



Vlaanderen
is wetenschap

14_082_5
WL rapporten

Agenda voor de Toekomst – Golven in het estuarium

Deelrapport 5 – Overzicht van metingen
op verschillende meetlocaties

DEPARTEMENT
**MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN**

waterbouwkundiglaboratorium.be

Agenda voor de Toekomst – Golven in het estuarium

Deelrapport 5 – Overzicht van metingen op verschillende meetlocaties

Meire, D.; Kolokythas, G.; Plancke, Y.

Juridische kennisgeving

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

Copyright en wijze van citeren

© Vlaamse overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Waterbouwkundig Laboratorium 2024
D/2024/3241/077

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Meire, D.; Kolokythas, G.; Plancke, Y. (2024). Agenda voor de Toekomst – Golven in het estuarium: Deelrapport 5 – Overzicht van metingen op verschillende meetlocaties. Versie 4.0. WL Rapporten, 14_082_5. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

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

Documentidentificatie

Opdrachtgever:	aMT	Ref.:	WL2024R14_082_5
Trefwoorden (3-5):	Golven, stroming, intergetijdengebieden, habitat		
Kennisdomeinen:	Hydrodynamica > Stroomsnelheden -en patronen> Getij > in-situ metingen Hydrodynamica > Golven > in-situ metingen		
Tekst (p.):	54	Bijlagen (p.):	4
Vertrouwelijk:	<input checked="" type="checkbox"/> Nee	<input checked="" type="checkbox"/> Online beschikbaar	

Auteur(s):	Meire, D.; Kolokythas, G.
------------	---------------------------

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Plancke, Y.	Getekend door: Yves Plancke (Signature) Getekend op: 2024-05-21 12:11:24 +02:00 Reden: Ik keur dit document goed  
Projectleider:	Meire, D.	Getekend door: Dieter Meire (Signature) Getekend op: 2024-05-21 12:00:46 +02:00 Reden: Ik keur dit document goed  

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Bellafkih, K.	Getekend door: Abdelkarim Bellafkih (Sign) Getekend op: 2024-05-03 13:31:14 +02:00 Reden: Ik keur dit document goed  
-----------------	---------------	---

Abstract

Eén van de vragen binnen het onderzoeksprogramma “Agenda voor de Toekomst” is het belang van golven in het estuarium. Golven kunnen belangrijk zijn wegens hun effect op de hydrodynamische belasting van oevers en dijken. Deze belasting kan ook morfologische effecten hebben, in de vorm van erosie of sedimentatie, op intergetijdengebieden en bijgevolg op de ecologische rol die deze intergetijdengebieden (zowel platen als schorren) kunnen spelen. Om een inschatting te kunnen maken van deze belasting, zijn veldmetingen noodzakelijk. Binnen het project 14_082: “Golven in het estuarium”, werden verschillende meetcampagnes uitgevoerd, zowel in de Westerschelde, in het westelijk deel (bij de Hooge Platen) en het oostelijk deel (bij Saefthinghe) als in de Zeeschelde, bij Rupelmonde (meer bepaald bij het jachtpaviljoen de Notelaer) en ter hoogte van Dendermonde (te Appels). Dit rapport geeft een overzicht van de analyse van deze metingen, gebaseerd op de individuele rapporten die de metingen beschrijven voor elke individuele meetlocatie.

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de tabellen.....	VII
Lijst van de figuren	VIII
1 Inleiding	1
2 Studiegebied en meetopstelling.....	2
2.1 Studiegebied.....	2
2.2 Meetinstrumenten en instellingen.....	7
3 Meetresultaten.....	9
3.1 Getijmetingen.....	9
3.2 Snelheidsmetingen	10
3.3 Windmetingen.....	12
3.4 Golfmetingen.....	15
4 Analyse van scheepsdata.....	17
4.1 AIS data en foto's.....	17
4.1.1 AIS.....	17
4.1.2 Foto's.....	18
4.2 Overzicht.....	18
4.3 Analyse van scheepskarakteristieken.....	20
5 Theorie rond scheepsgolven	23
5.1 Primaire golven.....	24
5.2 Secundaire golven	26
5.2.1 Overzicht van formuleringen.....	28
6 Analyse van scheepsgolven	32
6.1 Golven door schepen.....	32
6.1.1 Primaire scheepsgolven.....	32
6.1.2 Secundaire scheepsgolven	33
6.1.3 Overzicht.....	34
6.2 Primaire scheepsgolven.....	35
6.3 Secundaire scheepsgolven	39
7 Analyse van windgolven	46
7.1 Detectie van windevents	46

7.2	Analyse van de resultaten	47
7.2.1	Relatie tussen golfklimaat op Noordzee en de Hooge Platen	47
7.2.2	Geïsoleerde windevents	48
8	Conclusies en aanbeveling.....	51
8.1	Conclusies	51
8.2	Aanbevelingen	52
9	Referenties	53
10	Bijlage	B1
1.	Balanin & Bykov.....	B1
2.	USCA (1980).....	B1
3.	Bhowmik (1975).....	B2
4.	Gates & Herbich (1977)	B2
5.	Bhowmik, Demissie & Guo (1982).....	B2
6.	Blaauw et al. (1984).....	B2
7.	PIANC (1987).....	B3
8.	Bhowmik et al. (1991).....	B3
9.	Sorensen & Weggel (1984 - 1986).....	B3
10.	Kriebel & Seelig (2005)	B4
11.	BAW (2011).....	B4
12.	Nece et al. (1986)	B4

Lijst van de tabellen

Tabel 1: Overzicht van de exacte meetlocatie van de druksensoren en Aquadopp. De geografische coördinaten zijn aangeduid in WGS84 UTM 31N	6
Tabel 2: Overzicht van de tijdsperiode waarin de metingen werden uitgevoerd.....	7
Tabel 3: Overzicht van de locatie van de gebruikte additionele metingen (met dataleverancier).....	8
Tabel 4: Overzicht van de belangrijkste getijkarakteristieken gedurende de meetcampagne en zoals weergegeven in het vijfjarig overzicht (Hertoghs et al., 2018), in cursief.....	10
Tabel 5: Overzicht van de gemiddelde windkarakteristieken gedurende de meetcampagne.....	14
Tabel 6: Karakteristieken van de windmetingen (snelheden) te Melsele voor de jaren 2016 en 2017	15
Tabel 7: Overzicht van aantal scheepspassages per locatie, gebaseerd op basis van AIS data	18
Tabel 8: Overzicht van de verschillende karakteristieken die zijn opgenomen in de verschillende vergelijkingen	29
Tabel 9: Overzicht van geselecteerde events, zowel primair als secundair, voor de verschillende meetlocaties.	34
Tabel 10: Multiparameterregressie: overzicht van significantie (NS = Niet Significant, S = Significant op basis van $p = 0.05$ criterium) van de verschillende variabelen in relatie tot de opgemeten primaire golfhoogte..	38
Tabel 11: Multiparameterregressie: overzicht van significantie (NS = Niet Significant, S = Signifant op basis van $p = 0.05$ criterium) van de verschillende variabelen in relatie tot de opgemeten secundaire golfhoogte.....	44
Tabel 12: Resultaten van de exponentiële fit ($\log(H) = a*x + b$) voor zowel de significante als de maximale golfhoogte.	50

Lijst van de figuren

Figuur 1: Overzichtsk kaartje met de verschillende meetlocaties binnen het project “Golven in het estuarium”.	3
Figuur 2: Drie meetpunten op de Hooge Platen: Hooge Platen West (HPW); Hooge Platen Noord (HPN) en Hoge Springer (HS).	4
Figuur 3: Twee meetpunten bij de oostrand van Saeftinghe. Eveneens is voor de zuidelijke locatie een crosssectie van de bathymetrie weergegeven.	4
Figuur 4: Twee meetpunten nabij de Notelaer. Eveneens is de dwarsdoorsnede ter hoogte van de metingen weergegeven.	5
Figuur 5: Twee meetpunten nabij Appels. Eveneens is de dwarsdoorsnede ter hoogte van de metingen weergegeven.	5
Figuur 6: Foto van de Aquadopp en druksensor uitgezet in het veld, bij de Hooge Platen (links) en Saeftinghe (rechts).	7
Figuur 7: Overzicht van de meetlocaties en de gemiddelde hoog- en laagwaterstanden in het estuarium (links) en getijverschil (rechts)	9
Figuur 8: Relatie tussen de maximale vloed en ebsnelheid nabij de Hooge Platen (HPW = Hooge Platen West, HPN = Hooge Platen Noord, HSP = Hoge Springer)	11
Figuur 9: Relatie tussen de maximale vloed en ebsnelheid nabij de oostrand van Saeftinghe	11
Figuur 10: Relatie tussen de maximale vloed en ebsnelheid nabij Rupelmonde	12
Figuur 11: Relatie tussen de maximale vloed en ebsnelheid nabij Dendermonde	12
Figuur 12: Windroos voor de verschillende meetlocaties (linksboven: Hooge Platen, rechtsboven: Saeftinghe, linksonder: Rupelmonde, rechtsonder: Dendermonde)	13
Figuur 13: Overzicht van de gemiddelde dagelijkse windmetingen (snelheden) te Melsele voor de jaren 2016 en 2017, met aanduiding van de periode van de meetcampagnes	14
Figuur 14: Overzicht van de significante golfhoogte en maximale golfhoogte op de verschillende meetlocaties, berekend op basis van een volledige getij	16
Figuur 15: Passage van een schip ter hoogte van Rupelmonde (links) en Dendermonde (rechts)	17
Figuur 16: Aanduiding van scheepspassages voor een getijcyclus geregistreerd met de AIS gegevens (rode bol) en de foto’s (gele cirkel)	19
Figuur 17: Visualisatie van de scheepsbewegingen nabij de Hooge Platen, zowel voor de Hooge Platen Noord (links) als de Hoge Springer (rechts)	19
Figuur 18: Verloop van de scheepspassages doorheen de dag, ter hoogte van Rupelmonde op basis van de AIS data	20
Figuur 19: Overzicht van het type schepen en verdeling van de scheeps lengte, ter hoogte van de Hooge Platen, gebaseerd op basis van de AIS data	21
Figuur 20: Overzicht van het type schepen en verdeling van de scheeps lengte, ter hoogte van de Saeftinghe, gebaseerd op basis van de AIS data	21
Figuur 21: Overzicht van het type schepen en verdeling van de scheeps lengte, ter hoogte van Rupelmonde, gebaseerd op basis van de AIS data	22

Figuur 22: Overzicht van het type schepen en verdeling van de scheeps lengte, ter hoogte van Dendermonde, gebaseerd op basis van de AIS data	22
Figuur 23: Boeg en hekgolf generatie bij scheepspassage (Schiereck, 1993)	23
Figuur 24: Aanduiding van primaire en secundaire golfpatronen in een volledig scheepsgolfpatroon (BAW, 2011).....	24
Figuur 25: Berekening van de primaire golfhoogte voor typeschepen passerend bij Saeftinghe (links) en bij Rupelmonde (rechts). De volle lijnen geven de resultaten bij hoogwater, de stippellijnen bij laagwater.	25
Figuur 26: Typische golfpatronen voor verschillende ranges van Froude getallen $F_h < 1$ (boven); $F_h = 1$ (midden) en $F_h > 1$ (onder)	26
Figuur 27: Golfpatroon voor een schip onder subkritische snelheid (MacFarlane, 2012).....	27
Figuur 28: Hoek β in relatie tot de diepte gerelateerde Froude getal $F_h [-]$	28
Figuur 29: Verschillende fases van scheepsnelheden en de resulterende golfhoogte (uit Maynard, 2005; Tan, 2012).....	28
Figuur 30: Voorbeeld van de passage van een schip, waarbij een duidelijke primair golfpatroon te onderscheiden valt	33
Figuur 31: Typisch secundair golfsignaal. Links zijn de resultaten weergegeven zonder filter, rechts zijn de resultaten weergegeven na toepassen van een band-pass filter. De verticale rode lijn geeft de tijd van passage weer van het schip.	34
Figuur 32: Primaire golfhoogtes ter hoogte van de Hooge Platen Noord, in relatie tot verschillende scheepskarakteristieken (snelheid en lengte), de afstand van het schip tot de meetlocatie en de waterhoogte (m TAW).....	36
Figuur 33: Primaire golfhoogtes ter hoogte van de Hooge Springer, in relatie tot verschillende scheepskarakteristieken (snelheid en lengte), de afstand van het schip tot de meetlocatie en de waterhoogte (m TAW).....	37
Figuur 34: Primaire golfhoogtes ter hoogte van de oostrand van Saeftinghe, in relatie tot verschillende scheepskarakteristieken (snelheid en lengte), de afstand van het schip tot de meetlocatie en de waterhoogte (m TAW).....	38
Figuur 35: Overzicht van gemiddelde, mediane en 10 ^{de} en 90 ^{ste} percentiel van de primaire scheepsgolven langsheen het estuarium, op die locaties waar golfmetingen werden uitgevoerd	39
Figuur 36: Secundaire golfhoogtes nabij Hooge Platen Noord, in relatie tot verschillende scheepskarakteristieken.....	40
Figuur 37: Secundaire golfhoogtes nabij de Hooge Springer, in relatie tot verschillende scheepskarakteristieken (snelheid en lengte), de afstand van het schip tot de meetlocatie en de waterhoogte (m TAW).....	41
Figuur 38: Secundaire golfhoogtes nabij Saeftinghe, in relatie tot verschillende scheepskarakteristieken (snelheid en lengte), de afstand van het schip tot de meetlocatie en de waterhoogte (m TAW).....	41
Figuur 39: Secundaire golfhoogtes nabij Rupelmonde op de lage positie, in relatie tot verschillende scheepskarakteristieken (snelheid en lengte), de afstand van het schip tot de meetlocatie en de waterhoogte (m TAW).....	42
Figuur 40: Secundaire golfhoogtes nabij Rupelmonde op de hoge positie, in relatie tot verschillende scheepskarakteristieken (snelheid en lengte), de afstand van het schip tot de meetlocatie en de waterhoogte (m TAW).....	42

Figuur 41: Secundaire golfhoogtes nabij Dendermonde op de lage positie, in relatie tot verschillende scheepskarakteristieken (snelheid en lengte), de afstand van het schip tot de meetlocatie en de waterhoogte (m TAW)..... 43

Figuur 42: Secundaire golfhoogtes nabij Dendermonde op de hoge positie, in relatie tot verschillende scheepskarakteristieken (snelheid en lengte), de afstand van het schip tot de meetlocatie en de waterhoogte (m TAW)..... 43

Figuur 43: Overzicht van gemiddelde, mediane en 10^{de} en 90^{ste} percentiel van de secundaire scheepsgolven langsheen het estuarium, op die locaties waar golfmetingen werden uitgevoerd 44

Figuur 44: Windevent voor een event met een hogere maximale golfhoogte bij de Hooge Platen, voor (links) en na filtering (rechts). De onderste figuren illustreren de overeenkomende spectrale dichtheidsverdelingen. 46

Figuur 45: Overzicht van meetlocaties buiten het Schelde-estuarium 47

Figuur 46: Relatie tussen getijgemiddelde significante golfhoogte van de Noordzee (Vlakte van de Raan) richting Hooge Platen (HP) 47

Figuur 47: Relatie tussen de windsnelheid en de significante (links) en maximale (rechts) golfhoogte, voor HPW (boven), HPN (midden) en HSP (onder). Eveneens zijn de fits voor de significante golfhoogtes (--) en de maximale golfhoogtes (..)..... 49

Figuur 48: Relatie tussen de windsnelheid en de significante (links) en maximale (rechts) golfhoogte, bij Saeftinghe..... 50

1 Inleiding

In de periode 2014-2017 is het 4 jaar lopende onderzoeksprogramma “Agenda voor de Toekomst” in uitvoering, gefocust op het Schelde estuarium. De Vlaamse-Nederlandse Schelde Commissie (VNSC) keurde de agenda van dit onderzoeksprogramma goed in 2013. Hierop volgend werd een actieplan opgesteld (Beirinckx et al., 2014), die als leidraad werd gebruikt voor het onderzoeksprogramma van 2014 tot 2017. Het huidige rapport is onderdeel van dit onderzoeksprogramma, met als doel om de kennis rond de belasting van intergetijdengebieden door golven te vergroten. In dit rapport, deelrapport 5 binnen het project 14_082: “Golven in het estuarium”, wordt een overzicht weergegeven van de metingen op de verschillende meetlocaties langsheen het Schele-estuarium. Deze meetlocaties zijn gelegen in de Westerschelde (Hooge Platen en Saeftinghe) en Zeeschelde (Rupelmonde en Dendermonde).

Golven kunnen opgewekt worden door meteorologische condities (windgolven) en door schepen (scheepsgolven). In dit project wordt getracht om het relatieve belang van wind en scheepsgolven te onderscheiden. Zo wordt de relatie tussen windrichting en snelheid enerzijds en golfhoogtes anderzijds onderzocht. Ook werd de relatie tussen scheepskarakteristieken (lengte en breedte van het schip, snelheid van het schip en afstand tot de meetpositie) en de golfkarakteristieken nagegaan.

In hoofdstuk 2 worden de verschillende meetlocaties voorgesteld en de meetopstelling op deze locaties besproken. De ingezette meetinstrumenten, met hun belangrijkste instellingen, worden beschreven. De geregistreeerde tijdsdata, snelheidsdata, golf- en winddata gedurende de beschouwde meetperiodes worden besproken in hoofdstuk 3. In hoofdstuk 4 wordt de informatie m.b.t. de scheepspassages geanalyseerd. Deze informatie wordt uit de AIS (“Automatic Identification System”) database gehaald, en bestaat enerzijds uit statische informatie van de schepen (type, lengte, breedte, etc.) en anderzijds dynamische informatie (snelheid, richting, diepgang, etc.) ter hoogte van de meetposities. Eveneens werd in de opwaartse locaties gebruik gemaakt van foto’s om scheepsbewegingen te registreren. In hoofdstuk 5 wordt de koppeling van de golfmetingen en de scheepspassages besproken, in hoofdstuk 7 wordt een gelijkaardige koppeling tussen winddata en golfdata weergegeven. Tot slot wordt in hoofdstuk 8 de belangrijkste conclusies van de analyse van de meetcampagnes toegelicht.

2 Studiegebied en meetopstelling

2.1 Studiegebied

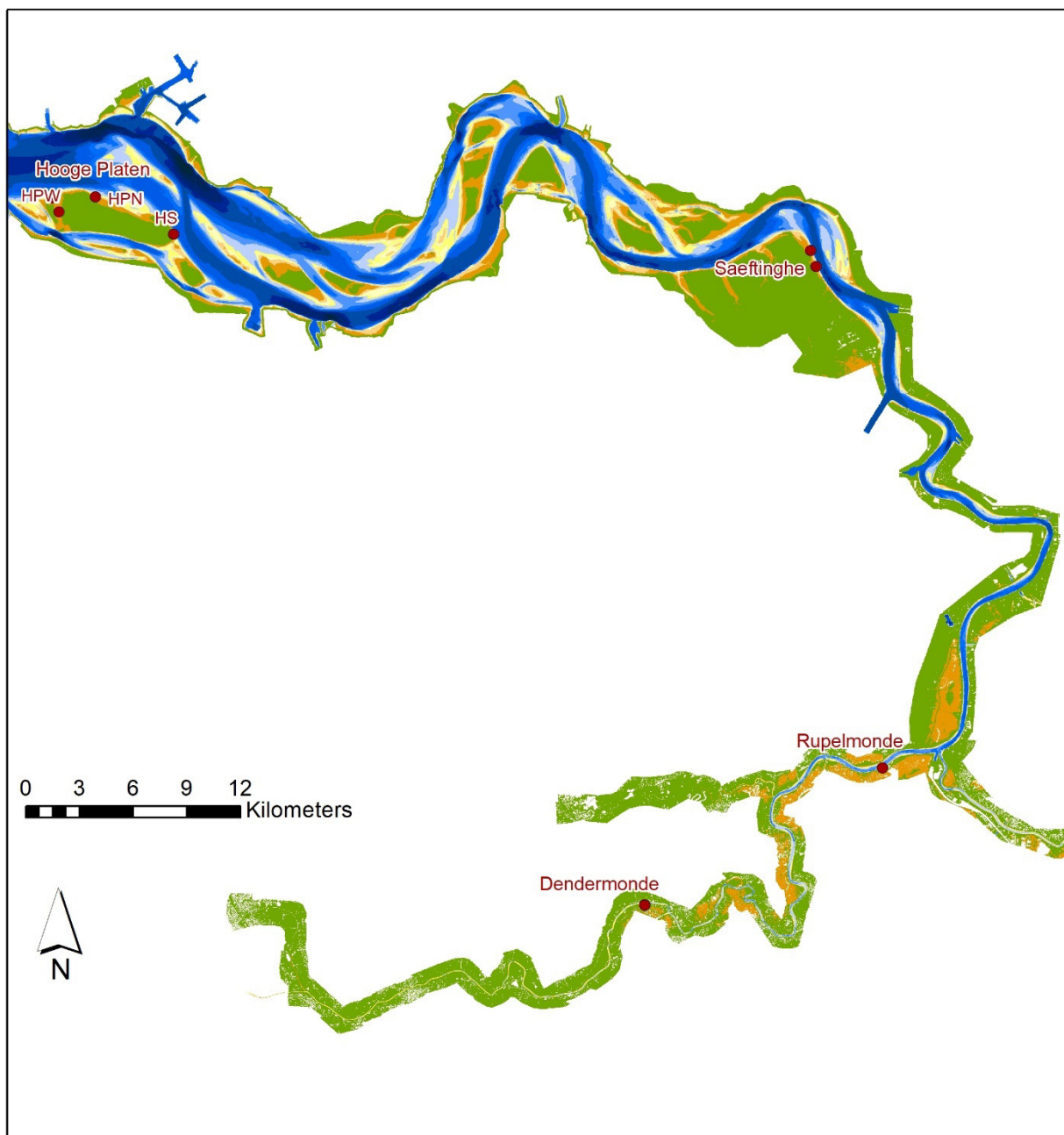
De metingen werden uitgevoerd in 4 verschillende gebieden langs het Schelde-estuarium. Twee gebieden bevinden zich in de Westerschelde, met name op de Hooge Platen in het westelijk deel en de ooststrand van Saeftinghe in het oostelijk deel, twee gebieden bevinden zich in de Zeeschelde, met name de slikken nabij de Notelaer (regio Rupelmonde) en te Appels (regio Dendermonde). Een overzichtsfiguur van deze locaties is weergegeven in Figuur 1. Deze gebieden werden geselecteerd aangezien een sterk verschillende golfbelasting verondersteld werd voor elk van deze gebieden. Een intensievere scheepvaart en ook grotere schepen, en dus ook meer golfbelasting, werd verwacht in de Westerschelde. Bij de Hooge Platen werd ook de invloed van golven uit de Noordzee belangrijk geacht, wat minder het geval is te Saeftinghe. In de Zeeschelde wordt het scheepvaartverkeer gedomineerd door binnenschepen, maar is ook de fetch voor windgolven kleiner, waardoor het relatieve belang van deze scheepsgolven even groot kan zijn.

De Hooge Platen is het meest afwaarts gelegen plaatcomplex van de Westerschelde, gelegen in Macrocel 1. Drie meetlocaties werden gedefinieerd (zie Figuur 2), met name bij de Hooge Platen West, waar de plaat het meest blootgesteld staat aan golven uit de Noordzee, de Hooge Platen Noord, gelegen achter de rug op de plaat en daarmee iets meer afgeschermd van golven uit de Noordzee en de Hoge Springer, het meest oostelijke meetpunt en dicht bij de plaats waar de vaargeul zich verlegt van het noorden naar het zuiden, met name de Pas van Borssele. De metingen bij de Hooge Platen West en Noord vallen samen met de meetraaien van Rijkswaterstaat binnen het monitoringswerk van Flexibel Storten.

