



Vlaanderen
is wetenschap

22_075_2
WL rapporten

Leie – natuurvriendelijke oevers pand 140

Deelrapport 2 – Analyse rapport

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

Leie – natuurvriendelijke oevers pand 140

Deelrapport 2 – Analyse rapport

Vercruysse, J.; De Roo, S.



Medegefinancierd door
de Europese Unie

Waterbouwkundig
Laboratorium



Vlaanderen
is wetenschap

Juridische kennisgeving

In deze publicatie wordt slechts de mening van de auteur weergegeven. De Europese Unie is niet aansprakelijk voor het gebruik dat eventueel wordt gemaakt van de informatie in deze publicatie.

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 2026
D/2026/3241/017

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Vercruysse, J.; De Roo, S. (2026). Leie – natuurvriendelijke oevers pand 140: Deelrapport 2 – Analyse rapport. Versie 4.0. WL Rapporten, 22_075_2. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

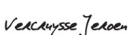
Overname uit en verwijzingen naar deze publicatie worden aangemoedigd, mits correcte bronvermelding.

Documentidentificatie

Opdrachtgever:	De Vlaamse Waterweg – afdeling regio West	Ref.:	WL2026R22_075_2
Trefwoorden (3-5):	scheepsgolf; erosiebescherming, in situ meting, natuurvriendelijke oever, golfdemping		
Kennisdomeinen:	Dijken, oevers en andere waterkeringen> Erosiebescherming > In situ metingen Dijken, oevers en andere waterkeringen> Erosiebescherming > Literatuur- en desktoponderzoek Literatuur- en desktoponderzoek Hydrodynamica > Golven > In situ metingen Golfopwekking door schepen > Invloed op oevers en bodem > In situ metingen		
Tekst (p.):	54	Bijlagen (p.):	16
Vertrouwelijk:	☒ Nee	☒ Online beschikbaar	

Auteur(s):	Vercruysse, J.
------------	----------------

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	De Roo, S.	Getekend door: Sieglie De Roo (Signatur) Getekend op: 2026-03-02 13:22:01 +01:0 Reden: Ik keur dit document goed  
Projectleider:	Vercruysse, J.	Getekend door: Jeroen Vercruysse (Signa) Getekend op: 2026-03-02 12:33:48 +01:0 Reden: Ik keur dit document goed  

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Bellafkih, K.	Getekend door: Bellafkih Abdelkarim Getekend op: 2026-03-02 14:58:22 +01:0 Reden: Ik keur dit document goed  
-----------------	---------------	---

Abstract

In het kader van het Seine-Scheldeproject wordt de Leie opgewaardeerd naar een CEMT-klasse Vb vaarweg. Dit omvat de verbreding en verdieping van de Leie. Daarnaast worden, flankerend, ook natuurvriendelijke oevers, vispassages, fauna-uitstapplaatsen, ... voorzien om de Leie als rivier te herstellen. De aanleg van de natuurvriendelijke oevers is in 2022 gestart in het afwaartse deel van pand 140. Een van de concepten betreft een ontwerp met een voorliggende breuksteenberm en een tussenliggende plasberm.

De Vlaamse Waterweg afdeling Regio West heeft het Waterbouwkundig Laboratorium gevraagd om een hydraulische evaluatie en validatie van de ontwerpmethodiek uit voeren voor dit concept. Hiervoor heeft WL van 2 juli 2024 tot en met 16 juli 2024 een in situ terreinmeting uitgevoerd. Tijdens deze terreinmeting werd hoogfrequent het peil in de Leie en in de plasberm opgemeten, werd een DTM opgesteld aangevuld met bathymetrische metingen en werd een AIS analyse uitgevoerd op de scheepsbewegingen. Gedurende deze twee weken werden in totaal 755 scheepspassages geregistreerd.

De preverwerking van de metingen werd behandeld onder een eerste deelrapport. Dit tweede deelrapport bevat de hydraulische evaluatie van de ontwerpmethodiek.

Vooreerst wordt een beschrijving van de scheepspassages aan de hand van de drone opnames, metingen en vaststellingen ter plaatse gegeven. Voor de 755 opgemeten scheepspassages wordt een golfkarakterisatie van de primaire en secundaire golven doorgevoerd. De opgemeten vaarsnelheid en golfkarakteristieken worden vervolgens voorgesteld in functie van de scheepsklasse en het al dan niet geladen zijn en vergeleken met de waarden uit het ontwerp. Ook wordt de transmissie van de primaire en secundaire golf van Leie naar plasberm voorgesteld. Hieruit volgde dat, binnen de tijdens metingen voorkomende waterpeilrange, de breuksteenberm de secundaire golf vrijwel geheel dempt. De demping van de primaire golf is in functie van het gemiddeld waterpeil en de grootte van de waterspiegeldaling. De meting werd uitgevoerd tijdens de zomerperiode met een beperkte peilvariatie. Aanbevolen wordt om een bijkomende meetcampagne uit te voeren tijdens wascondities bij verhoogd peil.

Van de vaarsnelheid en primaire en secundaire golfkarakteristieken wordt een hindcast berekening uitgevoerd op basis van formuleringen uit de Rock Manual, de handleiding van Dipro en een handboek van de Bundesanstalt für Wasserbau. Uit deze hindcast volgde dat er een behoorlijke onzekerheid is op de berekende primaire en secundaire golf. Waar mogelijk wordt geadviseerd om voor toekomstige ontwerpen te vertrekken van metingen. Met de belangrijke bemerking dat deze metingen nog geen CEMT VB bevatten.

Tot slot werd nog een validatie uitgevoerd van de bij ontwerp gebruikte formulering voor de golftransmissie. Hieruit volgde dat de bij ontwerp toegepaste formulering niet representatief is voor de situatie van de Leie.

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de tabellen.....	VII
Lijst van de figuren	VIII
1 Inleiding	1
2 Beschrijving metingen	2
3 Beschrijving scheepspassages	4
4 Golfkarakterisatie	11
4.1 Primaire golf	11
4.2 Secundaire golf.....	13
5 Analyse metingen	14
5.1 Vergelijking vaarsnelheden en golfhogte tijdens ontwerp met metingen	14
5.2 Onverstoorde passages met AIS	17
5.2.1 Primaire en secundaire golf Leie	17
5.2.2 Primaire en secundaire golf plasberm.....	20
5.2.3 Transmissie	24
5.3 Onverstoorde passages zonder AIS.....	25
5.4 Kruising schepen	26
6 Validatie formule scheepsgeïnduceerde golfbeweging	27
6.1 Rock manual.....	27
6.1.1 Vaarsnelheid	27
6.1.2 Primaire golf.....	30
6.1.3 Secundaire golf	33
6.2 Dipro.....	34
6.2.1 Vaarsnelheid	35
6.2.2 Primaire golf.....	35
6.3 Vergelijking met memo SBE	37
7 BAW	40
7.1 Algemeen	40
7.2 Vaarsnelheid.....	41
7.3 Primaire golf	42
7.4 Secundaire golf.....	46

8	Validatie formule transmissiecoëfficiënt.....	48
9	Conclusies	52
10	Referenties	54
Bijlage A	Dempingscorrectie druksensoren.....	B1
Bijlage B	CEMT classificatie en lading.....	B5
Bijlage C	Vaarwegprofiel	B7
Bijlage D	Controle snelheidsmeting.....	B9
Bijlage E	Passages met drone opname.....	B11

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Scheepspassage met snelheidsmeting	9
Tabel 2 – Vergelijking ontwerp vaarsnelheid met uit de metingen afgeleid vaarsnelheid [km/h]	15
Tabel 3 – Vergelijking ontwerpwaarden met de gemiddelde uit de metingen	16
Tabel 4 – Transmissiecoëfficiënt CUR201	48
Tabel 5 – Aantal beschouwde scheepspassages golfcorrectie i.f.v. diepte.....	B2
Tabel 6 – Kenmerken van maatgevende motorschepen.....	B5
Tabel 7 – CEMT classificatie o.b.v. lengte.....	B5
Tabel 8 – Punten aslijn bathymetrie.....	B7
Tabel 9 – Punten bepaling taludhelling onderwatertalud.....	B8

Lijst van de figuren

Figuur 1 – Vooroever met een breuksteenberm Leie ter hoogte van de meetsectie	1
Figuur 2 – Locatie drukmetingen (P1-P5) en peilmeting (P5)	2
Figuur 3 – Drone opname en metingen - passage nr. 386	5
Figuur 4 – Drone opname en metingen - scheepspassage nr. 389	6
Figuur 5 – Illustratie aanzuiging water doorheen plasberm	8
Figuur 6 – Schuin invallende secundair golfpatroon volgens op een snelvarend recreatievaartuig	8
Figuur 7 – Snelheidsmeting plasberm	9
Figuur 8 – Primaire golf tijdens scheepspassage met snelheidsmetingen.....	10
Figuur 9 – Karakterisatie primaire golf o.b.v. Rock Manual (CIRIA; CUR, 2007)	11
Figuur 10 – Illustratie bepaling primaire golf karakteristieken	12
Figuur 11 – Illustratie bepaling secundaire golfhoogte.....	13
Figuur 12 – Haalgolf Leie in functie van vaarsnelheid en CEMT classificatie	17
Figuur 13 – Gemiddelde waterspiegeldaling Leie in functie van vaarsnelheid en CEMT classificatie	18
Figuur 14 – Integratie waterspiegeldaling overheen duurtijd Leie in functie van vaarsnelheid en CEMT classificatie	19
Figuur 15 – Secundaire golfhoogte Leie in functie van vaarsnelheid en CEMT classificatie	20
Figuur 16 – Haalgolf plasberm in functie van vaarsnelheid en CEMT classificatie.....	21
Figuur 17 – Integratie waterspiegeldaling overheen duurtijd Leie in functie van vaarsnelheid en CEMT classificatie	22
Figuur 18 – Secundaire golfhoogte plasberm in functie van vaarsnelheid en CEMT classificatie	23
Figuur 19 – Transmissie haalgolf Leie naar plasberm in functie van gemiddeld waterpeil P_{gem}	24
Figuur 20 – Opbouw breuksteenberm	25
Figuur 21 – Haalgolf, gemiddelde waterspiegeldaling en secundaire golfhoogte in functie van snelheid.....	26
Figuur 22 – Versterking waterspiegeldaling bij kruising van twee schepen	26
Figuur 23 – Vergelijking limietsnelheid ten opzichte van opgemeten vaarsnelheid.....	28
Figuur 24 – Vergelijking berekende ten opzichte van opgemeten vaarsnelheid	29
Figuur 25 – Parameters primaire golf Rock Manual.....	30
Figuur 26 – Voorbeeld schip in vaargeul	31
Figuur 27 – Afstand tussen damwandplank rechteroever en romp respectievelijk center schip.....	32
Figuur 28 – Vergelijking berekende waterspiegeldaling (links) ter hoogte van de oever (rechts) ten opzichte van gemeten haalgolf (formulering Rock Manual).....	32
Figuur 29 – Vergelijking berekende ten opzichte van opgemeten haalgolf (formulering Rock Manual)	33
Figuur 30 – Vergelijking berekende ten opzichte van opgemeten secundaire golfhoogte (formulering Rock Manual)	34

Figuur 31 – Vergelijking berekende ten opzichte van opgemeten haalgolf (formulering Dipro)	36
Figuur 32 – Vergelijking berekende ten opzichte van opgemeten maximale waterspiegeldaling (formulering Dipro).....	37
Figuur 33 – Trapezium vaarwegprofiel rekenblad memo hydrodynamische randvoorwaarden.....	38
Figuur 34 –Vaarwegprofiel ter hoogte van meetsectie.....	38
Figuur 35 – Afstand center schip t.o.v. as vaarweg.....	39
Figuur 36 – Vergelijking kritische vaarsnelheid volgens formulering handboek BAW ten opzichte van opgemeten vaarsnelheid.....	42
Figuur 37 – Vergelijking gemiddelde berekende waterspiegeldaling ten opzichte van opgemeten haalgolf (formulering BAW).....	44
Figuur 38 – Reductie waterspiegeldaling nabij oever in functie van relatieve lengte schip en afstand tot oever (voor $L_s/B_s = 10$)	45
Figuur 39 – Vergelijking berekende waterspiegeldaling ten opzichte van opgemeten waterspiegeldaling boeg en hek (formulering BAW).....	46
Figuur 40 – Vergelijking berekende ten opzichte van opgemeten secundaire golfhoogte (formulering BAW)	47
Figuur 41 – Transmissiecoëfficiënt golfhoogte breuksteendam CUR201	48
Figuur 42 – Dichtheidsdistributie verhouding kruinhoogte ten opzichte van inkomende golfhoogte (haalgolf en secundaire golf)	49
Figuur 43 – Vergelijking berekende transmissiecoëfficiënt ten opzichte van gemeten transmissiecoëfficiënt	50
Figuur 44 – Invallend secundair golfpatroon naar de oever toe tijdens scheepspassage nr. 390.....	51
Figuur 45 – Illustratie wateroppervlak nabij breuksteenberm bij scheepspassage nr. 389.....	B1
Figuur 46 – Correctiefactor op secundaire golfhoogte gebruik makende van drukmetingen Leie i.f.v. gem diepte.....	B2
Figuur 47 – Illustratie resultaat correctie secundaire golfhoogte bij toepassing correctiefactor overheen spectrum 0.1 Hz tot 2.5 Hz	B3
Figuur 48 – Illustratie resultaat correctie secundaire golfhoogte bij toepassing correctiefactor overheen spectrum 0.4 Hz tot 1.0 Hz	B4
Figuur 49 – Relatieve lading t.o.v. diepgang en t.o.v. laadvermogen	B6
Figuur 50 – Profiel meting	B7
Figuur 51 – Karakterisatie vaarwegprofiel o.b.v. Rock Manual.....	B8
Figuur 52 – Voorbeelden van ongeldig verklaarde vaarsnelheidsberekeningen	B9
Figuur 53 – Scheepspassage nr. 384.....	B12
Figuur 54 – Scheepspassage nr. 385.....	B13
Figuur 55 – Scheepspassage nr. 387.....	B14
Figuur 56 – Scheepspassage nr. 388.....	B15
Figuur 57 – Scheepspassage nr. 390.....	B16

1 Inleiding

In het kader van het Seine-Scheldeproject wordt de Leie opgewaardeerd naar een CEMT-klasse Vb vaarweg. Dit omvat de verbreding en verdieping van de Leie. Daarnaast worden, flankerend, ook natuurvriendelijke oevers, vispassages, fauna-uitstapplaatsen, ... voorzien om de Leie als rivier te herstellen. De aanleg van de natuurvriendelijke oevers is in 2022 gestart in het afwaartse deel van pand 140.

De Vlaamse Waterweg afdeling Regio West (contactpersoon: Stéphan Creëlle) vraagt aan afdeling Waterbouwkundig Laboratorium om een evaluatie uit te voeren van de golfdempende werking van de vooroevers en een validatie van de ontwerpmethodiek. Voor deze evaluatie werd initieel zowel een vooroever bestaande uit een breuksteenberm als een vooroever bestaande uit een palenrij beschouwd. Omwille van uitvoeringstechnische moeilijkheden bij de eerste locaties met palenrijen werd besloten om de voorkeur te geven aan de breuksteenberm. Een foto van een vooroever met een breuksteenberm wordt gegeven in Figuur 1.



Figuur 1 – Vooroever met een breuksteenberm Leie ter hoogte van de meetsectie

De validatie gebeurt door middel van waterpeilmetingen in de vaarweg en in de achterliggende plasberm. Voor de beschrijving van de schepen wordt gebruik gemaakt van AIS data. De terreinmetingen werden uitgevoerd van 2 juli 2024 tot en met 16 juli 2024.

De *factual data* verwerking van deze metingen wordt beschreven in een eerste rapport:

- **Vercruysse, J.B.; De Roo, S.** (2026) Leie – natuurvriendelijke oevers pand 140: deelrapport 1. Factual data rapportage monitoring. Versie 4.0. *WL Rapporten*, 22_075_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Dit tweede rapport bevat de hydraulische evaluatie van de werking van de breuksteenberm en de validatie van de ontwerpmethodiek.

Een korte beschrijving van de meetopstelling wordt gegeven in hoofdstuk 2. Van de met de drone opgenomen scheepspassages wordt in hoofdstuk 3 een beschrijving gegeven van de metingen en opgenomen golfpatronen. Op de metingen wordt vooreerst een karakterisatie van de opgemeten golven uitgevoerd, zie hoofdstuk 4. Volgend hierop wordt in hoofdstuk 5 een analyse uitgevoerd van de opgemeten scheepspassages zowel op vlak van vaarsnelheid, haalgolf, secundaire golf en transmissie naar de plasberm. De in het ontwerp van vooroever gebruikte formules voor de scheepsgeïnduceerde golf worden gevalideerd in hoofdstuk 6. Bijkomend wordt in hoofdstuk 7 een validatie uitgevoerd op basis van formules van de Duitse Bundesanstalt für Wasserbau (BAW). De in het ontwerp gebruikte formule voor de transmissie van de breuksteenberm wordt gevalideerd in hoofdstuk 8. De conclusies en aanbevelingen worden gegeven in hoofdstuk 9.

2 Beschrijving metingen

Een overzicht van de locatie van de ingezette druksensoren wordt gegeven in Figuur 2. De meetopstelling bestaat uit één meetraai 32 m opwaarts een tijdelijke passerelle en één meetpunt in de Leie vanop de passerelle. Bemerkt dat de metingen in de plasberm bewust niet vanop de passerelle uitgevoerd werden. Dit uit de bezorgdheid dat de passerelle, die deels in de plasberm ligt, de stroming en golfwerking zou verstoren. Gekozen werd voor de locatie 32 m opwaarts door de aanwezigheid van een paal aan Leie zijde van de breuksteenberm waaraan een druksensor gemonteerd kon worden en doordat de plasberm hier merkbaar dieper en niet begroeid was.



Figuur 2 – Locatie drukmetingen (P1-P5) en peilmeting (P5)

De scheepspassages werden door DVW aangeleverd op basis van AIS informatie aangevuld met de diepgang en tonnage uit de vaarvergunning databank. Op basis van de aangeleverde scheepspassages aangevuld met een detectie op basis van karakteristieke golfpatronen werden tijdens de duurtijd van de metingen een 755 scheepspassages geregistreerd. Voor elk van deze scheepspassages werd een tijdreeks van 5 minuten met het opgemeten peil, de primaire golf en de secundaire golf weggeschreven. Daarnaast werden per scheepspassage ook enkele relevante karakteristieken zoals het gemiddelde peil, het debiet te Machelen en de karakteristieken van het schip weggeschreven. Bemerkt dat o.w.v. GDPR deze scheepspassages geanonimiseerd zijn en geen absolute tijdstippen of identificatie gegevens bevatten.

Naast de peilmetingen en de scheepspassages werden ook nog hoogtemetingen (RTK-GNSS en fotogrammetrisch), opnames van het golfpatroon met een drone voor een 7 scheepspassages, bathymetrie metingen van de plasberm (ADCP en RTK-GNSS) en voor een 3 scheepspassages een snelheidsmeting in de plasberm uitgevoerd.

Ten opzichte van de verwerking in het factual data rapport wordt nog volgende bijkomende preverwerking uitgevoerd.

