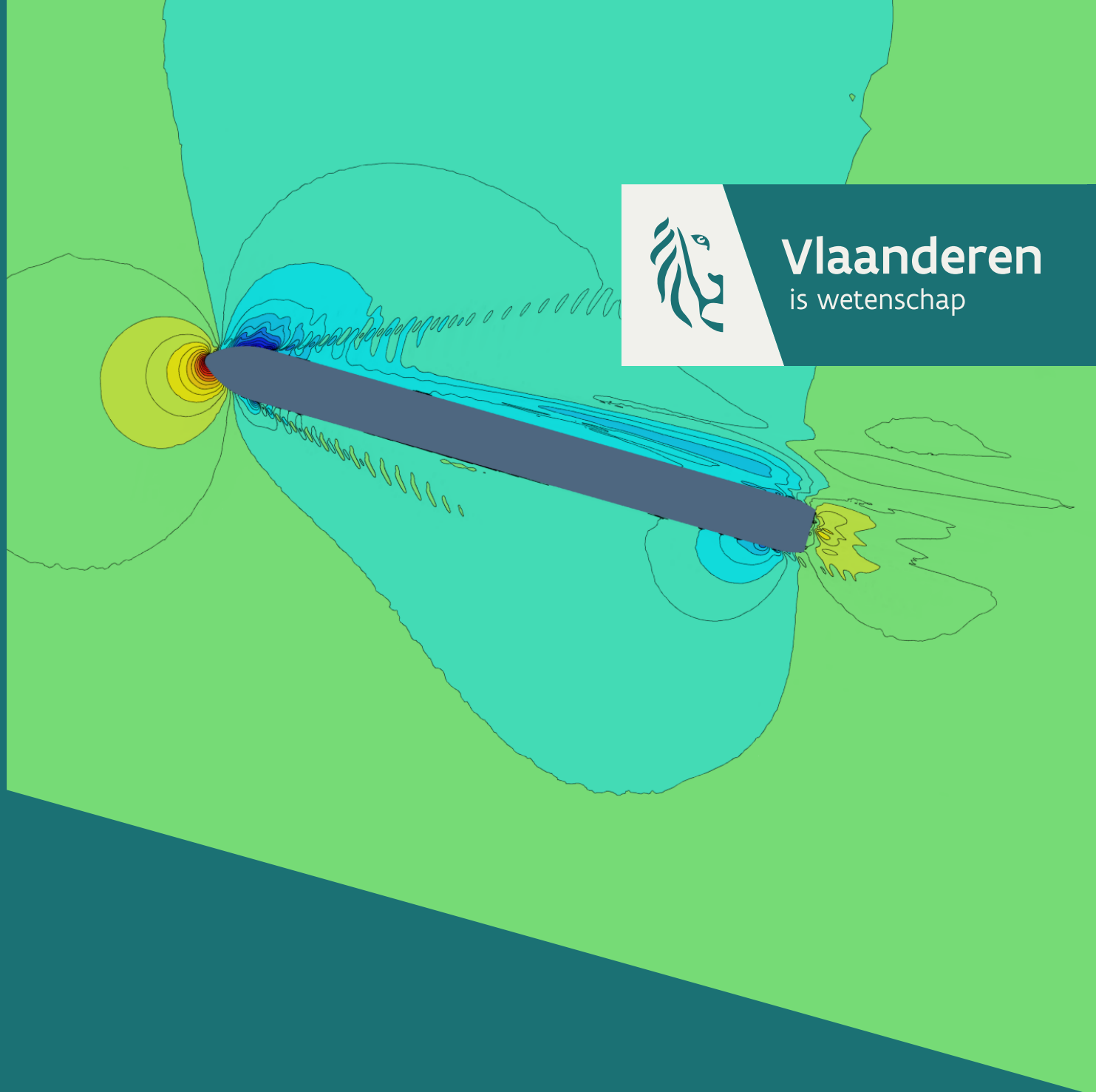




Vlaanderen
is wetenschap



23_058_1
WL Rapporten

Krachten op afgemeerde schepen in het Albertkanaal (pand Wijnegem – haven Antwerpen)

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

Krachten op afgemeerde schepen in het Albertkanaal (pand Wijnegem - haven Antwerpen)

Van Hoydonck, W.; Van Zwijnsvoorde, T.; Eloit, K.

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, 2023

D/2023/3241/313

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Van Hoydonck, W.; Van Zwijnsvoorde, T.; Eloot, K. (2023). Krachten op afgemeerde schepen in het Albertkanaal (pand Wijnegem - haven Antwerpen). Versie 2.0. WL Rapporten, 23_058_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

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


Documentidentificatie

Oprachtgever:	De Vlaamse Waterweg nv	Ref.:	WL2023R23_058_1
Trefwoorden (3-5):	ROPES, line forces, mooring, boulders, Albert Canal		
Kennisdomeinen:	Harbours and waterways > Interaction with structures > Mooring		
Tekst (p.):	21	Bijlagen (p.):	0
Vertrouwelijk:	Nee	<input checked="" type="checkbox"/> Online beschikbaar	
Auteur(s):	Van Hoydonck, W.		

Controle

	Name	Handtekening
Revisor(en):	Van Zwijnsvoorde, T.; Eloot, K.	Getekend door:Thibaut Van Zwijnsvoorde Getekend op:2023-12-05 16:18:09 +01:0 Reden:Ik keur dit document goed  Vlaamse overheid  Katrien Eloot (Signature) Getekend op:2023-12-05 15:42:01 +01:0 Reden:Ik keur dit document goed  Vlaamse overheid
Projectleider:	Van Hoydonck, W.	Getekend door:Wim Van Hoydonck (Sign) Getekend op:2023-12-05 15:54:54 +01:0 Reden:Ik keur dit document goed  Vlaamse overheid

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Bellafkih, A.	Getekend door:Abdelkarim Bellafkih (Sign) Getekend op:2023-12-05 21:56:23 +01:0 Reden:Ik keur dit document goed  Vlaamse overheid
-----------------	---------------	--



Abstract

De Vlaamse Waterweg NV (contact Timothy Kurvers) vraagt het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) om de krachten op bolders te bepalen in het Albertkanaal in het pand tussen de sluisen van Wijnegem en de haven van Antwerpen. In dit pand van het Albertkanaal gebeurt het regelmatig dat de bouten die de bolders verankeren aan de kade breken. De snelheidslimiet in de sectie Hoogmolen (Schoten) is 9 km/h voor schepen met een diepgang van 1.5 m tot 3.4 m. Voor een diepgang van minder dan 1.5 m is de maximale snelheid 13 km/h. Deze snelheidslimieten worden niet strict gehandhaafd voor schepen die naar de haven van Antwerpen varen. In dit onderzoek zullen met behulp van de potentiaal software ROPES (Pinkster en Pinkster, 2014) voor enkele gevallen de krachten op een afgemeerd schip bepaald worden ten gevolge van de passage van één schip. Parameters die gevarieerd worden zijn de laterale afstand tussen het afgemeerde schip en het voorbijvarende schip, de snelheid van het passerende schip, de scheepstypes (passerend en afgemeerd), de diepgang van het passerende schip en de waterdiepte.

De schepen hebben (van groot naar klein) de maximale afmetingen van een samengesteld schip voor dit pand van het Albertkanaal (2x2 duwbak combinatie, 200 m × 23 m), een enkelvarend schip met maximale afmetingen voor dit pand van het Albertkanaal (135 m × 15 m) en een kleiner schip met de maximale afmetingen voor het Netekanaal (81.3 m × 10.3 m). De twee grootste schepen worden gebruikt als voorbijvarend schip, terwijl de twee kleinste schepen gebruikt worden als afgemeerd schip. De varende schepen worden getest bij drie diepgangen (1.5 m, 2.5 m en 3.4 m) terwijl de afgemeerde schepen enkel bij de individuele maximale diepgangen worden gebruikt (2.8 m voor het kleinste schip). De varende schepen worden beproefd bij snelheden van 9 km/u, 11 km/u en 13 km/u.

Uit de resultaten van het onderzoek volgt dat de langskracht op de afgemeerde schepen maatgevend is, de dwarskracht is altijd kleiner. Bij overschreiding van de snelheidslimiet van enkelvarende schepen met maximale afmetingen en diepgang is de boldercapaciteit niet voldoende. Voor samengestelde schepen met maximale afmetingen en diepgang wordt de boldercapaciteit in de langsrichting overschreden vanaf $V = 9$ km/u. Een verhoging van de waterdiepte levert — net als een vermindering van diepgang van het varende schip — een significante reductie van de berekende afmeerkrachten op.

Inhoudsopgave

Abstract.....	III
Lijst van figuren.....	V
Lijst van tabellen.....	VI
1 Inleiding.....	1
1.1 Motivatie.....	1
1.2 Vaarweg en typische secties.....	1
1.3 Vaartuigen.....	2
2 Ropes Berekeningen.....	5
2.1 Inleiding.....	5
2.2 Randvoorwaarden berekeningen.....	5
2.2.1 Schepen en kanaalsectie.....	5
2.2.2 Scheepssnelheden.....	7
2.2.3 Assenstelsel en laterale scheepsposities.....	7
2.2.4 Scheepsgeometrie.....	8
2.2.5 Oevers.....	10
2.3 Postprocessing.....	10
2.3.1 Conversie naar afmeerkrachten.....	10
2.3.2 Correctie voor hoge Froude getallen.....	11
2.3.3 Relatieve scheepspositie.....	11
2.3.4 Bolderkrachten.....	12
2.3.5 Simulatie condities.....	12
3 Resultaten.....	14
3.1 Conditie A_s_{Am}	14
3.2 Conditie B_s_{Am}	17
3.3 Conditie B_s_{Cm}	19
4 Conclusies.....	20
Referenties.....	21