Het Verdrongen land van Saeftinghe is een natuureservaat, bestaande uit slikken en schorren. Nabij de oostelijke zijde, tussen de bocht van Bath en de Belgisch-Nederlandse grens is de afstand tussen de hoofdgeul en het intergetijdengebied klein. In Figuur 3 zijn twee meetposities weergegeven, net zoals een dwarsdoorsnede van de bathymetrie ter hoogte van het meest zuidelijke punt.

In de regio van Rupelmonde werden metingen uitgevoerd ter hoogte van de intergetijdengebieden aan het jachtpaviljoen van de Notelaer op het grondgebied Bornem (rechteroever). Deze locatie bevindt zich ongeveer 95 km opwaarts van Vlissingen. Een overzicht van de meetlocatie is gegeven in Figuur 4. De meetlocaties zelf zijn aangeduid met een gele bol. De metingen zijn gesitueerd op de rechteroever van de rivier, met één meetpunt ter hoogte van de laagwaterlijn en één meetpunt hoger op het slik. Eveneens is een dwarsdoorsnede weergegeven ter hoogte van de metingen.

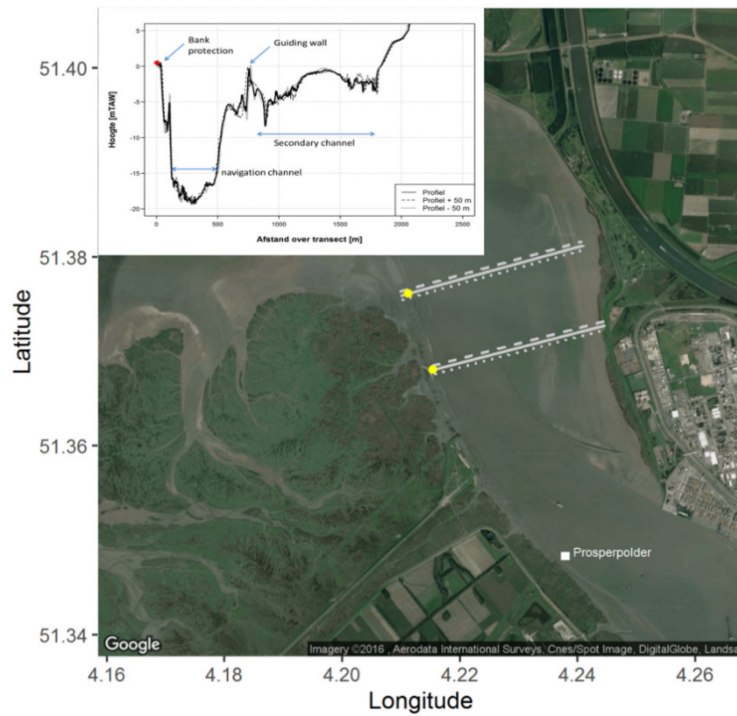
In de regio van Dendermonde werden metingen uitgevoerd ter hoogte van de intergetijdengebieden te Appels. Deze locatie bevindt zich ongeveer 125 km opwaarts van Vlissingen. Een overzicht van de meetlocatie is gegeven in Figuur 5. De meetlocaties zelf zijn aangeduid met een gele bol. De metingen zijn gesitueerd op de rechteroever van de rivier, met één meetpunt ter hoogte van de laagwaterlijn en één meetpunt hoger op het slik. Eveneens is een dwarsdoorsnede weergegeven ter hoogte van de metingen.



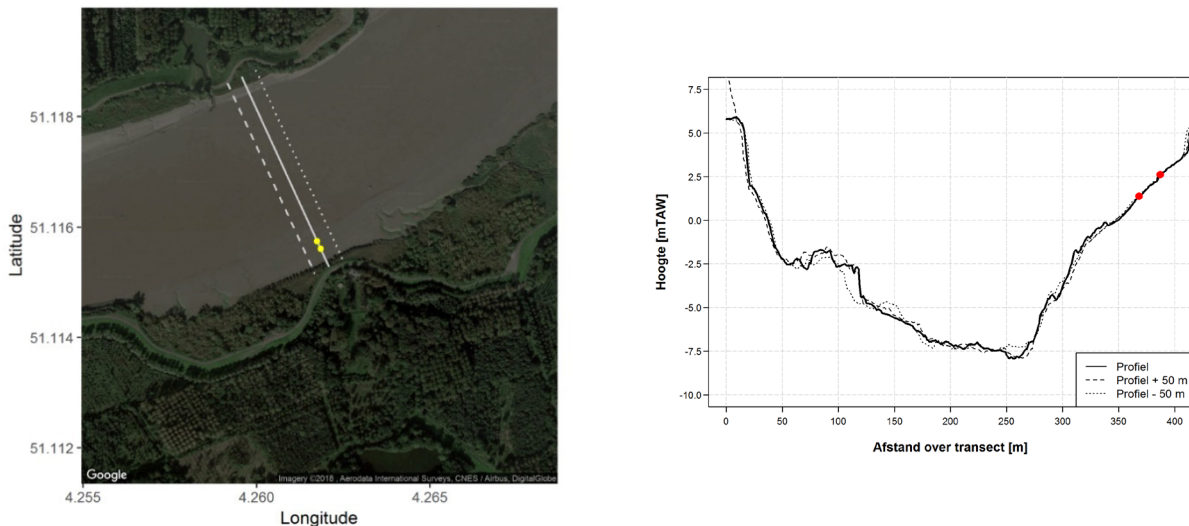
Figuur 1: Overzichtskaartje met de verschillende meetlocaties binnen het project “Golven in het estuarium”.



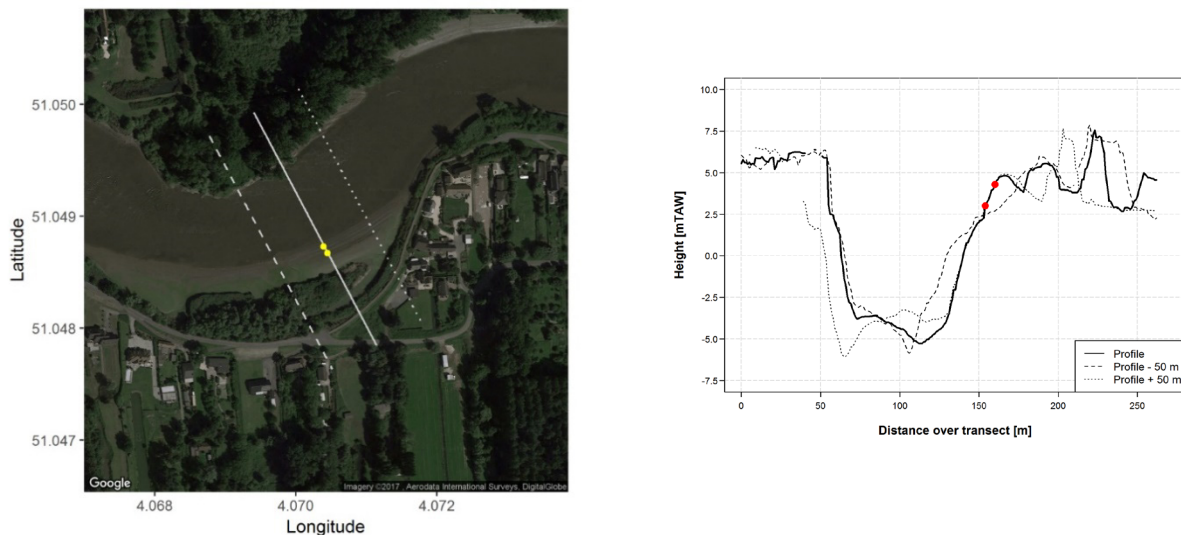
Figuur 2: Drie meetpunten op de Hooge Platen: Hooge Platen West (HPW); Hooge Platen Noord (HPN) en Hoge Springer (HS).



Figuur 3: Twee meetpunten bij de oostrand van Saeftinghe. Eveneens is voor de zuidelijke locatie een cross-sectie van de bathymetrie weergegeven.



Figuur 4: Twee meetpunten nabij de Notelaer. Eveneens is de dwarsdoorsnede ter hoogte van de metingen weergegeven.



Figuur 5: Twee meetpunten nabij Appels. Eveneens is de dwarsdoorsnede ter hoogte van de metingen weergegeven.

Samengevat werden in de Zeeschelde metingen uitgevoerd op één dwarsdoorsnede, met name op laag slik nabij de laagwaterlijn en op middelhoog slik. In de Westerschelde werden de metingen uitgevoerd op de laagwaterlijn, op 2 locaties nabij Saeftinghe en 3 locaties bij de Hooge Platen. Een overzicht van alle meetlocaties is weergegeven in Tabel 1.

Op elke meetlocatie worden de stroomsnelheden gemeten met een Aquadopp® (Nortek), waarbij dieptegemiddelde stroomsnelheden worden berekend, terwijl met een hoogfrequente druksensor de waterfluctuaties (golven) worden opgemeten.

Tabel 1: Overzicht van de exacte meetlocatie van de druksensoren en Aquadopp.
De geografische coördinaten zijn aangeduid in WGS84 UTM 31N

Regio	Meetlocatie	Instrument	Longitude (E)	Latitude (N)	Verticale positie [m TAW]
Hooge Platen	HPW	Druksensor	541894,5	5695263	0,934
		Aquadopp®	542283,6	5694499	0,990
	HPN	Druksensor	544316,9	5695344	1,269
		Aquadopp®	544315,9	5695343	1,302
	HS	Druksensor	548686,2	5693255	1,197
		Aquadopp® (up)	548685,5	5693257	1,221
Aquadopp® (down)		548683,6	5693255	1,63	
Saeftinghe	Noord	Druksensor	584300,18	5692350,61	0,089
		Aquadopp®	584300,18	5692350,61	0,089
	Zuid	Druksensor	584609,72	5691455,84	0,54
		Aquadopp®	584609,72	5691455,84	0,54
Rupelmonde	Laag slik	Druksensor	588313,2	5663452	1,20
		Aquadopp®	588314,2	5663453	1,24
	Hoog slik	Druksensor	588321,3	5663437	2,44
		Aquadopp®	588321,9	5663438	2,50
Dendermonde	Laag slik	Druksensor	575031,08	5655789,51	2,690
		Aquadopp®	575029,92	5655788,94	2,739
	Hoog slik	Druksensor	575034,69	5655782,78	4,099
		Aquadopp®	575033,52	5655782,43	4,101

2.2 Meetinstrumenten en instellingen

De metingen op de verschillende locaties werden uitgevoerd in de loop van 2016 en 2017. In Tabel 2 is een overzicht weergegeven van de periode waarin de metingen op de verschillende locaties werden uitgevoerd.

Tabel 2: Overzicht van de tijdsperiode waarin de metingen werden uitgevoerd.

	Start meting	Einde meting
Hooge Platen	25/10/2017	28/11/2017
Saeftinghe	20/07/2016	23/08/2016
Rupelmonde	30/08/2017	5/10/2017
Dendermonde	08/05/2017	12/06/2017

Op de verschillende locaties werd steeds gemeten met een Aquadopp© voor het opmeten van stroomsnelheden en met een hoogfrequente druksensor, voor het opmeten van waterfluctuaties. Beide toestellen worden grotendeels ingegraven in het slik, waardoor ze ca. 5 à 10 cm boven het oppervlak uitsteken (zie Figuur 6).



Figuur 6: Foto van de Aquadopp en druksensor uitgezet in het veld, bij de Hooge Platen (links) en Saeftinghe (rechts)

Voor de snelheidsmetingen met de Aquadopp® worden volgende instellingen gehanteerd:

- Verticale resolutie van 0,10 m
- Blanking afstand van 0,10 m
- Meetfrequentie: 1 / 300 s (1 meting per 5 minuten)
- 1 geregistreerde meting is een gemiddelde van metingen gedurende 60 s

De druksensoren (OSSI-010-003 B/C instruments) meten met een frequentie van 20 Hz. Deze metingen zijn continu, met uitzondering van een periode van ca. 20 s per dag, waarbij de metingen worden opgeslagen door het meetinstrument.

Gegevens die betrekking hebben op de scheepvaart worden afgeleid op basis van de AIS database en/of foto's. Deze data en de analyse die werd uitgevoerd op deze data, wordt uitvoerig besproken in hoofdstuk 4.

Additionele metingen werden eveneens gebruikt. Hierbij werd steeds gebruik gemaakt van het dichtstbijzijnde, gekende meetstation, met data gedurende de meetperiode. De variabelen die nog gebruikt werden zijn de luchtdruk, voor de compensatie van de gemeten (hoogfrequente) drukken, de windsnelheid en windrichting voor het linken van de golfdata en getijdata. Een overzicht van de gebruikte informatie voor elk van deze variabelen en elke meetregio is te vinden in Tabel 3.

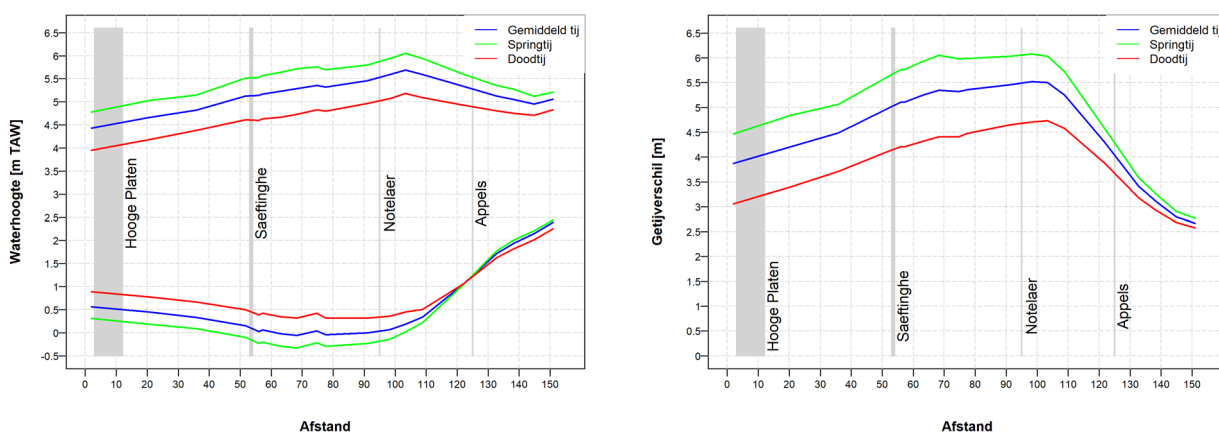
Tabel 3: Overzicht van de locatie van de gebruikte additionele metingen (met dataleverancier).

	Luchtdruk	Wind (richting & snelheid)	Tijdata
Hooge Platen	Boekhoute (VMM)	Wielingen (meetnet Vlaamse Banken)	Vlissingen (RWS)
Saeftinghe	Melsele (VMM)	Melsele (VMM)	Prosperpolder (WL)
Rupelmonde	Melsele (VMM)	Melsele (VMM)	Temse (WL)
Dendermonde	Melsele (VMM)	Liedekerke (VMM)	Dendermonde (WL)

3 Meetresultaten

3.1 Getijmetingen

In Figuur 7 is een overzicht weergegeven van de locaties van de metingen, en het verloop van hoog- en laagwaterstanden in het estuarium, net zoals het getijverschil. Deze gemiddelde waarden komen uit het vijfjarig overzicht (Hertoghs et al., 2018). Bij de Hooge Platen is het gemiddeld getijverschil ca. 4 m, bij Saeftinghe is dit reeds 5 m. De metingen bij de Notelaer bevinden zich ongeveer op het punt waar het getijverschil maximaal is (ca. 5.5 m), bij Appels is het getijverschil opnieuw vergelijkbaar met deze bij de Hooge Platen, al is de variatie tussen spring- en doottij hier kleiner.



Figuur 7: Overzicht van de meetlocaties en de gemiddelde hoog- en laagwaterstanden in het estuarium (links) en getijverschil (rechts)

Voor het inschatten van de opgetreden waterstanden gedurende de meetcampagnes wordt gebruik gemaakt van een nabijgelegen meetstation. In Tabel 3 is een overzicht weergegeven van de meetstations die gebruikt werden, per meetlocatie. In Tabel 4 zijn deze statistieken weergegeven voor de meetperiode en de gemiddelde karakteristieken voor 2011-2015. Bij de meetperiodes te Saeftinghe en Dendermonde is de getijfactor respectievelijk 1,02 en 1,04. In het eerste geval is dit vooral door iets hogere hoogwaters dan gemiddeld, in het tweede geval door iets lagere laagwaters dan gemiddeld. Bij de meetperiodes bij de Hooge Platen en Rupelmonde is de getijfactor respectievelijk 0,94 en 0,96. Dit is enerzijds te wijten aan hogere laagwaters dan gemiddeld en anderzijds zowel door zowel lagere hoogwaters en hogere laagwaters. In het algemeen sluiten de getijgegevens van de verschillende meetperiodes goed aan bij het representatieve getijverloop op de verschillende locaties. De enige meetperiode waarin de extreme waarden groter zijn dan de 99^e percentiel van de hoogwaters en ook het 1^e percentiel van de laagwaters is gedurende de metingen bij de Hooge Platen.

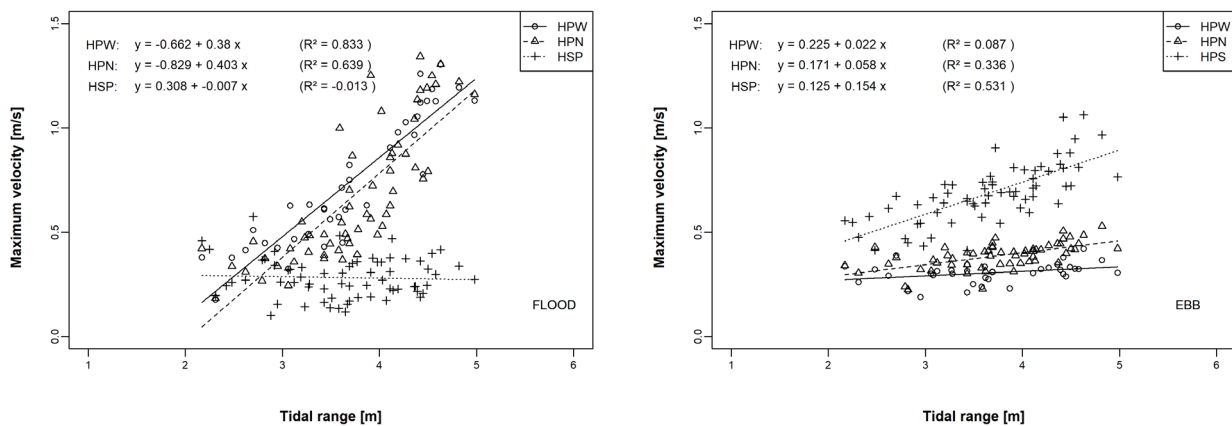
Tabel 4: Overzicht van de belangrijkste getijkarakteristieken gedurende de meetcampagne en zoals weergegeven in het vijfjarig overzicht (Hertoghs et al., 2018), in cursief.

	Gemiddeld			Max./Min.	
	HW [m TAW]	LW [m TAW]	getijverschil [m]	HW [m TAW]	LW [m TAW]
Hooge Platen	4,47	0,83	3,64	6,02	-0,63
	<i>4,43</i>	<i>0,56</i>	<i>3,86</i>	<i>5,28</i>	<i>-0,21</i>
Saeftinghe	5,26	0,03	5,23	5,88	-0,41
	<i>5,14</i>	<i>0,03</i>	<i>5,11</i>	<i>6,02</i>	<i>-0,61</i>
Rupelmonde	5,51	0,19	5,33	6,40	-0,44
	<i>5,59</i>	<i>0,07</i>	<i>5,51</i>	<i>6,45</i>	<i>-0,62</i>
Dendermonde	5,34	0,86	4,48	5,89	0,61
	<i>5,34</i>	<i>1,04</i>	<i>4,29</i>	<i>6,37</i>	<i>0,55</i>

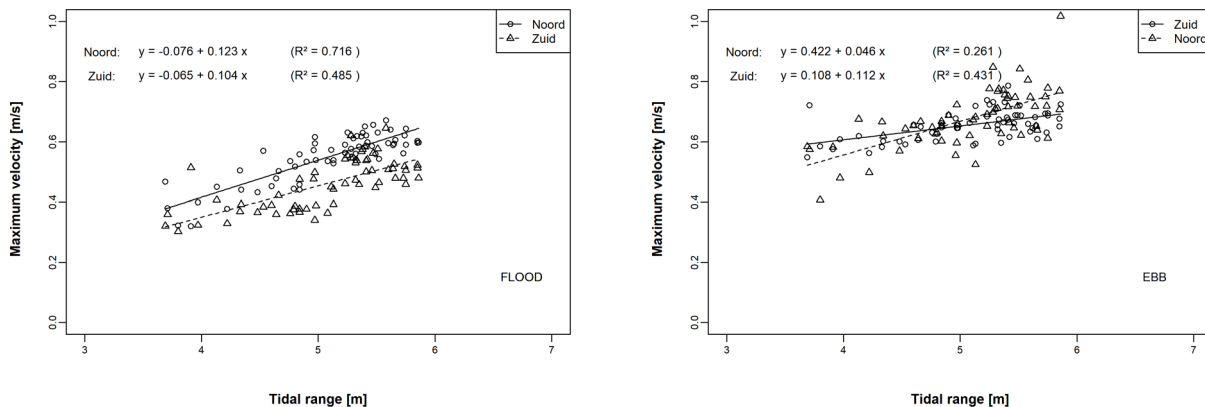
3.2 Snelheidsmetingen

In Figuur 8 t/m Figuur 11 is de relatie weergegeven tussen het lokale getijverschil (gebaseerd op het getijstation dat het meest nabijgelegen is) en de maximale snelheid opgemeten bij vloed en bij eb. Op de Hooge Platen kan een duidelijk relatie worden gevonden tussen de maximale vloednelheden en het getijverschil, bij de Hooge Platen West (HPW) en Hooge Platen Noord (HPN). Voor de Hoge Springer is deze relatie niet zichtbaar. Voor de maximale eb snelheden geldt het omgekeerde, waarbij de snelheden op de Hoge Springer hoger liggen (in de range van 0,5 m/s tot 1 m/s) en ook duidelijk gerelateerd zijn aan het getijverschil. Bij de HPN is er een flauwe relatie tussen de maximale eb stroomsnelheid en het getijverschil, voor de Hooge Platen West is deze relatie er niet.

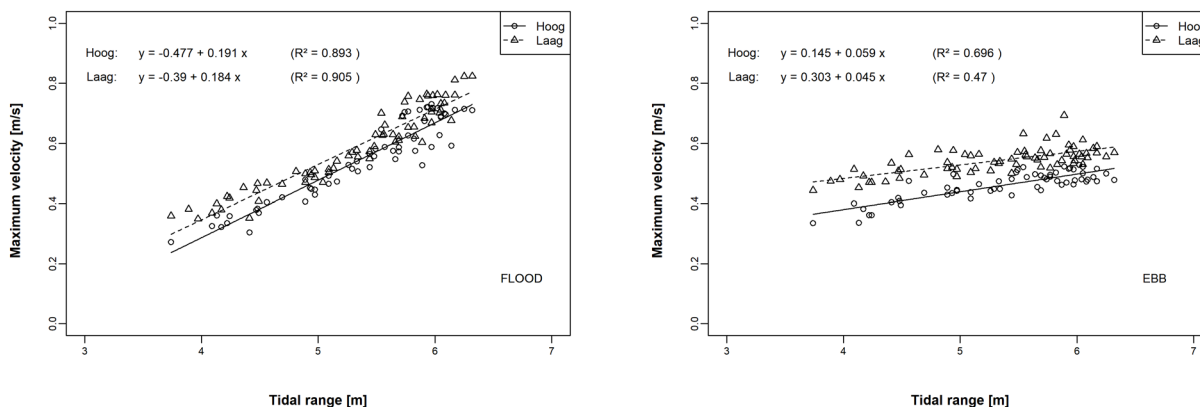
Nabij de oostrand van Saeftinghe zijn de vloednelheden in het algemeen lager dan de ebsnelheden. Er is een duidelijke, maar niet zo sterke relatie tussen het getijverschil en de snelheden voor de maximale vloednelheden. Voor de ebsnelheden kan eveneens een relatie worden gevonden, al is de spreiding toch groot. Te Rupelmonde is er een sterk gelijkende relatie tussen getijverschil en maximale vloednelheden, op hoog als laag slik. Ook in absolute waarden zijn de snelheden op beide locaties sterk gelijkaardig. Voor de ebsnelheden is deze relatie veel minder sterk. Een gelijkaardig patroon kan worden geobserveerd nabij Dendermonde. Hier zijn echter de ebsnelheden op het laag slik in absolute waarden veel groter dan deze op het hoog slik (ca. 0,4 m/s vs. 0,2 m/s).