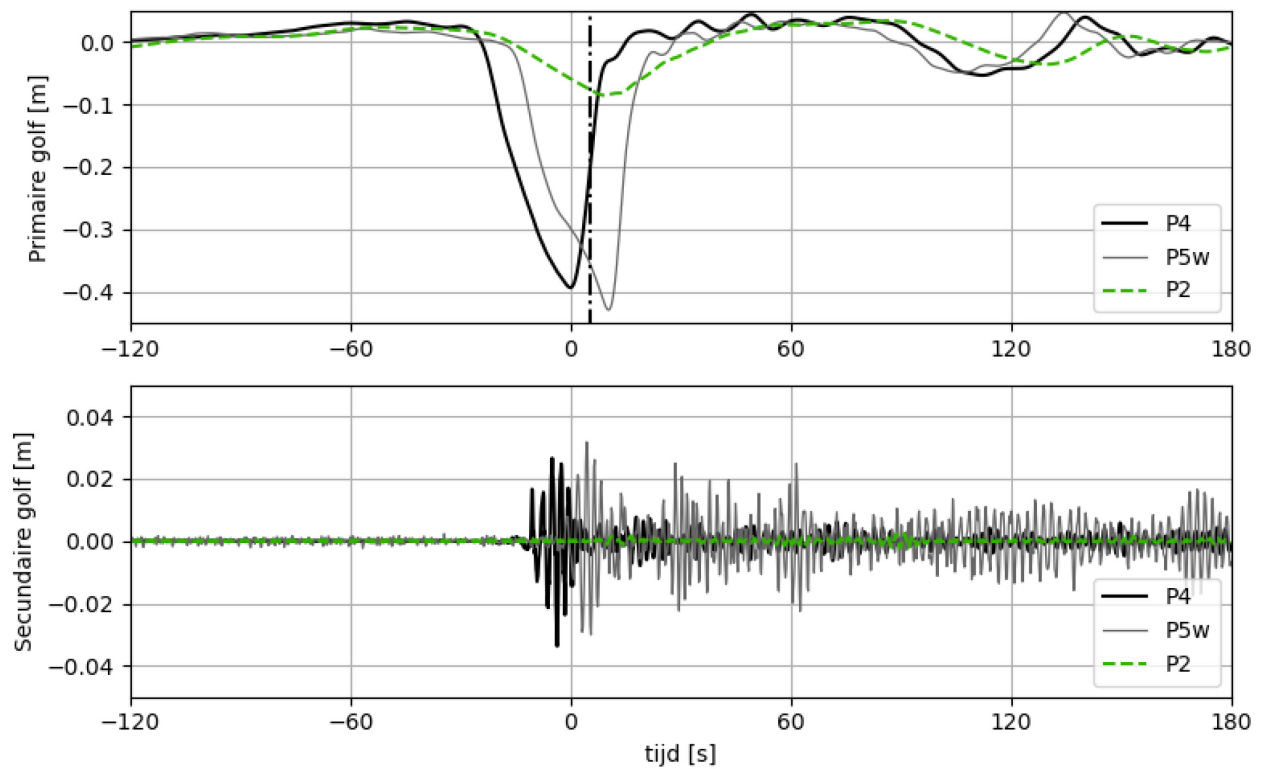
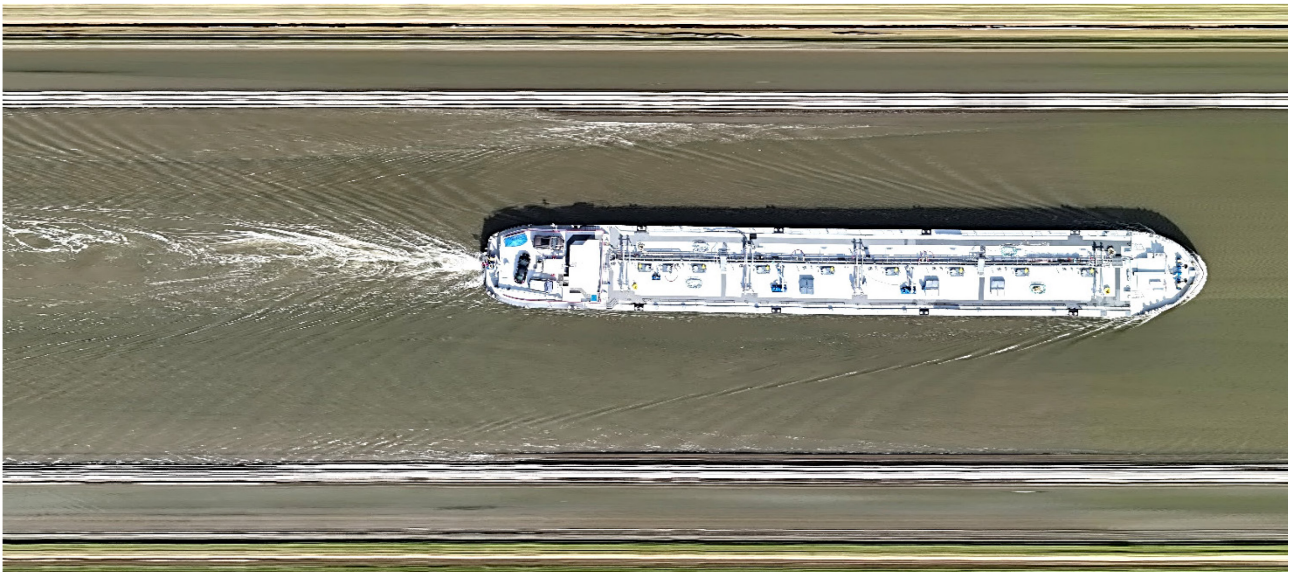
- Een karakterisatie van de golven, zie hoofdstuk 4.
- Toepassen van een correctie op de drukmetingen in de Leie, zie Bijlage A.
- Opdelen van de schepen in een CEMT classificatie en opdeling in geladen en ongeladen, zie bijlage B.
- Afleiding van het vaarwegprofiel ter hoogte van de meetraai, zie bijlage C.
- Een controle van de snelheid afgeleid uit de AIS meting en de snelheid afgeleid uit de drukmetingen op de Leie, zie bijlage D.

3 Beschrijving scheepspassages

Voor de scheepspassages waarvan een drone opname beschikbaar is, wordt een samengestelde voorstelling gegeven van het met de drone geregistreerde golfpatroon, een figuur met het verloop van het primaire en secundaire golfpatroon en een tabel met enkele karakteristieke waarden. Voor twee kenmerkende scheepspassages wordt deze voorstelling hieronder gegeven, zie Figuur 3 en Figuur 4. Voor de overige scheepspassages wordt deze voorstelling gegeven in bijlage E.

Bemerk dat in de drone opname het schip niet volledig in beeld kwam. Hierom werd een lijnscan methodiek toegepast. Het samengevoegd beeld werd in de lengterichting verschaald op basis van de vaarsnelheid van het schip zodat de lengte/breedte verhouding van het schip en ook het beeld bij benadering geometrisch correct is. Bemerk dat voor de scheepspassage met de duwboot-duwbak combinatie de drone nog niet stabiel gepositioneerd was. Omdat voor deze scheepspassage het secundaire golfpatroon het meest uitgesproken is, werd deze passage toch opgenomen in dit hoofdstuk.

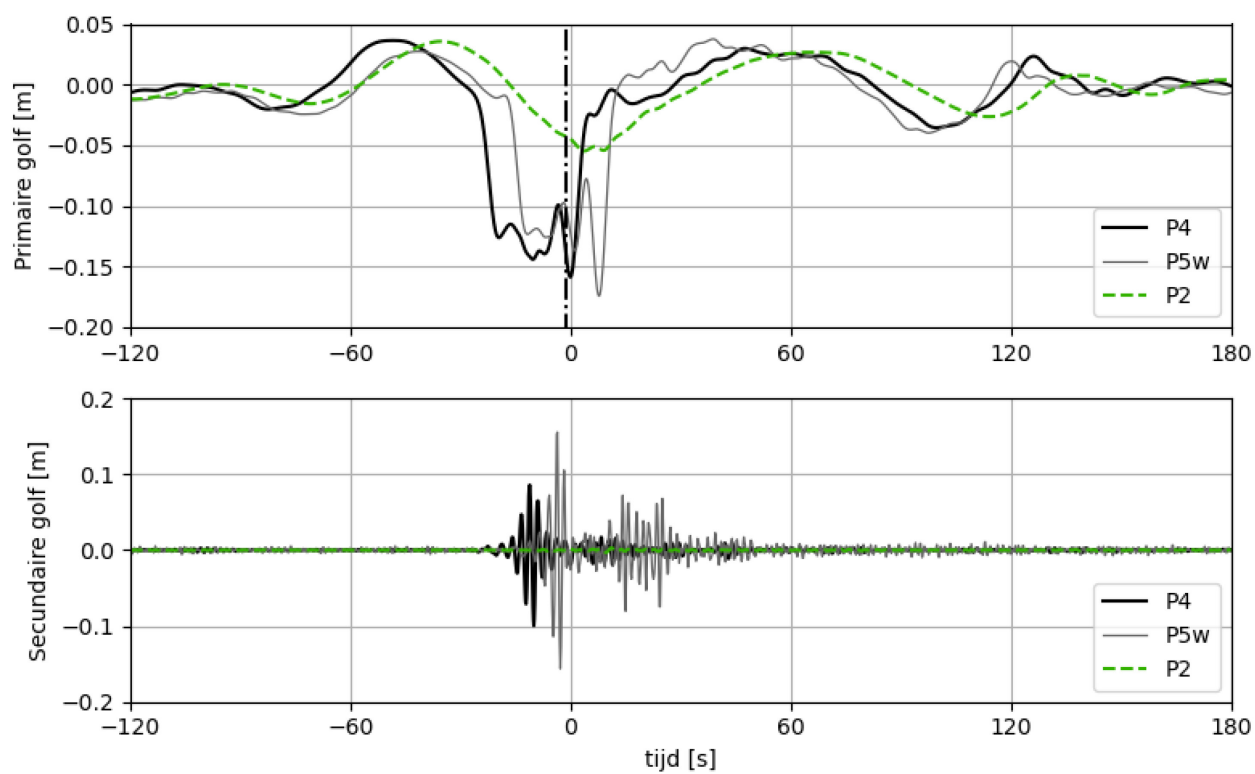
In de tabel met karakteristieke gegevens wordt naast de scheepsafmetingen ook de uit de metingen afgeleide positie van het schip in de vaargeul (Y_{cs}) gegeven, de opgemeten vaarsnelheid (V_s) en de berekende limietsnelheid (V_L). Voor de verduidelijking van de vaarsnelheid en de limietsnelheid wordt verwezen naar paragraaf 6.1. De positie van het schip in de vaarweg wordt uitgedrukt ten opzichte van het center van de vaargeul. Een positieve afstand wil zeggen dat het center van het schip naar rechteroever toe is gericht, een negatieve afstand wil zeggen dat het center van het schip naar linkeroever toe is gericht.



Passage	Peil [m TAW]	CEMT	LxB* [mxm]	Diepgang [m]	Vaarrichting [-]	Ycs [m]	Vs [m/s]	VL [m/s]
386	5.63	CEMT Va	110x12	1.6	afvaart	-0.8	3.47	3.72

* De maatgevende breedte van een CEMT Va bedraagt 11.4 m, de breedte in het aangeleverde AIS bestand was vermoedelijk naar boven afgerond tot meter precisie.

Figuur 3 – Drone opname en metingen - passage nr. 386



Passage	Peil [m TAW]	CEMT	LxB* [mxm]	Diepgang [m]	Vaarrichting [-]	Ycs [m]	Vs [m/s]	VL [m/s]
389	5.62	CEMT IV	103x10	/	afvaart	5.24	3.69	4.82

* De AIS registratie bevat alleen informatie over de duwer en niet over de combinatie. Hierom werden de breedte van de bak en de lengte van de combinatie afgeleid uit de samengestelde opname.

Figuur 4 – Drone opname en metingen - scheepspassage nr. 389

Uit * De maatgevende breedte van een CEMT Va bedraagt 11.4 m, de breedte in het aangeleverde AIS bestand was vermoedelijk naar boven afgerond tot meter precisie.

Figuur 3 en Figuur 4 volgt dat de opstuwing van de boeggolf in de plasberm vrijwel even uitgesproken is als in de Leie. Wanneer volgend op deze opstuwing het peil in de Leie afneemt en hierbij het peil in de plasberm onderschrijdt, begint ook het peil in de plasberm af te nemen. Het peil in de plasberm blijft hierbij afnemen tot net na het moment dat het peil in de Leie het peil in de plasberm terug overschrijdt. De primaire golf in de plasberm verloopt dus gedempt en met een verschuiving in tijd ten opzichte van de primaire golf in de Leie. Voor scheepspassages 384, 388 en 390 wordt in de drone opname een sedimentpluim komende uit de breuksteenberm vastgesteld. Bemerkt dat, alhoewel de waterspiegeldaling een zelfde grootteorde heeft, dit minder uitgesproken is voor de overige passages wat mogelijk verklaard kan worden door omgevingsfactoren (lichtinval, tijd ten opzichte van voorgaande passage,...). Bij installatie van de druksensoren werd de dwarse uitstroming doorheen de plasberm ook ter plaatse vastgesteld, zie Figuur 5. Na passage van het schip wisselde de stroomrichting en werd de plasberm terug gevuld. Academiejaraar 2024-2025 werd een thesisonderzoek (uitgevoerd naar de stroming in de plasberm en doorheen de breuksteenberm bij passage van een schip (Claeys, 2025).

In het verloop van de primaire golf in de tijd is een duidelijk verschil waarneembaar tussen de tanker in passage nr. 388 en de duwbak-duwboot in nr. 389. Bij de duwbak-duwboot van passage nr. 389 is er een duidelijk lokale daling ten gevolge van de boeggolf met hierop volgend een tweede minimum bij het einde van de duwbak en een derde minimum ten gevolge van de duwboot. Bij de tanker van passage nr. 386 maar ook bij de overige opgenomen motorschepen gegeven in bijlage E wordt geen uitgesproken boeggolf opgemerkt. In het primaire golfpatroon van de duwbak-duwboot combinatie wordt op 80 s volgend op diens passage een tweede inzinking teruggevonden. Dit is een patroon dat bij alle passages in afvaart in minder of sterkere mate wordt opgemerkt. Een mogelijke verklaring is een ondiep watergolf effect dat ontstaat bij passage van de afwaarts de meetsectie gelegen lokale verbreding t.h.v. de oude meander.

Ook in het verloop van het secundaire golfpatroon is de duwboot-duwbak combinatie afwijkend. Uit de drone opnames maar ook uit het verloop van het secundaire golfpatroon in de tijd volgt dat de sterkste secundaire golfhoogte veroorzaakt worden door de stompe boeg van de duwbak maar dat daarnaast ook loslating aan het hek van de duwbak in een aanzienlijke secundaire golfhoogte resulteert. Passage nr. 385 waarbij een ongeladen CEMT IV met een gelijkaardige snelheid vaart, resulteert in aanzienlijk kleinere secundaire golfhoogtes wat duidt op het effect van de vorm van de scheepsromp. De secundaire golven vallen onder een hoek in op de breuksteenberm. Voor snelvarende schepen zal de hoek van de secundaire golven afnemen. Zie Figuur 6 voor het secundaire golfpatroon gegenereerd door een snelvarend recreatievaartuig. De golfpieken en -dalen werken hier over een merklijk langere afstand in op de breuksteen

Voor een aantal van de passages wordt opgemerkt dat het schip excentrisch naar linkeroever toe vaart. Voor passage nr. 385, 386 en 387 valt hierbij ook op dat het golfpatroon aan de breuksteenberm aan linkeroever meer uitgesproken is dan aan rechteroever. Bemerkt dat ook uit de analyse van de AIS data, zie paragraaf 6.1.2, een systematisch afwijking van het center van het schip naar linkeroever toe volgt. De vermoedelijke verklaring betreft de tot aan de vaarweg uitstekende passerelle. Bemerkt dat deze passerelle mogelijk niet alleen een invloed heeft gehad op de positie van het schip in de vaarweg maar ook op de snelheid van het schip.

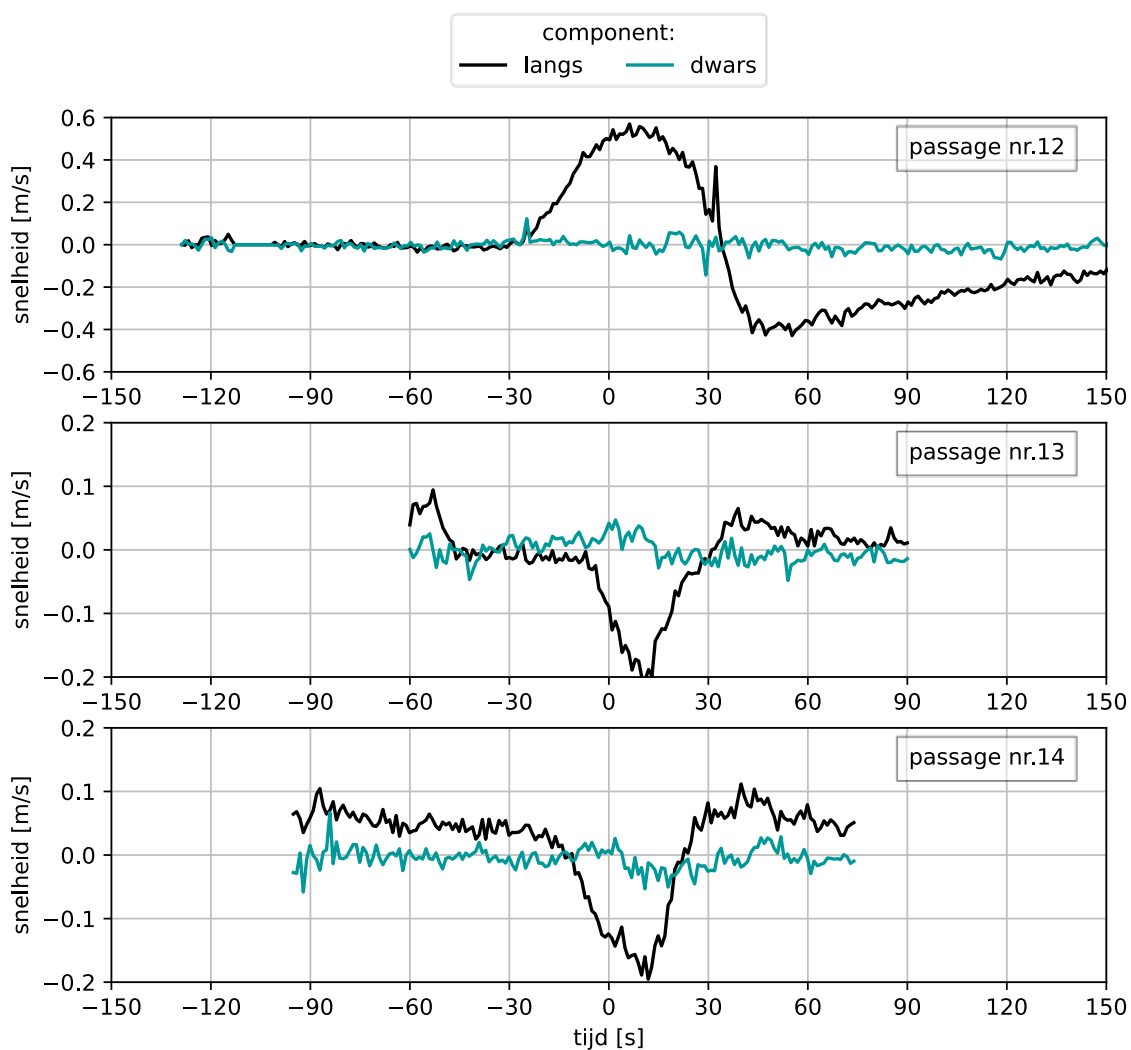


Figuur 5 – Illustratie aanzuiging water doorheen plasberm



Figuur 6 – Schuin invallende secundair golfpatroon volgens op een snelvarend recreatievaartuig

Op de dag van installatie werd tijdens een drie scheepspassages de snelheid in de plasberm opgemeten. Zie Figuur 7 voor het verloop van snelheid en Tabel 1 voor de specificaties van de betreffende passages. Een positieve snelheid in dwarsrichting is gericht naar afwaarts. Bij passage 12 is er een duidelijke aanzuiging naar het van afwaarts komende CEMT IV schip toe met een snelheid tot 0.55 m/s. Na de scheepspassage keert de stroomrichting in de plasberm om en neemt hierbij toe tot een 0.4 m/s om vervolgens geleidelijk uit te dempen. Voor de twee volgende scheepspassages is dit patroon minder uitgesproken. Ook hier ontwikkelt een snelheid gericht naar het in dit geval van opwaartse komende schip toe. De piekwaarde is beperkt tot 0.20 m/s en ook het omkeren van de snelheid is hier minder uitgesproken. Wanneer vergeleken wordt met het verloop van de primaire golf valt op dat voor passage nr. 12 de duurtijd van de waterpeildaling aanzienlijk langer is dan voor passage nr. 13. Voor de karakterisatie van de metingen, zie hoofdstuk 4, wordt ook een integratie van de waterspiegeldaling in de tijd bepaald. Bemerk dat deze integratie over de tijd mogelijk een relevante parameter is voor het bepalen van de hydraulische belasting in de plasberm.

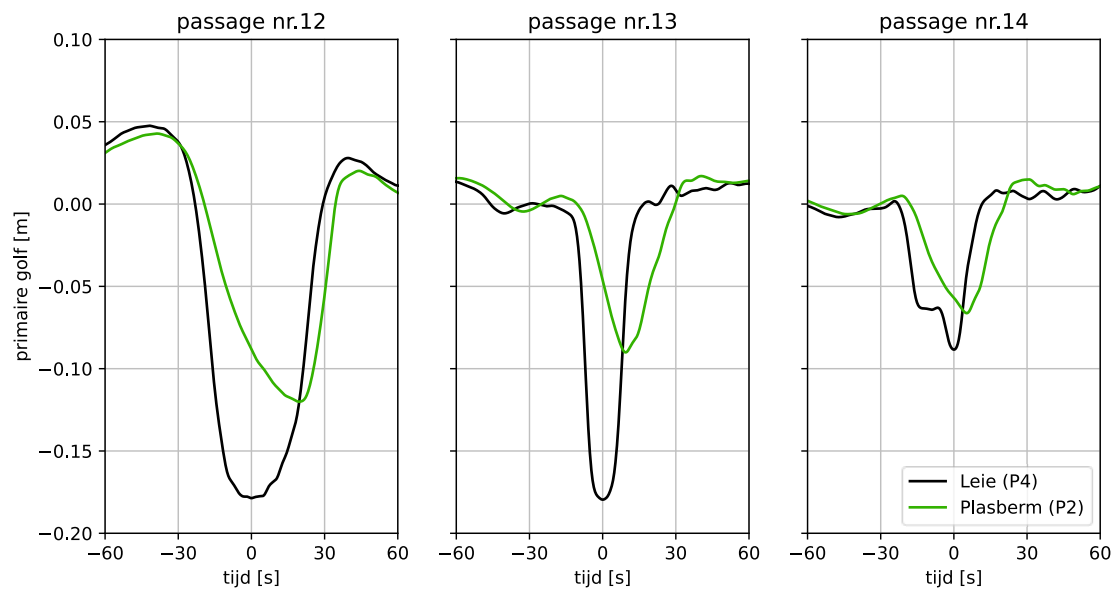


Figuur 7 – Snelheidsmeting plasberm

Tabel 1 – Scheepspassage met snelheidsmeting

Nr.	Pgem [m TAW]	CEMT	LxB [mxm]	Diepgang [m]	Vaar richting	Vaar snelheid [m/s]	Max. waterspiegelinzinking [m]	
							Leie (P4)	Plasberm (P2)
12	5.84	CEMT IV	105x9	1.00	Opvaart	2.16	-0.18	-0.12
13	5.85	CEMT III	59x6	2.50	Afvaart	3.55	-0.18	-0.09
14	5.85	CEMT I*	78x5	2.25	Afvaart	3.09	-0.09	-0.07

* Betrof een CEMT I in koppelverband



Figuur 8 – Primaire golf tijdens scheepspassage met snelheidsmetingen

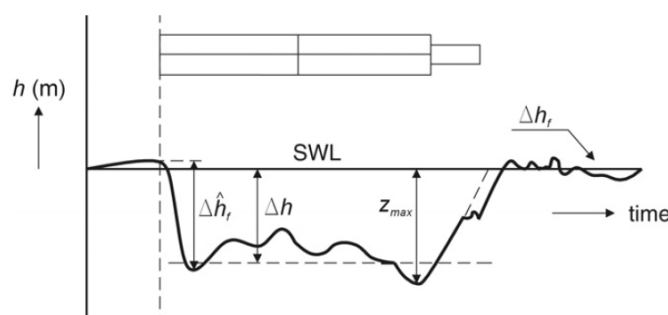
4 Golfkarakterisatie

Voor het ontwerp van de breuksteenberm werden door SBE de formuleringen uit de Rock Manual (CIRIA; CUR, 2007) en DIPRO (Waterloopkundig Laboratorium, 1997) toegepast. Om een optimale vergelijking tussen de metingen en het ontwerp te kunnen uitvoeren, wordt ook de karakterisatie uitgevoerd op basis van de Rock Manual. De karakterisatie van de primaire golf wordt beschreven in paragraaf 4.1 en de karakterisatie van de secundaire golf in paragraaf 4.2.

