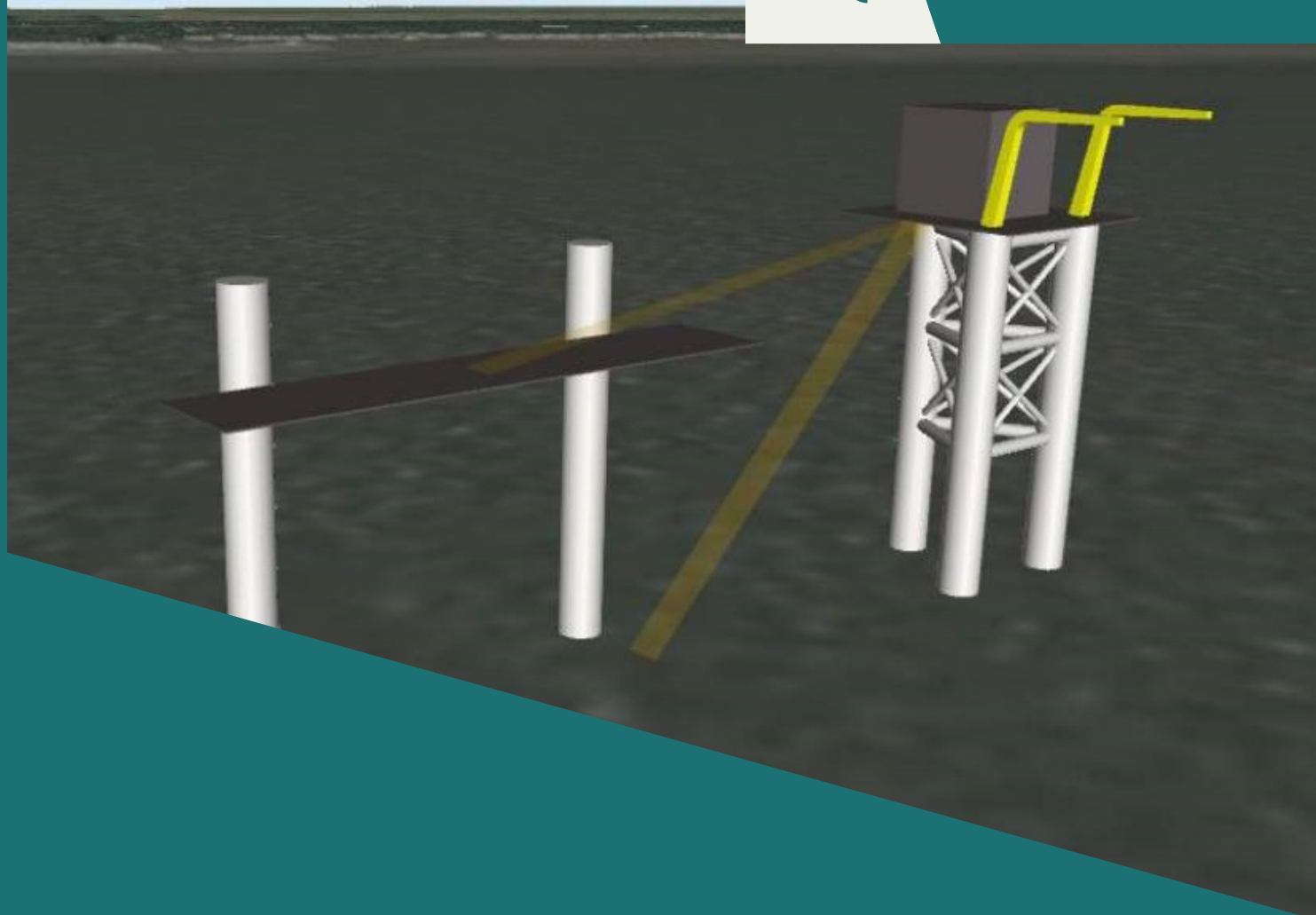




Vlaanderen
is wetenschap



20_037_1
WL rapporten

Beneden-Zeeschelde – Prosperpolder

Kracht op buispalen van het toekomstige meetplatform

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

Beneden-Zeeschelde – Prosperpolder

Kracht op buispalen van het toekomstige meetplatform

Verelst, K.; Chu, K.; De Mulder, T.; Vanlede, J.

Juridische kennisgeving

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

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

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

Copyright en wijze van citeren

© Vlaamse overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Waterbouwkundig Laboratorium 2022
D/2022/3241/013

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Verelst, K.; Chu, K.; De Mulder, T.; Vanlede, J. (2022). Beneden-Zeeschelde – Prosperpolder: Kracht op buispalen van het toekomstige meetplatform. Versie 4.0. WL Rapporten, 20_037_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

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

Documentidentificatie

Opdrachtgever:	Afdeling Maritieme Toegang	Ref.:	WL2022R20_037_1
Keywords (3-5):	Pile, drag force, lift force, current		
Kennisdomeinen	Waterbouwkundige constructies > Brugpijlers > Literatuur- en desktoponderzoek Hydraulica en sediment > stroomsnelheden- en patronen > Numerieke modelleringen		
Tekst (p.):	42	Bijlagen (p.):	2
Vertrouwelijk:	☒ Nee	☒ Online beschikbaar	

Auteur(s):	Verelst, K.; Chu, K.
------------	----------------------

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	De Mulder, T.; Vanlede, J.	Tom De Mulder (Signature) Digitally signed by Tom De Mulder (Signature) Date: 2022.02.22 12:51:48 +01'00' Getekend door:Joris Vanlede (Signature) Getekend op:2022-03-03 15:10:25 +01:0 Reden:Ik keur dit document goed <i>Joris Vanlede</i>
Projectleider:	Verelst, K.	Getekend door:Kristof Verelst (Signature) Getekend op:2022-02-23 09:09:05 +01:0 Reden:Ik keur dit document goed <i>Kristof Verelst</i>

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Bellafkih K.	Getekend door:Abdelkarim Bellafkih (Sign) Getekend op:2022-02-22 13:47:13 +01:0 Reden:Ik keur dit document goed <i>Abdelkarim Bellafkih</i>
-----------------	--------------	--



Abstract

De huidige meetpaal ter hoogte van Prosperpolder wordt in de toekomst vervangen door een nieuw meetplatform, dat zich meer in de richting van de vaargeul situeert. Het structureel ontwerp van dit meetplatform wordt uitgevoerd in opdracht van afdeling Maritieme Toegang. Het meetplatform wordt hierbij ondersteund door 3 buispalen. De 3 buispalen worden aan elkaar verbonden met behulp van een frame. Voor het ontwerp van deze buispalen en het meetplatform zijn ook gegevens nodig met betrekking tot de krachten op de buispalen ten gevolge van de stroming. Daartoe is een literatuurstudie uitgevoerd.

Voor de bepaling van de kracht op de buispalen van het meetplatform zijn twee oriëntaties beschouwd. Enerzijds is de oriëntatie beschouwd waarbij de tophoek van de gelijkzijdige driehoek tegen de vloedstroming in gericht is, anderzijds is de oriëntatie beschouwd waarbij de basis van de gelijkzijdige driehoek tegen de vloedstroming in gericht is. Bij deze configuraties worden eerder beperkte verschillen in sleepcoëfficiënten op de buispalen geraamd. Bij de configuratie met de basis van de driehoek tegen de vloedstroming in gericht is er enige onzekerheid betreffende de richting van de liftkrachten op de buispalen ter plaatse van de basis van de driehoek. Omwille van deze onzekerheid gaat de voorkeur uit naar de configuratie waarbij de tophoek van de driehoek tegen de vloedstroming in gericht is.

Voor het bepalen van de kracht op de buispalen van het meetplatform zijn de stroomsnelheden, waterdieptes, de sleepcoëfficiënt en de liftcoëfficiënt voor een cilindervormige paal in een stroming bepaald. Hierbij zijn een aantal onzekerheden vastgesteld. De waarden voor de sleep- en de liftcoëfficiënt voor een groep van 3 palen in de vorm van een gelijkzijdige driehoek in de stroming, die in de literatuur zijn teruggevonden, zijn voornamelijk afgeleid op basis van windtunnelproeven met cilinders in een uniforme stroming. Deze proeven zijn meestal uitgevoerd voor lagere Reynoldsgetallen van de stroming, lagere turbulentie-intensiteiten van de stroming en gladde palen in plaats van palen met een zekere ruwheid.

Om rekening te houden met deze onzekerheden bij het structureel ontwerp is voor de bepaling van de sleepkracht van één enkele buispaal in de stroming een waarde van de sleepcoëfficiënt voorgesteld in de range 0.6 à 1.2 en wordt dezelfde range als pragmatische oplossing voorgesteld voor één buispaal uit de palengroep. Hierbij wordt opgemerkt dat, indien men voor elk van de 3 palen een identieke sleepcoëfficiënt van 1.2 hanteert, de totale kracht op de palengroep wordt overschat, maar dat een identieke coëfficiënt van 0.9 wel een meer realistische bovengrens is.

Voor de berekening van de liftkrachten op één geïsoleerde paal wordt voorgesteld om de liftkracht op een individuele paal niet mee te nemen. Voor de bepaling van de liftkracht op de afzonderlijke buispalen van het meetplatform wordt een onderscheid gemaakt tussen de stroming bij vloed en de stroming bij eb. Voor de buispaal ter plaatse van de tophoek van de driehoek wordt zowel bij vloed als bij eb een waarde 0.10 voor de liftcoëfficiënt beschouwd. Het teken van de liftkracht op deze buispaal kan zowel negatief als positief van teken zijn. Voor de buispalen ter plaatse van de basis wordt bij vloed voor de liftcoëfficiënt een waarde beschouwd die varieert van 0.10 tot 0.30 en die exceptioneel 0.60 kan bedragen. De liftkrachten op deze beide buispalen staan naar elkaar toe gericht. Bij eb wordt voor de buispalen ter plaatse van de basis voor de liftcoëfficiënt een waarde beschouwd die varieert tussen 0.10 en 0.30. Het teken van de liftkracht kan hierbij zowel positief als negatief zijn.

Aan de hand van de waarden van de sleepcoëfficiënt en de liftcoëfficiënt is de sleepkracht en de liftkracht op de buispalen van het meetplatform begroot.

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de tabellen.....	VI
Lijst van de figuren	VII
1 Inleiding	1
2 Gegevens meetplatform.....	3
3 Stroomsnelheden in Schelde ter hoogte van meetplatform.....	4
3.1 Stroomsnelheid in normale toestand.....	4
3.2 Stroomsnelheid in extreme toestand.....	9
4 Inschatting kracht op buispalen meetplatform.....	11
4.1 Algemeen.....	11
4.2 Krachten op één geïsoleerde paal in een stroming.....	13
4.3 Kracht op een paal uit een groep van 3 palen in een stroming	17
4.3.1 Algemeen.....	17
4.3.2 Literatuuronderzoek.....	18
4.3.3 Inschatting sleep- en lift krachten op de buispalen van de palengroep.	28
4.4 Variatie van stroomsnelheid over waterdiepte.....	32
5 Conclusies	37
6 Referenties	41
7 Bijlage 1 Tabellen.....	B1

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Karakteristieke waterpeilen [m TAW] voor hoogwater en laagwater te Prosperpolder en Antwerpen	5
Tabel 2 – Dieptegemiddelde stroomsnelheid en waterpeil in de normale toestand	6
Tabel 3 – Stroomsnelheid en waterpeil in extreme toestand	10
Tabel 4 - Kinematische viscositeit van water	12
Tabel 5 – Bepaling waarde invloedsparameters sleepcoëfficiënt	15
Tabel 6 – Berekening sleepkracht per eenheidslengte op één buispaal in normale toestand en extreme toestand.....	16
Tabel 7 – Literatuur met betrekking tot krachten op een groep van 3 palen in een stroming.....	19
Tabel 8 – Waarde van sleepcoëfficiënt C_D (-)	25
Tabel 9 – Conversietabel voor aflezen waarden voor sleep- en liftcoëfficiënt	26
Tabel 10 – Gemiddelde en maximale waarde van de sleepcoëfficiënt voor een paal uit beide configuraties van de palengroep.....	26
Tabel 11 – Sleepcoëfficiënt op buispaal A, B en C voor beide configuraties van de palengroep.....	27
Tabel 12 – Liftcoëfficiënt op buispaal A, B en C voor beide configuraties van de palengroep	27
Tabel 13 – Berekening sleepkracht per eenheidslengte op één buispaal in palengroep in normale toestand en extreme toestand	30
Tabel 14 – Berekening liftkracht per eenheidslengte op buispaal in palengroep tijdens vloed in normale toestand en extreme toestand	31
Tabel 15 – Berekening liftkracht per eenheidslengte op buispaal in palengroep tijdens eb in normale toestand en extreme toestand	31
Tabel 16 – Verhogingsfactoren op totale sleepkracht en moment ten opzichte van de paalvoet	33
Tabel 17 – Sleepkracht op een geïsoleerde paal en een paal in een groep van 3 palen tijdens vloed en eb in normale en extreme toestand.....	39
Tabel 18 – Liftkracht per eenheidslengte op buispaal in palengroep tijdens vloed in normale toestand en extreme toestand	40
Tabel 19 – Liftkracht per eenheidslengte op buispaal in palengroep tijdens eb in normale toestand en extreme toestand.....	40
Tabel 20 – Sleepcoëfficiënt C_d voor een paal in een groep van 3 palen	B1
Tabel 21 – Liftcoëfficiënt C_L voor een paal in een groep van 3 palen	B2

Lijst van de figuren

Figuur 1 – Situering meetplatform	1
Figuur 2 – Situering nieuw meetplatform Prosperpolder in dwarsprofiel Schelde.....	3
Figuur 3 – Principeschets buispalen meetplatform en locatie losse buispalen	3
Figuur 4 – Locatie meetplatform en raai voor bepaling stroomsnelheden.	4
Figuur 5 – Variatie in de tijd van dieptegemiddelde stroomsnelheid en stroomrichting ter plaatse van het meetplatform	6
Figuur 6 – Geselecteerd getij voor grafische voorstelling stroomsnelheden in raai ter plaatse van nieuwe meetplatform	7
Figuur 7 – Stromingspatroon in Schelde ter hoogte van de meetlocatie tijdens maximum vloed en maximum eb.	7
Figuur 8 – Variatie van de dieptegemiddelde stroomsnelheid over de raai ter hoogte van de meetlocatie op het tijdstip van maximum vloed en op het tijdstip van maximum eb.....	8
Figuur 9 – Sectiegemiddelde stroomsnelheid voor raai ter plaatse van meetplatform	9
Figuur 10 – Variatie van de rms-waarde van de sleepcoëfficiënt C_D en de rms-waarde van de liftcoëfficiënt C_L in functie van het Reynoldsgetal	13
Figuur 11 – Variatie van de sleepcoëfficiënt in functie van Reynoldsgetal, invloed van oppervlakteruwheid en turbulentie.....	14
Figuur 12 – Beschouwde oriëntaties voor bepaling oriëntatie meetplatform.....	18
Figuur 13 – Sleepcoëfficiënt C_D en liftcoëfficiënt C_L voor een paal in een groep van 3 palen.....	20
Figuur 14 – Sleepcoëfficiënt C_D en liftcoëfficiënt C_L voor een paal in een groep van 3 palen.....	21
Figuur 15 – Sleepcoëfficiënt C_D en liftcoëfficiënt C_L voor een paal in een groep van 3 palen in de stroming	22
Figuur 16 – Sleepcoëfficiënt C_D en liftcoëfficiënt C_L voor een paal in een groep van 3 palen in de stroming	23
Figuur 17 – Naamgeving parameters voor 3 buispalen in een stroming	24
Figuur 18 – Locatie raaien uit IMDC NV <i>et al.</i> , (2005).....	34
Figuur 19 – Stroomsnelheid tijdens maximum vloed en maximum eb.....	34
Figuur 20 – Situering punt 1 en punt 2 in de raai van de meetcampagne	35
Figuur 21 – Verticale variatie van de stroomsnelheid in punt 1 en punt 2 tijdens maximum vloed en maximum eb.....	36
Figuur 22 – Beschouwde oriëntaties voor bepaling oriëntatie meetplatform.....	39

1 Inleiding

De meetpaal Prosperpolder situeert zich aan linkeroever in de Zeeschelde ter hoogte van de Belgisch-Nederlandse grens. In de toekomst zal de huidige meetpaal vervangen worden door een nieuw meetplatform, dat zich ca. 300 m meer in de richting van de vaargeul situeert (zie Figuur 1).



Figuur 1 – Situering meetplatform

Het structureel ontwerp van dit meetplatform wordt uitgevoerd in opdracht van afdeling Maritieme Toegang (contactpersoon: Thomas Maes). Het meetplatform wordt hierbij ondersteund door 3 buispalen. De 3 buispalen worden aan elkaar verbonden met behulp van een frame. Voor het ontwerp van deze buispalen en het meetplatform zijn ook gegevens nodig met betrekking tot de krachten op de buispalen ten gevolge van de stroming in de Schelde. Dat is het onderwerp van dit rapport.

Hoofdstuk 2 beschrijft de afmetingen en de locatie van de buispalen van het nieuwe meetplatform. De optredende stroomsnelheden ter plaatse van het meetplatform worden beschreven in hoofdstuk 3. Hoofdstuk 4 beschrijft de inschatting van de krachten op de buispalen van het meetplatform. Hoofdstuk 5 vat de conclusies van dit rapport samen.

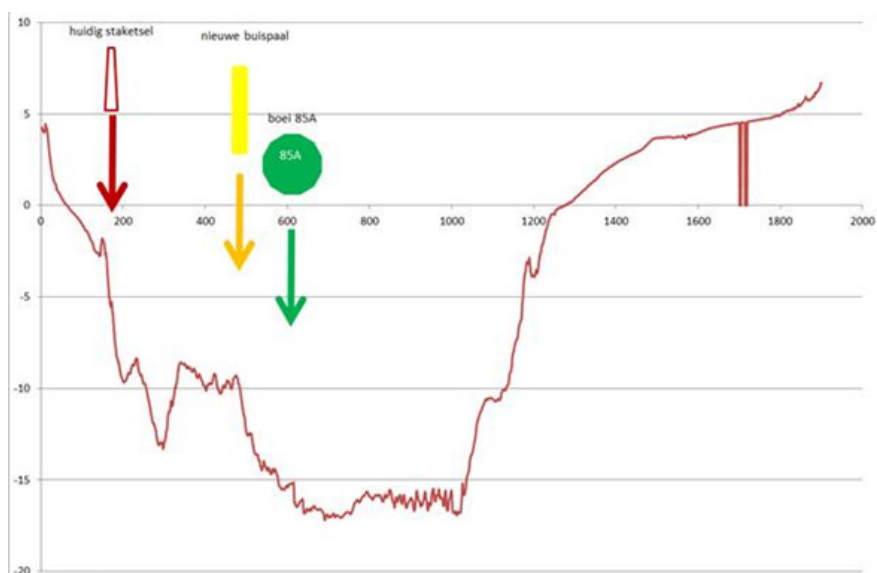
Hierbij moet het volgende opgemerkt worden:

- De kracht op de buispalen van het meetplatform ten gevolge van golven van voorbijvarende schepen behoort niet tot het onderwerp van dit advies. Ten gevolge van voorbijvarende schepen wordt ook een retourstroming gegenereerd. Gelet op de geringe blokkering die een schip vertegenwoordigt in de ruime dwarsdoorsnede, zijn de stroomsnelheden van deze retourstroming beduidend lager dan de stroomsnelheden ten gevolge van de stroming in de Schelde. Om die reden wordt de stroomsnelheid ten gevolge van retourstroming van scheepvaart in dit rapport niet beschouwd.

- Ten gevolge van de stroming zal er rond een buispaal of een groep van buispalen mogelijk erosie ontstaan, indien er voor wordt geopteerd om geen bodembescherming aan te brengen. Het inschatten van de diepte van de erosiekuil behoort niet tot het onderwerp van dit advies. Er wordt verondersteld dat de buispalen voldoende diep in de bodem worden ingeheid, zodat enige erosie toegestaan is, dewelke de stabiliteit van de buispaal niet in gedrang brengt.

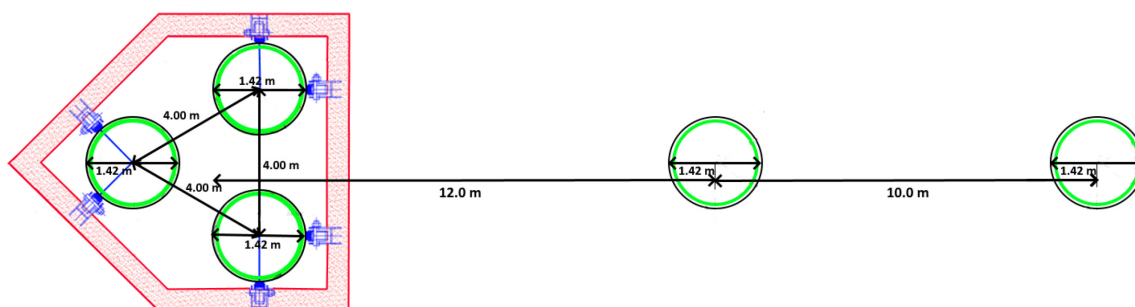
2 Gegevens meetplatform

Figuur 2 situeert het nieuwe meetplatform in het dwarsprofiel van de Schelde op deze locatie. Uit deze figuur volgt dat het nieuwe meetplatform zich bevindt op een locatie waar de bodemdiepte -9.45 m TAW bedraagt.



Figuur 2 – Situering nieuw meetplatform Prosperpolder in dwarsprofiel Schelde

Figuur 3 geeft een principeschets van de afmetingen en de tussenafstand van de buispalen van het meetplatform. De buispalen van het meetplatform, met diameter 1.42 m en hart-op-hart 4.0 m van elkaar verwijderd in de vorm van een gelijkzijdige driehoek, worden onderling verbonden aan elkaar. Rond de buispalen is een vijfhoekige balk aanwezig, waaraan het eigenlijke meetplatform bevestigd wordt. Hierbij wordt opgemerkt dat dit een principeschets betreft om de diameter van de buispalen en de tussenafstand aan te duiden. In hoofdstuk 4 wordt de oriëntatie van de buispalen van het meetplatform meer in detail behandeld. Opwaarts of afwaarts van het meetplatform (afhankelijk van de oriëntatie van de buispalen) bevinden zich nog twee losse buispalen. Aan deze losse buispalen wordt een ponton bevestigd. Op dit ponton wordt een trap aangebracht naar het nieuwe meetplatform. Om rekening te houden met het getij kan deze trap over het ponton rijden. Het ponton is bijgevolg niet vast verbonden aan het meetplatform.