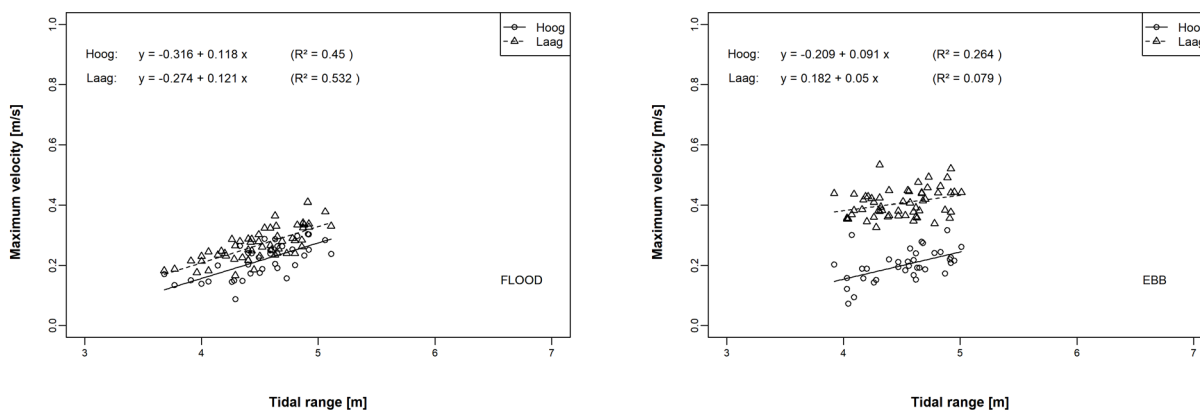
Figuur 8: Relatie tussen de maximale vloed en ebsnelheid nabij de Hooge Platen (HPW = Hooge Platen West, HPN = Hooge Platen Noord, HSP = Hoge Springer)



Figuur 9: Relatie tussen de maximale vloed en ebsnelheid nabij de ooststrand van Saeftinghe



Figuur 10: Relatie tussen de maximale vloed en ebsnelheid nabij Rupelmonde

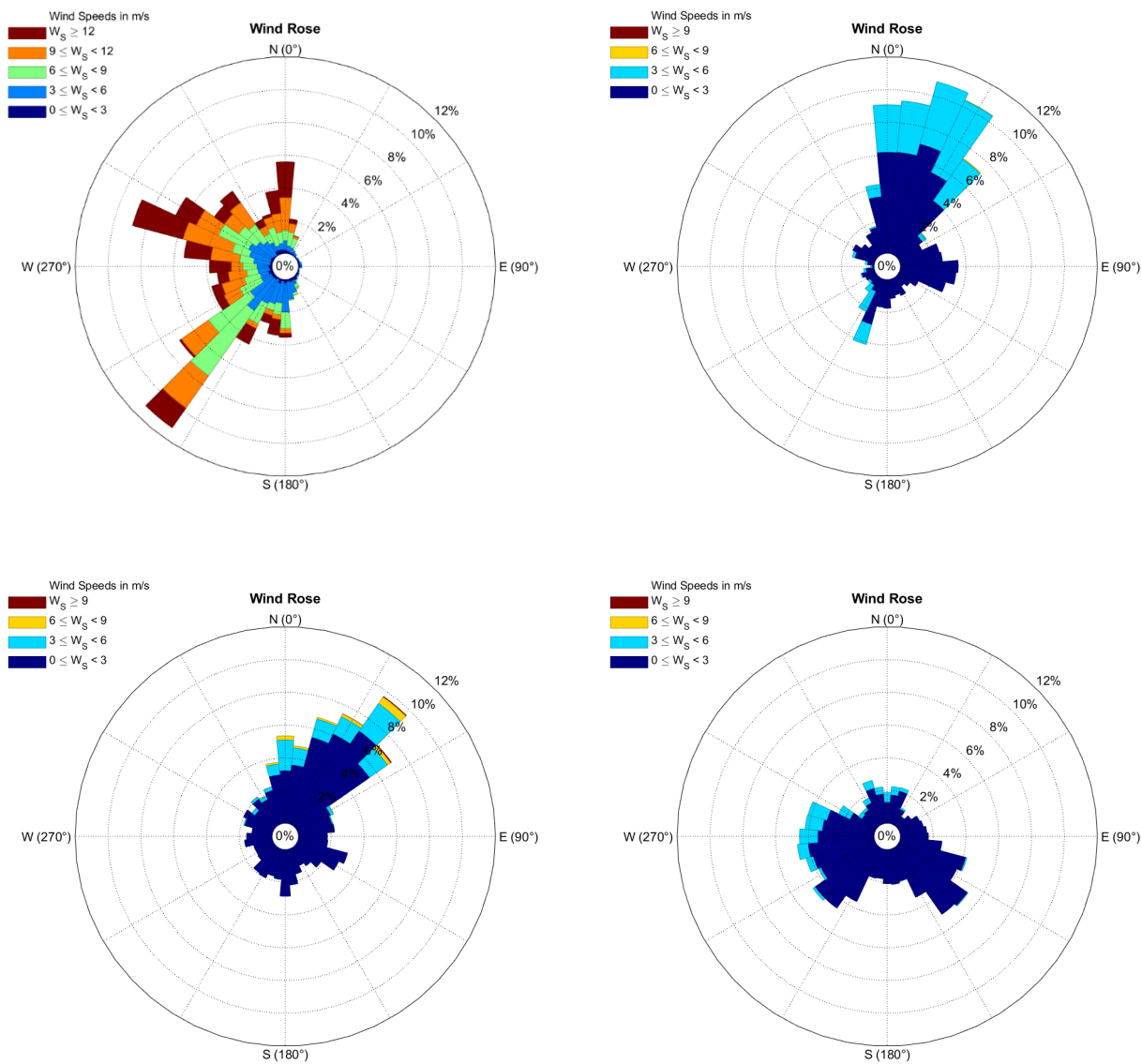


Figuur 11: Relatie tussen de maximale vloed en ebsnelheid nabij Dendermonde

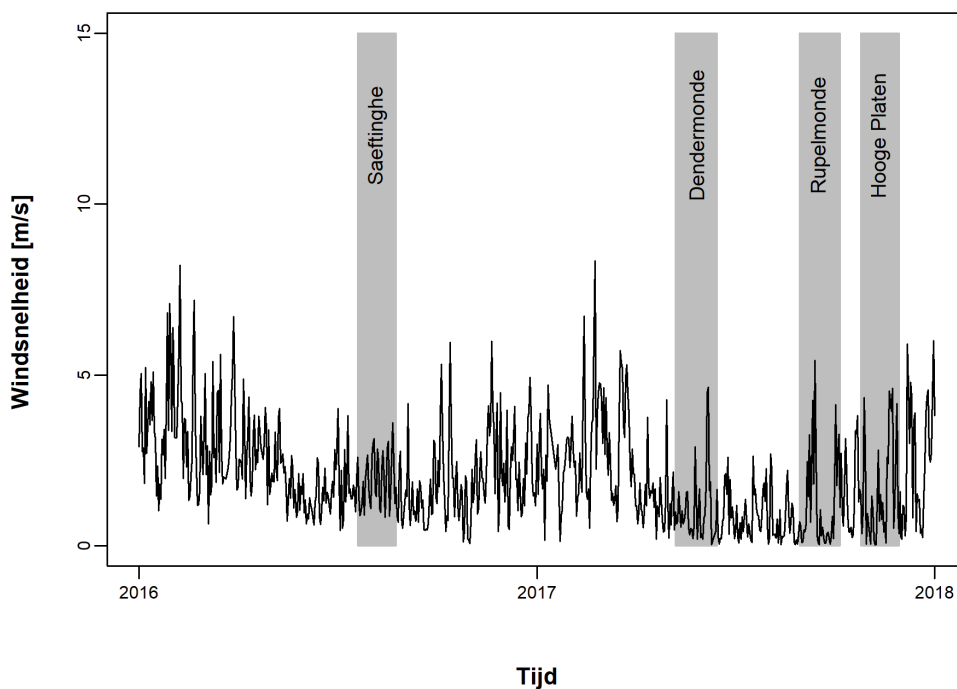
3.3 Windmetingen

In Figuur 12 zijn de windrozen weergegeven voor de verschillende meetcampagnes. Gedurende de meetcampagne op de Hooge Platen werden relatief hoge windsnelheden waargenomen, voornamelijk vanuit een zuidwestelijke en WNW richting. Op de andere meetlocaties werden veel lagere windsnelheden opgemeten. Bij Saeftinghe en Rupelmonde werd voornamelijk een NO-wind geregistreerd. Een overzicht van de gemiddelde karakteristieken van de windsnelheid en richting is eveneens weergegeven in Tabel 5.

In Figuur 13 en Tabel 6 is het windklimaat weergegeven voor een periode van begin 2016 tot eind 2017 te Melsele, om de meetperiodes te kaderen binnen het opgetreden windklimaat op langere termijn. Hierbij kan duidelijk gesteld worden dat het opgetreden windklimaat gedurende de meetcampagnes niet uitzonderlijk laag of hoog was. De gemiddelde windsnelheid is het grootst gedurende de metingen bij Saeftinghe, maar de spreiding en maximale waarden tijdens deze periode zijn dan weer het kleinst.



Figuur 12: Windroses voor de verschillende meetlocaties (linksboven: Hooge Platen, rechtsboven: Saeftinghe, linksonder: Rupelmonde, rechtsonder: Dendermonde)



Figuur 13: Overzicht van de gemiddelde dagelijkse windmetingen (snelheden) te Melsele voor de jaren 2016 en 2017, met aanduiding van de periode van de meetcampagnes

Tabel 5: Overzicht van de gemiddelde windkarakteristieken gedurende de meetcampagne

	Windrichting [°]	Windsnelheid [m/s]
Hooge Platen	273°	8,47
Saeftinghe	21°	1,97
Rupelmonde	18°	1,11
Dendermonde	272°	1,31

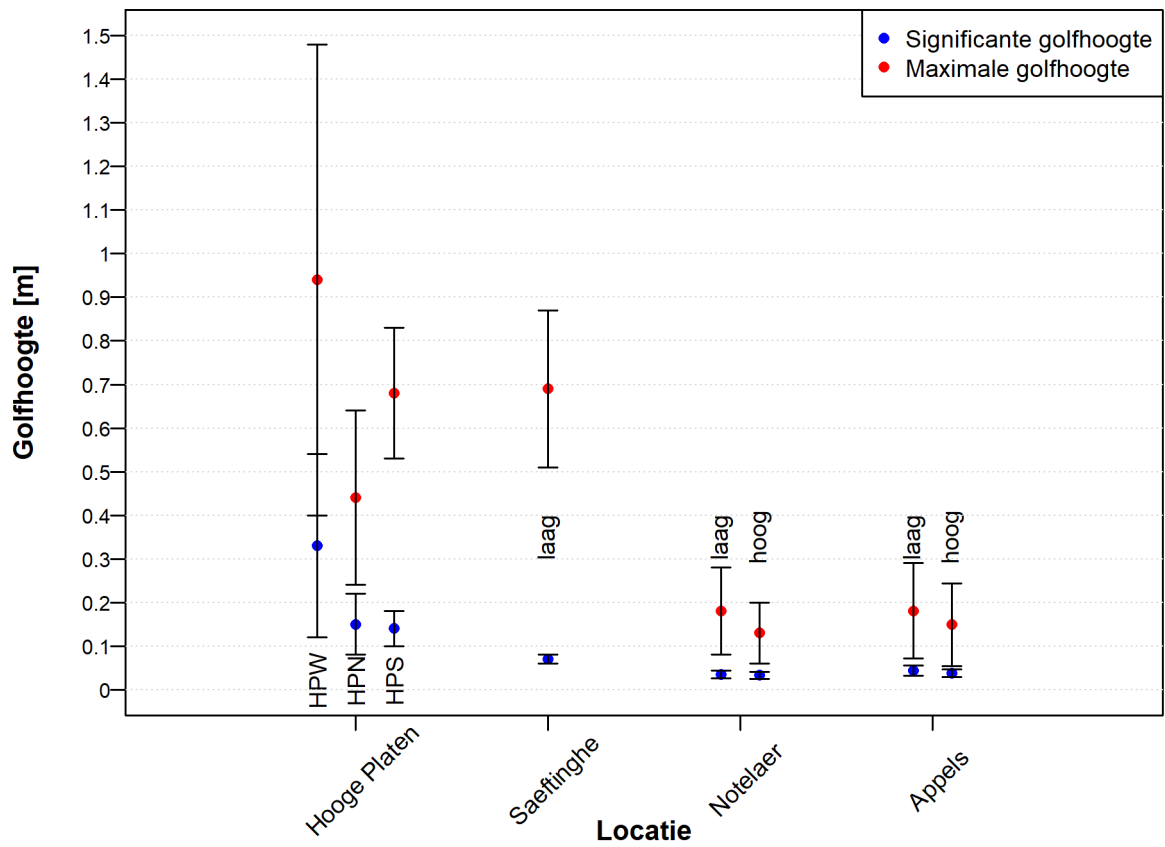
Tabel 6: Karakteristieken van de windmetingen (snelheden) te Melsele voor de jaren 2016 en 2017

Periode	Gemiddelde dagelijkse windsnelheid (m/s)	Maximale dagelijkse windsnelheid (m/s)
2016 - 2017	2,00	16,81
Hooge Platen	1,5 ± 1,43	10,33
Saeftinghe	1,97 ± 0,78	7,89
Rupelmonde	1,11 ± 1,38	9,7
Dendermonde	1,10 ± 1,04	8,81

3.4 Golfmetingen

In Figuur 14 is een overzicht weergegeven van de significante en maximale opgemeten golfhoogtes. Deze werden bepaald per getijcyclus, dus elke periode waarop de sensoren onder water staan wordt één waarde voor de significante en maximale golfhoogte berekend. Hiervan wordt vervolgens een gemiddelde waarde berekend, over alle tijden, en deze waarden zijn weergegeven in Figuur 14. Voor de Notelaer en Appels zijn de significante en maximale golfhoogtes sterk gelijkaardig. Voor de Hooge Platen zien we duidelijk dat de significante golfhoogte groter is aan de westelijke zijde, die blootgesteld is naar de zee toe. Bij Hooge Platen Noord en de Hoge Springer zijn de significante golfhoogtes reeds duidelijk lager.

Voor de maximale golfhoogtes, weergegeven in rode punten in Figuur 14, en berekend als het gemiddelde van alle maximale golfhoogtes per getij, zien we eveneens een duidelijk afname naarmate men zich opwaarts beweegt. Voor de HPW werd een waarde van bijna 1 m waargenomen, met een grote spreiding. Zowel waarde als spreiding is duidelijk veel groter dan alle andere metingen. Bij de Hooge Platen Noord is de maximale golfhoogte iets lager dan bij de oostrand van Saeftinghe en Hoge Springer, vermoedelijk door het effect van scheepsgolven in deze laatste 2 locaties. Ter hoogte van de opwaartse meetposten worden golfhoogtes van 0,15 à 0,20 m opgemeten. Het verschil tussen de hoge en lage meetpunten bedraagt enkele centimeters.



Figuur 14: Overzicht van de significante golfhoogte en maximale golfhoogte op de verschillende meetlocaties, berekend op basis van een volledige getij

4 Analyse van scheepsdata

4.1 AIS data en foto's

4.1.1 AIS

Het “Automatic Identification System (AIS)” is een “tracking” systeem, gebruikt door VTS, “Vessel Traffic Services”, voor de lokalisatie en identificatie van schepen. Schepen wisselen data uit met andere schepen of grondstations. Deze data omvat informatie omtrent de positie, richting en vaarsnelheid van het schip. Op de Westerschelde en de Noordzee worden de AIS data ontvangen door meer dan 10 grondstations. Deze data wordt opgeslagen in een centrale server, uitgebaat door de Schelde Radar Keten. Voor meer informatie wordt verwezen naar Kolokythas et al., 2017. Ook op de Zeeschelde worden deze AIS data gebruikt. Hier worden de data echter verzameld door de Vlaamse Waterweg. De inhoud van de data afkomstig van de verschillende bronnen, is identiek.

Voor de verwerking van deze AIS data, werd in deze studie gebruik gemaakt van een tool, ontwikkeld door Flanders Hydraulics (Kolokythas et al, 2017). Er wordt een dwarssectie aangeduid, “entry line” genaamd, gelegen in het verlengde van de meetposities. Deze dwarssectie, volledige doorgetrokken tussen linker- en rechteroever is een lijn waarop de volledige AIS database gefilterd wordt. Voor elke entry line wordt een data file gegenereerd, waarin zowel statische als dynamische informatie van de passerende schepen wordt geregistreerd: (a) tijd van passage, (b) mmsi (“Maritime Mobile Service Identity”) nummer, (c) naam van het schip, (d) scheepstype, (e) lengte, (f) breedte, (g) diepgang, (h) snelheid (over grond) en (i) richting. De afstand tot de meettoestellen is toegevoegd aan de AIS informatie als een extra parameter.



Figuur 15: Passage van een schip ter hoogte van Rupelmonde (links) en Dendermonde (rechts)

4.1.2 Foto's

Scheepspassages worden geregistreerd met behulp van het AIS, maar in de Boven-Zeeschelde worden niet alle schepen geregistreerd in deze database, aangezien dit systeem niet verplicht gebruikt dient te worden in deze zone. Daarom werd voor de meetlocaties hier, met name bij Rupelmonde en Dendermonde, eveneens foto's getrokken, respectievelijk vanop het jachtpaviljoen de Notelaer (zie foto in Figuur 15, links) en een wilgenboom in het schor (zie foto in Figuur 15, rechts). Deze foto's werden automatisch genomen met de Reconyx Hyperfire PC800, met een welbepaalde frequentie en gedurende bepaalde periodes tijdens het daglicht. Foto's werden getrokken met een frequentie van respectievelijk 5 s en 3 s. Continue metingen voor de volledige periode waren niet mogelijk vanwege de beperkingen met zowel de batterijen van het fototoestel als de opslagcapaciteit.

Passages van schepen worden automatisch gedetecteerd door een algoritme geschreven in de R software omgeving.

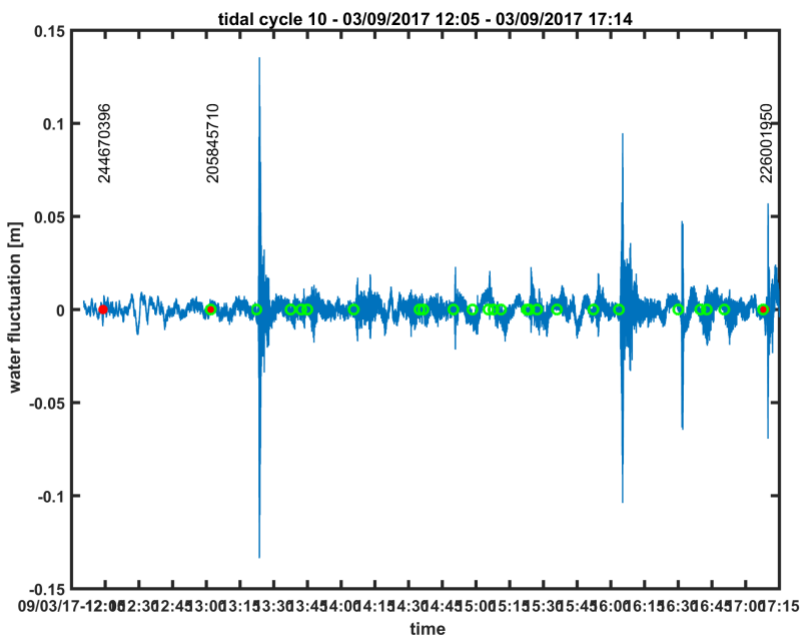
4.2 Overzicht

In Tabel 7 is een overzicht weergegeven van het aantal scheepspassages ter hoogte van de verschillende meetlocaties, gedurende de respectievelijke meetcampagnes. Het aantal passages neemt af van af- naar opwaarts. Aangezien de foto's slechts voor bepaalde periodes zijn ingezet, zijn deze aantallen voor de Boven-Zeeschelde enkel gebaseerd op de AIS data en bijgevolg een onderschatting, zoals blijkt uit Figuur 16.

Tabel 7: Overzicht van aantal scheepspassages per locatie, gebaseerd op basis van AIS data

Locatie	Passages	Tijd (# dagen)	Passages / dag
Hooge Platen	7844	42	186,7
Saeftinghe	5877	35	167,9
Rupelmonde	937	37	25,3
Dendermonde	530	30	17,6

In Figuur 16 is een getijcyclus weergegeven voor Rupelmonde, waarbij zowel scheepspassages geregistreerd werden met behulp van de AIS database en de foto's. Het is duidelijk dat in de AIS database voor dit deel van de Schelde, heel wat schepen niet worden geregistreerd. In dit voorbeeld werden 22 scheepspassages geregistreerd met de camera's, terwijl er slechts 3 geregistreerd werden met het AIS systeem. Eveneens valt het op dat de grootste golfpatronen die worden gedetecteerd, niet noodzakelijk worden opgewekt door schepen geregistreerd in het AIS systeem.



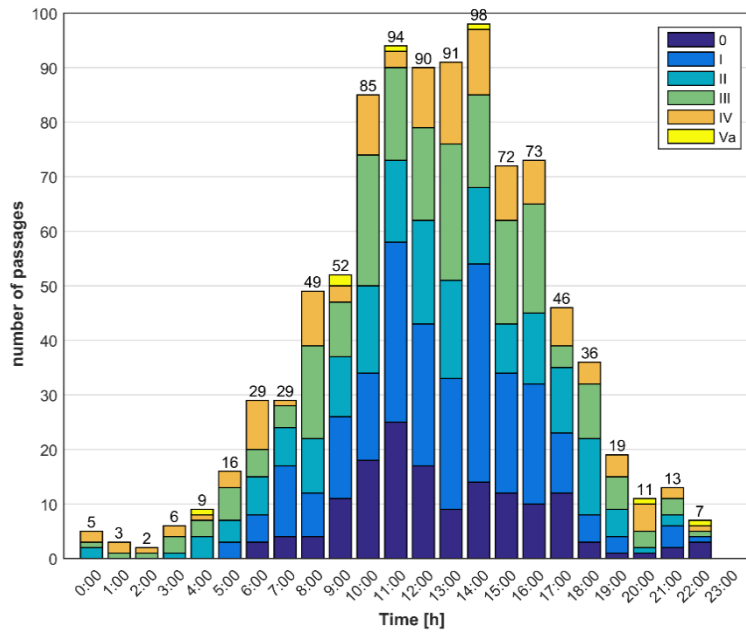
Figuur 16: Aanduiding van scheepspassages voor een getijcyclus geregistreerd met de AIS gegevens (rode bol) en de foto's (gele cirkel)



Figuur 17: Visualisatie van de scheepsbewegingen nabij de Hooge Platen, zowel voor de Hooge Platen Noord (links) als de Hoge Springer (rechts)

Op de verschillende locaties is de scheepsbeweging hoofdzakelijk georiënteerd parallel aan de oever en bijgevolg de meetlocatie. De uitzondering hierop zijn de metingen bij de Hooge Platen, zoals weergegeven in Figuur 17. Met name nabij de Hoge Springer, Figuur 17 rechts, zijn de patronen van de scheepsbewegingen duidelijk in verschillende richtingen.