Bemerkt dat bij momenten schepen elkaar kruisen of in elkaars zog varen. Om deze reden wordt de karakterisatie enkel uitgevoerd voor scheepspassages waarbij de voorgaande of de navolgende 90 s geen andere schip kruiste of volgde.

4.1 Primaire golf

De karakterisatie van de primaire golf wordt uitgevoerd voor de metingen op de Leie (locatie 4 en 5). Hiervan wordt vertrokken van de uit de factuale data verwerking bekomen primaire golf (Vercruysse & De Roo, 2026). Dit betreft een reeks waaruit enerzijds de hoogfrequente golven gefilterd zijn die vallen onder de secundaire golfhoogte en anderzijds een filter werd toegepast om geleidelijke peilvariaties over de duur van de scheepspassage uit te filteren. De karakterisatie van de primaire golf is gebaseerd op basis van de uit de Rock Manual overgenomen Figuur 9.



Figuur 9 – Karakterisatie primaire golf o.b.v. Rock Manual (CIRIA; CUR, 2007)

Per scheepspassage en per sensor in de Leie worden volgende karakteristieken bepaald:

• t_{s-p}	Start waterspiegeldaling	[s]
• t_{e-p}	Einde waterspiegeldaling	[s]
• Δt_p	Duurtijd waterspiegeldaling (of -inzinking)	[s]
• Δh	Gemiddelde waterspiegeldaling tijdens primaire golf	[m]
• t_{z-max}	Tijdstip maximale inzinking tijdens waterspiegeldaling	[s]
• h_{b-pos}	Hoogte opstuwing boeggolf	[m]
• h_{h-pos}	Hoogte opstuwing haalgolf	[m]
• h_{h-neg}	Maximale waterspiegeldaling tijdens primaire golf	[m]
• Z_{max}	Hoogte haalgolf bepaald als $h_{b-pos} + h_{h-neg}$	[m]

Voor het starttijdstip ($t_{s,p}$), eindtijdstip ($t_{e,p}$) en duurtijd Δt_p van de waterspiegeldaling in het primaire golfpatroon wordt de periode beschouwd waarbij de primaire golf negatief is. Bij een niet uitgesproken opstuwing voor de boeg kan hierbij een afwijking optreden omdat bij enkele scheepspassages het peil net voorgaand de waterspiegeldaling een periode net onder nul blijft. Om te voorkomen dat dit de duurtijd beïnvloed wordt de duurtijd van de waterspiegeldaling bepaald als de periode waarover de primaire golfhoogte onder -0.01 m blijft.

De gemiddelde waterspiegeldaling - Δh - wordt bepaald als de gemiddelde waterdaling tussen start en einde van de waterspiegeldaling.

De positieve piek van de boeggolf - $h_{b,pos}$ - wordt bepaald als het eerste knikpunt voorgaand de start van de waterspiegeldaling.

Een lokaal dieptepunt ten gevolge van de boeggolf komt slecht voor bij enkele passages en wordt hierom niet bepaald.

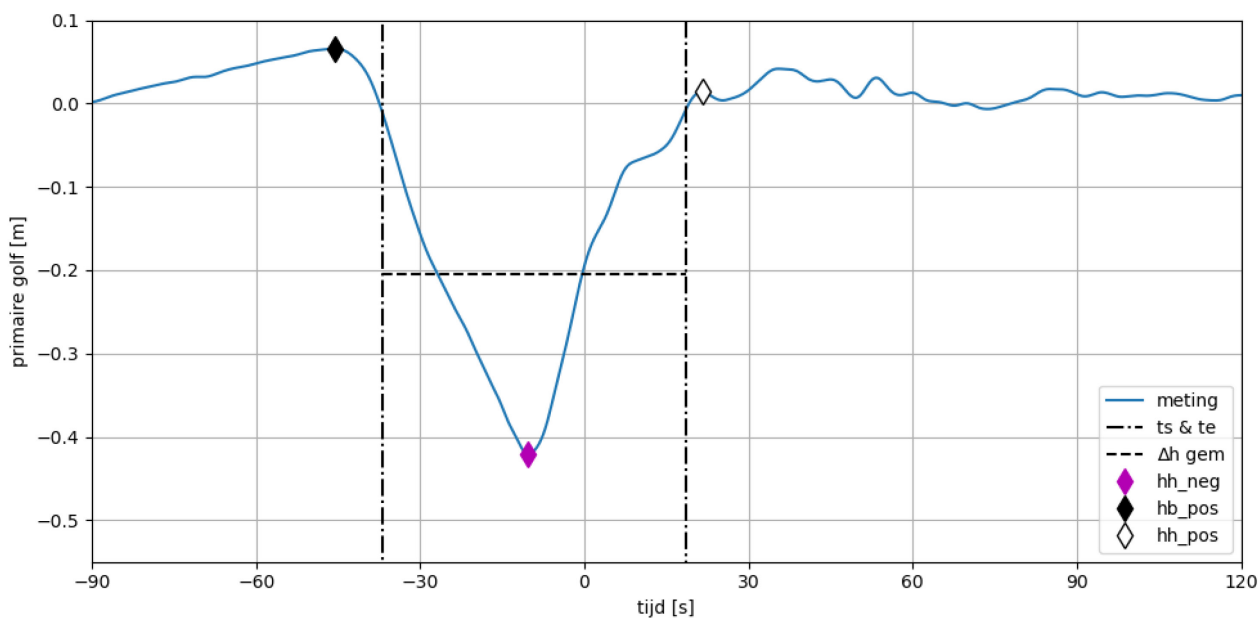
De positieve piek van de haalgolf - $h_{h,pos}$ - wordt bepaald als het eerste knikpunt binnen de 10 s volgend op het einde van de waterspiegeldaling.

De negatieve piek van de haalgolf - $h_{h,neg}$ wordt bepaald als de minimale waterspiegeldaling.

De haalgolf Z_{max} wordt bepaald als de som van de negatieve en positieve piek van de haalgolf.

Bij bepaling naar de ernst van een belasting moet niet alleen gekeken worden naar de inzinking maar ook naar de duurtijd. Om de events onderling te kunnen vergelijken, wordt aanvullend nog een integratie uitgevoerd overheen de duurtijd van de waterspiegeldaling. Deze kan eenvoudig berekend worden door de gemiddelde waterspiegeldaling Δh te vermenigvuldigen met de duurtijd van de waterspiegeldaling Δt_p .

Een illustratie van de hierboven bepaalde karakteristieken voor scheepspassage 39 wordt gegeven in Figuur 10.



Figuur 10 – Illustratie bepaling primaire golf karakteristieken

Deze karakterisatie werkt goed bij een typisch primair patroon zoals voorgesteld in Figuur 10. Voor scheepspassages waarbij de maximale inzinking kleiner is dan 0.025 m worden alle golfhoogtes gelijkgesteld aan nul en worden de tijdstippen opgevuld door NaN waarden. De primaire golf wordt bij deze scheepspassages als te verwaarlozen geacht.

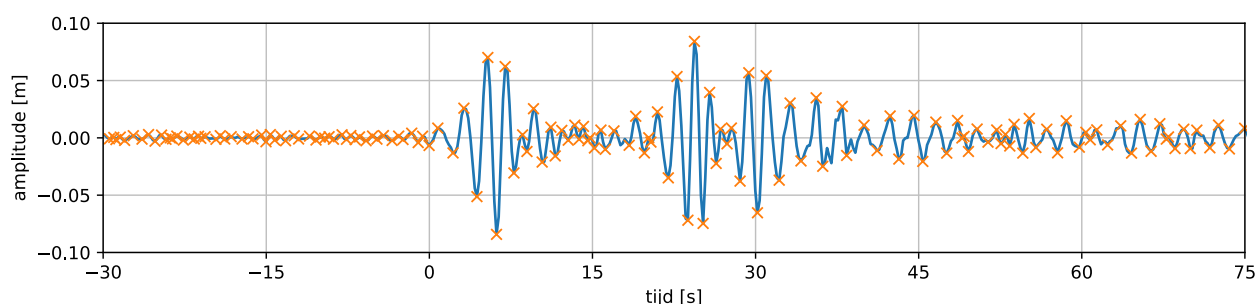
Voor de locaties in de plasberm wordt een zelfde analyse uitgevoerd.

4.2 Secundaire golf

Voor de secundaire golven wordt de max. golfhoogte en het bijhorende tijdstip afgeleid. De max. golfhoogte wordt als volgt afgeleid uit de secundaire golfhoogte:

- Een ingekorte reeks lopend van -30 s tot +60 s ten opzichte van de maximale waterspiegeldaling wordt beschouwd.
- Op basis van het teken wordt de meting opgedeeld in een sequentie van positieve en negatieve amplitudes.
- Per sequentie wordt de piekwaarde bepaald.
- De golfhoogte wordt bepaald als de optelling van twee opeenvolgende piekwaarden.

Dit wordt voor scheepspassage nr. 39 geïllustreerd in Figuur 11.



Figuur 11 – Illustratie bepaling secundaire golfhoogte

Van deze analyse worden volgende parameters weggeschreven ter karakterisatie van de secundaire golf.

- | | | |
|----------------|-------------------------------------|-----|
| • t_{hs-max} | Tijdstip max. secundaire golfhoogte | [s] |
| • h_{s-max} | Max. secundaire golfhoogte | [m] |

Deze bepaling wordt zowel voor de metingen in de Leie als in de plasberm uitgevoerd.

5 Analyse metingen

Voor het ontwerp van de plasberm werden theoretische bepaalde maatgevende vaarsnelheden en golfhoogtes afgeleid in functie van de CEMT classificatie en lading. De in het kader van het ontwerp bepaalde maatgevende vaarsnelheden en golfhoogtes worden in paragraaf 5.1 vergeleken met de metingen. De golfkarakteristieken in functie van de CEMT classificatie en de vaarsnelheid en lading worden in paragraaf 5.2.1 uitgezet voor de Leie en in paragraaf 5.2.2 uitgezet voor de plasberm. De transmissie tussen de vaarweg en de plasberm voor de verschillende golfkarakteristieken wordt beschreven in paragraaf 5.2.3. Een afzonderlijke analyse voor de scheepspassages zonder AIS registratie wordt uitgevoerd in paragraaf 5.3. Tot slot wordt in paragraaf 5.4 nog een voorbeeld gegeven van het golfpatroon bij een kruising.

5.1 Vergelijking vaarsnelheden en golfhoogte tijdens ontwerp met metingen

De in de ontwerpmemo van SBE (SBE nv, 2020) gegeven maatgevende vaarsnelheid is bepaald op basis van een vergelijking tussen de opgelegde maximum vaarsnelheid en een analyse van de vaarsnelheden gegeven in De Roo (2013). Deze maatgevende vaarsnelheden worden in Tabel 2 vergeleken met de gemeten vaarsnelheid. Naast de gemiddelde vaarsnelheid wordt ook het 5 % en 95 % kwantiel gegeven. Bemerkt dat de verschillen in vaarsnelheid tussen de scheepsklassen beperkt zijn. De lagere opgelegde vaarsnelheid (door de waterwegbeheerder) voor een CEMT klasse III, IV en Va komt niet voort uit de metingen. Ten opzichte van de uit De Roo (2014) afgeleide vaarsnelheden volgt dat de bovenwaarde vrijwel overeenkomt met het 95% kwantiel. De opdeling van de scheepsklassen is uitgevoerd op basis van de uit de AIS data meegegeven afmetingen. Bemerkt dat het niet mogelijk is om hierbij een opdeling te maken in kajuitboten en motorjachten, wel kan aangenomen worden dat motorjachten veelal geen AIS data uitzenden. Voor de vaarsnelheid van motorjachten is de in paragraaf 5.3 gegeven analyse voor de schepen zonder AIS relevanter.

Tabel 2 – Vergelijking ontwerp vaarsnelheid met uit de metingen afgeleid vaarsnelheid [km/h]

klasse	ontwerpmemo van SBE (SBE nv, 2020))			Gemeten snelheid q05/gemiddelde/q95
klasse	Max. geobserveerde snelheid * (De Roo, 2013)	Opgelegde maximum snelheid	Ontwerp snelheid	
I geladen	10.9	10	10	8.2 / 9.3 / 10.7
I ongeladen	14.4			11.8 / 13.5 / 15.9
II geladen	10.8	10	10	8.1 / 9.5 / 10.9
II ongeladen	14.9			9.8 / 12.7 / 14.6
III geladen	10.3	8	8	8.3 / 9.9 / 13.2
III ongeladen	14.7			9.6 / 13.2 / 15.3
IV geladen	10.2	8	8	7.6 / 9.2 / 10.9
IV ongeladen	14.3			9.2 / 12.5 / 14.3
Va geladen	9.4	8	8	7.67 / 8.71 / 9.7
Va ongeladen	13.6			10.4 / 12.2 / 14.0
Kajuitboot		12	12	7.8 / 10.7 / 14.1
Motorjacht		12		Zie paragraaf 5.3

(*) Bemerkt dat de uit SBE nv (2020) overgenomen max. geobserveerde snelheid een misinterpretatie betreft van figuur 4.9 uit (De Roo (2013)). In werkelijkheid betreft dit de gemiddelde snelheid vermeerderd met 1 keer de standaardafwijking.

Voor de golfhoogte wordt in de ontwerpmemo van SBE (SBE nv, 2020) een tabel gegeven met per scheepsklasse een golfhoogte bepaald op basis van formuleringen uit de Rock Manual (CIRIA; CUR, 2007). Een vergelijking tussen de in de memo opgegeven golfhoogtes en de gemiddelde waarde uit de metingen wordt gegeven in Tabel 3. De metingen van de primaire en secundaire golfhoogte zijn op basis van de ultrasone waterpeilmeting op locatie 5 (P5w).

Tabel 3 – Vergelijking ontwerpwaarden met de gemiddelde uit de metingen

CEMT klasse	Vaarsnelheid Vs [m/s]		Haalgolf Zmax [m]		Secundaire golf Hs [m]	
	SBE	meting	SBE	Meting*	SBE	meting
I geladen	2.78	2.58	0.51	0.08	0.09	0.10
I ongeladen	2.78	3.76	0.41	0.06	0.04	0.23
II geladen	2.78	2.64	0.42	0.12	0.10	0.08
II ongeladen	2.78	3.54	0.33	0.11	0.04	0.12
III geladen	2.22	2.76	0.31	0.19	0.04	0.07
III ongeladen	2.22	3.67	0.24	0.19	0.02	0.11
IV geladen	2.22	2.56	0.37	0.22	0.05	0.05
IV ongeladen	2.22	3.46	0.25	0.23	0.02	0.09
Va geladen	2.22	2.40	0.48	0.30	0.06	0.05
Va ongeladen	2.22	3.39	0.29	0.28	0.02	0.09
Kajuitboot	3.33	2.97	0.22	0.12	0.06	0.15
Motorjacht	3.33		0.53		0.10	

Uit de vergelijking van de ontwerpwaarden met de gemiddelde waarden uit de metingen volgt:

- De gemeten gemiddelde vaarsnelheid van een ongeladen schip is merklijk hoger dan de gemiddelde vaarsnelheid van een geladen schip. Voor ongeladen schepen is de vaarsnelheid merklijk hoger dan aangenomen bij ontwerp.
- De in de ontwerpmemo gegeven haalgolf voor CEMT klasse I en II schepen overschat aanzienlijk de opgemeten golfhoogte en gaat hierbij ook tegen de trend in dat de golfhoogte toeneemt bij een toename van de scheepsgrootte.
- De haalgolf bij een geladen schip werd bij ontwerp overschat.
- Uit de metingen volgt een toename van de secundaire golf bij een ongeladen schip wat omgekeerd is ten opzichte van het ontwerp. Bemerk dat in de formulering van de Rock Manual, zie paragraaf 6.1.3, de secundaire golfhoogte afhankelijk is van de vaarsnelheid en de positie van het schip ten opzichte van de oever maar niet van het al dan niet geladen zijn van het schip. Doordat in de berekening voor ongeladen en geladen schepen een zelfde vaarsnelheid en zelfde positie ten opzichte van de oever gehanteerd wordt, zou bijgevolg een zelfde secundaire golfhoogte bekomen moeten worden.

Bemerk dat bovenstaande een validatie van de maatgevende vaarsnelheden en golfhoogte uit het ontwerp betreft maar geen validatie van de gebruikte formuleringen. Dit omdat de vergelijking uitgevoerd wordt tussen enerzijds een maatgevende situatie (vaarsnelheid en positie in de vaarweg) en anderzijds een gemiddelde situatie. Uit de vergelijking van de vaarsnelheid uit ontwerp ten opzichte van de metingen, zie Tabel 2, volgt dat de opgemeten vaarsnelheid vrijwel steeds gelijk of hoger is dan de ontwerpsnelheid. Voor de positie van het schip in de vaarweg wordt in het ontwerp het schip excentrisch gepositioneerd naar de betreffende oever toe. Uit de in paragraaf 6.3 gegeven verwerking uit de AIS volgde dat de schepen gemiddeld een excentriciteit naar linkeroever, de tegenoverliggende oever, toe hadden. Bijkomend wijkt ook het voor ontwerp gebruikte vaarwegprofiel af van het uit de bathymetriemetingen afgeleide vaarwegprofiel, zie ook paragraaf 6.3.

5.2 Onverstoorde passages met AIS

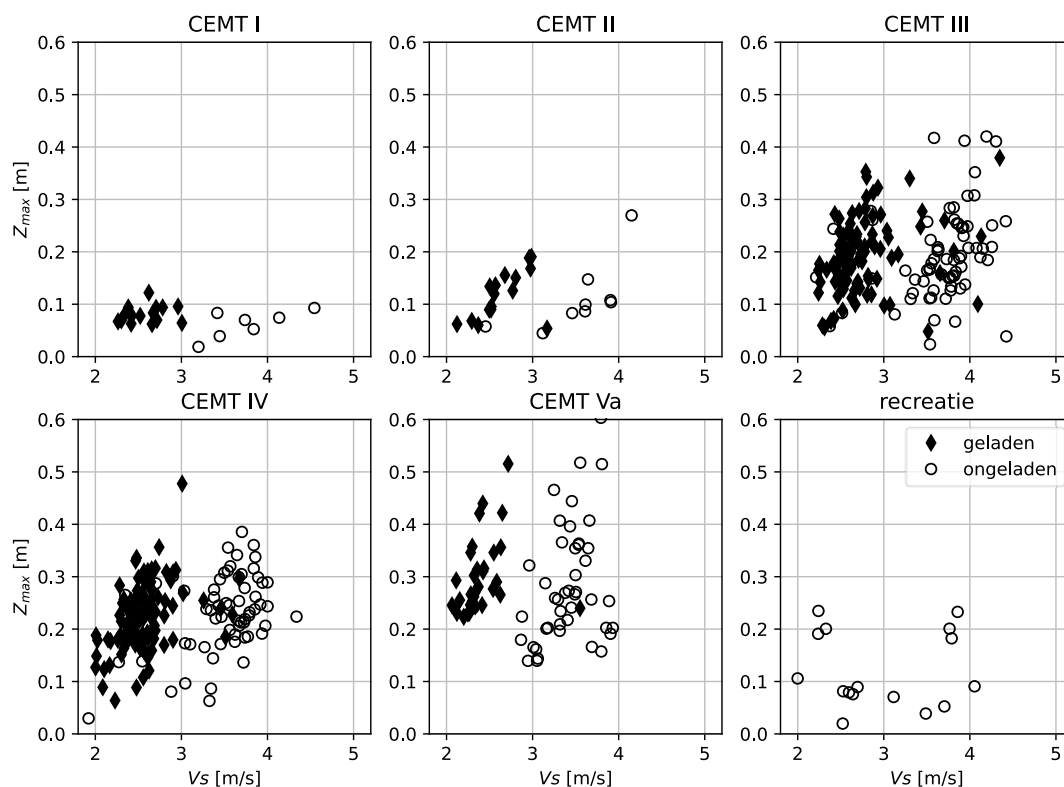
Op basis van 562 passages waarbij zowel AIS data beschikbaar was als dat de meting niet verstoord werd door een kruisend of voor- of achterlopend schip wordt een analyse uitgevoerd van de primaire en secundaire golf.

5.2.1 Primaire en secundaire golf Leie

In deze paragraaf wordt een visualisatie gegeven van de karakteristieke golfhoogte in de Leie in functie van de CEMT classificatie, de vaarsnelheid en of het schip al dan niet geladen is.