Figuur 3 – Principeschets buispalen meetplatform en locatie losse buispalen

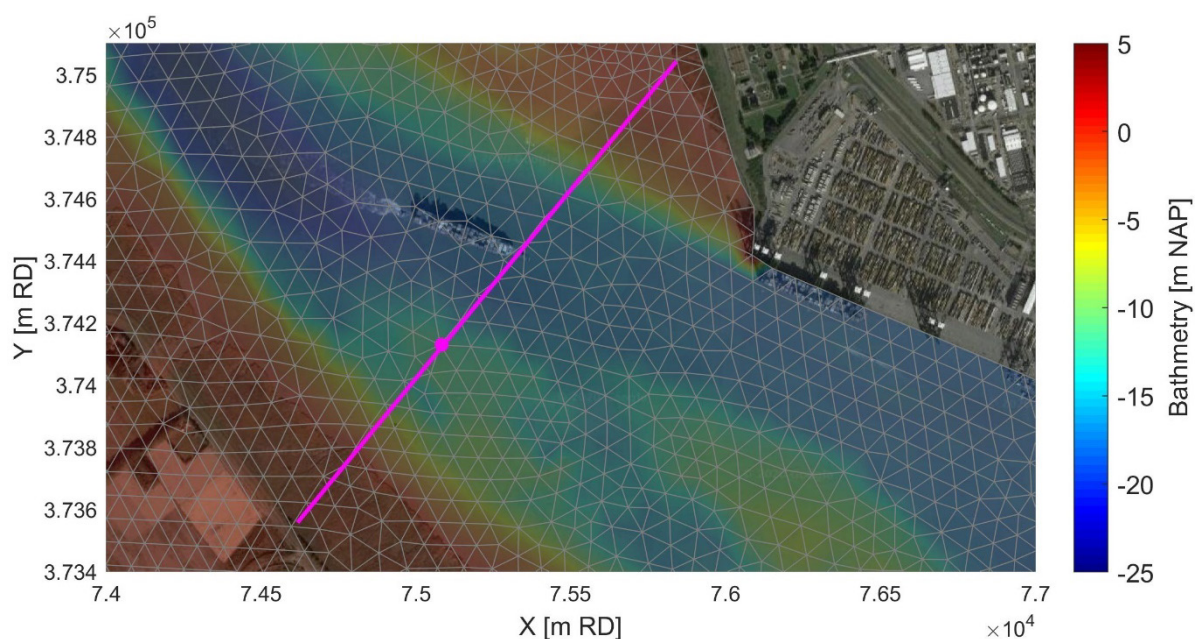
3 Stroomsnelheden in Schelde ter hoogte van meetplatform

Aan WL is gevraagd om een inschatting van de kracht op de buispalen uit te voeren zowel voor de stroming in de Schelde in de normale toestand (paragraaf 3.1) als voor de stroming in de Schelde in de extreme toestand (paragraaf 3.2).

3.1 Stroomsnelheid in normale toestand

De stroomsnelheid ter plaatse van het meetplatform in de normale toestand is berekend met het 3D Scaldis-model van de Schelde van WL (Chu *et al.*, 2017). Dit model is gevalideerd op basis van waterstanden, stationaire stroomsnelheidsmetingen, stroomsnelheidsmetingen met ADCP gemeten tijdens meetvaarten, en debieten door een aantal raaien.

Figuur 4 toont de locatie van het meetplatform en de raai die beschouwd is om de stroomsnelheid ter plaatse van de meetlocatie te bepalen. Het bodempeil ter plaatse van de meetlocatie bedraagt -11.80 m NAP of -9.45 m TAW.



Figuur 4 – Locatie meetplatform en raai voor bepaling stroomsnelheden.

De stroomsnelheden zijn berekend voor een springtij-doodtij cyclus van 30/08/2015 00:00 tot 13/09/2015 00:00. De variatie van de dieptegemiddelde stroomsnelheid in de tijd ter plaatse van het meetplatform is voor deze periode grafisch voorgesteld in Figuur 5. Tijdens deze periode bedroeg de maximale dieptegemiddelde stroomsnelheid bij vloed 1.35 m/s en de maximale dieptegemiddelde stroomsnelheid bij eb 0.71 m/s. De stroomrichting bij maximum vloed bedraagt (gemeten in wijzerzin) ca. 125° ten opzichte van het Noorden en bij maximum eb ca. 306° ten opzichte van het Noorden. De beide richtingen verschillen 180° van elkaar. Zowel gedurende eb als gedurende vloed wordt een variatie van de

stroomrichting met 5° à 10° vastgesteld. Het omkeren van de stroomrichting bij kentering gebeurt relatief plots gedurende een korte tijdsspanne.

Voor één springtij uit deze springtij-doodtij cyclus (voorgesteld in Figuur 6) wordt in Figuur 7 een voorstelling gegeven van de dieptegemiddelde stroomsnelheden tijdens maximum vloed en maximum eb. Voor dit springtij bedraagt het hoogwater te Antwerpen +3.74 m NAP (+6.09 m TAW) en het laagwater -2.33 m NAP (+0.02 m TAW). Worden deze waarden vergeleken met de karakteristieke waterpeilen voor hoogwater en laagwater te Antwerpen uit Tabel 1, dan volgt hieruit dat dit getij een iets hoger dan gemiddeld springtij betreft. Het hoogwater bevindt zich tussen gemiddeld hoogwater bij springtij en het hoogwater met onderschrijdingsfrequentie van 99 % in de periode 2011-2015. Het overeenkomstige tijdstip en peil van maximum vloed te Antwerpen is 1 uur voor hoogwater (01/09/2015 04:00) en +2.24 m NAP (dus +4.59 m TAW), terwijl het tijdstip en peil van maximum eb te Antwerpen 3.5 uur na hoogwater (01/09/2015 08:30) is en ca. +0.71 m NAP (dus +3.06 m TAW). Hierbij wordt opgemerkt dat hier vergeleken wordt met het hoogwater en laagwater te Antwerpen, aangezien deze beschouwd zijn voor de selectie van het springtij uit de springtij-doodtij cyclus. Ter vergelijking zijn in Tabel 1 ook de karakteristieke peilen voor hoogwater en laagwater te Prosperpolder gegeven.

Tabel 1 – Karakteristieke waterpeilen [m TAW] voor hoogwater en laagwater te Prosperpolder en Antwerpen

	Prosperpolder			Antwerpen		
	2011-2015	2001-2010	1991-2000	2011-2015	2001-2010	1991-2000
Hoogste hoogwater	+7.07	+6.92	+7.39	+7.30	+7.08	+7.53
99 ^e percentiel	+6.02	+6.15	ca. +6.15	+6.18	+6.35	ca. +6.35
Gemiddeld hoogwater springtij	+5.53	+5.57	+5.55	+5.70	+5.75	+5.72
1 ^e percentiel	+3.97	+3.97	ca. +4.05	+4.14	+4.19	ca. +4.25
Laagste hoogwater	+3.40	+3.57	+3.27	+3.60	+3.63	+3.53
Hoogste laagwater	+2.42	+3.10	+2.29	+2.28	+3.05	+2.21
99 ^e percentiel	+1.46	+1.23	ca. +1.25	+1.32	+1.18	ca. +1.25
Gemiddeld laagwater springtij	-0.23	-0.15	-0.16	-0.29	-0.19	-0.23
1 ^e percentiel	-0.61	-0.63	ca. -0.65	-0.80	-0.66	ca. -0.75
Laagste laagwater	-1.24	-1.21	-1.20	-1.38	-1.24	-1.20

Bron: Hertoghs *et al.*, (2018); Taverniers & Mostaert, (2009); Vanlierde *et al.*, (2016)

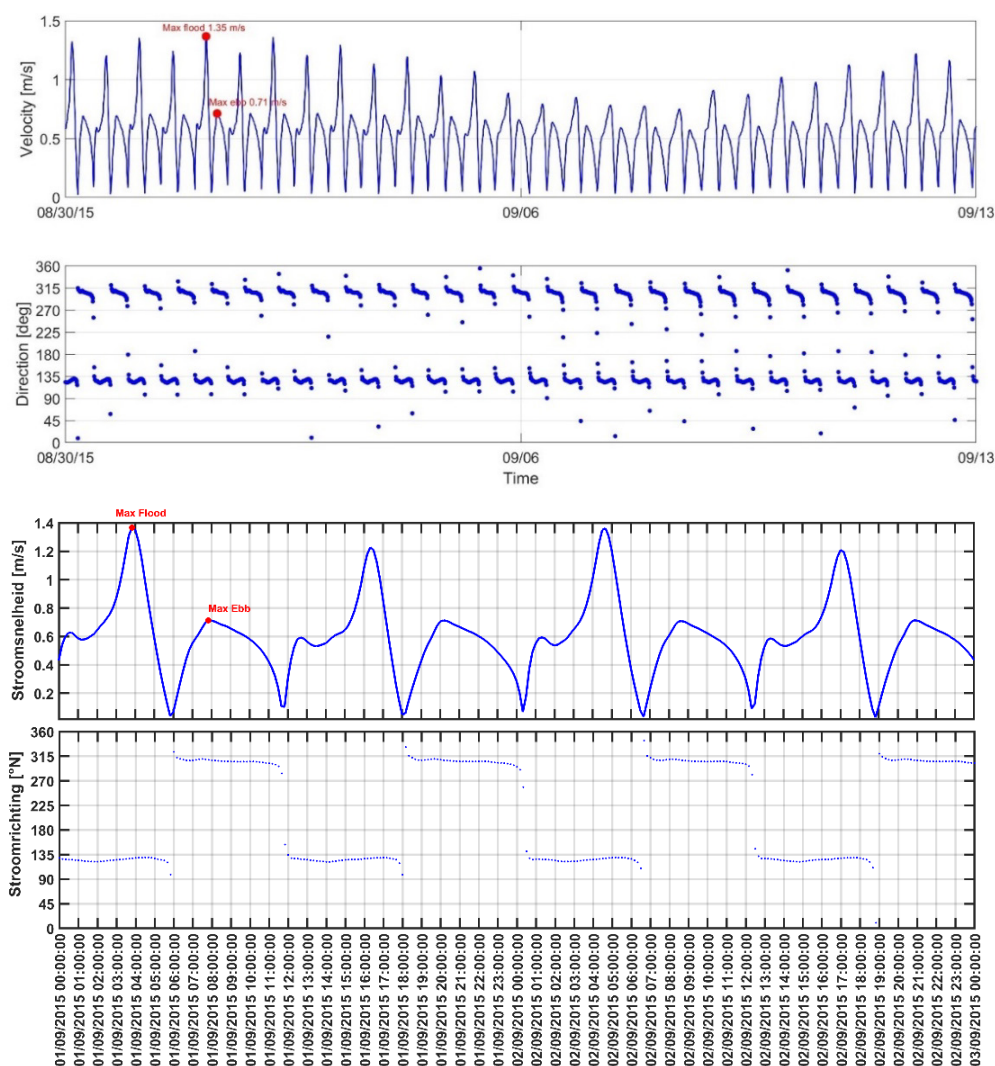
Figuur 8 toont de laterale variatie van de berekende dieptegemiddelde stroomsnelheid over de raai ter hoogte van het nieuwe meetplatform voor het tijdstip van maximum vloed en het tijdstip van maximum eb. Uit deze figuur volgt dat bij maximum vloed de maximale stroomsnelheid van 1.35 m/s zich voordoet ter hoogte van de meetlocatie. De maximale stroomsnelheid van 0.83 m/s bij maximum eb doet zich meer naar het midden van de vaargeul voor. Ter plaatse van het meetplatform doet zich bij maximum eb een enigszins lagere stroomsnelheid voor. Conservatief worden voor dit advies ter plaatse van de meetlocatie zowel de maximale stroomsnelheid bij vloed als de maximale stroomsnelheid bij eb die zich voordoen in de raai beschouwd.

Wat de waterstand in de normale toestand betreft, wordt de waterstand te Prosperpolder uit het 3D Scaldis-model beschouwd bij maximum vloed (1 uur voor hoogwater te Prosperpolder) en bij maximum eb (3.5 uur na hoogwater te Prosperpolder). Op deze wijze wordt bij maximum vloed een waterstand van +2.62 m NAP (= +4.97 m TAW) beschouwd en bij maximum eb een waterstand van +0.53 m NAP (+2.88 m TAW).

Tabel 2 geeft een overzicht van de beschouwde waarden voor waterpeil en dieptegemiddelde stroomsnelheid ter hoogte van het meetplatform in de normale toestand.

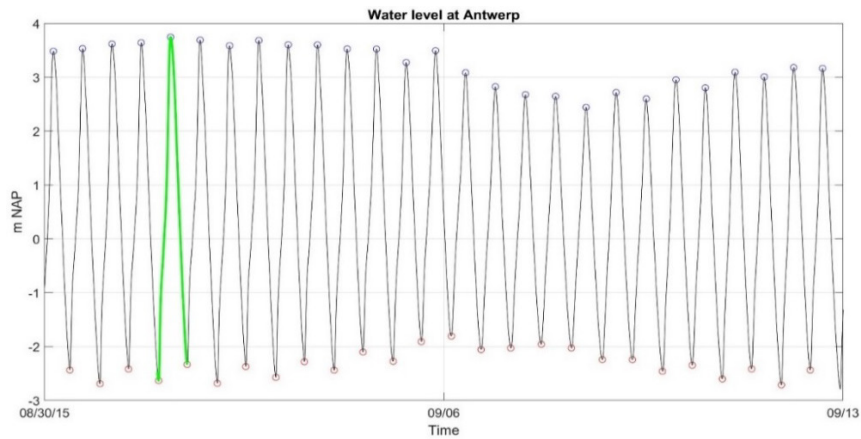
Tabel 2 – Dieptegemiddelde stroomsnelheid en waterpeil in de normale toestand

	Vloed	Eb
Maximale stroomsnelheid	1.35 m/s	0.83 m/s
Waterpeil te Prosperpolder	+4.97 m TAW	+2.88 m TAW

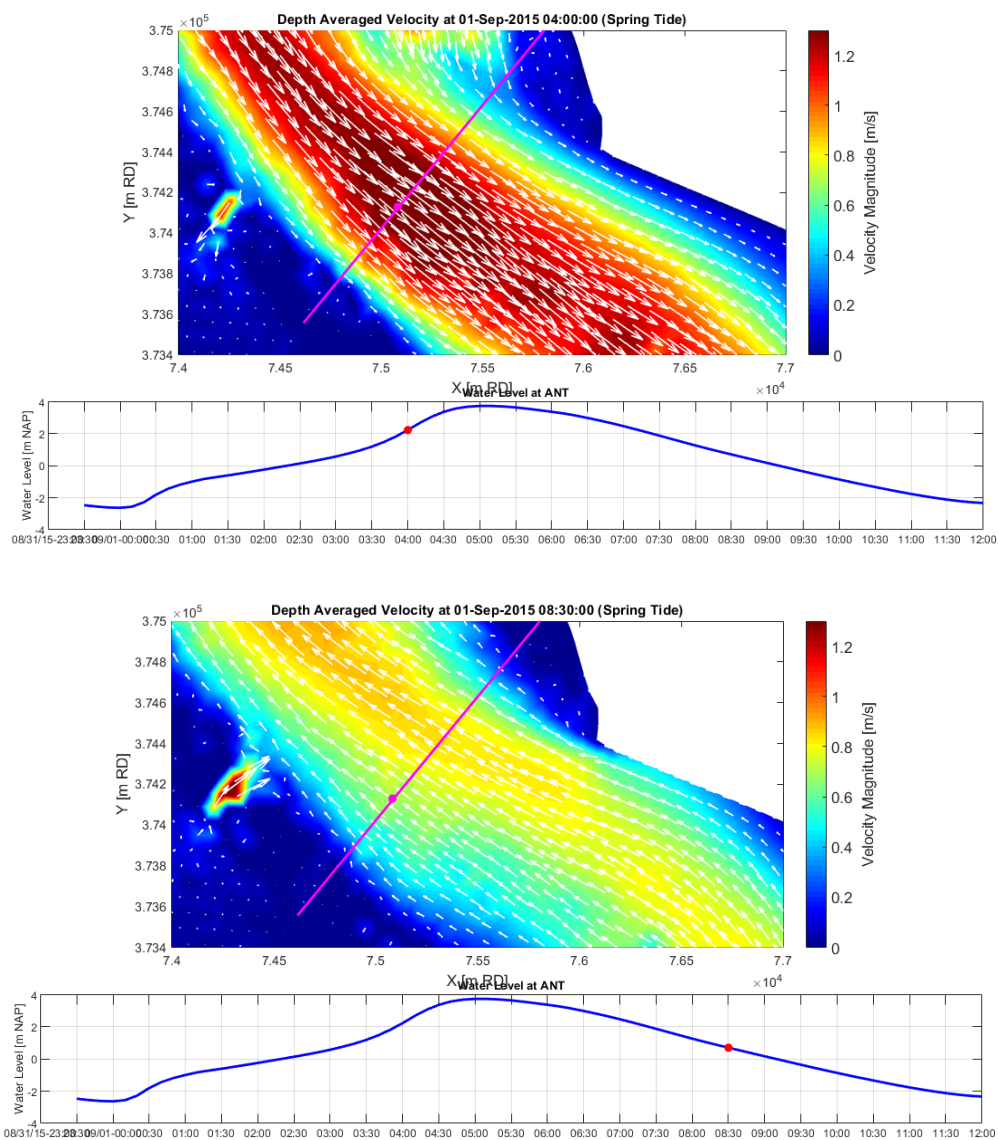


Boven: volledige periode 30/08/2015 – 13/09/2015; onder: detail voor periode 01/09/2015 – 03/09/2015

Figuur 5 – Variatie in de tijd van dieptegemiddelde stroomsnelheid en stroomrichting ter plaatse van het meetplatform

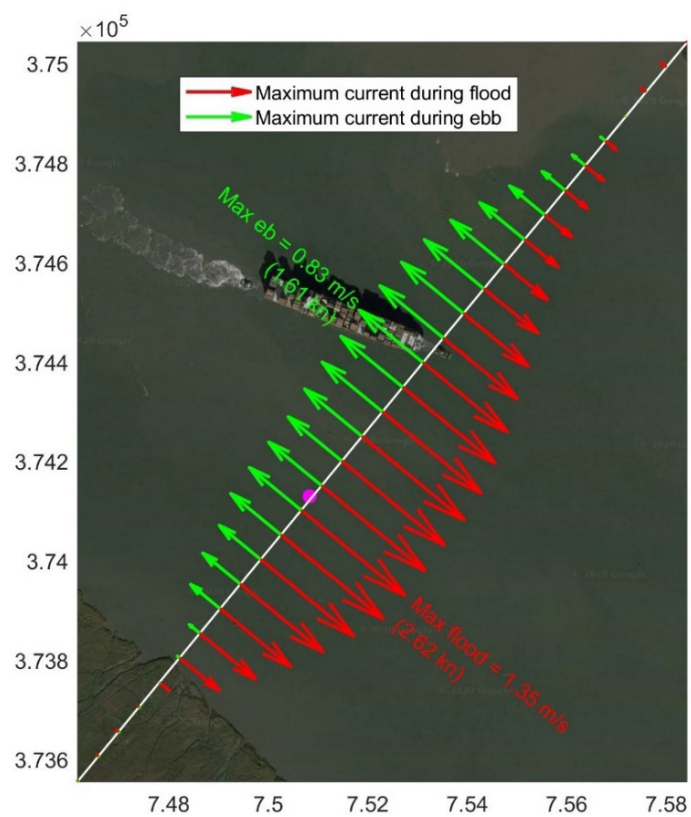


Figuur 6 – Geselecteerd getij voor grafische voorstelling stroomsnelheden in raai ter plaatse van nieuwe meetplatform



Boven: maximum vloed: onder: maximum eb.

Figuur 7 – Stromingspatroon in Schelde ter hoogte van de meetlocatie tijdens maximum vloed en maximum eb.

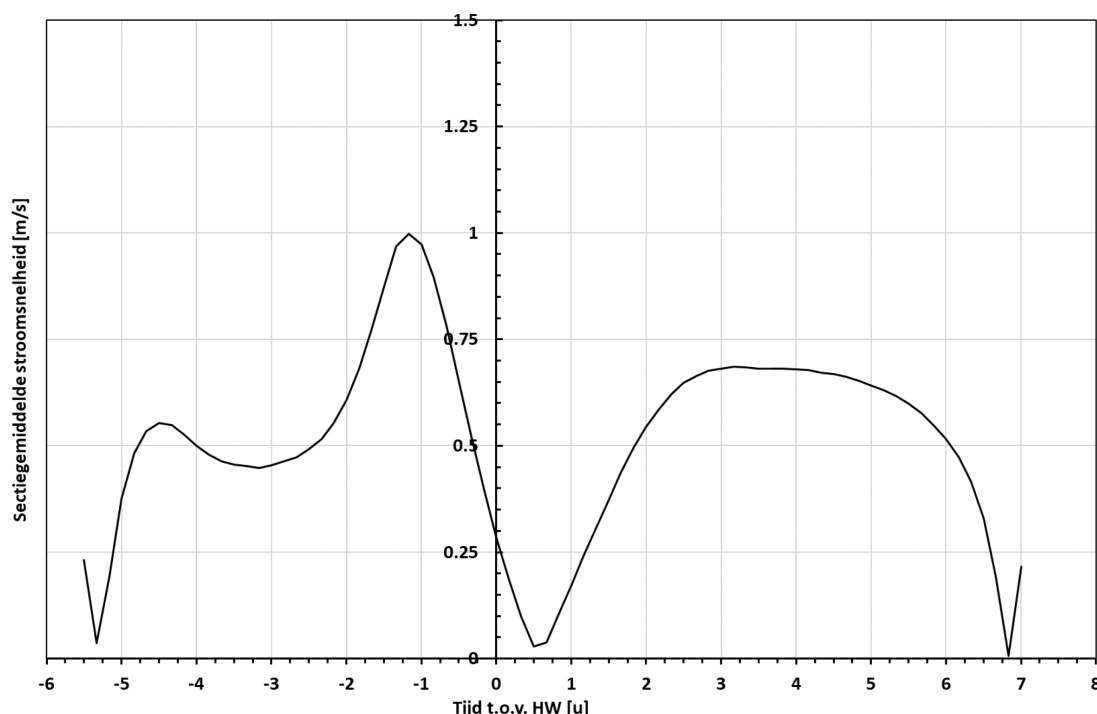


Figuur 8 – Variatie van de dieptegemiddelde stroomsnelheid over de raai ter hoogte van de meetlocatie op het tijdstip van maximum vloed en op het tijdstip van maximum eb.