In Figuur 18 is het verloop weergegeven doorheen de dag op basis van de AIS data te Rupelmonde, waarbij de verschillende klassen weergegeven de ECMT klassen zijn voor binnenvaartschepen (zie Meire et al., 2020; Meire et al., 2021a). Het is duidelijk dat het grootste aantal scheepspassages waargenomen worden doorheen de dag, 85% van de scheepspassages hier wordt waargenomen tussen 8 u 's morgens en 20 u 's avonds. Voor de locaties in de Westerschelde kon deze dagelijkse variatie niet worden onderscheiden.

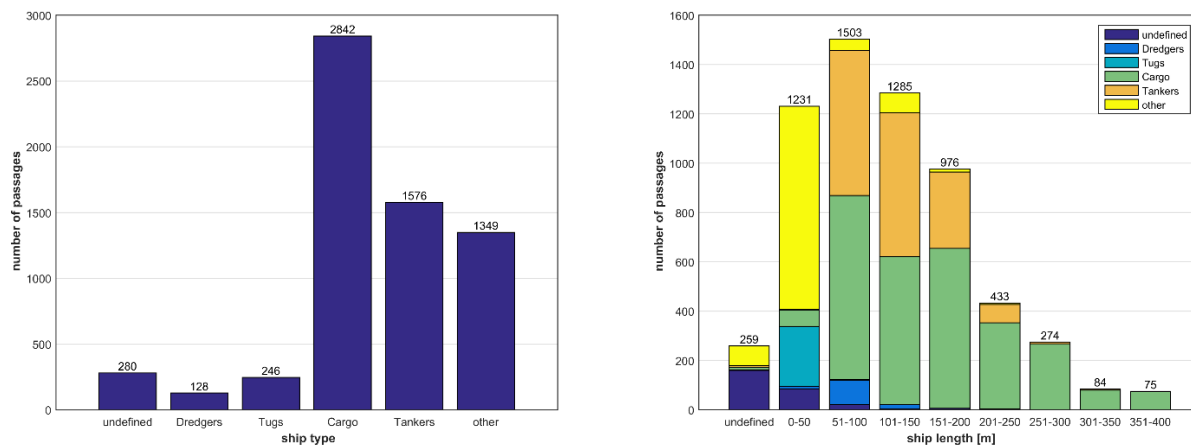


Figuur 18: Verloop van de scheepspassages doorheen de dag, ter hoogte van Rupelmonde op basis van de AIS data.

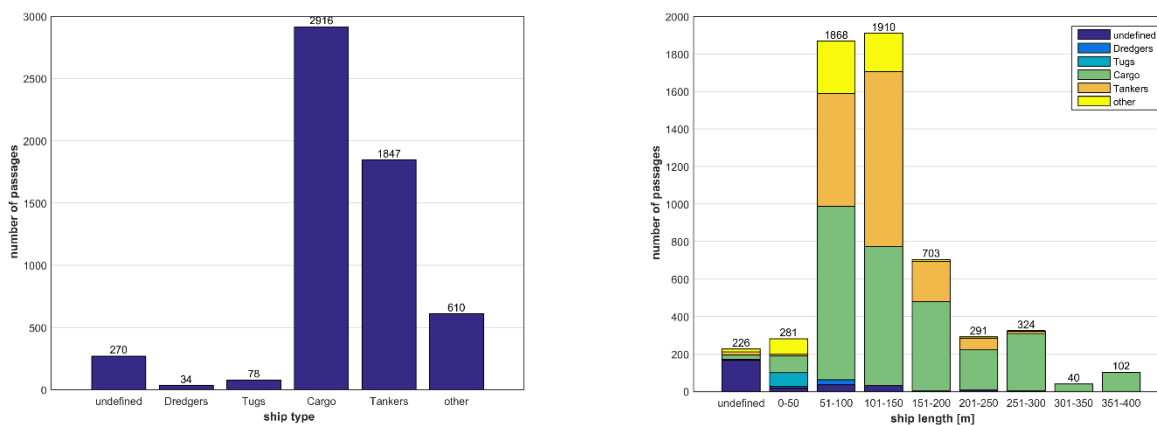
4.3 Analyse van scheepskarakteristieken

In Figuur 19 t.e.m. Figuur 22 zijn de scheepstypes en lengteverdeling voor de verschillende locaties weergegeven. Zowel bij de Hooge Platen (Figuur 19) als Saeftinghe (Figuur 20) zijn het grootste deel van de passerende schepen cargoschepen, zij vertegenwoordigen respectievelijk 44 % en 50 % van alle passages, gevolgd door tankers (verantwoordelijk voor respectievelijk 24 % en 32 % van de passages). Voor de locaties op de Boven-Zeeschelde worden de schepen opgedeeld volgens ECMT klassen, zoals weergegeven in Meire et al. (2020&2021a). Voor Rupelmonde (Figuur 21) is van categorie I t.e.m. IV relatief goed verdeeld, in Dendermonde (Figuur 22) wordt het grootste deel van de scheepspassages vertegenwoordigd door scheepsklassen II en III.

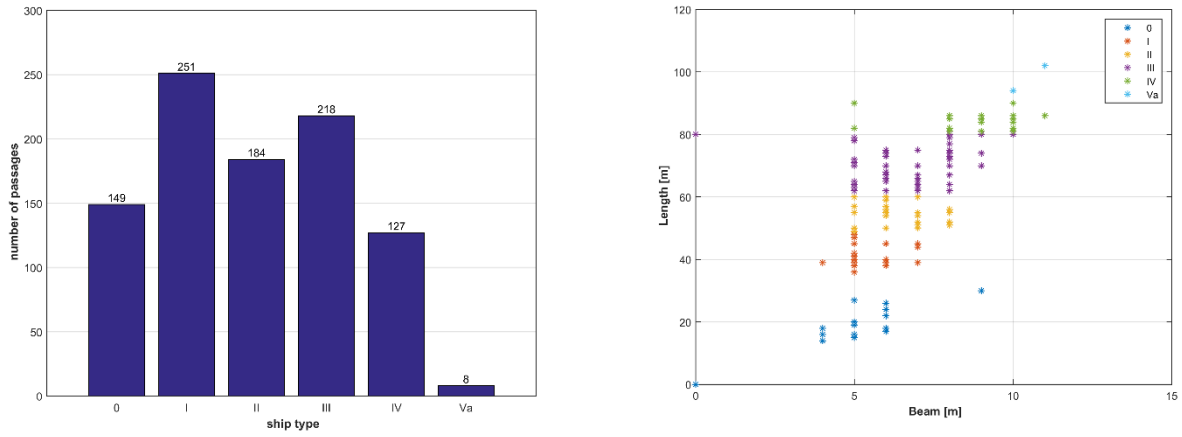
Met betrekking tot de lengte vertegenwoordigen schepen groter dan 300 m respectievelijk 159 en 142 passages (Hooge Platen en Saeftinghe). Schepen groter dan 200 m, dit is de minimum lengte die geselecteerd werd om primaire scheepsgolven te beschouwen (zie verder), vertegenwoordigen respectievelijk 866 en 757 scheepspassages (of 13 % in beide gevallen).



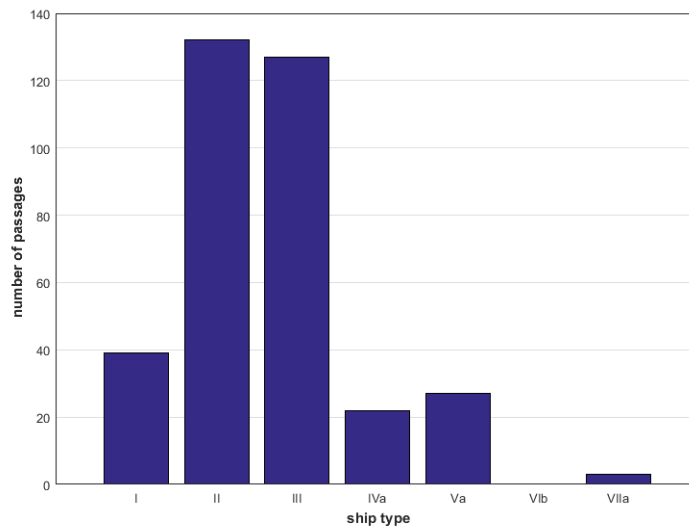
Figuur 19: Overzicht van het type schepen en verdeling van de scheeps lengte, ter hoogte van de Hooge Platen, gebaseerd op basis van de AIS data



Figuur 20: Overzicht van het type schepen en verdeling van de scheeps lengte, ter hoogte van de Saeftinghe, gebaseerd op basis van de AIS data



Figuur 21: Overzicht van het type schepen en verdeling van de scheeps lengte, ter hoogte van Rupelmonde, gebaseerd op basis van de AIS data

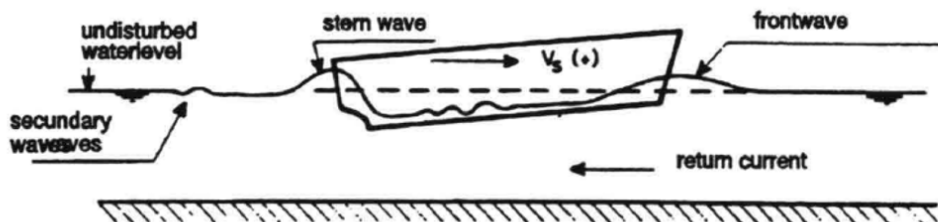


Figuur 22: Overzicht van het type schepen en verdeling van de scheeps lengte, ter hoogte van Dendermonde, gebaseerd op basis van de AIS data

5 Theorie rond scheepsgolven

Golven kunnen worden opgewekt door zowel wind als schepen. Ten gevolge van hun verschillende generatiemechanisme, hebben scheeps- en windgolven duidelijk verschillende eigenschappen, zoals bv. golfperiode, golflengte en patroon van de golven (Hofmann et al., 2008). De karakteristieken van de scheepsgolven worden beïnvloed door omgevingsfactoren (waterdiepte, bathymetrie, watersnelheid) en door parameters van het schip zelf (design van de romp, snelheid, lading, voortstuwing,...) (Houser, 2010). Scheepsgolven zijn een verzameling van boeg en hekgolven, waterstands dalingen (“drawdown”) en golven veroorzaakt door de schroef.

Wanneer een schip door het water beweegt, versnelt het water ter hoogte van de boeg van het schip en buigen de stroomlijnen hier ook af. Deze versnelling wordt veroorzaakt door een drukgradiënt langsheen de romp van het schip (Sorensen, 1997). Voor een gewoon schip, neemt de druk toe nabij de boeg van het schip, zakt onder het gewoon waterpeil langsheen de romp van het schip en stijgt opnieuw nabij het hek van het schip, zoals weergegeven in Figuur 23. De sterke drukgradiënten bij de boeg, en ook de hek van het schip, veroorzaken een snelle stijging en daling van het wateroppervlak. Inertie van het wateroppervlak zorgt dan voor de productie van oscillaties aan het wateroppervlak (Sorensen, 1997). In open water is deze versnelling en drukgradiënt kleiner dan in ondiepe of smalle vaarwaters. Er is een duidelijk onderscheid tussen een primaire golf en de secundaire golven, deze worden besproken in respectievelijk sectie 6.1.1 en 6.1.2.



Figuur 23: Boeg en hekgolf generatie bij scheepspassage (Schierreck, 1993)

Twee verschillende Froude getallen worden dikwijls gebruikt voor de karakterisatie van golven gegeneerd door schepen (Parnell, 2001; Racionero, 2014). Het lengte gebaseerde Froude getal wordt gedefinieerd als:

$$F_l = \frac{V_s}{\sqrt{gL}}$$

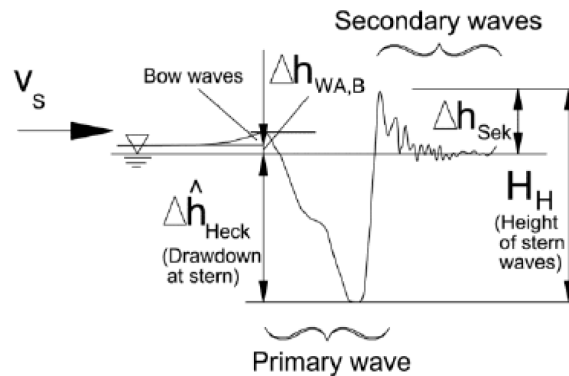
met V_s de snelheid van het schip [m/s], g de gravitationele constante ($9,81 \text{ m/s}^2$) en L de lengte van het schip (m), meestal de lengte van het schip ter hoogte van de waterlijn. In het diepte gebaseerde Froude getal wordt h , de diepte, gebruikt als karakteristieke maat.

$$F_h = \frac{V_s}{\sqrt{gh}}$$

In het werk van Kriebel & Seelig (2005) wordt nog gebruik gemaakt van een aangepast Froudegetal (zie sectie 5.2.1). In diep water variëren scheepsgolven voornamelijk met het lengte gebaseerde Froudegetal, terwijl voor ondiep water vooral het diepte gebaseerde Froude getal bepalend is (Kriebel & Seelig, 2005). Wanneer de golven zich van het schip weg verplaatsen wordt het gedrag ervan voornamelijk bepaald door de waterdiepte (Parnell et al., 2001).

5.1 Primaire golven

De combinatie van de lagere waterspiegel langs de romp van het schip (“drawdown”), boegwolf en transversale hekgolf, zoals weergegeven in Figuur 24, worden de primaire golf genoemd (Moffat & Nichols, 2011). De primaire golf heeft een golflengte die van eenzelfde grootte orde is als de scheepslengte (Schiereck, 2003; De Roo, 2013), secundaire golven zijn veel korter.



Figuur 24: Aanduiding van primaire en secundaire golfpatronen in een volledig scheepsgolfpatroon (BAW, 2011)

De theoretische effecten van een varend schip in een kanaal kunnen worden afgeleid uit de vergelijking van Bernoulli. Immers, wanneer een schip ergens passeert, stroomt water in de tegengestelde richting, de retourstroming. Door deze extra snelheidshoogte (“velocity head”), en de voorwaarde dat de totale energie constant blijft, daalt het waterniveau langs het schip. De primaire golfhoogte kan als volgt bepaald worden (Moffat & Nichols, 2011; Schiereck, 2001):

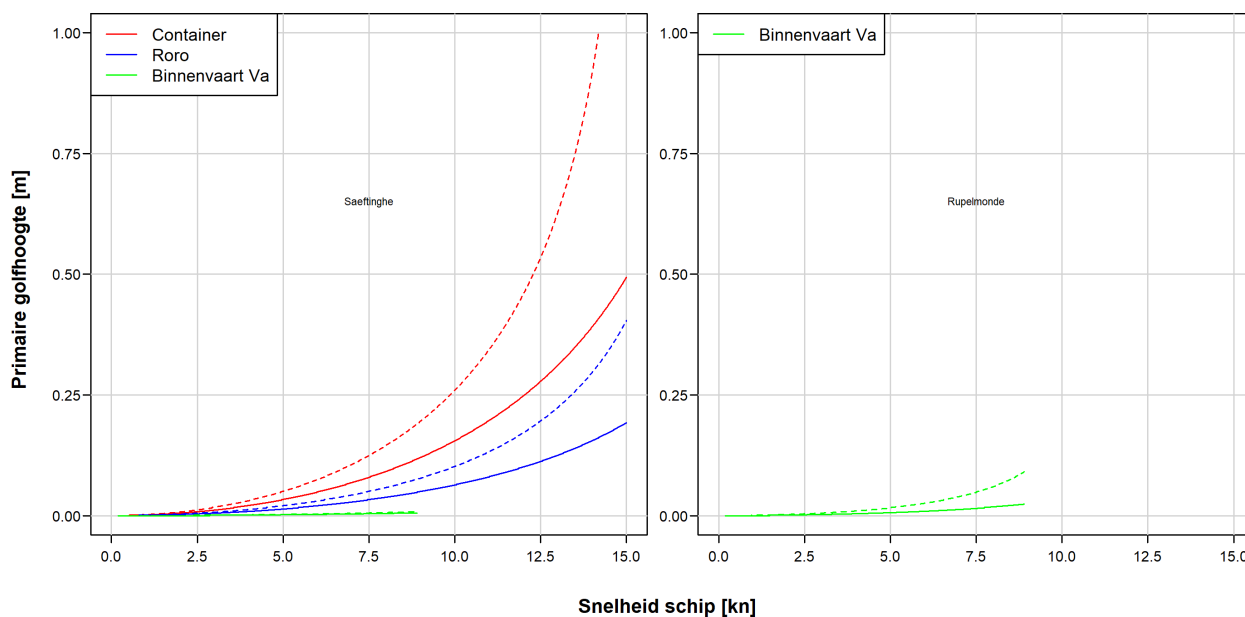
$$\frac{v^2}{g h} = \frac{2 H_{prim}/h}{\alpha \left(1 - \frac{A_s}{A_c} - \frac{H_{prim}}{h}\right)^{-2} - 1}$$

met A_s en A_c respectievelijk de doorsnede van het schip en de rivier. Een correctie coëfficiënt α kan toegepast worden, afhankelijk van de verhouding van de scheepssnelheid tot de kritische snelheid en irregulariteiten in de retourstroming. De retourstroming (u_r) wordt berekend als:

$$\frac{u_r}{\sqrt{g h}} = \left(\frac{1}{\left(1 - \frac{A_s}{A_c} - \frac{H_{prim}}{h}\right)} - 1 \right) \frac{v}{\sqrt{g h}}$$

De bovenstaande primaire golfhoogte is eigenlijk een uitdrukking voor de zakking van het water langs het schip, de “drawdown”, zoals weergegeven in Figuur 24. Deze uitdrukking is dus an sich een onderschatting van de berekende primaire golfhoogte, aangezien die wordt bepaald als combinatie van drawdown en hek- of boegwolf (afhankelijk welke de grootste is). Er bestaan eveneens verschillende correcties van bovenstaande formules, voor de positie van het schip in de rivier t.o.v. de thalweg (excentriciteit) (BAW, 2011; Schiereck, 2011). In BAW (2011) worden verschillende methodes weergegeven voor de berekening van de maximale primaire golfhoogte bij de boeg en het hek van het schip, gebaseerd op de uitdrukking van de gemiddelde waterstandsdeling zoals hierboven weergegeven.

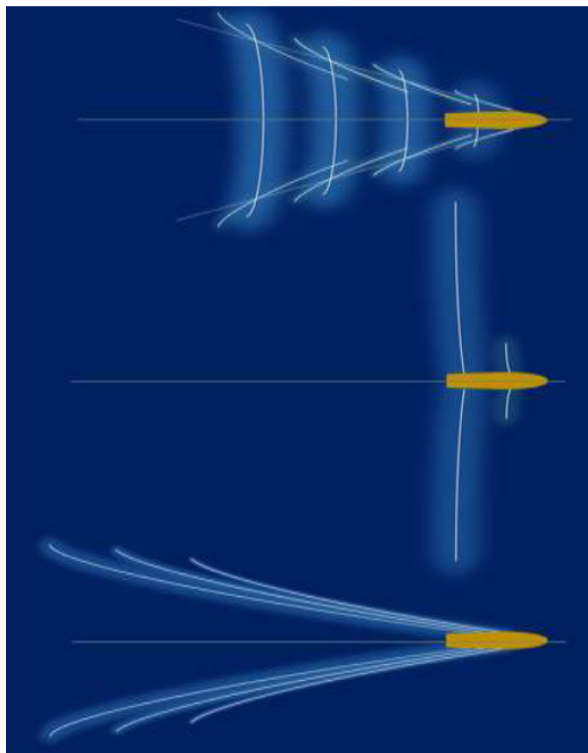
In Figuur 25 is de berekende hoogte (vergelijking hierboven volgens Schiereck, 2011) van de primaire golfhoogte weergegeven voor 3 verschillende typeschepen, op 2 locaties, met name bij Saeftinghe (links) en bij Rupelmonde (rechts). Deze drie types van schepen zijn een groot containerschip (L = 366 m, B = 48 m, D = 11,5 m), een Roro schip (L = 180 m, B = 30 m, D = 8 m) en een binnenvaartschip van klasse Va (L = 100 m, B = 11 m, D = 2,5 m). Deze lengtes (L), breedtes (B) en diepgangen (D) zijn gebaseerd op de eigenschappen van de passerende schepen, op basis van AIS gegevens. Voor de dwarsdoorsnedes op de 2 locaties wordt respectievelijk een waterdiepte van 12,2 m en 4,5 m bij laagwater en 17,3 m en 8,5 m bij hoogwater gebruikt, gebaseerd op de bathymetriën en hoog- en laagwaterstanden (Hertoghs et al., 2018) op beide locaties. Als oppervlak bij laagwater wordt respectievelijk een waarde van 8800 m² en 1400 m² gebruikt in de berekening, bij hoogwater een oppervlak van 12600 m² en 3400 m². Als correctie coëfficiënt α wordt een waarde van 1 gehanteerd. De volle lijn is het resultaat van de berekening voor een situatie bij hoogwater, de stippellijn zijn berekende waarden voor een laagwatersituatie. Voor de situatie bij Rupelmonde werd enkel de berekening voor het binnenvaarschip weergegeven, aangezien de andere type schepen hier niet passeren. Bij Saeftinghe worden maximale golfhoogtes voorspeld tussen 0,5 m en 1 m, bij 15 knopen voor de grootste schepen. Voor binnenvaart wordt hier nauwelijks een effect verwacht, voor Roro schepen is de berekende primaire golf tussen 0,15 en 0,4 m groot. Bij Rupelmonde worden effecten tot ca. 0,10 m verwacht bij maximale snelheden.



Figuur 25: Berekening van de primaire golfhoogte voor typeschepen passerend bij Saeftinghe (links) en bij Rupelmonde (rechts). De volle lijnen geven de resultaten bij hoogwater, de stippellijnen bij laagwater.

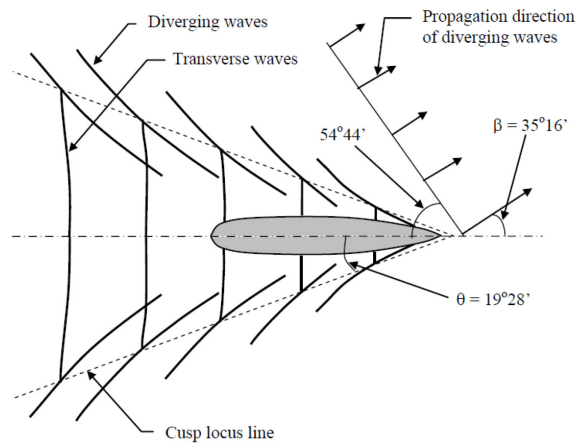
5.2 Secundaire golven

De secundaire golven worden voornamelijk veroorzaakt door discontinuïteiten in het profiel van de scheepsromp. De boeggolven zijn meestal dominant vergeleken met de hekgolven (Schiereck, 2001). In tegenstelling tot een primaire golf, die een enkele golf is, bestaat de secundaire golf uit een aantal golven, m.a.w. een golftrain.