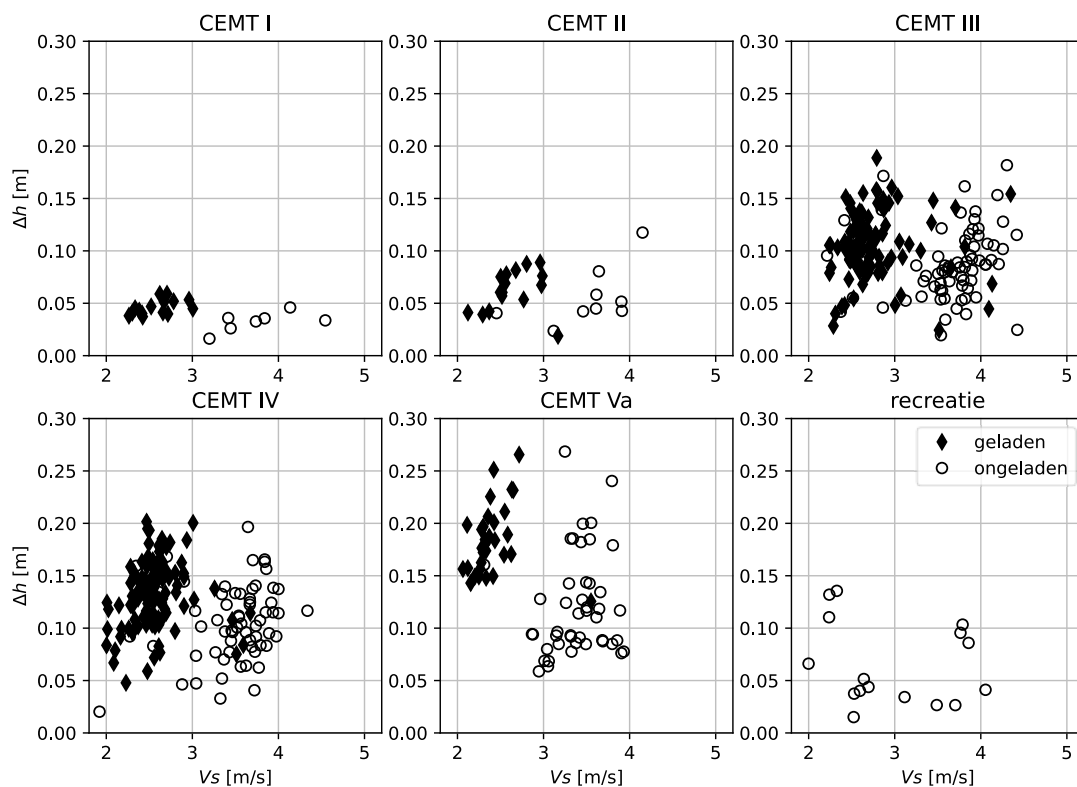
- De haalgolf wordt gegeven in Figuur 12.
- De gemiddelde waterspiegeldaling wordt gegeven in Figuur 13.
- De integratie van de waterspiegeldaling overheen de duurtijd van de waterspiegeldaling wordt gegeven in Figuur 14.
- De maximale secundaire golfhoogte wordt gegeven in Figuur 15.

De weergave van de haalgolf en secundaire golfhoogte wordt uitgevoerd op basis van de ultrasone waterpeilmeting op locatie 5 (P5w).



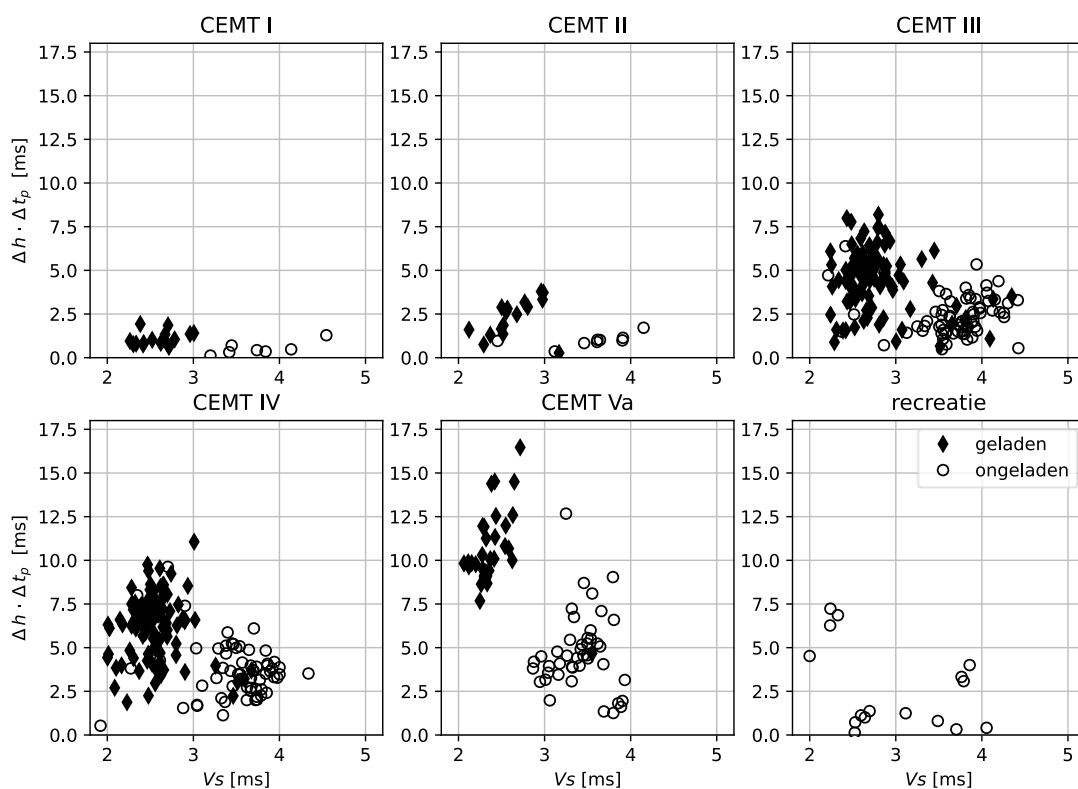
Figuur 12 – Haalgolf Leie in functie van vaarsnelheid en CEMT classificatie

Uit Figuur 12 volgt dat de haalgolf ($Z_{\max}$) toeneemt bij een toename van de CEMT klasse omwille van de grotere waterverplaatsing (grotere blockcoëfficiënt). De toename van de haalgolf bij een toename van de snelheid is enigszins waarneembaar. Wat opvalt is dat niettegenstaande de snelheid voor een niet geladen schip merkbaar hoger is dit niet resulteert in een merkbaar hogere of lagere maximale inzinking $Z_{\max}$. De te verwachten lagere inzinking bij een ongeladen schip wordt gecompenseerd door de toename van de vaarsnelheid.



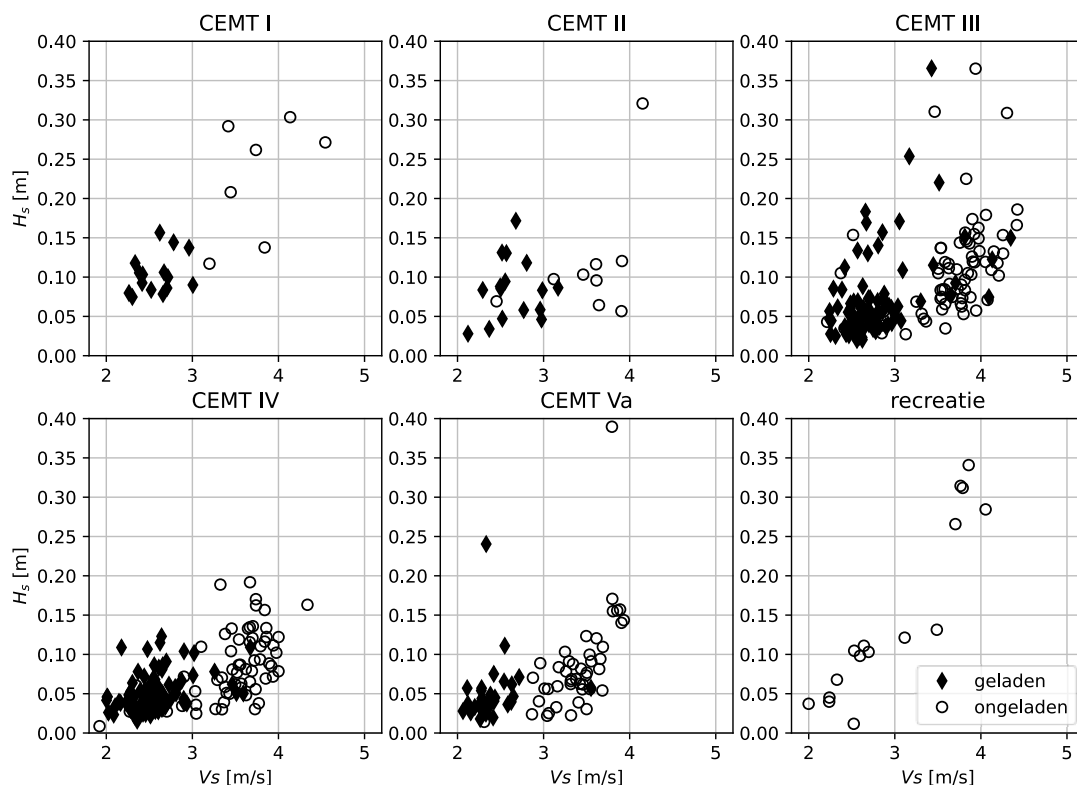
Figuur 13 – Gemiddelde waterspiegeldaling Leie in functie van vaarsnelheid en CEMT classificatie

De trends horende bij de gemiddelde waterspiegeldaling tijdens de primaire golf, zie Figuur 13; zijn overeenkomend met de trends horende bij de haalgolf, zie Figuur 12.



Figuur 14 – Integratie waterspiegeldaling overheen duurtijd Leie in functie van vaarsnelheid en CEMT classificatie

Wanneer gekeken wordt naar de integratie van de waterspiegeldaling over de duurtijd valt op dat wel een merkelijk verschil optreedt tussen geladen en ongeladen schepen en dat er een toename is bij een toename van de CEMT klasse. Doordat de geladen schepen merkelijk trager varen neemt de duurtijd van de waterspiegeldaling toe.



Figuur 15 – Secundaire golfhoogte Leie in functie van vaarsnelheid en CEMT classificatie

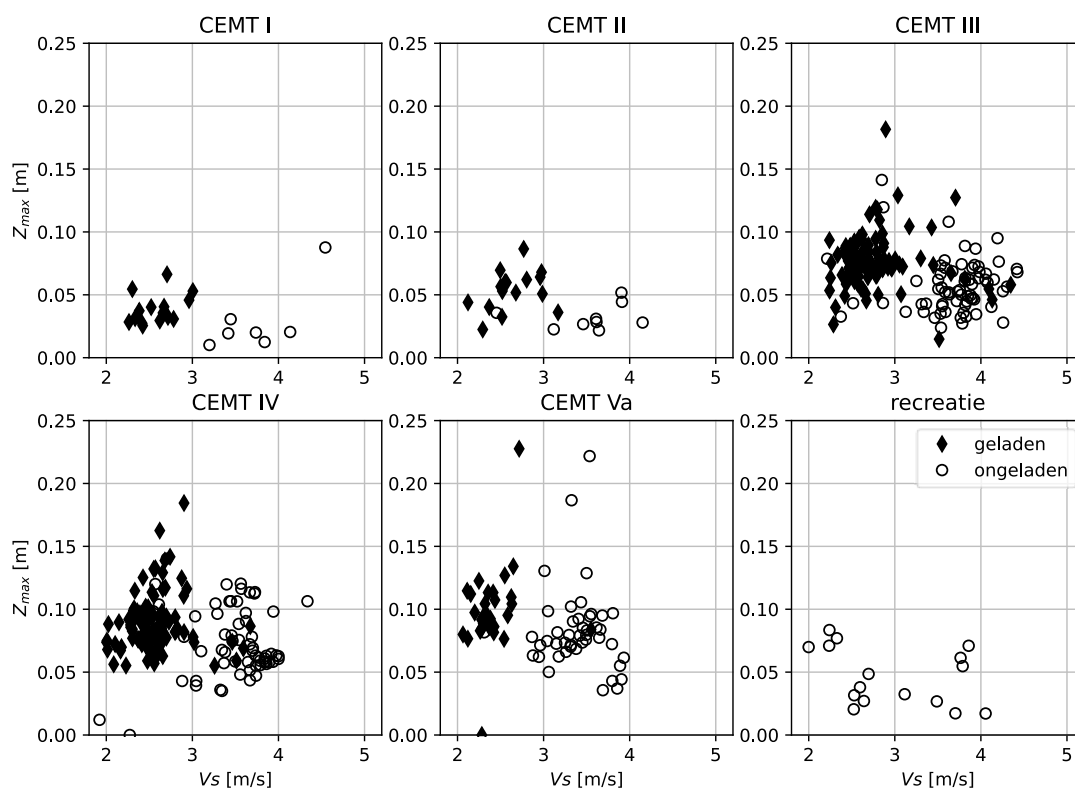
Voor de secundaire golfhoogte, zie Figuur 15, volgt logischerwijze een uitgesproken toename van de secundaire golfhoogte bij een toename van de vaarsnelheid. De hogere secundaire golfhoogtes voor recreatieschepen zijn vermoedelijk, deels, toe te schrijven aan het categoriseren van duwboot-bak combinaties onder recreatievaart (zie bv. Figuur 4 met scheepspassage nr. 389).

5.2.2 Primaire en secundaire golf plasberm

In deze paragraaf wordt een visualisatie gegeven van de karakteristieke golfhoogte in de plasberm in functie van de CEMT classificatie, de vaarsnelheid en of het schip al dan niet geladen is.

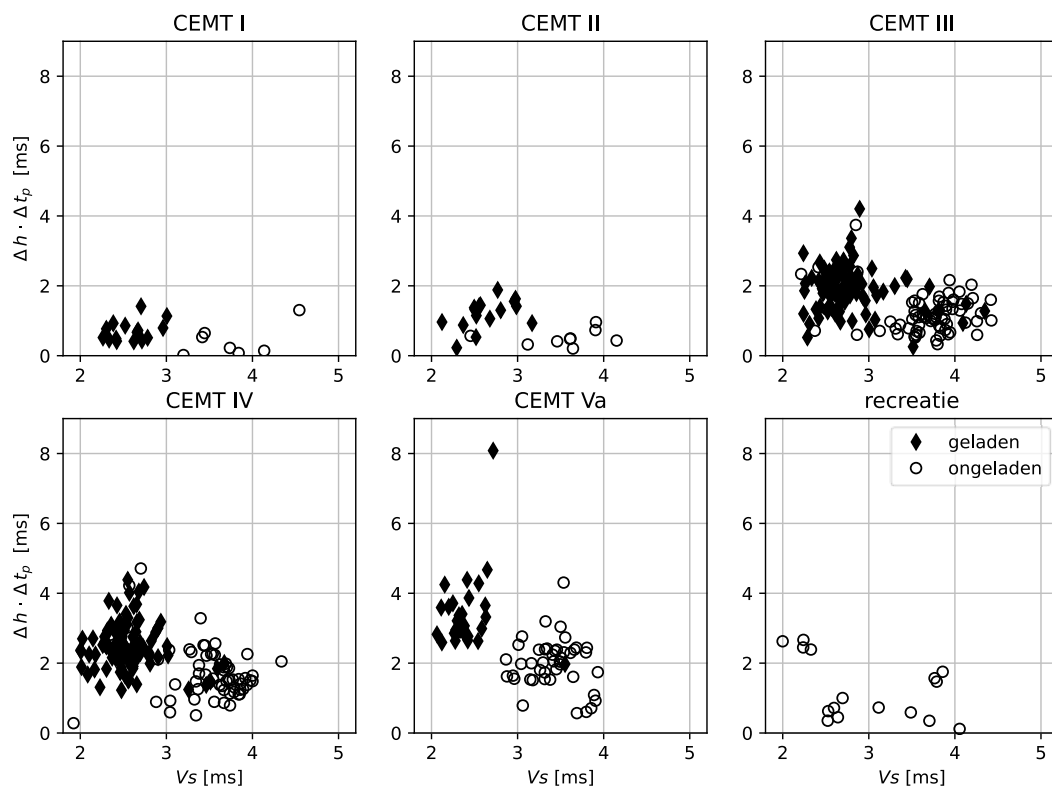
- De haalgolf wordt gegeven in Figuur 16.
- De integratie van de inzinking overheen de duurtijd van de waterspiegeldaling wordt gegeven in Figuur 17.
- De maximale secundaire golfhoogte wordt gegeven in Figuur 18.

Voor de plasberm wordt de meting op locatie P2, in het midden van de berm (uitgevoerd op 5.08 m TAW wat overeenkomt met een gemiddelde diepte 0.60 m), gebruikt. Het verschil tussen de drie posities is beperkt.



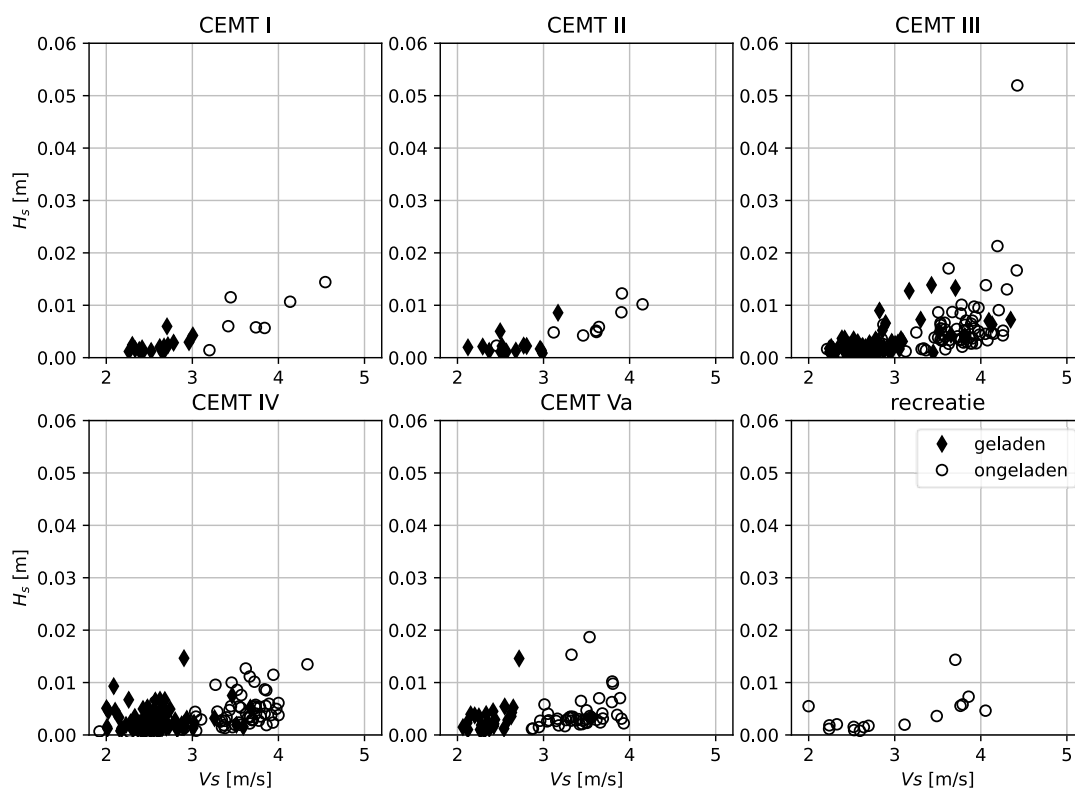
Figuur 16 – Haalgolf plasberm in functie van vaarsnelheid en CEMT classificatie

De haalgolf in de plasberm is merkkelijk kleiner dan deze gemeten in de vaarweg. De haalgolf neemt toe met de CEMT classificatie. Bij een CEMT klasse I schip is de haalgolf beperkt tot een 0.07 m. Bij een CEMT IV en CEMT Va loopt de haalgolf in de plasberm op tot een 0.15 m, met nog enkele hogere uitschieters voor een CEMT Va.



Figuur 17 – Integratie waterspiegeldaling overheen duurtijd Leie in functie van vaarsnelheid en CEMT classificatie

Voor de integratie van de waterspiegeldaling overheen de duurtijd van de waterspiegeldaling valt op dat het verschil tussen een CEMT III, CEMT IV en CEMT Va in de plasberm merkkelijk kleinere is dan in de Leie.

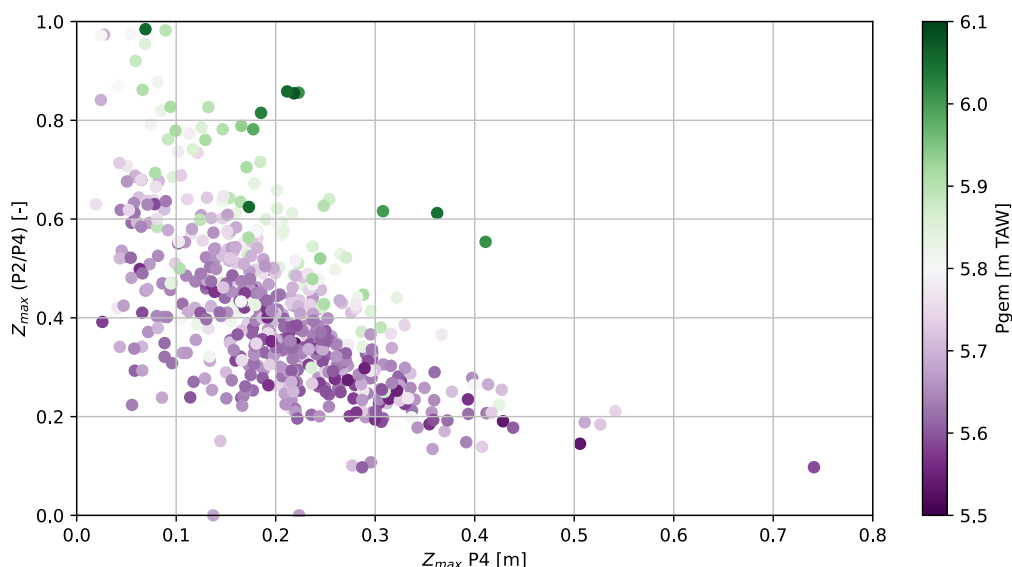


Figuur 18 – Secundaire golfhoogte plasberm in functie van vaarsnelheid en CEMT classificatie

De opgemeten secundaire golfhoogte in de plasberm is verwaarloosbaar, dit op een enkele meting met een ongeladen CEMT III na. Bij deze passage was het peil op de Leie tijdelijk verhoogd tot 6.05 m TAW, wat ca. overeenkomt met het kruinpeil van de breuksteenberm.

