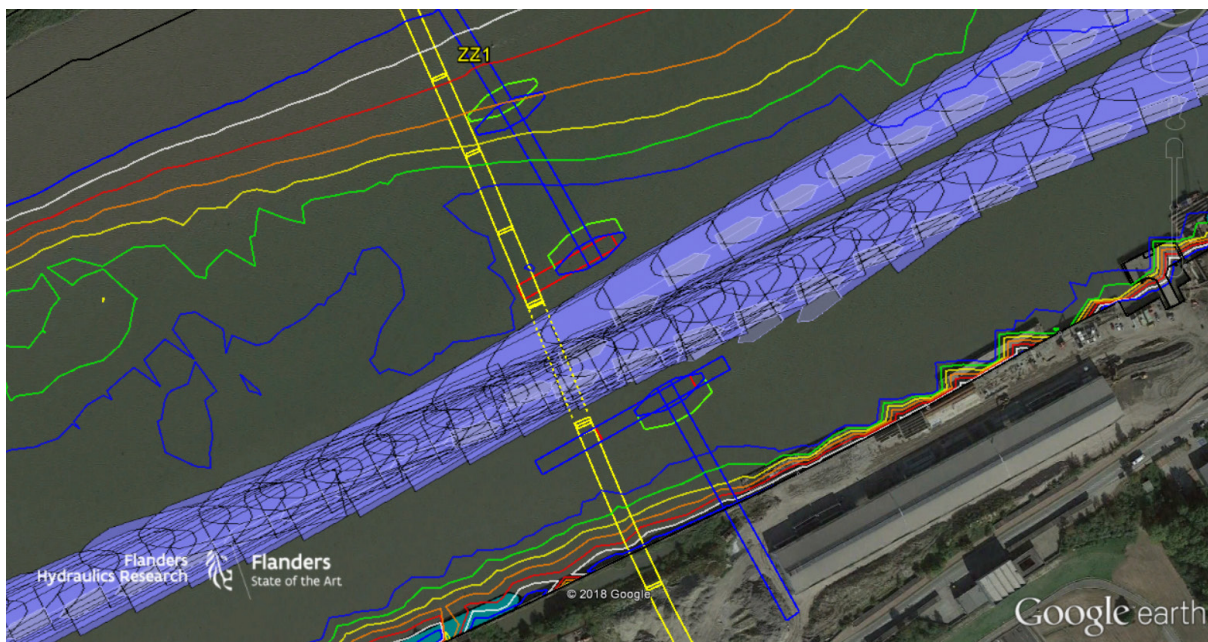
De runs 008 tot en met 010 en 012 werden uitgevoerd bij een noordwestelijke wind van 6 Bft (008, 009 en 012) en 7 Bft (010) met het ontwerpschip Rhone zowel in afvaart als opvaart met en zonder (008) sleepbootassistentie. De diepgang werd nu voor alle simulatieruns op de ongeladen diepgang van 7.0 m ingesteld die een grotere windgevoeligheid geeft. Er werd steeds voorstrooms gevaren.

Aangezien er gekozen werd om de nieuwe te onderzoeken locatie van de brug dichterbij de “groene” variant te leggen, is de padbreedte van de simulatieruns ter plaatse van de nieuwe bruglocatie nog groot.

Deze twee vergelijkingen werden hier enkel gemaakt om de verschillen tussen de nieuwe bruglocatie en de vorige onderzochte varianten duidelijker te illustreren. De evaluatie van de nieuwe bruglocatie met drie brugtypes wordt in dit deelrapport verder besproken op basis van de simulatieruns die op 26 juni 2019 werden uitgevoerd.



Figuur 8 – Detail van Figuur 7: vergelijking met “gele” variant: projectie van de runs 008 tot en met 0010 en 012 uit (Eloot *et al.*, 2019) op de nieuwe locatie van fietsbrug met drie brugtypes (groen: basculebrug, blauw: draaibrug met één deel, rood: draaibrug met twee delen)



### 3.1.2 Ontwerpschip

In de voorgaande simulatiestudie werden simulaties uitgevoerd met twee verschillende simulatieschepen als ontwerpschip (tankers Stolt en Rhone, Tabel 5). Er werd ondertussen op basis van een rondvraag van de opdrachtgever, de Vlaamse Waterweg, bij de bedrijven opwaarts de fietsbrug, bevestigd dat de afmetingen van deze tankers overeenkomen met de maximale te verwachten scheepsafmetingen voor de toekomst.

Verder werden door De Vlaamse Waterweg opmerkingen geuit over de keuze van het hoofdzakelijk simuleren met het moeilijker manoeuvreerbare schip Rhone in vergelijking met het schip Stolt. Aangezien de fietsbrug de toegankelijkheid van de grootste schepen met een gangbare manoeuvreerbaarheid zoals het simulatieschip Rhone niet in het gedrang mag brengen, is de keuze om bij deze bijkomende studie enkel met dit schip te varen gerechtvaardigd. Voor het ontwerp van de fietsbrug en het bepalen van de nautische vereisten is het immers niet de vraag onder welke operationele randvoorwaarden de volledige vloot van zeevaart en binnenvaart die de brug zal passeren, zal kunnen varen maar wel of het grootste te verwachten schip met een representatieve manoeuvreerbaarheid nog onder dezelfde operationele voorwaarden de bedrijven zal kunnen bereiken zoals tot op vandaag mogelijk is.

Tabel 5 – Afmetingen ontwerpschepen voor simulatie

Parameter	Eenheid	Stolt	Rhone
Lengte over alles	m	176.8	175.0
Breedte	m	31.01	31.00
Diepgang	m	10.80	7.0 / 10.8

Tabel 6 – Toerental-snelheid voor de Stolt en Rhone in diep en ondiep water

Simulatieschip	Diep water		Ondiep water	
	Toerental (rpm)	Snelheid (knots)	Toerental (rpm)	Snelheid (knots)
Rhone bij 10.8 m diepgang (diep = 400% UKC, ondiep = 10% UKC)	37.8	4.93	37.8	4.80
	55.2	7.20	55.2	7.02
	72.6	9.47	72.6	9.23
	90	11.74	90	11.44
Rhone bij 7.0 m diepgang (diep = 100% UKC, ondiep = 20% UKC)	37.8	4.89	37.8	4.08
	55.2	7.14	55.2	5.96
	72.6	9.39	72.6	7.84
	90	11.64	90	9.72
Stolt bij 10.8 m diepgang met Beckerroer tot 65 deg (diep = 200% UKC, ondiep = 20% UKC)	15	2.81	15	2.52
	33.402	6.33	33.402	5.61
	51.798	9.82	51.798	8.71
	70.2	13.31	70.2	11.80
Stolt bij 10.8 m diepgang met klassiek roer tot 35 deg (diep = 200% UKC, ondiep = 20% UKC)	15	2.81	15	2.52
	33.402	6.33	33.402	5.61
	51.798	9.82	51.798	8.71
	70.2	13.31	70.2	11.80

Om het verschil in manoeuvreerbaarheid van de Stolt en de Rhone te illustreren worden verschillende eigenschappen van deze schepen in Tabel 6, Tabel 7 en Tabel 8 voorgesteld. De Rhone is een gangbare tanker met een klassiek roer terwijl de Stolt een tanker is die met twee roeruitvoeringen is gemodelleerd, enerzijds met een hoogperformant Beckerroer en anderzijds met een klassiek roer. De simulaties die in de eerste simulatiestudie met de Stolt werden uitgevoerd, hadden betrekking op de versie met een hoogperformant Beckerroer. Het verschil in manoeuvreerbaarheid is duidelijk zichtbaar indien men de manoeuvreereigenschappen bekijkt van de Rhone, de Stolt met Beckerroer en de Stolt met klassiek roer tijdens een draaicirkelproef (Tabel 7 en Tabel 8). Voor de tanker bij een diepgang van 10.8 m heeft de Stolt met Beckerroer een tactische diameter van 1.7 keer de lengte tussen de loodlijnen  $L_{pp}$  tegenover 3.0 en 3.4 keer deze lengte voor de Stolt met klassiek roer en de Rhone met klassiek roer. De Stolt met Beckerroer die tijdens de eerste simulatiestudie werd gebruikt, was dus niet representatief voor tankers (en ook andere scheepstypes in de wereldvloot) die vooral uitgerust zijn met standaardroeren.

Tabel 7 – Manoeuveereigenschappen voor een draaicirkel in diep water, Stolt en Rhone

Simulatieschip	n	V	Advance	Transfer	Tact Dia	ufinal	vfinal	rfinal
	(rpm)	(knots)	[Lpp]	[Lpp]	[Lpp]	(knots)	(knots)	(deg/min)
Rhone bij T = 10.8 m	55.2	7.20	3.58	1.79	3.43	1.70	0.65	-27.834
Rhone bij T = 7.0 m	55.2	7.14	3.01	1.30	2.88	2.38	0.98	-28.332
Stolt bij T = 10.8 m Becker	51.798	9.82	1.79	0.77	1.69	1.68	0.81	-64.95
Stolt bij T = 10.8 m	51.798	9.82	3.13	1.31	3.00	2.52	1.42	-35.334

Tabel 8 – Manoeuveereigenschappen voor een draaicirkel in ondiep water, Stolt en Rhone

Simulatieschip	n	V	Advance	Transfer	Tact Dia	ufinal	vfinal	rfinal
	(rpm)	(knots)	[Lpp]	[Lpp]	[Lpp]	(knots)	(knots)	(deg/min)
Rhone bij T = 10.8 m	55.2	7.20	4.77	3.44	6.87	4.45	0.33	-15.948
Rhone bij T = 7.0 m	55.2	7.14	3.67	2.38	4.89	3.69	0.41	-18.45
Stolt bij T = 10.8 m Becker	51.798	9.82	1.90	1.05	2.11	2.31	0.70	-51.258
Stolt bij T = 10.8 m	51.798	9.82	3.43	2.06	4.21	4.38	0.69	-29.448

### 3.1.3 Bathymetrie, wind en stroming

Hoewel er recentere bodemmetingen beschikbaar waren, werd er voor gekozen om met dezelfde bathymetrie van juni 2018 als in de voorgaande simulatiestudie (Eloot *et al.*, 2019) te simuleren.

Tijdens de simulaties werd voor de invloed van de stroming enkel met maximale vloed- en ebstroom gewerkt. Deze stroomcondities treden viermaal per dag op en hebben dus een belangrijke frequentie van voorkomen en een belangrijke invloed, rekening houdend dat zonder de aanwezigheid van de fietsbrug de stroming geen beperkende factor is in het huidige toelatingsbeleid. Omdat het voorstrooms varen moeilijker is dan tegenstrooms, werden de simulaties in opvaart bij maximale vloedstroom uitgevoerd en in afvaart bij

maximale ebstroom<sup>4</sup>. In (De Maerschallck *et al.*, 2019) werd een toename van de stroom verwacht door de vermindering van de doorstroomsectie onder invloed van de pijlers van de fietsbrug. Idealiter wordt door middel van numerieke berekeningen de impact van de pijlers in de waterweg op de stroming begroot en wordt een aangepast tweedimensionaal stroomveld geïmplementeerd tijdens de simulaties. Deze berekening was echter nog niet voorhanden. Rekening houdend dat de dimensie van de pijlers groter is dan aangenomen in (Eloot *et al.*, 2019) door het weerstaan van de impact van een aanvaring met een schip tot een snelheid van 8 knopen, is de vermenigvuldigingsfactor van 1.2 om de toegenomen stroom (20%) in rekening te brengen, een mogelijke eerste aanname voor effecten die zeker zullen optreden.

De windrichting werd gevarieerd tussen zuidelijk, zuidwestelijk, noordwestelijk en noordelijk. Hoewel in de voorgaande studie de noordwestelijke windrichting als de moeilijkste werd aangegeven, werd met deze grotere variatie van de windrichting getracht om de invloed van de werkelijke spreiding van de sterke winden beter te omvatten. De windkracht werd gevarieerd tussen 5, 6 en 7 Beaufort.

De gesimuleerde wind in de simulator is een vlagerige wind in grootte en in richting. De vlagerigheid die optreedt binnen een synoptische meetperiode van 10 minuten wordt nagebootst met het Von Karman spectrum. Daarnaast wordt in de simulator rekening gehouden met een terreinklasse die gebaseerd is op de indeling in ruweheidsklassen volgens Davenport. De afscherming van de wind door afgemeerde schepen, de fietsbrug of kades werd niet in rekening gebracht tijdens de simulatie. Afhankelijk van het type brug kan dit wel een invloed hebben.

Bij alle vaarten werd een vlagerige wind bij terreinklasse 3 toegepast. Voor deze klasse is de procentuele verdeling van de werkelijke wind over de Beaufortklassen gegeven in Tabel 9. Voor een gekozen Beaufortklasse van 7 Bft tijdens de simulaties zal bijvoorbeeld volgens Tabel 9 gedurende 23.6 % van de tijd de windkracht in Beaufort overeenkomen met 8 Bft. Omdat het evalueren van de windsterkte tijdens het varen op de rivier in werkelijkheid gebaseerd wordt op de geregistreerde windsnelheden op de windmeters van de schepen of VTS, blijken tijdens simulaties de gemiddelde windklassen sterker te zijn dan in werkelijkheid. Een gemiddelde windkracht van 7 Bft tijdens de simulaties zal dus door de loodsen door de pieken in werkelijkheid als een 8 Bft klasse geïnterpreteerd worden. Deze laatste opmerking moet men begrijpen als enerzijds een objectieve meting van de windkracht met de verdeling zoals in Tabel 9 en de subjectieve beoordeling van de windkracht door een waarnemer bij het volgen van de ogenblikkelijke windmeter. In het laatste geval zal een waarnemer altijd vooral de hoge windsnelheden waarnemen en zal hij nooit in functie van een nominale windsnelheid de werkelijke Beaufortschaal interpreteren. Objectivering is echter noodzakelijk om hiermee om te gaan.

Tabel 9 – Procentuele verdeling van de werkelijke wind over de Beaufortklassen voor terreinklasse 3

Nominale windsnelheid		Procentuele verdeling van de werkelijke wind over de Beaufortklassen						
Bft	m/s	3 Bft	4 Bft	5 Bft	6 Bft	7 Bft	8 Bft	9 Bft
4	6.7	2.7	84.6	12.7				
5	9.4	0.7	18.5	61.6	18.9	0.3		
6	12.3	0.1	1.9	21.6	54.9	20.5	1	
7	15.5		0.2	3.5	23.7	46.8	23.6	2.2

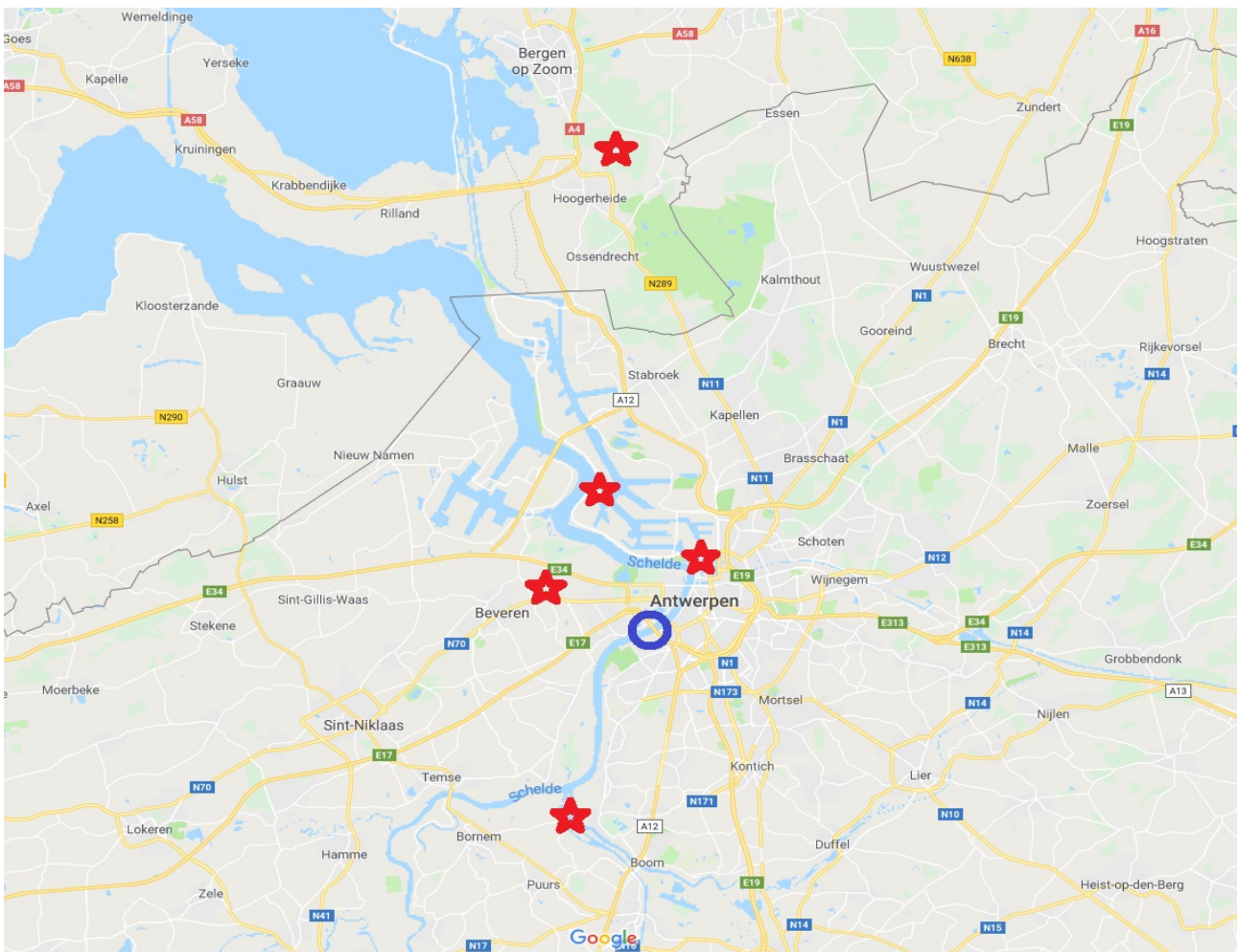
<sup>4</sup> In het centrale deel van de beweegbare brug is de maximale vloedstroom 1.6 m/s (3.0 kn) en is de maximale ebstroom 1.2 m/s (2.4 kn) zonder een verhoging met 20%. Met een verhoging van 20% worden deze stroomsnelheden 1.9 m/s (3.6 kn) en 1.5 m/s (2.9 kn).