Figuur 26: Typische golfpatronen voor verschillende ranges van Froude getallen
 $F_h < 1$ (boven); $F_h = 1$ (midden) en $F_h > 1$ (onder)

Voor subkritische snelheden, gekarakteriseerd door $F_h < 0,75$, wordt een golfpatroon gecreëerd dat een Kelvin golfpatroon wordt genoemd. Dit is geschetst in Figuur 26, boven. Dergelijk Kelvin golfpatroon wordt gekarakteriseerd door transversale en divergerende golven. Transversale golven, ook hekgolven genoemd, propageren parallel met de vaarrichting van het schip. Divergerende golven, ook boeggolven genoemd, propageren schuin t.o.v. de vaarrichting van het schip. Waar de divergerende en transversale golven elkaar tegenkomen spreekt men van de “cusp locus line”, de lijn van raakpunten. In Figuur 27 is een overzicht weergegeven van deze verschillende golven en hun voortbewegingsrichting. Wanneer het diepte gebaseerd Froudegetal F_h groter is dan 0,75 zullen de scheepsgolven beïnvloed worden door de diepte.



Figuur 27: Golfpatroon voor een schip onder subkritische snelheid (MacFarlane, 2012)

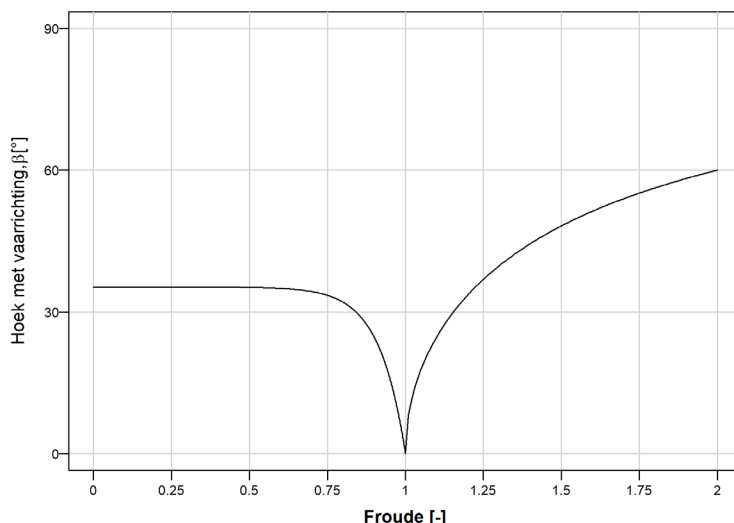
Bij kritische snelheden, met name bij $F_h = 1$, zal één of meerdere golven worden gegenereerd loodrecht op de vaarrichting, zoals weergegeven in Figuur 26, midden. Tussen een Froude getal van 0,75 en 1 zal de hoek van de Kelvin enveloppe met de vaarrichting dan ook toenemen (De Roo, 2013), zoals ook weergegeven in Figuur 28. Bij deze kritische snelheden zal het schip een maximale weerstand ondervinden. Voor superkritische snelheden, $F_h > 1$, verdwijnen de transversale golven. De divergerende golven bewegen met een hoek t.o.v. de vaarrichting die afhankelijk is van de snelheid van het schip. Het patroon voor superkritische golven is weergegeven in Figuur 26, onder.

Voor de hoek van de divergerende golven wordt volgende uitdrukking voorgesteld door Weggel & Sorenson (1996), met hoek β zoals aangeduid in Figuur 27:

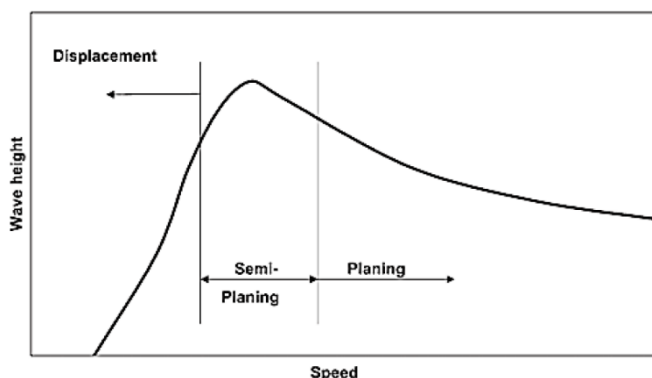
$$\beta = 35.27 (1 - e^{12(F-1)}) \quad F < 1$$

$$\beta = 90 - \sin^{-1}(1/F) \quad F > 1$$

Deze uitdrukking, visueel weergegeven in Figuur 28, verklaart tevens de golfpatronen bij toenemende Froude getallen, zoals in vorige alinea beschreven. In beperkt vaarwater ervaren zelf-aangedreven schepen, die niet planeren of zweven, een maximale snelheid van $0,9 F_h$ (Sorenson, 1996). Dergelijke schepen kunnen dus niet sneller varen, het is eveneens de snelheid waarbij maximale golven worden gegenereerd, zoals weergegeven in Figuur 29. In diep water, waarbij het lengte gebaseerd Froude getal F_l belangrijk is, worden maximale golven verwacht wanneer $F_l = 0,4$, aangezien de boeg- en hekgolven dan positief met elkaar interfereren.



Figuur 28: Hoek β in relatie tot het diepte gerelateerde Froude getal F_h [-]



Figuur 29: Verschillende fases van scheepsnelheden en de resulterende golfhoogte (uit Maynard, 2005; Tan, 2012)

5.2.1 Overzicht van formuleringen

De beschrijving van de secundaire golven gegenereerd door schepen is niet eenvoudig. Er zijn dan ook heel wat (empirische) formuleringen te vinden in de literatuur. Deze maken meestal een inschatting van de maximale golfhoogte, m.a.w. op deze lijn waar de transversale en divergerende golven maximaal met elkaar interfereren. De golfhoogte zal verminderen naarmate men zich weg beweegt van de vaarlijn. Voor deze demping van golven worden in de literatuur, gebaseerd op theoretische argumenten, een exponentiële afname voorgesteld van -0.33 en/of -0.5, die respectievelijk voor divergerende en transverse golven gelden (Kriebel & Weeber, 2005; MacFarlane, 2012).

Tabel 8: Overzicht van de verschillende karakteristieken die zijn opgenomen in de verschillende vergelijkingen

	Scheepskarakteristieken							Omgevingskarakteristieken			Bron
	Lengte	Breedte	Diepgang	Snelheid	afstand		Froude	Oppervlak	diepte	breedte	
	L	B	D	V	x	A_s / A_c	F_h	A_c	h	W	
Balanin & Bykov	$x^{-0.5}$			x^2		$x^{1.5}$				$x^{0.5}$	Sorenson, 1996
USCA (1980)	$x^{-0.5}$		$x^{0.5}$	x^2		$x^{2.5}$					Sorenson, 1996
Bhowmik	$x^{-0.457}$		X	$x^{0.587}$	$x^{-0.457}$						Sorenson, 1996
Ghates&Herbich	x^{-1}	X		x^2							Sorenson, 1996
Bhowmik (1982)			$x^{1/2}$	x							Sorenson, 1996
Blaauw (1984)					$x^{-0.33}$		$x^{2.67}$		$x^{0.67}$		Sorenson, 1996
PIANC (1987)					$x^{-0.33}$		x^4		$x^{0.67}$		Sorenson, 1996

Bhowmik	$x^{0.56}$		$x^{0.355}$	$x^{-0.346}$					x		Sorenson, 1996
Sorenson & Weggel (1984 – 1986)							x				Sorenson, 1996
BAW (2011)				$x^{2.67}$	$x^{-0.33}$				x^4		BAW (2011)
Kriebel & Seelig (2005)	$x^{0.33}$			x^2	$x^{-0.33}$		x^2				Kriebel & Seelig (2005)
Nece (1986)	$x^{4/3}$				$x^{-0.33}$		exp(F)				Sireli (2002)

Voor de verschillende empirische vergelijkingen, ontwikkeld in de loop van de tijd, wordt gebruik gemaakt van parameters, zoals snelheid van het schip, afstand van het beschouwde punt tot de vaarlijn, de waterdiepte en scheepskarakteristieken (bv. lengte, breedte, etc.). Dikwijls zijn deze formules gebaseerd op een regressie analyse van data voor een beperkt aantal scheepstypes of onder een set van typische operationele condities (Tan, 2012). In Tabel 8 is een overzicht weergegeven van de vergelijkingen voor het bepalen van scheepsgelateerde, secundaire golven. De volledige vergelijkingen zijn weergegeven in Appendix, in Tabel 9 zijn de variabelen weergegeven die gebruik worden in de vergelijking.

De twee vergelijkingen die het meest terugkomen in de verschillende literatuurbronnen is de vergelijking die wordt voorgesteld in PIANC (1987) o.a. vermeld in Moffat & Nichols (2011), Schiereck (2001).

$$H_{sec} = h \alpha_1 \left(\frac{S}{h}\right)^{-0.33} F_h^4$$

Hierbij is α_1 [-] een coëfficiënt die afhankelijk is van het scheepstype en S de afstand tussen het schip en de meetpositie. Hierbij varieert de waarde van α_1 tussen 0,35 en een maximale limiet van 1,2 (Schiereck, 2001; Verhey en Bogaerts, 1989; Moffatt et al, 2011). De periode van de golf kan bepaald worden als:

$$T = 0,82 V \frac{2\pi}{g}$$

In recentere studies (o.a. Goldman Associates (2014), ...) wordt ook meer gebruik gemaakt van het model van Kriebel & Seelig (2005). Dit empirisch model is gebaseerd op een ander empirisch model, met name deze ontwikkeld door Sorenson en Weggel (1984) en Weggel en Sorenson (1986), dat o.a. beschreven is in Sorenson, (1996), zie ook Appendix. In Kriebel & Seelig (2005) wordt gebruik gemaakt van een aangepast Froudegetal, gedefinieerd als:

$$F^* = \frac{V}{\sqrt{g L}} \exp\left(\frac{\alpha D}{h}\right)$$

voor waarden van F^* lager dan 0,1 werden geen golven geregistreerd. Dit leidt tot volgende empirische formulering:

$$H = \frac{V^2}{g} \beta (F^* - 0,1)^2 \left(\frac{x}{L}\right)^{-0,33}$$

Hierbij zijn dus twee empirische coëfficiënten aanwezig, met name α voor de berekening van F^* en β . Beide coëfficiënten zijn afhankelijk van de vorm van de boeg van het schip. Voor α wordt afhankelijk verondersteld van de blokkage coëfficiënt C_b :

$$\alpha = 2,35 (1 - C_b) = 2,35 \left(1 - \frac{\Delta}{L B D}\right)$$

Voor β wordt gebruik gemaakt van de "bow entry length" L_e , gedefinieerd als de afstand tussen de boeg en het breedste deel van het schip. Een volgende best fit, op de empirische data werd gevonden:

$$\beta = 1 + 8 \tanh^3\left(0.45 \left(\frac{L}{L_e} - 2\right)\right)$$

6 Analyse van scheepsgolven

Zoals reeds vermeld, is op de verschillende meetlocaties informatie beschikbaar omtrent het golfklimaat en de scheepspassages. In sectie 6.1 wordt algemeen beschreven hoe scheepsgolven worden opgewekt en op welke manier deze scheepsgolven in deze studie gelinkt werden aan de informatie van de schepen zelf. In sectie 6.2 worden de resultaten van deze analyse beschreven voor de primaire scheepsgolven, in sectie 6.3 voor de secundaire scheepsgolven.

6.1 Golven door schepen

De analyse van primaire golfhoogtes wordt bediscussieerd in sectie 6.1.1, de analyse van secundaire scheepsgolven in sectie 6.1.2. Door de drukke scheepvaart, met name op de Westerschelde, bestaan veel van de opgemeten golfsignalen uit verschillende patronen, veroorzaakt door individuele scheepspassages, maar ook kruisende schepen of schepen achter elkaar. Om een duidelijke link te leggen tussen de opgemeten scheepsgolven en de scheepskarakteristieken, wordt een zogenaamd ‘single ship’ event geïdentificeerd.

Zo’n event wordt als volgt gedefinieerd: de minimale lengte van het tijdsframe waarin geen andere schepen passeren, is vastgelegd op 9 minuten. Dit wil zeggen: $t_i - t_{i-1} > 9 \text{ min}$ en $t_i - t_{i+1} > 9 \text{ min}$, waarbij t_i de tijd is van scheepspassage i , $i-1$ en $i+1$ respectievelijk het voorgaande en volgende schip.

6.1.1 Primaire scheepsgolven

Voor de identificatie van primaire golfpatronen, werd gefocust op de aanwezigheid van grote schepen, aangezien visueel werd vastgesteld dat bij de passage van deze schepen een waterdaling kon worden waargenomen. De detectie van de primaire golfpatronen, uit een tijdreeks van waterfluctuaties voor elke getijcyclus, gebeurde door de toepassing van volgende criteria:

- Minimum lengte van het schip : 200 m
- Minimum snelheid van het schip : 2,5 knopen

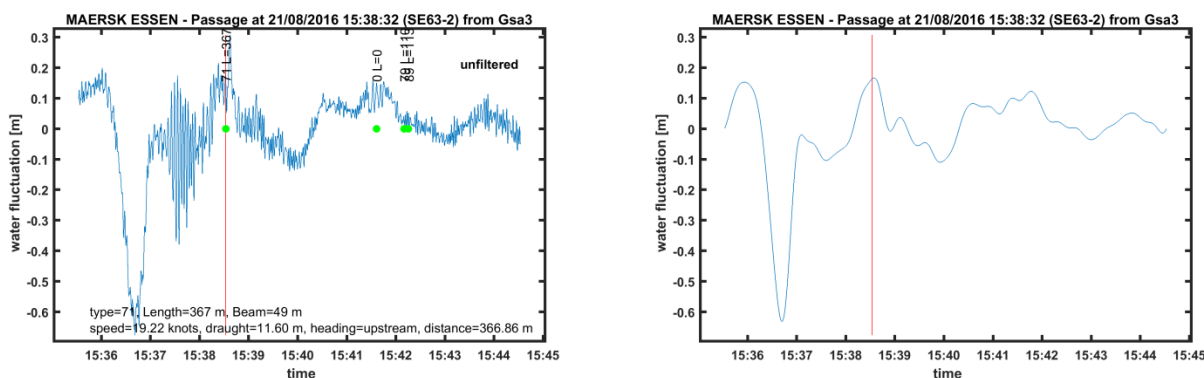
Vervolgens wordt het criterium voor een “single ship” event toegepast, waarbij enkel rekening gehouden wordt met:

- passages waarbij het waterniveau boven de druksensor minstens 20 cm bedraagt op het ogenblik van passeren
- passages waarin binnen een tijdsvenster van 9 minuten voor en na de passage van het beschouwde schip geen andere grote schepen (> 200 m) passeren ter hoogte van het meetpunt
- Een minimum snelheids criterium van 2,5 knopen werd toegepast. Dit criterium wordt toegepast om te vermijden dat events, waarbij een zeer traag varend groot schip passeert binnen het beschouwde tijdsvenster van een ander groot schip, dit event niet in rekening kan gebracht worden. Hierbij wordt er dus vanuit gegaan dat deze traag varende schepen geen invloed hebben op het golfsignaal.

Samengevat wordt dus bij een ‘event’ selectie voor primaire golven enkel grote schepen (>200 m) en snel varende schepen (> 2,5 knopen) beschouwd.

Voor het bekomen van de waarde van een primaire golfhoogte wordt de maximale golfhoogte bepaald van het event, na implementatie van een low-pass filter, met een cutoff frequentie $f_{cut} = 0.05$ ($T_{cut} = 20 \text{ sec}$). Events waarbij de hoogte van de primaire golf kleiner is dan 4 cm, worden in de analyse niet in beschouwing genomen.

Dit resulteert voor elke meetlocatie in een aantal geregistreerde events, zoals weergegeven in Tabel 7. In Figuur 30 is een voorbeeld gegeven van een groot schip met een duidelijke primaire golfhoogte. Links is het origineel signaal weergegeven, met een meetfrequentie van 20 Hz. Rechts is het signaal weergegeven na toepassing van de low-pass filter. Op deze resultaten wordt de hoogte van de primaire golf bepaald. De verticale rode lijn geeft het tijdstip weer van het moment van de scheepspassage, zoals geregistreerd in de AIS database.

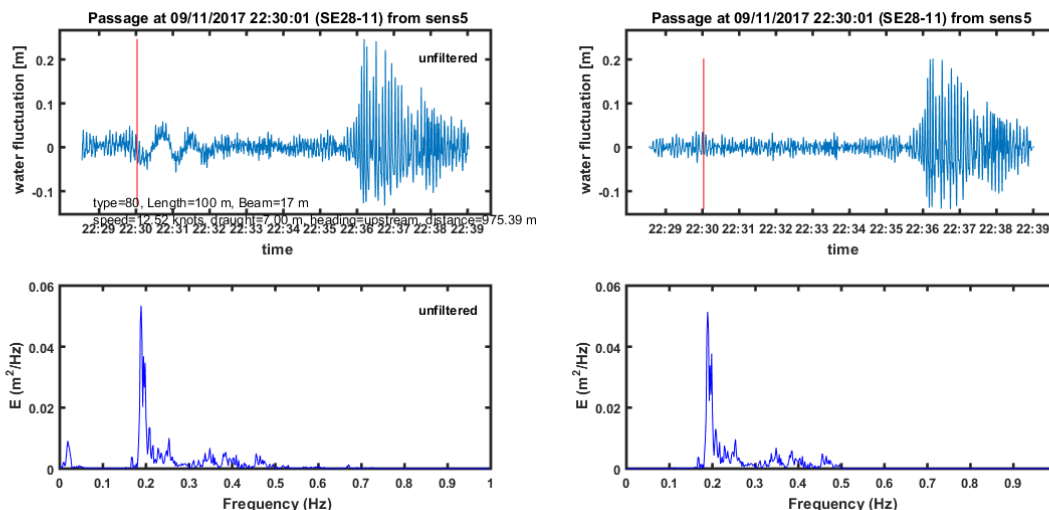


Figuur 30: Voorbeeld van de passage van een schip, waarbij een duidelijk primair golfpatroon te onderscheiden valt

6.1.2 Secundaire scheepsgolven

Voor het bepalen van secundaire scheepsgolven wordt eveneens het criterium gebruikt voor een ‘single ship’ event. Het beschouwde event heeft dan ook een duur gelijk aan 9 minuten. De gekozen duur van de gebeurtenis was het resultaat van visuele inspectie van de signalen van een belangrijk aantal gebeurtenissen om ervoor te zorgen dat het hele scheepsgolfpatroon is opgenomen in het tijdsvenster, uitgevoerd voor metingen ter hoogte van het Galgeschoor (Kokolythas, 2017). De geselecteerde duur is iets korter dan de overeenkomstige duur van 10 minuten beschouwd in De Roo (2013) en groter dan de gemiddelde duur van een scheepsgolfpatroon (7,1 min) gerapporteerd in Verelst et al. (2012) voor golfmetingen bij het Galgeschoor. Naast dit ‘single ship event’ criterium, wordt steeds nagegaan of de minimale waterdiepte boven de sensor 20 cm bedraagt.

In sommige studies (bv. Baur, 2008; De Roo, 2013) wordt een kritische waarde van 2 seconden ($f_{cr} = 0.5$) beschouwd als een limiet tussen scheepsgolven en windgolven. Golven met een periode van 2 seconde of kleiner worden beschouwd als windgolven. Het gefilterde signaal, waarop de golfkarakteristieken van de secundaire golf worden berekend, wordt gecreëerd met een bandpass filter tussen $2s < T < 10 s$. De secundaire golfhoogte wordt bepaald als de maximale golfhoogte op dit gefilterde signaal.



Figuur 31: Typisch secundair golfsignaal. Links zijn de resultaten weergegeven zonder filter, rechts zijn de resultaten weergegeven na toepassen van een band-pass filter. De verticale rode lijn geeft de tijd van passage weer van het schip.

6.1.3 Overzicht

In Tabel 9 is een overzicht weergegeven van de verschillende primaire en secundaire golfevents die geselecteerd zijn op basis van de criteria die hierboven beschreven zijn. In de Westerschelde werden zowel primaire als secundaire golven waargenomen. Het aantal events dat geselecteerd werd voor de secundaire golven is hier op alle locaties sterk gelijkaardig. Voor primaire golven werden veel minder events geselecteerd op de Hooge Platen Noord. Voor de Zeeschelde werden geen primaire scheepsgolven gedetecteerd. Het aantal events voor de analyse van secundaire golven hier is uiteraard lager op hoog slik dan op laag slik, dit door de beperktere overspoelingsduur op deze hogere locaties. Voor beide locaties hier (Rupelmonde en Dendermonde) is het aantal geselecteerde events ook sterk gelijkend.

Tabel 9: Overzicht van geselecteerde events, zowel primair als secundair, voor de verschillende meetlocaties.

Locatie		Primaire golfevents	Secundaire golfevents
Hooge Platen	HPW	/	/
	HPN	43	470
	HSP	256	486
Saeftinghe		410	497
Rupelmonde	Laag	/	320
	Hoog	/	155
Dendermonde	Laag	/	307
	Hoog	/	76

Voor de verschillende golftypes wordt een relatie gelegd met scheeps- en omgevingskarakteristieken in sectie 6.2 en 6.3. De relatie tussen deze karakteristieken en de opgemeten golfhoogten wordt zowel visueel gemaakt als aan de hand van een multiparameter analyse, een uitbreiding van een simpele, lineaire regressie. Hierbij wordt een voorspelling gemaakt van de afhankelijke variabele, op basis van, in dit geval, vier predictorvariabelen.

$$y = b_0 + b_1 \cdot \text{var1} + b_2 \cdot \text{var2} + b_3 \cdot \text{var3} + b_4 \cdot \text{var4}$$

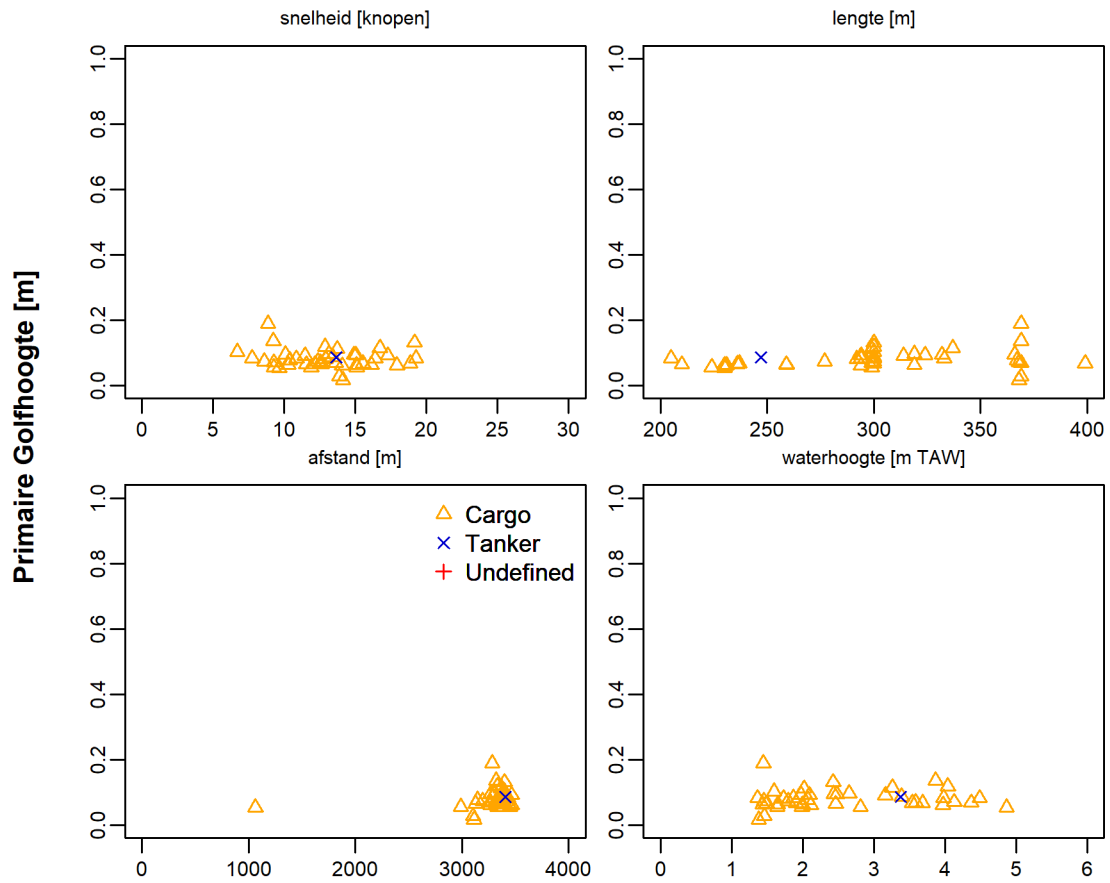
In een eerste stap wordt nagegaan welke variabelen significant zijn voor het verklaren van de parameter, in een tweede stap worden de coëfficiënten bepaald op een model waarbij alleen de significante predictorvariabelen ($p < 0,05$) worden beschouwd. De analyses werden in R uitgevoerd met behulp van de lm functie.