5.2.3 Transmissie

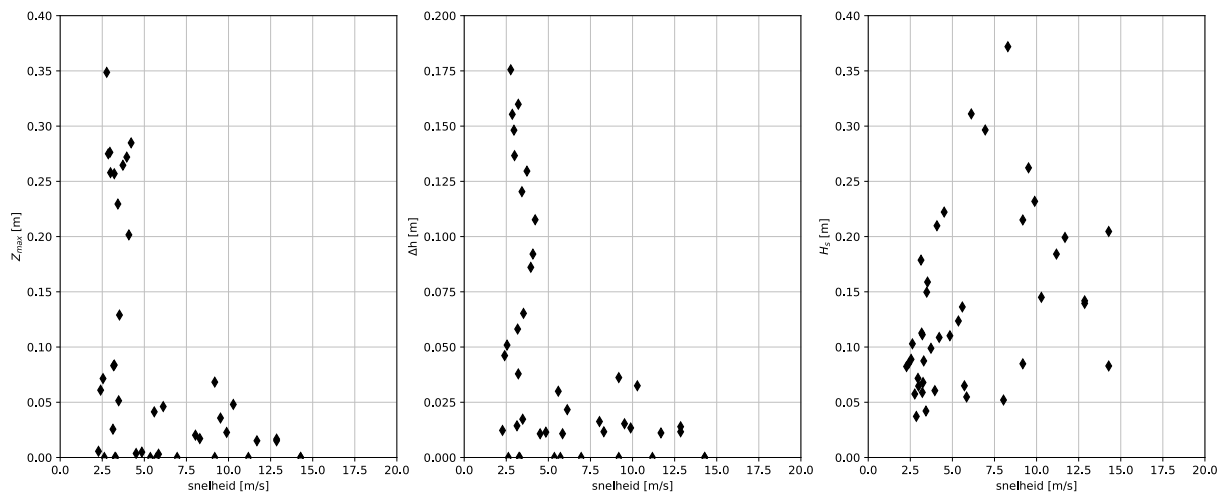
De transmissie van de haalgolf doorheen de breuksteenberm in functie van de grootte van de betreffende parameter in de Leie en het gemiddeld peil tijdens de betreffende scheepspassage wordt gegeven in Figuur 19. Voor de transmissie van de haalgolf wordt een vergelijking uitgevoerd tussen de druksensor P4 in de Leie en de druksensor P2 in het midden van de plasberm.



Figuur 19 – Transmissie haalgolf Leie naar plasberm in functie van gemiddeld waterpeil P_{gem}

Uit de transmissie van de haalgolf valt een duidelijke relatie op tussen de grootte van de haalgolf (x-as) en de transmissie (y-as). Relatief gezien hoe groter de haalgolf: hoe kleiner de transmissie. Een tweede invloedparameter betreft het gemiddeld peil. Hoe hoger het gemiddelde peil hoe groter de transmissie. Bij een haalgolf van 0.20 m opgemeten in de Leie wordt bij een gemiddeld peil ca. 6.00 m TAW een transmissie ca. 0.8 bekomen terwijl bij een gemiddelde peil ca. 5.6 - 5.7 m TAW de transmissie afneemt tot 0.2 a 0.4.

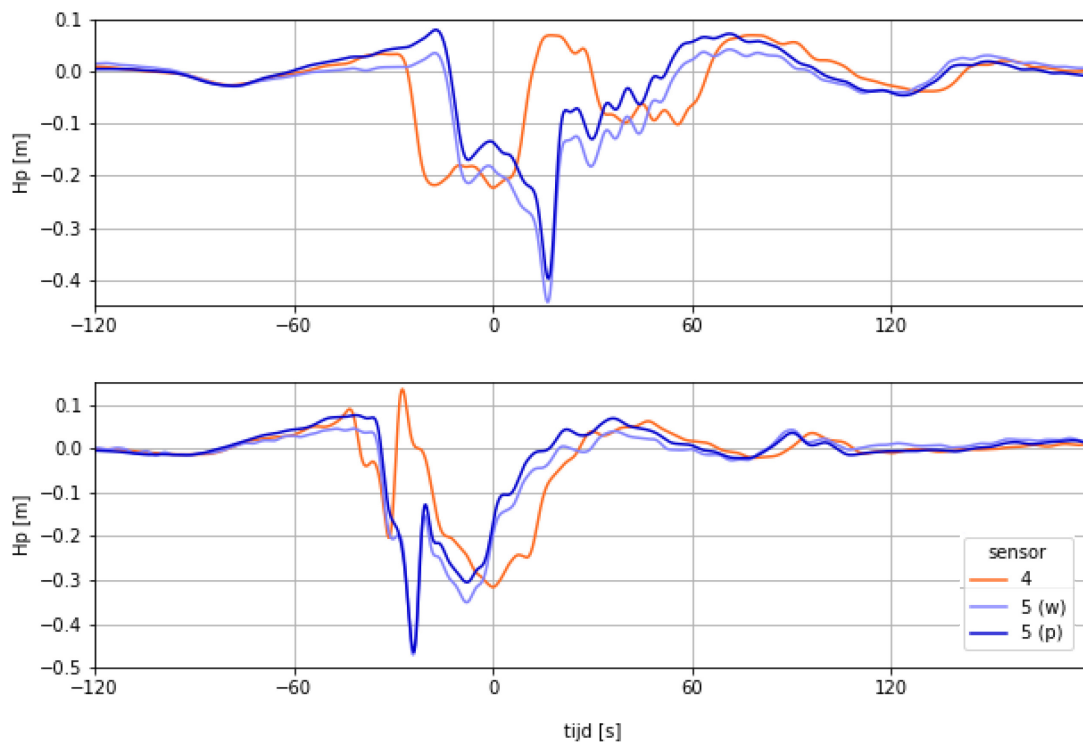
Voor de transmissie van de haalgolf is zowel het kruinpeil van de breuksteenberm (6.1 m TAW) als het peil van de damwandplank (5.26 m TAW) mee bepalend. Bij een afname van het gemiddeld peil neemt de hoogte waarover water doorheen de breuksteenberm kan stromen af. Het bovenpeil van de damwandplank betreft ook een ondergrens. Een verdere verlaging van het peil in de Leie zorgt niet voor een toename van de aanzuiging.



Figuur 21 – Haalgolf, gemiddelde waterspiegeldaling en secundaire golfhoogte in functie van snelheid

5.4 Kruising schepen

Figuur 22 toont de lokale versterking van de primaire golf op een moment dat twee schepen elkaar net voor de sensor P5 kruisen. Merk op dat een kruising lokaal kan leiden tot een verdubbeling van de waterspiegeldaling ten gevolge van een sterke vergroting van de block coëfficiënt.



boven scheepspassage 48; onder scheepspassage 458

Figuur 22 – Versterking waterspiegeldaling bij kruising van twee schepen

6 Validatie formule scheepsgeïnduceerde golfbeweging

Het hydraulisch ontwerp van de breuksteenberm wordt beschreven in de memo SBE nv (2020). In deze memo wordt de primaire en secundaire golf en retourstroming berekend in functie van het type schip en het al dan niet geladen zijn op basis van formuleringen uit de Rock Manual (CIRIA; CUR, 2007). Voor de bepaling van de primaire golf in kader van de dimensionering van de stabiliteit van de breuksteenberm wordt verwezen naar formuleringen uit de handleiding van Dipro (Waterloopkundig Laboratorium, 1997).

Voor de scheepspassages waarbij AIS informatie beschikbaar is, wordt een validatie van de gebruikte formuleringen uitgevoerd. De validatie voor de formuleringen uit de Rock Manual wordt uitgevoerd in paragraaf 6.1 een validatie van de formuleringen uit Dipro wordt gegeven in paragraaf 6.2. Enkele algemene vaststellingen uit nazicht van de memo van het hydraulisch ontwerp worden gegeven in paragraaf 6.3.

Voor deze formuleringen dient het vaarwegprofiel beschreven te zijn. Hiervoor wordt in bijlage C het vaarwegprofiel en de relevante parameters afgeleid uit een bathymetriemeting.

6.1 Rock manual

6.1.1 Vaarsnelheid

Als eerste stap in de berekening van de scheepsgeïnduceerde golven dient de vaarsnelheid bepaald te worden. Hiervoor wordt vertrokken van de limietsnelheid. De limietsnelheid wordt in de Rock Manual bepaald als het minimum van volgende drie limietsnelheden:

$$V_L = F_L \cdot \sqrt{g \cdot A_c / b_w}$$

$$V_L = \left(\frac{g \cdot L_s}{2\pi} \right)^{1/2}$$

$$V_L = (g \cdot h)^{1/2}$$

Waarbij:

$$F_L = \left[\frac{2}{3} \left[1 - \frac{A_m}{A_c} + 0.5 \cdot F_L^2 \right] \right]^{3/2}$$

$$A_m = C_m \cdot B_s \cdot T_s$$

Met:

- B_w Breedte vaarweg op de waterlijn = 47.2 m, zie bijlage C [m]
 - A_c Doorsnede waterweg, zie bijlage C [m²]
 - h Gemiddelde waterhoogte = $P_{gem} - P_b$ [m]
 - P_{gem} Gemiddeld peil tijdens scheepspassage [m TAW]
 - P_b Bodempeil vaargeul = 1.32 m TAW, zie bijlage C [m TAW]
 - F_L Froudegetal [-]
 - A_m Grootspantoppervlak [m²]
 - C_m Coëfficiënt reductie grootspantoppervlak [-]
- $C_m=0.90$ tot 1.0 voor duwbakken en beroepsvaartuigen

- $C_m = 0.9$ tot 0.7 voor onderhoudsschepen en duwbotten
- B_s Breedte schip, o.b.v. AIS [m]
- T_s Diepgang schip, o.b.v. AIS [m]

Bij doorrekenen van bovenstaande vergelijkingen werd vastgesteld dat de berekening op basis van het Froude getal steeds resulteert in de laagste snelheid en dus de limietsnelheid bepaald.

Om te kunnen vergelijken met de metingen wordt de absolute snelheid uit de metingen omgezet naar de vaarsnelheid, zijnde de snelheid van het schip ten opzichte van de stroomsnelheid in de Leie. Deze omzetting gebeurt als volgt:

$$\text{Afvaart: } V_{s-\text{meting}} = V_{g-\text{meting}} - Q/A_c$$

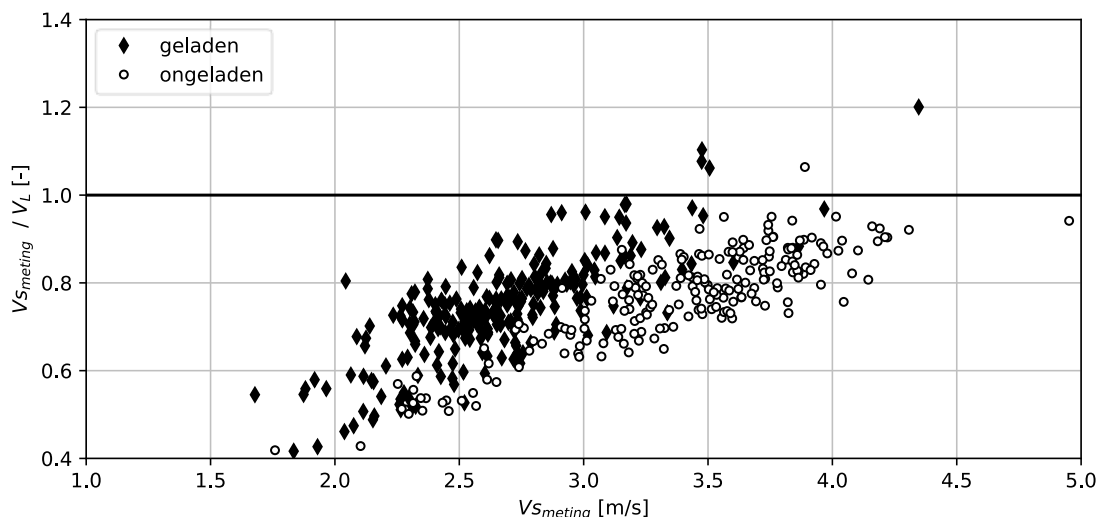
$$\text{Opvaart: } V_{s-\text{meting}} = V_{g-\text{meting}} + Q/A_c$$

Met:

- V_s Vaarsnelheid schip ten opzichte van de stroming [m/s]
- V_g Absolute snelheid van het schip [m/s]
- Q Debiet opgemeten te Machelen tijdens tijdstip scheepspassages [m³/s]
- A_c Doorsnede waterweg, zie bijlage C [m²]

Bovenstaande formule houdt geen rekening met een stroomsnelheidsprofiel waar de snelheid in het center van de vaarweg veelal hoger is dan aan de oevers en bodem. De invloed van deze vereenvoudiging op de vaarsnelheid wordt verwaarloosbaar geacht.

De verhouding van de limietsnelheid ten opzichte van de opgemeten vaarsnelheid wordt gegeven in Figuur 23. Bemerkt dat zowel de geladen schepen als de ongeladen schepen lijken te evolueren naar de limietsnelheid, maar dat maar bij enkele scheepspassages een overschrijding van deze limietsnelheid vastgesteld wordt.



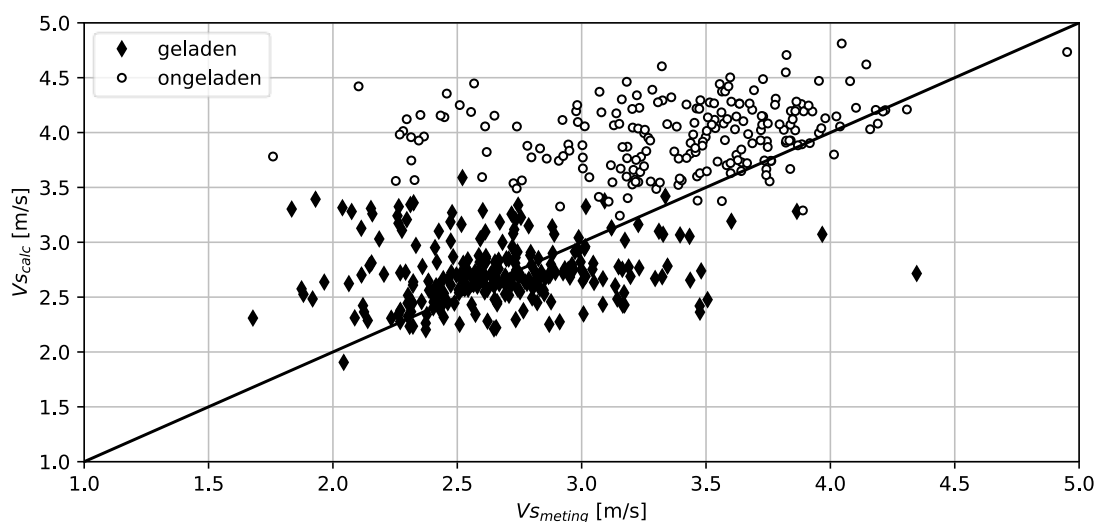
Figuur 23 – Vergelijking limietsnelheid ten opzichte van opgemeten vaarsnelheid

Voor de bepaling van de berekende vaarsnelheid wordt een reductiecoëfficiënt f_v toegepast op de limietsnelheid:

$$V_{s-calc} = f_v \cdot V_L$$

De reductiecoëfficiënt f_v bedraagt 0.75 respectievelijk 0.90 voor een geladen respectievelijk ongeladen schip. De classificering of een schip ongeladen of geladen is, gebeurt op basis van de diepgang ten opzichte van de maatgevende diepgang, zie bijlage B.

De berekende vaarsnelheid V_{s-calc} ten opzichte van de opgemeten vaarsnelheid V_s wordt uitgezet in Figuur 24. Bemerk hierin een duidelijk onderscheid tussen geladen en ongeladen schepen. De ongeladen schepen met lagere snelheid zijn mogelijk gedeeltelijk te verklaren doordat schepen in konvooi varen.

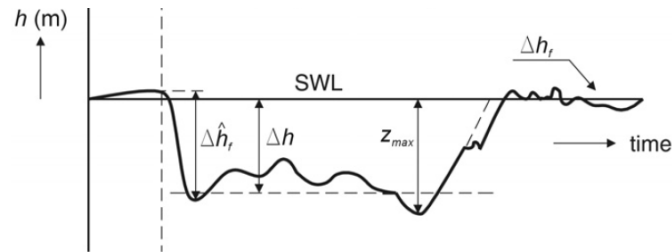


Figuur 24 – Vergelijking berekende ten opzichte van opgemeten vaarsnelheid

Voor de berekening van de primaire en secundaire golf in volgende paragrafen wordt de opgemeten vaarsnelheid V_s gebruikt.

6.1.2 Primaire golf

Een figuur met de karakterisatie van een primaire golf uit de Rock Manual wordt overgenomen in Figuur 25. Bemerk dat ook op basis van deze figuren karakteristieke waarden per scheepspassage werden afgeleid, zie hoofdstuk 4.



Figuur 25 – Parameters primaire golf Rock Manual

Voor de bepaling van de gemiddelde waterspiegeldaling wordt volgende formule opgegeven in de Rock Manual:

$$\Delta h = \frac{V_s^2}{2g} \cdot [\alpha_s \cdot (A_c/A_c^*)^2 - 1]$$

Met:

- Δh Gemiddelde waterspiegeldaling tijdens de scheepspassage [m]
- V_s Vaarsnelheid afgeleid uit de metingen [m/s]
- α_s Correctiefactor om de invloed van de vaarsnelheid ten opzichte van het maximum uit te drukken $\alpha_s = 1.4 - 0.4 \cdot V_s/V_L$ [-]
- A_c Dwarssctie vaarweg in de onverstoorde situatie, zie bijlage C [m²]
- A_c^* Dwarssctie vaarweg rondom het schip: $A_c^* = A_c - b_w \cdot \Delta h - A_m$ [m²]

Bemerk dat door de aanwezigheid van de inzinking in de berekening van de dwarssectie rondom het schip de oplossing iteratief doorgerekend moet worden. Dit wordt uitgevoerd vertrekkend van $\Delta h=0$ tot het verschil tussen twee opeenvolgende iteraties kleiner wordt dan <0.001 m. Bij toepassen valt op dat voor grotere schepen bij vaarsnelheden boven de limietsnelheid de oplossing kan divergeren. Een groter wordende inzinking doet de term $(A_c/A_c^*)^2$ sterk toenemen waardoor opslingeren optreedt. Enkel de scheepspassages waarbij de berekening convergeerde worden weerhouden. Een 23 scheepspassages convergeerden niet.

Om rekening te houden met de positie van het schip in de vaarweg geeft de Rock Manual volgende formule:

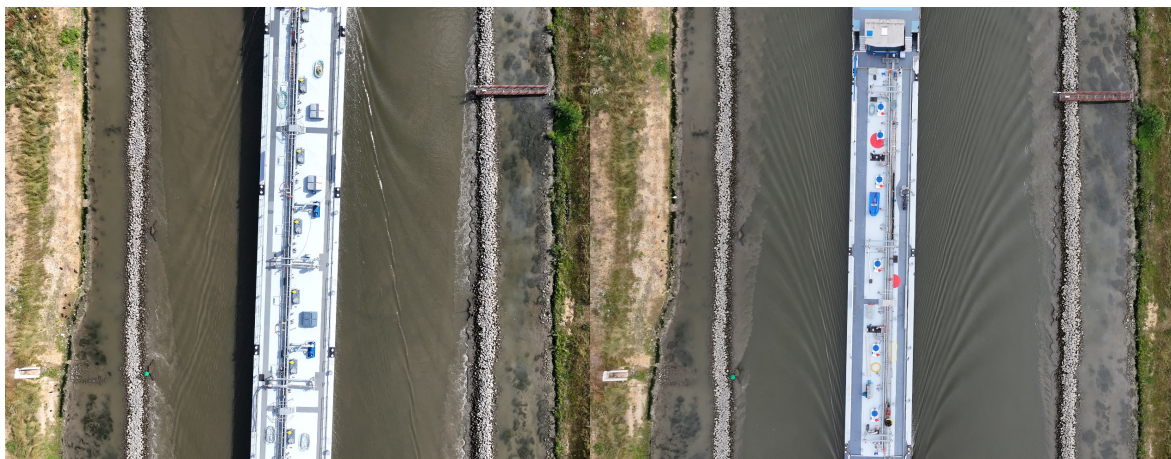
$$\Delta \hat{h}/\Delta h = \begin{cases} 1 + 2A_w^* & \text{voor } b_w/L_s < 1.5 \\ 1 + 4A_w^* & \text{voor } b_w/L_s \geq 1.5 \end{cases}$$

Met:

- Δh Gemiddelde waterspiegeldaling tijdens scheepspassage [m]
- $\Delta \hat{h}$ Gemiddelde waterspiegeldaling nabij oever tijdens scheepspassage [m]
- A_w^* $y h/A_c$ [-]
- y Positie schip ten opzichte van center vaargeul [m]
- h Waterhoogte [m]
- A_c Dwarssctie vaarweg, zie bijlage C. [m²]

Wanneer het center van het schip naar de linkeroever toe is georiënteerd, wordt het teken van de positie van het schip ten opzichte van center vaargeul negatief en zal dus een reductie optreden ten opzichte van de gemiddelde waterspiegeldaling.