Lijst van figuren

Figuur 1	Luchtfoto van de sectie van het Albertkanaal tussen de sluisen van Wijnegem en de haven van Antwerpen. Bron: geopunt.be.	2
Figuur 2	Bovenaanzicht van het Albertkanaal bij <i>Euro Rice Handling</i> in Schoten. De waterdiepte is er 4.5 m en de vaarwegbreedte is er 63 m. Bron: geopunt.be.	2
Figuur 3	Bovenaanzicht van het Albertkanaal nabij de splitsing met het kanaal Dessel-Turnhout-Schoten met links de ondertussen afgebroken Hoogmolenbrug. Bron: geopunt.be.	2
Figuur 4	Bovenaanzicht van het Albertkanaal ter hoogte van brug Deurne-Bal. Bron: geopunt.be.	3
Figuur 5	Luchtfoto's van het scheepspassages op het pand Wijnegem haven van Antwerpen op het Albertkanaal. Bron: geopunt.be.	4
Figuur 6	Blockage van de kanaalsectie met breedte 63 m en diepte 4.5 m voor de twee schepen als functie van hun diepgang.....	6
Figuur 7	Schematische doorsnede van het kanaal met A als afgemeerd schip en B als varende schip (bovenaanzicht) en A als varende schip (onderaanzicht).	7
Figuur 8	Schematische doorsnede van het kanaal met C als afgemeerd schip en B als varende schip (conditie Bs_Cm).	8
Figuur 9	Visualisatie van paneel geometrie van het samengesteld schip (B) met maximale afmetingen. .	9
Figuur 10	Visualisatie van paneel geometrie van het enkelvarende schip (A) met maximale afmetingen. ...	9
Figuur 11	Visualisatie van de drie scheepsrompen. Boven: B, midden: A, onder: C.	9
Figuur 12	Definitie van krachten op een afgemeerd schip.	10
Figuur 13	Geïdealiseerde afmeerconfiguratie voor een enkel schip met de relevante krachtcomponent per afmeertouw.	11
Figuur 14	Invloed van correctie voor hoge Froude getallen (Talstra en Blik, 2014) voor conditie As_Ambij $V = 11$ km/u.	12
Figuur 15	Verloop van resulterende krachten op het afgemeerde schip voor conditie As_Am_VA ($V = 6$ km/u) als functie van de relatieve positie van het afgemeerde schip en het varende schip. ...	13
Figuur 16	Verloop van resulterende krachten op het afgemeerde schip voor conditie As_Am_VG ($V = 11$ km/u) als functie van de relatieve positie van het afgemeerde schip en het varende schip. ..	13
Figuur 17	Extreme waarden voor de langskracht en dwarskracht voor conditie As_Am bij een diepgang van 1.5 m van het varende schip.	14
Figuur 18	Extreme waarden voor de langskracht en dwarskracht voor conditie As_Am bij een diepgang van 2.5 m van het varende schip.	15
Figuur 19	Extreme waarden voor de langskracht en dwarskracht voor conditie As_Am bij een diepgang van 3.4 m van het varende schip.	15
Figuur 20	Extreme waarden voor de langskracht en dwarskracht voor conditie As_Am_VF ($V = 9$ km/u) van het varende schip.....	16
Figuur 21	Extreme waarden voor de langskracht en dwarskracht voor conditie As_Am_VG ($V = 11$ km/u) van het varende schip.....	16
Figuur 22	Extreme waarden voor de langskracht en dwarskracht voor conditie As_Am_VH ($V = 13$ km/u) van het varende schip.....	17
Figuur 23	Extreme waarden voor de langskracht en dwarskrachten voor conditie Bs_Am bij een diepgang van 3.4 m van het varende schip.	17
Figuur 24	Extreme waarden voor de langskracht en dwarskrachten voor conditie Bs_Am bij een diepgang van 2.5 m van het varende schip.	18
Figuur 25	Extreme waarden voor de langskracht en dwarskrachten voor conditie Bs_Am bij een diepgang van 1.5 m van het varende schip.	18
Figuur 26	Extreme waarden voor de langskracht en dwarskrachten voor conditie Bs_Cm bij een maximale diepgang van 3.4 m van het varende schip.	19

Lijst van tabellen

Tabel 1	Scheepscodes en scheepskarakteristieken.....	6
Tabel 2	Snelheidscodes en overeenkomstige sloopssnelheden.....	7
Tabel 3	Laterale posities varend schip, codes en laterale afstanden voor de combinatie Bs_Am en As_Am.	8
Tabel 4	Laterale posities varend schip, codes en laterale afstanden voor de combinatie Bs_Cm.	8
Tabel 5	Simulatieduur als functie van de vaarsnelheid.	13

1 Inleiding

1.1 Motivatie

De Vlaamse Waterweg NV (contact Timothy Kurvers) vraagt het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) om de krachten op bolders te bepalen in het Albertkanaal in het pand tussen de sluizen van Wijnegem en de haven van Antwerpen. In dit pand van het Albertkanaal gebeurt het regelmatig dat de bouten die de bolders verankeren aan de kade breken. De snelheidslimiet in de sectie Hoogmolen (Schoten) is 9 km/h voor schepen met een diepgang van 1.5 m tot 3.4 m. Voor een diepgang van minder dan 1.5 m is de maximale snelheid 13 km/h. Deze snelheidslimieten worden niet strict gehandhaafd voor schepen die naar de haven van Antwerpen varen. In dit onderzoek zullen voor enkele generieke gevallen de krachten op afgemeerde schepen bepaald worden ten gevolge van passerende schepen met de software ROPES (Pinkster en Pinkster, 2014). Deze potentiaalcode werd in een Joint Industry Project (JIP) specifiek ontwikkeld om krachten op afgemeerde schepen te bepalen voor gebruik als input voor afmeerstudies.

Dit rapport is gebaseerd op memo WL2023M23_058_1 welke enkel een kort overzicht geeft van de condities van de berekeningen en een samenvatting van de belangrijkste resultaten van de initiële berekeningen. Het huidige rapport bevat tevens een algemene discussie van de opzet van de berekeningen (inclusief mogelijkheden en beperkingen van de software), en alle resultaten en conclusies.

Tijdens een overleg met de opdrachtgever op 22/8/2023, werd overeengekomen om extra berekeningen uit te voeren met een kleiner afgemeerd schip. Tijdens dit overleg werd ook duidelijk dat er plannen zijn om in dit pand de waterdiepte te vergroten tot 6 m. Daarom worden ook enkele cases doorgerekend waarbij de waterdiepte van de kanaalsectie vergroot wordt tot 6 m. Volgende parameters worden gevarieerd:

- de laterale afstand tussen het afgemeerde schip en het voorbijvarende schip,
- de snelheid van het passerende schip,
- de scheepstypes (passerend en afgemeerd),
- de waterdiepte van het kanaal en
- de diepgang van het passerende schip.

1.2 Vaarweg en typische secties

De complete sectie van het Albertkanaal tussen de sluizen van Wijnegem en de haven van Antwerpen heeft een lengte van ongeveer 6.7 km. Een luchtfoto van deze sectie wordt getoond in Fig. 1.

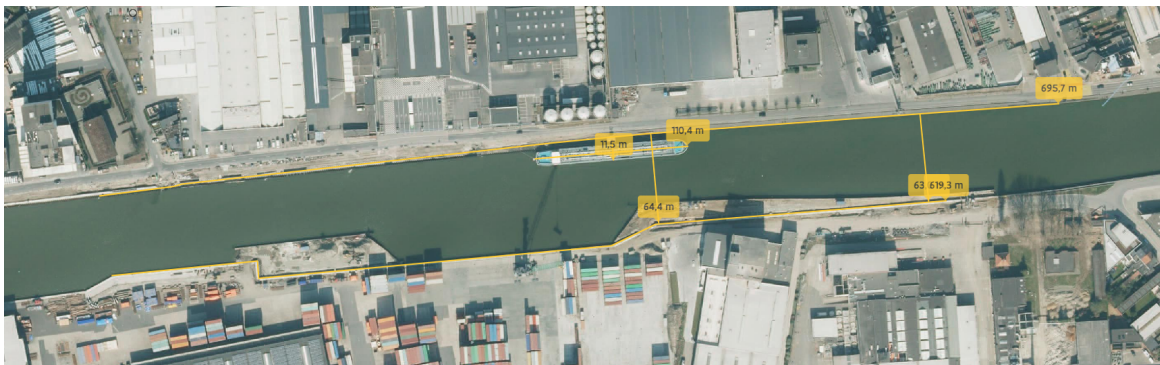
De narrowste sectie heeft een rechthoekig profiel met een waterdiepte van 4.5 m. Bij de locatie van *Euro Rice Handling* in Schoten (Kmp. 124.8) is de vaarweg recent verbreed tot 63 m. Een luchtfoto van deze locatie (genomen tijdens de verbredingswerken) wordt weergegeven in Fig. 2. Op deze locatie wordt enkel afgemeerd aan rechteroever.

Ter hoogte van het districtshuis van De Vlaamse Waterweg (splitsing Albertkanaal - kanaal Dessel-Turnhout-Schoten, Kmp. 122.8) is de waterspiegelbreedte 75 m, wordt er aan beide oevers afgemeerd en is de theoretische waterdiepte aan linkeroever 3.5 m en aan rechteroever 4.0 m, zie Fig. 3. Er kan aan beide zijden afgemeerd worden. Een gelijkaardige locatie situeert zich net opwaarts van de afgebroken Hoogmolenbrug in Schoten (zichtbaar links in Fig. 3). Hier is de waterspiegelbreedte 80 m.

Ter hoogte van brug Deurne-Bal (Fig. 4) zijn beide oevers vernieuwd en is de vaarweg 63 m breed. Schepen meren er enkel af aan rechteroever.



Figuur 1 – Luchtfoto van de sectie van het Albertkanaal tussen de sluisen van Wijnegem en de haven van Antwerpen. Bron: geopunt.be.



Figuur 2 – Bovenaanzicht van het Albertkanaal bij Euro Rice Handling in Schoten. De waterdiepte is er 4.5 m en de vaarwegbreedte is er 63 m. Bron: geopunt.be.

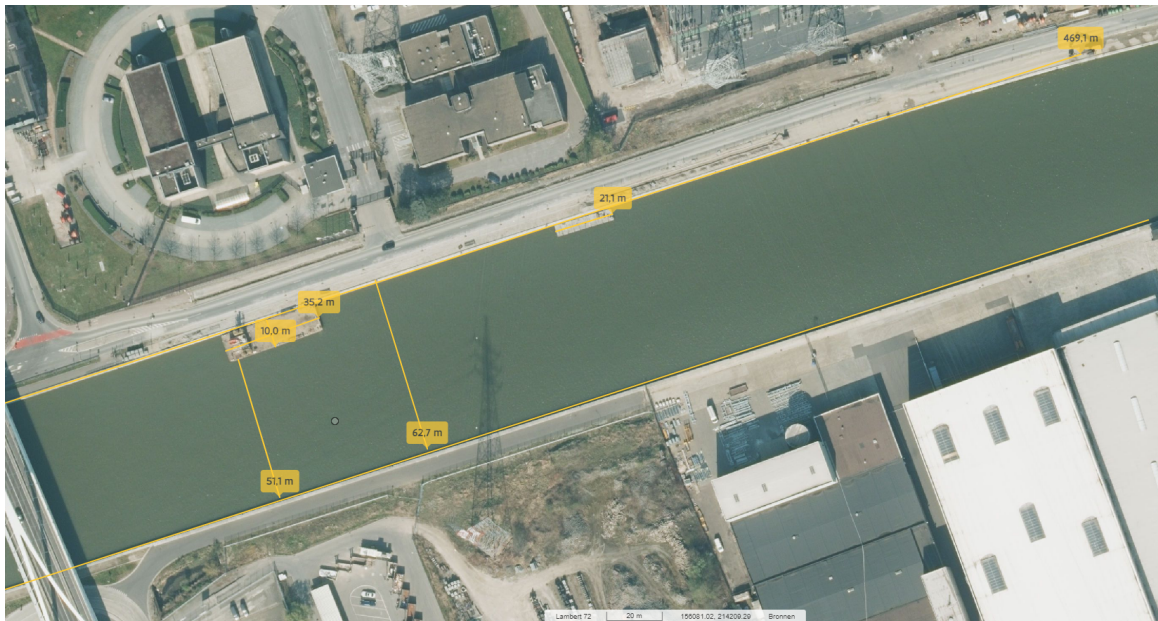


Figuur 3 – Bovenaanzicht van het Albertkanaal nabij de splitsing met het kanaal Dessel-Turnhout-Schoten met links de ondertussen afgebroken Hoogmolenbrug. Bron: geopunt.be.

1.3 Vaartuigen

Volgens de website Visuriz.be is het pand van het Albertkanaal tussen de sluisen van Wijnegem en de haven van Antwerpen geklasseerd als CEMT Vb.

De maximale afmetingen van enkelvarende schepen in het kanaalpand tussen de sluisen van Wijnegem en de haven van Antwerpen zijn 135 m x 15 m. De maximaal toegelaten diepgang is 3.4 m. Voor samengestelde schepen zijn de maximale afmetingen in het kanaalpand tussen de sluisen van Wijnegem en de brug Deurne-



Figuur 4 – Bovenaanzicht van het Albertkanaal ter hoogte van brug Deurne-Bal. Bron: geopunt . be.

Bal 200 m x 23 m. Voor het westelijke deel tussen de brug Deurne-Bal en de haven van Antwerpen zijn de maximale afmetingen voor samengestelde schepen kleiner: 200 m x 15 m.