De procentuele verdeling van de werkelijke wind over de Beaufortklassen in Tabel 9 is een op de realiteit gebaseerde verdeling van de windsnelheden bij een bepaalde windkracht uitgedrukt in Beaufort. Hoe hoger de nominale windsnelheid of hoe harder het dus waait, hoe groter de verdeling van de gemeten windsnelheden over meer Beaufortklassen. Bij een nominale windsnelheid van 6.7 m/s (overeenkomend met 4 Bft) zal 85% van de metingen in de 4 Bft klasse vallen en de overige metingen vooral in de 5 Bft en minder in de 3 Bft klasse. Deze steile piek in de verdeling wordt veel breder naarmate de nominale windsnelheid toeneemt. Een nominale windsnelheid van 15.5 m/s (of dus 7 Bft) veronderstelt steeds dat de windsnelheden naast de 47% van de tijd in de 7 Bft klasse ook 24% van de tijd elk in de 6 en de 8 Bft klasse zullen liggen. Dit wordt ook zo gesimuleerd tijdens de studie.

Verder moet men deze gesimuleerde Beaufortklassen in verband brengen met de gemeten windsnelheden op locaties in de buurt van de ontworpen fietsbrug. Hiervoor heeft de Vlaamse Waterweg de windgegevens geanalyseerd of gerapporteerd op vijf locaties (Figuur 9).

Figuur 9 – Vijf meetlocaties voor wind (rode ster) ten opzichte van de locatie van de fietsbrug (blauwe cirkel)

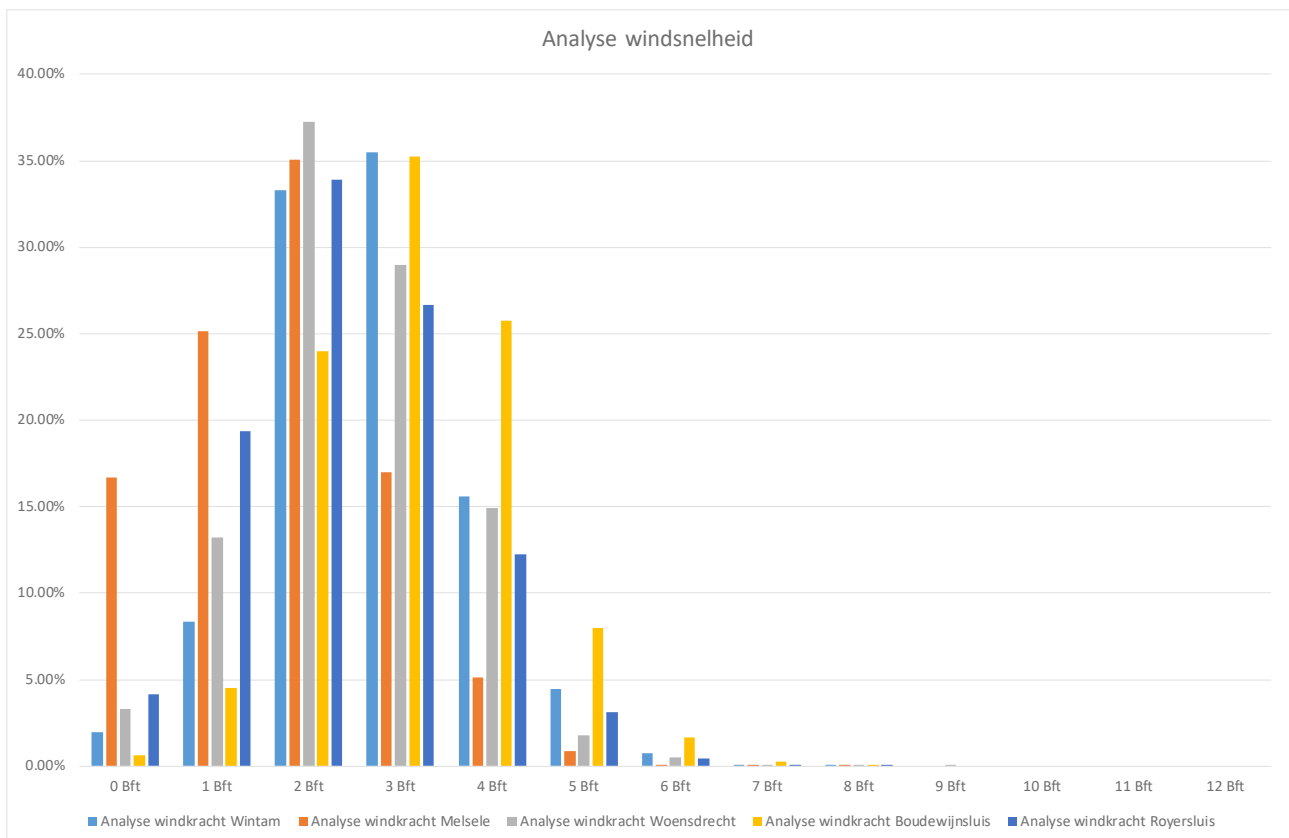


De metingen op deze vijf locaties werden op een verschillende manier uitgevoerd en op een verschillende manier verwerkt voor ook verschillende registratieperiodes:

- Windmeting Wintam: 1 meting/ minuut: windrichting + windsnelheid, periode 28/05/2018 - 28/5/2019 => gemiddelde over 10 min cfr windkrachtberekening KMI
- Windmeting Melsele (VMM): 1 meting/15 minuten: windrichting + windsnelheid, periode 28/05/2012 - 28/5/2019
- Windmeting Woensdrecht (KNMI): uurgemiddelde windsnelheid, gemiddeld over laatste 10 min, hoogste windstoot + windrichting, periode 01/05/2000 - 26/5/2019
- Windmeting Boudewijnsluis (Port of Antwerp): data volgens richtlijnen World Meteorological Organization, periode 2016 & 2017
- Windmeting Royersluis (Port of Antwerp): data volgens richtlijnen World Meteorological Organization, periode 2016 & 2017

De verdeling van de verschillend gemeten windsnelheden over de Beaufortklassen is voorgesteld in Figuur 10. Er worden belangrijke verschillen waargenomen tussen de verdeling aan de Boudwijn- en Royersluis en de andere locaties. Vooral ook de windmetingen te Melsele vallen op door de hoge aantallen bij 0 en 1 Bft. De metingen aan de Boudewijnsluis geven een verdeling met een groter percentage in de hogere Beaufortklassen (4 en 5 Bft). Het is belangrijk om deze verschillen verder te onderzoeken en te valideren met andere meetdata.

Figuur 10 – Analyse van de windsnelheid op de vijf meetlocaties uit Figuur 9



De onderzochte windklassen van 5 Beaufort en hoger komen volgens de metingen aan de Boudewijn- en Royersluis maar gedurende 5 tot 10% van de tijd voor. Aangezien men echter de passage van de fietsbrug wil toelaten tot een gemiddelde windsnelheid van 7 Beaufort zoals in de huidige regelgeving, blijft het noodzakelijk om bij deze windkracht simulaties uit te voeren voor het vastleggen van de vereisten voor het ontwerp.



### 3.2 Simulatieprogramma

Het simulatieprogramma, uitgevoerd op 26 juni 2019 door twee loodsen en één sleepbootkapitein, is samengevat in Tabel 10. Alle simulaties werden uitgevoerd met het schip Rhone. De windkracht werd gevarieerd tussen 5, 6 en 7 Bft (9 simulaties tegenover 4 bij 6 Bft en 4 bij 5 Bft). Er werden 6 simulaties in de variant met basculebrug, 3 in de variant met een draaibrug met twee delen en 8 in de variant met een draaibrug met één deel uitgevoerd.

Omdat uit de voorgaande simulatiestudie (Eloot *et al.*, 2019) bleek dat het bij de onderzochte Beaufortklassen moeilijk was om de scheepssnelheid bij passage van de brug onder de 8 knopen over de grond te houden, werd er tijdens deze studie in meer simulaties een achtersleepboot ingezet. De pijlers worden ontworpen op een impactsnelheid van 8 knopen voor het ontwerpschip zodat de snelheid bij passage van de brug onder deze waarde zou moeten blijven.

Tabel 10 – Overzicht simulaties

Run	T (m)	Variant	Op/Af	Stroom	Wind	Sleepboot
18_120_014	10.8	Draai 2	Op	VLOED 1.2 <sup>5</sup>	ZW 6 Bft	14 ton Voith
18_120_015	10.8	Draai 2	Op	VLOED 1.2	NW 6 Bft	14 ton Voith
18_120_016	7.0	Draai 1	Op	VLOED 1.2	NW 7 Bft	14 ton Voith
18_120_017	7.0	Draai 1	Af	EB 1.2	NW 7 Bft	14 ton Voith
18_120_018	7.0	Draai 1	Af	EB 1.2	ZW 6 Bft	14 ton Voith
18_120_019	7.0	Draai 1	Af	EB 1.2	ZW 7 Bft	14 ton Voith
18_120_020	7.0	Draai 1	Af	EB 1.2	N 7 Bft	14 ton Voith
18_120_021	7.0	Bascule	Op	VLOED 1.2	N 5 Bft	Geen
18_120_022	7.0	Bascule	Op	VLOED 1.2	Z 5 Bft	Geen
18_120_023	10.8	Bascule	Op	VLOED 1.2	Z 7 Bft	65 ton ASD
18_120_024	10.8	Bascule	Op	VLOED 1.2	N 7 Bft	65 ton ASD
18_120_025	10.8	Bascule	Op	VLOED 1.2	N 7 Bft	65 ton ASD
18_120_026	7.0	Bascule	Af	EB 1.2	NW 5 Bft	Geen
18_120_027	7.0	Draai 1	Af	EB 1.2	Z 5 Bft	Geen
18_120_028	7.0	Draai 1	Af	EB 1.2	Z 7 Bft	65 ton ASD
18_120_029	7.0	Draai 1	Af	EB 1.2	N 7 Bft	65 ton ASD
18_120_030	7.0	Draai 2	Af	EB 1.2	NW 6 Bft	65 ton ASD

<sup>5</sup> De toevoeging 1.2 duidt op de vermenigvuldigingsfactor voor de stroomsterkte.

Om de verdeling van de verschillende parameters (diepgang, stroom/richting, met sleepbootassistentie en wind - kracht en richting) over de uitgevoerde simulaties per brugtype duidelijker te zien, werden Tabel 11 en Tabel 12 toegevoegd. Er is geen evenredige verdeling van de verschillende parameters over de brugtypes omdat de doorvaartopening voor alle brugtypes zich op exact dezelfde plaats bevindt en deze locatie voor passages van de zeevaart belangrijker is dan het brugtype. Zoals reeds in 3.1.1 gemeld, is er bijna geen onderscheid tussen de basculebrug en de draaibrug uit twee delen. Voor de draaibrug met één deel is alleen het langere horizontale draaideel onderscheidend. De doorvaartopening en de beschikbare ruimte in de aanloop aan de zijde van de Rede van Antwerpen (dus opwaartse richting) zijn minder onderscheidend voor de brug met één draaideel ten opzichte van de andere brugtypes. In de keuze van de parameters werd er gevarieerd volgens het verloop van de simulatiedag (afwisseling van loodsen, niet starten met hoogste windkracht, anticiperen op resultaten uit voorgaande simulaties).

Tabel 11 – Verdeling van de parameters diepgang, stroom en sleepboothulp over de simulaties per brugtype

Type brug	Aantal	T = 7.0 m	T = 10.8 m	Vloed/Op	Eb/Af	Sleep
Draai 1	8	8	0	1	7	7
Draai 2	3	1	2	2	1	3
Bascule	6	3	3	5	1	3

Tabel 12 – Verdeling van de windparameters over de simulaties per brugtype

Type brug	Aantal	5 Bft	6 Bft	7 Bft	Z	ZW	NW	N
Draai 1	8	1	1	6	2	2	2	2
Draai 2	3	0	3	0	0	1	2	0
Bascule	6	3	0	3	2	0	1	3

In de verdeling van de parameters zijn een aantal verschillen tussen het brugtype met één horizontaal draaideel en de andere twee brugtypes vast te stellen:

- Voor het type met één draaideel zijn alle simulaties uitgevoerd bij de windgevoeligere diepgang van 7.0 m en zijn, op één na, alle simulaties uitgevoerd in afvaart. Bij de andere twee brugtypes zijn deze parameters beter verdeeld over de twee brugtypes (4 bij 7.0 m diepgang en 5 bij 10.8 m) of tonen ze een tegengestelde parameter (7 simulaties in opvaart en slechts 2 in afvaart voor deze brugtypes ten opzichte van 7 simulaties in afvaart en slechts 1 in opvaart voor het brugtype met één draaideel).
- Voor het type met één draaideel zijn 6 simulaties bij de hoogste windkracht van 7 Bft uitgevoerd en komen de andere Beaufortklassen elk maar in één simulatie voor. De simulaties zijn verder gelijk verdeeld over de vier windrichtingen. Voor de andere twee brugtypes is er een gelijke verdeling over de drie Beaufortklassen en zijn de simulaties over de verschillende windrichtingen ook ongeveer gelijk verdeeld.

Hoewel de condities waarbij de verschillende brugtypes gesimuleerd werden, variëren, dient opgemerkt te worden dat de nautische verschillen van deze varianten gering zijn. Enkel het langere draaideel voor de draaibrug met één deel aan de opwaartse zijde van de fietsbrug zal een invloed hebben op de nautische beoordeling van de drie brugtypes. De gemeenschappelijke kenmerken (locatie van de brug, aanloopgeulen tot de brug aan opwaartse en afwaartse zijde) wegen dus meer door in de beoordeling.

### 3.3 Analyse

De simulaties worden geanalyseerd op basis van de feedback van de loodsen (Bijlage 1) en de padbreedtes van het schip in KMZ bestanden te openen in Google Earth (Bijlage 2). Op deze KMZ bestanden wordt ook het tijdsverloop van de controleparameters (machine en roer), de scheeps- en stroomsnelheden (langs, dwars en giersnelheid) en, indien gebruikt, van de thrust van de sleepboot weergegeven.

Bij de analyse wordt een onderscheid gemaakt tussen simulaties uitgevoerd in opvaart enerzijds en in afvaart anderzijds. Dit onderscheid wordt gemaakt omdat de locatie van de doorvaartopening voor alle brugtypes identiek is en enkel aan de afwaartse zijde een klein (bascule- en draaibrug met twee delen) tot groter verschil (draaibrug met één deel) waar te nemen is tussen de drie brugtypes.