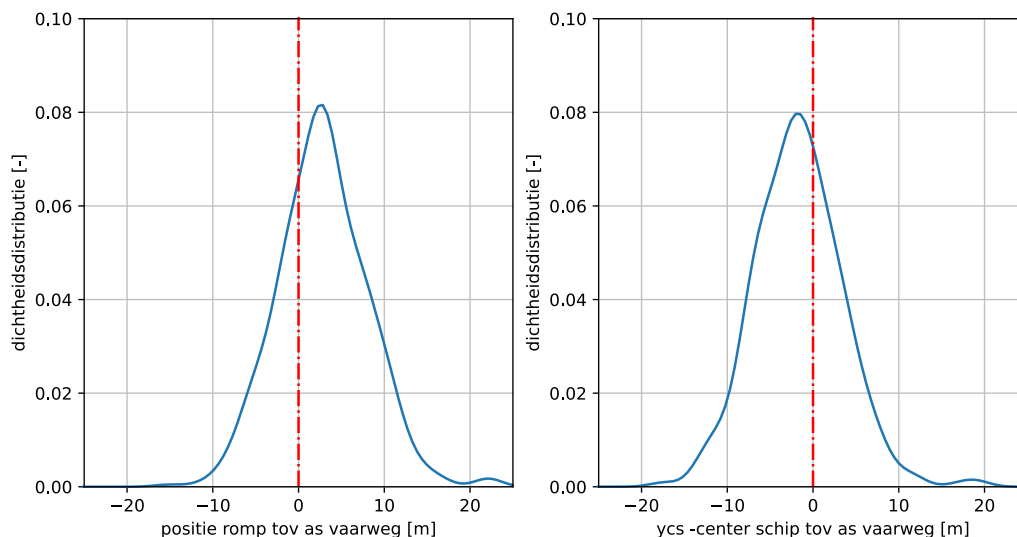
Uit de op 9/7 opgemaakte drone opnames volgt dat de schepen vrijwel centraal in de vaargeul varen. Echter de meeste met een beperkte afwijking naar linkeroever toe en enige hoek (yaw). Zowel de schepen in opvaart als de schepen in afvaart hebben hierbij een gelijkaardige afwijking waarbij de afwaarts georiënteerde zijde van het schip naar rechteroever is gericht en de naar opwaarts georiënteerde zijde van het schip naar linkeroever is gericht, zie Figuur 26. Het is niet duidelijk of de passerelle het varen van de schepen beïnvloed.



links scheepspassage 386 afvaart / rechts scheepspassage 388 opvaart

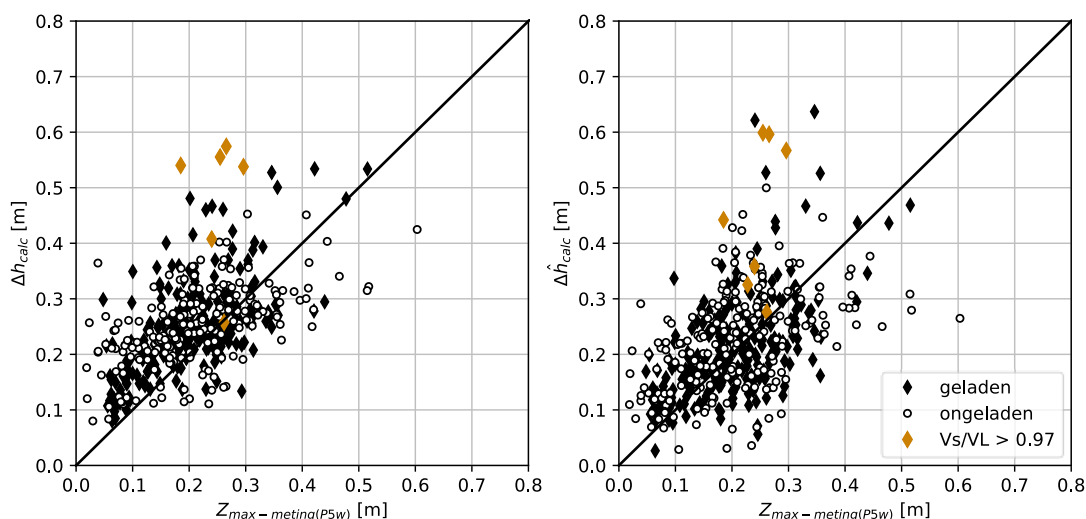
Figuur 26 – Voorbeeld schip in vaargeul

Ook uit de AIS data werd de positie van het schip ten opzichte van de oever bepaald. Hiervoor werd het snijpunt bepaald tussen de twee coördinaten uit de AIS data en de raai van de meetsectie. Bemerkt dat de coördinaten en dus ook het snijpunt de locatie van de AIS transponder betreffen. Doordat in de data ook de positie van de transponder ten opzichte van de contouren van het schip gegeven wordt en dat de vaarrichting gekend is, kan dit snijpunt omgezet worden naar de locatie van het center en de locatie van de romp van het schip. In Figuur 27 wordt de locatie van de romp aan zijde rechteroever en het center van het schip ten opzichte van het center van de vaargeul gegeven. De vaargeul heeft een totale breedte 47.2 m en de x-as wordt gelimiteerd op +/- 23.6 m. Een negatieve waarde betreft een oriëntatie naar linkeroever, een positieve oriëntatie betreft een oriëntatie naar rechteroever. Alle scheepspassages bevinden zich binnen de vaargeul en gemiddeld is er een kleine afwijking van het center van het schip naar linkeroever toe.



Figuur 27 – Afstand tussen damwandplank rechtoever en romp respectievelijk center schip

De gemiddelde waterspiegeldaling Δh en de gemiddelde waterspiegeldaling nabij de oever $\Delta \hat{h}$ wordt in Figuur 28 vergeleken met de opgemeten haalgolf. Uit een vergelijking van de berekende haalgolf ten opzichte van de gemeten gemiddelde waterspiegeldaling volgde een sterke overschatting van de meting, waarna werd besloten dat voor de Leie de haalgolf representatiever is. Uit de vergelijking volgt dat er een ruime spreiding optreedt en dat deze onafhankelijk lijkt van het geladen of ongeladen zijn. Bij toepassing van omrekening naar de oever neemt de spreiding toe. In beide figuren valt ook op dat voor een aantal scheepspassages hoge waterspiegeldalingen berekend worden, dit betreffen voornamelijk scheepspassages waarbij de opgemeten vaarsnelheid naar de limietsnelheid toe evolueert.



Figuur 28 – Vergelijking berekende waterspiegeldaling (links) ter hoogte van de oever (rechts) ten opzichte van gemeten haalgolf (formulering Rock Manual)

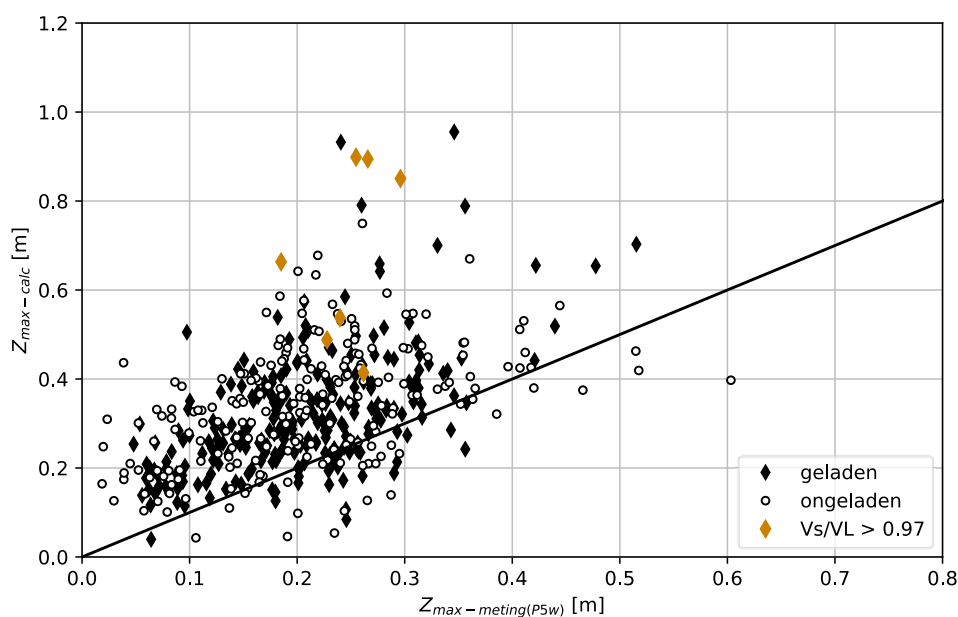
Naast de formule voor de gemiddelde waterspiegeldaling geeft de Rock Manual een afleiding naar de haalgolf:

$$Z_{max} = 1.5 \cdot \Delta \hat{h}$$

Met:

- Z_{max} Haalgolf schip [m]
- $\Delta \hat{h}$ Gemiddelde waterspiegeldaling nabij oever tijdens scheepspassage [m]

In Figuur 29 wordt een vergelijking gegeven tussen de berekening en de meting waaruit een merkelijke overschatting van de berekening ten opzichte van de meting volgt.



Figuur 29 – Vergelijking berekende ten opzichte van opgemeten haalgolf (formulering Rock Manual)

6.1.3 Secundaire golf

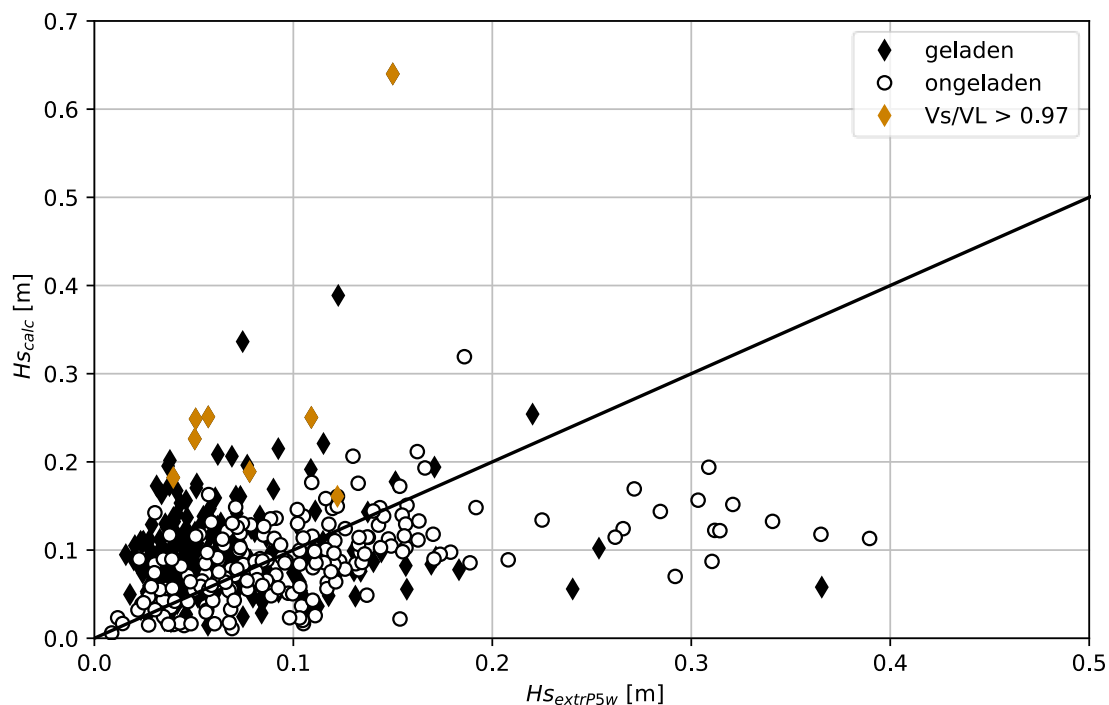
Voor de secundaire golfhoogte wordt in de Rock Manual volgende formule gegeven:

$$H_s = 1.2 \alpha_i h (y_s/h)^{-1/3} \cdot \frac{V_s^4}{(gh)^2}$$

Met

- H_s Hoogte secundaire golf [m]
- α_i Coëfficiënt in functie van type schip. Aanbevolen waarden: [-]
 Sleepboten en geladen beroepsvaart = 1
 Ongeladen conventionele schepen = 0.35
 Ongeladen duwbakken = 1
- y_s Afstand schip ten opzichte van oever [m]
- V_s Vaarsnelheid schip, bepaald uit de metingen [m/s]
- h Waterhoogte = $P_{gem} - P_b$ [m]
- P_{gem} Gemiddeld waterpeil tijdens een scheepspassage [m TAW]
- P_b Gemiddeld bodempeil in de vaargeul = 1.32 m TAW, zie bijlage C [m TAW]
- g Zwaartekrachtversnelling 9.81 m/s² [m/s²]

Een vergelijking tussen de berekende en opgemeten secundaire golfhoogte wordt gegeven in Figuur 30.



Figuur 30 – Vergelijking berekende ten opzichte van opgemeten secundaire golfhoogte (formulering Rock Manual)

Bemerkt dat de resultaten een sterke spreiding vertonen waarbij de berekening de meting zowel kan onderschatten als overschatten. Een aantal scheepspassages met een vaarsnelheid naar de limietsnelheid toe resulteren in een berekende golfhoogte die merkkelijk hoger is dan de opgemeten golfhoogte. Anderzijds zijn er een aantal opgemeten scheepspassages, van overwegend ongeladen schepen, waarbij de opgemeten secundaire golfhoogte merkkelijk hoger is dan de berekende. Uit de analyse van de secundaire golfhoogte in functie van de CEMT klasse, zie Figuur 15, volgt dat dit, op een uitzondering na, ongeladen CEMT I, CEMT III en recreatievaartuigen betreffen. Met de bemerking dat ook duwboot-duwbak combinaties foutief als recreatievaart zijn gecategoriseerd.

6.2 Dipro

Voor de eigenlijke dimensionering van de breuksteenberm in de memo van SBE wordt gebruik gemaakt van de formulering uit het programma Dipro (Waterloopkundig Laboratorium, 1997).

6.2.1 Vaarsnelheid

De vaarsnelheid wordt op een gelijkaardige manier ingeschat als in de Rock Manual. Met het verschil dat één van de drie formules voor de limietsnelheid verschillend is alsook wordt bij Dipro een vaste reductiecoëfficiënt ten opzichte van de limietsnelheid van 0.90 aangehouden waar dat in de Rock Manual voor geladen schepen een reductiecoëfficiënt van 0.75 wordt aangehouden en voor ongeladen schepen een reductiecoëfficiënt van 0.90 wordt aangehouden. Wanneer uit de bepaling van de limietsnelheid geen bruikbare resultaten volgen, wordt een methodiek beschreven op basis van weerstand, voortstuwing en vaarsnelheid. Het is evenwel niet duidelijk wanneer de resultaten als niet bruikbaar beschouwd dienen te worden.

Voor de bepaling van de haalgolf in volgende paragraaf wordt de opgemeten vaarsnelheid gebruikt.

6.2.2 Primaire golf

Naast de formule voor de gemiddelde waterspiegeldaling die ook in de Rock Manual wordt gegeven, wordt nog een oplossing beschreven op basis van een behoud van impuls en krachterevenwicht. De wijze waarop dit evenwicht opgelost wordt, is niet beschreven en de uitwerking valt buiten scope van dit project.

Naast beide theoretische formuleringen worden empirisch bepaalde relaties gegeven die van toepassing zijn bij een vaarsnelheid van het schip die hoger is dan 0.75 keer de limietsnelheid ($V_{\text{schip}} / V_L > 0.75$). Deze formuleringen werden toegepast in kader van de stabiliteitsberekening van de breuksteenberm (SBE, 2020).

Voor geladen RHK-schepen kan voor de bepaling van de grootte van de haalgolf de volgende relatie worden gehanteerd:

$$Z_{\max} = 23.6 \cdot \left(\frac{A'_c}{A_c}\right)^{-0.7} \cdot \left(\frac{A_M}{A_c}\right)^2 \cdot \left(\frac{B_s}{h_1}\right)^{0.5} \cdot \left(\frac{V_{\text{schip}}}{\sqrt{g \cdot h_1}}\right)^4 \cdot h_1 \cdot m^{0.4}$$

Voor ongeladen RHK-schepen in een klasse IV vaarweg kan de maximale haalgolf bepaald worden met volgende relatie:

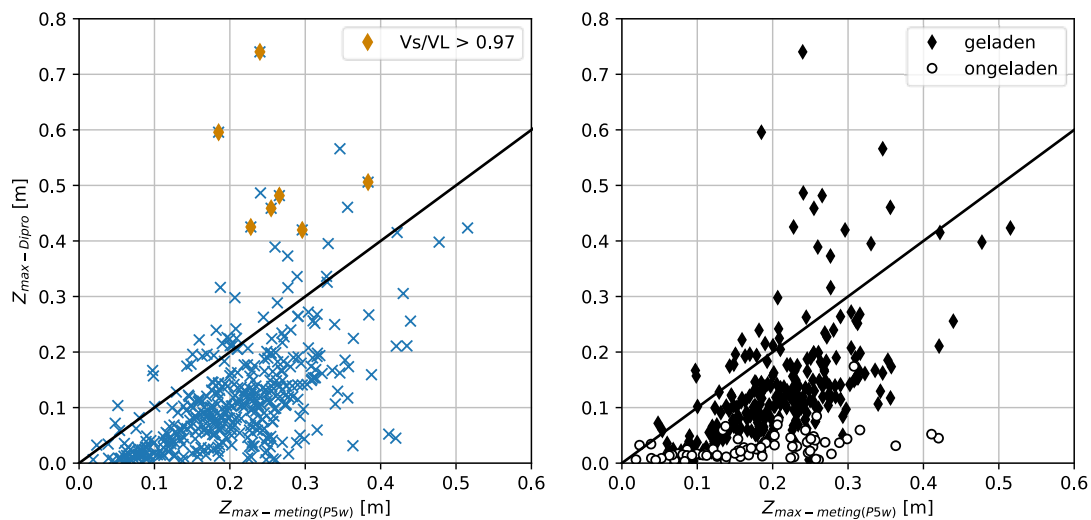
$$Z_{\max} = 70.3 \cdot \left(\frac{A'_c}{A_c}\right)^{-0.5} \cdot \left(\frac{A_M}{A_c}\right)^2 \cdot \left(\frac{B_s}{h_1}\right)^{0.5} \cdot \left(\frac{V_{\text{schip}}}{\sqrt{g \cdot h_1}}\right)^{5.5} \cdot h_1 \cdot m^{0.4}$$

Met:

• $Z_{\max}$	Haalgolfhoogte boven talud	[m]
• A_c	Dwarssectie vaarweg, zie bijlage C	[m ²]
• A'_c	Doorsnede vaarweg tussen as van schip en oever, zie bijlage C	[m ²]
• m	Taludhelling = 1.56, zie bijlage C	[-]
• B_s	Breedte schip	[m]
• A_m	Grootspantoppervlak	[m ²]
• V_s	Vaarsnelheid schip	[m/s]
• g	Zwaartekrachtversnelling = 9.81 m/s ²	[m/s ²]
• h_1	Waterhoogte = $P_{\text{gem}} - P_b$	[m]
• P_{gem}	Gemiddeld waterpeil tijdens een scheepspassage	[m TAW]
• P_b	Gemiddeld bodempeil in de vaargeul = 1.32 m TAW, zie bijlage C	[m TAW]

Wanneer de uitkomst van $Z_{\max}$ kleiner is dan de waterspiegeldaling ter hoogte van de oever $\Delta\hat{h}$ wordt $Z_{\max}$ gelijkgesteld aan $\Delta\hat{h}$. Bemerk dat de formulering voor $\Delta\hat{h}$ overeenkomt met de hierboven toegepaste formulering uit de Rock Manual.

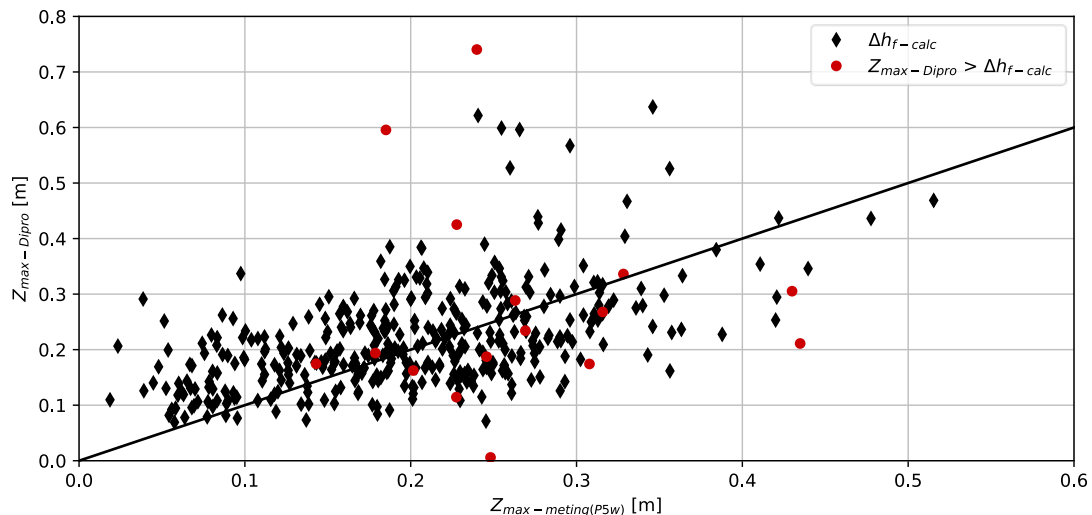
Bovenstaande berekening van $Z_{\max}$ wordt toegepast op alle beroepsvaart. De opdeling in geladen en ongeladen schepen wordt gemaakt op basis van de diepgang, zie bijlage B. Voor de tussenliggende diepgangen wordt een interpolatie tussen de berekende $Z_{\max}$ bij een ongeladen en bij een geladen schip toegepast. De op deze wijze bepaalde $Z_{\max}$ wordt in Figuur 31 uitgezet ten opzichte van de opgemeten maximale waterspiegeldaling. Bemerk dat om inzicht te verkrijgen in de berekening de waarden $Z_{\max}$ die kleiner zijn dan $\Delta\hat{h}$ hierin nog niet gelijkgesteld zijn aan $\Delta\hat{h}$.



Figuur 31 – Vergelijking berekende ten opzichte van opgemeten haalgolf (formulering Dipro)

Uit de vergelijking valt op dat voor een aantal scheepspassages merkkelijk hogere waterspiegeldalingen berekend worden met de formulering van Dipro maar dat voor de meeste scheepspassages de berekening een onderschatting betreft van de meting. Bij de opsplitsing in geladen en ongeladen schepen valt op dat deze onderschatting beduidend sterker is voor ongeladen schepen dan voor geladen schepen.

Wanneer voor de scheepspassages waarbij $Z_{\max} < \Delta\hat{h}$, $Z_{\max}$ gelijkgesteld wordt aan $\Delta\hat{h}$ wordt Figuur 32 bekomen. Op enkele uitzonderingen na is de berekende $\Delta\hat{h}$ groter dan de aan de hand van empirische formules berekende $Z_{\max}$. Op deze wijze vervalt ook de systematische onderschatting.