De maximale snelheden van de schepen hangt af van de afmetingen (voornamelijk de diepgang): voor schepen met een diepgang minder dan 1.5 m is de maximale snelheid 13 km/h, terwijl die voor schepen met een diepgang van 1.5 m tot 3.4 m, 9 km/h bedraagt. Deze limieten gelden voor enkelvarende en samengestelde schepen.

Enkele voorbeelden van passages worden weergegeven in Fig. 5. De eerste (Fig. 5a) betreft een luchtfoto uit 2017 waar een 2x2 duwkonvooi (afmetingen 23x181m) onder de oude Hoogmolenbrug passeert waar de doorgang ongeveer 50 m is. De tweede (Fig. 5b) betreft een luchtfoto uit 2021 waar het oplopen van twee schepen onder de vernieuwde brug Deurne-Bal te zien is, waarbij iets later een afgemeerd schip gepasseerd zal worden. Het oplopen of kruisen van schepen terwijl aangemeerde schepen gepasseerd worden, is enkel toegelaten indien de breedte van de schepen niet meer is dan 15 m.

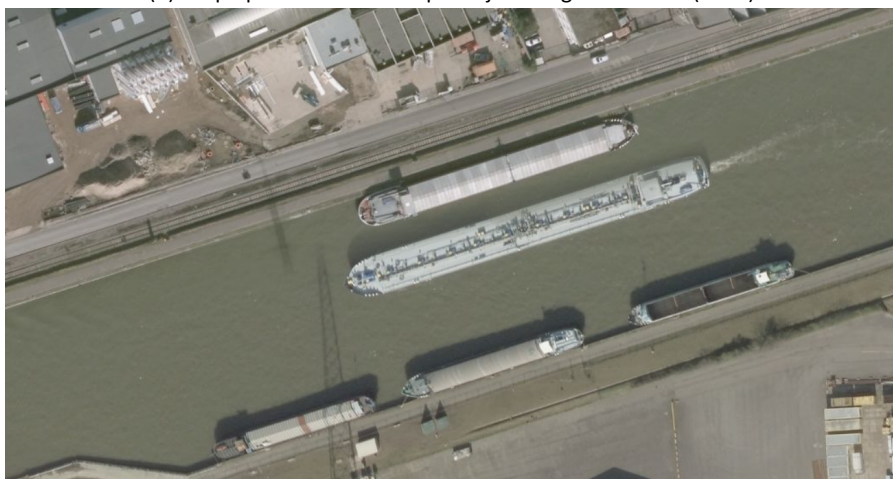
Het derde luchtbeeld toont de passage van een binnenvaartschip bij de wachtplaats in Merksem (ter hoogte van de Borrewaterstraat) waar het Albertkanaal een breedte heeft van 60 m en een aangemeerd schip gepasseerd wordt op een afstand van minder dan de scheepsbreedte van het varende schip. Hierbij dient de kanttkening gemaakt te worden dat de luchtfoto een compositie is van meerdere foto's (minstens twee) wat duidelijk is door de schaduw van de hoogspanningsmast op linkeroever. Het is daarom mogelijk dat het schip afgemeerd aan rechteroever tijdens de passage van de tanker niet op de plaats lag zoals dat op de luchtfoto zichtbaar is.



(a) Passage 2x2 duwbak onder Hoogmolenbrug (2017).



(b) Oplopen van twee schepen bij de brug Deurne-Bal (2021).



(c) Passage wachtplaats Merksem (2013).

Figuur 5 – Luchtfoto's van het scheepspassages op het pand Wijnegem haven van Antwerpen op het Albertkanaal. Bron: [geopunt . be](http://geopunt.be).

2 Ropes Berekeningen

2.1 Inleiding

De ROPES (Research On Passing Effects on Ships) software is ontwikkeld in een Joint Industry Project geleid door Marin, waar WL een bijdrage geleverd heeft door een grote reeks sleeptank proeven uit te voeren met afgemeerde schepen waarmee de software gevalideerd werd (Delefortrie *e.a.*, 2012; Pinkster en Pinkster, 2014; Talstra en Blik, 2014).

De software is in staat om het effect van arbitraire haven- en kanaalgeometrie mee te nemen in berekeningen van de krachten veroorzaakt door passerende schepen. Een nadeel van ROPES is wel dat de rekentijd toeneemt met het kwadraat van het aantal panelen dat gebruikt wordt. Daarom moet dit aantal zo laag mogelijk gehouden worden (ordegrootte enkele duizenden panelen in totaal is gebruikelijk). Een verder nadeel van ROPES is dat de drukverdeling op de romp van schepen niet geëxporteerd en gevisualiseerd kan worden, enkel de integralen hiervan (krachten en momenten) worden geëxporteerd. De vervorming van het vrije vloeistofoppervlakte wordt niet in rekening gebracht bij ROPES berekeningen, enkel de water fase is van belang. Het gevolg hiervan is dat de geometrie van een romp enkel het gedeelte bevat dat zich onder water bevindt.

Twee types oevers zijn beschikbaar binnen ROPES:

- mathematische oever: rechtlijnig zonder panelen;
- discrete oever: eender welke vorm, gemaakt met panelen.

Deze laatste heeft het voordeel dat arbitraire oevers (en bodems) gemodelleerd kunnen worden, maar het nadeel is dat de discrete vorm d.m.v. panelen convergentie issues kunnen geven als de afstand tussen de panelen van de oever en de panelen van een passerend of afgemeerd schip kleiner is dan de grootte van de panelen. De mathematische oever maakt gebruik van een spiegeling van de geometrie tov de oever locatie, waarbij de gespiegelde geometrie ook gebruikt wordt als bron van invloed voor het bepalen van de geïnduceerde snelheden op de panelen.

Ropes kan een varend schip enkel een eenparig rechtlijnige beweging uit laten voeren. Hierdoor is het niet mogelijk om specifieke situaties met bochten in een kanaal (zoals zichtbaar in Fig. 2), exact door te rekenen.

2.2 Randvoorwaarden berekeningen

2.2.1 Schepen en kanaalsectie

Voor de passerende schepen zullen een samengesteld en enkelvarend schip gebruikt worden met maximale toelaatbare afmetingen en diepgang. Voor beide scheepstypes zal hetzelfde snelheidsbereik onderzocht worden. De focus van snelheden ligt evenwel bij 9 km/u, 11 km/h en 13 km/u. Voor de passerende schepen zullen naast de maximale diepgang, ook berekeningen uitgevoerd worden met volgende twee kleinere waarden van de diepgang: 1.5 m en 2.5 m.

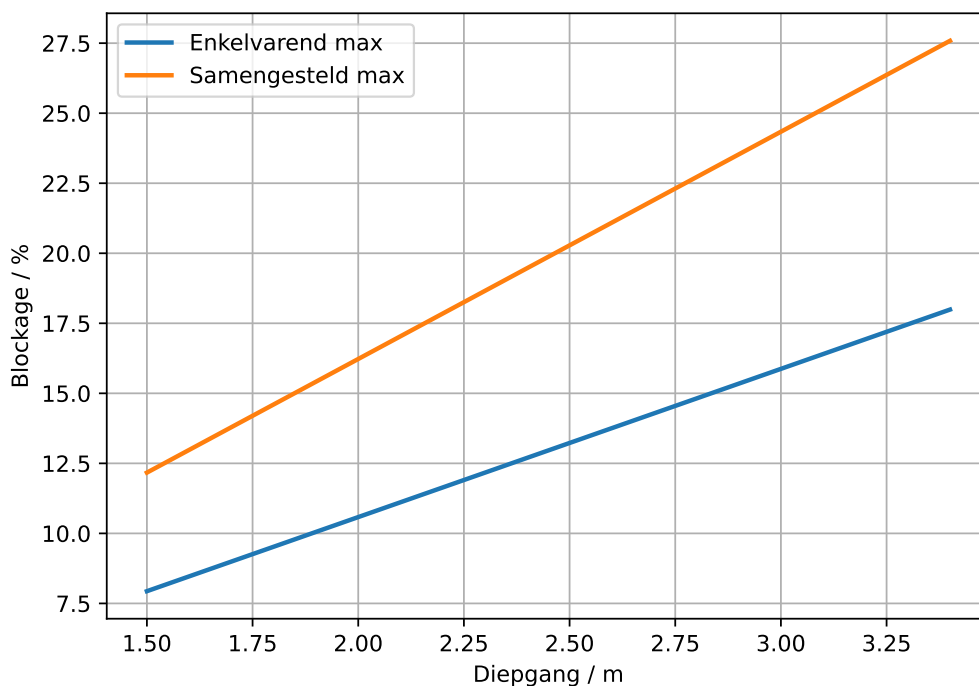
Voor het afgemeerde schip zal in eerste instantie hetzelfde enkelvarende schip gebruikt worden met maximale afmetingen en diepgang. De invloed van de afmetingen van het afgemeerde schip worden bepaald door ook berekeningen uit te voeren met een kleiner schip (CEMT IV, met maximale afmetingen voor toegang tot het Netekanaal).

De identificatiecodes van deze schepen voor de berekeningen worden weergegeven in Tabel 1. Merk op dat de block coëfficiënten relatief hoog zijn. Voor schip B is dit een direct gevolg van de vereenvoudiging van de rompvorm tot een enkele duwbak zonder duwer. Voor de twee schepen die als passerend schip gebruikt zullen worden, wordt in Figuur 6 de blockage¹ weergegeven als functie van de diepgang. Deze waarden worden gebruikt om de resultaten van de ROPES berekeningen te corrigeren voor de invloed van de vervorming van het vrije vloeistofoppervlakte bij hoge(re) snelheden (zie sectie 2.3.2).

Tabel 1 – Scheepscodes en scheepskarakteristieken.

Code	Beschrijving	breedte	diepgang	lengte	blokcoëfficiënt	displacement
A	1x1 max	15 m	3.4 m	135 m	0.921	6339 m ³
B	2x2 max	23 m	3.4 m	200 m	0.981	15 220 m ³
C	CEMT IV	10.3 m	2.8 m	81.3 m	0.921	2159 m ³
A25	1x1 max	15 m	2.5 m	134.3 m	0.921	4596 m ³
B25	2x2 max	23 m	2.5 m	197.3 m	0.982	11 140 m ³
A15	1x1 max	15 m	1.5 m	132.5 m	0.905	2698 m ³
B15	2x2 max	23 m	1.5 m	196 m	0.98	6628 m ³

Blockage als functie van diepgang



Figuur 6 – Blockage van de kanaalsectie met breedte 63 m en diepte 4.5 m voor de twee schepen als functie van hun diepgang.

Er zal een recht kanaal gebruikt worden met een breedte van 63 m en diepte van 4.5 m waar één enkel schip afgemeerd ligt aan de rechteroever. Specifieke oevers worden niet gebruikt. De uitgevoerde berekeningen benaderen het meeste de situatie zoals weergegeven in Figuur 4.

¹De blockage is de verhouding van het dwarsoppervlak van het schip in vergelijking met het oppervlak van de kanaal sectie waar het door vaart.