3.2 Stroomsnelheid in extreme toestand

In het kader van het Sigmaplan vermelden Peeters *et al.* (2009) dat ter hoogte van Prosperpolder een veiligheid en bescherming dient geboden te worden tot een terugkeerperiode hoger dan 10000 jaar. Voor dimensionering wordt hierbij rekening gehouden met een maximale waterstand op de Schelde van + 9.00 m TAW en een sectiegemiddelde stroomsnelheid van 2.5 m/s (onafhankelijk van het getij).

Figuur 9 toont voor de raai ter plaatse van het nieuwe meetplatform de variatie in de tijd van de sectiegemiddelde stroomsnelheid berekend met het 3D Scaldis-model van de Schelde van WL. Uit deze figuur volgt voor het tijdstip van maximum eb (3.5 uur na hoogwater) een sectiegemiddelde stroomsnelheid gelijk aan 0.68 m/s en voor het tijdstip van maximum vloed (1 uur voor hoogwater) een sectiegemiddelde stroomsnelheid van 1.00 m/s. In paragraaf 3.1 werd met het 3D Scaldis-model van WL een dieptegemiddelde stroomsnelheid van 0.83 m/s bij maximum eb en 1.35 m/s bij maximum vloed berekend ter plaatse van het nieuwe meetplatform. Deze dieptegemiddelde stroomsnelheden zijn respectievelijk 22 % en 35 % groter dan de overeenkomstige maximale sectiegemiddelde waarden van 0.68 m/s en 1.00 m/s uit Figuur 9.



Figuur 9 – Sectiegemiddelde stroomsnelheid voor raai ter plaatse van meetplatform

Op basis van de bovenstaande analyse van de dieptegemiddelde stroomsnelheid ter plaatse van het meetplatform en de sectiegemiddelde stroomsnelheid voor de beschouwde raai bij springtij wordt de maximale sectiegemiddelde stroomsnelheid van 2.5 m/s uit het Sigmaplan omgerekend naar een dieptegemiddelde stroomsnelheid. Dit kan mogelijk leiden tot een overschatting van de stroomsnelheid aangezien de maximale waarde van 2.5 m/s bepaald is voor een groter gedeelte van de Schelde. Deze berekening geeft aanleiding tot een dieptegemiddelde stroomsnelheid van 3.38 m/s ($= 2.5 \text{ m/s} \times 1.35$) bij maximum vloed en een dieptegemiddelde stroomsnelheid van 3.05 m/s ($= 2.5 \text{ m/s} \times 1.22$) bij maximum eb.

Deze stroomsnelheden worden toegepast voor de bepaling van de kracht op de buispalen van het meetplatform in de extreme toestand. Ter vergelijking wordt zowel bij vloed als bij eb ook een stroomsnelheid gelijk aan 2.5 m/s toegepast.

Wat de waterdiepte betreft, wordt voor maximum vloed het maximale waterpeil van +9.00 m TAW uit het Sigmaplan beschouwd, voor maximum eb wordt als waterpeil het hoogste laagwater bij springtij te Prosperpolder beschouwd (+2.42 m TAW; zie Tabel 1 in paragraaf 3.1). Tabel 3 geeft een overzicht van de voor de bepaling van de krachten op de buispalen beschouwde stroomsnelheden en waterpeilen in de extreme toestand.

Tabel 3 – Stroomsnelheid en waterpeil in extreme toestand

	Vloed		Eb	
Maximale stroomsnelheid	3.38 m/s	2.50 m/s	3.05 m/s	2.50 m/s
Waterpeil te Prosperpolder	+9.00 m TAW	+9.00 m TAW	+2.42 m TAW	+2.42 m TAW

4 Inschatting kracht op buispalen meetplatform

4.1 Algemeen

Een voorwerp dat in een stroming wordt geplaatst, ondergaat een krachtscomponent in de stroomrichting, i.e. de sleepkracht F_D . Daarnaast kan ook loodrecht op de stroomrichting een krachtscomponent ontstaan, i.e. de liftkracht F_L . Hierbij wordt opgemerkt dat deze krachten fluctueren in de tijd ten gevolge van turbulente fluctuaties van de stroming. Voor dit advies wordt enkel een inschatting van de (tijds)gemiddelde krachten beoogd.

De amplitude van deze (tijdsgemiddelde) krachten wordt meestal berekend aan de hand van de volgende formulering:

$$F_D = C_D A \frac{\rho U^2}{2}$$

$$F_L = C_L A \frac{\rho U^2}{2}$$

Met:

-	F_D	Sleepkracht	[N]
-	C_D	Sleepcoëfficiënt	[-]
-	A	Aangestroomde oppervlakte	[m ²]
-	ρ	Dichtheid van water	[kg/m ³]
-	U	Aanstroomsnelheid	[m/s]
-	F_L	Liftkracht	[N]
-	C_L	Liftcoëfficiënt	[-]

Hierin zijn zowel C_D als C_L empirische coëfficiënten, waarvan er waarden in de literatuur te vinden zijn voor bepaalde vormen van (volledig) ondergedompelde voorwerpen. Deze coëfficiënten zijn meestal een functie van het (karakteristiek) Reynolds getal van de stroming, de oppervlakteruwheid van de paal, de turbulentie-intensiteit van de stroming. Door interferentie met andere voorwerpen in de omgeving (vb: een wand of andere palen) kan de krachtswerking sterk worden beïnvloed.

Paragraaf 4.2 beschrijft de berekening van de kracht op één enkele buispaal in een stroming. De inschatting van de kracht op een paal uit een groep van drie palen wordt beschreven in paragraaf 4.3.

Hierbij wordt opgemerkt dat in hoofdstuk 3 enkel de dieptegemiddelde stroomsnelheid berekend is. Het gebruiken van deze stroomsnelheid om de kracht op de buispaal te bepalen geeft bijgevolg aanleiding tot een gemiddelde waarde van de kracht op de buispaal. Het is mogelijk dat op bepaalde hoogtes boven de bodem lokaal hogere stroomsnelheden en bijgevolg hogere krachten voorkomen. Daarnaast wordt opgemerkt dat in de volgende paragrafen enkel de kracht op de buispaal per eenheidslengte zal berekend worden. In paragraaf 4.4 wordt dieper ingegaan op de variatie van de stroomsnelheid over de waterdiepte.

In dit hoofdstuk wordt het Reynoldsgetal Re van de stroming berekend als UD/ν , met U [m] de stroomsnelheid, D [m] is een karakteristieke lengteschaal in dit geval de diameter van de buispaal, en ν [m²/s] de kinematische viscositeit van water. Tabel 4 geeft een overzicht van de variatie van de waarde van de kinematische viscositeit van zuiver water en zout water in functie van de temperatuur. Voor dit advies wordt de waarde van de kinematische viscositeit van zout water bij 10° beschouwd ($= 1.37 \cdot 10^{-6}$ m²/s).

Tabel 4 - Kinematische viscositeit van water

	zuiver	zout
T [°C]	ν [m ² /s]	ν [m ² /s]
2	1.63E-06	1.72E-06
6	1.46E-06	1.53E-06
10	1.30E-06	1.37E-06
14	1.17E-06	1.22E-06
18	1.05E-06	1.10E-06
22	9.57E-07	9.93E-07

4.2 Krachten op één geïsoleerde paal in een stroming

De sleepkracht per eenheidslengte op een buispaal of een cilinder in een stroming wordt gegeven door (Mutlu Sumer & Fredsoe, 2006; Naudascher, 1991):

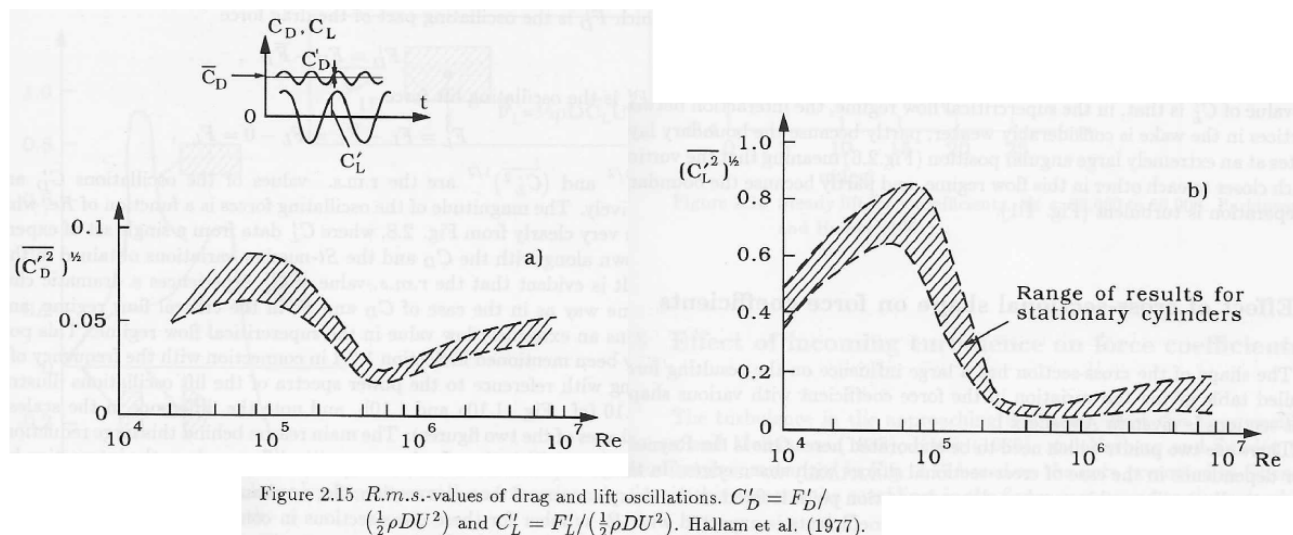
$$F'_D = C_D D \frac{\rho U^2}{2}$$

Met:

-	F'_D	Sleepkracht per eenheidslengte	[N/m]
-	C_D	Sleepcoëfficiënt	[-]
-	D	Diameter van de buispaal/cilinder	[m]
-	ρ	Dichtheid van water	[kg/m ³]
-	U	Aanstroomsnelheid	[m/s]

De sleepcoëfficiënt is een functie van het Reynoldsgetal Re van de stroming. Daarnaast wordt de sleepcoëfficiënt beïnvloed door de relatieve wandruwheid van de cilinder, de turbulentie van de stroming, de nabijheid van een wand of andere cilinders en de lengte van de cilinder. Figuur 11 geeft een overzicht van de variatie van de sleepcoëfficiënt in functie van het Reynoldsgetal, de invloed van de wandruwheid, en de turbulentie-intensiteit op de sleepcoëfficiënt. Hierbij wordt opgemerkt dat de invloed van de nabijheid van een wand op de sleepcoëfficiënt in dit hoofdstuk niet besproken wordt, aangezien het meetplatform zich in de Schelde bevindt, waar wanden of oevers ver verwijderd zijn van het meetplatform. De invloed van de nabijheid van andere palen wordt in volgende paragraaf besproken.

Bij Figuur 11 wordt opgemerkt dat dit de tijdsgemiddelde waarden van de sleepcoëfficiënt betreffen. Omwille van het turbulente karakter van de stroming doen er zich oscillaties van de sleepcoëfficiënt voor rond deze gemiddelde waarde. De grootte van de overeenkomstige root-mean-square (rms) waarde is voorgesteld in Figuur 10.



Bron: Mutlu Sumer & Fredsoe (2006)

Figuur 10 – Variatie van de rms-waarde van de sleepcoëfficiënt C'_D en de rms-waarde van de liftcoëfficiënt C'_L in functie van het Reynoldsgetal

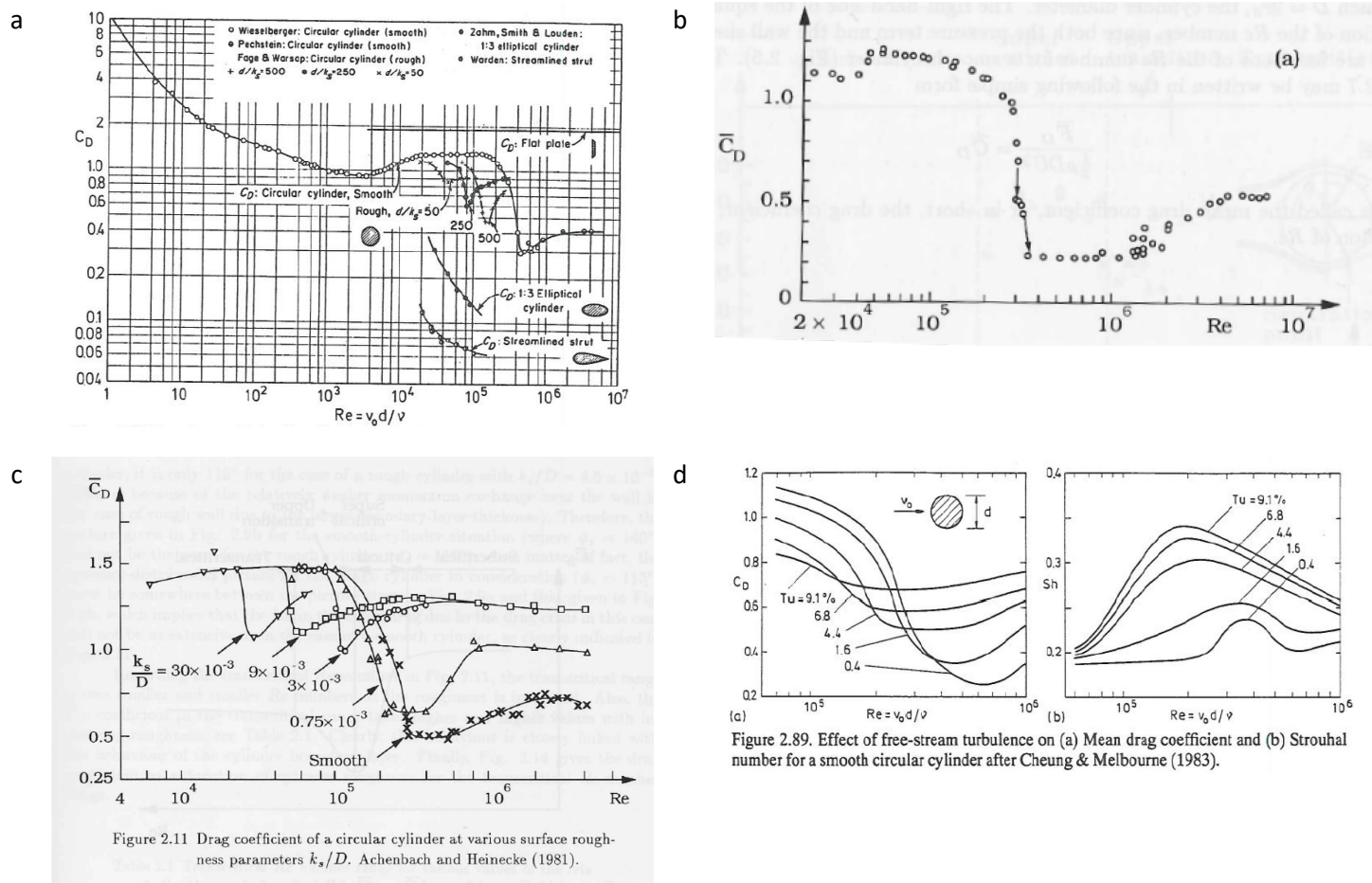


Figure 2.11 Drag coefficient of a circular cylinder at various surface roughness parameters k_s/D . Achenbach and Heinecke (1981).

Figure 2.89. Effect of free-stream turbulence on (a) Mean drag coefficient and (b) Strouhal number for a smooth circular cylinder after Cheung & Melbourne (1983).

- a: Variatie van de sleepcoëfficiënt voor een oneindig lange cilinder in functie van het Reynoldsgetal uit Naudascher (1991);
b: Variatie van de sleepcoëfficiënt voor een oneindig lange cilinder in functie van het Reynoldsgetal uit Mutlu Sumer & Fredsoe (2006);
c: Invloed van oppervlakteruwheid op de sleepcoëfficiënt (Mutlu Sumer & Fredsoe, 2006);
d: invloed van turbulentie op de sleepcoëfficiënt en het Strouhal-getal (Mutlu Sumer & Fredsoe, 2006; Naudascher, 1991).

Figuur 11 – Variatie van de sleepcoëfficiënt in functie van Reynoldsgetal, invloed van oppervlakteruwheid en turbulentie

Analoog wordt de liftkracht per eenheidslengte op een buispaal of een cilinder in een stroming gegeven door (Mutlu Sumer & Fredsoe, 2006; Naudascher, 1991):

$$F'_L = C_L D \frac{\rho U^2}{2}$$

Met:

- F'_L	Liftkracht per eenheidslengte	[N/m]
- C_L	Liftcoëfficiënt	[-]
- D	Diameter van de buispaal/cilinder	[m]
- ρ	Dichtheid van water	[kg/m ³]
- U	Aanstroomsnelheid	[m/s]

De tijdsgemiddelde waarde van de liftkracht op een cilinder in een uniforme stroming is gelijk aan nul, maar kan wel periodiek fluctueren ten gevolge van wervelafscheiding. De periode T ($= 1/f$) van deze fluctuaties is functie van het Strouhalgetal, $St = f \cdot D / U$, dat op zijn beurt functie is van het Reynoldsgetal, de wandruwheid en de turbulentie-intensiteit in de stroming. De oscillaties van de liftcoëfficiënt (uitgedrukt door de rms-waarde C'_L) kunnen ook beïnvloed worden door de nabijheid van wanden of andere buispalen.

Aangezien het meetplatform relatief ver verwijderd is van de oevers van de Schelde wordt de invloed van de wanden hier niet beschouwd. De nabijheid van andere buispalen wordt in paragraaf 4.3 besproken.

Voor de bepaling van de waarde van de sleepcoëfficiënt geeft Tabel 5 een overzicht van de waarde van de verschillende invloedsparameters. Hierbij wordt opgemerkt dat voor de viscositeit de waarde bij een temperatuur van 10° beschouwd wordt.

Wat de ruwheid betreft, wordt voor een nieuwe stalen buispaal een ruwheid $k_s = 0.001$ m verondersteld. Door “marine growth” (ook “bio fouling” genoemd) wordt aangenomen dat de ruwheidslengte kan oplopen tot $k_s \approx 0.01$ m.

Tabel 5 – Bepaling waarde invloedsparameters sleepcoëfficiënt

	Symbool	Eenheid	Normale toestand		Extreme toestand			
			Vloed	Eb	Vloed		Eb	
Stroomsnelheid	U	m/s	1.35	0.83	2.85	2.50	2.95	2.50
Waterpeil	H	m TAW	+5.28	+2.76	+9.00	+9.00	+2.42	+2.42
Bodempeil	Z	m TAW	-9.74	-9.74	-9.74	-9.74	-9.74	-9.74
Waterdiepte	h	m	15.02	12.50	18.74	18.74 m	12.16	12.16
Diameter buispaal	D	m	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42
Viscositeit water	ν	m ² /s	$1.37 \cdot 10^{-6}$	$1.37 \cdot 10^{-6}$	$1.37 \cdot 10^{-6}$	$1.37 \cdot 10^{-6}$	$1.37 \cdot 10^{-6}$	$1.37 \cdot 10^{-6}$
Reynoldsgetal	Re	-	$1.4 \cdot 10^6$	$8.6 \cdot 10^5$	$3.5 \cdot 10^6$	$2.6 \cdot 10^6$	$3.2 \cdot 10^6$	$2.6 \cdot 10^6$
Ruwheid buispaal	k_s	m	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Verhouding h/D	h/D	-	10.6	8.8	13.2	13.2	8.6	8.6
Verhouding k_s/D	k_s/D	-	$7 \cdot 10^{-4}$ à $7 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-4}$ à $7 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-4}$ à $7 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-4}$ à $7 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-4}$ à $7 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-4}$ à $7 \cdot 10^{-3}$

Voor de inschatting van de krachten op één buispaal wordt de waarde van de sleepcoëfficiënt als volgt bepaald, rekening houdend met de waarde van de invloedsparameters uit Tabel 5:

1. Uit paneel a en b van Figuur 11 volgt dat de sleepcoëfficiënt van één oneindig lange, gladde buispaal in een stroming bij Reynoldsggetallen tussen $9 \cdot 10^5$ en $4 \cdot 10^6$ varieert tussen 0.25 en 0.50, terwijl paneel c een range van 0.50 tot 0.75 geeft. Merk op dat dergelijke waarden vaak zijn afgeleid uit onderzoek in windtunnels, waarbij de aanstroming gekenmerkt wordt door een heel lage turbulentie-intensiteit.
2. De oppervlakteruwheid k_s/D van de buispaal bedraagt $7 \cdot 10^{-4}$ à $7 \cdot 10^{-3}$. Uit paneel c van Figuur 11 volgt dan bij Reynoldsggetallen tussen $9 \cdot 10^5$ en $4 \cdot 10^6$ een waarde van de sleepcoëfficiënt gelijk aan 0.90 à 1.25. Merk op dat de gegevens van paneel c betrekking hebben op een aanstroming met een lage turbulentie-intensiteit van 0.45 %.
3. Voor stroming in rivieren bedraagt de turbulentie-intensiteit I_u circa 10 %. Op paneel d van Figuur 11 wordt bij een Reynoldsgetal van $1 \cdot 10^6$ en een turbulentie-intensiteit van 10 % een sleepcoëfficiënt van ca. 0.75 afgelezen. Merk op dat de gegevens van paneel d betrekking hebben op gladde cilinders.
4. De variatie van de oscillaties van de sleepcoëfficiënt en de liftcoëfficiënt in functie van het Reynoldsgetal zijn gegeven Figuur 10. Bij Reynoldsggetallen tussen $8.6 \cdot 10^5$ à $3.2 \cdot 10^6$ bedragen de rms-waarden van de sleepcoëfficiënt C_d' maximaal 0.02 à 0.04, wat eerder beperkt is ten opzichte van de gemiddelde waarde. De wervelafscheiding zorgt voor grotere rms-waarden van de liftcoëfficiënt C_l' in vergelijking met deze van de sleepcoëfficiënt (zie Figuur 10). Voor Reynoldsggetallen tussen $9 \cdot 10^5$ en $4 \cdot 10^6$ bedraagt de rms-waarde van de oscillaties van de liftcoëfficiënt 0.1 à 0.2. Bij een Reynoldsgetal van $1 \cdot 10^6$ en een turbulentie-intensiteit van ca. 10 % geeft paneel d van Figuur 11 een Strouhalgetal van ongeveer 0.25.