#### 3.3.1 Opvaart: aanloop vanaf afwaartse zijde van de brugtypes

Over alle brugtypes heen werden 8 simulaties uitgevoerd bij opvaart en vloedstroom (voorstroms). Deze simulaties worden verder verdeeld volgens de diepgang en de windkracht in Tabel 13. In Tabel 13 worden ook nog de snelheid over de grond (speed over ground, SOG), de rate of turn (ROT) en de heading van het schip weergegeven wanneer het schip zich in langse richting in het midden van de brugopening bevindt. De heading van het schip ten opzichte van het noorden kan vergeleken worden met de voorligging van de lichtenlijn (LL) door het midden van de brugopening (als Error LL). Deze voorligging bedraagt 60.83 deg in afvaart en 240.83 deg in opvaart.

Tabel 13 – Simulatieruns in opvaart: diepgang, brugtype, wind, sleepboot, speed over ground, rate of turn, heading en koersafwijking ten opzichte van de lichtenlijn

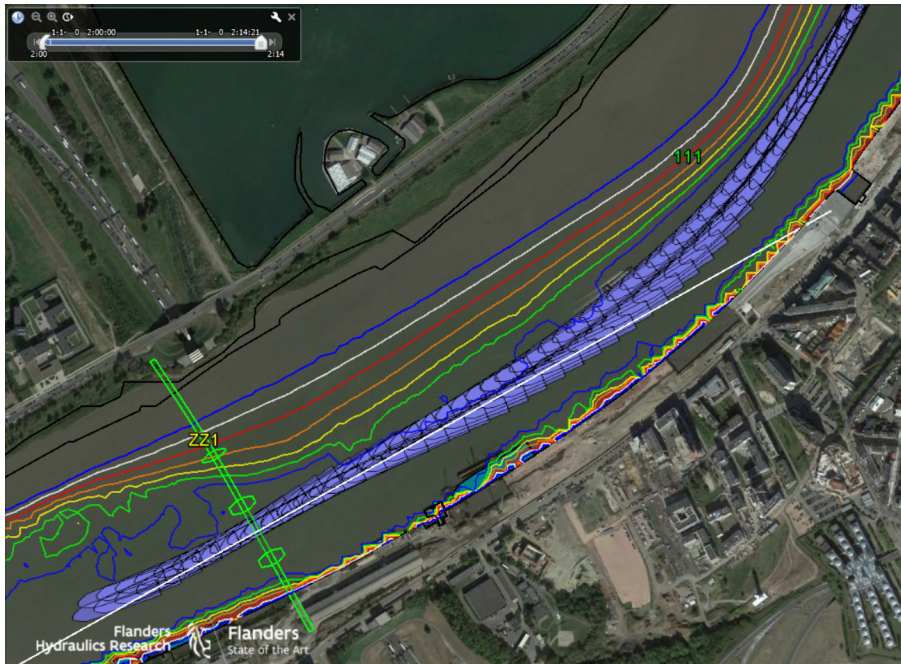
Run	T (m)	Variant	Wind	Sleepboot	SOG (kn)	ROT (deg/min)	Heading (deg)	Error LL (deg)
18_120_021	7.0	Bascule	N 5 Bft	Geen	8.76	-0.14	240.08	-0.75
18_120_022	7.0	Bascule	Z 5 Bft	Geen	7.31	9.18	236.46	-4.38
18_120_016	7.0	Draai 1	NW 7 Bft	14 ton Voith	8.19	-15.13	256.93	16.10
18_120_014	10.8	Draai 2	ZW 6 Bft	14 ton Voith	6.71	-2.49	239.94	-0.90
18_120_015	10.8	Draai 2	NW 6 Bft	14 ton Voith	7.56	5.48	232.87	-7.97
18_120_023	10.8	Bascule	Z 7 Bft	65 ton ASD	7.30	-3.25	238.11	-2.72
18_120_024	10.8	Bascule	N 7 Bft	65 ton ASD	6.78	9.97	226.65	-14.18
18_120_025	10.8	Bascule	N 7 Bft	65 ton ASD	7.71	2.00	240.19	-0.65

De twee simulaties 021 en 022 die bij 5 Bft werden uitgevoerd en bij de diepgang van 7.0 m bij de variant met basculebrug zijn voorgesteld in Figuur 11. Deze simulaties werden uitgevoerd zonder sleepboothulp bij een noordelijke en zuidelijke wind maar men kan vaststellen dat in run 021 (Tabel 13) de scheepssnelheid SOG groter is dan 8 knopen en dus groter dan de toegelaten maximale snelheid voor contact met de pijlers. Tijdens run 022 (Figuur 13) kan de snelheid zonder sleepboot wel onder de 8 knopen gehouden worden maar tijdens de passage van de brug treedt nog een ROT van 9 deg/min<sup>6</sup> op en ook de afwijking ten opzichte van de lichtenlijn is meer dan 4 deg. Tijdens run 016 met de 7.0 m diepgang en NW 7 Bft wordt de draaibrug met

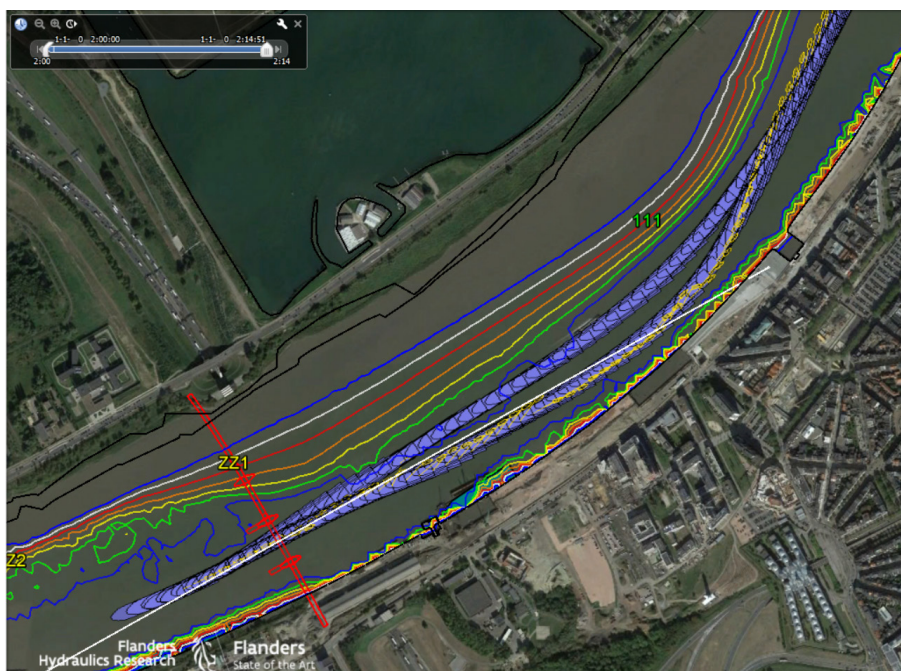
<sup>6</sup> Zelfs tot 19 deg/min wanneer het achterschip zich nog tussen de pijlers bevindt en de afstand tot de noordelijke pijler slechts 13 m is bij zuidelijke wind.

één deel, voornamelijk onder invloed van de sterke wind, gepasseerd met een koersafwijking van 16 deg ten opzichte van de lichtenlijn. Dit is een zeer grote waarde die samen met de SOG van net meer dan 8 knopen en de ROT van -15 deg/min wijst op een onaanvaardbare passage van de brug. De 14 ton Voith sleepboot die tijdens deze passage wordt ingezet, wordt meermaals op maximaal vermogen gebruikt waardoor er geen reserve is en die bovendien niet voldoende is om een goede aanloop van de brug bij deze windkracht te bekomen. De loods stelt voor om een zwaardere sleepboot in te zetten zodat bij deze sterke stroom en wind er voldoende sleepbootkracht aanwezig is voor het corrigeren van snelheid en ROT.

Figuur 11 – Opvaart (T = 7.0 m): runs 021 en 022 bij windkracht 5 Bft met basculebrug, zonder sleepbootassistentie

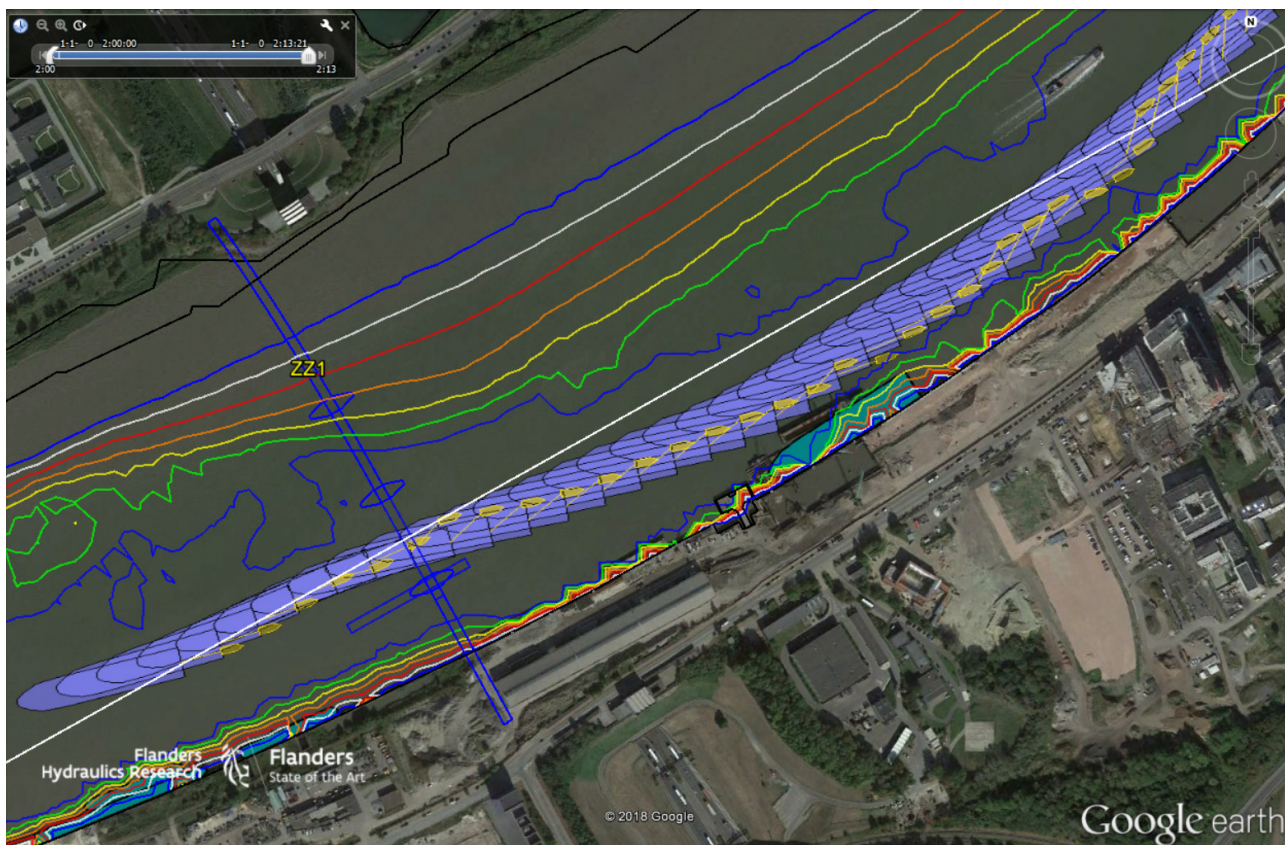
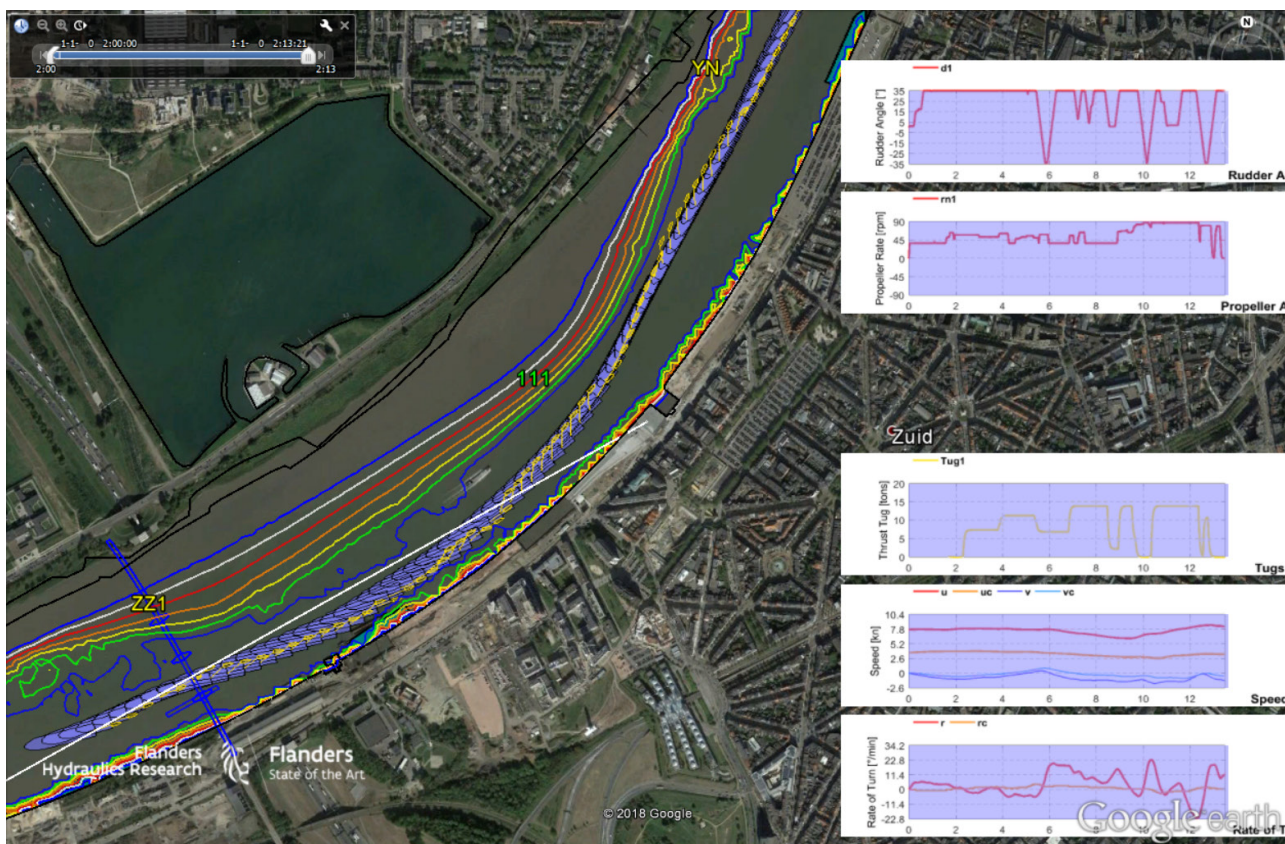


Figuur 12 – Opvaart (T = 10.8 m): runs 014 en 015 bij windkracht 6 Bft met draaibrug met twee delen, 14 ton achtersleepboot





Figuur 13 – Opvaart (T = 7.0 m): run 016 bij windkracht NW 7 Bft met draaibrug met één deel, 14 ton achtersleepboot: overzicht en detail

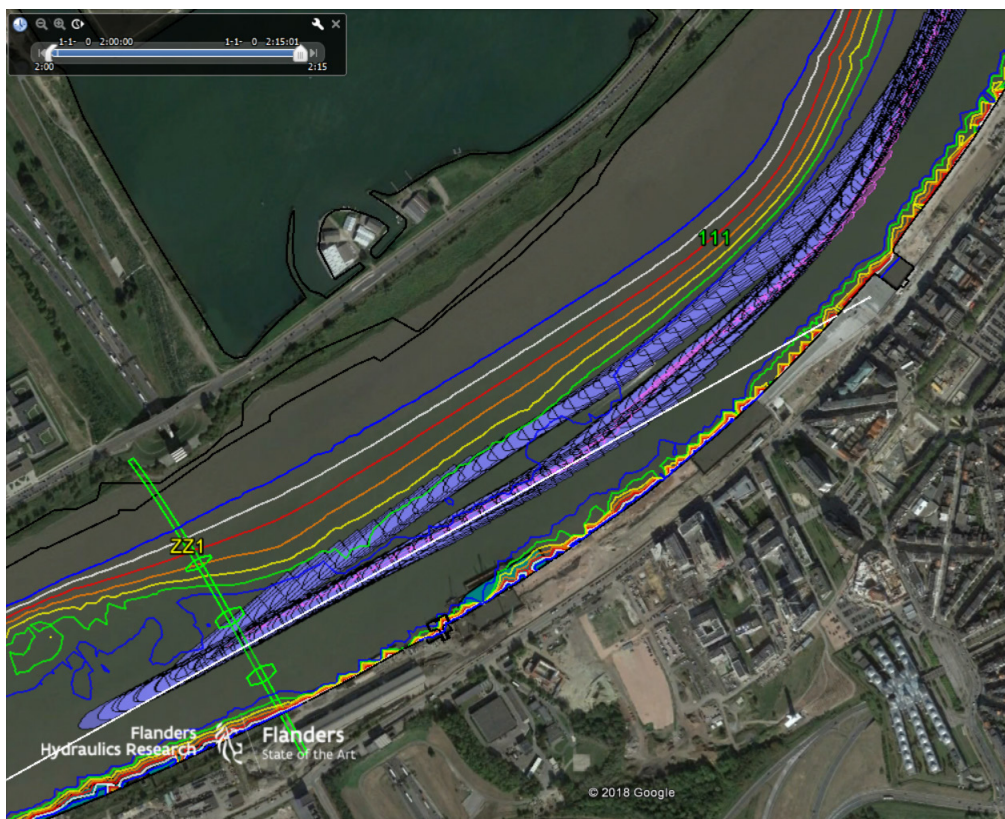




De simulatieruns bij de geladen diepgang van 10.8 m zijn opgesplitst volgens de windkracht met 6 Bft in Figuur 12 en 7 Bft in Figuur 14. Runs 014 en 015 waren de eerste gewenningsvaarten voor beide loodsen voor deze simulatiedag. Omwille van de resultaten van de voorgaande simulatiestudie in (Eloot *et al.*, 2019) werd vanaf 6 Bft meteen een achtersleepboot ingezet. Eerst was dat een Voith met 14 ton bollard pull, type Follow me, maar later werd vastgesteld dat bij 6 Bft zeer vaak maximaal vermogen werd toegepast zodat er geen reserve was op de sleepboot. In de runs 023 tot en met 025 bij 7 Bft werd daarom meteen een Azimuth Stern Drive (ASD) sleepboot van 65 ton bollard pull gekozen. Op de Schelde zetten de sleepbedrijven namelijk ASD sleepboten in die een minimale bollard pull van 65 ton hebben. Sleepboten met kleinere vermogens zijn niet beschikbaar.