2.2.2 Scheepssnelheden

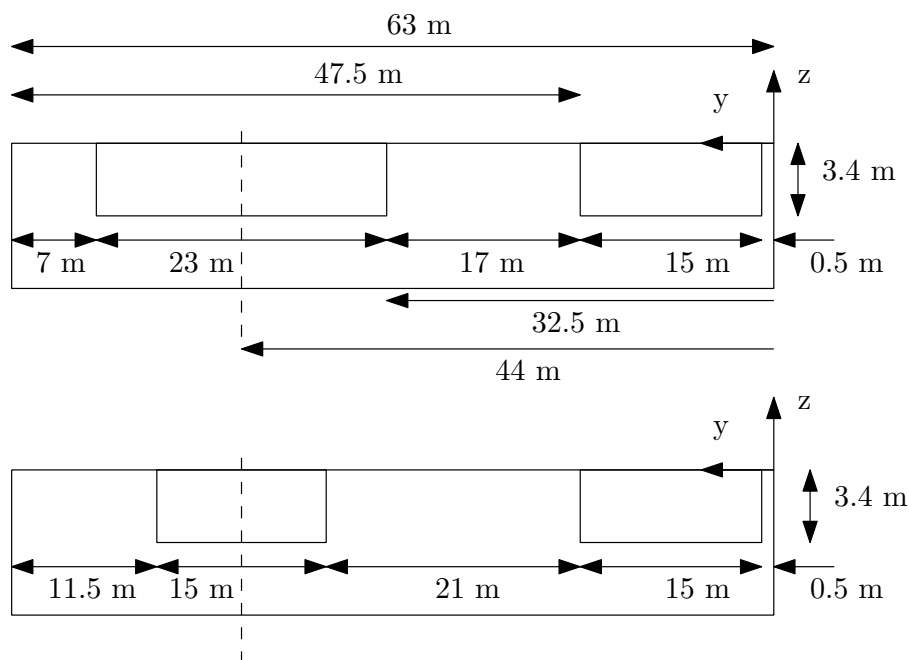
De snelheden opgelegd aan de varende schepen staan vermeld in Tabel 2.

Tabel 2 – Snelheidscodes en overeenkomstige scheepssnelheden.

Code	$V / \text{km/h}$	$V / \text{m/s}$
A	6	1.667
B	8	2.222
C	10	2.778
D	12	3.333
E	14	3.889
F	9	2.5
G	11	3.056
H	13	3.611

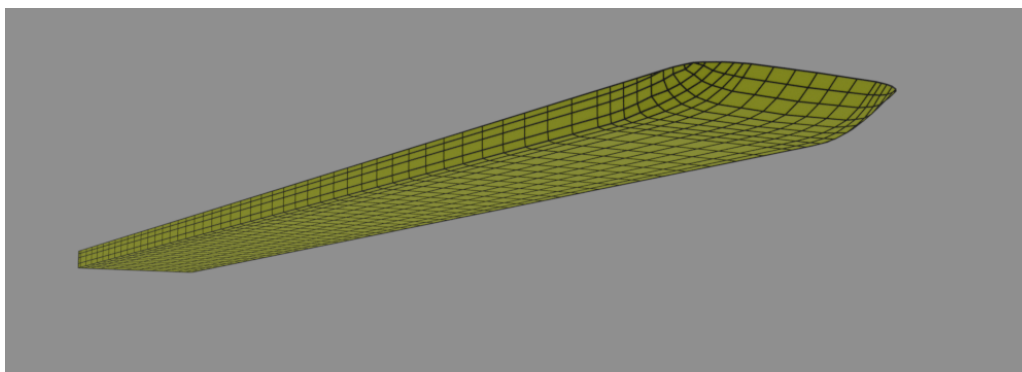
2.2.3 Assenstelsel en laterale scheepsposities

De oorsprong van het assenstelsel bevindt zich aan rechteroever. De x-as is parallel aan de rechteroever, de y-as wijst naar linkeroever en de z-as is positief naar boven. Doorsneden van het kanaal met A en B als varende schepen en A als afgemeerd schip worden getoond in Figuur 7. De afgemeerde schepen worden op een halve meter van de oever geplaatst. Merk op dat deze doorsnede niet op schaal is getekend.



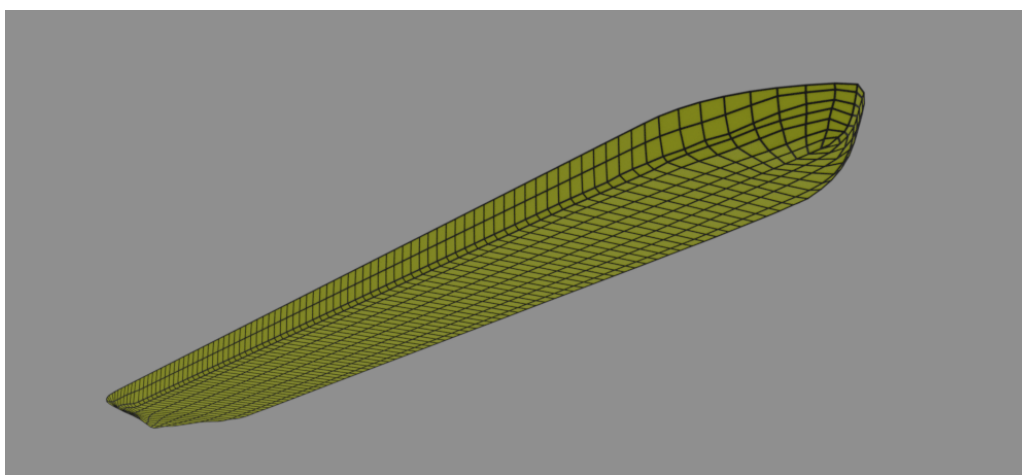
Figuur 7 – Schematische doorsnede van het kanaal met A als afgemeerd schip en B als varend schip (bovenaan) en A als varend schip (onderaan).

Het varende schip wordt op verschillende laterale afstanden van de rechteroever gepositioneerd. Voor de situatie met B als varend schip en A als afgemeerd schip (conditie B_s_{Am}), worden de absolute posities van het varende schip en de laterale afstand tussen het varende en afgemeerde schip weergegeven in Tabel 3. De eerste rij in deze tabel komt overeen met de doorsnede van het kanaal zoals weergegeven in Figuur 7. Voor de conditie A_s_{Am} worden dezelfde laterale posities gebruikt voor het varende schip (y_s), maar de laterale afstan-



Figuur 9 – Visualisatie van paneel geometrie van het samengesteld schip (B) met maximale afmetingen.

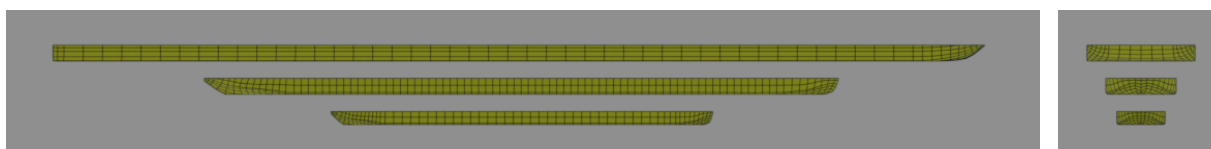
enkelvarend schip met maximaal toelaatbare afmetingen (A). De geometrie van de resulterende romp wordt weergegeven in Fig. 10.



Figuur 10 – Visualisatie van paneel geometrie van het enkelvarend schip (A) met maximale afmetingen.

Deze geometrie wordt verder ook gebruikt voor het kleinere schip, maar verschaald naar de maximale afmetingen van een schip dat op het Netekanaal kan varen (CEMT IV, lengte = 81.3 m en breedte = 10.3 m met een diepgang van 2.8 m).

De drie geometrieën van de schepen (bij maximale diepgang) worden samen weergegeven in Figuur 11.



Figuur 11 – Visualisatie van de drie scheepsrompen. Boven: B, midden: A, onder: C.

Zoals reeds vermeld, zullen de twee varende schepen (A en B) ook met verminderde diepgang doorgerekend worden. Hiervoor werd de geometrie aangepast in Blender². Merk hierbij op dat de lengte van de schepen L_{pp} bij verminderde diepgang afneemt door de vorm van de boeg en/of steven (dit is ook zichtbaar bij de waarden van de scheeps lengte in Tabel 1).

²<https://www.blender.org>

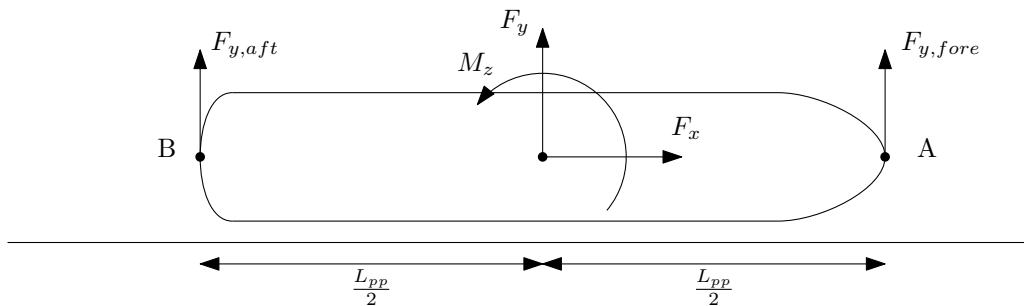
2.2.5 Oevers

De linkeroever wordt benaderd met een discrete geometrie met een lengte van 1500 m waarbij twee panelen in de Z-richting worden gebruikt en 222 panelen in de langsrichting van de oever. De horizontale zijden zijn 6.757 m lang, en de verticale zijden hebben een lengte van 2.25 m en 3 m voor de respectievelijke waterdieptes van 4.5 m en 6 m. De rechteroever wordt meegenomen in de simulaties met behulp van een mathematische kaaimuur (oneindig lang).

2.3 Postprocessing

2.3.1 Conversie naar afmeerkrachten

ROPES berekent de potentiaal krachten (zonder de invloed van viscositeit of vervorming van het wateroppervlak) op de verschillende schepen in een simulatie. Voor het huidige onderzoek zullen enkel de krachten op het afgemeerde schip geanalyseerd worden. Het assenstelsel waarin de kracht- en momentcomponenten bepaald worden, wordt weergegeven in Figuur 12.



Figuur 12 – Definitie van krachten op een afgemeerd schip.

Standaard worden de krachten bepaald bij de oorsprong van het coördinatenstelsel van het schip in kwestie (midscheeps in lengte- en dwarsrichting en vertikaal op het waterniveau). Voor een analyse van bolderkrachten worden de tijdreeksen van de midscheepse laterale kracht F_y en het giermoment M_z omgerekend naar laterale krachten op het voorschip ($F_{y,fore}$) en achterschip ($F_{y,aft}$),

$$\sum M_{A^+} : -F_{y,aft} L_{pp} = -F_y \frac{L_{pp}}{2} + M_z, \quad (1)$$

$$\sum M_{B^+} : F_{y,fore} L_{pp} = F_y \frac{L_{pp}}{2} + M_z. \quad (2)$$

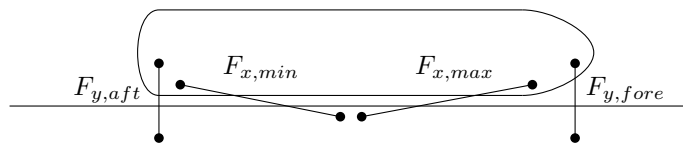
Hieruit volgen uitdrukkingen voor de laterale kracht op het voorschip ($F_{y,fore}$) en de laterale kracht op het achterschip ($F_{y,aft}$),

$$F_{y,fore} = \frac{F_y}{2} + \frac{M_z}{L_{pp}}, \quad (3)$$

$$F_{y,aft} = \frac{F_y}{2} - \frac{M_z}{L_{pp}}. \quad (4)$$

Deze krachtontbinding kan gebruikt worden voor een geïdealiseerde afmeerconfiguratie, zoals weergegeven in Figuur 13. Hierbij worden vier trossen gebruikt die elk vastgemaakt worden aan een aparte bolder. In werkelijkheid zal de afmeerconfiguratie afhankelijk zijn van de positie van het schip ten opzichte van de bolders,

de lengte van het schip, de afstand tussen de bolders en het aantal schepen dat (achter en naast elkaar) afgemeerd ligt. Voor het huidige onderzoek wordt enkel rekening gehouden met de ideale situatie en zullen de krachten in de afmeertouwen gebruikt worden als richtwaarde voor de boldercapaciteit.