Figuur 32 – Vergelijking berekende ten opzichte van opgemeten maximale waterspiegeldaling (formulering Dipro)

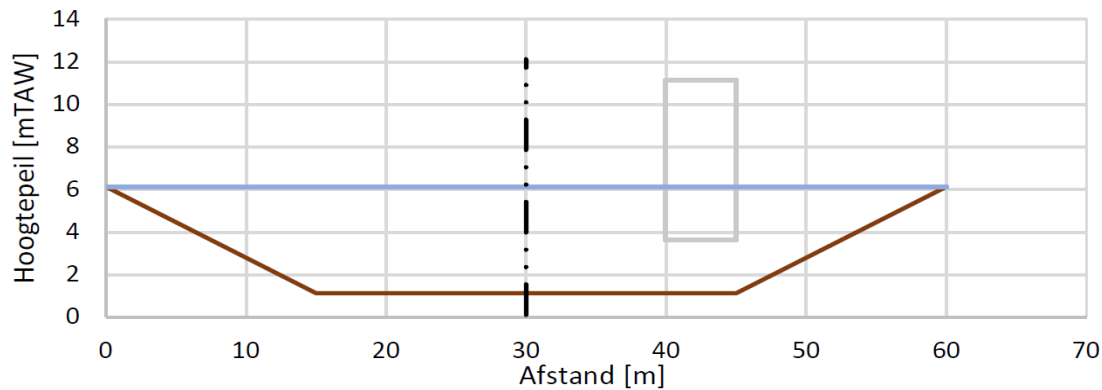
6.3 Vergelijking met memo SBE

Bijlage 2 van de door SBE opgemaakte memo hydrodynamische randvoorwaarden bevat per CEMT classificatie voor zowel een ongeladen als een geladen schip een uittreksel van een rekenblad. De achterliggende formules betreffen deze van de Rock Manual en Dipro. Bemerkt dat de rekenbladen uitgaan van een theoretisch profiel, een ontwerp vaarsnelheid en de ontwerp afstand tot de oever. Een één op één revisie van de memo van SBE wordt niet uitgevoerd. Wel wordt in deze paragraaf een nazicht van de memo op hoofdlijnen uitgevoerd en een vergelijking met de berekening in voorgaande paragrafen.

In de memo van SBE wordt uitgegaan van een trapeziumvormig profiel. In voorgaande paragrafen werd vertrokken van een opgemeten vaarwegprofiel, zie bijlage C. Het trapeziumvormig ontwerp-profiel wordt overgenomen in Figuur 33 en het opgemeten vaarwegprofiel in Figuur 34. In dit rapport wordt de vaarwegbreedte gelijkgesteld aan de uit de orthofoto afgeleide afstand tussen de damwandplanken ter hoogte van de meetsectie, dit betreft een 46.2 m. Deze 46.2 m is merkbaar minder breed dan de 60 m uit het trapezium vormig profiel. Ook valt in het opgemeten vaarwegprofiel op dat net voor de damwandplanken een tussenplateau voorkomt met een peil 3.5 m TAW aan zijde rechteroever en 3.0 m TAW aan zijde linkeroever. In de formuleringen van Dipro dient de helling van het talud ingevuld te worden. In de memo van SBE wordt een helling 3 (H:V) beschouwd. Uit het opgemeten vaarwegprofiel wordt een helling 1.35 (H:V) afgeleid voor de overgang tussen het bodempeil van de Leie en het onderwaterplateau voor de damwandplank.

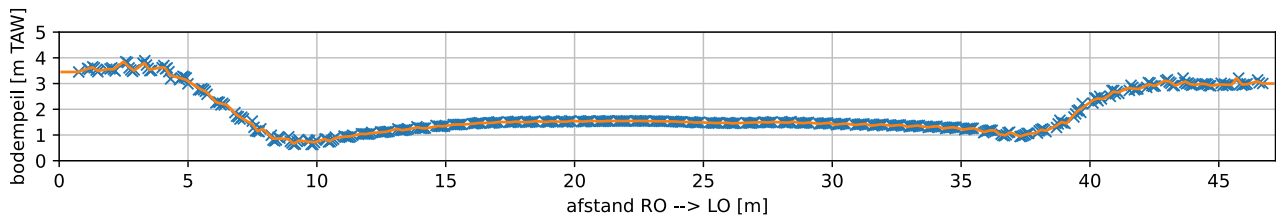
In de memo van SBE wordt de minimale diepte van de vaarweg op 1.11 m TAW gelegd. Uit de bathymetrische opmeting wordt een gemiddeld peil 1.32 m TAW afgeleid.

Bemerkt dat in deze fase de baggerwerken benodigd voor de opwaardering naar een CEMT Vb vaarweg nog niet zijn uitgevoerd. Na uitvoeren van deze baggerwerken zal het tussenplateau verdwijnen en wordt de minimale diepte van de vaarweg op 1.11 m TAW gebracht.



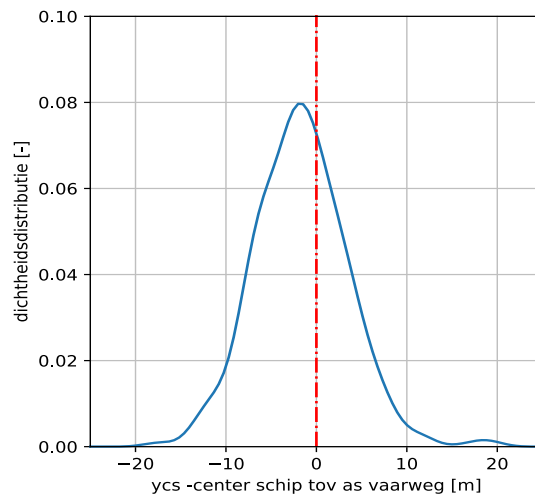
(SBE, 2020)

Figuur 33 – Trapezium vaarwegprofiel rekenblad memo hydrodynamische randvoorwaarden



Figuur 34 –Vaarwegprofiel ter hoogte van meetsectie

Voor het ontwerp (SBE, 2020) werd een excentriciteit ten opzichte van het center van de vaargeul opgelegd. Deze excentriciteit is in functie van het type schip en bedraagt een 12.48 m voor een CEMT I schip en neemt af tot 9.30 m voor een CEMT Vb. Om inzicht te krijgen in excentriciteit in situ werd een analyse uitgevoerde op de AIS data, zie Figuur 35. Hieruit volgde dat de schepen ter hoogte van de meetsectie een gemiddelde excentriciteit gericht naar linkeroever toe vertoonden, vermoedelijk te wijten aan de passerelle van de meetopstelling die tot aan de vaarweg reikte. Een rechtstreekse vergelijking tussen de excentriciteit volgens uit de AIS analyse en de in ontwerp gehanteerde excentriciteit is niet mogelijk door verschil in profiel en breedte van de vaarweg.



Figuur 35 – Afstand center schip t.o.v. as vaarweg

Voor toekomstige ontwerpen is het aanbevolen om een beter inzicht te krijgen in de afstand tussen schip en oever. Aanbevolen wordt om de AIS analyse opnieuw uit te voeren voor een moment zonder passerelle en om daarnaast ook andere kenmerkende locaties te beschouwen.

7 BAW

De Duitse Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) heeft een handboek uitgegeven met betrekking tot het ontwerp van oeverbeschermingen op bevaarbare binnenwaterwegen. In onderhavig hoofdstuk worden de voor de Leie relevante formuleringen voor scheepsgeïnduceerde golven overgenomen en vervolgens voor de beschouwde scheepspassages doorgerekend en vergeleken met de metingen. Analoog met hoofdstuk 6 waar dit werd gedaan voor de formulering uit de Rock Manual en Dipro.

De formuleringen werden overgenomen uit volgend BAW handboek:

- Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen (BAW, 2010).
- BAW Code of Practice Principles for the Design of Bank and Bottom Protection for Inland Waterways (GBB) (BAW, 2010)

Bemerkt dat BAW een iets andere symbolologie hanteert alsook dat bepaalde parameters mogelijk enigszins verschillen. Om foute interpretaties en verwarring te vermijden wordt in dit hoofdstuk de symbolologie van de BAW publicaties overgenomen.

Een aantal voor de Leie relevante algemene bemerkingen uit (BAW, 2010) worden overgenomen in paragraaf 7.1. De vaarsnelheid wordt behandeld in paragraaf 7.2, de primaire golf in paragraaf 7.3 en de secundaire golf in paragraaf 7.4.

7.1 Algemeen

Het BAW handboek geeft aan dat berekeningsmethoden uitgaan van vereenvoudigde basisvergelijkingen waarin onder meer ook de geometrie wordt vereenvoudigd. Hier wordt deels aan tegemoetgekomen door toepassen van empirische correcties. Deze zijn echter enkel geldig voor het gebied waarbinnen deze werden opgemaakt. Alsook is er niet voor alle types schepen voldoende ervaring met de toepasbaarheid. Om deze reden heeft het de voorkeur om een ontwerp te baseren op gemeten waarden.

Wat betreft de nauwkeurigheid van de berekeningsmethoden moet worden opgemerkt dat de belastingen die voortvloeien uit de haalgolf nauwkeuriger kunnen worden bepaald dan de belastingen uit het secundaire golfsysteem en de windgolven.

Uit model- en natuurproeven volgt dat de grootste belastingen voorkomen bij enkelvoudige scheepspassages. Dit omdat deze enkelvoudige scheepspassages, hoewel ze voldoende ruimte hebben, tijdelijk tot nabij de oever varen en varen met veel hogere snelheden dan kruisende of oplopende schepen. Voor kruisende schepen bestaat er geen betrouwbare benadering. Voor de haalgolf kan in eerste fase uitgegaan worden door het veronderstellen dat de schepen in dezelfde richting varen en berekend kunnen worden als één schip. Bemerkt dat bij de gedetecteerde kruisingen tijdens de metingen, zie illustraties onder paragraaf 5.4, wel een merkelijke versterking van de haalgolf optrad.

Voor de primaire golf wordt aangegeven dat voor de belasting ook de duurtijd van de waterspiegeldaling van belang is. Dit ondersteunt de in paragraaf 4.1. geformuleerde representatie waarbij de waterspiegeldaling geïntegreerd wordt over de duurtijd van de waterspiegeldaling.

In het handboek wordt een situatie beschreven waarbij bij het bereiken van de limiet vaarsnelheid de golf aan het hek begint te breken wat leidt tot een sterke belasting op de oevers. Een dergelijke patroon werd niet opgemerkt tijdens de terreinbezoeken en uit de drone opnames.

7.2 Vaarsnelheid

Het BAW handboek wijst er op dat de stabiliteit in gevaar gebracht kan worden door één scheepspassage met een hoge vaarsnelheid en dat hierom voor het ontwerp uitgegaan moet worden van de grootste realistische vaarsnelheid, ofwel de limiet vaarsnelheid ofwel de maximale toegestane snelheid. Als de schade toe te schrijven valt aan de som van meerdere scheepspassages wordt aanbevolen om de ontwerpsnelheid gelijk te stellen aan 97 % van de limiet vaarsnelheid. Bemerkt dat een coëfficiënt 0.97 merkbaar hoger is dan de coëfficiënt 0.90 die in Dipro wordt toegepast, zie paragraaf 6.2.1, en de coëfficiënt 0.75 (geladen) tot 0.90 (niet geladen) uit de Rock Manual, zie paragraaf 6.1.1.

Daarnaast wordt opgemerkt dat rekening gehouden moet worden met de leeftijd van de schepen. Nieuwe moderne schepen zullen veelal sneller varen dan oudere. Ook speelt de drukte op de vaarweg mee. Bij een ontmoeting zal een schip uitwijken naar de oever toe. Uit observaties merkt BAW op dat de grootste belastingen doorgaans worden veroorzaakt door schepen die dicht bij de oever varen in enkelvaart.

Op kanaaltrajecten in Duitsland gelden verschillende toegelaten vaarsnelheden, die meestal gedifferentieerd zijn naar vol- en leegvaart. Voor de bepaling van vol- respectievelijk leegvaart wordt dikwijls een opdeling gemaakt op basis van over- respectievelijk onderschrijden van een diepgang van 1.3 m. Een representatieve vaarsnelheid betreft 12 km/u voor een ongeladen schip en een vaarsnelheid van 10 km/u voor een geladen schip. Verkeersobservaties tonen echter aan dat soms aanzienlijk hogere vaarsnelheden worden aangehouden dan toegestaan als schepen deze kunnen bereiken op basis van hun motorvermogen en de dwarsdoorsnede verhouding.

Voor de limiet vaarsnelheid wordt volgende formule gegeven:

$$v_k = y_{krit} \cdot \sqrt{g \cdot h_m}$$

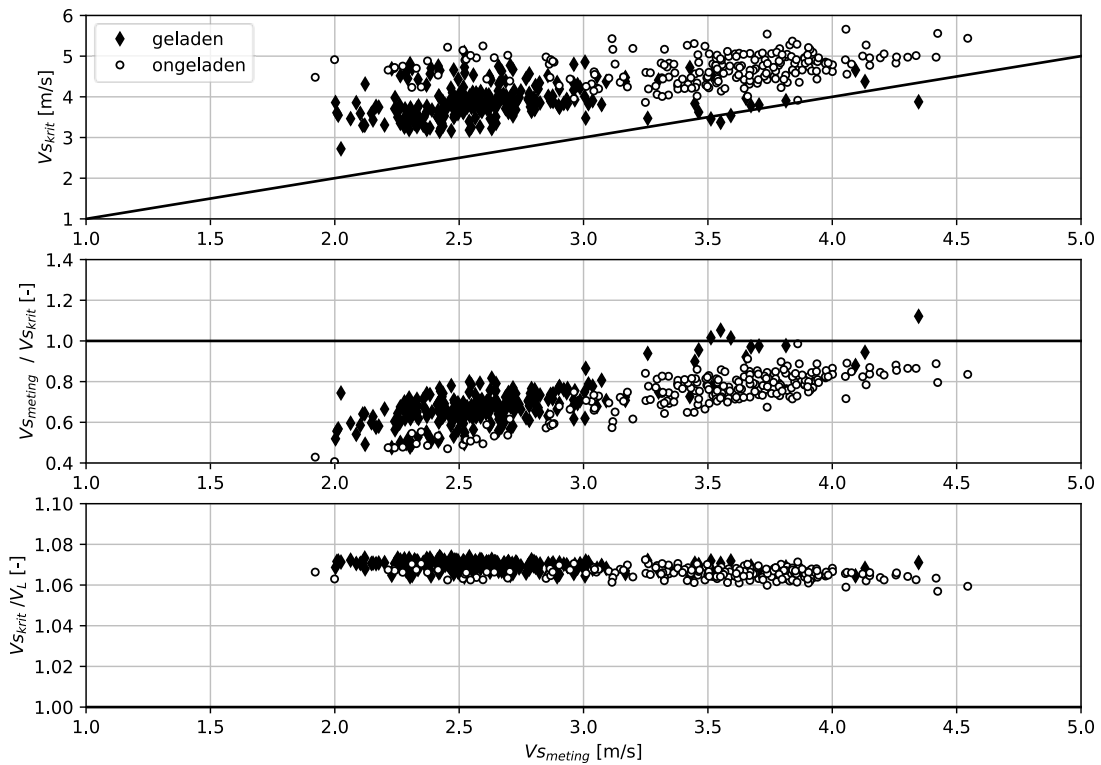
Met:

• v_{krit}	Kritische vaarsnelheid	[m/s]
• y_{krit}	Iteratief bepaalde coëfficiënt	[-]
• g	Zwaartekrachtversnelling = 9.81 m/s ²	[m/s ²]
• h_m	Gemiddelde waterdiepte	[m]

De coëfficiënt y_{krit} dient iteratief bepaald te worden door middel van de oplossing van een reeks formules die rekening houden met volgende parameters:

- de equivalente kanaal doorsnede,
- de dwarsdoorsnede van het schip,
- de breedte van de vaarweg aan het wateroppervlak,
- de gemiddelde waterdiepte,
- de helling van de oever,
- de verhouding van de kanaal doorsnede ten opzichte van de dwarsdoorsnede van het schip.

Voor de formules voor de bepaling van y_{krit} wordt verwezen naar par 5.5.2. van BAW (2010). De bepaalde kritische vaarsnelheid wordt in Figuur 36 uitgezet ten opzichte van de opgemeten vaarsnelheid. Bemerkt dat voor de bepaling van de maatgevende vaarsnelheid nog een coëfficiënt 0.97 zou toegepast moeten worden op de kritische vaarsnelheid. Slechts een aantal schepen overschrijden de berekende kritische vaarsnelheid. Voor de meeste scheepspassages betreft de berekende kritische vaarsnelheid een overschatting van de werkelijke vaarsnelheid. Op basis van de grafiek wordt een reductiecoëfficiënt 0.80 voorgesteld voor geladen schepen en een reductiecoëfficiënt 0.90 voor ongeladen schepen. Ter vergelijking wordt in de onderste figuur de kritische vaarsnelheid bepaald volgens het BAW handboek vergeleken met de limiet vaarsnelheid bepaald uit de Rock Manual. De kritische vaarsnelheid bepaald volgens het handboek is een 7-8 % hoger dan de limietsnelheid bepaald volgens de Rock Manual.



Figuur 36 – Vergelijking kritische vaarsnelheid volgens formulering handboek BAW ten opzichte van opgemeten vaarsnelheid.

Voor de berekening van de primaire en secundaire golf wordt verder de opgemeten vaarsnelheid toegepast in plaats van de berekende vaarsnelheid.

7.3 Primaire golf

Het handboek maakt een opdeling op basis van de afmeting van het schip en de breedte van de vaarweg. Hiervoor dient een invloedsbreedte – b_E – bepaald te worden:

$$b_E = \frac{\pi}{2} \cdot (L_s + f_B \cdot B_s)$$

Met

- b_E Invloedsbreedte [m]
- B_s Breedte schip [m]
- f_B Factor van de invloedsbreedte, afhankelijk van het scheepstype [-]
 - $f_B = 3$: gebruikelijk binnenschip
 - $f_B \approx 1,5$: modern, binnengaats zeeschip; schip met bulbsteven
 - $f_B = 0$: scheepsomtrek ellipsvormig (volgens de theorie)
- L_s Lengte schip [m]

Voor een CEMT klasse I schip met een lengte 38.5 m en een breedte 5.05 m wordt een invloedsbreedte 84 m bepaald. De beschouwde sectie van de Leie met een breedte op de waterlijn 47 m valt zelfs voor CEMT klasse I schepen ruim binnen de definitie van een beperkte vaarweg. De retourstroming werkt hierdoor over de volledige kanaalbreedte.

Voor de bepaling van de gemiddelde waterspiegeldaling ter hoogte van de smalste sectie van het schip wordt volgende formule gegeven:

$$\Delta \bar{h} = \frac{1}{2g} \cdot [\alpha_1 \cdot (v_s + v_r)^2 - v_s^2]$$

Met:

- $\Delta \bar{h}$ Gemiddelde waterspiegeldaling tijdens de scheepspassage [m]
- v_s Vaarsnelheid schip (afgeleid uit de metingen) [m/s]
- v_r Snelheid retourstroming [m/s]
- α_1 Coëfficiënt = $1.4 - 0.4 \cdot V_s/V_L$ [-]

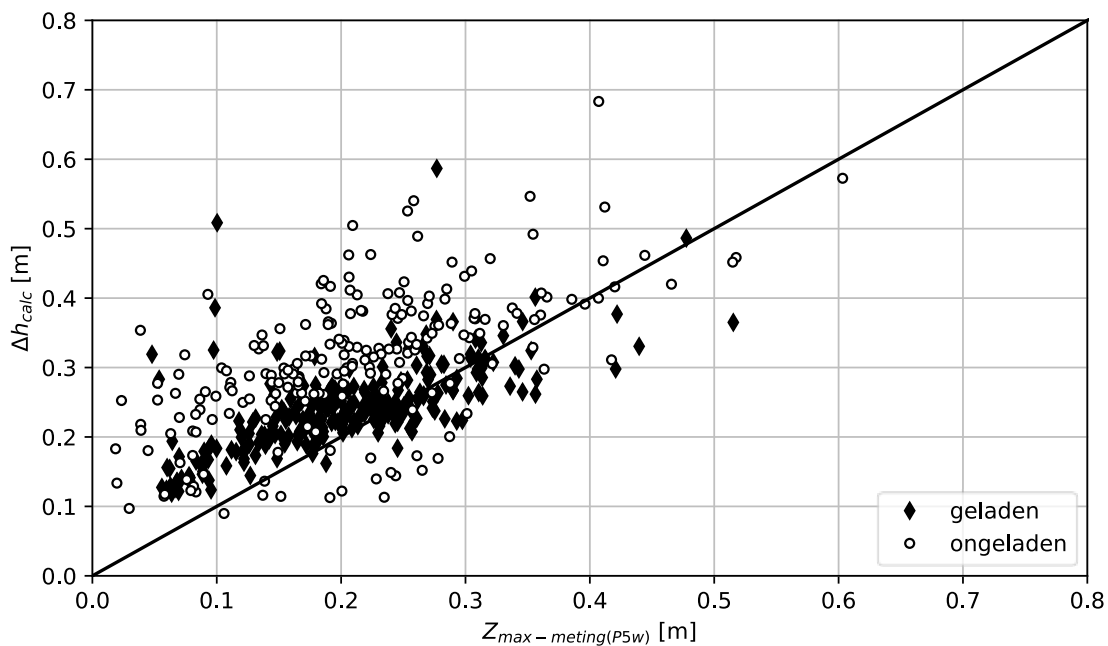
Voor de bepaling van de retourstroming wordt volgende formule gegeven:

$$v_r = \frac{A_M + b_m \cdot \Delta \bar{h}}{A - (A_M + b_m \cdot \Delta \bar{h})} \cdot v_s$$

Met:

- A Kanaal doorsnede [m²]
- A_M Grootspantoppervlak [m²]
- b_m Gemiddelde breedte aan het wateroppervlak in het gebied van de waterstandverlaging = $b_w - \Delta \bar{h} \cdot m$ [m]

Bovenstaande vergelijkingen dienen iteratief opgelost te worden. Voor 41 scheepspassages itereerde de oplossing niet. Dit betroffen scheepspassages met een vaarsnelheid ten opzichte van de kritische snelheid van 0.90 of hoger. De berekende gemiddelde waterspiegeldaling wordt in Figuur 37 uitgezet ten opzichte van de opgemeten haalgolf. Uit de vergelijking volgt dat zeker voor de ongeladen schepen een ruime spreiding optreedt. Voor de geladen schepen lijken de resultaten iets coherenter, weliswaar met enkele uitschieters.