6.2 Primaire sloopgolven

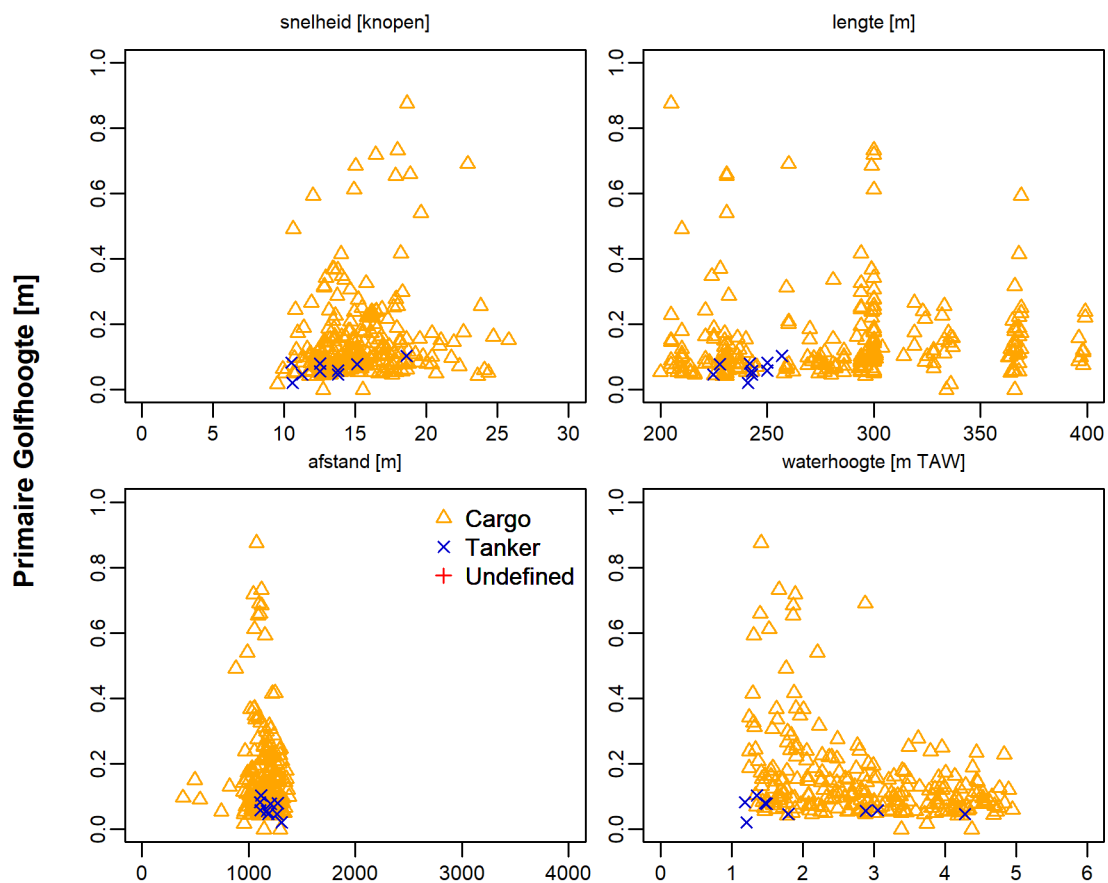
In Figuur 32 t.e.m. Figuur 34 zijn de primaire golfhoogtes weergegeven die opgemeten werden bij respectievelijk de Hooge Platen (Noord en Hoge Springer) en Saeftinghe oost. Dergelijke golven worden niet geregistreerd bij Rupelmonde en Dendermonde, deze locaties zullen hier dan ook niet verder aan bod komen. Deze golven zijn steeds weergegeven in relatie met een potentiële verklarende parameters, met name de snelheid van de schepen (t.o.v. de grond), de lengte van de schepen, afstand van het schip tot de meetpositie en de waterhoogte. Voor de Hooge Platen Noord kan nauwelijks variatie in de secundaire golfhoogte worden vastgesteld. Zowel voor de Hoge Springer als voor de metingen bij Saeftinghe (zij het minder duidelijk) lijkt de grootte van de primaire golf omgekeerd evenredig met de waterhoogte.

In Tabel 10 is een overzicht weergegeven van de coëfficiënten van een multiparameter regressie. Voor de Hooge Platen Noord kan hier, doordat er geen variatie is in de geobserveerde golfhoogtes, niets worden uitgemaakt. Voor Hoge Springer en Saeftinghe verklaart de geselecteerde multiparameter regressie respectievelijk 20 en 30 % van de variatie. Voor Saeftinghe zijn de snelheid, lengte van het schip en waterhoogte geselecteerd als verklarende, significante variabelen, voor de Hoge Springer zijn alle parameters significant.

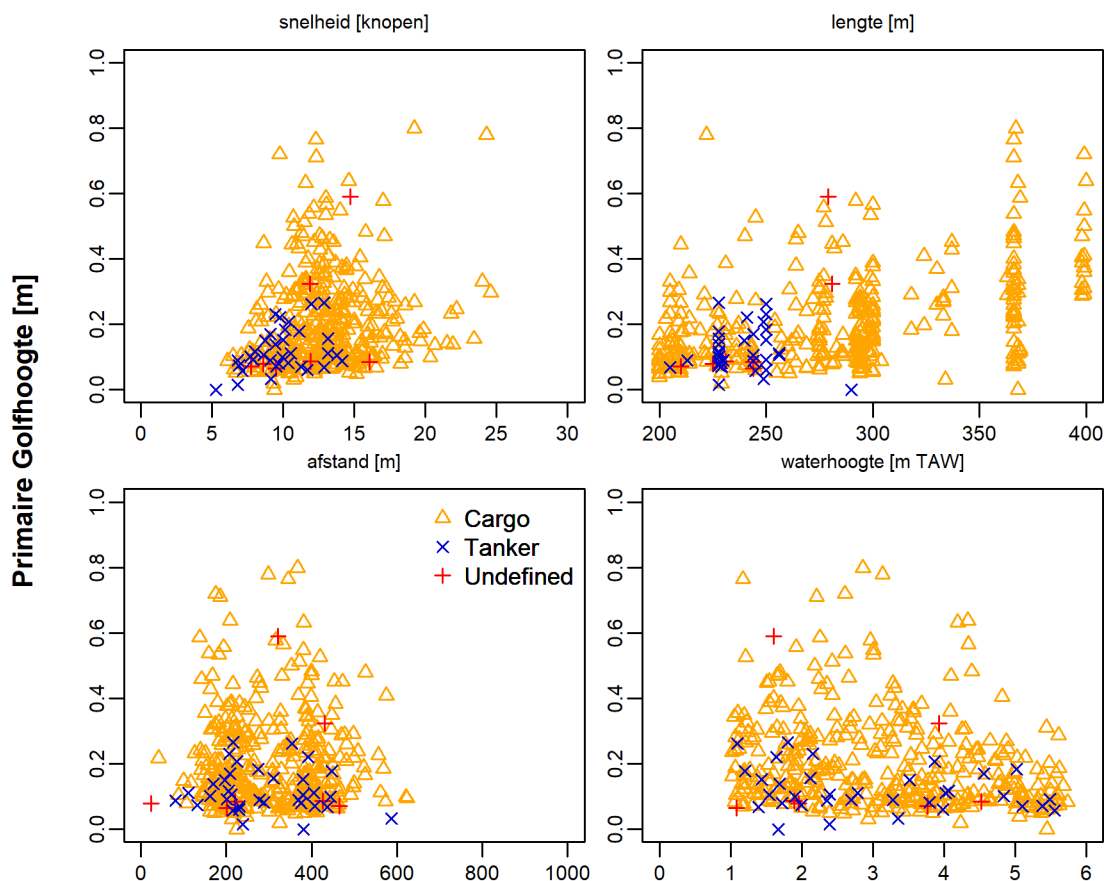
In Figuur 35 is een overzicht gegeven van de belangrijkste karakteristieken van de primaire golfhoogten doorheen het estuarium. Hierbij is het duidelijk dat de primair golfhoogte groter is bij Saeftinghe dan op de meetlocaties nabij de Hooge Platen en gemiddeld ca. 0,15 m bedraagt.



Figuur 32: Primaire golfhoogtes ter hoogte van de Hooge Platen Noord, in relatie tot verschillende scheepskarakteristieken (snelheid en lengte), de afstand van het schip tot de meetlocatie en de waterhoogte (m TAW)



Figuur 33: Primaire golfhoogtes ter hoogte van de Hooge Springer, in relatie tot verschillende scheepskarakteristieken (snelheid en lengte), de afstand van het schip tot de meetlocatie en de waterhoogte (m TAW)

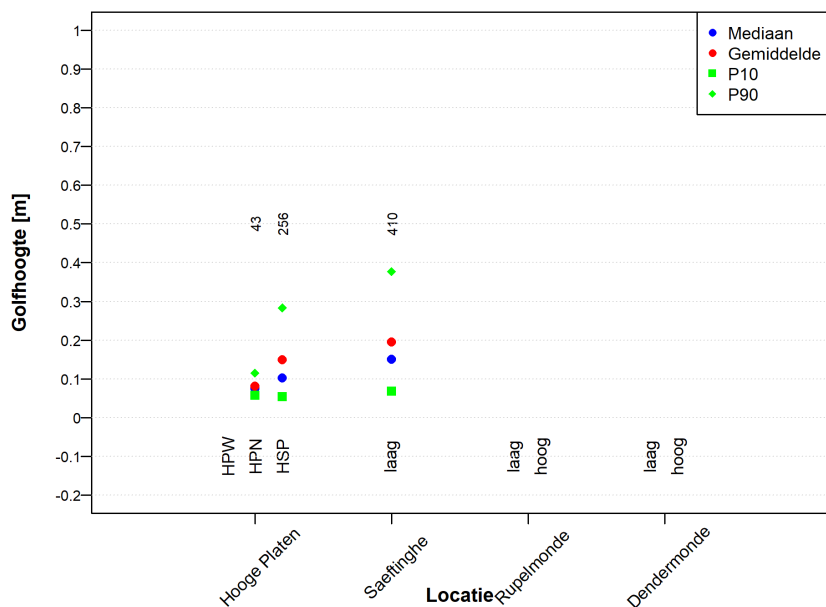


Figuur 34: Primaire golfhoogtes ter hoogte van de oostrand van Saeftinghe, in relatie tot verschillende scheepskarakteristieken (snelheid en lengte), de afstand van het schip tot de meetlocatie en de waterhoogte (m TAW)

Tabel 10: Multiparameterregressie: overzicht van significantie (NS = Niet Significant, S = Significant op basis van $p = 0.05$ criterium) van de verschillende variabelen in relatie tot de opgemeten primaire golfhoogte

	Snelheid [knopen]	Lengte [m]	Afstand [m]	Waterhoogte [m TAW]
Hooge Platen – noord	NS	NS	NS	NS
Hooge Platen – Hoge Springer	S ($p < 0.001$) $0,004 \pm 0,001$	S ($p < 0.001$) $0,0005 \pm 0,0001$	S ($p < 0.001$) $-0,00013 \pm 0,00006$	S ($p < 0.001$) $-0,051 \pm 0,008$
Saeftinghe	S ($p < 0.001$) $0,0012 \pm 0,0001$	S ($p < 0.001$) $0,004 \pm 0,001$	NS	S ($p < 0.001$) $-0,024 \pm 0,004$

Op basis van de theoretische vergelijking voor het voorspellen van de primaire golfhoogte, werd eveneens een combinatie van en uitgezet tegenover de primaire golfhoogte. De maximale voorspelde golfhoogte voor Saeftinghe, tussen laag- en hoogwater, varieert tussen 0,5 en 1m (zie Figuur 25), wat in dezelfde grootte orde is als de opgemeten waarden (maximale waarden rond 0,8 m). Voor Rupelmonde op basis van de tijdreeksen geen primaire golven geobserveerd worden (visueel), ook de berekende (voorspelde) waarde is beperkt, met een maximale berekende primaire golf van ca. 0,10 m.



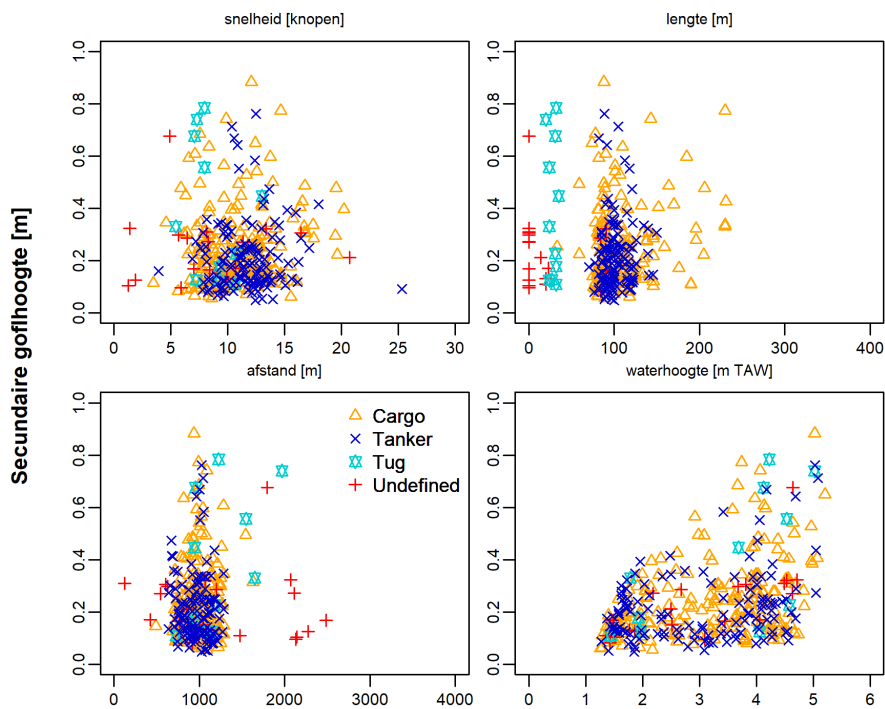
Figuur 35: Overzicht van gemiddelde, mediane en 10^{de} en 90^{ste} percentiel van de primaire scheepsgolven langsheen het estuarium, op die locaties waar golfmetingen werden uitgevoerd

6.3 Secundaire scheepsgolven

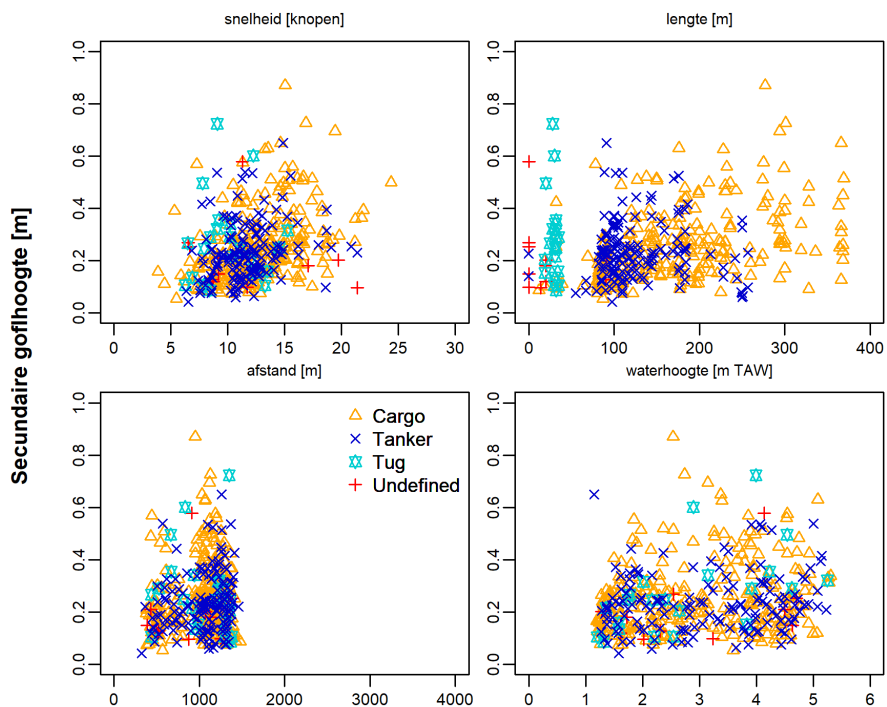
In Figuur 36 t.e.m. Figuur 42 is de grootte van de secundaire golf weergegeven in relatie tot verschillende variabelen (snelheid, lengte, afstand tot het meetpunt en waterhoogte). In het algemeen lijkt de spreiding op de meetresultaten groot, en kan voor geen enkele locatie een duidelijke relatie worden gezien tussen een bepaalde variabele en de opgemeten golfhoogte. Voor de Hoge Platen Noord (Figuur 36) lijkt er een positieve relatie te bestaan tussen de golfhoogte en de waterhoogte. Voor de Hoge Springer (Figuur 37) lijkt er een lichte correlatie te zijn tussen de golfhoogte en de snelheid, voor de andere variabelen kan geen relatie worden geobserveerd. Voor Saeftinghe (Figuur 38) lijkt er zowel voor de snelheid, lengte van het schip en waterhoogte een licht positieve correlatie, zeker voor de hogere golfhoogtes. Bij Rupelmonde (Figuur 39 en Figuur 40) lijkt er een lichte correlatie te zijn tussen de golfhoogte en de snelheid. Bij Dendermonde op de lage positie (Figuur 41) lijkt er een licht positieve correlatie voor de snelheid en een licht negatieve relatie met de lengte van het schip. Op de hoge positie (Figuur 42) zijn er te weinig events met een uitgesproken meting van de golfhoogte om een duidelijke uitspraak te kunnen doen over de relaties.

In Tabel 11 is een overzicht weergegeven van de resultaten van een multiparameter regressie. Hierbij dient opgemerkt te worden dat slechts een heel beperkte variatie binnen de dataset verklaard wordt door dergelijke regressie. Voor alle locaties is de R^2 gelegen tussen 0,15 en 0,20, met uitzondering van de metingen te Saeftinghe, waar de R^2 rond 0,30 gelegen is. Er werd steeds een volledige regressie, een regressie met alle variabelen (snelheid, lengte schip, afstand tot meetpunt, waterhoogte) opgesteld. Vervolgens werd de regressie herhaald met deze variabelen die een significante bijdrage leveren aan de regressie ($p < 0.05$). De resultaten hiervan zijn weergegeven in Tabel 11. De afstand tot het meetpunt werd nooit weerhouden als een significante variabele. Op de Hoge Springer en Saeftinghe worden zowel de snelheid, lengte en waterhoogte geselecteerd als significante variabelen. Op Hooge Platen Noord enkel de waterhoogte.

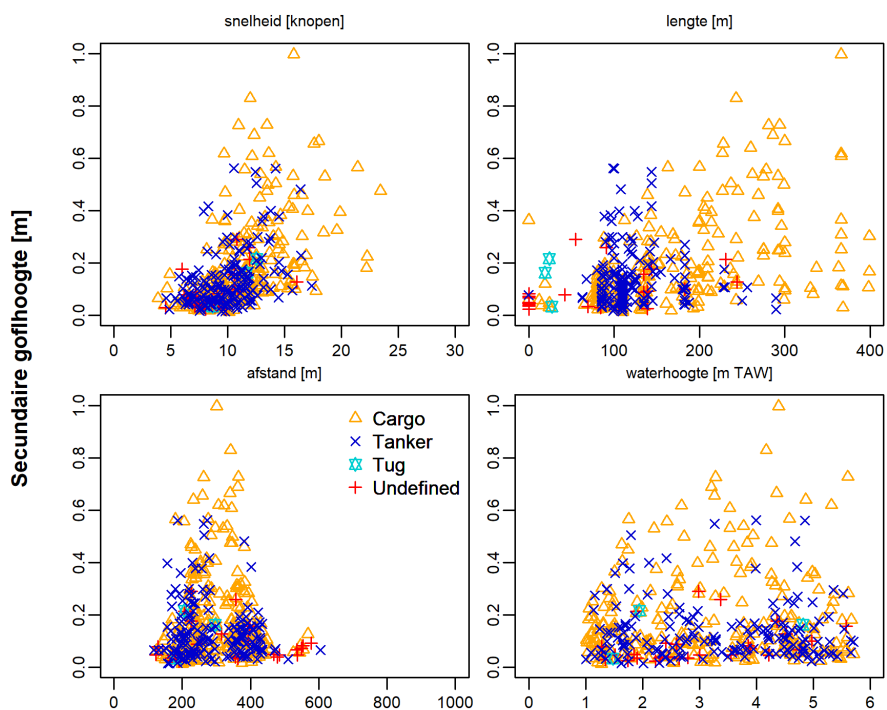
Alle significante variabelen correleren positief met de secundaire golfhoogte. Bij Rupelmonde wordt de snelheid steeds weerhouden als een significante variabele. Te Dendermonde is, enkel op de lage positie, een verklarende variabele te vinden, met name de scheeps lengte, die verassend negatief gecorreleerd is met de golfhoogte. Dit zou eventueel toegeschreven kunnen worden aan het feit dat deze schepen ook trager varen.