De simulaties 014 en 015 bij 6 Bft (Figuur 12) hebben qua padbreedte een grotere breedte dan deze bij 5 Bft (Figuur 11) maar tijdens de passage van de brug wordt ook eerder de doorgang ten noorden van de lichtenlijn gepasseerd, ondanks de tegengestelde windrichtingen die worden toegepast. In run 024 valt dit nog sterker op en kan men het schip niet meer opgelijnd krijgen in de buurt van de lichtenlijn waardoor het schip in aanvaring komt met de noordelijke pijler. Dezelfde condities als in run 024 werden herhaald in run 025. In alle simulaties probeert men tegen de wind in (dus hoger in de wind) het schip naar de brug te brengen. Door de zeer asymmetrische bathymetrie zowel afwaarts (zeer brede en lange ondiepte aan linkeroever) als opwaarts (zie 3.3.2 ondiepte aan rechteroever) van de brug ziet men dat voor een opwaartse aanloop van de brug in deze paragraaf de schepen eerder dichterbij de linkeroever (dus de noordelijke helft van de doorgang van de brug) passeren. Als men te laag ten opzichte van de lichtenlijn de brug aanloopt zoals in Figuur 13 dan kan men heel moeilijk weg van de rechteroever. De natuurlijke bathymetrie en de bochtige vorm van de Schelde opwaarts en afwaarts van de fietsbrug werken zeer nadelig voor veilige passages van de brug. Loopt men iets te noordelijk of te zuidelijk de brug aan dan kan men mogelijk de externe hydrodynamische effecten van de oevers samen met de stroming en de wind moeilijk compenseren (ook grote roerhoeken nodig) zodat men het risico loopt de brug aan te varen.

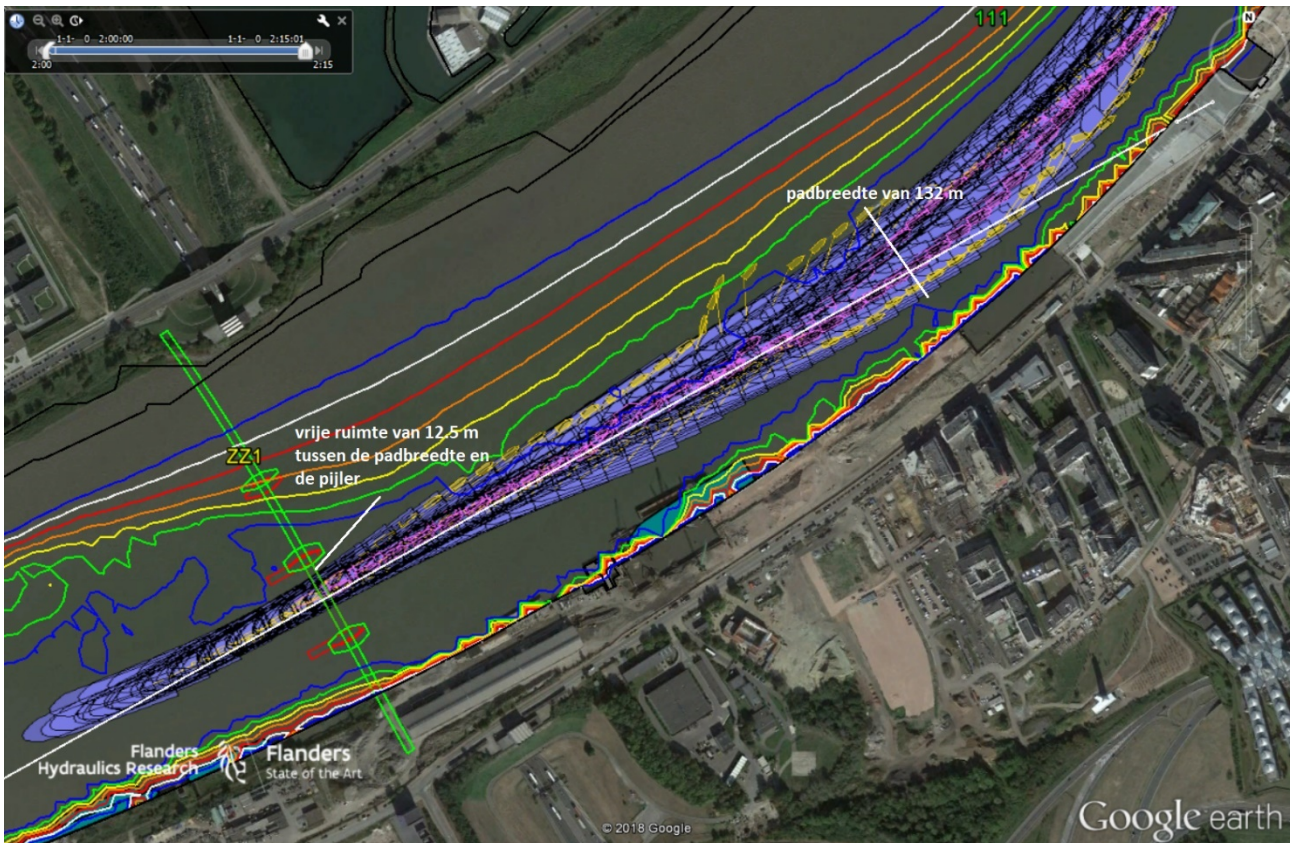
Figuur 14 – Opvaart (T = 10.8 m): run 023, 024 en 025 bij windkracht 7 Bft met basculebrug, 65 ton achtersleepboot





Als men alle simulatieruns samenbrengt voor de opvaart, waarbij er eigenlijk nagenoeg geen onderscheid is tussen de drie brugtypes aangezien de draaiende brugdelen zich aan de opwaarste zijde bevinden en niet tot weinig hinderen, en men verwijdert de twee simulatieruns die beide onaanvaardbaar waren (run 016 bij NW 7 Bft en run 024 bij N 7 Bft met grote afwijking van de heading ten opzichte van de voorligging van de lichtenlijn) dan bekomt men een gezamenlijke padbreedte zoals voorgesteld in Figuur 15.

Figuur 15 – Samengestelde tracks van de runs bij opvaart: 014, 015, 021, 022, 023 en 025



Er kunnen een aantal conclusies getrokken worden (Figuur 15, Tabel 13):

- Op ongeveer vijf scheeps lengtes voor de fietsbrug is bij het bochten onder verschillende windcondities en voorstrooms een padbreedte waar te nemen van 132 m. Naar gelang het inzetten van het bochten en de windinvloed vertrekt het schip op vijf scheeps lengtes noordelijker of zuidelijker in het diepste deel van de vaargeul.
- Door de vorm van de bocht en de belangrijke ondiepte aan linkeroever afwaarts de fietsbrug bevindt het schip zich in hoofdzaak ten noorden van de lichtenlijn op vier tot vijf scheeps lengtes voor de brug.
- Tegelijkertijd stelt men vast dat, ook bij verschillende windrichtingen, ter plaatse van de brug zelf de samengestelde tracks zich ook eerder in de noordelijke helft en dus ten noorden van de lichtenlijn bevinden. Enerzijds heeft dit te maken met de nadering vanuit de bocht op vijf scheeps lengtes en minder en het bochten zelf en anderzijds heeft dit ook te maken met de asymmetrie in de bathymetrie en de positie van de meeste tracks ten opzichte van deze ongelijke oevers. Oevereffecten treden hierdoor op en beïnvloeden de aanloop van de brug.
- Ook indien het schip op drie tot vijf scheeps lengtes voor de brug ten zuiden van de lichtenlijn uitkomt, gaat dit gepaard met een grote hoekafwijking tussen de heading van het schip en de voorligging van de lichtenlijn door het midden van de brug zodat men het schip weer moet bijsturen om deze afwijking te verminderen. Hierdoor komt het schip ter plaatse van de brug ook eerder in de noordelijke helft van de brugopening terecht.

- Aangezien de impactsnelheid voor contact tussen het ontwerpschip en de brugpijlers niet groter mag zijn dan 8 knopen werd geprobeerd om de snelheid inderdaad onder deze waarde te houden. Bij zes van de acht simulaties in opvaart is dat gelukt, maar bij één van de twee simulaties uitgevoerd bij windkracht 5 Bft kon men deze snelheid niet voldoende laag houden. De twee simulaties bij windkracht 5 Bft werden ook uitgevoerd zonder sleepboot zodat er enkel met schroef en roer kon gestuurd worden. Aangezien een roer een passief controleorgaan is, vereist meer stuurvermogen voor het schip meer roercapaciteit die met grotere roerhoeken en/of grotere toerentallen kan bekomen worden. De opmerking van de loodsen om een achtersleepboot ook vanaf windkracht 5 Bft in te zetten heeft dus ook te maken met het houden van de passeersnelheid onder de 8 knopen met voldoende behoud van stuurvermogen.
- In vergelijking met de voorgaande simulatiestudie (Eloot *et al.*, 2019), waarbij de passagesnelheid meestal groter was dan 8 knopen door het gebrek aan een achtersleepboot, werd tijdens deze simulatiestudie wel gestreefd naar een passagesnelheid onder de 8 knopen. Hoe lager de passagesnelheid, hoe groter de invloed van de wind door een lagere relatieve windsnelheid en hoe moeilijker dus het oplijnen van het schip voor de passage van de brug. Verder zorgt een lagere snelheid over de grond voor een lagere snelheid door het water die mee bepaald wordt door de stroomsterkte. Hoe lager de snelheid door het water hoe lager het stuurvermogen van het roer door de lagere aanstroomsnelheid. Enerzijds moet men de snelheid lager dan 8 knopen houden indien de impactsnelheid voor de pijlers op deze waarde wordt ingesteld en anderzijds wil men de snelheid zo hoog mogelijk houden (dus zo dicht mogelijk bij de maximale impactsnelheid) om de invloed van wind en voorstrooms varen te beperken.
- Tijdens de simulaties werd er vanaf 6 Bft een achtersleepboot ingezet in overeenkomst met de conclusies van de voorgaande simulatiestudie<sup>7</sup> (Eloot *et al.*, 2019). Bij windkracht 6 Bft bleek een 14 ton bollard pull sleepboot regelmatig vol te moeten trekken terwijl ook het roer op maximale roerhoek werd ingesteld. Het verhogen van het schroeftoerental om het stuurvermogen te verhogen was echter niet aangewezen omdat de scheepssnelheid dan zou oplopen aangezien er geen reserve meer was op de achtersleepboot. Daarom werd in hoofdzaak bij 7 Bft een 65 ton bollard pull sleepboot ingezet. Ook al trekt deze niet op volle vermogen maar toch meer dan de 14 ton van de Follow me, deze bollard pull werd geselecteerd omdat de ASD sleepboten van de sleepbedrijven die opereren op de Schelde geen kleinere bollard pull hebben.
- Voor de passage van de brugopening met het ontwerpschip is er bij de opvaart geen verschil te zien tussen de brugtypes. Ook al worden op Figuur 15 enkel de basculebrug en de draaibrug met twee delen voorgesteld, blijkt het duidelijk dat de kortste afstanden optreden tussen de pijlers en het ontwerpschip met een minimale afstand van 12.5 m. De positie van de zijde van de pijlers grenzend aan de doorvaartopening is identiek voor de drie brugtypes. Vanuit de opvaart is er dus geen voorkeur voor een brugtype.
- Twee van de acht simulaties in opvaart zouden in realiteit geleid hebben tot een aanvaring met de brug via de noordelijke pijler of tot een risicovol aanloopmanoeuvre of passage van de brug. Bij de toegankelijkheid van schepen moet men ook rekening houden met de aanvaarding van de uit te voeren manoeuvres door de rederijen en meer specifiek door de kapitein op het schip. Te risicovolle manoeuvres zullen aanleiding geven tot een weigering van een kapitein om een manoeuvre uit te voeren of het opleggen van limieten in de omgevingscondities die dan weer de toegankelijkheid voor de bedrijven verminderen.

---

<sup>7</sup> In (Eloot *et al.*, 2019) werden geen simulaties bij 5 Bft uitgevoerd zodat geen uitspraak kon gedaan worden over het al dan niet inzetten van sleepboten bij lagere windsnelheden dan 6 Bft.



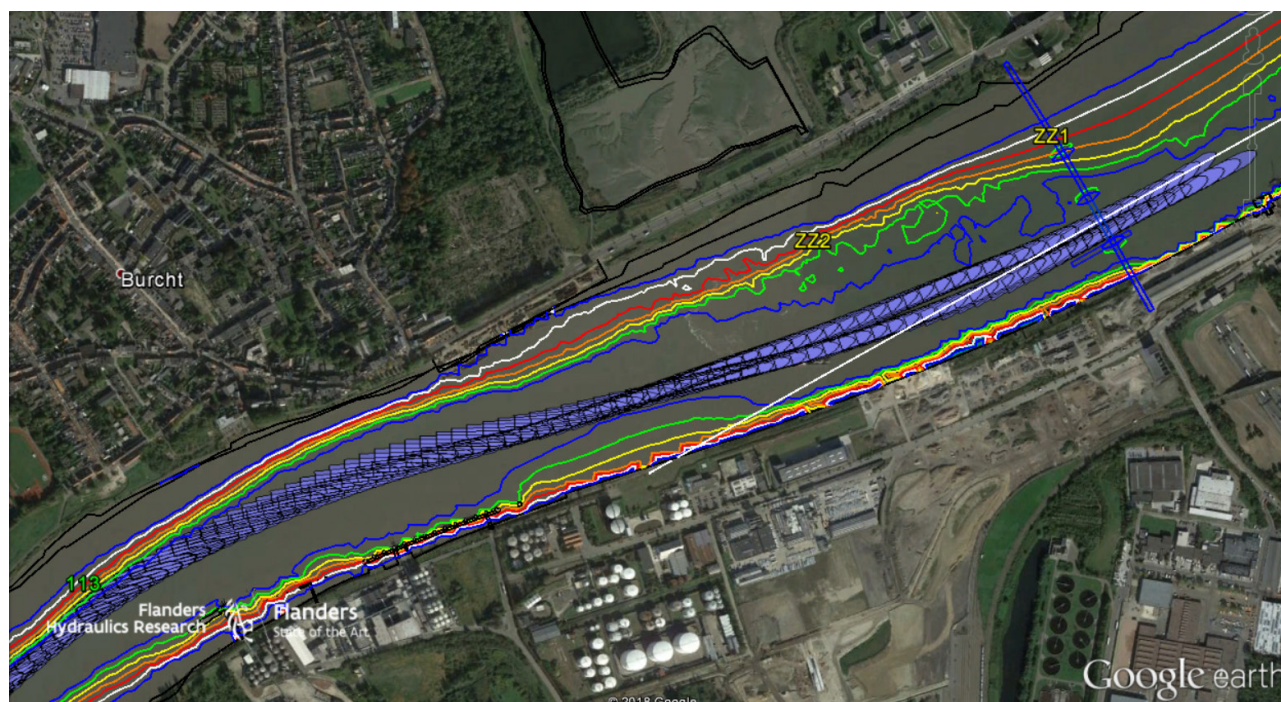
### 3.3.2 Afvaart: opwaartse zijde van de brugtypes

Over alle brugtypes heen werden 9 simulaties uitgevoerd bij afvaart en ebstream (voorstreams). Alle simulaties werden ook uitgevoerd bij de diepgang van 7.0 m en met de brugvariant en de windcondities zoals samengevat in Tabel 14.