Figuur 13 – Geïdealiseerde afmeerconfiguratie voor een enkel schip met de relevante krachtcomponent per afmeertouw.

2.3.2 Correctie voor hoge Froude getallen

De rompkrachten berekend door ROPES houden geen rekening met effecten ten gevolge van de vervorming van het vrije wateroppervlak en hoge waarden van de diepte-gebaseerde Froude getallen. Talstra en Blik (2014) hebben een correctiefactor F_c bepaald gebaseerd op een vereenvoudigd 1D kanaal model, wat gevalideerd werd met interactieproeven uitgevoerd in de sleeptank van het Waterbouwkundig Laboratorium (Delefortrie *e.a.*, 2012). De correctiefactor is een functie van de blockage en het op diepte gebaseerde Froude getal,

$$F_c = 1 + \alpha Fr^2, \quad (5)$$

met

$$\alpha = 1 + 20r, \quad (6)$$

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}}. \quad (7)$$

Hierbij wordt voor r enkel de blockage van het varende schip in de kanaalsectie genomen (zie data in Fig. 6) en Fr het (diepte-gebaseerd) Froude getal. Talstra en Blik (2014) raden aan om voor de blockage de invloed van het afgemeerde schip ook mee te nemen, maar op basis van onderzoek van UGent in samenwerking met WL wordt enkel de blockage van het varende schip meegenomen (Van Zwijnsvoorde, 2022).

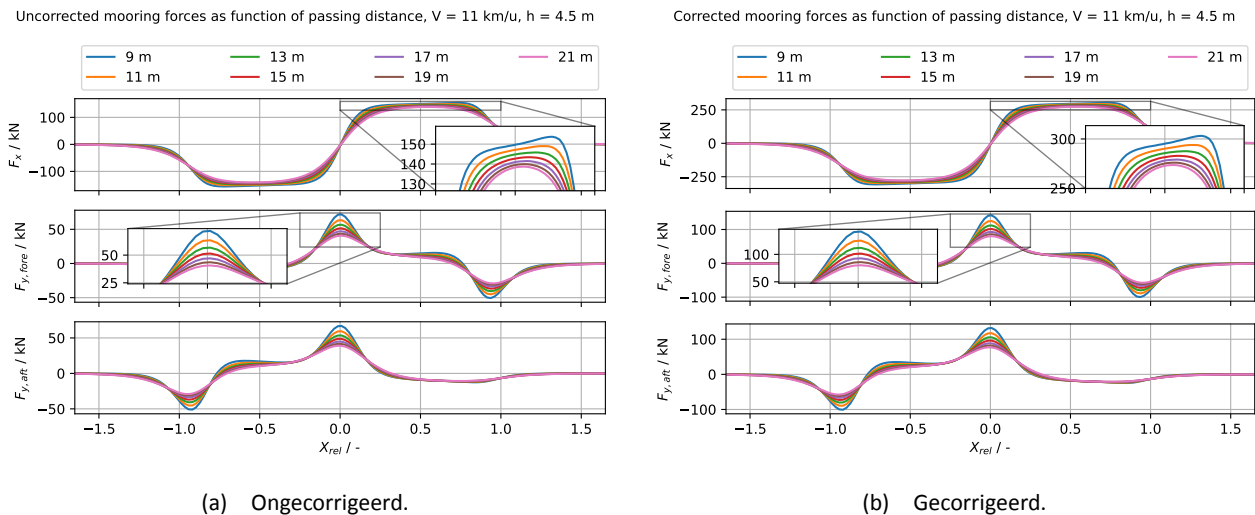
Alle componenten van de krachten en momenten worden vermenigvuldigd met de correctiefactor F_c (Eq. 5). Wanneer dusdanig gecorrigeerde resultaten getoond worden in dit rapport, is dit in de titel van de figuur duidelijk weergegeven.

In Figuur 14 wordt het effect van deze correctie op de resultaten weergegeven voor enkele resultaten van conditie As_Am. Ten gevolge van de relatief hoge waarden van de blockage en snelheid voor deze gevallen ($r \approx 18\%$ en $V = 11$ km/u), is de correctie factor significant.

2.3.3 Relatieve scheepspositie

Als voorbeeld worden de midscheepse krachten voor alle laterale afstanden van conditie As_Am_VA ($V = 6$ km/u) weergegeven in Figuur 15a. De tijdreeksen van de equivalente dwarskrachten op het voorschip en achterschip worden daarna weergegeven in Figuur 15b. In beide gevallen wordt voor de X-as de relatieve positie X_{rel} van het varende schip ten opzichte van het afgemeerde schip gebruikt. Hierbij is de waarde van $X_{rel} = -1$ als het varende schip met de boeg gelijk ligt met de achtersteven van het afgemeerde schip. Bij $X_{rel} = 0$ liggen de middens van beide schepen gelijk ten opzichte van elkaar en bij $X_{rel} = 1$ is de longitudinale positie van de achtersteven van het varende schip gelijk met de boeg van het afgemeerde schip,

$$X_{rel} = \frac{X_s - X_m}{0.5(L_{pp_s} + L_{pp_m})}, \quad (8)$$



Figuur 14 – Invloed van correctie voor hoge Froude getallen (Talstra en Bliek, 2014) voor conditie As_Ambij $V = 11$ km/u.

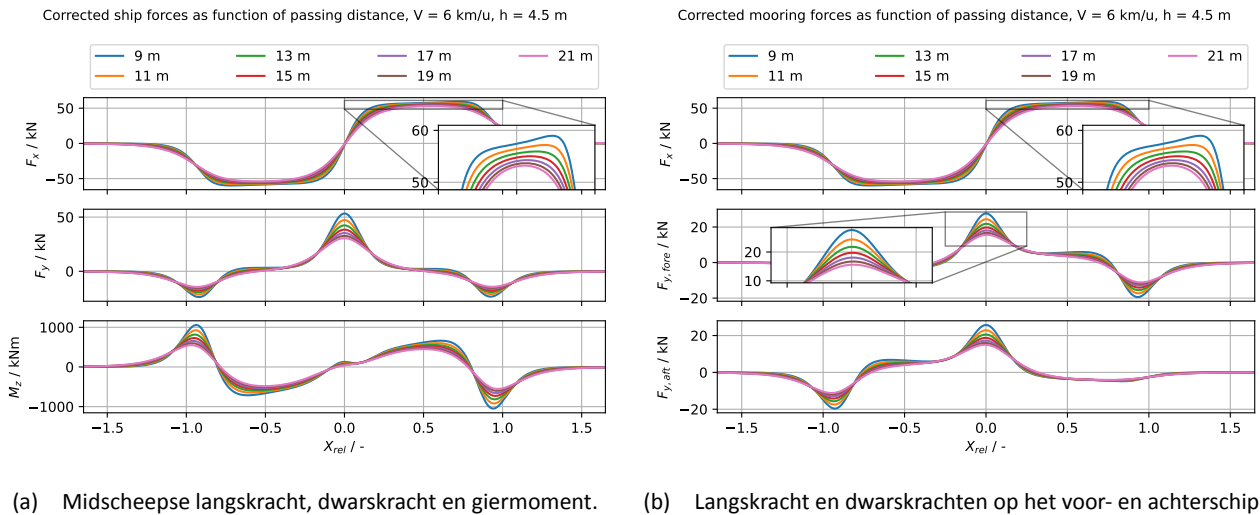
waarbij L_{pp_s} en L_{pp_m} de karakteristieke lengten zijn van het varend (*sailing*) respectievelijk afgemeerd (*moored*) schip. Voor de conditie As_Am_VG ($V = 11$ km/u) worden de krachten op het afgemeerde schip weergegeven in Figuur 16. Een vergelijking van de overeenkomstige tijdreeksen weergegeven in Figuren 15 en 16 toont aan dat de snelheid van het varende schip enkel van invloed is op de grootte van de waarden, de vorm van de tijdreeksen zijn gelijk voor gelijke laterale afstanden.

2.3.4 Bolderkrachten

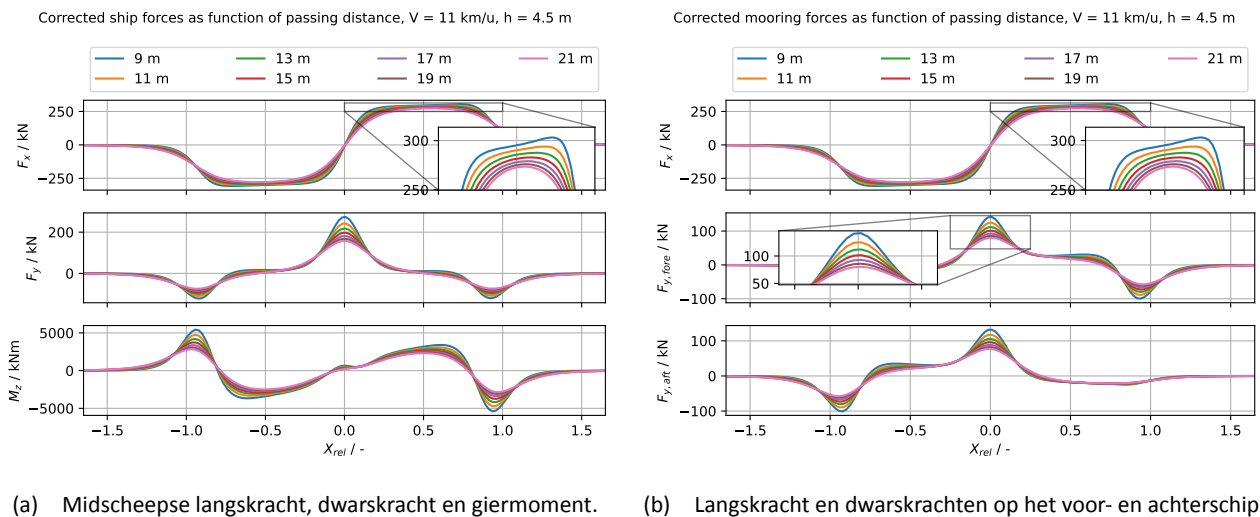
De extreme waarden van de tijdreeksen zoals weergegeven in Figuren 15b en 16b worden bepaald en deze worden gebruikt als richtwaarde voor de bolderkrachten. Merk hierbij op dat voor de langskracht de maximale en minimale waarde worden bepaald, terwijl voor de laterale krachten, enkel de maximale waarden worden bepaald. Uit de positieve richting van de laterale krachten zoals weergegeven in Figuur 12 volgt dat enkel bij een positieve waarde afmeertouwen worden belast op trek, terwijl bij een negatieve kracht, het schip tegen de kaaimuur/fenders wordt gedrukt. De tijdreeksen in Figuur 15 laten verder zien dat de maximale waarden van de longitudinale en laterale krachten niet noodzakelijk gelijktijdig optreden. Hierbij is bij de bepaling van de externe waarden geen rekening gehouden, dit is enkel nuttig bij een dynamische afmeerstudie waarbij de tijdreeksen volledig gebruikt worden. Dit valt echter buiten de scope van het huidige onderzoek.

2.3.5 Simulatie condities

De varende schepen leggen een afstand van 1000 m af (ze beginnen allen bij $x = -500$ m). De tijdstap van de simulaties is vastgelegd op 1 s. Door de variabele snelheid en vaste afgelegde weg van 1000 m is de totale simulatieduur afhankelijk van de snelheid. Voor de verschillende snelheden zoals eerder weergegeven in Tabel 2, wordt de simulatieduur weergegeven in Tabel 5. De waterdichtheid is 1000 kg/m^3 , de grootte van de zwaartekrachtsversnelling is 9.81 m/s^2 . Resultaten van de ROPES berekeningen worden besproken in hoofdstuk 3.