Uit het voorgaande blijkt dat er nogal wat onzekerheid is op de empirische coëfficiënten. Daarom wordt voorgesteld om de stromingskrachten op één enkele geïsoleerde buispaal als volgt te begroten:

- Voor de sleepcoëfficiënt (bij maximum vloed en bij maximum eb) worden de fluctuaties in de tijd verwaarloosd en wordt een waarde verondersteld in de range 0.60 à 1.20. De berekening van de sleepkracht wordt uitgevoerd voor de waarden 0.60, 0.90 en 1.20 van de sleepcoëfficiënt.
- De liftcoëfficiënt is gemiddeld in de tijd nul, maar fluctueert met een rms-waarde van 0.10 à 0.20, met een typische frequentie die gekarakteriseerd wordt door een Strouhalgetal van ca. 0.25. Voorgesteld wordt om de liftkracht op een individuele geïsoleerde paal niet mee te nemen, tenzij de opdrachtgever dit noodzakelijk acht in de ontwerpberoekeningen.

Tabel 6 geeft het resultaat van de berekening van de sleepkracht per eenheidslengte op één geïsoleerde buispaal in de stroming bij toepassing van hogergenoemde waarden. Uit de tabel volgt in normale toestand een sleepkracht tussen 294 N/m en 1553 N/m. In extreme toestand wordt een kracht op de buispaal berekend tussen 2663 N/m en 9734 N/m.

Tabel 6 – Berekening sleepkracht per eenheidslengte op één buispaal in normale toestand en extreme toestand

	Symbool	Eenheid	Normale toestand		Extreme toestand			
			Vloed	Eb	Vloed		Eb	
Stroomsnelheid	U	m/s	1.35	0.83	3.38	2.50	3.05	2.50
Diameter buispaal	D	m	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42
Sleepcoëfficiënt	C_D	-	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
Sleepkracht	F_D	N/m	776	294	4867	2663	3963	2663
Sleepcoëfficiënt	C_D	-	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
Sleepkracht	F_D	N/m	1165	440	7300	3994	5944	3994
Sleepcoëfficiënt	C_D	-	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20
Sleepkracht	F_D	N/m	1553	587	9734	5325	7926	5325

4.3 Kracht op een paal uit een groep van 3 palen in een stroming

4.3.1 Algemeen

De 3 buispalen diameter $D = 1.42$ m bevinden zich hart op hart op een afstand $L = 4.0$ m van elkaar in een gelijkzijdige driehoek. De palen worden ook aan elkaar verbonden door middel van een frame.

De sleepkracht en de liftkracht op een individuele paal in een groep van 3 palen in een stroming worden berekend gebruik makend van dezelfde formuleringen als voor één paal in een stroming:

$$F'_D = C_D D \frac{\rho U^2}{2}$$

$$F'_L = C_L D \frac{\rho U^2}{2}$$

Met:

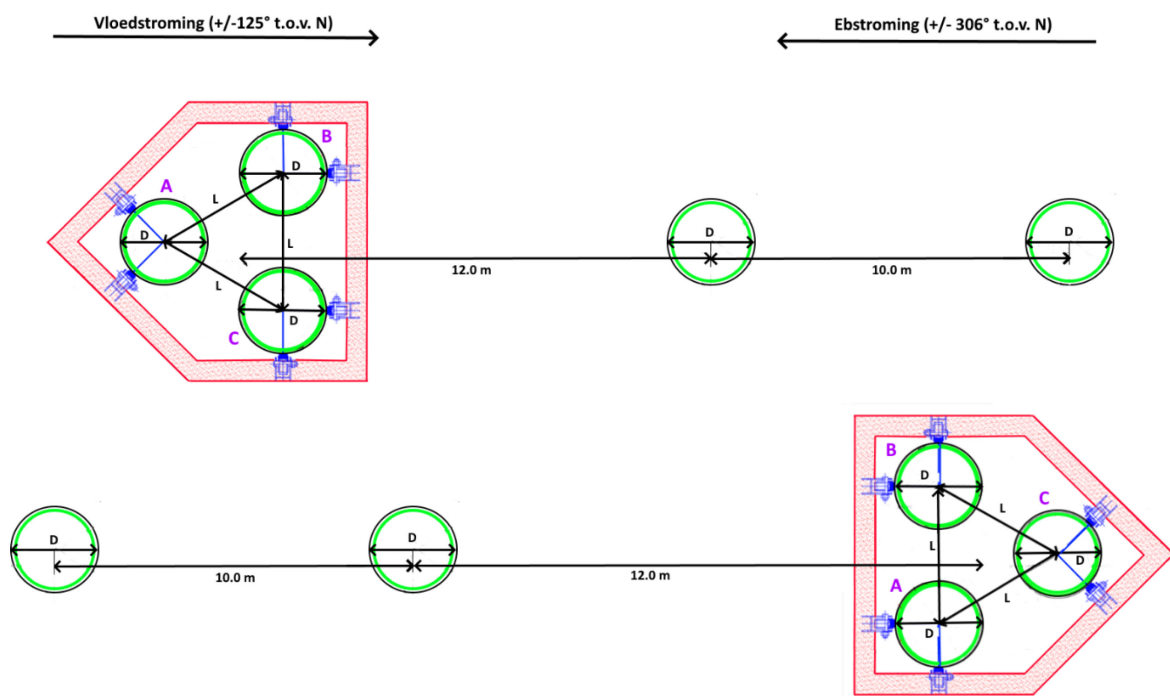
-	F'_D	Sleepkracht per eenheidslengte	[N/m]
-	F'_L	Liftkracht per eenheidslengte	[N/m]
-	C_D	Sleepcoëfficiënt	[-]
-	C_L	Liftcoëfficiënt	[-]
-	D	Diameter van de buispaal/cilinder	[m]
-	ρ	Dichtheid van water	[kg/m ³]
-	U	Aanstromingsnelheid	[m/s]

Vooreerst is een literatuuronderzoek uitgevoerd naar de waarden van de sleepcoëfficiënt en de liftcoëfficiënt van een individuele paal in een groep van drie palen. De resultaten van dit literatuuronderzoek zijn beschreven in paragraaf 4.3.2.

De opdrachtgever heeft ook de vraag gesteld of er wat betreft sleep- en liftkrachten een optimale oriëntatie van de 3 buispalen van de palengroep bestaat. Om dit na te gaan worden in dit hoofdstuk de twee configuraties uit Figuur 12 beschouwd. De configuratie waarbij de tophoek van de gelijkzijdige driehoek tegen de maximale vloedstroming in gericht is, wordt in het vervolg van dit rapport aangeduid met “tophoek driehoek tegen vloedstroming in”, de configuratie waarbij de basis van de gelijkzijdige driehoek tegen de vloedstroming in gericht is (of de tophoek tegen de maximale ebstroming in) wordt aangeduid met “basis driehoek tegen vloedstroming in”. Uit paragraaf 3.1 volgt dat de vloedstroming een hoek maakt van 125° (gemeten in wijzerzin ten opzichte van het Noorden) en de ebstroming een hoek van ca. 306°.

Bij deze configuraties wordt het volgende opgemerkt:

- In deze figuur liggen de buispaal van de tophoek van de gelijkzijdige driehoek en de twee losse buispalen in het verlengde van elkaar. Dit hoeft in praktijk niet noodzakelijk het geval te zijn. Het is perfect mogelijk dat de buispaal die de tophoek van de driehoek vormt om constructieve of nautische redenen niet in het verlengde ligt van de twee losse buispalen, maar er een beperkte hoek mee vormt.
- Voor de bepaling van de configuraties is de maximale vloedstroming beschouwd, aangezien deze stroming gekenmerkt wordt door de hoogste stroomsnelheden. De stroomrichting bij maximale eb verschilt ca. 180° met de stroomrichting bij vloed. Wat het meetplatform zelf betreft, wijzigt de configuratie “tophoek tegen de vloedstroming in gericht” dan naar “basis tegen de ebstroming in gericht”. Echter de losse buispalen bevinden zich dan opwaarts van het meetplatform in plaats van afwaarts bij de vloedstroming.
- Voor dit advies zijn enkel de configuraties uit Figuur 12 beschouwd. Uit het literatuuronderzoek in paragraaf 4.3.2 volgt dat de sleep- en liftcoëfficiënt van een buispaal in een palengroep afhankelijk is van een aantal factoren en dat er ook nog een bepaalde onzekerheid is op de waarde van de sleep- en liftcoëfficiënt. Om die reden zijn tussenliggende configuraties voor dit advies niet beschouwd.



Boven: tophoek van driehoek tegen vloedstroming in gericht; onder: basis van driehoek tegen vloedstroming in gericht.

Figuur 12 – Beschouwde oriëntaties voor bepaling oriëntatie meetplatform

In paragraaf 4.3.3 wordt op basis van het literatuuronderzoek een keuze gemaakt tussen beide oriëntaties en worden de sleep- en liftkrachten op de buispalen van het meetplatform begroot.

Uit het literatuuronderzoek in paragraaf 4.3.2 volgt dat de waarde van de liftcoëfficiënt en de sleepcoëfficiënt kunnen verschillen voor de 3 palen in de paalgroep. Ze blijken immers een functie te zijn van de aanstroomrichting α van de groep van 3 palen, het Reynoldsgetal van de stroming, de relatieve tussenafstand L/D van de palen, de ruwheid van de palen en de turbulentie-intensiteit van de stroming. Voor de 3 buispalen van het nieuwe meetplatform in de Schelde worden de volgende waarden voor deze parameters beschouwd:

- Het Reynoldsgetal van de stroming varieert tussen $9 \cdot 10^5$ en $4 \cdot 10^6$ (zie Tabel 5 in paragraaf 4.2).
- Voor de ruwheid van een nieuwe stalen buispaal wordt $k_s = 0.001$ m beschouwd, of $k_s/D = 7 \cdot 10^{-4}$. In gebruikstoestand kan de ruwheid evenwel oplopen tot $k_s \approx 0.01$ m of $k_s/D = 7 \cdot 10^{-3}$.
- De relatieve tussenafstand L/D bedraagt $4.00/1.42 = 2.82$.
- De turbulentie-intensiteit betreft de waarde voor stroming in rivieren (ca. 10 %).

4.3.2 Literatuuronderzoek

Er is een literatuuronderzoek uitgevoerd naar de waarden van de sleepcoëfficiënt en de liftcoëfficiënt van een individuele paal in een groep van drie palen. Hierbij wordt opgemerkt dat al deze onderzoeken onderzoek in een windtunnel van de stroming van wind rond lange cilindervormige objecten (zoals schoorstenen) betreffen. Tabel 7 geeft een overzicht van de verschillende beschouwde referenties. Hieruit volgt dat de waarde van de liftcoëfficiënt en de sleepcoëfficiënt kunnen verschillen voor de 3 palen in de paalgroep. Ze blijken immers een functie te zijn van de aanstroomrichting α van de groep van 3 palen, maar ook het Reynoldsgetal van de stroming, de relatieve tussenafstand L/D van de palen, de ruwheid van de palen en de turbulentie-intensiteit van de stroming bepalen mee de waarde van de coëfficiënten.

Tabel 7 – Literatuur met betrekking tot krachten op een groep van 3 palen in een stroming

Type driehoek	Referentie	Reynoldsgetal	Verhouding L/D	Aanvalshoek stroming	Turbulentie-intensiteit	Ruwheid palen
Gelijkzijdige	Gerhardt & Kramer (1981)	8×10^6	2.00	0° tot 180°	< 1 %	“glad”
	Bardowicks (1984)	1×10^5	2.50 en 3.00	0° tot 180°	< 1 %	heel ruw
	Sayers (1987)	3×10^4	1.25 à 5.00	0° tot 120°	0.4 %	glad
	Tatsuno <i>et al.</i> (1998)	6.2×10^4	2.60 à 3.64	0° tot 60°	0.12 %	glad
	Gu & Sun (2001)	5.5×10^4	1.70 à 5.00	0° tot 60°	0.4 %	glad
	Pouryoussefi <i>et al.</i> (2011)	1.26×10^4 tot 6.08×10^4	1.50 à 4.00	0°	< 0.15 %	glad
Gelijkbenige rechthoekige	Qiu <i>et al.</i> (2017)	2.1×10^5 tot 6.2×10^5	2.30	0° en 180°	< 0.6 %, 7 %, 10 %	glad

Uit een vergelijking van de waarden voor de parameters uit Tabel 7 met de waarde voor de buispalen in de Schelde uit paragraaf 4.3.1 volgt dat voor de meeste onderzoeken het Reynoldsgetal van de stroming beduidend lager is dan deze voor de beschouwde stroming in de Schelde. Enkel Gerhardt & Kramer (1981) beschouwen een hoger Reynoldsgetal van de stroming. De turbulentie-intensiteit is, met uitzondering van Qiu *et al.* (2017), beduidend lager dan de turbulentie-intensiteit van stroming in een rivier (10 %). Met uitzondering van Pouryoussefi *et al.* (2011) en Qiu *et al.* (2017) worden meerdere invalshoeken van de stroming beschouwd. Pouryoussefi *et al.* (2011) beschouwen enkel de invalshoek van de stroming gelijk aan 0° en Qiu *et al.* (2017) enkel 0° en 180°.

Figuur 14, Figuur 15 en Figuur 16 geven een overzicht van de grafische voorstellingen van de waarden van de sleep- en liftcoëfficiënt uit de beschouwde referenties. In deze figuren wordt ook telkens de in de referenties beschouwde configuratie van cilinders weergegeven. Bij deze figuren wordt het volgende opgemerkt:

- Gerhardt & Kramer (1981) vermelden een gemiddelde en maximale waarde van de sleepcoëfficiënt van de drie palen in de gelijkzijdige driehoek. Echter deze referentie vermeldt niet de waarde van de liftcoëfficiënt.
- Bardowicks (1984) en Sayers (1987) vermelden de sleep- en de liftcoëfficiënt voor één individuele cilinder in de gelijkzijdige driehoek. Sayers (1987) vermeldt ook de totale waarde van de sleep- en liftcoëfficiënt voor het geheel van de drie cilinders. Uit de bepaling van deze totale waarde in Sayers (1987) volgt dat dit eerder een gemiddelde waarde van de sleepcoëfficiënt van de drie cilinders is.
- Tatsuno *et al.* (1998), Pouryoussefi *et al.* (2011), Gu & Sun (2001) en Qiu *et al.* (2017) vermelden de waarde van de sleep- en de liftcoëfficiënt voor alle drie de individuele cilinders in de gelijkzijdige driehoek. Daarnaast vermelden Tatsuno *et al.* (1998) en Qiu *et al.* (2017) ook de totale waarde van de sleep- en liftcoëfficiënt van het geheel van de drie cilinders. Uit de bepaling van deze totale waarde volgt dat de totale waarde in Tatsuno *et al.* (1998) eerder een gemiddelde waarde van de sleepcoëfficiënt van de drie cilinders betreft, terwijl de totale waarde uit Qiu *et al.* (2017) wel degelijk de som van de krachten op de drie cilinders betreft.

Daarnaast volgt uit de figuren ook dat de sleep- en de liftcoëfficiënt van een paal in een palengroep variëren met de aanvalshoek van de stroming.

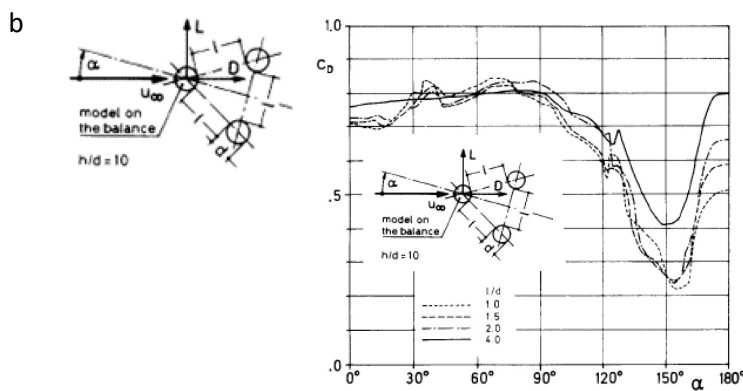
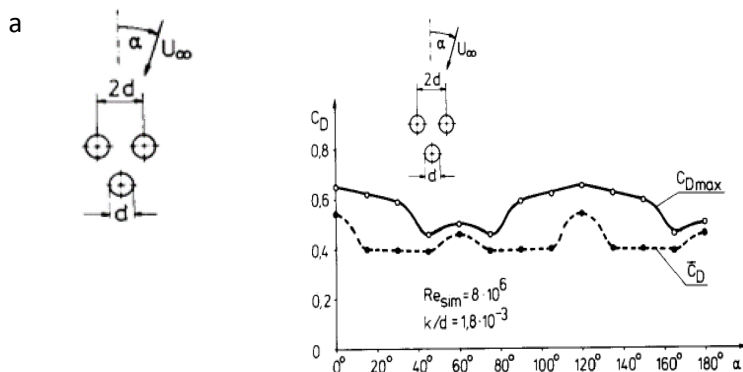


Fig. 3.3: Drag coefficients of one of three circular cylinders equidistant from each other

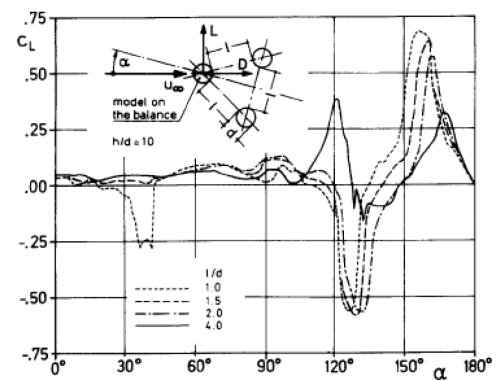
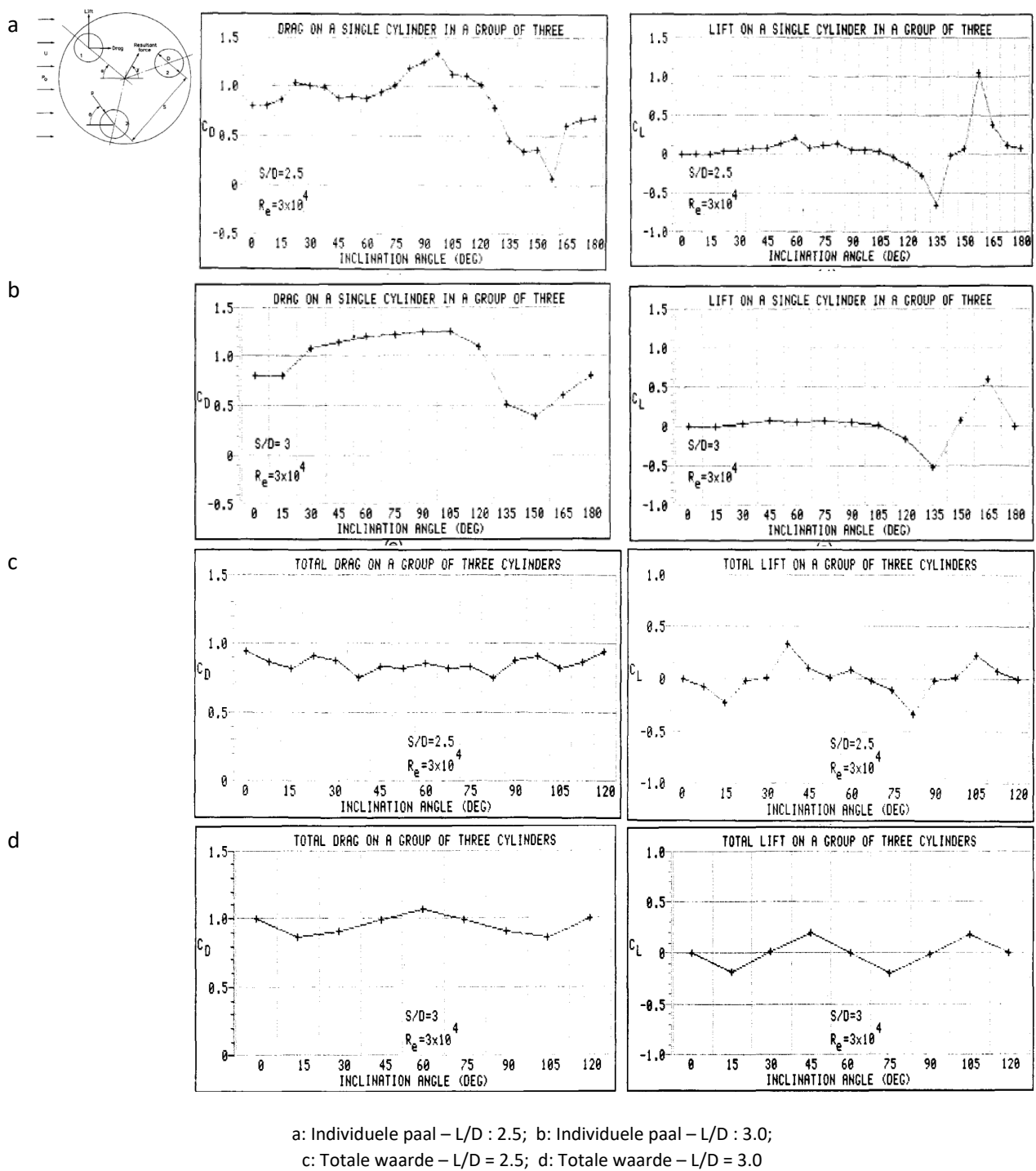