Tabel 14 – Simulatieruns in afvaart: diepgang, brugtype, wind, sleepboot, speed over ground, rate of turn, heading en koersafwijking ten opzichte van de lichtenlijn

Run	T (m)	Variant	Wind	Sleepboot	SOG (kn)	ROT (deg/min)	Heading (deg)	Error LL (deg)
18_120_026	7.0	Bascule	NW 5 Bft	Geen	6.97	-6.31	59.12	-1.72
18_120_027	7.0	Draai 1	Z 5 Bft	Geen	7.40	3.19	60.20	-0.63
18_120_018	7.0	Draai 1	ZW 6 Bft	14 ton Voith	8.90	8.55	54.72	-6.11
18_120_030	7.0	Draai 2	NW 6 Bft	65 ton ASD	6.79	-19.97	63.50	2.67
18_120_017	7.0	Draai 1	NW 7 Bft	14 ton Voith	7.97	-1.00	59.61	-1.23
18_120_019	7.0	Draai 1	ZW 7 Bft	14 ton Voith	7.67	-1.38	63.63	2.80
18_120_020	7.0	Draai 1	N 7 Bft	14 ton Voith	6.96	-2.88	61.27	0.44
18_120_028	7.0	Draai 1	Z 7 Bft	65 ton ASD	7.46	6.35	67.32	6.49
18_120_029	7.0	Draai 1	N 7 Bft	65 ton ASD	6.97	-6.31	59.12	-1.72

Figuur 16 – Afvaart (T = 7.0 m): run 026 en 027 bij windkracht 5 Bft met basculebrug of draaibrug met één deel, zonder sleepbootassistentie

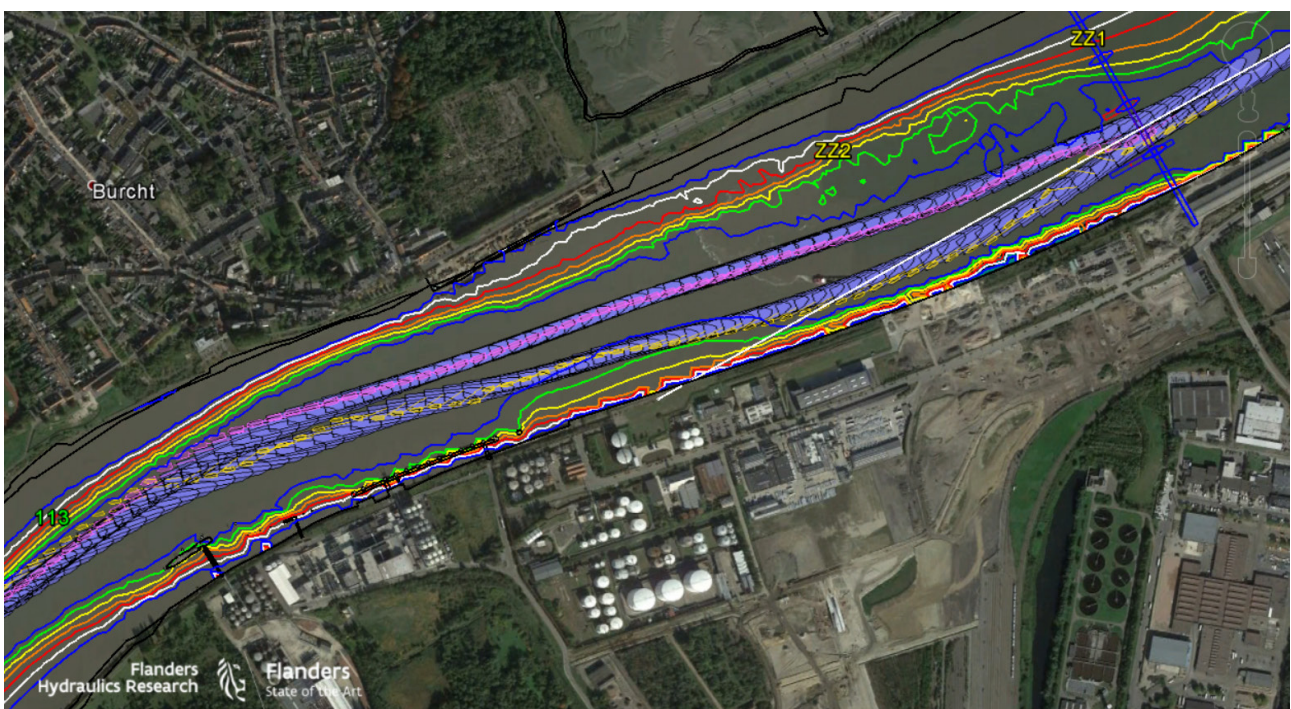


De twee simulaties 026 en 027 die bij windkracht 5 Bft werden uitgevoerd en voor twee verschillende brugvarianten (basculebrug en draaibrug met één deel) zijn voorgesteld in Figuur 16. Deze simulaties werden uitgevoerd zonder sleepboothulp bij een noordwestelijke en zuidelijke wind. Voor beide schepen was de scheepssnelheid kleiner dan 8 knopen (Tabel 14) maar in run 027 met de zuidelijke wind was de afstand tussen de pijlers en het draaideel van de brug en het schip met 3.5 m onaanvaardbaar. De stroomeffecten langs de pijlers en de oevereffecten van de pijlers zijn niet opgenomen in deze simulatiestudie maar een dergelijke kleine afstand laat een zeer groot risico op contact tussen brug en schip. De loodsen geven tijdens de feedback aan dat slechts een afstand van 15 m tussen de scheepszijde en de pijlers een veilig gevoel geeft tijdens de passage van de brug.

In Figuur 16 zijn de trajecten van het schip voorgesteld vanaf de bocht opwaarts van boei 113 tot voorbij de brug. Indien men deze tracks in detail bekijkt, dan stelt men vast dat het schip in afvaart eerst een smalle bocht moet nemen om vervolgens te moeten tegensturen en dan geen aanlooplengte krijgt om op te lijnen voor de passage van de brug. In run 026, met de meest noordelijke aanloop, komt men pas op de lichtenlijn, die het midden van de brug aangeeft, vlak voor de brug. In run 027 komt men op iets meer dan twee scheepslengtes op de lichtenlijn maar omdat men nog aan het tegenbochten is (wat ook weer moet gecompenseerd worden) schiet men door onder de lichtenlijn en kan men het schip onmogelijk nog op een aanvaardbare afstand (minstens 10 m volgens de loodsen) van de brugpijlers brengen.

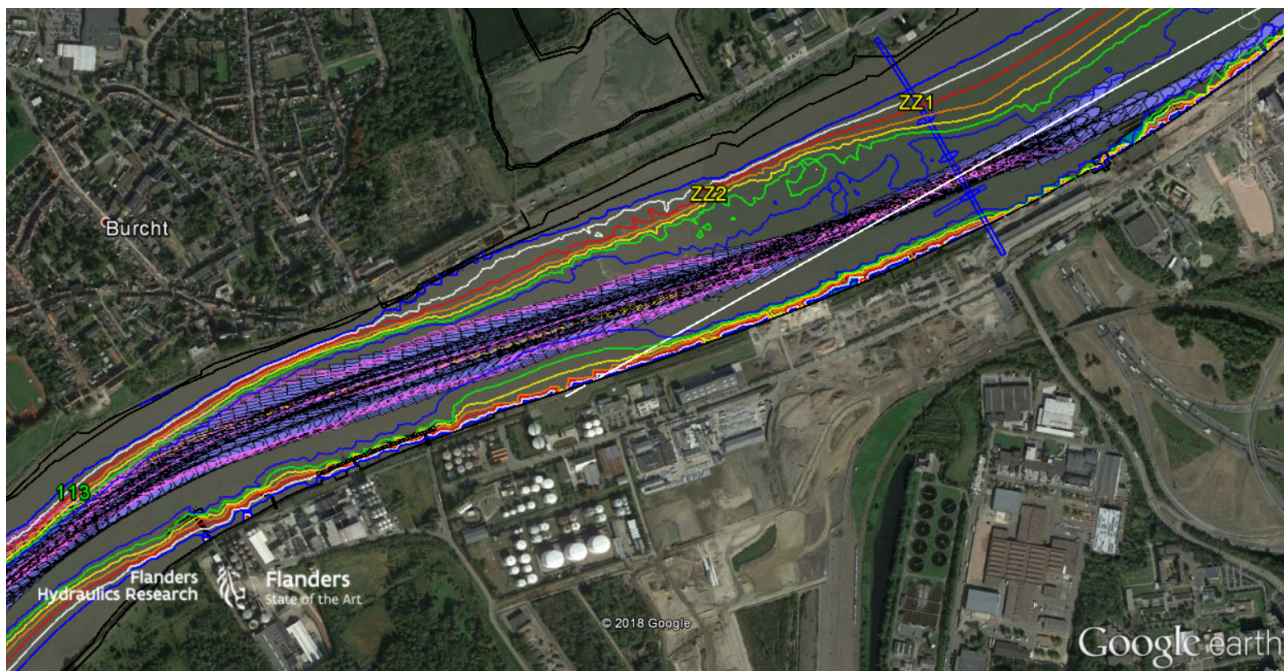
Simulatieruns 018 en 030 werden uitgevoerd bij een zuidwestelijke en noordwestelijke wind met kracht 6 Bft (Figuur 17). Bij de zuidwestelijke wind (run 018) wordt een zuidelijk pad gevaren (mede onder invloed van de wind) waarbij het schip terug ten zuiden van de lichtenlijn doorschiet en niet meer opgelijnd kan worden op de lichtenlijn. Hierdoor wordt de draaibrug met één deel rakelings angevaren maar komt men ook te dicht bij de pijlers. Deze simulatie werd uitgevoerd met een 14 ton achtersleepboot en door het moeilijke aanloopmanoeuvre loopt de snelheid op tot boven de 8 knopen (Tabel 14, 8.9 knopen). De koersafwijking met de lichtenlijn is belangrijk met 6 graden verschil. Ook bij de aanloop vanuit het noorden onder invloed van een noordwestelijke wind en met een 65 ton achtersleepboot is de afstand tot het noordelijke brugdeel onaanvaardbaar klein (6 m). Tijdens de passage van de brug probeert het schip ook met een grote rate of turn van bijna 20 graden het schip terug op te lijnen wat ook wijst op een risicovolle passage.

Figuur 17 – Opvaart (T = 7.0 m): run 018 en 030 bij windkracht 6 Bft met draaibrug met één of twee delen, 14 of 65 ton achtersleepboot





Figuur 18 – Afvaart (T = 7.0 m): run 017, 019, 020, 028 en 029 bij windkracht 7 Bft met draaibrug met één deel, 14 of 65 ton achtersleepboot



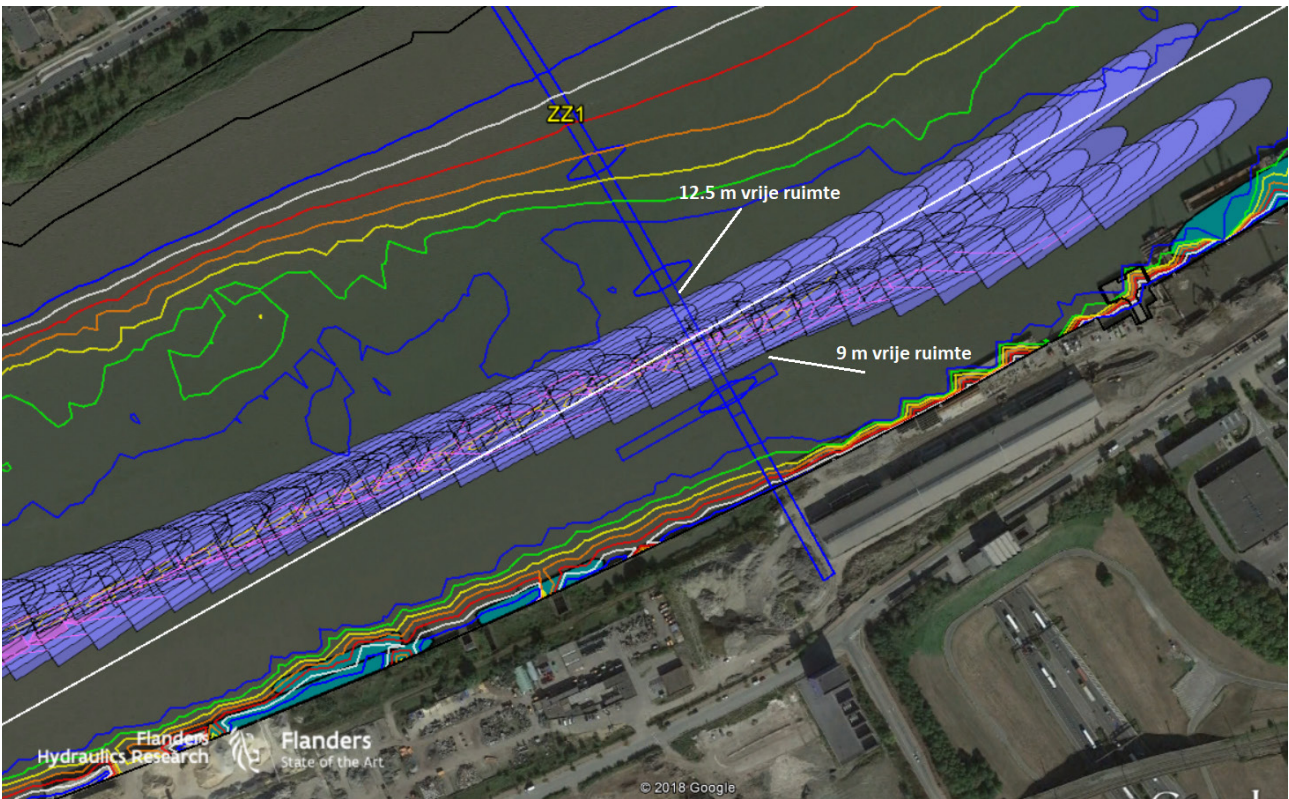
Alle simulaties bij windkracht 7 Bft werden uitgevoerd met de draaibrug met één deel. Dit werd zo gekozen omdat deze brugvariant de meeste beperkingen inhoudt. Op basis van de tracks kan men ook beoordelen hoe de passages met de andere twee brugvarianten zouden geweest zijn. Op basis van Figuur 18 ziet men dat er minder onder de lichtenlijn is doorgeschooten en dat men meer geprobeerd heeft om vanuit het noorden de lichtenlijn aan te varen. Eén run (028) komt afwaarts van de brug wel te dicht bij de rechteroever omdat de aanloop van de brug onder een koersafwijking van 6.5 graden er voor zorgt dat men bij het vervolg van het manoeuvre, ook onder invloed van de zuidelijke wind, het schip niet goed tegen de wind in kan terugbrengen naar de vaargeul. Oevereffecten zullen dit verloop nog versterken.

Als de tracks nog opgesplitst worden volgens de noordelijke of zuidelijke windrichting en meer in detail worden voorgesteld (Figuur 19), dan kan men in (b) vaststellen dat de runs bij de zuidelijke windrichtingen onder de grootste koersafwijkingen ten opzichte van de voorligging van de lichtenlijn zijn uitgevoerd en (meer specifiek run 028) de kleinste afstand geven tot de afwaartse zijde van de draaibrug. Bij de passage van de brug liggen de tracks volledig onder de lichtenlijn die het midden van de brugopening aangeeft. Het aanlopen in de lichtenlijn is bijna onmogelijk. Bij de noordelijke windrichtingen (a) is de gemeenschappelijke padbreedte van de drie simulatieruns opwaarts groter dan bij de zuidelijke windrichtingen en bovendien vooral aan de afwaartse zijde groot. Dit duidt nogmaals op een moeilijk aanloopmanoeuvre naar de brug in afvaart. Aan de zuidzijde is de kleinste afstand slechts 9 m en kleiner dan de 10 m die de loodsen aanvaardbaar vinden en de 15 m die als veilig wordt ervaren.