Figuur 15 – Verloop van resulterende krachten op het afgemeerde schip voor conditie As_Am_VA ($V = 6 \text{ km/u}$) als functie van de relatieve positie van het afgemeerde schip en het varende schip.



Figuur 16 – Verloop van resulterende krachten op het afgemeerde schip voor conditie As_Am_VG ($V = 11 \text{ km/u}$) als functie van de relatieve positie van het afgemeerde schip en het varende schip.

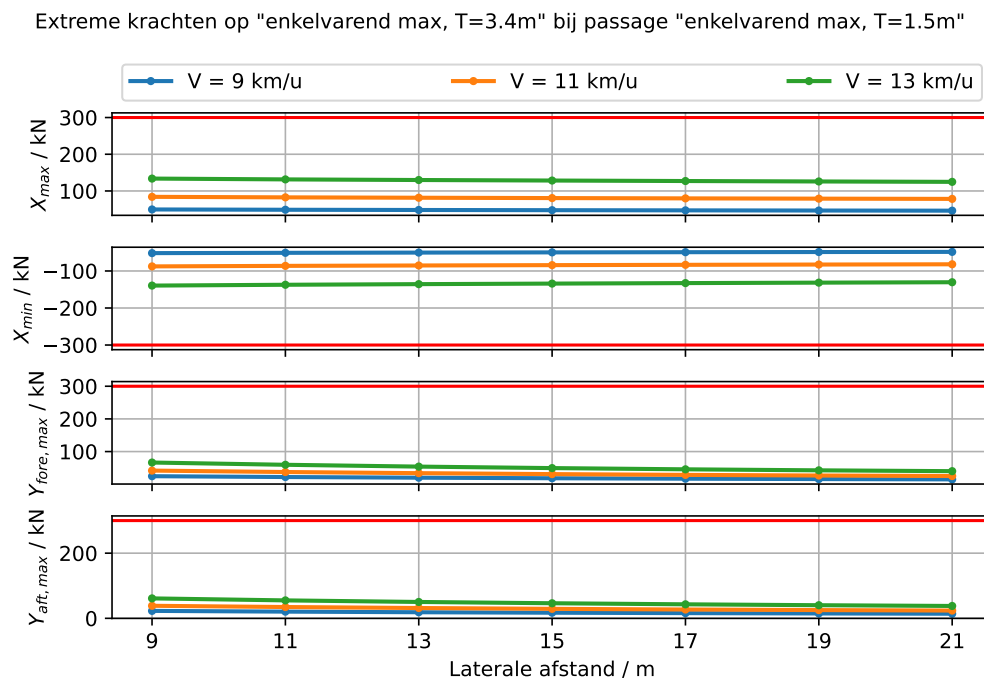
Tabel 5 – Simulatieduur als functie van de vaarsnelheid.

Code	$V / \text{km/h}$	T_{end} / s
A	6	599
B	8	450
C	10	360
D	12	300
E	14	257
F	9	400
G	11	327
H	13	277

3 Resultaten

3.1 Conditie As_Am

Zoals eerder gemeld werden voor de conditie met het enkelvarende schip met maximale afmetingen meerdere diepgangen onderzocht van het varende schip. De extreme waarden voor een diepgang van 1.5 m worden weergegeven in Figuur 17. Voor deze conditie worden ook resultaten weergegeven als de vaarweg verdiept zou worden tot 6 m. Voor een diepgang van 2.5 m worden de resultaten gepresenteerd in Figuur 18 terwijl de resultaten voor de maximale diepgang worden weergegeven in Figuur 19. In elk van deze figuren worden de trends van de extreme waarden weergegeven voor drie snelheden (9 km/u, 11 km/u en 13 km/u) als functie van de laterale afstand tussen het afgemeerde en varende schip. De rode horizontale lijn bij ± 300 kN geeft de boldercapaciteit weer. Merk op dat de boldercapaciteit hier gebruikt wordt als richtwaarde, de totale kracht die opgenomen wordt door een bolder hangt af van de specifieke trosconfiguratie en de dynamische respons van het afgemeerde schip. Een dynamische afmeerstudie valt echter buiten de scope van de huidige studie.

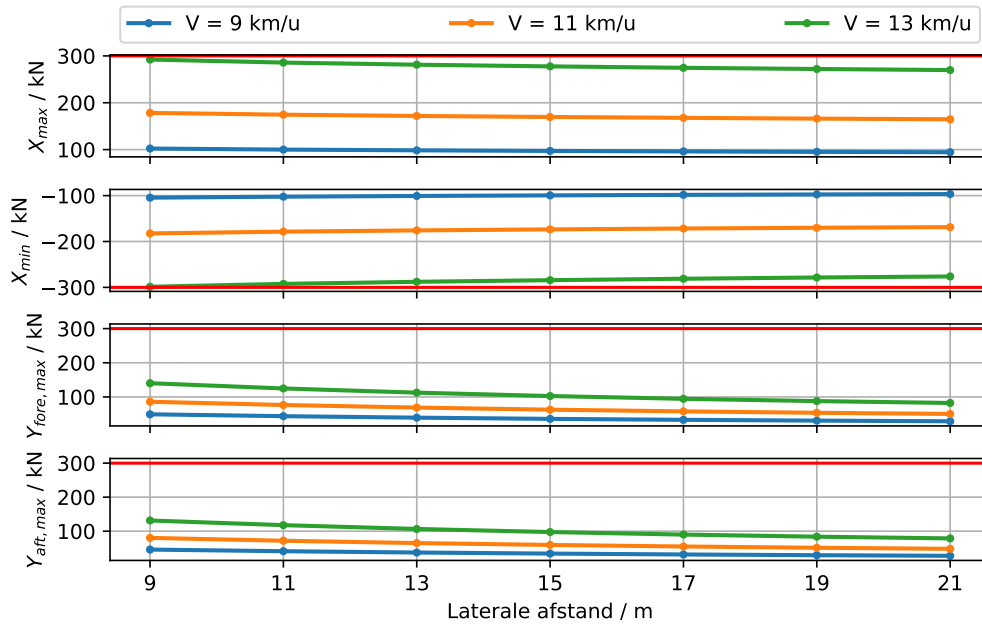


Figuur 17 – Extreme waarden voor de langskracht en dwarskracht voor conditie As_Am bij een diepgang van 1.5 m van het varende schip.

Bij een diepgang van 1.5 m wordt de boldercapaciteit in geen van de doorgerekende gevallen overschreden. Voor deze gevallen is er nog een marge van een factor twee over bij de kleinste laterale afstand en hoogste snelheid. Als de diepgang van het varende schip toeneemt, verhogen de krachten op het afgemeerde schip. Bij een diepgang van 2.5 m (Figuur 18) wordt de boldercapaciteit bij een snelheid van 13 km/u en de laagste laterale afstanden dicht benaderd. Voor de twee laagste snelheden is er nog een significante marge.

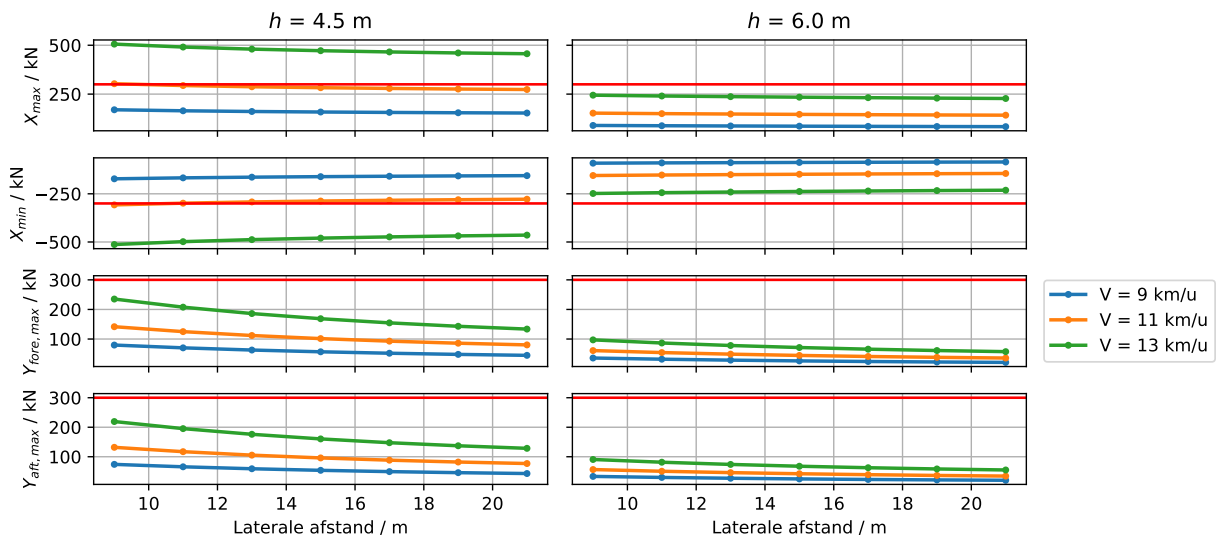
Voor de resultaten van de berekeningen uitgevoerd bij de maximale waarde van de diepgang (Figuur 19) wordt de boldercapaciteit voor de langskracht bij een snelheid van 11 km/u voor alle laterale afstanden benaderd of overschreden bij de huidige diepgang van het kanaal. De invloed van een verdieping van het kanaal tot 6 m heeft een gunstig effect op de extreme waarden: bij de drie snelheden blijven de berekende bolderkrachten

Extreme krachten op "enkelvarend max, T=3.4m" bij passage "enkelvarend max, T=2.5m"



Figuur 18 – Extreme waarden voor de langskracht en dwarskracht voor conditie As_Am bij een diepgang van 2.5 m van het varende schip.

Extreme krachten op "enkelvarend max, T=3.4m" bij passage "enkelvarend max, T=3.4m"

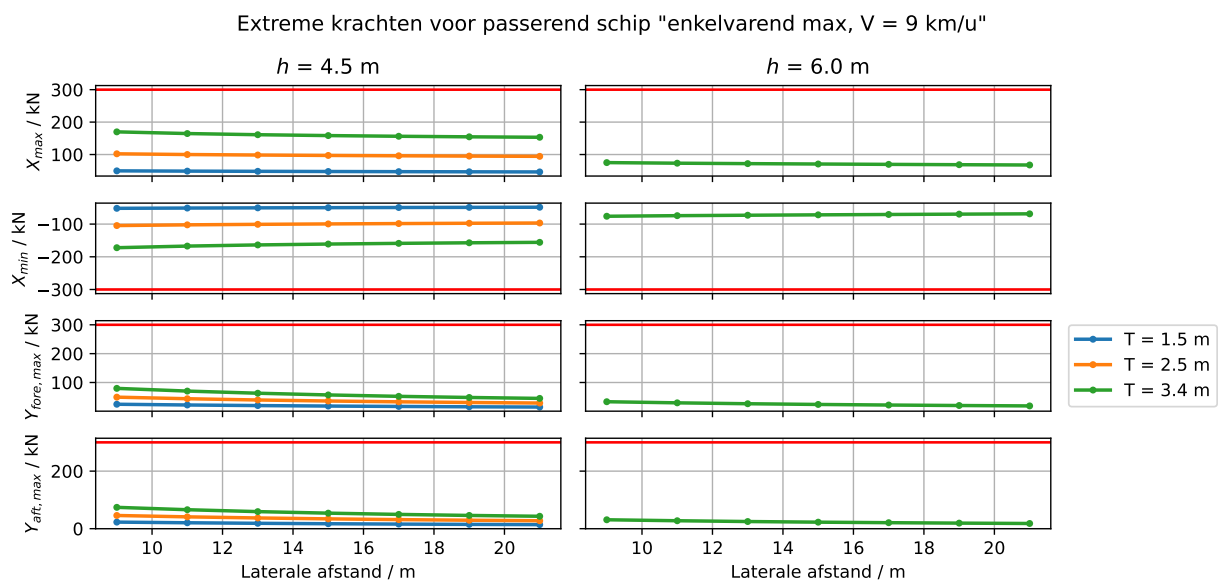


Figuur 19 – Extreme waarden voor de langskracht en dwarskracht voor conditie As_Am bij een diepgang van 3.4 m van het varende schip.