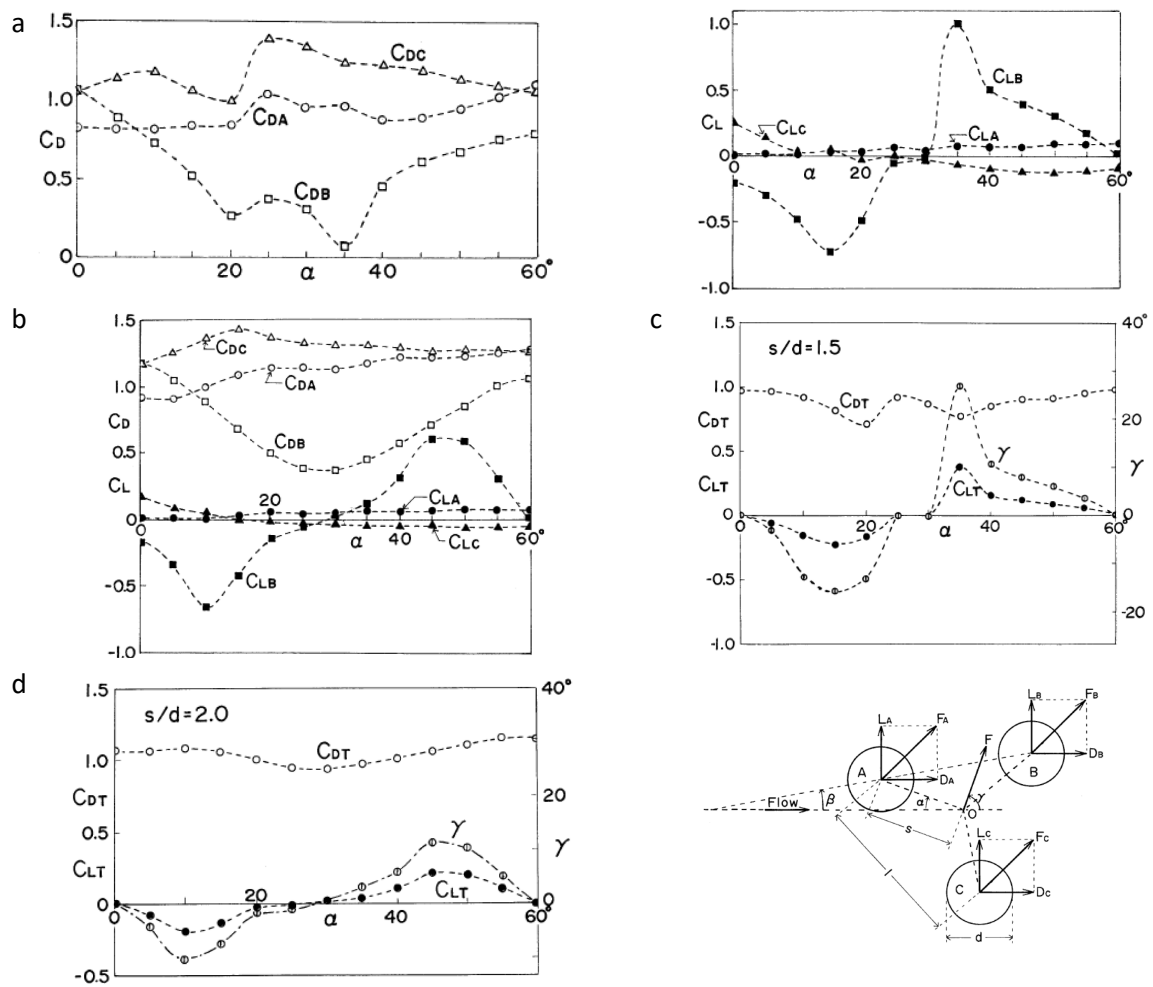
Fig. 3.4: Lift coefficients of one of three circular cylinders equidistant from each other

a: Gemiddelde en maximale waarde uit Gerhardt & Kramer (1981); b: Bron: Bardowicks (1984)

Figuur 13 – Sleepcoëfficiënt C_D en liftcoëfficiënt C_L voor een paal in een groep van 3 palen volgens Gerhardt & Kramer (1981) en Bardowicks (1984)

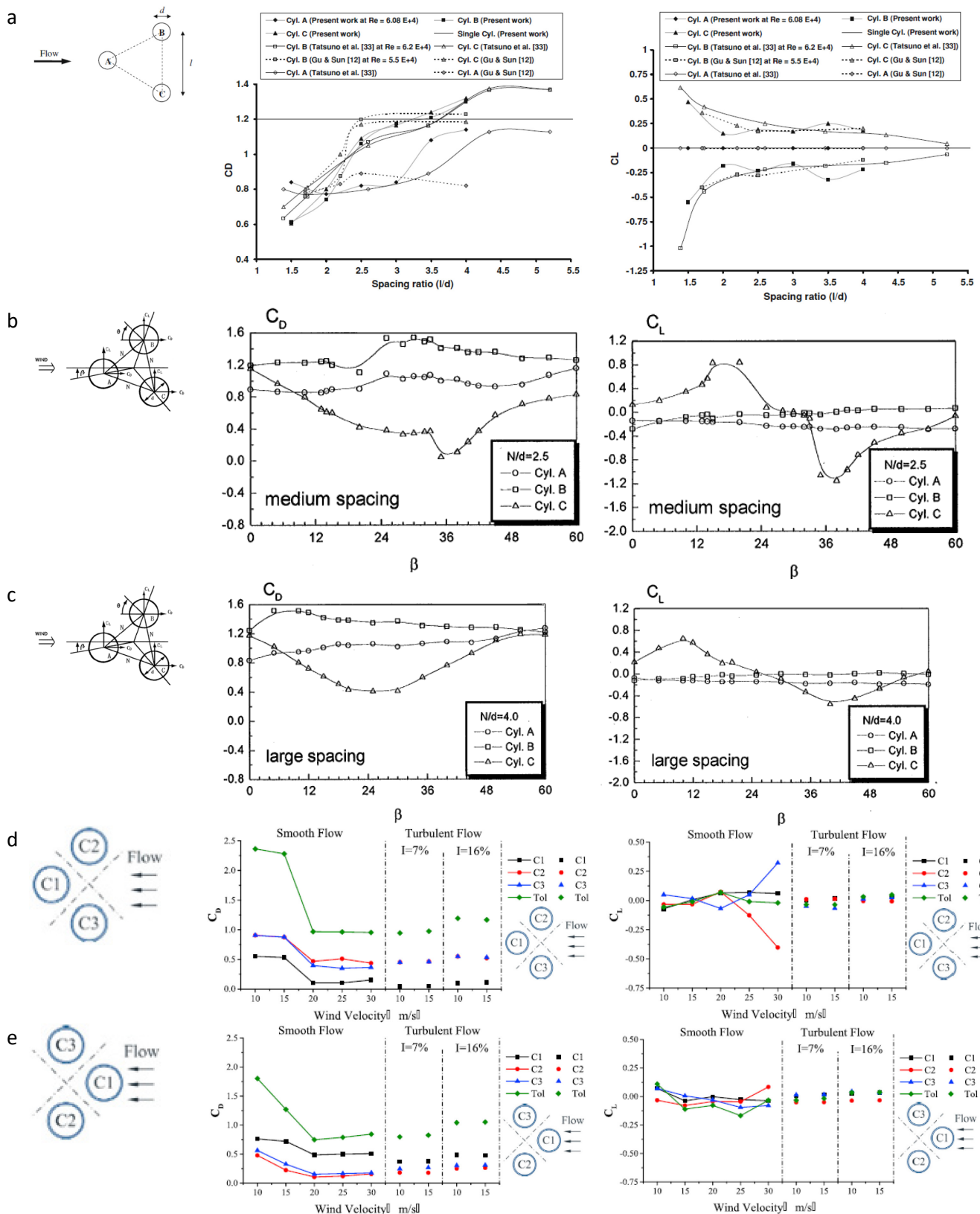


Figuur 14 – Sleepcoëfficiënt C_D en liftcoëfficiënt C_L voor een paal in een groep van 3 palen volgens Sayers (1987)



a: individuele cilinder - $L/D = 2.60$; b: individuele cilinder - $L/D = 3.46$;
c: Totale sleep- en liftcoëfficiënt voor $L/D = 2.60$; d: Totale sleep- en liftcoëfficiënt voor $L/D = 3.46$

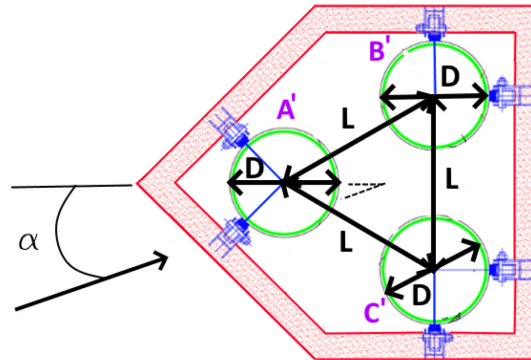
Figuur 15 – Sleepcoëfficiënt C_d en liftcoëfficiënt C_L voor een paal in een groep van 3 palen in de stroming volgens Tatsuno *et al.* (1998)



a : Pouryoussefi *et al.* (2011); b: Gu & Sun (2001) – $L/D = 2.5$; c: Gu & Sun (2001) - $L/D = 4.0$; d en e: Qiu *et al.* (2017)

Figuur 16 – Sleepcoëfficiënt C_d en liftcoëfficiënt C_L voor een paal in een groep van 3 palen in de stroming volgens Pouryoussefi *et al.* (2011), Gu & Sun (2001) en Qiu *et al.* (2017)

Uit Figuur 14, Figuur 15 en Figuur 16 volgt vooreerst dat de naamgeving van de buispalen en de conventie van de stroomrichting in de verschillende beschouwde referenties niet dezelfde is. Om die reden wordt de waarde voor sleep- en liftcoëfficiënt uit de verschillende referenties afgelezen voor de configuratie uit Figuur 17, waarbij de naamgeving en conventie voor de stroomrichting uit deze figuur wordt toegepast. Dit is uitgevoerd voor de invalshoeken van de stroming gelijk aan 0° , 60° , 120° en 180° .



L: tussenafstand hart op hart buispalen; D: diameter buispalen; α : invalshoek stroming.

Figuur 17 – Naamgeving parameters voor 3 buispalen in een stroming

Hierbij wordt het volgende opgemerkt:

- Er is getracht om de waarde van de sleepcoëfficiënt en de liftcoëfficiënt voor elke buispaal afzonderlijk af te lezen, alsook de waarde voor het geheel van de drie buispalen, indien deze waarden in de betreffende figuur grafisch voorgesteld zijn.
- De waarden van de sleepcoëfficiënt en de liftcoëfficiënt zijn afgelezen door deze figuur te digitaliseren en daarna de betreffende waarden benaderend af te lezen.
- Indien de definitie van de invalshoek van de stroming uit de betreffende referentie verschillend is van deze uit Figuur 17, dan is de configuratie uit de referentie omgezet naar deze uit Figuur 17.
- De beschouwde invalshoeken van de stroming 0° , 60° , 120° en 180° betreffen richtingen waarbij ofwel de tophoek van de gelijkzijdige driehoek naar de stroming gericht is, ofwel de stroming loodrecht staat op een zijde van de gelijkzijdige driehoek. Bij tussenliggende invalshoeken volgen mogelijk hogere of lagere waarden van de sleepcoëfficiënt en de liftcoëfficiënt. Om die reden is telkens ook de minimale en maximale waarde uit de betreffende figuur afgelezen. Omwille van de conversie naar de configuratie uit Figuur 17 geldt dat de minimale en maximale waarden voor de sleepcoëfficiënt uit Gu & Sun (2001) niet meer overeenkomen met deze voor de betreffende configuratie. Om die reden is voor Gu & Sun (2001) geen minimale en maximale waarde vermeld in de tabellen in Bijlage 1.
- De op deze wijze afgelezen waarden voor de liftcoëfficiënt uit Qiu *et al.* (2017) bedragen (in absolute waarde) maximaal 0.06. Echter de Y-as van deze figuren varieert tussen -0.75 en 0.50. Dit maakt dat deze waarden moeilijk af te lezen zijn en dat de onzekerheid op deze waarden groot is.

In tegenstelling tot de overige referenties vermelden Gerhardt & Kramer (1981) als enige een gemiddelde en een maximale waarde van de sleepcoëfficiënt voor de drie cilinders. De sleepcoëfficiënt is ook bepaald voor een Reynoldsgetal van de stroming dat beduidend hoger is dan voor de beschouwde stroming op de Schelde. De turbulentie-intensiteit en de verhouding L/D zijn dan weer lager dan deze voor de buispalen van het nieuwe meetframe. Tabel 8 geeft de gemiddelde en maximale waarde van de sleepcoëfficiënt voor de verschillende beschouwde invalshoeken.

Tabel 8 – Waarde van sleepcoëfficiënt C_D (-) uit Gerhardt & Kramer (1981)

	0°	60°	120°	180°	min	max
Gemiddelde waarde	0.46	0.54	0.46	0.53	0.39	0.54
Maximale waarde	0.52	0.66	0.50	0.65	0.46	0.66

$Re = 8 \times 10^6$; turbulentie-intensiteit < 1 %; $L/D = 2.00$

Uit Tabel 8 volgt de variatie van de sleepcoëfficiënt voor invalshoeken 0°, 60°, 120° en 180° beperkt is. De gemiddelde waarde varieert tussen 0.46 en 0.53 en de maximale waarde varieert tussen 0.52 en 0.66. Indien alle invalshoeken beschouwd worden, is de variatie iets groter, namelijk 0.39 à 0.54 voor de gemiddelde waarde en 0.46 à 0.66 voor de maximale waarde.

Bardowicks (1984), Sayers (1987), Tatsuno *et al.* (1998), Pouryoussefi *et al.* (2011), Gu & Sun (2001) en Qiu *et al.* (2017) vermelden waarden voor de sleep- en de liftcoëfficiënt van individuele cilinders in een groep van 3 cilinders. Tabel 20 en Tabel 21 in Bijlage 1 geven een overzicht van de in de betreffende figuren afgelezen waarde van respectievelijk sleepcoëfficiënt en liftcoëfficiënt van (indien vermeld) een individuele buispaal en (indien vermeld) de (in de referenties vermelde) totale waarde voor het geheel van drie buispalen.

Vooreerst wordt vastgesteld dat de waarden van sleep- en liftcoëfficiënt uit Bardowicks (1984), Sayers (1987), Tatsuno *et al.* (1998), Pouryoussefi *et al.* (2011) en Gu & Sun (2001) gebaseerd zijn op proeven in een windtunnel waarbij het Reynoldsgetal van de stroming varieert tussen $3.0 \cdot 10^4$ en $1.0 \cdot 10^5$. Bij een invalshoek van 0° wordt vastgesteld dat de sleepcoëfficiënt uit deze referenties (variërend tussen 0.71 en 0.92) beduidend hoger is dan deze uit Qiu *et al.* (2017). Deze laatste waarden variëren tussen 0.41 en 0.50 en zijn ongeveer even groot als de waarden uit Gerhardt & Kramer (1981), zie Tabel 8. Uit paneel a en b van Figuur 11 volgt dat de sleepcoëfficiënt bij Reynoldsgetalen van de stroming hoger dan $2.0 \cdot 10^5$ à $3.0 \cdot 10^5$ een grote afname vertoont. Dit wordt in de literatuur ook de drag-crisis genoemd. Om die reden zullen de beduidend hogere waarden van de sleepcoëfficiënt bepaald bij Reynoldsgetalen van de stroming die beduidend lager zijn dan in de Schelde verder niet gebruikt worden om de kracht van de stroming op de drie buispalen in te schatten. Deze waarden zullen wel gebruikt worden om enkele algemene beschouwingen te formuleren met betrekking tot de variatie van sleep- en liftcoëfficiënt in functie van de invalshoek van de stroming.

Uit Tabel 20 en Tabel 21 in Bijlage 1 wordt het volgende vastgesteld:

1. De variatie van de sleepcoëfficiënt voor invalshoeken 0°, 60°, 120° en 180° is eerder beperkt. Indien alle invalshoeken beschouwd worden, wordt een beduidend grotere variatie vastgesteld. De liftcoëfficiënt van de drie cilinders voor de invalshoeken 0°, 60°, 120° en 180° is relatief laag (in absolute waarde lager dan 0.3). Indien alle invalshoeken beschouwd worden, kan de liftcoëfficiënt van de drie cilinders variëren tussen -1.1 en +1.1.
2. Voor de invalshoeken 0°, 60°, 120° en 180° wordt een sleepcoëfficiënt voor de totale kracht op het geheel van de drie cilinders berekend, dewelke ongeveer aan elkaar gelijk zijn. Uit Figuur 14 volgt dat de sleepcoëfficiënt voor de totale kracht in functie van de invalshoek van de stroming een cyclische variatie rond een constante waarde vertoont. Analooch is de liftcoëfficiënt voor de totale kracht op het geheel van de drie cilinders gelijk aan nul of beperkt groter dan nul voor de invalshoeken 0°, 60°, 120° en 180°. Uit Figuur 14 volgt dat de liftcoëfficiënt voor de totale kracht in functie van de invalshoek van de stroming een cyclische variatie rond nul vertoont. Gemiddeld over alle invalshoeken is de liftcoëfficiënt gelijk aan nul.
3. In Qiu *et al.* (2017) is de waarde voor de sleep- en liftcoëfficiënt zowel bepaald voor een stroming met turbulentie-intensiteit <0.6 %, als 7 % als 16 %. Hieruit volgt dat de sleepcoëfficiënt bij een toename in turbulentie-intensiteit significant afneemt van <0.6 % naar 7 % (en dan weer wat toeneemt van 7 % naar 16 %). Voor een invalshoek gelijk aan 0° neemt de sleepcoëfficiënt voor

cilinder A bij een Reynoldsgetal van de stroming gelijk aan $3.1 \cdot 10^5$ met 43 % af van 0.72 (bij $I_u < 0.6$ %) naar 0.41 (bij $I_u = 7$ %), voor cilinder B met 5 % van 0.21 (bij $I_u < 0.6$ %) naar 0.20 (bij $I_u = 7$ %) en voor cilinder C met 15 % van 0.34 (bij $I_u < 0.6$ %) naar 0.29 (bij $I_u = 7$ %).

Aan de hand van de afgelezen waarden voor de sleep- en de liftcoëfficiënt in Tabel 8 en Tabel 20 en Tabel 21 in Bijlage 1 zijn daarna de waarden voor de sleep- en de liftcoëfficiënt bepaald voor de twee beschouwde configuraties van buispalen van het meetplatform (zie Figuur 12 in paragraaf 4.3.1). Hierbij is (indien mogelijk) getracht om voor elke buispaal afzonderlijk de waarde van de sleep- en de liftcoëfficiënt te bepalen. Voor de beide beschouwde configuraties geeft Tabel 9 aan op welke wijze de waarden van sleep- en liftcoëfficiënt voor de buispalen van de beide beschouwde configuraties afgelezen zijn in Tabel 20 en Tabel 21 in Bijlage 1, dewelke bepaald is voor de configuratie uit Figuur 17. Voor Gerhardt & Kramer (1981) worden de waarden voor de configuratie “tophoek driehoek naar de vloedstroming gericht” afgelezen in Tabel 8 bij 0° en deze voor de configuratie “basis driehoek naar de vloedstroming gericht” bij 180° .

Tabel 9 – Conversietabel voor aflezen waarden voor sleep- en liftcoëfficiënt uit Tabel 20 en Tabel 21 in Bijlage 1

Configuratie	Buis- paal	Bardowicks (1984)		Sayers (1987)		Tatsuno et al. (1998)		Gu & Sun (2001)		Pouryoussefi et al. (2011)		Qiu et al. (2017)	
		buispaal	hoek	buispaal	hoek	buispaal	hoek	buispaal	hoek	buispaal	hoek	buispaal	hoek
Tophoek driehoek naar vloedstroming gericht	A	A'	0°	A'	0°	A'	0°	A'	0°	A'	0°	A'	0°
	B	A'	120°	A'	120°	B'	0°	B'	0°	B'	0°	B'	0°
	C	*	*	*	*	C'	0°	C'	0°	C'	0°	C'	0°
Basis driehoek naar vloedstroming gericht	A	*	*	*	*	C'	60°	C'	60°	-	-	A'	180°
	B	A'	60°	A'	60°	A'	60°	A'	60°	-	-	B'	180°
	C	A'	180°	A'	180°	B'	60°	B'	60°	-	-	C'	180°

* = Deze referenties bevatten de waarden voor sleep- en liftcoëfficiënten voor 1 buispaal voor een invalshoek van de stroming tussen 0° en 180° . Om de waarde voor buispaal C af te lezen zou ook de waarde bij een hoek 240° gekend moeten zijn. Bijgevolg kan de sleepcoëfficiënt voor deze buispaal niet afgeleid worden uit deze referentie;

- = waarden voor sleep- en liftcoëfficiënten kunnen niet bepaald worden, aangezien deze referentie enkel de waarde voor 0° bevat.