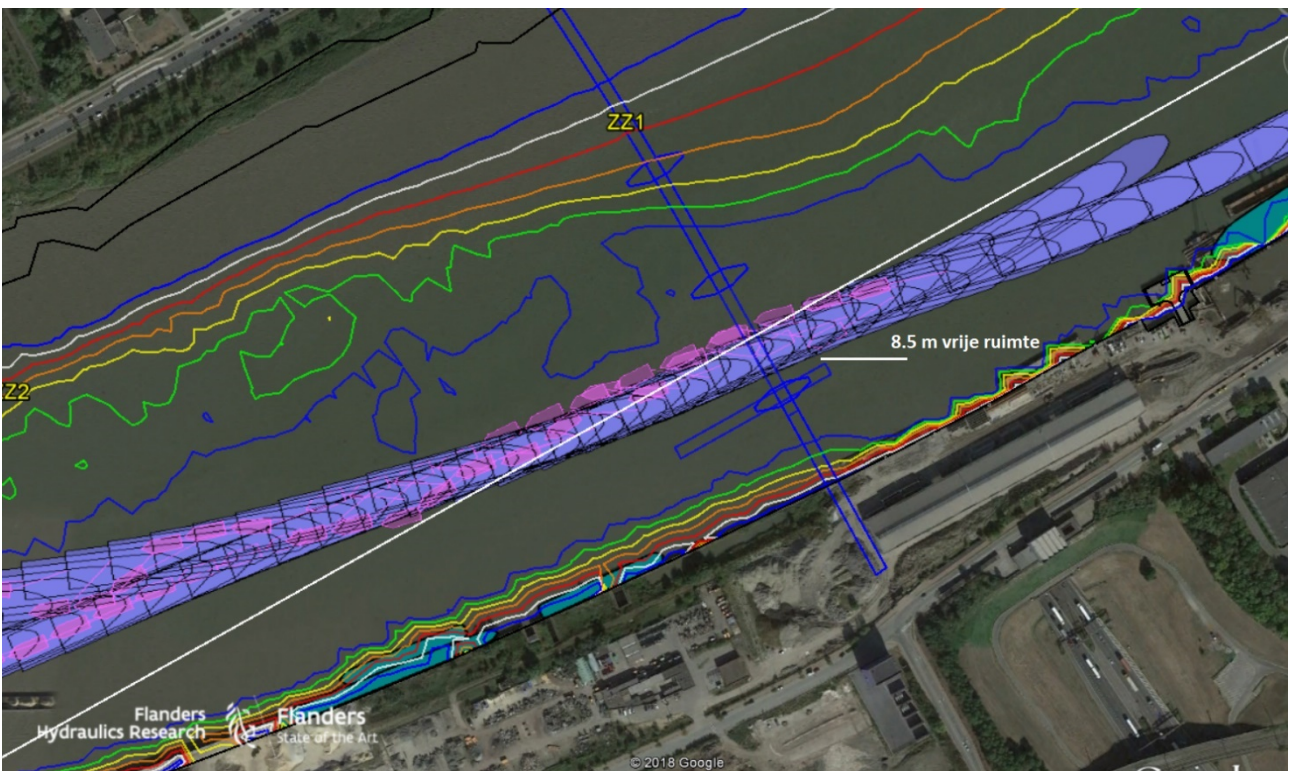
Hoewel drie van de vijf simulaties bij 7 Bft met een achtersleepboot van 14 ton werden uitgevoerd, is meer bollard pull noodzakelijk omdat de effectiviteit van een sleepboot afneemt naarmate de snelheid door het water toeneemt. Rekening houdend dat tijdens deze simulatiestudie steeds voorstrooms werd gevaren, is de snelheid door het water kleiner dan de snelheid over de grond (onder de 8 knopen) maar is de wendbaarheid van sleepboten bij 4 à 5 knopen door het water minder dan bij nog lagere snelheden. Voldoende reserve op de bollard pull van de sleepboten is dus noodzakelijk om te vermijden dat men geen reserve meer heeft op het roer (meermaals hard over roergeven) of de snelheid te hoog oploopt.



Figuur 19 – Afvaart (T = 7.0 m): noordelijke (a) en zuidelijke (b) windrichtingen



(a) Run 017, 020 en 029



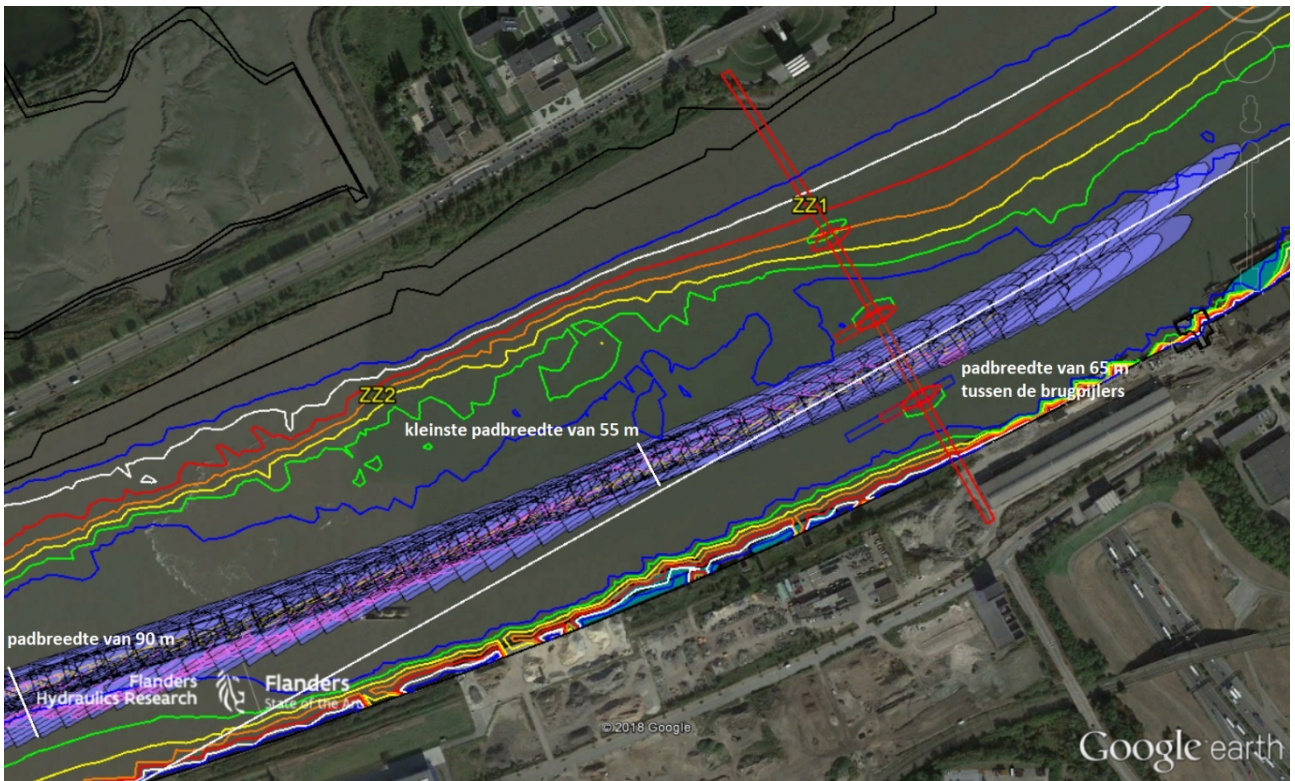
(b) Run 019 en 028



Indien men alle simulaties samenbrengt die een minimale aanvaardbare afstand van 10 m tussen brug en schip geven, dan behoudt men slechts vier van de negen simulaties (run 017, 019, 020 en 026). Het merendeel van de behouden runs zijn simulaties uitgevoerd bij windkracht 7 Bft met een 14 ton sleepboot. De volgende conclusies kunnen getrokken worden voor de afvaart (Figuur 20, Tabel 14):

- De padbreedte van de simulaties in afvaart komende uit de bocht (meest opwaarts) bedraagt 90 m. Deze breedte neemt verder af naar een minimale breedte van 55 m halverwege tussen de boeien ZZ1 en ZZ2 om dan weer toe te nemen tot een breedte van 65 m ter plaatse van de brug.
- Vijf van de negen simulaties werden uitgesloten omwille van onaanvaardbare afstanden tot de brug. Van de vier overgebleven simulaties zijn er drie bij een noordelijke windrichting (NW en N) en één bij een zuidwestelijke richting (van vier uitgevoerde runs) waaruit zou kunnen blijken dat een zuidelijke windrichting ongunstiger is. Omdat men in de afvaart niet kan oplijnen op de lichtenlijn moet men zorgen dat men vanuit een beperkte sector (aangegeven met de tracks en de padbreedte van 90 m op Figuur 20) de brug aanloopt. Indien men buiten deze sector een aanloopmanoeuvre uitvoert dan zal men de koersafwijking nog moeilijk kunnen corrigeren voor de brugpassage.
- Omdat in de afvaart en met de gekozen locatie en de oriëntatie van de drie brugtypes het aanloopmanoeuvre moeilijk verloopt (zie de conclusie van de voorgaande studie met voorkeur voor de gedraaide variant), komt men zowel noordelijker als zuidelijker ten opzichte van de lichtenlijn uit maar zelden over verschillende scheepslengtes op de lichtenlijn wat gewenst is voor een brugpassage. Met een padbreedte van 65 m voor een schip met een breedte van 31 m betekent dit meer dan een verdubbeling. Indien men ervan uitgaat dat men er kan in slagen om binnen deze 65 m padbreedte te blijven en men wenst nog aan beide zijden een vrije ruimte van 15 m om een veilige afstand tussen schip en brug te garanderen dan moet men de brugopening vergroten naar minstens 95 m.
- Behalve in één run (018) is men er steeds ingeslaagd om de snelheid over de grond onder de 8 knopen te houden. Hiervoor werd bij alle simulaties vanaf windkracht 6 Bft wel een achtersleepboot ingezet. In tegenstelling tot de simulaties bij opvaart kon men bij windkracht 5 Bft wel de snelheid onder de 8 knopen houden. Tegelijkertijd kan men vaststellen dat tijdens deze simulaties het roer meermaals op hard over (geen reserve meer) moet gezet worden en dat men ook engine kicks moet geven om de aanstroming van het roer te verbeteren. Een sleepboot bij windkracht 5 Bft zal het stuurvermogen van het schip vergroten zonder dat de snelheid te hoog oploopt en zal hierdoor het aanvaringsrisico tijdens de brugpassage verkleinen.
- Net zoals bij de opvaart wordt ook bij de afvaart aangeraden om eerder een 65 ton dan een 14 ton sleepboot te gebruiken vanaf windkracht 6 Bft. De reserve op de 14 ton sleepboot die bovendien moet opereren in snelheden door het water van 5 knopen en meer is immers te weinig om een voldoende wendbare sleepboot te voorzien.
- Voor de passage van de brugopening met het ontwerpschip is er bij de afvaart wel een verschil te zien tussen de brugtypes. Aangezien de draaiende brugdelen zich voor het grootste gedeelte aan de opwaartse zijde bevinden hinderen deze delen het aanloopmanoeuvre naar de brug. Tegelijkertijd worden ook korte afstanden gemeten tussen de afwaartse zijde van het brugdek bij de draaibrug met één deel. In dit opzicht wordt een draaibrug met één draaiend deel volledig afgeraden bij deze locatie van de fietsbrug. Tijdens simulatie 030 werd ook het noordelijke draaideel van de draaibrug met twee delen dicht genaderd. Daarom wordt eigenlijk ook dit brugtype afgeraden. Dit betekent dat enkel een basculebrug op deze locatie nog overblijft. Bij een basculebrug zullen de verticale brugdelen wel voor een lokale afscherming van de wind zorgen wat in deze simulaties nog niet onderzocht werd.
- Vijf van de negen simulaties zouden in realiteit geleid hebben tot een aanvaring met de brug via het draaideel van de draaibrug met één deel of tot een risicovol aanloopmanoeuvre of passage van de brug door afstanden kleiner dan 10 m tot de brug.

Figuur 20 – Samengestelde tracks van de runs bij afvaart: 017, 019, 020 en 026



## 4 Conclusies en bijkomend onderzoek

In dit hoofdstuk worden de algemene conclusies van het tot nu toe uitgevoerde nautische onderzoek samengebracht. Op het einde van de analyses in 3.3.1 en 3.3.2 werden ook reeds conclusies geformuleerd die best worden gelezen samen met de algemene conclusies in dit hoofdstuk. Ook voorstellen tot aanpassing van het ontwerp worden opgenomen.

### 4.1 Conclusies simulatiestudie

Er werden in deze simulatiestudie 17 simulaties uitgevoerd met één type ontwerpschip met een lengte van 175 m en een breedte van 31 m. De bedrijven verwachten geen noemenswaardige toename van de scheepsafmetingen en de onderzochte maximale diepgang van 10.8 m. Hoewel het gebruikte simulatieschip Rhone een schip is met een standaardroer en dus representatieve manoeuvreerbaarheid ten opzichte van het schip Stolt met een hoogperformant Beckerroer en zeer goede manoeuvreerbaarheid –(voor drie van de 13 simulaties uit de voorgaande simulatiestudie (Eloot *et al.*, 2019) werd de Stolt gebruikt), is het simulatieschip Rhone representatief voor de tankers die varen tot de bedrijven opwaarts de Kennedytunnel. Het ontwerp van de brug zou gebaseerd moeten worden op het behoud van de huidige operationele condities voor de grootste schepen die de bedrijven aanlopen.

Zoals aangegeven in de voorgaande simulatiestudie (Eloot *et al.*, 2019) is de passage van een brug op de Schelde met variabele stromingen per etmaal een manoeuvre dat veel risicovoller is dan een aanloop van een sluis. Het manoeuvre moet immers uitgevoerd worden met een snelheid van ongeveer 8 knopen – niet te laag om de wind- en stroominvloed te compenseren, niet te hoog om de impactsnelheid bij aanvaring van de brug onder de maximale toegelaten snelheid te houden – die (meer dan) het dubbele is van de aanloopsnelheid voor een sluis. Op geen enkele andere locatie op de Westerschelde (en met uitbreiding in de Vlaamse havens) moeten zeeschepen met dergelijke snelheden (en stroom) door of langs constructies varen zodat de inplanting van een fietsbrug een belangrijke toevoeging is van een risico in de toegankelijkheid binnen de Vlaamse context.

Tijdens deze simulatiestudie werden drie brugtypes onderzocht – basculebrug, draaibrug met één deel en draaibrug met twee delen – op één opgelegde locatie waarbij elk brugtype ook werd voorgesteld op de Portable Pilot Unit (PPU) van de loodsen. Ook een lichtenlijn door het midden van de brug, parallel met de pijlers van de brug, werd toegevoegd tot de simulatieomgeving en de PPU. Belangrijk is het om te vermelden dat bij de opvaart er weinig verschil is waar te nemen tussen de drie brugtypes, enerzijds omdat voor de drie types de doorvaartopening zich op exact dezelfde plaats bevindt en anderzijds omdat de draaiende delen van de draaibruggen vooral naar de opwaartse zijde ten opzichte van de brug draaien. Voor de afvaart wordt het verschil tussen de brugtypes wel significant.