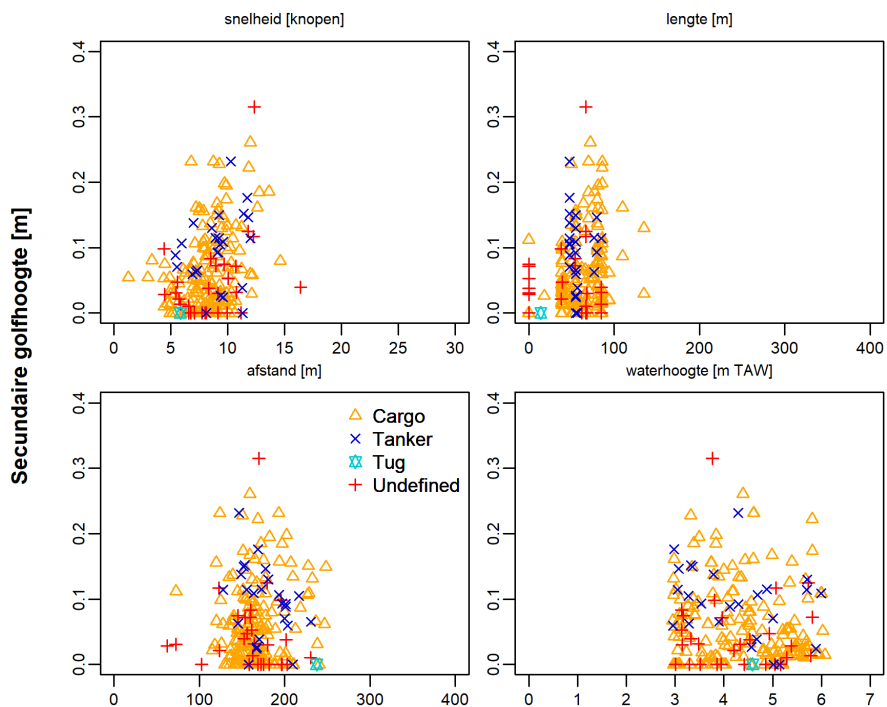
Figuur 36: Secundaire golfhoogtes nabij Hooge Platen Noord, in relatie tot verschillende scheepskarakteristieken



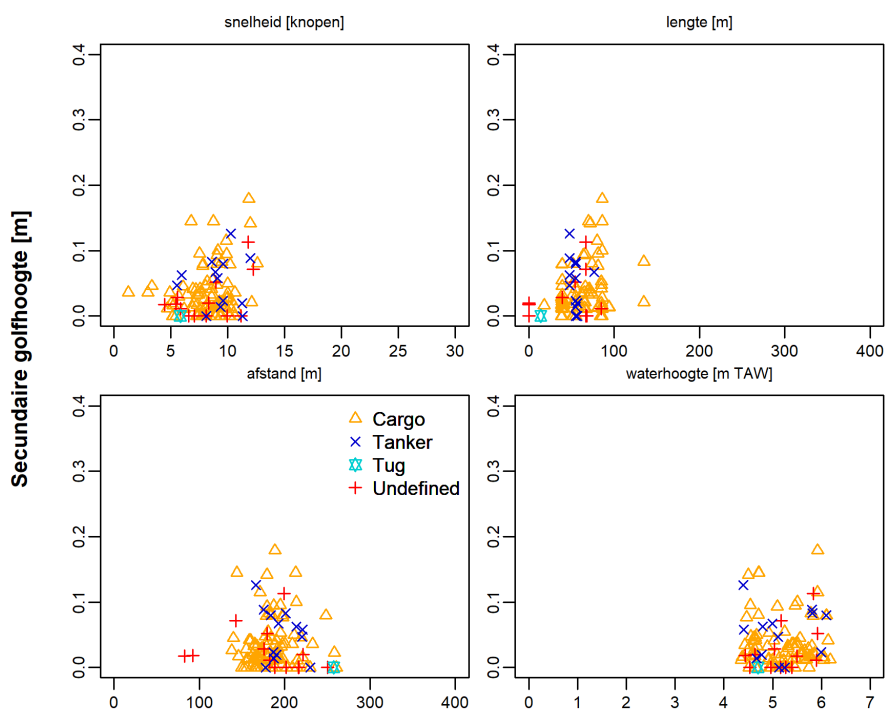
Figuur 37: Secundaire golfhoogtes nabij de Hoge Springer, in relatie tot verschillende scheepskarakteristieken (snelheid en lengte), de afstand van het schip tot de meetlocatie en de waterhoogte (m TAW)



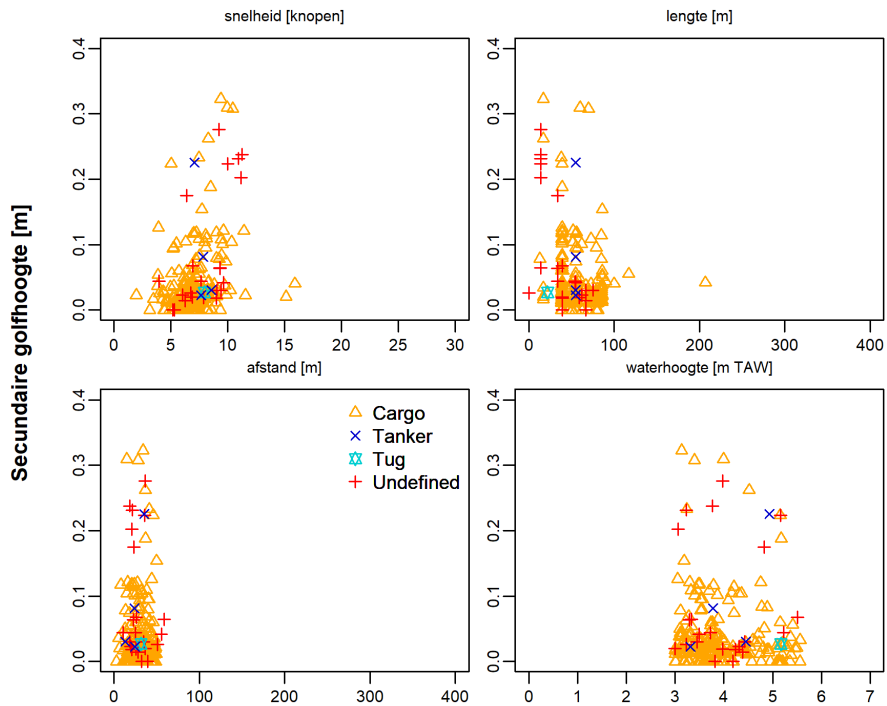
Figuur 38: Secundaire golfhoogtes nabij Saeftinghe, in relatie tot verschillende scheepskarakteristieken (snelheid en lengte), de afstand van het schip tot de meetlocatie en de waterhoogte (m TAW)



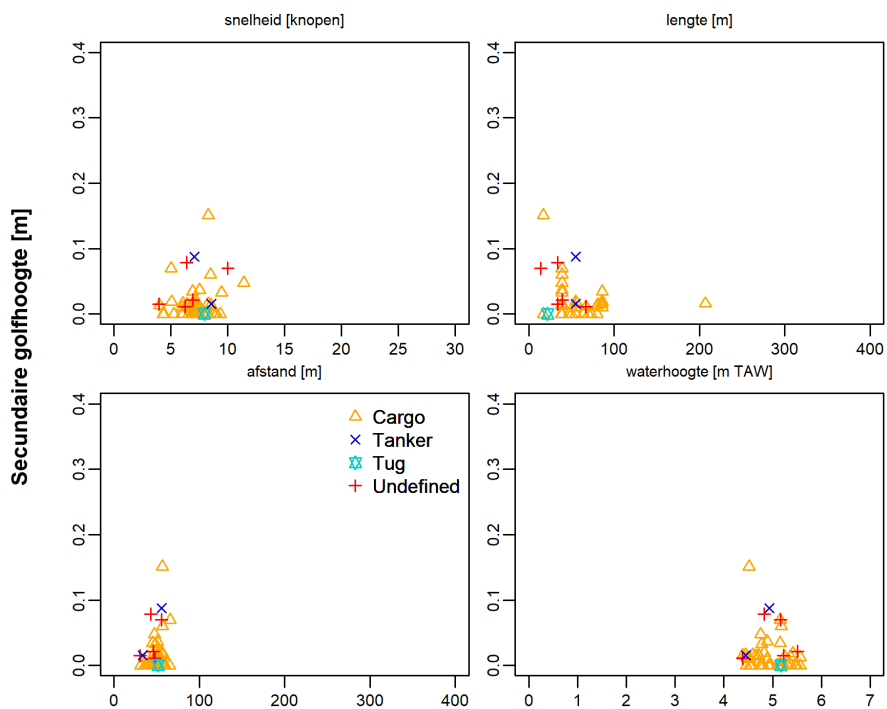
Figuur 39: Secundaire golfhoogtes nabij Rupelmonde op de lage positie, in relatie tot verschillende scheepscharacteristieken (snelheid en lengte), de afstand van het schip tot de meetlocatie en de waterhoogte (m TAW)



Figuur 40: Secundaire golfhoogtes nabij Rupelmonde op de hoge positie, in relatie tot verschillende scheepscharacteristieken (snelheid en lengte), de afstand van het schip tot de meetlocatie en de waterhoogte (m TAW)



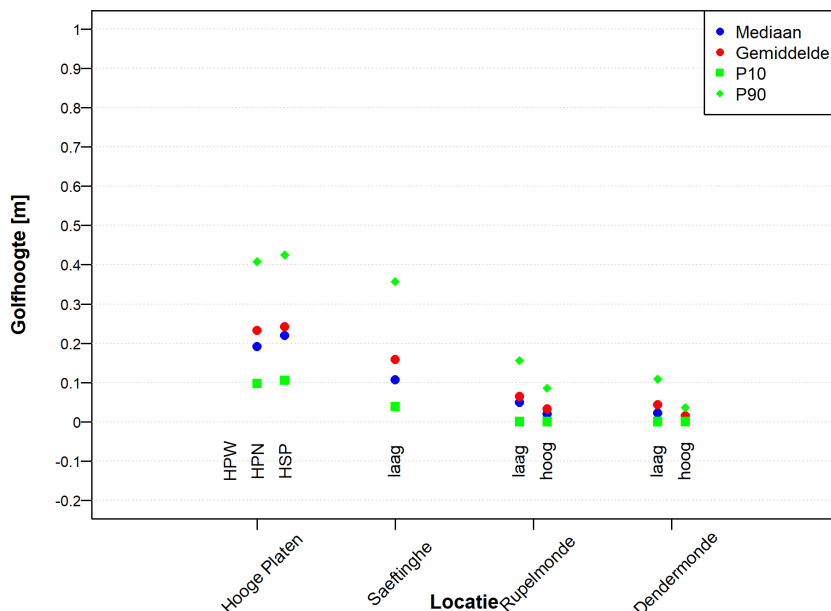
Figuur 41: Secundaire golfhoogtes nabij Dendermonde op de lage positie, in relatie tot verschillende scheepskenmerken (snelheid en lengte), de afstand van het schip tot de meetlocatie en de waterhoogte (m TAW)



Figuur 42: Secundaire golfhoogtes nabij Dendermonde op de hoge positie, in relatie tot verschillende scheepskenmerken (snelheid en lengte), de afstand van het schip tot de meetlocatie en de waterhoogte (m TAW)

Tabel 11: Multiparameterregressie: overzicht van significantie (NS = Niet Signifcant, S = Signifant op basis van $p = 0.05$ criterium) van de verschillende variabelen in relatie tot de opgemeten secundaire golfhoogte

	Snelheid [knopen]	Lengte [m]	Afstand [m]	Waterhoogte [m TAW]
Hooge Platen – noord	NS	NS	NS	S ($p < 0.001$) $0,053 \pm 0,005$
Hooge Platen – Hoge Springer	S ($p < 0.001$) $0,005 \pm 0,001$	S ($p < 0.001$) $0.00039 \pm 0,00007$	NS	S ($p < 0.001$) $0.018 \pm 0,005$
Saeftinghe	S ($p < 0.001$) $0,009 \pm 0,001$	S ($p < 0.001$) $0,00079 \pm 0,00008$	NS	S ($p < 0.05$) $0,008 \pm 0,004$
Rupelmonde - hoog	S ($p < 0.01$) $0,004 \pm 0,001$	S ($p < 0.05$) $0.0003 \pm 0,0001$	NS	NS
Rupelmonde - laag	S ($p < 0.001$) $0,009 \pm 0,001$	NS	NS	S ($p < 0.001$) $-0.015 \pm 0,003$
Dendermonde - hoog	NS	NS	NS	NS
Dendermonde - laag	NS	S ($p < 0.001$) $-0,0006 \pm 0,0001$	NS	NS



Figuur 43: Overzicht van gemiddelde, mediane en 10^{de} en 90^{ste} percentiel van de secundaire scheepsgolven langs het estuarium, op die locaties waar golfmetingen werden uitgevoerd

In Figuur 43 is het verloop weergegeven van de belangrijkste karakteristieken van de opgemeten, secundaire scheepsgolven, langsheen het estuarium. De gemiddelde golfhoogte, gerelateerd aan de secundaire scheepsgolven, daalt naarmate men opwaarts beweegt doorheen het estuarium van ca. 0,2 nabij de Hooge Platen tot ca. 0,05 m bij Rupelmonde en Dendermonde. De P90 van de secundaire golfhoogtes is voor de locaties in de Westerschelde gelijkaardig, en gelegen rond 0,4 m. In de Zeeschelde liggen deze lager, rond 0,15 m bij Rupelmonde en 0,10 m bij Dendermonde.

7 Analyse van windgolven

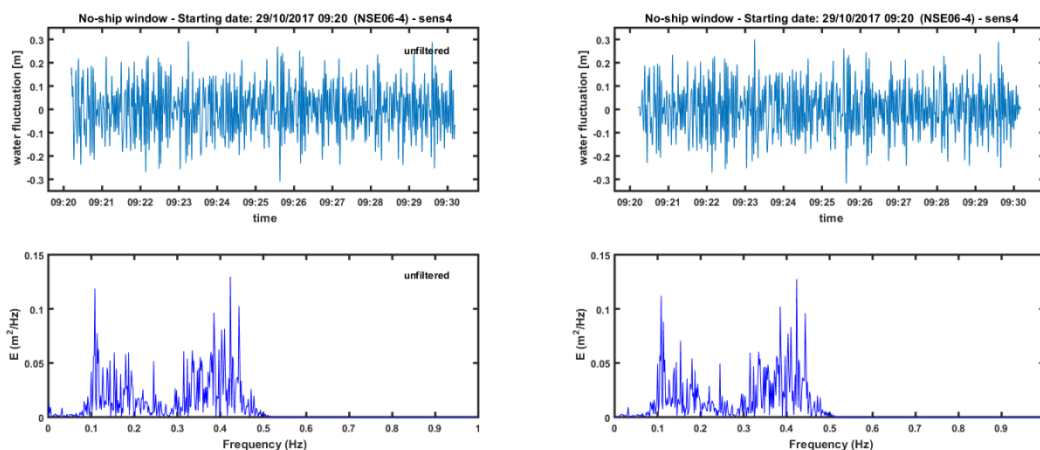
In dit hoofdstuk wordt de gemeten winddata gedurende de meetcampagnes, gekoppeld aan de golfmetingen, besproken.

7.1 Detectie van windevents

Voor het selecteren van windevents worden periodes afgebakend waar de wind als enige forcing voor de opgemeten golven kan worden aangeduid, er wordt m.a.w. gezocht naar periodes waarin scheepsbewegingen het meetsignaal niet beïnvloeden.

Er wordt eerst gezocht naar periodes waarin de tijd tussen twee scheepspassages minimaal 30 minuten bedraagt. Binnen deze periode, waarin dus geen scheepspassages zijn geregistreerd, wordt een windevent geselecteerd met een lengte van 10 minuten. Dit windevent start 13 minuten na de passage van het laatste schip. Op deze manier wordt gegarandeerd dat de opgemeten waterfluctuaties in dit tijdvenster zeker niet verstoord zijn door voorgaande scheepspassages. Een vaste tijdsduur van 10 minuten werd geselecteerd om een voldoende aantal golven (>100) te hebben gedurende een dergelijk event, zodat een accurate schatting van de golfkarakteristieken wordt bekomen. Deze periode van 10 minuten voor een windevent is vast genomen voor consistentie, ook al zou de volledige periode zonder scheepspassage groter zijn dan 30 minuten. Op deze manier zijn de karakteristieken van elk wind event ($H_{1/3}$) gebaseerd is op eenzelfde periode. Net zoals voor scheepsevents werd een minimale waterhoogte van 20 cm boven de sensor geselecteerd als minimum.

Om mogelijke interferenties met laag frequente golfpatronen te verwijderen, werd een high pass filter met een cutoff frequentie $f_{cut} = 0.1$ ($T_{cut} = 10$ sec) toegepast op de golfsignalen van de geselecteerde windevents. In Figuur 44 is een voorbeeld weergegeven van zo'n windevent, voor en na filtering.

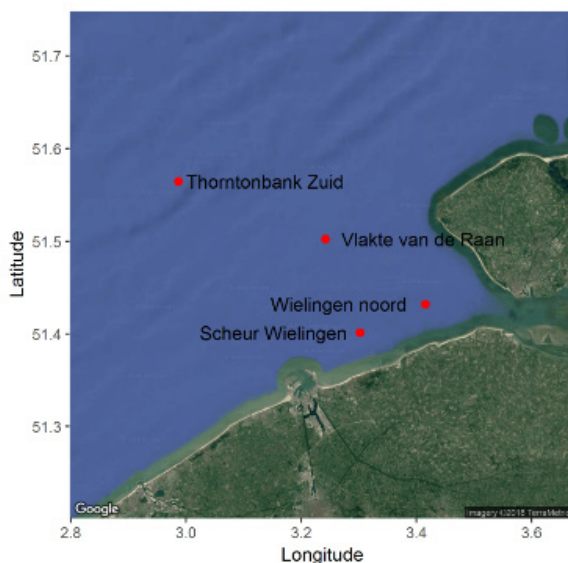


Figuur 44: Windevent voor een event met een hogere maximale golfhoogte bij de Hooge Platen, voor (links) en na filtering (rechts). De onderste figuren illustreren de overeenkomende spectrale dichtheidsverdelingen.

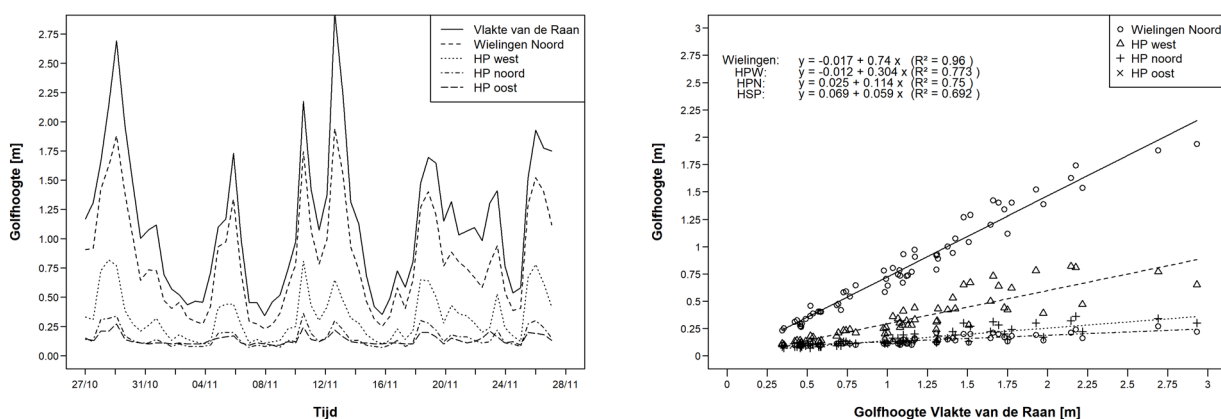
7.2 Analyse van de resultaten

7.2.1 Relatie tussen golfklimaat op Noordzee en de Hooge Platen

Aangezien de Hooge Platen sterk blootgesteld staan aan invloed vanuit de Noordzee, waar scheepsgolven irrelevant zijn, werd in een eerste het golfklimaat op de Hooge Platen (op intergetijdengebied) vergeleken met het waargenomen golfklimaat op de Noordzee. Beschikbare meetstations in de Noordzee zijn weergegeven in Figuur 45. Het is duidelijk te zien dat voor alle meetstations een goede correlatie werd waargenomen met het gemeten golfklimaat ter hoogte van de Vlakte van de Raan (Figuur 46). Zowel de sterkte van de correlatie als de sterkte van de relatie daalt naarmate men zich opwaarts naar/in het estuarium beweegt, met een significante golfhoogte die ong. 30 % (van de gemeten golfhoogte bij de Vlakte van de Raan) bij de Hooge Platen West en daalt naar ca. 10 % bij de HPN en 5% bij de Hoge Springer.



Figuur 45: Overzicht van meetlocaties buiten het Schelde-estuarium



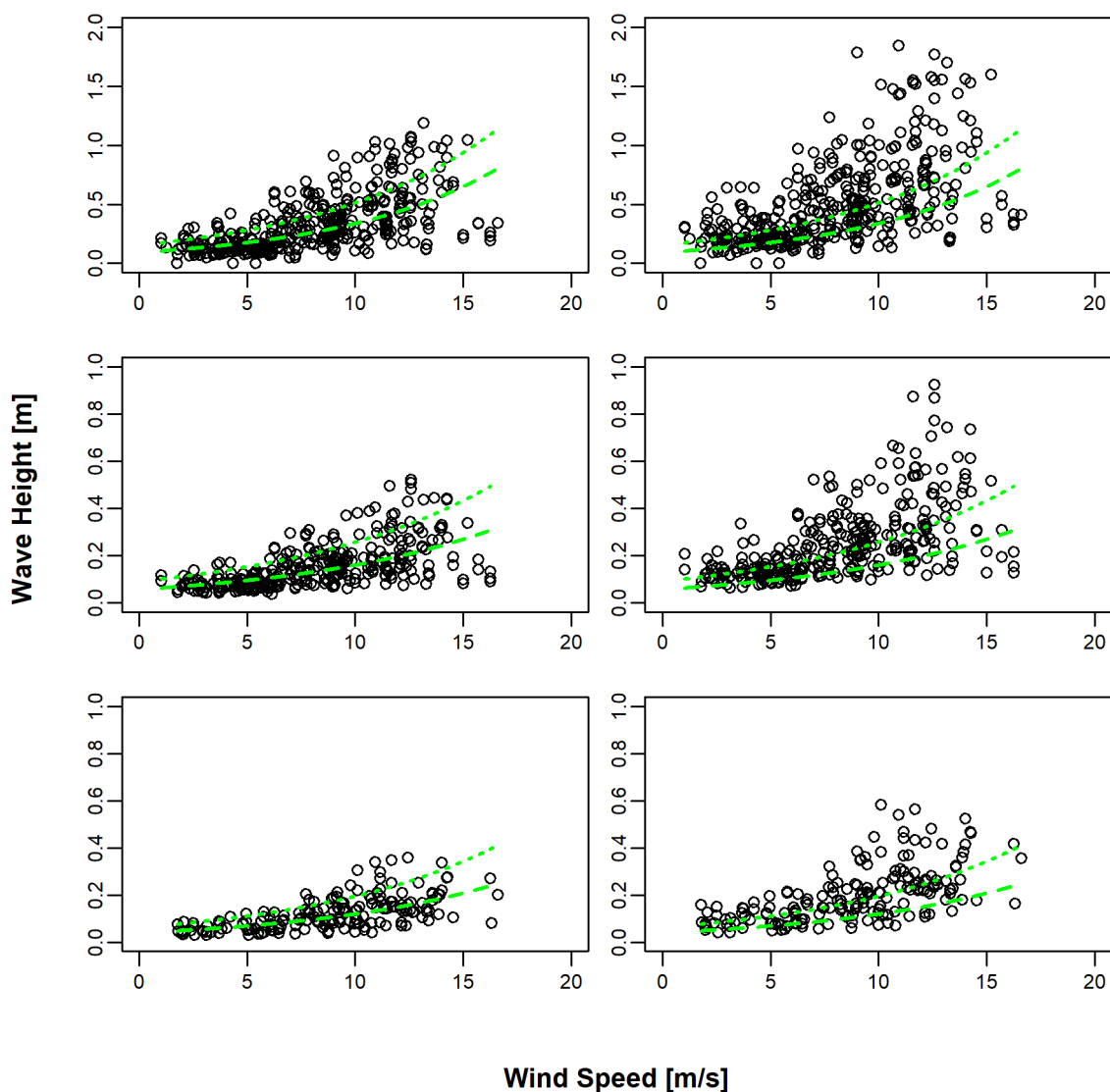
Figuur 46: Relatie tussen getijgemiddelde significante golfhoogte van de Noordzee (Vlakte van de Raan) richting Hooge Platen (HP)

7.2.2 Geïsoleerde windevents

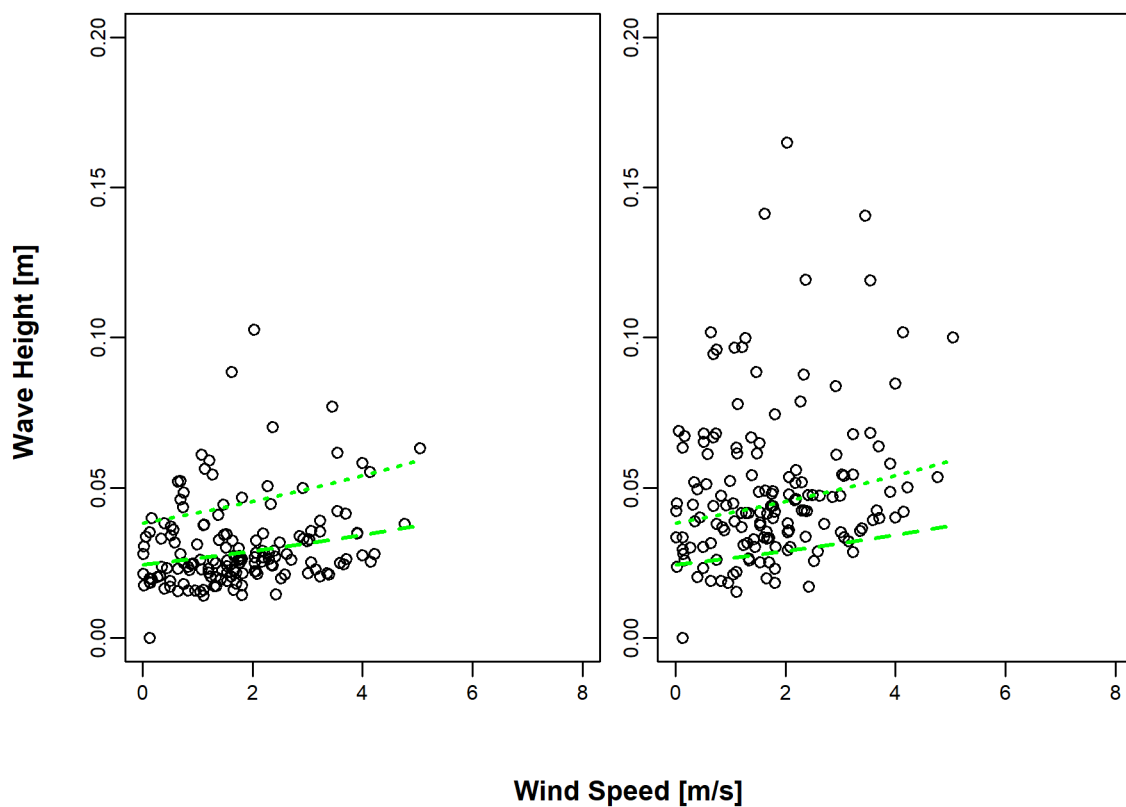
Aangezien de AIS data niet gefilterd zijn op een entryline voor het meetpunt “Hooge Platen West”, werd deze analyse voor de HPW uitgevoerd op basis van de filtering voor HPN. Hierbij zijn dus dezelfde tijdvensters beschouwd voor HPN en HPW.