Gerhardt & Kramer (1981) vermelden enkel de gemiddelde en maximale waarde van de sleepcoëfficiënt voor een paal uit een palengroep. Tabel 10 geeft voor de beide configuraties van de buispalen van het meetframe de gemiddelde en de maximale waarde van de sleepcoëfficiënt. Tabel 11, respectievelijk Tabel 12 geven de waarde van de sleepcoëfficiënt, respectievelijk de liftcoëfficiënt voor de 3 buispalen van de beide beschouwde configuraties van de palengroep. Bij deze tabellen wordt opgemerkt dat in de tabellen de waarden voor sleep- en liftcoëfficiënt samengevat zijn voor meerdere waarden van L/D. Om die reden wordt telkens xx à yy vermeldt in de tabel overeenkomend met de variatie van L/D. Indien één waarde wordt vermeldt voor meerdere waarden van L/D, dan betekent dit voor beide waarden van L/D eenzelfde waarde is afgelezen.

Tabel 10 – Gemiddelde en maximale waarde van de sleepcoëfficiënt voor een paal uit beide configuraties van de palengroep uit Gerhardt & Kramer (1981)

	Gemiddelde waarde	Maximale waarde
Tophoek driehoek gericht naar vloedstroming	0.46	0.52
Basis driehoek gericht naar vloedstroming	0.53	0.65

$Re = 8 \times 10^6$; turbulentie-intensiteit < 1 %; $L/D = 2.00$

Tabel 11 – Sleepcoëfficiënt op buispaal A, B en C voor beide configuraties van de palengroep uit Bardowicks (1984), Sayers (1987), Tatsuno et al. (1998), Gu & Sun (2001), Pouryoussefi et al. (2011) en Qiu et al. (2017)

		Re	Turbulentie-intensiteit	L/D	Buispaal A	Buispaal B	Buispaal C
Tophoek driehoek tegen vloedstroming in	Bardowicks (1984)	1×10^5	< 1 %	2.00 à 4.00	0.71 à 0.76	0.68	⁽¹⁾
	Sayers (1987)	3×10^4	0.40 %	2.50 à 3.00	0.79 à 0.80	1.00 à 1.11	⁽¹⁾
	Tatsuno et al. (1998)	6.2×10^4	0.12 %	2.60 à 3.46	0.81 à 0.92	1.07 à 1.19	1.05 à 1.19
	Gu & Sun (2001)	5.5×10^4	0.40 %	2.50 à 4.00	0.84 à 0.90	1.20 à 1.26	1.17 à 1.18
	Pouryoussefi et al. (2011)	6.08×10^4	< 0.15 %	2.82	0.81	1.15	1.15
	Qiu et al. (2017)	3.1×10^5	7.00 % à 16.00 %	2.3	0.41 à 0.48	0.20 à 0.28	0.29 à 0.31
		6.2×10^5	< 0.60 %	2.3	0.50	0.13	0.18
Basis driehoek tegen vloedstroming in	Bardowicks (1984)	1×10^5	< 1 %	2.0 à 4.0	⁽¹⁾	0.80 à 0.83	0.67 à 0.80
	Sayers (1987)	3×10^4	0.40 %	2.5 à 3.0	⁽¹⁾	0.88 à 1.20	0.67 à 0.80
	Tatsuno et al. (1998)	6.2×10^4	0.12 %	2.60 à 3.46	1.04 à 1.27	1.10 à 1.28	0.78 à 1.06
	Gu & Sun (2001)	5.5×10^4	0.40 %	2.50 à 4.00	1.16 à 1.23	1.21 à 1.26	0.82 à 1.19
	Qiu et al. (2017)	3.1×10^5	7.00 % à 16.00 %	2.3	0.43 à 0.59	0.43 à 0.59	0.02 à 0.16
		6.2×10^5	< 0.60 %	2.3	0.44	0.36	0.16

⁽¹⁾ Liftcoëfficiënt kan voor deze buispaal niet afgeleid worden uit deze referentie.

Tabel 12 – Liftcoëfficiënt op buispaal A, B en C voor beide configuraties van de palengroep uit Bardowicks (1984), Sayers (1987), Tatsuno et al. (1998), Gu & Sun (2001) en Qiu et al. (2017)

		Re	Turbulentie-intensiteit	L/D	Buispaal A	Buispaal B	Buispaal C
Tophoek driehoek tegen vloedstroming in	Bardowicks (1984)	1×10^5	< 1 %	2.00 à 4.00	0.04 à 0.05	0.00 ⁽¹⁾ à 0.40	⁽³⁾
	Sayers (1987)	3×10^4	0.40 %	2.50 à 3.00	-0.01 à 0.00	-0.14 à -0.18 ⁽²⁾	⁽³⁾
	Tatsuno et al. (1998)	6.2×10^4	0.12 %	2.60 à 3.46	0.00	-0.17 à -0.20	0.17 à 0.25
	Gu & Sun (2001)	5.5×10^4	0.40 %	2.50 à 4.00	-0.09 à -0.14	-0.09 à -0.30	0.14 à 0.20
	Pouryoussefi et al. (2011)	6.08×10^4	< 0.15 %	2.82	0.00	-0.17	0.17
	Qiu et al. (2017)	3.1×10^5	7.00 % à 16.00 %	2.3	0.00 à 0.03	-0.06 à -0.04	0.00 à 0.03
		6.2×10^5	< 0.60 %	2.3	-0.03	0.09	-0.08
Basis driehoek tegen vloedstroming in	Bardowicks (1984)	1×10^5	< 1 %	2.0 à 4.0	⁽³⁾	0.06 à 0.07	0.00
	Sayers (1987)	3×10^4	0.40 %	2.5 à 3.0	⁽³⁾	0.05 à 0.19	0.00 à 0.07
	Tatsuno et al. (1998)	6.2×10^4	0.12 %	2.60 à 3.46	-0.04 à -0.11	0.09	0.00 à 0.02
	Gu & Sun (2001)	5.5×10^4	0.40 %	2.50 à 4.00	-0.19 à -0.27	-0.03 à +0.07	-0.04 à 0.04
	Qiu et al. (2017)	3.1×10^5	7.00 % à 16.00 %	2.3	-0.04 à 0.00	-0.08 à -0.01	0.00
		6.2×10^5	< 0.60 %	2.3	-0.40	0.33	0.07

⁽¹⁾= liftcoëfficiënt sterk afhankelijk van de hoek. Bij +/- 130 ° is deze gelijk aan -0.60 voor buispaal B en +0.60 voor buispaal C.

⁽²⁾= liftcoëfficiënt sterk afhankelijk van de hoek. Bij 135 ° is deze gelijk aan -0.60 (bij S/D = 2.5) à -0.50 (bij S/D = 3.0) voor buispaal B en 0.60 (bij S/D = 2.5) à 0.50 (bij S/D = 3.0) voor buispaal C.

⁽³⁾ = Liftcoëfficiënt kan voor deze buispaal niet afgeleid worden uit deze referentie.

Op basis van Tabel 11 en Tabel 12 kan het volgende vastgesteld worden:

1. Indien het hoekpunt van de gelijkzijdige driehoek naar de vloedstroming gericht is, wordt bij Reynoldsgetallen lager dan ca. $1 \cdot 10^5$ voor de cilinder in het hoekpunt een lagere waarde voor de sleepcoëfficiënt bepaald, terwijl voor de sleepcoëfficiënt voor de twee andere cilinders hoger zijn en aan elkaar gelijk. Bij Reynoldsgetallen hoger dan ca. $1 \cdot 10^5$ wordt vastgesteld dat de sleepcoëfficiënt van de twee cilinders aan de basis van de gelijkzijdige driehoek iets lager is dan deze van de tophoek. Indien de basis van de gelijkzijdige driehoek tegen de vloedstroming in gericht is, dan zijn de waarden van de sleepcoëfficiënten voor de cilinders aan de basis van de gelijkzijdige driehoek, onafhankelijk van het Reynoldsgetal van de stroming, aan elkaar gelijk en iets hoger dan deze van de cilinder van de tophoek. Voor beide configuraties worden ongeveer even grote waarden van de sleepcoëfficiënt bepaald.
2. Bij de configuratie waarbij het hoekpunt van de gelijkzijdige driehoek naar de vloedstroming gericht is, is de liftcoëfficiënt voor de cilinder in de tophoek altijd lager dan deze van de cilinders die zich ter plaatse van de basis van de driehoek bevinden. De liftcoëfficiënten voor deze laatste twee cilinders zijn aan elkaar gelijk en tegengesteld aan elkaar. Hierbij wordt opgemerkt dat dit besloten is rekening houdend met het feit dat de liftcoëfficiënt uit Bardowicks (1984) bij $L/D = 2.0$ en een hoek van de aanstroming die ca. 10° afwijkt van de betreffende stromingsrichting beduidend negatief wordt.
3. Indien de basis van de driehoek tegen de vloedstroming in gericht is, is de liftcoëfficiënt van de cilinder ter plaatse van de tophoek van de driehoek relatief laag (-0.04 à 0.07) en beduidend lager dan de liftcoëfficiënt van de cilinders ter plaatse van de basis van de driehoek. Het teken van de liftcoëfficiënt van de cilinders ter plaatse van de basis van de driehoek vertoont geen eenduidige trend. In bepaalde referenties is de liftcoëfficiënt voor buispaal B bijvoorbeeld negatief, terwijl deze in andere referenties positief is. Het teken van de liftcoëfficiënt voor buispaal A lijkt overwegend negatief te zijn.

4.3.3 Inschatting sleep- en lift krachten op de buispalen van de palengroep.

In paragraaf 4.3.2 is een literatuuronderzoek uitgevoerd naar de sleep- en de liftcoëfficiënt van een buispaal die deel uitmaakt van een groep van 3 buispalen geplaatst in de vorm van een gelijkzijdige driehoek. Hierbij zijn twee configuraties beschouwd, namelijk één configuratie waarbij de tophoek van de gelijkzijdige driehoek tegen de vloedstroming in gericht is en één configuratie waarbij de basis van de gelijkzijdige driehoek tegen de vloedstroming in gericht is. Tabel 11 en Tabel 12 in vorige paragraaf geven de waarden van de sleep- en de liftcoëfficiënt van de 3 buispalen voor deze beide configuraties. Wat sleep- en liftcoëfficiënt betreft kan voor de beide configuraties uit vorige paragraaf het volgende besloten worden:

1. Sleepcoëfficiënt
Voor beide configuraties worden ongeveer even grote waarden van de sleepcoëfficiënten bepaald. Rekening houdend met de Reynoldsgetallen van de beschouwde stroming in de Schelde volgt uit Tabel 11 dat bij de configuratie met de tophoek van de driehoek tegen de vloedstroming in gericht de waarde van de sleepcoëfficiënt van de buispaal ter plaatse van de tophoek van de driehoek iets hoger is dan deze van de buispalen ter plaatse van de basis. Bij de configuratie met de basis van de driehoek tegen de vloedstroming in gericht, is de waarde van de sleepcoëfficiënt van de buispaal ter plaatse van de tophoek beduidend lager dan deze van de buispalen ter plaatse van de basis. Voor beide configuraties worden voor de beide buispalen ter plaatse van de basis van de driehoek ongeveer even grote waarden voor de sleepcoëfficiënt bepaald.
2. Liftcoëfficiënt:
Voor beide configuraties is de liftcoëfficiënt van de buispaal ter plaatse van de tophoek van de gelijkzijdige driehoek beduidend lager dan deze van de buispalen ter plaatse van de basis van de driehoek. De waarden van de liftcoëfficiënt van deze laatste buispalen is ongeveer aan elkaar gelijk. Voor de configuratie met de tophoek van de driehoek tegen de vloedstroming in gericht, is het teken van de liftcoëfficiënt van de buispalen ter plaatse van de basis tegengesteld aan elkaar, i.e. de liftkrachten zijn naar elkaar toe gericht. Voor de configuratie met de basis van de driehoek tegen de

vloedstroming in gericht is er enige onzekerheid over het teken van de liftcoëfficiënten. In sommige referenties zijn deze tegengesteld van teken, in andere referenties juist gelijk van teken.

Wat sleepcoëfficiënten betreft worden er bijgevolg eerder beperkte verschillen tussen de beide configuraties vastgesteld. Er is enige onzekerheid wat betreft de tekens van de liftcoëfficiënten van de buispalen ter plaatse van de basis van de driehoek bij de configuratie met de basis van de driehoek tegen de vloedstroming in gericht. Bij de configuratie met de tophoek tegen de vloedstroming in gericht zijn de liftkrachten op deze buispalen naar elkaar toe gericht. Omwille van het feit dat deze onzekerheid niet voorkomt bij deze laatste configuratie, wordt de voorkeur uitgesproken voor de configuratie waarbij de tophoek van de driehoek tegen de vloedstroming in gericht is.

Voor de configuratie waarbij de tophoek van de driehoek tegen de vloedstroming in gericht is, worden nu de sleepkrachten en de liftkrachten bepaald. Hierbij moet rekening gehouden worden met het feit dat de stroming in de Schelde twee maal per dag 180° van richting verandert. Bijgevolg geldt voor deze configuratie dat bij maximale vloed de tophoek tegen de stroming in gericht is en dat bij maximale eb de basis van de driehoek tegen de stroming in gericht is.

Wat de sleepcoëfficiënt betreft volgt uit Tabel 10 dat de maximale waarde bij stroming met hoge Reynoldsgetallen (8×10^6) varieert tussen 0.52 en 0.66, afhankelijk van de richting van de stroming. De waarden in Tabel 11 bepaald uit de overige referenties is nog hoger, maar deze zijn bepaald voor stroming met een beduidend lager Reynoldsgetal. Zoals eerder vermeld, neemt de sleepcoëfficiënt af bij toename van het Reynoldsgetal boven een bepaalde waarde, de zogenaamde drag-crisis. Daarnaast werd in de literatuur geen informatie teruggevonden over de invloed van wandruwheid op de krachten op de 3 palen in een paalgroep. Voor het geval van een geïsoleerde paal bleek uit Figuur 11 (paneel c) dat de ruwheid leidt tot een gevoelige verhoging van de sleepcoëfficiënten in de beoogde zone van Reynoldsgetallen.

Om die redenen wordt als pragmatische oplossing voorgesteld om met dezelfde range van sleepcoëfficiënten te werken als bepaald werd voor het geval van een geïsoleerde paal, namelijk 0.6 à 1.2. Merk op dat door voor elk van de 3 palen een identieke sleepcoëfficiënt te hanteren de totale kracht op de palengroep mogelijks wordt overschat, aangezien hierboven reeds vermeld werd dat, afhankelijk van de beschouwde configuratie, voor de buispaal ter plaatse van de tophoek ofwel voor de beide buispalen ter plaatse van de basis een iets lagere waarde voor de sleepcoëfficiënt is bepaald. Het beschouwen van een waarde van de sleepcoëfficiënt gelijk aan 1.2 voor elke paal in de palengroep wordt door de auteurs van dit rapport als een overschatting van de totale kracht op de palengroep beschouwd, verwijzend naar de maximale waarde van 0.52 à 0.66 voor één paal uit Tabel 10. Het toepassen van bijvoorbeeld een waarde gelijk aan 0.9 voor elk van de drie buispalen wordt als nog mogelijk beschouwd.

De berekening van de sleepkracht op één paal van de palengroep wordt bijgevolg uitgevoerd voor de waarden 0.60, 0.90 en 1.20 van de sleepcoëfficiënt. Tabel 13 geeft het resultaat van de berekening van de sleepkracht per eenheidslengte op één buispaal van de palengroep in de stroming bij toepassing van hogergenoemde waarden. Uit de tabel volgt in normale toestand een sleepkracht tussen 294 N/m en 1553 N/m. In extreme toestand wordt een kracht op de buispaal berekend tussen 2663 N/m en 9734 N/m.

Tabel 13 – Berekening sleepkracht per eenheidslengte op één buispaal in palengroep in normale toestand en extreme toestand

	Symbool	Eenheid	Normale toestand		Extreme toestand			
			Vloed	Eb	Vloed		Eb	
Stroomsnelheid	U	m/s	1.35	0.83	3.38	2.50	3.05	2.50
Diameter buispaal	D	m	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42
Sleepcoëfficiënt	C_D	-	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
Sleepkracht	F_D	N/m	776	294	4867	2663	3963	2663
Sleepcoëfficiënt	C_D	-	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
Sleepkracht	F_D	N/m	1165	440	7300	3994	5944	3994
Sleepcoëfficiënt	C_D	-	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20
Sleepkracht	F_D	N/m	1553	587	9734	5325	7926	5325

Voor de berekening van de liftkrachten op de buispalen van het meetplatform wordt een onderscheid gemaakt tussen de stroming bij vloed en de stroming bij eb. Bij vloed is de tophoek van de driehoek tegen de vloedstroming in gericht. Hierboven werd besloten dat de liftcoëfficiënt van de buispaal ter plaatse van de tophoek beduidend lager is dan deze van de twee buispalen ter plaatse van de basis, dewelke gelijk zijn aan elkaar en tegengesteld van teken. Op basis van Tabel 12 wordt voor de buispaal ter plaatse van de tophoek een waarde van 0.10 beschouwd voor de liftcoëfficiënt. De liftcoëfficiënten van de buispalen ter plaatse van de basis vertonen meer variatie. De waarden variëren tussen 0.10 en 0.30. Echter bij een kleine afwijking van de hoek van de aanstroming kunnen deze van teken wisselen en beduidend stijgen in grootte, tot ca. -0.60 cfr. Bardowicks (1984). Om die reden wordt ook 0.60 beschouwd als exceptioneel optredende waarde. Wat het teken van de liftkrachten betreft, kan het teken van de liftkracht op de buispaal in de tophoek van de driehoek zowel positief als negatief zijn, de liftkrachten op de twee andere buispalen staan naar elkaar toe gericht (negatief voor buispaal B en positief voor buispaal C).

Tabel 14 geeft voor elk van de drie buispalen van de palengroep het resultaat van de berekening van de liftkracht per eenheidslengte bij toepassing van de stroomsnelheden bij maximum vloed en bij toepassing van de hogergenoemde waarden voor de liftcoëfficiënt. Uit de tabel volgt in normale toestand een liftkracht die varieert tussen -129 N/m en 129 N/m voor buispaal A, tussen -776 N/m en -129 N/m voor buispaal B en tussen 129 N/m en 776 N/m voor buispaal C. In extreme toestand wordt een liftkracht berekend die voor buispaal A varieert tussen -444 N/m en 811 N/m, voor buispaal B tussen -444 N/m en -4867 N/m en voor buispaal C tussen 444 N/m en 4867 N/m.

Bij eb is de basis van de gelijkzijdige driehoek tegen de stroming in gericht. Hierboven volgde dat de liftcoëfficiënt voor de buispaal ter plaatse van de tophoek van de driehoek beduidend lager is dan deze van de twee overige buispalen. Op basis van de waarden in Tabel 12 wordt voor deze buispaal een waarde van 0.10 beschouwd voor de liftcoëfficiënt. De liftcoëfficiënten van de buispalen ter plaatse van de basis vertonen meer variatie. De waarden variëren tussen 0.10 en 0.30. De waarden 0.10 en 0.30 worden dan ook beschouwd voor het inschatten van de liftkrachten op deze beide buispalen. Omwille van de onzekerheid op het teken van de liftkrachten bij deze configuratie wordt voor alle buispalen zowel een positieve als een negatieve liftkracht beschouwd.

Tabel 15 geeft voor elk van de drie buispalen van de palengroep het resultaat van de berekening van de liftkracht per eenheidslengte bij toepassing van de stroomsnelheden bij maximum eb en bij toepassing van de hogergenoemde waarden voor de liftcoëfficiënt. Uit de tabel volgt in normale toestand een liftkracht die varieert tussen -147 N/m en 147 N/m voor buispaal A en voor buispaal B en tussen -49 N/m en 49 N/m voor buispaal C. In extreme toestand wordt een liftkracht berekend die voor buispaal A en buispaal B varieert tussen -1981 N/m en 1981 N/m en voor buispaal C varieert tussen -661 N/m en 661 N/m.

Tabel 14 – Berekening liftkracht per eenheidslengte op buispaal in palengroep tijdens vloed in normale toestand en extreme toestand

	Symbol	Eenheid	Normale toestand			Extreme toestand					
Stroomsnelheid	U	m/s	1.35	1.35	1.35	3.38	3.38	3.38	2.50	2.50	2.50
Diameter buispaal	D	m	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42
Sleepcoëfficiënt buispaal A	C_{D,A}	-	-0.1	0.1		-0.1	0.1		-0.1	0.1	
Sleepkracht buispaal A	F_{D,A}	N/m	-129	129		-811	811		-444	444	
Sleepcoëfficiënt buispaal B	C_{D,B}	-	-0.6	-0.3	-0.1	-0.6	-0.3	-0.1	-0.6	-0.3	-0.1
Sleepkracht buispaal B	F_{D,B}	N/m	-776	-388	-129	-4867	-2433	-811	-2663	-1331	-444
Sleepcoëfficiënt buispaal C	C_{D,C}	-	0.1	0.3	0.6	0.1	0.3	0.6	0.1	0.3	0.6
Sleepkracht buispaal C	F_{D,C}	N/m	129	388	776	811	2433	4867	444	1331	2663

Tabel 15 – Berekening liftkracht per eenheidslengte op buispaal in palengroep tijdens eb in normale toestand en extreme toestand

	Symbol	Eenheid	Normale toestand				Extreme toestand							
Stroomsnelheid	U	m/s	0.83	0.83	0.83	0.83	3.05	3.05	3.05	3.05	2.5	2.5	2.5	2.5
Diameter buispaal	D	m	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42
Sleepcoëfficiënt buispaal A	C_{D,A}	-	-0.3	-0.1	0.1	0.3	-0.3	-0.1	0.1	0.3	-0.3	-0.1	0.1	0.3
Sleepkracht buispaal A	F_{D,A}	N/m	-147	-49	49	147	-1981	-661	661	1981	-1331	-444	444	1331
Sleepcoëfficiënt buispaal B	C_{D,B}	-	-0.3	-0.1	0.1	0.3	-0.3	-0.1	0.1	0.3	-0.3	-0.1	0.1	0.3
Sleepkracht buispaal B	F_{D,B}	N/m	-147	-49	49	147	-1981	-661	661	1981	-1331	-444	444	1331
Sleepcoëfficiënt buispaal C	C_{D,C}	-	-0.1		0.1		-0.1		0.1		-0.1		0.1	
Sleepkracht buispaal C	F_{D,C}	N/m	-49		48.9		-661		661		-444		444	

4.4 Variatie van stroomsnelheid over waterdiepte

In de vorige paragrafen werd de sleepkracht en de liftkracht op een geïsoleerde paal en een palengroep begroot. Hierbij is een kracht per eenheidslengte van de paal afgeleid gebruik makend van een dieptegemiddelde stroomsnelheid (bij maximum vloed en bij maximum eb) ter plaatse van het nieuwe meetframe. In deze paragraaf wordt dieper ingegaan op de variatie van de stroomsnelheid in functie van de waterdiepte. Omdat deze gegevens niet beschikbaar waren in de ter beschikking gestelde resultaten van het 3D Scaldis-model van WL, wordt in deze paragraaf enkel een eerste indruk gegeven van deze variatie op basis van het theoretisch te verwachten snelheidsprofiel en snelheidsmetingen in de Schelde.