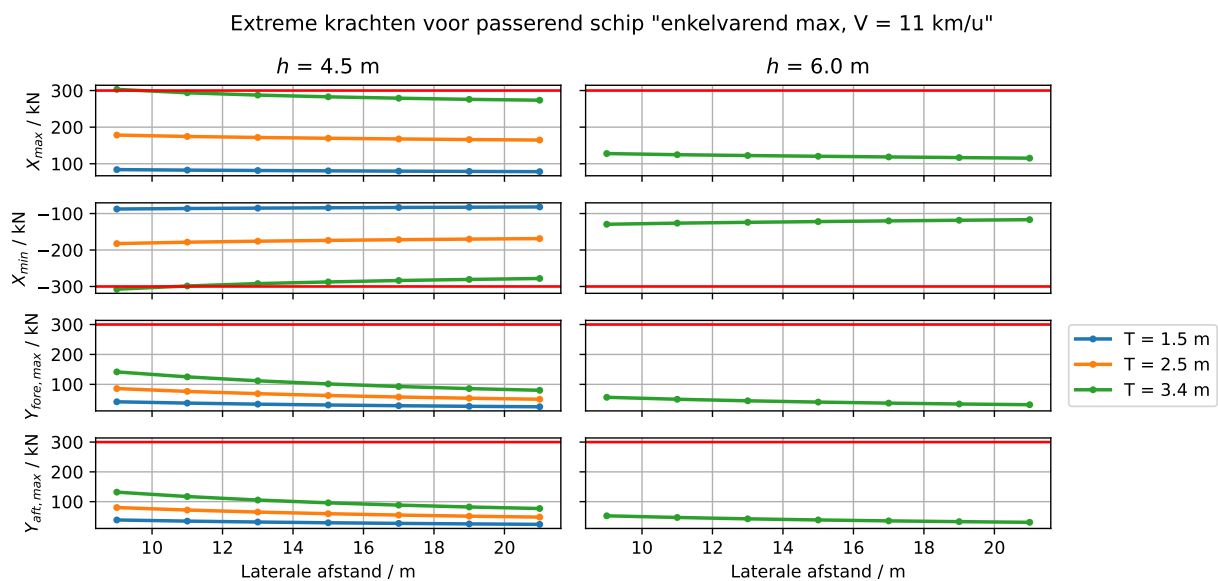
kleiner dan de boldercapaciteit van 300 kN. Voor de dwarskrachten wordt de boldercapaciteit bij geen van de snelheden benaderd of overschreden.

Voor de huidige waterdiepte blijven de berekende extreme krachten enkel voor de maximaal toelaatbare snelheid van 9 km/u in alle gevallen ruim onder de boldercapaciteit.

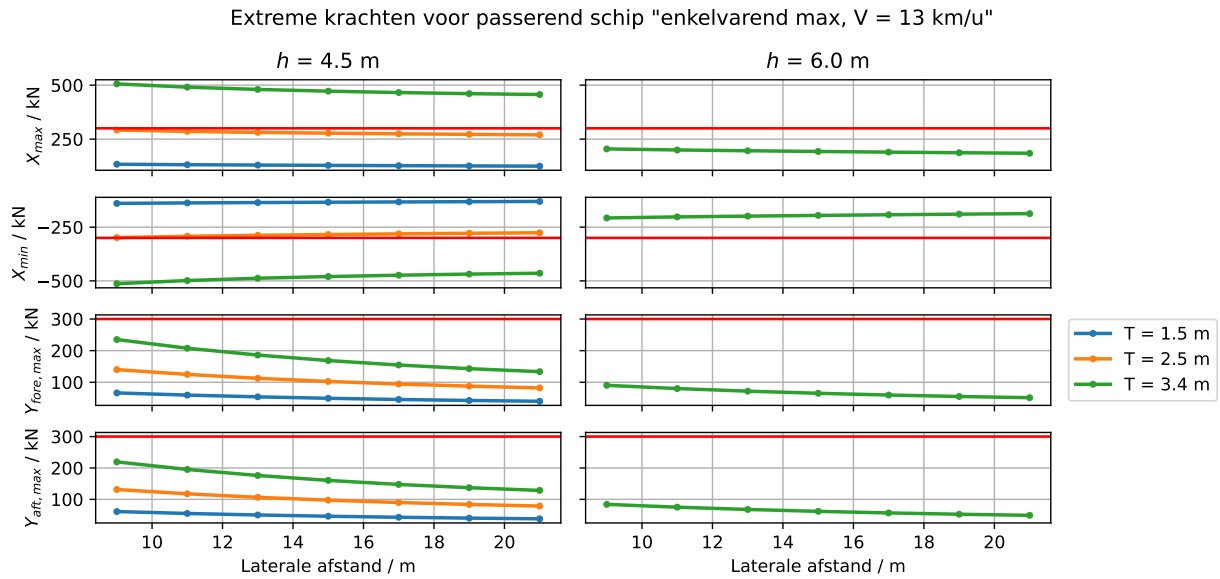
De resultaten van Figures 17-19 worden in Figures 20-22 opnieuw weergegeven, waarbij eerst gefilterd werd op snelheid. Dit toont duidelijk de belangrijke invloed van de snelheid op de extreme waarden van de krachten: bij een snelheid van $V = 9$ km/h is er voor geen van de onderzochte diepgangen een overschreiding van de boldercapaciteit. Verder bevestigt dit ook dat bij een diepgang van 1.5 m, de krachten onder de boldercapaciteit blijven bij een snelheid van 13 km/u. Voor hogere waarden van de diepgang (2.5 m en meer) wordt de boldercapaciteit wel benaderd of ver overschreden (afhankelijk van de grootte van de laterale afstand).



Figuur 20 – Extreme waarden voor de langskracht en dwarskracht voor conditie As_Am_VF ($V = 9$ km/u) van het varende schip.



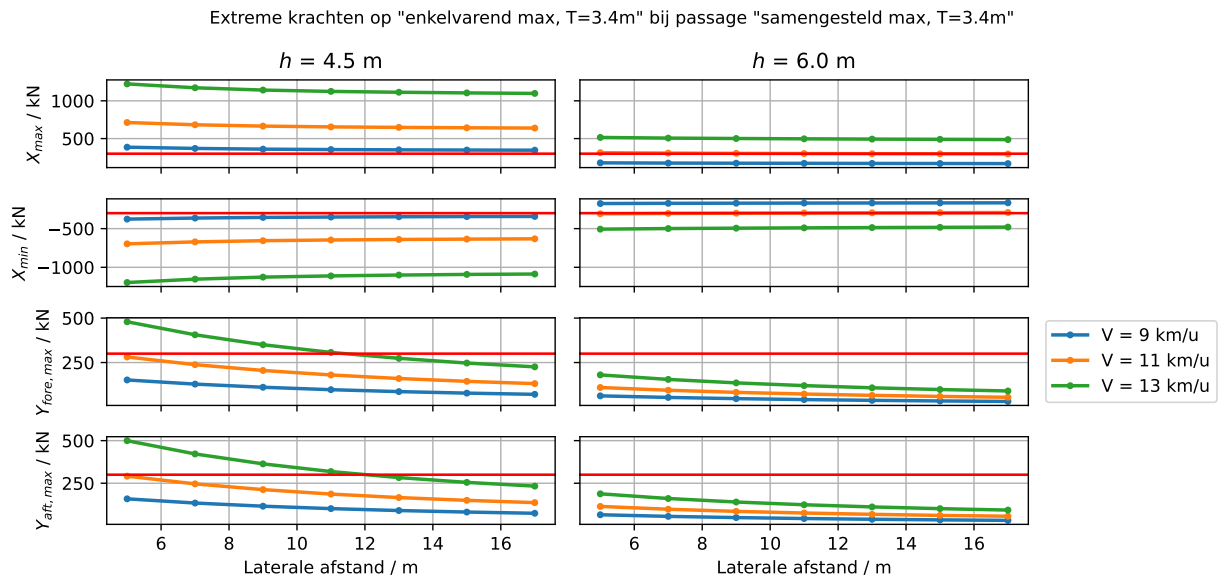
Figuur 21 – Extreme waarden voor de langskracht en dwarskracht voor conditie As_Am_VG ($V = 11$ km/u) van het varende schip.



Figuur 22 – Extreme waarden voor de langskracht en dwarskracht voor conditie As_Am_VH ($V = 13$ km/u) van het varende schip.

3.2 Conditie Bs_Am

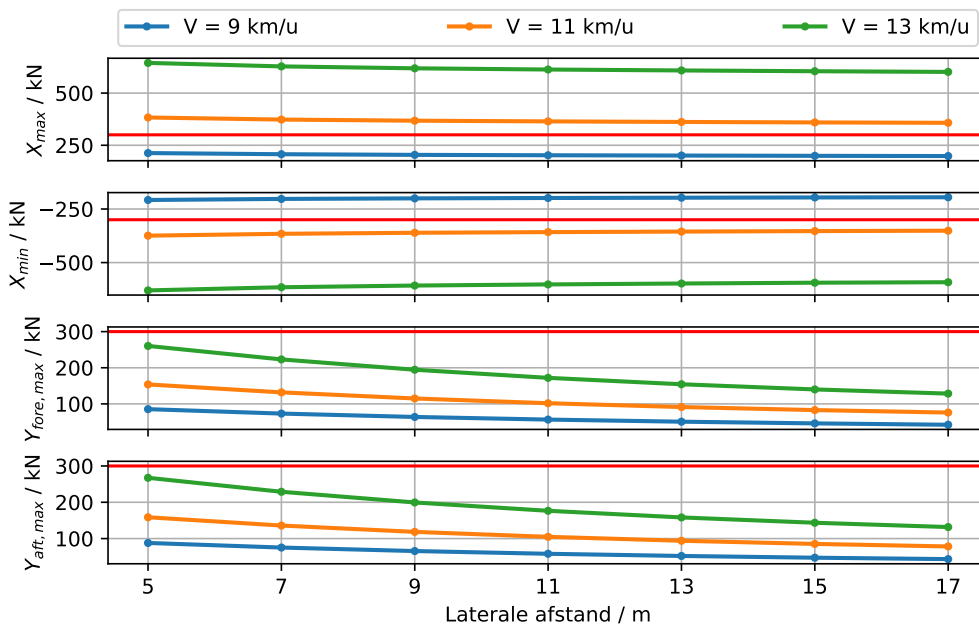
Voor de conditie waarbij het varende schip de maximale afmetingen heeft van een samengesteld schip, werden dezelfde diepgangen onderzocht als voor conditie As_Am: $T = 1.5$ m, 2.5 m en 3.4 m. Resultaten worden weergegeven in Figuur 23 voor de hoogste diepgang van $T = 3.4$ m, in Figuur 24 voor $T = 2.5$ m en in Figuur 25 voor de kleinste diepgang. Net zoals voor conditie As_Am wordt hier, voor de maximale diepgang van het varende schip, ook het effect bepaald van een verhoging van de waterdiepte tot 6 m.