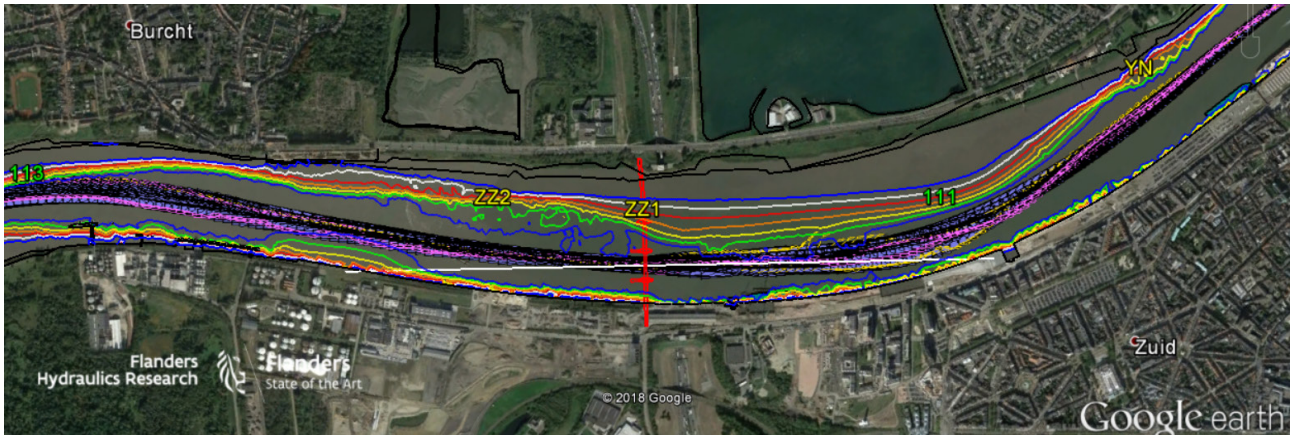
De volgende algemene conclusies worden geformuleerd:

- Aangezien de fietsbrug onder de huidige operationele condities veilig en vlot doorvaren zou moeten worden, en de maximale toegestane windkracht 7 Bft is zonder een stroomvenster, werden de simulaties uitgevoerd bij windcondities tussen 5 en 7 Bft en maximale stroom mee (voorstrooms met minimale snelheid door het water en stuurvermogen). Ook al is de frequentie van voorkomen van windkracht 5 Bft en meer, afhankelijk van de meetlocatie, tussen 5 en 10% van de tijd, eenzelfde toegankelijkheid als de huidige toegankelijkheid vereist een brugontwerp dat dezelfde veilige en vlotte passage garandeert als zou er geen brug aanwezig zijn.
- De variatie van de diepgang, de windkracht en windrichting en de stroomconditie is niet identiek uitgevoerd per brugtype wat, rekening houdend met de beperkte verschillen tussen de brugtypes, niet betekent dat er geen evaluatie kan uitgevoerd worden over het ontwerp van elk type brug.



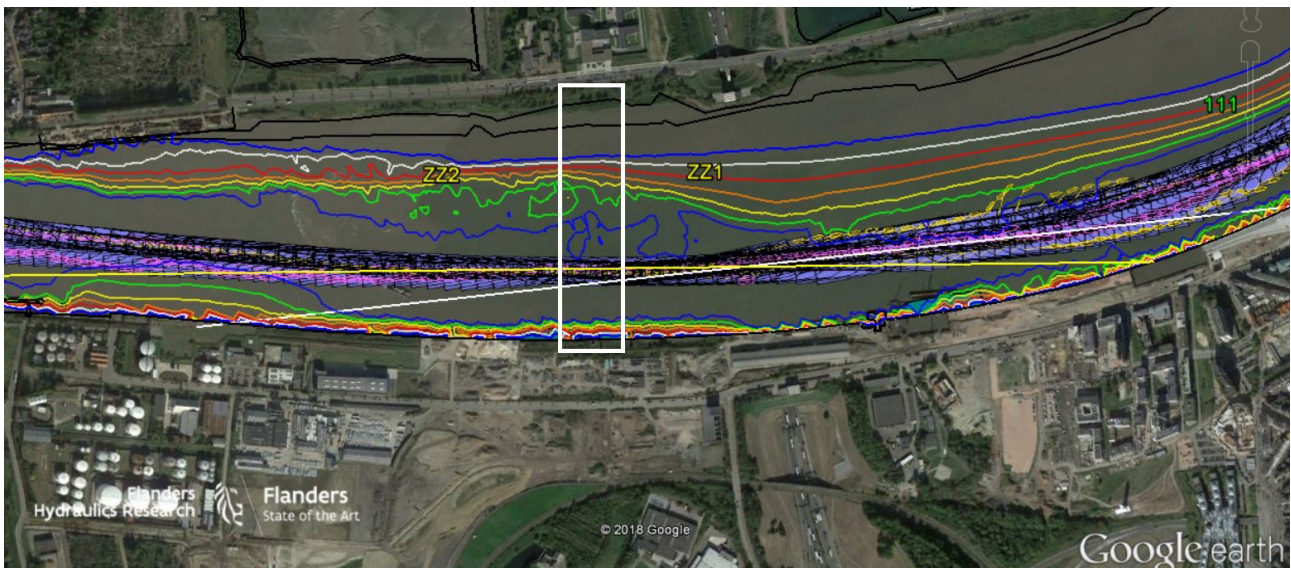
Aangezien de draaibrug met één deel het meest afwijkt van de twee andere brugtypes werd gekeken naar de verschillen in opgelegde simulatieparameters tussen de draaibrug met één deel en de andere twee bruggen. In dit opzicht is de verdeling van de simulatieparameters wel te vergelijken.

Figuur 21 – Samengestelde geselecteerde tracks in opvaart en afvaart: (a) ontwerp van draaibrug met twee delen van deze simulatiestudie, (b) voorstel met optimalisatie van de locatie voor een fietsbrug



(a)

De lichtenlijn in wit werd ongeveer horizontaal in het beeld geplaatst zodat de tracks van de simulaties opwaarts en afwaarts de brug vergeleken kunnen worden.



(b)

De lichtenlijn in wit werd behouden als referentie maar het beeld werd meer ingezoomd ten opzichte van (a) waarbij een nieuwe gele lichtenlijn werd toegevoegd en een wit kader met de zoekzone voor een nieuwe locatie voor de fietsbrug die nautisch beter is.

- Bijkomend stelt men vast dat de locatie van de brug ten opzichte van de bochten in de Schelde en de bathymetrie van de Schelde belangrijker is dan het brugtype met betrekking tot het risico voor het aanvaren van de brug. De conclusie uit de voorgaande simulatiestudie dat de brug meer opwaarts van de Kennedytunnel zou geplaatst moeten worden, werd niet gevolgd maar blijft een belangrijke beperking voor het al dan niet risicovol aanlopen van de brug. Deze conclusie wordt ondersteund door de samengestelde tracks van deze simulatiestudie in opvaart en afvaart zoals voorgesteld in Figuur 21. De locatie en oriëntatie van de brug zoals tijdens deze simulatiestudie opgelegd, is weergegeven in (a) met het brugtype met twee delen. Indien men de tracks van de verschillende

simulaties vergelekt met de positie van de lichtenlijn en de brug dan kan men vaststellen dat aan de afwaartse zijde de padbreedte van de tracks breder is dan aan de opwaartse zijde op vergelijkbare afstanden van de positie van de brug. De nautische meest aangewezen locatie wordt bepaald door deze zelfde tracks te gebruiken en een nieuwe lichtenlijn (gele lijn in (b)) te definiëren op basis van deze tracks. Hierdoor moet de fietsbrug tot 250 m opwaarts verplaatst worden en moet de opening van het beweegbare deel van de brug ook meer noordelijker geplaatst worden met een vast brugdeel aan de zuidelijke zijde van 100 m tot de rechteroever. De brug komt dus eerder halverwege tussen de boeien ZZ1 en ZZ2 te liggen. De Schelde is daar op de -7.0 en -8.0 m LAT dieptelijn over een grotere lengte voor en achter deze locatie breder dan ter plaatse van de in deze studie onderzochte positie en de brug zou dan meer halverwege tussen de bochten aan boei 113 (opwaarts) en boei 111 (afwaarts) liggen. Het niet respecteren van deze nautische conclusies zullen leiden tot het beperken van de operationele limieten voor de toegankelijkheid van de huidige vloot opwaarts de Kennedytunnel of tot hogere aanvaringsrisico's.

- Tijdens de simulatiestudie werd beter vastgelegd wat voor de loods maar dus ook voor de kapitein van het schip, die de eindverantwoordelijkheid heeft, aanvaardbaar is qua afstanden tot de brugpijlers. Een afstand van 15 m tot de brugpijlers geeft een veilig gevoel (ook zoveel mogelijk opgelijnd ten opzichte van de brugvoorzijde). Een afstand van 10 m is nog aanvaardbaar maar omdat een 175 m schip niet op meters juist kan gestuurd worden moet men eerder uitgaan van de noodzakelijk vrije ruimte tussen scheepzijde en pijler van 15 m. Elke afstand die kleiner is, wordt als stresserend ervaren (mede omdat het schip niet opgelijnd is).

De specifieke conclusies die uit deze simulatiestudie komen, zijn:

- Twee van de acht simulaties in opvaart en vijf van de negen simulaties in afvaart hebben geleid tot een onaanvaardbare afstand tussen het schip en de brugpijlers. Door training kan men het aanlopen van de brug bij windkracht 5 Bft en meer en bij stroom meer vertrouwd maken maar door het uitzonderlijke karakter van deze passage zal het steeds een risicovolle onderneming blijven.
- De gekozen locatie en oriëntatie van de brug bepalen voor een groot deel dit risico bij elke brugpassage. De lichtenlijn die het midden van de brug aangeeft en parallel is met de pijlers toont aan dat aan opwaartse zijde de rechteroever wordt doorsneden op een afstand van 1000 m en aan afwaartse zijde op 1200 m. Mede door de uit te voeren manoeuvres aan de opwaartse zijde in afvaart (bocht – tegenbocht) en aan afwaartse zijde in opvaart (bocht met grote koerswijziging en oevereffecten ter hoogte van de ondiepte aan linkeroever) kan het schip vooral aan de opwaartse zijde nauwelijks opgelijnd op de lichtenlijn de brug naderen en blijft het schip aan de afwaartse zijde eerder aan de noordelijke kant van de brugopening. Dit zorgt voor een grote padbreedte twee scheepslengtes voor en twee scheepslengtes achter de brug of het moeilijk kunnen aanlopen van het huidige midden van de brug door de gekozen locatie en oriëntatie. Indien men niets wenst te wijzigen aan deze locatie en oriëntatie dan kan men het risico alleen verminderen door de doorvaartbreedte aan te passen.
- Er zouden volgende aanpassingen aan de ligging en de opening van de brug moeten uitgevoerd worden indien men de brug niet meer opwaarts de Kennedytunnel tussen de boeien ZZ1 en ZZ2 plaatst:
  - De brugligging moet geoptimaliseerd worden tussen de locatie en oriëntatie in deze simulatiestudie en de gele variant uit (Eloot *et al.*, 2019). Een tussenliggende (halve afstand tussen beide) variant moet ontworpen worden met een lichtenlijn door het midden en parallel met de pijlers, die de rechteroever snijdt opwaarts en afwaarts op ongeveer 1100 m. De koers van de lichtenlijn moet dus enkele graden in wijzerzinn draaien om dit te realiseren.
  - Het niet op te lijnen manoeuvre vanuit de opwaartse zijde zorgt voor een padbreedte ter plaatse van de brug van 65 m. Rekening houdend met een veilige afstand van 15 m tussen de scheepzijde en de brugpijler betekent dit dat men minimaal  $65 + 2 \times 15 = 95$  m doorvaartopening nodig heeft om een veiligere brugpassage mogelijk te maken. De 65 m padbreedte werd gebaseerd op een selectie van gesimuleerde tracks waarbij de meest optimale aanloopmanoeuvres optraden. Afwijkingen hierop zijn nog steeds mogelijk



waardoor het risico op aanvaring van de brug tijdens een brugpassage blijft bestaan. Indien men de negatieve effecten van een brugaanvaring wenst te beperken dan moet men het risico op aanvaring beperken wat mogelijk is door een andere locatie en oriëntatie en een grotere doorvaartopening. Aan de afwaartse zijde van de brug stelt men vast dat de geselecteerde tracks in opvaart allemaal in hoofdzaak ten noorden van de lichtenlijn liggen door de specifieke aanloop vanuit een bocht met bijkomend een asymmetrisch bodemprofiel. Dit betekent dat het schip zich eerder in de noordelijke helft van de doorvaartopening bevindt. Voor een grotere doorvaartbreedte van 100 m of dus een halve breedte van 50 m blijft voor een schip met een breedte van 30 tot 35 m dan minimaal 15 tot 20 m tot de dichtste pijler over.

- Sleepboothulp is noodzakelijk vanaf een gemiddelde windkracht van 5 Bft omdat men zonder een achtersleepboot enerzijds niet kan garanderen dat de scheepssnelheid bij passage onder de 8 knopen zal blijven en dat anderzijds het schip voldoende reserve op het stuurvermogen zal hebben (geen hard over roerhoeken over een langere tijd en engine kicks zonder reserve). Er werd gesimuleerd met één achtersleepboot die niet alleen als rem maar ook als sturing werd ingezet. Om het risico op aanvaring te vermijden bij hoge windkracht, kan het noodzakelijk zijn om twee sleepboten in te zetten (één voor- en één achtersleepboot). De Follow Me sleepboot (Voith Schneider met beperkte bollard pull van 14 ton) volstaat over het algemeen niet voor het assisteren van het schip bij 5 Bft en meer. Rekening houdend dat een sleepboot zijn effectiviteit verliest bij hogere snelheden door het water en deze snelheden tussen de 5 en de 8 knopen zullen liggen bij een brugpassage, kan enkel een sleepboot met voldoende bollard pull naast een gedeeltelijk vermogen voor het assisteren van het schip nog voldoende vermogen overhouden om zelf voldoende wendbaar te zijn. De 65 ton ASD sleepboten van Boluda (vroeger Kotug Smit) of Antwerp Towage zijn meer aangewezen om ook deze assistentie te doen.
- Bij de vergelijking van de drie brugtypes wordt op basis van de simulaties besloten om een draaibrug met één deel niet te overwegen als een mogelijk type omdat het horizontale draaideel een verlenging veroorzaakt van de doorvaartopening met nog een verhoging van het risico op aanvaring. Men verwacht dat zelfs bij een verhoging van de doorvaartopening dit brugtype moet vermeden worden. In dit opzicht verdient de basculebrug met verticaal opendraaiende delen de voorkeur, mits dus de verhoging van de doorvaartopening tot 95 of 100 m nog steeds wordt voorzien bij een gelijkblijvende locatie. Omdat de invloed van de stroming langs de pijlers en de windafscherming door de brugdelen nog niet werden onderzocht kan deze doorvaartopening nog steeds wijzigen. Een draaibrug met twee opendraaiende horizontale delen kan wel nog beschouwd worden maar dit kan nog een bijkomende verhoging van de doorvaartopening vereisen in vergelijking met de basculebrug. Een draaibrug met twee delen kan aanleiding geven tot een verlenging met 50% van de opening tussen de brugpijlers ten opzichte van een basculebrug. Een 50 m lange vernauwing wordt dan een 75 m lange vernauwing. Indien men dit uitdrukt ten opzichte van de scheepslengte van 175 m dan heeft men een procentueel verschil van 14%. Dit percentage toegepast op een doorvaartopening van 100 m geeft een extra 14 m voor de draaibrug met twee delen.

De belangrijke inertie en beperkte manoeuvreerbaarheid van zeevaart enerzijds en de externe verstoringen ten gevolge van oevereffecten door een asymmetrische bathymetrie, stroming en wind anderzijds zorgen er voor dat een schip onmogelijk kan manoeuvreren volgens opgelegde banen of paden. Elke constructie waarlangs een schip verplicht wordt om te manoeuvreren met kleine afstanden zal dus onderhevig zijn aan een groot risico op aanvaring en falen van deze constructie en het schip.

## 4.2 Bijkomend onderzoek

In het voorgaande rapport (Eloot *et al.*, 2019) werden voorstellen tot bijkomend onderzoek geformuleerd. Deze kunnen na het in rekening brengen van de conclusies uit deze simulatiestudie verder opgenomen worden.