In een rivier treedt op elk ogenblik (dus ook bij maximum vloed en bij maximum eb) een verticaal snelheidsprofiel op. In afwezigheid van lokale verstoringen, kan het verticaal snelheidsprofiel benaderd worden door een machtswet:

$$U(z) = U_{opp} \left(\frac{z}{h} \right)^{1/n}$$

met:

- $U(z)$	Stroomsnelheid op afstand z boven de bodem	[m/s]
- U_{opp}	Stroomsnelheid aan de oppervlakte	[m/s]
- z	Afstand boven de bodem	[m]
- h	Waterdiepte	[m]
- n	Empirische parameter	[-]

De empirische parameter n kan in principe gefit worden op een snelheidsprofiel van het 3D Scaldis-model van WL. Aangezien deze op dit ogenblik niet beschikbaar zijn (i.e. er werden enkel dieptegemiddelde snelheden ter beschikking gesteld), wordt hiervoor voorlopig een typische range van 4 tot 7 gehanteerd, op basis van de literatuur.

Uit de machtswet volgt de volgende relatie tussen de dieptegemiddelde snelheid U_{gem} en de oppervlaktesnelheid U_{opp} :

$$\frac{U_{opp}}{U_{gem}} = \frac{(n+1)}{n}$$

In paragraaf 4.2 werd de lokale sleepkracht per eenheidslengte als volgt uitgedrukt:

$$F_D'(z) = C_D D \frac{\rho [U(z)]^2}{2}$$

Indien voor de eenvoud de sleepcoëfficiënt onafhankelijk van de waterdiepte wordt verondersteld, volgt hieruit door substitutie van de machtswet en door integratie over de waterdiepte, de totale sleepkracht F_D op (het ondergedompelde deel van) een meetpaal:

$$\frac{F_D}{\left(C_D D \frac{\rho U_{gem}^2}{2} \right) \cdot h} = \frac{(n+1)^2}{n(n+2)} = f_F(n)$$

waarin de factor f_F de verhouding uitdrukt van F_D tot de totale sleepkracht in geval de stroming uniform over de waterdiepte zou zijn met een snelheid gelijk aan U_{gem} .

Analoog kan men door integratie over de waterdiepte het totale moment M_D (t.o.v. de paalvoet) van de sleepkrachten vinden:

$$\frac{M_D}{\left(C_D D \frac{\rho U_{gem}^2}{2}\right) \cdot h \cdot \frac{h}{2}} = \frac{(n+1)}{n} = f_M(n)$$

waarin de factor f_M de verhouding uitdrukt van M_D tot het totale moment in geval de stroming uniform over de waterdiepte zou zijn met een snelheid gelijk U_{gem} (en het moment te wijten zou zijn aan een uniform verdeelde sleepkracht per eenheidslengte, waarvan de resulterende kracht een hefboomsarm $h/2$ heeft ten opzichte van de paalvoet).

Voor een aantal typische waarden van de empirische parameter n wordt in Tabel 16 de waarde van de verhogingsfactoren f_F en f_M begroot. De waarden 4 à 7 uit de literatuur zijn hier beschouwd, alsook de waarde 3 die volgt uit een opgemeten snelheidsprofiel ter hoogte van Prosperpolder, zie verder in deze paragraaf. Uit deze tabel volgt dat f_F varieert in de range van 1.02 tot 1.07, terwijl f_M varieert in de range van 1.14 tot 1.33. Met name voor het totale moment van de stromingskrachten t.o.v. de paalvoet zou het dus wel eens relevant kunnen zijn om de stromingskracht per eenheidslengte te laten variëren over het ondergedompelde deel van een meetpaal. Een dergelijke aanpak laat ook toe om dichtbij het wateroppervlak een verhoogde stromingskracht per eenheidslengte te specificeren, om rekening te houden met het frame rond de 3 naburige meetpalen (Figuur 17). Dit vergt een raming van de aangestroomde breedte van het frame (die in principe varieert met de aanvalshoek) en van de sleepcoëfficiënt, waarvoor ruwweg een waarde 1.8 vermeld wordt in Eurocode 1 (voor berekening van de windkracht op objecten met als doorsnede een regelmatige vijfhoek).

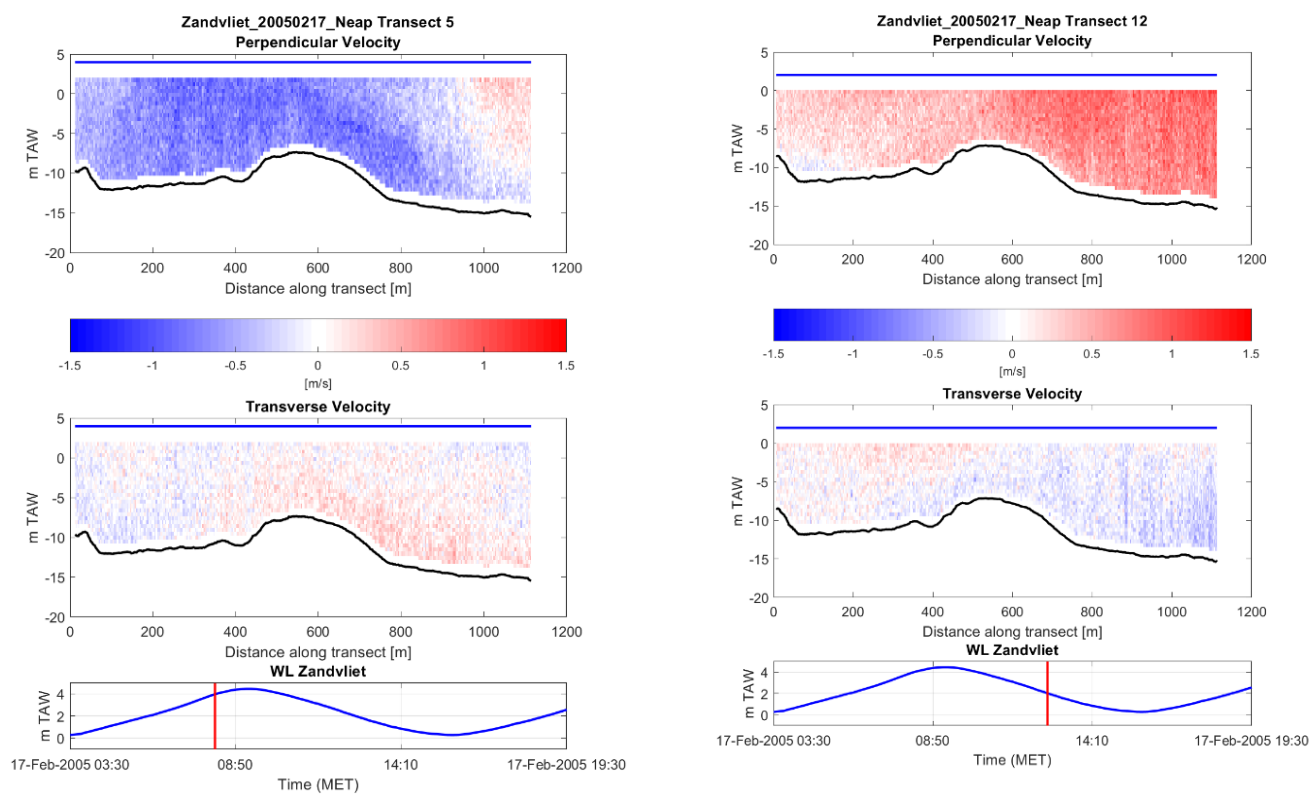
Tabel 16 – Verhogingsfactoren op totale sleepkracht en moment ten opzichte van de paalvoet als functie van de empirische parameter in de machtswet waarmee verticale snelheidsprofielen worden benaderd

n [-]	f_F [-]	f_M [-]
3	1.07	1.33
4	1.04	1.25
5	1.03	1.20
6	1.02	1.17
7	1.02	1.14

In het kader van het onderzoek naar de aanwezigheid van hooggeconcentreerde slibsuspensies in de Schelde is door IMDC NV op 17/02/2005 een meetcampagne uitgevoerd ter plaatse van Prosperpolder. Het getij op 17/02/2005 kwam overeen met een doodtij. Deze meetcampagne is gerapporteerd in IMDC NV *et al.* (2005). Tijdens deze meetcampagne zijn gedurende 13u een aantal raaien gevaren en is onder meer de variatie van de stroomsnelheid over deze raai en over de diepte met behulp van een ADCP opgemeten. De locatie van deze raaien is voorgesteld in Figuur 18. Figuur 19 geeft voor het tijdstip van maximum vloed en het tijdstip van maximum eb een voorstelling van de stroomsnelheid evenwijdig aan de raai en de stroomsnelheid loodrecht op de raai.



Figuur 18 – Locatie raaien uit IMDC NV *et al.*, (2005)

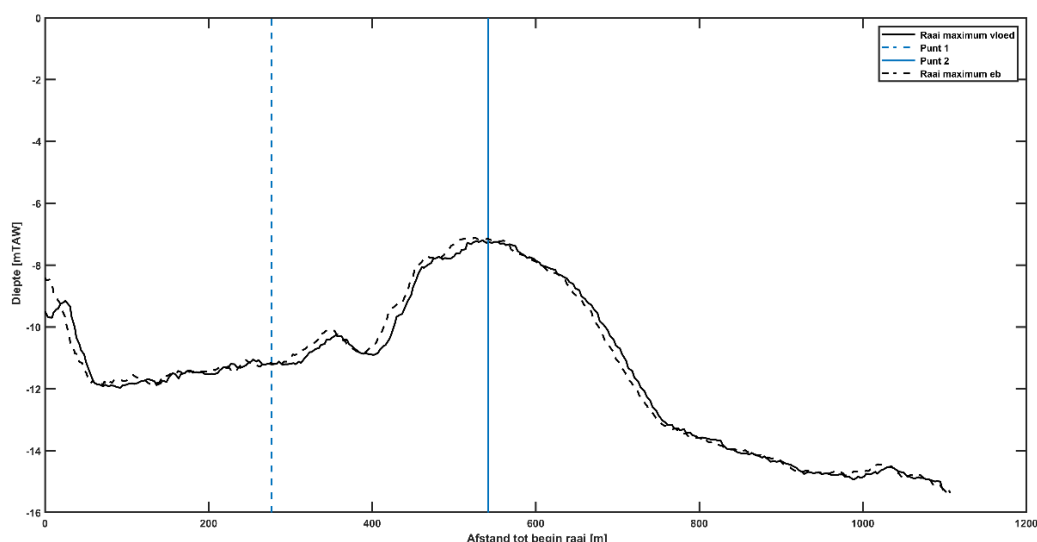


Bron: IMDC NV *et al.*, (2005); links: maximum vloed; rechts: maximum eb

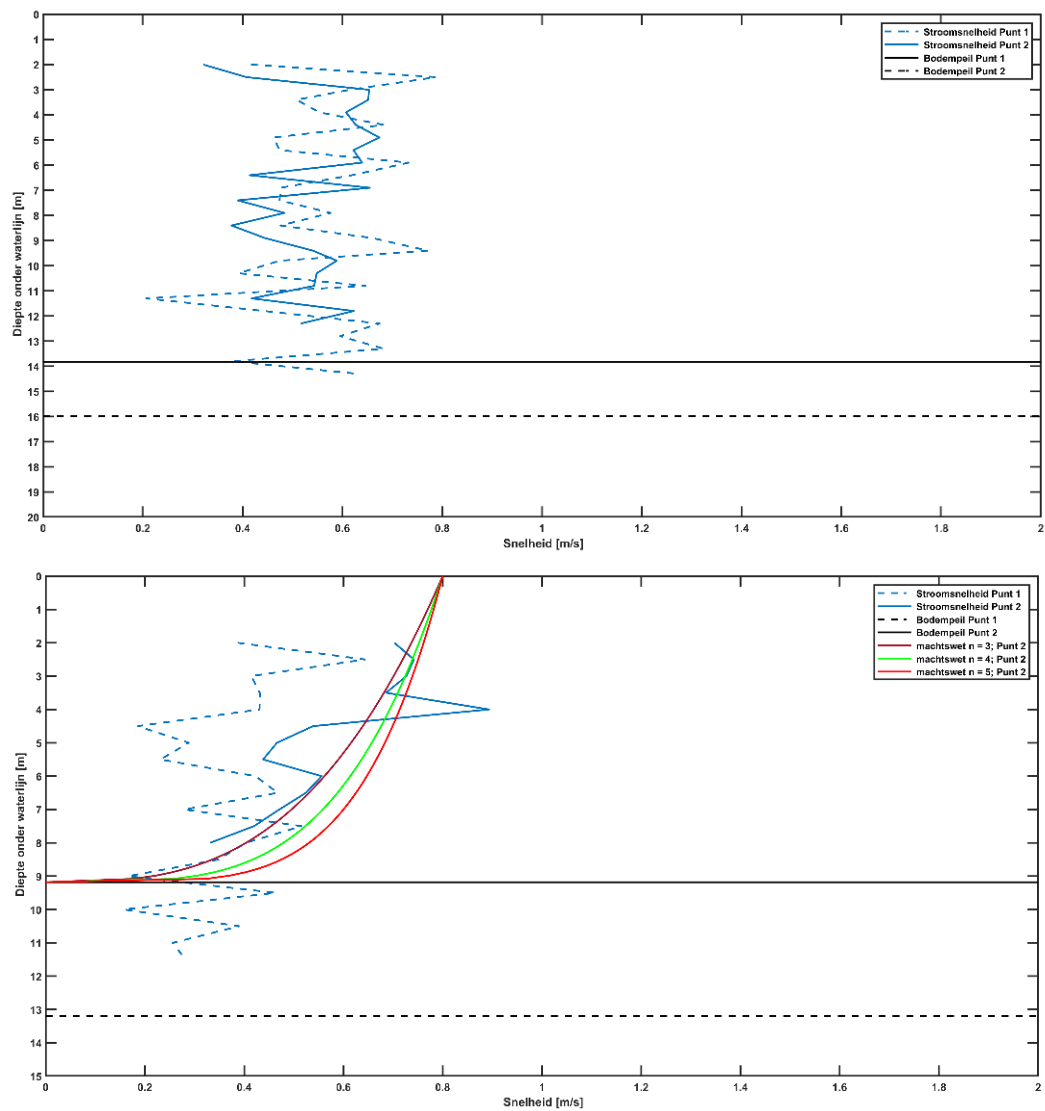
Figuur 19 – Stroomsnelheid tijdens maximum vloed en maximum eb

Voor twee punten op deze raai is in Figuur 21 de verticale variatie van de stroomsnelheid over de diepte bij het tijdstip van maximum vloed en bij het tijdstip van maximum eb grafisch voorgesteld. De ligging van deze twee punten op de raai is ook gegeven in Figuur 18. Figuur 20 geeft een voorstelling van de ligging van deze twee punten samen met het bodemprofiel van de betreffende raai. Uit deze figuur volgt dat Punt 2 zich op een min of meer vergelijkbare plaats in het bodemprofiel van de raai bevindt als het nieuwe meetplatform (zie ook hoofdstuk 2), namelijk in het midden van de verondieping naast de vaargeul. Figuur 21 toont de verticale variatie van de stroomsnelheid in deze twee punten tijdens maximum vloed en maximum eb. Uit deze figuur volgt dat enkel bij maximum eb in Punt 2 het snelheidsprofiel de vorm van een machtswet vertoont. De overige snelheidsprofielen zijn eerder uniform. Voor het snelheidsprofiel in de vorm van een machtswet in Punt 2 bij maximum eb is getracht om hier een machtswet door te fitten. Voor $n = 3$ à 4 volgt dat de vorm van de gefitte machtswet relatief goed overeenkomt met het opgemeten profiel. Dit is iets lager of gelijk aan de ondergrens van de typische waarden van 4 à 7 uit de literatuur.

Bij de snelheidsprofielen dewelke tijdens de terreinmeting zijn opgemeten, moet opgemerkt worden dat het getij waarbij de terreinmeting is uitgevoerd een doottij betrof, terwijl voor dit advies een springtij en extremere getijden beschouwd worden. De stroomsnelheden bij springtij en de meer extremere getijden zijn hoger dan bij doottij, wat ook invloed heeft op de vorm van het snelheidsprofiel. Besluiten met betrekking tot de vorm van het snelheidsprofiel tijdens springtij en de getijden in de extreme toestand kunnen niet genomen worden op basis van één terreinmeting uitgevoerd bij doottij.



Figuur 20 – Situering punt 1 en punt 2 in de raai van de meetcampagne



Boven: maximum vloed; onder: maximum eb

Figuur 21 – Verticale variatie van de stroomsnelheid in punt 1 en punt 2 tijdens maximum vloed en maximum eb

5 Conclusies

De huidige meetpaal ter hoogte van Prosperpolder wordt in de toekomst vervangen door een nieuw meetplatform, dat zich meer in de richting van de vaargeul situeert. Het structureel ontwerp van dit meetplatform wordt uitgevoerd in opdracht van afdeling Maritieme Toegang (contactpersoon: Thomas Maes). Het meetplatform wordt hierbij ondersteund door 3 buispalen. De 3 buispalen worden aan elkaar verbonden met behulp van een frame. Voor het ontwerp van deze buispalen en het meetplatform zijn ook gegevens nodig met betrekking tot de krachten op de buispalen ten gevolge van de stroming. Dat is het onderwerp van dit rapport. Op basis van een literatuurstudie, en rekening houdende met de vastgestelde onzekerheden, wordt in dit rapport een (pragmatisch) voorstel gedaan voor te hanteren sleepkrachten en liftkrachten.

Vooreerst is een uitspraak gedaan over de **oriëntatie van het meetplatform**. Hiervoor zijn twee oriëntaties beschouwd. Enerzijds is de oriëntatie beschouwd waarbij de tophoek van de gelijkzijdige driehoek tegen de maximale vloedstroming in gericht is, anderzijds is de oriëntatie beschouwd waarbij de basis van de gelijkzijdige driehoek tegen de maximale vloedstroming in gericht is (zie ook Figuur 22). Wat sleepcoëfficiënten betreft worden eerder beperkte verschillen tussen de beide configuraties vastgesteld. Bij de configuratie met de tophoek van de driehoek tegen de vloedstroming in gericht zijn de liftkrachten op de buispalen ter plaatse van de basis van de driehoek naar elkaar toe gericht. Bij de configuratie met de basis van de driehoek tegen de vloedstroming in gericht is er enige onzekerheid betreffende de richting van de liftkrachten op de buispalen ter plaatse van de basis van de driehoek. Omwille van deze onzekerheid gaat de voorkeur uit naar de configuratie waarbij de tophoek van de driehoek tegen de vloedstroming in gericht is. Bij deze configuratie wordt opgemerkt dat in de figuur de buispaal ter plaatse van de tophoek van de gelijkzijdig driehoek en de twee losse buispalen in elkaars verlengde liggen. Dit hoeft in praktijk niet noodzakelijk het geval te zijn. Het is perfect mogelijk dat de buispaal die de tophoek van de driehoek vormt om constructieve of nautische redenen niet in het verlengde ligt van de twee losse buispalen maar er bijvoorbeeld een beperkte hoek mee vormt.

Voor het bepalen van de kracht op de buispalen van het meetplatform zijn de stroomsnelheden, waterdieptes, de sleepcoëfficiënt en de liftcoëfficiënt voor een cilindervormige paal in een stroming bepaald. Hierbij zijn een aantal **onzekerheden** vastgesteld. De waarden voor de **sleep- en de liftcoëfficiënt** voor een groep van 3 palen in de vorm van een gelijkzijdige driehoek in de stroming, die in de literatuur zijn teruggevonden, zijn voornamelijk afgeleid op basis van windtunnelproeven met cilinders in een uniforme stroming. Deze proeven zijn meestal uitgevoerd voor lagere Reynoldsgetallen van de stroming, lagere turbulentie-intensiteiten van de stroming en gladde palen in plaats van palen met een zekere ruwheid.