Figuur 23 – Extreme waarden voor de langskracht en dwarskrachten voor conditie Bs_Am bij een diepgang van 3.4 m van het varende schip.

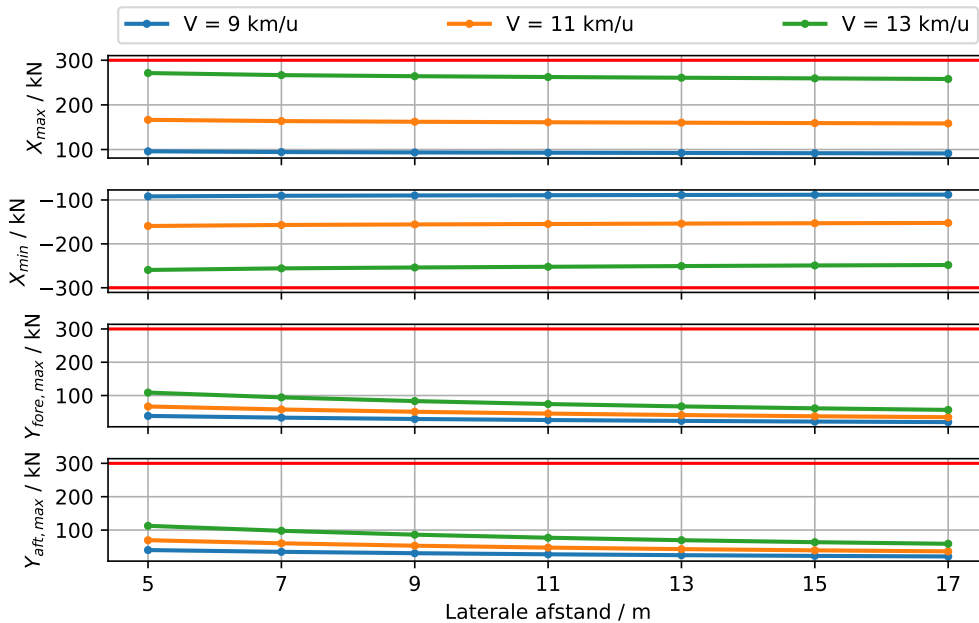
Voor de condities met maximale diepgang van het varende schip bij de huidige waterdiepte, overschreden de langskrachten bij een snelheid van 9 km/u voor alle laterale afstanden de boldercapaciteit. Deze wordt bij de maximaal toegelaten snelheid van 9 km/u niet overschreden voor de dwarskrachten. Bij een verhoogde

Extreme krachten op "enkelvarend max, T=3.4m" bij passage "samengesteld max, T=2.5m"



Figuur 24 – Extreme waarden voor de langskracht en dwarskrachten voor conditie Bs_Am bij een diepgang van 2.5 m van het varende schip.

Extreme krachten op "enkelvarend max, T=3.4m" bij passage "samengesteld max, T=1.5m"



Figuur 25 – Extreme waarden voor de langskracht en dwarskrachten voor conditie Bs_Am bij een diepgang van 1.5 m van het varende schip.

snelheid van 11 km/u wordt de boldercapaciteit overschreden voor de laterale krachten bij de kleinste laterale afstanden, terwijl bij een snelheid van 13 km/u, de boldercapaciteit wordt overschreden bij vrijwel alle beproefde laterale afstanden. Als de waterdiepte wordt vergroot tot 6 m, verlagen de krachten op het afgemeerde schip significant: bij een snelheid van 9 km/u blijven de langskrachten ruim onder de boldercapaciteit, terwijl bij een verhoogde snelheid van 11 km/u, de boldercapaciteit voor alle laterale afstand benaderd of net overschreden wordt. Enkel bij $V = 13$ km/u blijft de langskracht voor alle laterale afstanden boven de boldercapaciteit. Bij de dwarskrachten blijven de resultate ruimschoots onder de boldercapaciteit voor alle laterale afstanden.

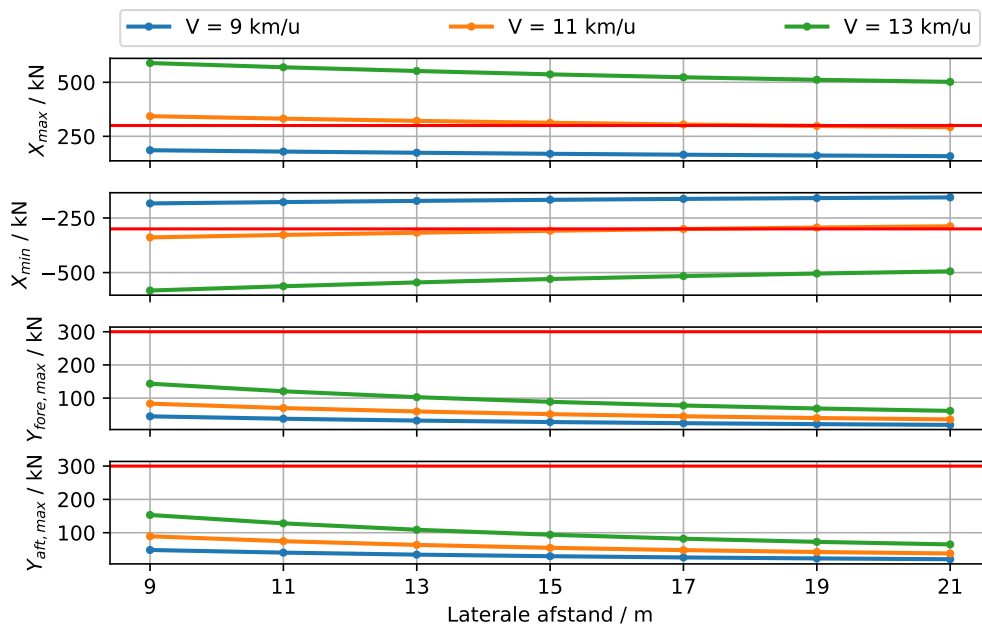
Als de diepgang van het varende schip verlaagd wordt tot 2.5 m (Figuur 24), verminderen de krachten op het afgemeerde schip significant in vergelijking met de resultaten voor de maximale diepgang. Voor alle snelheden blijven de laterale krachten onder de boldercapaciteit. Voor verhoogde snelheden (11 km/u en 13 km/u) wordt de boldercapaciteit voor de langskracht voor alle laterale afstanden overschreden.

Bij de kleinste diepgang van het samengestelde schip blijven de berekende afmeerkrachten in alle gevallen (ook bij verhoogde snelheden) onder de boldercapaciteit.

3.3 Conditie Bs_Cm

De krachten op het kleinste schip worden berekend bij passage van het grootste schip. Resultaten van ROPES berekeningen worden getoond in Figuur 26. Zoals bij alle eerdere resultaten, is ook hier de langskracht maatgevend. Wanneer de resultaten worden vergeleken met die in Figuur 23 valt op dat de boldercapaciteit in dit geval niet wordt bereikt voor de toegestane maximale snelheid van $V = 9$ km/u, deze blijft er ruim onder. Bij een verhoogde snelheid van 11 km/u wordt de boldercapaciteit overschreden bij de kleinste waarden van de laterale afstand die werden doorgerekend. Voor de hoogste snelheid wordt de boldercapaciteit significant overschreden, maar de waarden zijn steeds lager dan met het afgemeerde schip A (conditie Bs_Am). De dwarskracht vooraan en achteraan blijven voor alle snelheden onder de boldercapaciteit.

Extreme krachten op "CEMT4 (Netekanaal max), T=2.8m" bij passage "samengesteld max, T=3.4m"



Figuur 26 – Extreme waarden voor de langskracht en dwarskrachten voor conditie Bs_Cm bij een maximale diepgang van 3.4 m van het varende schip.

4 Conclusies

In dit rapport wordt *boldercapaciteit* gebruikt als richtwaarde om de grootte van troskrachten te beoordelen voor een geïdealiseerde afmeerconfiguratie. De enige manier om de werkelijke bolderkrachten te kennen en te vergelijken met de boldercapaciteit is door middel van een dynamische afmeer analyse. Dit valt echter buiten de scope van deze studie.

Uit de resultaten van het onderzoek volgt dat de langskracht op de afgemeerde schepen maatgevend is, de dwarskracht is altijd kleiner. Een vermindering van de diepgang van het varende schip heeft een vergelijkbaar effect op de bolderkrachten als een verhoging van de waterdiepte: beide gevallen resulteren in significante reducties van de afmeerkrachten.

Voor een enkelvarend schip met maximale afmetingen dat zich aan de opgelegde snelheidslimieten houdt, tonen de berekeningen aan dat de boldercapaciteit niet overschreden wordt. Bij een verhoogde snelheid van 11 km/u en een maximale diepgang wordt de boldercapaciteit bereikt. De boldercapaciteit wordt ver overschreden bij een snelheid van 13 km/u en maximale diepgang. Bij kleinere dan de maximale diepgang wordt de boldercapaciteit enkel benaderd bij een snelheid van 13 km/u en dat enkel voor de kleinste laterale afstand. Als de diepgang maximaal 1.5 m is, wordt bij geen van de snelheden (9 km/u, 11 km/u en 13 km/u) de boldercapaciteit benaderd. Als de waterdiepte wordt vergroot tot 6 m, blijven de bolderkrachten bij een diepgang van 3.4 m en een snelheid van $V = 13$ km/u onder de limiet van 300 kN.

Voor een duwkonvooi met maximale diepgang (3.4 m) wordt de boldercapaciteit overschreden bij de maximale snelheid van 9 km/u in de langsricting voor alle laterale afstanden, terwijl die voor de dwarskrachten niet wordt overschreden. Bij een verhoogde snelheid ($V = 11$ km/u) wordt de boldercapaciteit voor de dwarsrichting benaderd voor de kleinste laterale afstand (5 m). Bij de hoogst doorgerekende snelheid ($V = 13$ km/u) wordt de boldercapaciteit bij vrijwel alle beproefde laterale afstanden overschreden. Een verlaging van de diepgang van het varende schip heeft ook hier een vergelijkbare invloed op de bolderkrachten als een verhoging van de diepte van het kanaal: de afmeerkrachten verminderen significant. Er blijven zich echter situaties voordoen waarbij de boldercapaciteit significant wordt overschreden: bijvoorbeeld de combinatie $V = 13$ km/u en $h = 6$ m, en ook $T = 2.5$ m en $V \geq 11$ km/u.

De afmeerkrachten op het kleinste schip bij passage van de duwbak blijven bij een passeersnelheid van 9 km/u onder de limiet. Als de snelheid wordt verhoogd tot 11 km/u, wordt de boldercapaciteit overschreden bij vrijwel alle laterale afstanden. Er is een significante overschreiding van de boldercapaciteit voor de langskracht als de snelheid van het passerende schip 13 km/u bedraagt. De dwarskrachten blijven voor deze scheepscombinatie altijd onder de limiet.

Referenties

Delefortrie, G.; Vantorre, M.; Mostaert, F. (2012). ROPES: Systematic captive tests at Flanders Hydraulics Research. *WL Rapporten*, 848_03a. Flanders Hydraulics Research: Antwerp, Belgium

Pinkster, J.; Pinkster, H. (2014). A fast, user-friendly, 3-D potential flow program for the prediction of passing vessel forces. *in: PIANC World Congress*. San Francisco, CA, 1–5 juni 2014. 12 pp.

Talstra, H.; Blik, A. J. (2014). Loads on moored ships due to passing ships in a straight harbour channel. *in: PIANC World Congress*. San Francisco, CA, 1–5 juni 2014. 19 pp.

Van Zwijnsvoorde, T. (2022). Modelling the behaviour of a moored ship in sheltered waters. (PhD Thesis). Ghent University: Ghent, Belgium. ISBN: 9789463555722

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