## Referenties

**De Maerschallck, B.; Eloit, K.; Plancke, Y.; Mostaert, F.** (2019). Advies Scheldebrug: deelrapport 1. Strooming en morfologie. Versie 4.0. *WL rapporten, 18\_120\_1*. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

**Eloit, K.; Verwilligen, J.; De Maerschallck, B.; Mostaert, F.** (2019). Advies Scheldebrug: deelrapport 2. Nautica. Versie 5.0. *WL Rapporten, 18\_120\_2*. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

**Eloit, K.; Verwilligen, J.; Peeters, P.; Mostaert, F.** (2012). Haven van Antwerpen: toegankelijkheid van cruiseschepen tot de Rede: deelrapport 1. Simulatiestudie. *WL Rapporten, 12\_007*. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

## Bijlage 1: Feedback van de loodsen

Run	Feedback
18_120_014	Met de Follow-me als voith sleepboot wordt het moeilijk, met 5 knopen door het water kan de sleepboot moeilijk naar stuurboord en bakboord trekken, eventueel indirect maar dan kan je moeilijk van richting wijzigen. De snelheid is ok. Je voelt de stroom op het gat heel goed. Het schip kwam daardoor te dicht bij de muur. De lichtenlijn helpt goed waardoor er weinig op de full wordt gekeken (de full is minder behandelbaar dan de Portable Pilot Unit - PPU). [Video]
18_120_015	Te veel schrik van de wind waardoor te veel tegen de wind in en hierdoor minder goed opgelijnd. Toch op 10 m van de pijler maar even spannend. In de bocht verzet de stroom je naar de muur maar nu bleef het schip ook weer op de ondiepte hangen. Gewenning voor tweede loods. [Video]
18_120_016	Vloed in de bocht te veel op de bakboord achterkant, waardoor het schip te laag komt. Een sterkere sleepboot zou kunnen helpen. Impact van stroom en wind is sterk, hierdoor met een te kleine afstand door de brug.
18_120_017	Er is geen reserve, zowel met de sleepboot als met het roer wordt maximum gegeven. Wind op het achterschip en ebstroom hinderlijk langs de steigers. [Video 2x]
18_120_018	Nadeel met deze variant van de brug is dat je het achterschip meer in de gaten moet houden wat nu uit het oog is verloren. De simulatie vergeten af te zetten waardoor deze langer doorliep dan dat het schip bestuurd werd. [Video echter geen achterbeeld]
18_120_019	De predictie op de Qastor enerzijds en de aanduiding van de rate of turn anderzijds geven een tegengestelde draairichting. Reden is onduidelijk. Dit geeft wel een verwarring. [Video]
18_120_020	De beginpositie was beter in vergelijking met de vorige afvaarten. Het is noodzakelijk om voldoende opwaarts de bocht te starten. Er is weinig reserve voor deze schepen bij de passage van de brug en een sleepboot die ook nog reserve heeft, is absoluut noodzakelijk. [Video]
18_120_021	Weinig reserve en de snelheid was ook hoger dan 8 knoop over de grond. [Video]
18_120_022	Op 200 à 300 m van de brug had de loods het idee dat het comfortabel ging zijn, maar de zuiden wind verzet het schip toch nog. Padbreedte voor de brug is 41 m. Rekening houdend dat je niet altijd in het midden kan aanlopen en een reserve tot de pijler wil van 10 à 15 m dan zou een brugopening van 100 m meer aangewezen zijn om bij 5 Bft zonder sleepboot er door te gaan. De aanvangssnelheid was iets te hoog waardoor er eerst nog achteruit is gegeven.
18_120_023	Eerst de snelheid er uit, en dan de lichtenlijn volgen maar door de wind nog verzet naar stuurboord. [Video]
18_120_024	Het diepliggende schip zit te dicht bij de plaat en geraakt er niet meer af. Aanvaring met de brug. [Video]

18_120_025	De voorgaande simulatie wordt herhaald. Op zicht varen en enkel op ondieptes voor de Full. De uitgangspositie was nu beter.
18_120_026	De lichtenlijn kan bij de afvaart als werkelijke lichtenlijn alleen dicht bij de brug gebruikt worden. 15 m afstand tot de dichtste pijler is de minimale afstand om een comfortabel gevoel te hebben. 10 m is eigenlijk te weinig. [Video]
18_120_027	De variant met draaibrug 1 deel wordt gekozen bij de afvaart voor de extra moeilijkheid van de lengte van de brug. Aan de opwaartse zijde mag de lichtenlijn niet te vroeg aangevaren worden omdat men dan te zuidelijk ten opzichte van de brug uitkomt (minimale afstand 3.5 m). Dus eerder onder een hoek nog aanvaren. [Video]
18_120_028	[Simulatie te laat gestopt]. Op 9.5 m van de brug, dit wordt als veel te kort ervaren. Het schip gaat ook volledig naar de kades voorbij de brug. Een draaibrug met 1 deel naar de rechteroever is af te raden (het draaideel aan de linkeroever is geen oplossing).
18_120_029	Op 8.5 m van de brug. De pijler meer naar rechteroever is nog slechter omdat je dan nog meer in de buitenbocht moet varen en dus afwaarts de brug mogelijk tegen de kade zal varen of te dicht bij. Eigenlijk is een gemiddelde windsnelheid van 7 Bft te hoog om deze brug te passeren. Indien de breedte zou verhoogd worden met 10 m (bijvoorbeeld aan zuidelijke pijler opschuiven dan komt men mogelijk toch nog dicht bij die brug met problemen bij het bochten afwaarts de brug).
18_120_030	Het is Russische roulette bij windsnelheden vanaf 5 Bft.



## Bijlage 2: Manual voor de KMZ presentaties

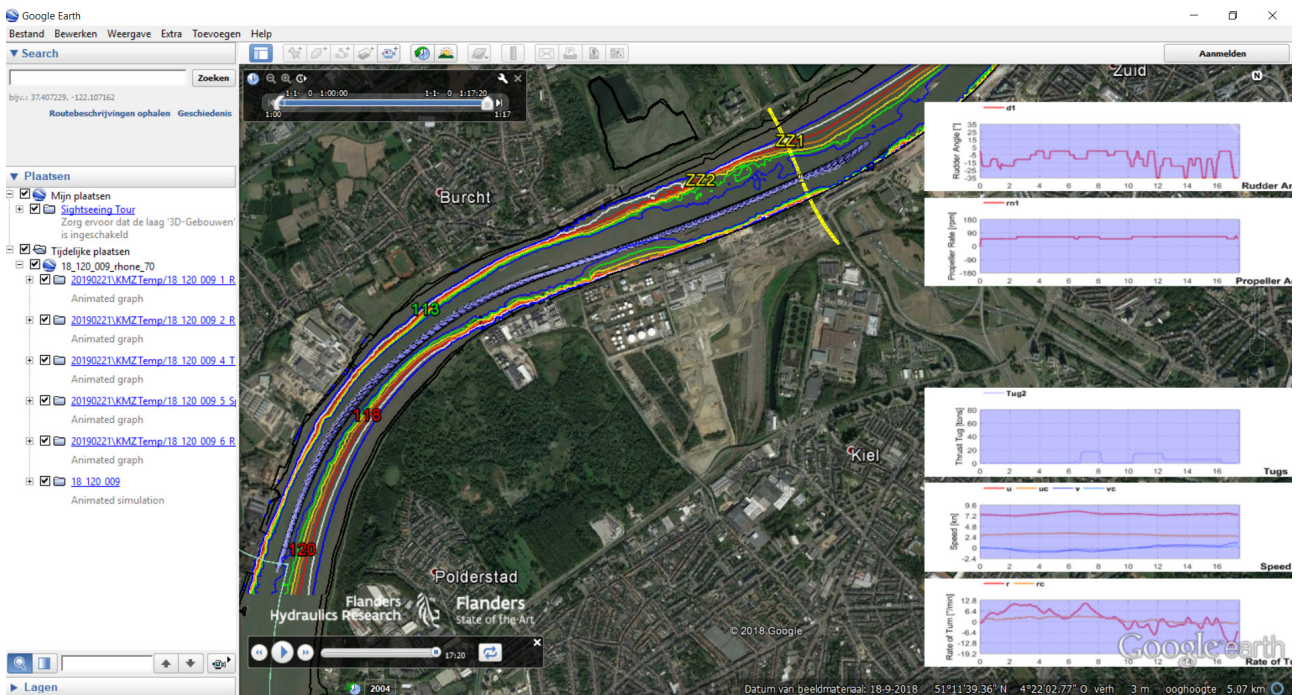
De uitgevoerde simulaties kunnen bekeken worden met animatie in Google Earth op basis van de bijgeleverde KMZ bestanden. Voor het bekijken van deze bestanden werd een korte Engelstalige manual opgesteld.

Install Google Earth (the version used for the images in this manual is a Dutch version)

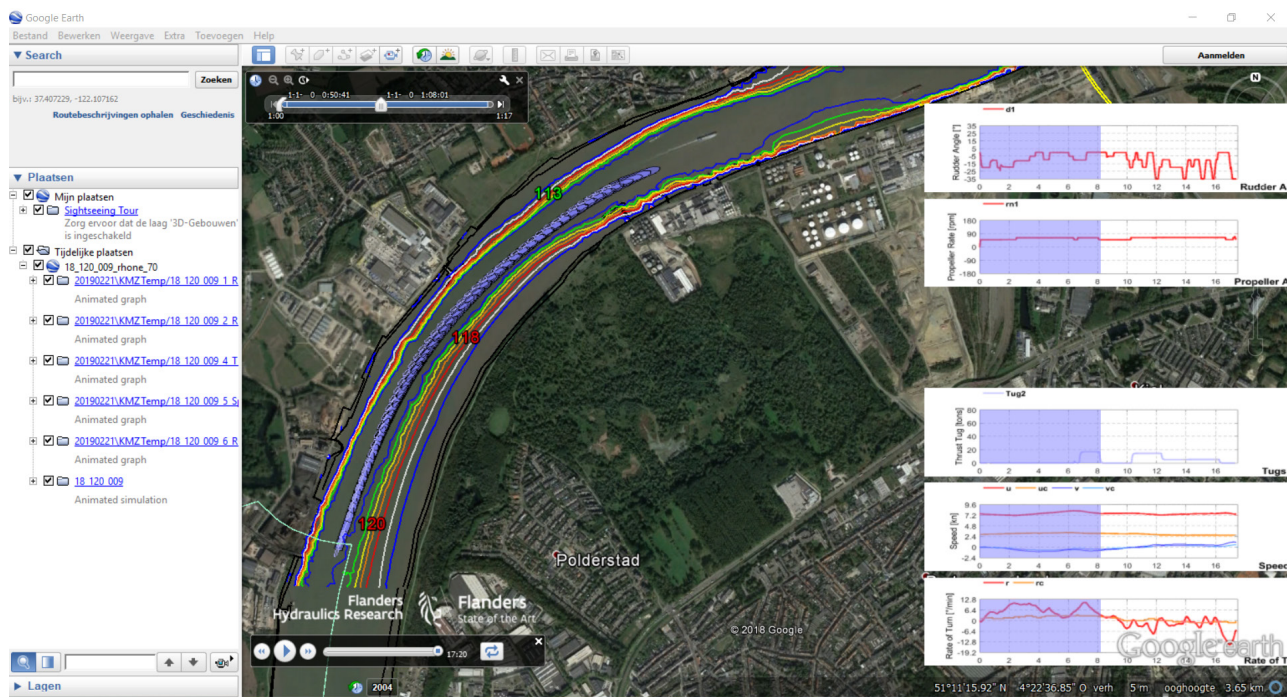
Go to Windows Explorer or the KMZ files attached to the report and double click on a selected KMZ file:

e.g. 18\_120\_009\_rhone\_70.kmz

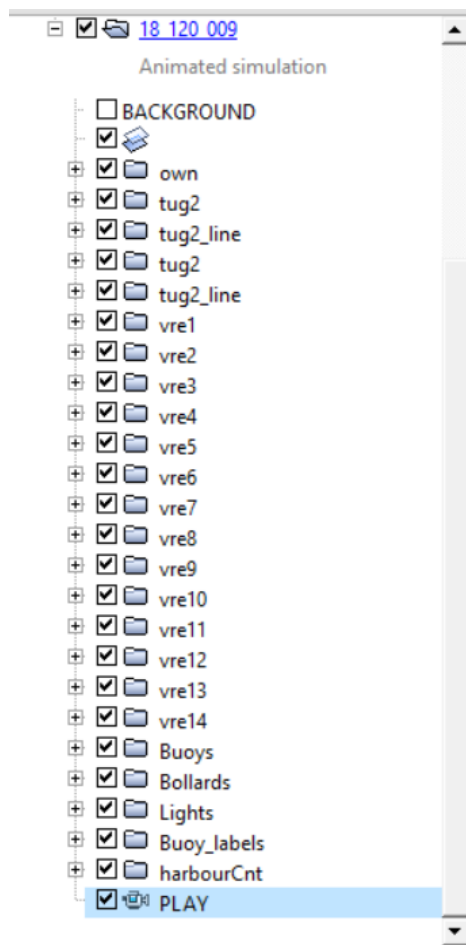
The KMZ file with animated graphs and animated simulation can be seen in the temporary locations at the left pull down menu. On the main screen the location is seen with the simulation data on top of it and the overlay graphs (right column with time graphs). You can tick on or off the different overlay graphs in the left pull down menu.



The overlay graphs are light blue 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 on the graphs and also on the track.



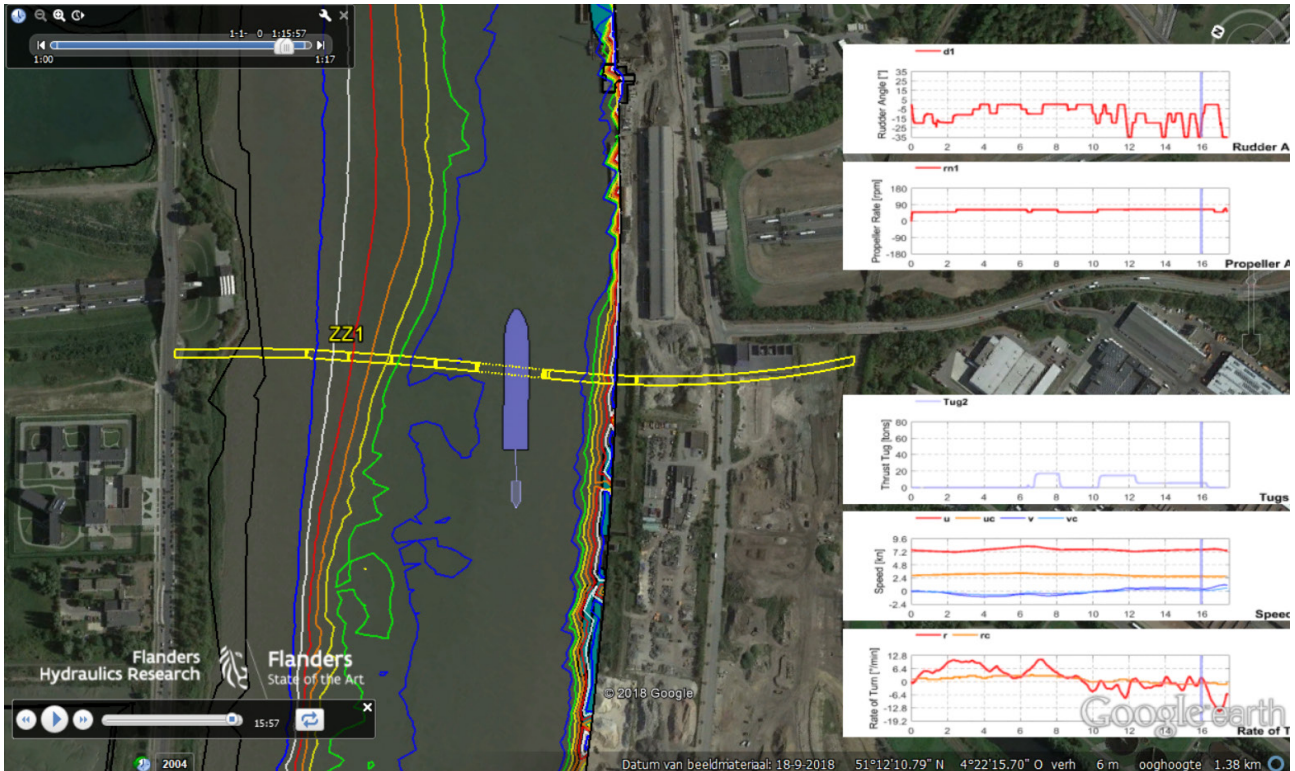
To clearly focus on the track of the own ship you can select the pull down list of the animated simulation





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.

In the pull down list of the animated simulation there is also a PLAY button, by double clicking on this button the simulation replays with a vertical blue line on the overlay graphs to show where you are in the graphs for the presented own ship on the Google Earth view. In the left corner below, the play button is presented and can be used for increasing the replay speed.



The following graphs are shown on the Google Earth presentation:

The rudder angle (d1) with a minimum of -35 degrees (to starboard) and a maximum of 35 degrees (to port) for the Rhone and the Kapitonas and -65 deg and 65 deg for the Stolt.

The propeller rpm (rn1) with a varying value depending on the engine rate of the different vessels.

The thrust of the aft tug in ton (Tug2).

The longitudinal speed component (u) of the vessel and the longitudinal current speed (uc) with the lateral speed component (v) of the vessel and the lateral current speed (vc).

The rate of turn (r) of the vessel and the rate of turn of the current (rc) on the ship.

In each KMZ file depthlines are added to visualise the bathymetry with the legend:

- 2.0 m LAT: blue
- 3.0 m LAT: white
- 4.0 m LAT: red
- 5.0 m LAT: orange
- 6.0 m LAT: yellow
- 7.0 m LAT: green
- 8.0 m LAT: blue



DEPARTEMENT **MOBILITEIT & OPENBARE WERKEN**  
Waterbouwkundig Laboratorium

Berchemlei 115, 2140 Antwerpen

T +32 (0)3 224 60 35

F +32 (0)3 224 60 36

[waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be](mailto:waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be)

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