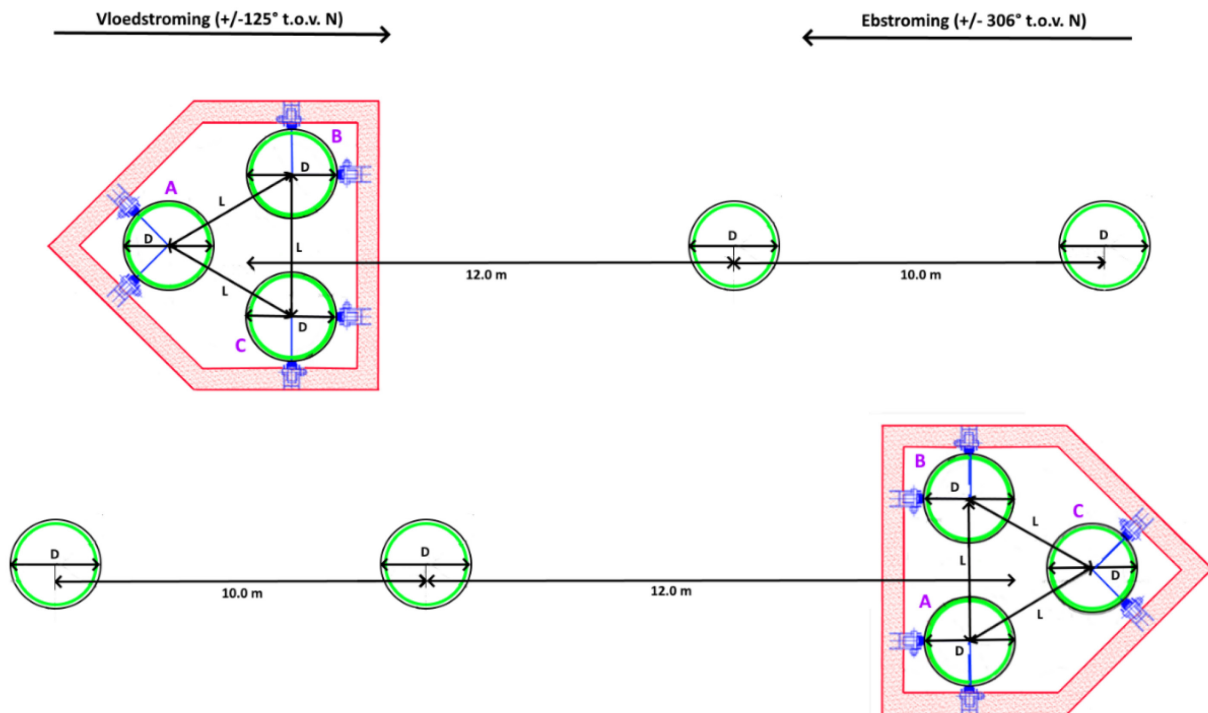
Naast de hierboven vermelde onzekerheden op de sleep- en de liftcoëfficiënt zijn er nog volgende bijkomende **onzekerheden** die in dit rapport niet expliciet gekwantificeerd konden worden:

- De aanstroming van de paal of de groep van drie palen is niet uniform, zoals in de windtunneltesten op basis waarvan de (meeste) gepubliceerde coëfficiënten gebaseerd zijn, maar betreft een afschuifstroming ("shear").
- Aan het vrije wateroppervlak en ter plaatse van de paalvoet doen er zich randeffecten voor.
- Op 10 m voorbij de groep van 3 palen en daarna nog eens 12 m verder bevinden zich twee losse buispalen. Afhankelijk van de stromingsrichting bevindt de palengroep zich in het zog van deze palen, waar zich een stroming met hoge turbulentie voordoet. Dit heeft tot gevolg dat de stroming ter plaatse van de palengroep voor bepaalde stromingsrichtingen een beduidend hogere turbulentie-intensiteit zal kennen dan in de in de literatuur beschouwde cases.

Om rekening te houden met al deze onzekerheden bij het structureel ontwerp, is voor de bepaling van de **sleepkracht** van één enkele buispaal in de stroming een waarde van de sleepcoëfficiënt voorgesteld in de range 0.6 à 1.2 en wordt dezelfde range als pragmatische oplossing voorgesteld voor één buispaal uit de palengroep. Hierbij wordt opgemerkt dat indien men voor elk van de 3 palen een identieke sleepcoëfficiënt van 1.2 hanteert de totale kracht op de palengroep wordt overschat, maar dat een identieke coëfficiënt van 0.9 wel een meer realistische bovengrens is. Indien de kracht op één buispaal van de palengroep begroot dient te worden kan daarentegen een sleepcoëfficiënt gelijk aan 1.2 wel beschouwd worden als bovengrens. Tabel 17 geeft de berekening van de sleepkrachten op één geïsoleerde buispaal en één buispaal uit de palengroep aan de hand van deze waarden. Uit deze tabel volgt dat de sleepkracht op één buispaal uit de palengroep in de normale toestand varieert tussen 294 N/m en 1553 N/m en in de extreme toestand tussen 2663 N/m en 9734 N/m.

Voor de berekening van de **liftkrachten** op één geïsoleerde paal in een stroming wordt een liftcoëfficiënt beschouwd, die gemiddeld in de tijd gelijk is aan nul maar fluctueert met een rms-waarde van 0.1 à 0.2 met een typische frequentie die gekarakteriseerd wordt door een Strouhalgetal van ca. 0.25. Voorgesteld wordt om de liftkracht op een individuele paal niet mee te nemen, tenzij de opdrachtgever dit noodzakelijk acht in de ontwerpberekeningen. Voor de bepaling van de liftkracht op de buispalen van het meetplatform wordt een onderscheid gemaakt tussen de stroming bij vloed en de stroming bij eb. Voor de buispaal ter plaatse van de tophoek van de driehoek wordt zowel bij vloed als bij eb een waarde 0.10 voor de liftcoëfficiënt beschouwd. Het teken van de liftkracht op deze buispaal kan zowel negatief als positief van teken zijn. Voor de buispalen ter plaatse van de basis wordt bij vloed een waarde van de liftcoëfficiënt beschouwd die varieert van 0.10 tot 0.30 en die exceptioneel 0.60 kan bedragen. De krachten op deze beide buispalen staan naar elkaar toe gericht. Bij eb wordt voor de buispalen ter plaatse van de basis een waarde voor de liftcoëfficiënt beschouwd die varieert tussen 0.10 en 0.30. Het teken van de liftkracht kan hierbij zowel positief als negatief zijn. Aan de hand van deze waarden voor de liftcoëfficiënt zijn in Tabel 18 en Tabel 19 de liftkrachten bij eb en bij vloed op de afzonderlijke buispalen van de palengroep begroot. Bij vloed varieert de liftkracht in de normale toestand tussen -129 N/m en 129 N/m voor buispaal A, tussen -776 N/m en -129 N/m voor buispaal B en tussen 129 N/m en 776 N/m voor buispaal C. In extreme toestand wordt bij vloed een liftkracht berekend die voor buispaal A varieert tussen -444 N/m en 811 N/m, voor buispaal B tussen -444 N/m en -4867 N/m en voor buispaal C tussen 444 N/m en 4867 N/m. Bij eb varieert de liftkracht in normale toestand tussen -147 N/m en 147 N/m voor buispaal A en voor buispaal B en tussen -49 N/m en 49 N/m voor buispaal C. In extreme toestand wordt bij eb een liftkracht berekend die voor buispaal A en buispaal B varieert tussen -1981 N/m en 1981 N/m en voor buispaal C varieert tussen -661 N/m en 661 N/m.

Omwille van al de onzekerheden, verdient het aanbeveling dat de opdrachtgever de hier aangereikte begroting van de sleep- en liftkrachten eerst beoordeelt en nagaat of de geraamde bovengrenzen van de krachten (en momenten) een haalbaar ontwerp van de buispalen van het meetplatform opleveren. Indien dit niet zo is, verdient het aanbeveling om na te gaan of dit laatste wel het geval is voor de voorgestelde ondergrenzen van de krachten (en momenten). Indien nodig kan daarna in onderling overleg nagegaan worden of op één of andere wijze de raming van de krachten verbeterd kan worden.



Boven: Tophoek van driehoek tegen vloedstroming in gericht; onder: Basis van driehoek tegen vloedstroming in gericht.

Figuur 22 – Beschouwde oriëntaties voor bepaling oriëntatie meetplatform

Tabel 17 – Sleepkracht op een geïsoleerde paal en een paal in een groep van 3 palen tijdens vloed en eb in normale en extreme toestand

			Symbol	Eenheid	Normale toestand			Extreme toestand					
Diameter buispaal			D	m	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42
Eén geïsoleerde buispaal	Vloed	Waterdiepte	h	m	15.02	15.02	15.02	18.74	18.74	18.74	18.74	18.74	18.74
		Stroomsnelheid	U	m/s	1.35	1.35	1.35	3.38	3.38	3.38	2.50	2.50	2.50
		Sleepcoëfficiënt	C_D	-	0.6	0.9	1.2	0.6	0.9	1.2	0.6	0.9	1.2
		Sleepkracht	F_D	N/m	776	1165	1553	4867	7300	9734	2663	3994	5325
	Eb	Waterdiepte	h	m	12.50	12.50	12.50	12.16	12.16	12.16	12.16	12.16	12.16
		Stroomsnelheid	U	m/s	0.83	0.83	0.83	3.05	3.05	3.05	2.50	2.50	2.50
		Sleepcoëfficiënt	C_D	-	0.6	0.9	1.2	0.6	0.9	1.2	0.6	0.9	1.2
		Sleepkracht	F_D	N/m	294	440	587	3963	5944	7926	2663	3994	5325
Eén buispaal in een groep van 3 palen	Vloed	Waterdiepte	h	m	15.02	15.02	15.02	18.74	18.74	18.74	18.74	18.74	18.74
		Stroomsnelheid	U	m/s	1.35	1.35	1.35	3.38	3.38	3.38	2.50	2.50	2.50
		Sleepcoëfficiënt	C_D	-	0.6	0.9	1.2	0.6	0.9	1.2	0.6	0.9	1.2
		Sleepkracht	F_D	N/m	776	1165	1553	4867	7300	9734	2663	3994	5325
	Eb	Waterdiepte	h	m	12.50	12.50	12.50	12.16	12.16	12.16	12.16	12.16	12.16
		Stroomsnelheid	U	m/s	0.83	0.83	0.83	3.05	3.05	3.05	2.50	2.50	2.50
		Sleepcoëfficiënt	C_D	-	0.6	0.9	1.2	0.6	0.9	1.2	0.6	0.9	1.2
		Sleepkracht	F_D	N/m	294	440	587	3963	5944	7926	2663	3994	5325

Tabel 18 – Liftkracht per eenheidslengte op buispaal in palengroep tijdens vloed in normale toestand en extreme toestand

	Symbool	Eenheid	Normale toestand			Extreme toestand					
Waterdiepte	h	m	15.02	15.02	15.02	18.74	18.74	18.74	18.74	18.74	18.74
Stroomsnelheid	U	m/s	1.35	1.35	1.35	3.38	3.38	3.38	2.50	2.50	2.50
Diameter buispaal	D	m	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42
Sleepcoëfficiënt buispaal A	C _{D,A}	-	-0.1	0.1		-0.1	0.1		-0.1	0.1	
Sleepkracht buispaal A	F _{D,A}	N/m	-129	129		-811	811		-444	444	
Sleepcoëfficiënt buispaal B	C _{D,B}	-	-0.6	-0.3	-0.1	-0.6	-0.3	-0.1	-0.6	-0.3	-0.1
Sleepkracht buispaal B	F _{D,B}	N/m	-776	-388	-129	-4867	-2433	-811	-2663	-1331	-444
Sleepcoëfficiënt buispaal C	C _{D,C}	-	0.1	0.3	0.6	0.1	0.3	0.6	0.1	0.3	0.6
Sleepkracht buispaal C	F _{D,C}	N/m	129	388	776	811	2433	4867	444	1331	2663

Tabel 19 – Liftkracht per eenheidslengte op buispaal in palengroep tijdens eb in normale toestand en extreme toestand

	Symbool	Eenheid	Normale toestand				Extreme toestand							
Waterdiepte	h	m	12.50	12.50	12.50	12.50	12.16	12.16	12.16	12.16	12.16	12.16	12.16	12.16
Stroomsnelheid	U	m/s	0.83	0.83	0.83	0.83	3.05	3.05	3.05	3.05	2.5	2.5	2.5	2.5
Diameter buispaal	D	m	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42
Sleepcoëfficiënt buispaal A	C _{D,A}	-	-0.3	-0.1	0.1	0.3	-0.3	-0.1	0.1	0.3	-0.3	-0.1	0.1	0.3
Sleepkracht buispaal A	F _{D,A}	N/m	-147	-49	49	147	-1981	-661	661	1981	-1331	-444	444	1331
Sleepcoëfficiënt buispaal B	C _{D,B}	-	-0.3	-0.1	0.1	0.3	-0.3	-0.1	0.1	0.3	-0.3	-0.1	0.1	0.3
Sleepkracht buispaal B	F _{D,B}	N/m	-147	-49	49	147	-1981	-661	661	1981	-1331	-444	444	1331
Sleepcoëfficiënt buispaal C	C _{D,C}	-	-0.1		0.1		-0.1		0.1		-0.1		0.1	
Sleepkracht buispaal C	F _{D,C}	N/m	-49		48.9		-661		661		-444		444	

6 Referenties

- Bardowicks, H.** (1984). A new six component balance and applications on wind tunnel models of slender structures. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 16: 341–349
- Chu, K.; Vanlede, J.; Decrop, B.; Verwilligen, J.; Mostaert, F.** (2017). Update snelheidsvelden Zeeschelde en Sluistoegangen: technical Report. Version 2.. *FHR reports*, 00_081_1. Flanders Hydraulics Research: Antwerp. Available at: <http://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=292688>
- Gerhardt, H.J.; Kramer, C.** (1981). Interference effects for groups of stacks. *J. Wind Eng.* 8: 195–202
- Gu, Z.; Sun, T.** (2001). Classification of flow pattern on three circular cylinders in equilateral-triangular arrangements. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 89(6): 553–568. doi:10.1016/S0167-6105(00)00091-X
- 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. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. Available at: <http://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=295302>
- IMDC NV; WL|Delft Hydraulics; Gems International.** (2005). Uitbreiding studie dichtheitsstromingen in de Beneden Zeeschelde in het kader van LTV meetcampagne naar hooggeconcentreerde slibsuspensies. Deelrapport 2.2 Zandvliet (17 februari 2005). Ministerie van de Vlaamse gemeenschap. Afdeling Waterbouwkundig en Hydrologisch Onderzoek
- Mutlu Sumer, B.; Fredsoe, J.** (2006). Hydrodynamics around cylindrical structures. *Advanced Series on Ocean Engineering*, 26. World Scientific: New Jersey. ISBN 981-270-039-0
- Naudascher, E.** (1991). Hydrodynamic forces. *Hydraulic Structures Design Manual: Hydraulic Design Considerations*, 3. Balkema: Rotterdam. ISBN 90-6191-993-2
- Peeters, P.; Taverniers, E.; Mostaert, F.** (2009). Studie ten behoeve van aanleg van overstromingsgebieden en natuurgebieden in het kader van het Sigmaplan: hydraulische randvoorwaarden voor toetsen op en ontwerpen naar veiligheid. *WL Rapporten*, 713_15a. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- Pouryousefi, S.G.; Mirzaei, M.; Pouryousefi, S.M.H.** (2011). Force coefficients and Strouhal numbers of three circular cylinders subjected to a cross-flow. *Arch. Appl. Mech.* 81(11): 1725–1741. doi:10.1007/s00419-011-0514-3
- Qiu, X.; Liu, H.; He, M.; He, R.; Dong, J.** (2017). Experimental study for the cross-flow around three cylinders in an isosceles right triangle configuration. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 170(August): 185–196. doi:10.1016/j.jweia.2017.08.013
- Sayers, A.T.** (1987). Flow interference between three equispaced cylinders when subjected to a cross flow. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 26: 1–19
- Tatsuno, M.; Amamoto, H.; Ishi-i, K.** (1998). Effects of interference among three equidistantly arranged cylinders in a uniform flow. *Fluid Dyn. Res.* 22(5): 297–315. doi:10.1016/S0169-5983(97)00040-3

Taverniers, E.; Mostaert, F. (2009). Overzicht van de tijwaarnemingen in het Zeescheldebekken gedurende het decennium 1991-2000: T.O. tijwaarnemingen Zeescheldebekken 1991-2000. *WL Rapporten*, 833_01. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Vanlierde, E.; Michielsen, S.; Vereycken, K.; Hertoghs, R.; Meire, D.; Deschamps, M.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2016). Tienjarig overzicht van de tijwaarnemingen in het Zeescheldebekken: decennium 2001-2010. *WL Rapporten*, 12_071. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

7 Bijlage 1 Tabellen

Tabel 20 – Sleepcoëfficiënt C_d voor een paal in een groep van 3 palen uit
Bardowicks, (1984), Sayers, (1987), Tatsuno *et al.* (1998), Pouryoussefi *et al.* (2011), Gu & Sun, (2001) en Qiu *et al.* (2017)

Referentie	Reynolds- getal	Turbulentie- intensiteit	L/D	Paal A'						Paal B'						Paal C'						Totaal					
				0°	60°	120°	180°	min	max	0°	60°	120°	180°	min	max	0°	60°	120°	180°	min	max	0°	60°	120°	180°	min	max
Bardowicks (1984)	1×10^5	smooth flow	2.00	0.71	0.83	0.68	0.67	0.25	0.84	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			4.00	0.76	0.80	0.68	0.80	0.41	0.80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sayers (1987)	3×10^4	0.40 %	2.50	0.80	0.88	1.00	0.67	0.06	1.33	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.94	0.85	0.94	-	0.75	0.94
			3.00	0.79	1.20	1.11	0.80	0.39	1.25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.00	1.07	1.00	-	0.87	1.07
Tatsuno <i>et al.</i> (1998)	6.2×10^4	0.12 %	2.60	0.81	1.10	-	-	0.81	1.10	1.07	0.78	-	-	0.07	1.07	1.05	1.04	-	-	0.97	1.38	0.97	0.98	-	-	0.70	0.98
			3.46	0.92	1.28	-	-	0.92	1.28	1.19	1.06	-	-	0.37	1.19	1.19	1.27	-	-	1.19	1.44	1.06	1.16	-	-	0.94	1.16
Pouryoussefi <i>et al.</i> (2011)	6.08×10^4	<0.15 %	2.82	0.81	-	-	-	-	-	1.15	-	-	-	-	-	1.15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Gu & Sun (2001)	5.5×10^4	0.40 %	2.50	0.90	1.26	-	-	x	x	1.20	0.82	-	-	x	x	1.18	1.16	-	-	x	x	-	-	-	-	-	-
	5.5×10^4		4.00	0.84	1.21	-	-	x	x	1.26	1.19	-	-	x	x	1.17	1.23	-	-	x	x	-	-	-	-	-	-
Qiu <i>et al.</i> (2017)	2.1×10^5	7 %	2.30	0.41	-	-	0.43	-	-	0.22	-	-	0.43	-	-	0.28	-	-	0.02	-	-	0.84*	-	-	0.91*	-	-
	3.1×10^5	7 %	2.30	0.41	-	-	0.43	-	-	0.20	-	-	0.43	-	-	0.29	-	-	0.02	-	-	0.87*	-	-	0.93*	-	-
	2.1×10^5	16 %	2.30	0.50	-	-	0.61	-	-	0.25	-	-	0.61	-	-	0.31	-	-	0.15	-	-	1.04*	-	-	1.27*	-	-
	3.1×10^5	16 %	2.30	0.48	-	-	0.59	-	-	0.28	-	-	0.59	-	-	0.31	-	-	0.16	-	-	1.05*	-	-	1.25*	-	-

- = waarde niet gegeven in betreffende referentie;

* = Totale waarde is op een andere wijze berekend dan bij overige referenties.

x = Door conversie naar beschouwde configuratie kunnen minimale en maximale waarden niet bepaald worden.

Tabel 21 – Liftcoëfficiënt C_L voor een paal in een groep van 3 palen uit
Bardowicks, (1984), Sayers, (1987), Tatsuno *et al.* (1998), Pouryoussefi *et al.* (2011), Gu & Sun, (2001) en Qiu *et al.* (2017)

Referentie	Reynolds- getal	Turbulentie- intensiteit	L/D	Paal A'						Paal B'						Paal C'						Totaal					
				0°	60°	120°	180°	min	max	0°	60°	120°	180°	min	max	0°	60°	120°	180°	min	max	0°	60°	120°	180°	min	max
Bardowicks (1984)	1×10^5	smooth flow	2.00	0.05	0.06	0.00	0.00	-0.59	0.58	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			4.00	0.04	0.07	0.40	0.00	-0.15	0.40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sayers (1987)	3×10^4	0.40 %	2.50	0.00	0.19	-0.14	0.07	-0.67	1.05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.00	0.08	0.00	-	-0.34	0.35
			3.00	-0.01	0.05	-0.18	0.00	-0.52	0.60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.00	0.00	0.00	-	-0.20	0.20
Tatsuno <i>et al.</i> (1998)	6.2×10^4	0.12 %	2.60	0.00	0.09	-	-	0.00	0.09	-0.20	0.00	-	-	-0.73	0.98	0.25	-0.11	-	-	-0.11	0.25	0.00	0.00	-	-	-0.24	1.02
			3.46	0.00	0.09	-	-	0.00	0.09	-0.17	0.02	-	-	-0.64	0.61	0.17	-0.04	-	-	-0.04	0.17	0.00	0.00	-	-	-0.21	0.22
Pouryoussefi <i>et al.</i> (2011)	6.08×10^4	<0.15 %	2.82	0.00	-	-	-	-	-	-0.17	-	-	-	-	-	0.17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Gu & Sun (2001)	5.5×10^4	0.40 %	2.50	-0.14	0.07	-	-	x	x	-0.30	-0.04	-	-	x	x	0.14	-0.27	-	-	x	x	-	-	-	-	-	-
	5.5×10^4		4.00	-0.09	-0.03	-	-	x	x	-0.09	0.04	-	-	x	x	0.20	-0.19	-	-	x	x	-	-	-	-	-	-
Qiu <i>et al.</i> (2017)	2.1×10^5	7 %	2.30	-0.01	-	-	-0.02	-	-	-0.06	-	-	-0.02	-	-	0.00	-	-	-0.07	-	-	-0.03*	-	-	-0.03*	-	-
	3.1×10^5	7 %	2.30	0.00	-	-	0.00	-	-	-0.06	-	-	0.00	-	-	0.00	-	-	-0.08	-	-	-0.01*	-	-	-0.03*	-	-
	2.1×10^5	16 %	2.30	0.02	-	-	0.00	-	-	-0.04	-	-	-0.04	-	-	0.04	-	-	-0.02	-	-	0.01*	-	-	0.03*	-	-
	3.1×10^5	16 %	2.30	0.03	-	-	0.00	-	-	-0.04	-	-	-0.04	-	-	0.03	-	-	-0.01	-	-	0.01*	-	-	0.05*	-	-

- = waarde niet gegeven in betreffende referentie;

* = Totale waarde is op een andere wijze berekend dan bij overige referenties.;

x = Door conversie naar beschouwde configuratie kunnen minimale en maximale waarden niet bepaald worden.

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