Er werden respectievelijk 323 en 180 events geselecteerd in de analyse. In Figuur 47 (boven) zijn de resultaten getoond voor HPW. Maximale significante golfhoogtes van ca. 1,2 m en maximale H_{\max} van 1,8 m werden opgemeten. In Figuur 47, midden, zijn de resultaten weergegeven voor Hooge Platen Noord. Maximale significante golfhoogtes van ca. 0,52 m en maximale H_{\max} van 0,92 m werden opgemeten. Er is een duidelijke positieve correlatie tussen de windsnelheid en de golfhoogte, al is de spreiding groot. Voor de Hoge Springer (Figuur 47, onder) is de spreiding op de resultaten reeds veel kleiner.

In Figuur 47 zijn ook steeds de fit weergegeven voor zowel de maximale golfhoogte (...) als voor de significante golfhoogtes (---). In Tabel 12 zijn de parameters weergegeven van de exponentiële fits voor de verschillende locaties, die ook zijn weergegeven in Figuur 47 en Figuur 48. Voor Saeftinghe (Figuur 48) dient wel opgemerkt te worden dat deze fit slechts voor een zeer kleine range van windsnelheden is opgesteld, aangezien de variatie van windsnelheden over de meetcampagne beperkt was. Voor Rupelmonde en Dendermonde konden geen windgolven worden gedetecteerd. Hierbij worden op deze locaties, zoals reeds vermeld, niet alle scheepsbewegingen gedetecteerd met de AIS data, waardoor de filtering voor windevents niet zuiver kan gebeuren.



Figuur 47: Relatie tussen de windsnelheid en de significante (links) en maximale (rechts) golfhoogte, voor HPW (boven), HPN (midden) en HSP (onder). Eveneens zijn de fits voor de significante golfhoogtes (--) en de maximale golfhoogtes (..)



Figuur 48: Relatie tussen de windsnelheid en de significante (links) en maximale (rechts) golfhoogte, bij Saeftinghe

Tabel 12: Resultaten van de exponentiële fit ($\log(H) = a \cdot x + b$) voor zowel de significante als de maximale golfhoogte.

		Significante golfhoogte ($H_{1/3}$)		Maximale golfhoogte (H_{max})	
		A	B	a	B
Hooge Platen	HPW	-2.41 ± 0.07	0.131 ± 0.008	-1.87 ± 0.07	0.121 ± 0.008
	HPN	-2.89 ± 0.06	0.105 ± 0.009	-2.40 ± 0.06	0.104 ± 0.006
	HSP	-3.24 ± 0.08	0.111 ± 0.009	-2.77 ± 0.09	0.113 ± 0.009
Saeftinghe		-3.71 ± 0.06	0.09 ± 0.03	-3.27 ± 0.07	0.09 ± 0.03

8 Conclusies en aanbeveling

8.1 Conclusies

In onderliggend rapport is een overzicht en analyse weergegeven van de metingen van vier intensieve meetcampagnes, opgemeten in de Westerschelde (Hooge Platen en Saeftinghe) en de Zeeschelde (Rupelmonde en Dendermonde). De metingen werden steeds uitgevoerd voor een periode van circa 4 weken, met name 2 springtij-doodtij cycli. Op deze verschillende locaties werden snelheids- en drukmetingen uitgevoerd nabij de laagwaterlijn, voor de locaties in de Zeeschelde was er een extra meetpunt hoger op het slik (~ 50% droogvalduur). De snelheidsmetingen werden gerelateerd met getijparameters, de drukmetingen met metingen van de windcondities maar eveneens met aanwezige scheepvaart.

Tijdens de meetcampagnes op de verschillende locaties zijn de opgetreden getijkarakteristieken sterk gelijkaardig met de gemiddelde getijkarakteristieken. Voor de snelheidsmetingen bij de Hooge Platen zijn de vloednelheden bij HPN en HPW groter dan de ebsnelheden en duidelijk gecorreleerd met het tijverschil. Voor de Hoge Springer geldt het omgekeerde. Te Saeftinghe zijn de ebsnelheden in het algemeen groter dan de vloednelheden. De relatie tussen de vloednelheden en het getijverschil zijn sterker dan de relatie voor de ebsnelheden. Voor Rupelmonde en Dendermonde zijn de relaties tussen de maximale vloednelheden en het getijverschil sterker dan voor de ebsnelheden. Enkel in Dendermonde is er een duidelijk verschil tussen de hoge en lage positie op het slik voor de ebsnelheden.

De hoogste significante golfhoogtes wordt waargenomen bij de Hooge Platen West (ca. 0,30 m), en deze nemen duidelijk af naarmate men zich opwaarts beweegt doorheen het estuarium tot ca. 0,05 m bij Rupelmonde en Dendermonde. De maximale golven vertonen een ander patroon. Maximale golfhoogte is het grootst bij de HPW, maar ook op Hoge Springer en Saeftinghe worden gelijkaardige waarden geregistreerd. In de Zeeschelde zijn de maximale golfhoogtes duidelijk lager. Bovendien zijn ze voor Rupelmonde en Dendermonde sterk gelijkaardig (ca. 0,15 m).

De hoogfrequente drukdata werd gekoppeld aan scheepsinformatie, afkomstig van de AIS database. Een relatie wordt gemaakt tussen de hoogte van de primaire en secundaire scheepsgolven enerzijds en een aantal karakteristieken zoals scheepslengte, breedte, snelheid van het schip (t.o.v. de grond) en de afstand tot de meetlocatie.

Voor de primaire golven werden enkel de locaties Hooge Platen en Saeftinghe beschouwd, aangezien te Rupelmonde en Dendermonde visueel geen primaire golfpatronen konden worden geïdentificeerd. De grootste primaire golven werden geregistreerd bij Saeftinghe en bij de Hoge Springer, met een gemiddelde grootte van 10 à 15 cm en maximale groottes van ca. 80 cm. Voor de Hoge Springer is er een duidelijke link met de waterhoogte, voor Saeftinghe is deze relatie minder duidelijk.

Voor de secundaire golven worden de grootste golven geregistreerd nabij de Hoge Springer. Deze nemen vervolgens af naarmate meer opwaarts in het estuarium wordt gekeken. Voor de meeste locaties lijkt de snelheid en de lengte van het schip een (beperkte) verklarende factor te zijn voor de golfhoogte, al is de spreiding zeer groot.

Voor de detectie van windgolven werd gebruik gemaakt van periodes waarin geen scheepspassages werden geregistreerd. Hierbij wordt voor de Hooge Platen een duidelijke relatie gezien met het golfklimaat op zee en is er een duidelijke afname voor HPN en HSP t.o.v. HPW. Zo dalen de maximale significante golfhoogtes van ca. 1,0 m naar 0,5 m en 0,4 m respectievelijk. Voor Dendermonde en Rupelmonde werd geen patroon gevonden in de windevents. Het verloop van de resultaten van de windevents is gelijkaardig aan deze van de significante golfhoogte berekend over een getijcyclus.

8.2 Aanbevelingen

In dit project werd gekozen voor een consequente analyse van de meetgegevens, waarbij de bepaling van de golfhoogtes en de identificatie van scheeps- en windevents op eenzelfde manier werden toegepast op de verschillende meetlocaties. Uiteraard zijn hier nog extra analyses mogelijk.

Zo wordt in deze studie gefocust op single ship events, om een link te maken tussen scheepskarakteristieken en golfkarakteristieken. Aanvullend op de huidige analyse kan ook de link tussen de geregistreerde golfkarakteristiek zelf en de beschouwde scheepsbeweging worden nagegaan. Hierbij zou men omgekeerd te werk gaan: bepaalde golfpatronen (vb. deze met grootste impact) worden geselecteerd en er wordt nagegaan met welke scheepsbewegingen deze kunnen worden gerelateerd.

Hiernaast kan de huidige manier waarop de golfhoogte bepaald wordt, gevarieerd worden. In plaats van gebruik te maken van een maximale golfhoogte kan ook de (totale) golfenergie berekend worden voor een event. Op deze manier kan eventueel, indien er meerdere pieken aanwezig zijn, een robuustere maat voor de golven bepaald worden.

Tot slot is de snelheid van het schip die nu gebruikt wordt als verklarende parameter de snelheid van het schip over de grond. Een betere verklarende variabele zou de snelheid van het schip door het water zijn. Hiervoor is echter geen informatie beschikbaar en moet gebruik gemaakt worden van gesimuleerde snelheden met een numeriek model.

9 Referenties

- BAW (2011) Principles for the Design of Bank and Bottom Protection for Inland Waterways (GBB), Karlsruhe-Germany
- Baur, T., Peters, K., Teschke, U. (2008). Practical analysis methodology for ship-induced waves in estuaries. ICCE '08, pp. 748-760.
- Beirinckx, K.; Taal, M.; Plancke, Y.; Van den Bergh, E. (2014). Plan van Aanpak Onderzoek Agenda voor de Toekomst.
- De Roo, S. (2013) Experimental Study of the Hydrodynamic Performance of a Nature-Friendly Bank Protection Subject to Ship Waves in a Confined, Non-Tidal Waterway. PhD Thesis, University of Ghent, Belgium.
- Golder Associates (2014) Vessel wake wash analysis. BURNCO aggregate project, Howe Sound, BC. Report Number: 11-1422-0046.4310.
- Hertoghs, R.; Vereecken, H.; Boeckx, L.; Deschamps, M.; Mostaert, F. (2018) Vijfjarig overzicht van de tijwaarnemingen in het Zeescheldebekken: tijdvak 2011-2015. Versie 4.0. *WL Rapporten*, 16_035_1. Versie 4.0. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. XV, 154 pp.
- Hofmann, H.; Lorke, A.; Peeters, F. (2008) The relative importance of wind and ship waves in the littoral zone of a large lake. *Limnol. Oceanogr.*, 53(1), 368–380
- Houser, C. (2010) Relative Importance of Vessel-Generated and Wind Waves to Salt Marsh Erosion in a Restricted Fetch Environment. *Journal of Coastal Research*, Vol. 26, No. 2 pp. 230-240
- Kolokythas, G.; Meire, D.; De Roo, S.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2017). Wave measurements at Galgeschoor: Sub report 1 – Analysis of velocities and waves during an intensive measuring campaign. Version 2.0. *FHR Reports*, 15_054_1. Flanders Hydraulics Research: Antwerp.
- Meire, D.; Kolokythas, G.; Smolders, S.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2019). Agenda voor de Toekomst – Waves in the estuary: analysis of wave measurements at Saeftinghe. Version 2.0. *FHR reports*, 14_082_1. Flanders Hydraulics Research: Antwerp. VIII, 34 + 40 p. bijl. pp.
- Meire, D.; Plancke, Y.; Mostaert, F. (2021a). Agenda voor de Toekomst – Golven in het estuarium: Analyse van golfmetingen te Rupelmonde. Versie 4.0. *WL Rapporten*, 14_082_3. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.
- Meire, D.; Plancke, Y.; Mostaert, F. (2020). Agenda voor de Toekomst – Golven in het estuarium: Analyse van golfmetingen te Dendermonde. Versie 4.0. *WL Rapporten*, 14_082_3. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.
- Meire, D.; Plancke, Y.; Mostaert, F. (2021b). Agenda voor de Toekomst – Golven in het estuarium: Analyse van golfmetingen te Hooge Platen. Versie 4.0. *WL Rapporten*, 14_082_3. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.
- Kriebel, D.L.; Seelig, W.N. (2005) An empirical model for ship-generated waves.
- Maynard, S. T. (2005) “Wave height from planing and semi-planing small boats”, *River Research and Applications*. 21: 1–17
- Moffat & Nichols (2011) Vessel wake study. M&N Project No. 7333
- Parnell, K.E.; Kofoed-Hansen, H. (2001) Wakes from Large High-Speed Ferries in Confined Coastal Waters: Management Approaches with Examples from New Zealand and Denmark. *Coastal Management*, 29:217–237.

Racionero, J.S. (2014) Modelling ship-generated sediment transport in the River Göta Älv. Chalmers University of Technology.

Sorensen, R. M., (1997) Prediction of vessel-generated waves with reference to vessels common to the Upper Mississippi River System. U.S. Army Engineer District, Rock Island, U.S. Army Engineer District, St. Louis, U.S. Army Engineer District, St. Paul. 50 p. : ill. ; 28 cm. "ENV report 4"

Schiereck, G. J. (1993) Introduction to bed bank shore protection. TUDelft.

Schiereck, G. J. (2001). Introduction to bed, bank and shore protection. Engineering the interface between soil and water. Delft University Press, The Netherlands.

Schiereck, G. J. (2004) Introduction to Bed, Bank and Shore Protection. Spon Press. New York.

Sireli, E.M. (2002)

Tan, S.W.S. (2012) Predictin Boat-Generated wave height: A quantitative analysis through video observations of vessel wakes. U.S. Naval Academy, Annapolis, MD21402.

Verelst, K.; De Mulder, T; Vereecken, H.; Taverniers; E.; Mostaert, F. (2012). Onderzoek naar de invloedsfactoren van golfbelasting en de morfologische effecten op slikken en schorren in de Beneden Zeeschelde, meer specifiek op het Galgeschoor: Deelrapport 8: Analyserapport golfbelasting op het Galgeschoor. Versie 2_0. WL Rapporten, 837_03. Waterbouwkundig Laboratorium & INBO: Antwerpen, België.

10 Bijlage

De volgende modellen zijn terug te vinden in de literatuur en samengevat in Tabel 8. In deze appendix zijn de vergelijkingen voluit weergegeven, waarbij SI eenheden gebruikt worden voor het berekenen van de resultaten. Vergelijkingen 1 t.e.m. 9 zijn terug te vinden in Sorenson (1997), voor de andere vergelijkingen is aangeduid waar deze terug gevonden konden worden. De volgende symbolen voor de verschillende variabelen worden gebruikt in de vergelijkingen.

variable		eenheid
V	Snelheid schip	m/s
B	Breedte schip	m
D	Diepgang schip	m
W	Breedte kanaal	m
A _{ship}	dwarsdoorsnede schip	m ²
A _{channel}	dwarsdoorsnede kanaal	m ²
S _c	A _{ship} /A _{channel}	-
x	Afstand	m
x _s	x – B/2	m

1. Balanin & Bykov

Balanin & Bykov (1965) formuleerden een vergelijking voor de golfhoogte van secundaire golven bij de oever. Deze formule is vermoedelijk slecht toepasbaar in kanalen/rivieren met beperkte breedte, aangezien de relatie tussen golfhoogte en afstand van het schip niet overeenkomt met de theoretische $x^{-1/3}$ relatie.

$$H_{sec,b} = \frac{1.25 V^2}{g} \left[1 - \left(1 - (4.2 + S_c)^{-\frac{1}{2}} \right) \left(\frac{S_c - 1}{S_c} \right)^2 \right] \left[\frac{2 + \sqrt{w/L}}{1 + \sqrt{w/L}} \right]$$

2. USCA (1980)

Deze vergelijking werd toegepast op de Ohio rivier, vermoedelijk voor beperkte afstanden tot de oever, aangezien deze parameter niet is opgenomen in de vergelijking.

$$H_{sec} = 0.0448 V^2 \left(\frac{D}{L} \right)^{1/2} \left(\frac{S_c - 1}{S_c} \right)^{2.5}$$

3. Bhowmik (1975)

Deze formulering is opgesteld voor 1 scheepstype. Aangezien de waterdiepte niet is opgenomen in deze vergelijking, is deze vermoedelijk opgesteld voor diep water toepassingen.

$$\left(\frac{H_{sec}}{D}\right)^2 = 0.0345 V^{1.174} \left(\frac{x}{L}\right)^{-0.915}$$

4. Gates & Herbich (1977)

De vergelijking voorgesteld door Gates & Herbich (1977) is opgesteld voor (destijds) grote schepen in diep water.

$$H_{sec} = \frac{1.11 K_w B V^2}{2 (2N + 1.5)^{0.33} L_e 2 g}$$

Hierbij varieert K_w tussen 3.2 en 1.13, en is een functie van $V/L^{1/2}$. L_e is de “entrance length”, de afstand van de plaats waar de boeg het water raakt tot de plaats waar de scheepsromp parallel loopt.

5. Bhowmik, Demissie & Guo (1982)

Deze vergelijking werd opgesteld voor duwvaart. Deze vergelijking houdt geen rekening met de afstand tussen het schip en de meetlocatie. Opvallend is de lineaire relatie tussen snelheid en golfhoogte.

$$H_{sec} = D 0.133 \frac{V}{\sqrt{gD}}$$

6. Blaauw et al. (1984)

Deze formulering is gebaseerd op een combinatie van labo en terreinmetingen.

$$H_{sec} = A h \left(\frac{x_s}{h}\right)^{-0.33} F^{2.67}$$

De coëfficiënt A is afhankelijk van het type van de boeg. Er worden waarden gegeven van $A = 0.8$ voor duwbakken en $A = 0.25$ voor binnenvaartschepen.

7. PIANC (1987)

De vergelijking voorgesteld door PIANC is qua vorm sterk gelijkend op voorgaande vergelijking. De coëfficiënt α_1 heeft een waarde van 1 voor de meeste boten en een waarde 0,5 voor lege binnenvaartschepen. Deze waarden zijn gebaseerd op testen in diep water.

$$H_{sec} = h \alpha_1 \left(\frac{x_s}{h}\right)^{-0.33} F_h^4$$

8. Bhowmik et al. (1991)

Deze vergelijking is gebaseerd op verschillende types van pleziervaart. Dit is de enige formule waar de golfhoogte omgekeerd evenredig is met de snelheid van het schip.

$$H_{sec} = 0.537 V^{-0.346} x^{-0.345} L^{0.56} D^{0.355}$$

9. Sorensen & Weggel (1984 - 1986)

Sorensen & Weggel (1984, 1986) ontwikkelden een formule, gebaseerd op terreinmetingen en labometingen die toen beschikbaar waren.

$$H_{sec} = \alpha W^{0.33} \left(\frac{x}{W^{0.33}}\right)^\beta \left(\frac{h}{W^{0.33}}\right)^\delta$$

Hierbij zijn β en δ coëfficiënten, die afhankelijk van het Froude getal een functie zijn van het Froudegetal, zoals hieronder weergegeven:

$$\begin{aligned} \delta &= -0.118 F^{-0.356} & 0.2 < F < 0.55 \\ \delta &= -0.146 & 0.55 < F < 0.8 \end{aligned}$$

en

$$\begin{aligned} \beta &= -0.225 F^{-0.699} & 0.2 < F < 0.55 \\ \beta &= -0.342 & 0.55 < F < 0.8 \end{aligned}$$

α is een parameter die functie is van de dimensieloze diepte $h^* = h/W^{0.33}$, en wordt gevonden als:

$$\log \alpha = a + b \log(h^*) + c \log^2(h^*)$$

Waarbij a, b en c coëfficiënten zijn die opnieuw een functie zijn van het Froudegetal.

10. Kriebel & Seelig (2005)

Deze methode is uitvoeriger beschreven in sectie 5.2.1.

$$H_{sec} = \frac{V^2}{g} \beta (F^* - 0,1)^2 \left(\frac{x}{L}\right)^{-0,33}$$

11. BAW (2011)

In BAW (2011) wordt volgende formule verondersteld voor de berekening van de maximale secundaire golfhoogte, gebaseerd op Blaauw et al. (1984) en Gates & Herbich (1977).

$$H_{sec} = A_w f \frac{V^{8/3}}{g^{4/3}(x - B/2)^{1/3}}$$

met A_w een coëfficiënt die afhankelijk is van vorm en dimensies van het schip, diepgang en waterdiepte. A_w varieert van 0,25 voor conventionele binnenvaart; 0,35 voor lege duwbakken en 0,8 voor volle duwbakken en pleziervaart. F is een snelheidscoëfficiënt variërende tussen 1.0 en 1.7, die rekening houdt met de toename van de secundaire golfhoogte naar de kritieke snelheid.

Wanneer er enkel transversale golven optreden wordt volgende formule voorgesteld, waarbij f_λ een coëfficiënt is die de superpositie van de hek en boeggolf beschrijft.

$$H_{sec} = A_w \frac{V^2}{g} \sqrt{\frac{B}{x}} (f + f_\lambda)$$

12. Nece et al. (1986)

De formule van Nece et al. (1986) werd teruggevonden in Sireli (2002). Deze formule is opgesteld voor het beschrijven van scheepsgolven afkomstig van ferry schepen.

$$H = L 1.100 10^{-3} e^{4.3875 F_h} \left(\frac{x}{L}\right)^{-1/3}$$

DEPARTEMENT **MOBILITEIT & OPENBARE WERKEN**
Waterbouwkundig Laboratorium

Berchemlei 115, 2140 Antwerpen

T +32 (0)3 224 60 35

F +32 (0)3 224 60 36

waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be

www.waterbouwkundiglaboratorium.be