Figuur 37 – Vergelijking gemiddelde berekende waterspiegeldaling ten opzichte van opgemeten haalgolf (formulering BAW)

Voor de bepaling van de waterspiegeldaling nabij de oever worden in het handboek figuren gegeven in functie van de positie van het schip in de vaarweg en de verhouding van de lengte van het schip tot een equivalente breedte van de vaarweg. Een afzonderlijke figuur wordt gegeven voor een ratio lengte ten opzichte van breedte van het schip van 5, 10 en 20. Bemerk dat voor binnenvaartschepen de ratio lengte tot breedte veelal in de grootteorde van 10 zal uitkomen. Om deze reden wordt de figuur horende bij een lengte breedte ratio van het schip gelijk aan 10 overgenomen in Figuur 38. De breedte br in deze figuur wordt als volgt bepaald:

$$br = \frac{A}{h} = \frac{186.9}{4.5} = 41.5 \text{ m}$$

Met:

- br : Breedte sectie [m]
- A : Natte sectie vaarweg 186.9 m^2 zie bijlage C [m²]
- h : Gemiddelde waterdiepte centraal in de vaargeul = $P_{\text{gem}} - P_b$
 $5.82 \text{ m TAW} - 1.32 \text{ m TAW} = 4.50 \text{ m}$ [m]

De verhouding van de lengte van het schip ten opzichte van de breedte br varieert tussen 0.87 voor een CEMT I schip tot 2.7 voor een CEMT Va schip. Op de liggende as van Figuur 38 wordt de positie van het center van het schip in de vaarweg gegeven. Bemerk dat bij een waarde 0.5 het schip zich centraal in de vaargeul bevindt en dat bij een waarde 0.0 het schip zich aan de oever bevindt waar de waterspiegeldaling berekend wordt. Op de opstaande as wordt de verhouding van de waterspiegeldaling aan de oever ten opzichte van de berekende waterspiegeldaling gegeven. Bemerk dat deze waarde niet hoger kan worden dan 1.0. Bij een CEMT I schip centraal in de vaargeul dient een reductiecoëfficiënt 0.6 toegepast te worden bij een CEMT Va schip centraal in de vaargeul bedraagt de reductiecoëfficiënt ca. 0.9.

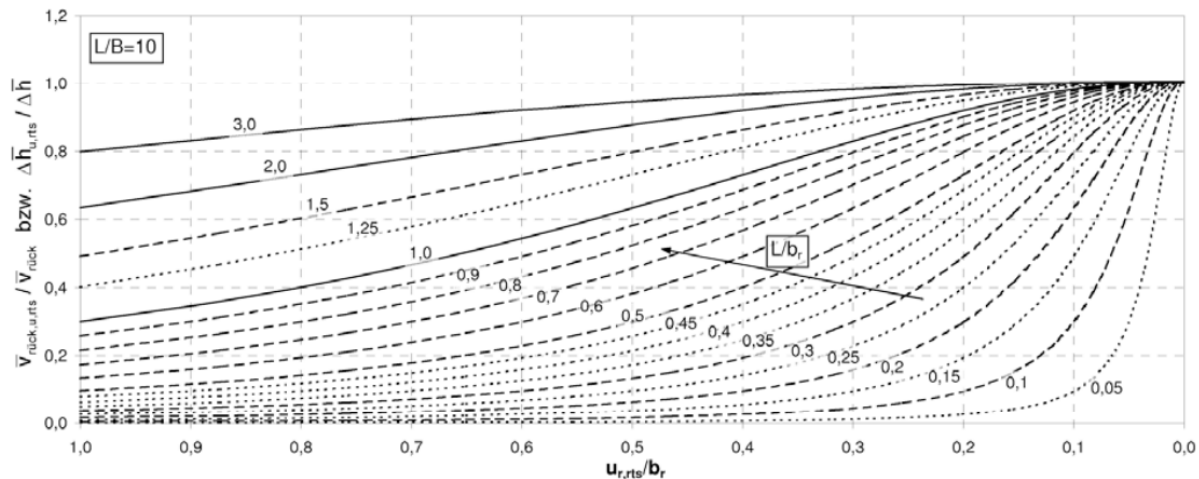


Fig 5.7 uit (BAW, 2010)

Figuur 38 – Reductie waterspiegeldaling nabij oever in functie van relatieve lengte schip en afstand tot oever (voor $L_s/B_s = 10$)

Bemerk uit Figuur 38 dat de reductie van de waterspiegeldaling naar de oever toe sterk kan oplopen, vooral bij schepen met kleinere lengte ten opzichte van kanaal breedte (L/b_r). In het handboek worden voor deze omzetting enkel figuren gegeven. Bemerk dat door toepassen van deze correctie de in Figuur 37 berekende waterspiegeldalingen gereduceerd zullen worden wat algemeen zal resulteren in een betere overeenkomst. Door het ontbreken van een formule en de verwachte spreiding op de resultaten wordt deze omzetting echter niet doorgevoerd.

Ook het BAW handboek geeft voor de grootte van de boeg- en haalgolf een opschaling vertrekkend van de formule voor de gemiddelde waterspiegeldaling.

Voor de haalgolf wordt volgende formule gegeven:

$$\Delta \hat{h}_{u,hek} = C_H \cdot \Delta \bar{h}_{u,hek}$$

Met:

- $\Delta \hat{h}_{u,hek}$ Maximale waterpeilverlaging aan hek [m]
- C_H Factor voor de invloed van het scheepstype, belading trim en waterpeilverlaging
 - $C_H \approx 1.3$ Voor moderne binnenschepen ($T/h \approx 0.7$)
 - $C_H \approx 1.5$ gedeeltelijk geladen en in het bijzondere geballaste moderne beroepsvaartuigen en sleepboten ($T/h \approx 0.7$)
 - $C_H \approx 1.1$ voor zeeschepen die veelal een getrimd zijn naar de boeg

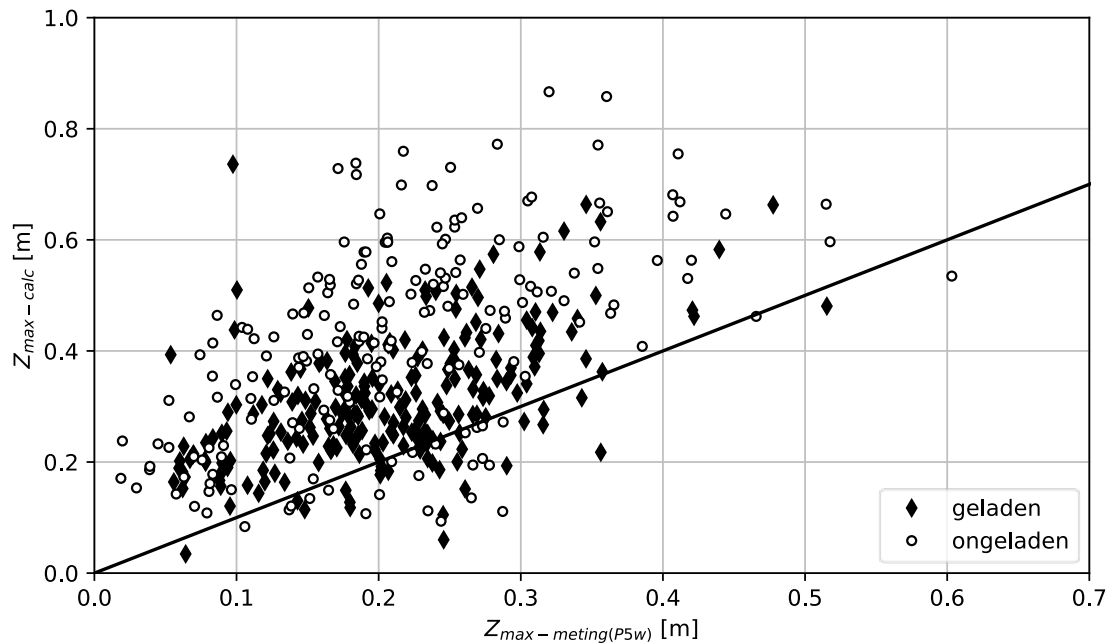
Voor varen nabij de oever wordt een versterking toegepast op basis van Przedwojski *et al.* (1995):

$$H_{u,hek} = \left(2.0 - 2.0 \frac{A'}{A} \right) \Delta \hat{h}_{u,hek}$$

Met:

- A Natte sectie kanaal, zie bijlage C. [m²]
- A' Natte sectie tussen scheepsas en oever, zie bijlage C [m²]

De op deze wijze bepaalde haalgolf wordt gegeven in Figuur 39. Bemerkt in deze figuur dat zowel voor ongeladen als voor geladen schepen een zeer grote spreiding optreedt. De formulering van de haalgolf leidt op enkele uitzonderingen na tot een overschatting van de gemeten maximale waterspiegeldaling.



Figuur 39 – Vergelijking berekende waterspiegeldaling ten opzichte van opgemeten waterspiegeldaling boeg en hek (formulering BAW)

7.4 Secundaire golf

Voor de bepaling van de golfhoogte op de interferentiepunten van de boeg en hekschuine golven neemt het handboek van BAW volgende formule uit (Blaauw & van de Kaa, 1978; Gates & Herbich, 1977) over:

$$H_{Sek} = A_w \cdot \frac{v_s^{8/3}}{g^{4/3} \cdot (u')^{1/3}} f_{cr}$$

Met:

- H_s Secundaire golfhoogte [m]
- A_w golfhoogtecoëfficiënt afhankelijk van scheepsvorm, scheepsafmetingen, diepgang en waterdiepte Voor schattingen kan worden aangenomen: [-]
 - $A_w \approx 0.25$ voor conventionele binnenvaartschepen en sleepboten
 - $A_w \approx 0.35$ voor lege duwkonvooien met achter elkaar liggende duwbakken
 - $A_w \approx 0.80$ voor volgeladen duwkonvooien met naast elkaar liggende duwbakken en motorvaartuigen
- f_{cr} Snelheidscoëfficiënt 1.0 – 1.7 [-]
- g Zwaartekrachtversnelling = 9.81 m/s² [m/s²]
- u' Afstand schip tot oeverlijn [m]

De coëfficiënt f_{cr} houdt rekening met een secundaire golfhoogte die toeneemt in het gebied van de kritische vaarsnelheid.

$$f_{cr} \approx 1.0 \text{ voor } \frac{v_s}{v_{krit}} < 0.8 \text{ en voor } \frac{v_s}{v_{krit}} > 1.2$$

$$f_{cr} \approx 1.0 + 0.7 \left(\sin \left(\frac{2\pi}{0.8} \left(\frac{v_s}{v_{krit}} - 0.8 \right) \right) \right)^2 \text{ voor } 0.8 \leq \frac{v_s}{v_{krit}} \leq 1.2$$

Deze formule is geldig voor zover:

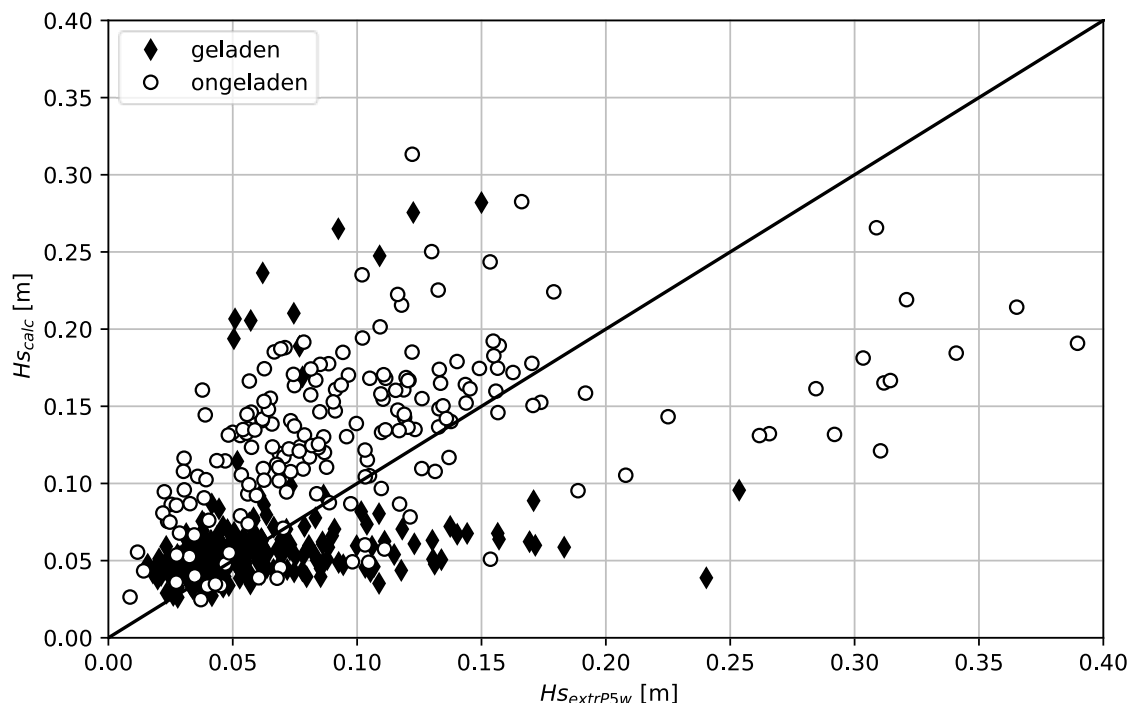
$$u' \geq \frac{1}{2} \lambda_q \tan \alpha_K$$

$$\lambda_q \approx 2\pi \left(\frac{v_s^2}{g} \right)$$

Met

- α_K Kelvinhoek ($\alpha_K \approx 19^\circ$) [°]
- λ_q Golflengte van de secundaire golf [m]

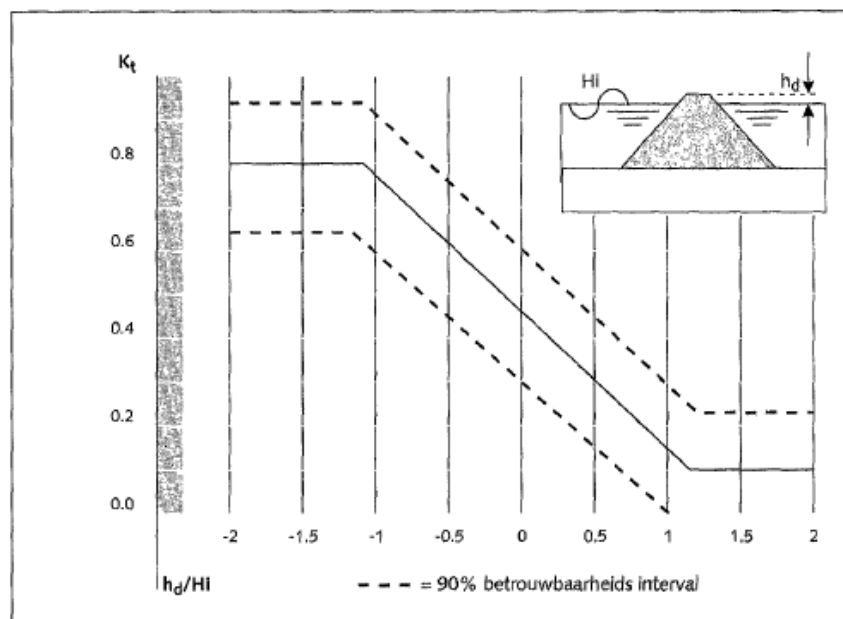
De berekende ten opzichte van de opgemeten secundaire golfhoogte wordt gegeven in Figuur 40. De scheepspassages van een geladen schip met merkelijke overschatting betreffen scheepspassages waarbij de verhouding van de gemeten vaarsnelheid ten opzichte van de berekende kritische vaarsnelheid een verhouding 0.90 en hoger betreft. Voor de ongeladen scheepspassages kan zowel een onder- als een overschatting optreden.



Figuur 40 – Vergelijking berekende ten opzichte van opgemeten secundaire golfhoogte (formulering BAW)

8 Validatie formule transmissiecoëfficiënt

Voor de bepaling van de golfdempende werking van de breuksteenberm wordt in de ontwerpmemo (SBE, 2020) verwezen naar CUR 201 (Bakker & Rijkswaterstaat - Dienst Weg en Waterbouwkunde. Productgroep Oevers, 1999). In CUR 201 wordt een golftransmissiecoëfficiënt van een breuksteenberm gegeven in functie van de inkomende golfhoogte ten opzichte van de kruinhoogte boven het gemiddeld peil, zie Figuur 41. Deze transmissiecoëfficiënt wordt overgenomen in Tabel 4. De transmissiecoëfficiënt is zowel van toepassing bij een homogene breuksteendam (één soort steen voor de gehele dam) als bij een breuksteendam bestaande uit een kern van fijner materiaal, daarna eventueel een onderlaag en een afdeklaag van zwaardere breuksteen die bestand is tegen de golfaanval.



(Bakker & Rijkswaterstaat - Dienst Weg en Waterbouwkunde. Productgroep Oevers, 1999).

Figuur 41 – Transmissiecoëfficiënt golfhoogte breuksteendam CUR201

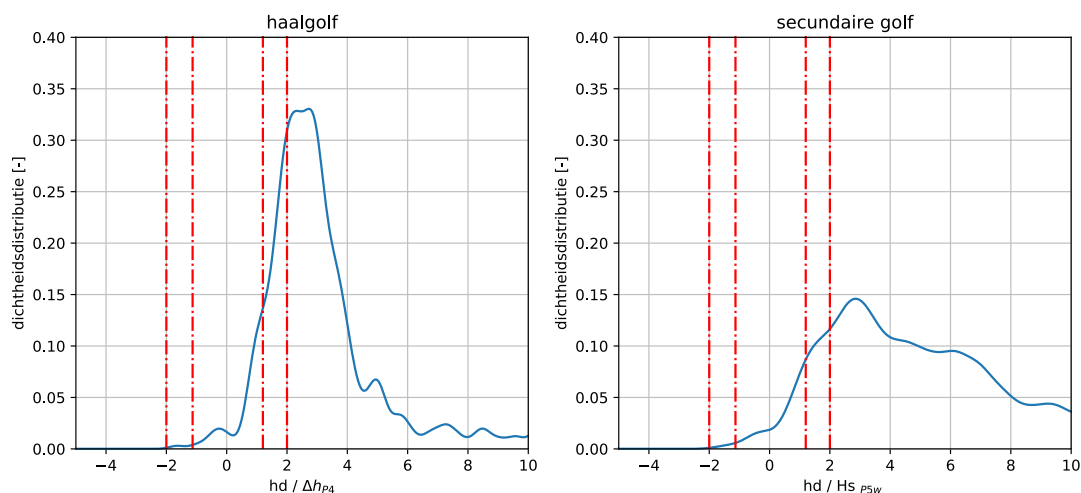
Tabel 4 – Transmissiecoëfficiënt CUR201

Transmissiecoëfficiënt	Verhouding h_d/H_i (zie Figuur 41)
0.80 -	$-2.0 < h_d/H_i < -1.13$ (dam boven het waterpeil)
$0.46 - 0.3 h_d/H_i$	$-1.13 < h_d/H_i < 1.2$ (dam in de tussenzone)
0.10	$1.2 < h_d/H_i < 2.0$ (dam onder het waterpeil)

Met:

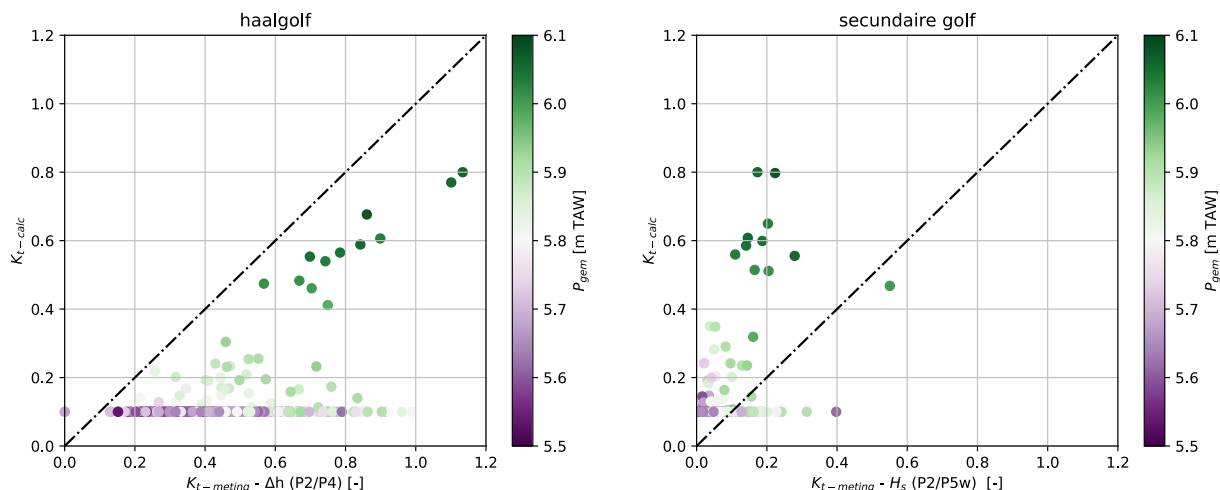
• Kt	Transmissie-coëfficiënt	[-]
• Hi	Maatgevende inkomende golfhoogte bij de teen van de dam	[m]
• Ht	Doorgelaten golfhoogte	[m]
• hd	Hoogte kruin ten opzichte van gemiddeld peil	[m]

De kruin van de breuksteenberm werd opgemeten met een RTK GNSS (Vercruysse & De Roo, 2026). Ter hoogte van meetraai ligt de kruin op 6.10 m TAW. De relatieve kruinhoogte – h_d – wordt bepaald als het verschil tussen dit kruinpeil en het gemiddeld peil per scheepspassage, dit varieert meestal tussen 0.07 m en 0.55 m (kwantiel 0.01 tot 0.99). Voor de maatgevende inkomende golfhoogte H_i wordt een onderscheid gemaakt tussen de haalgolf en de secundaire golfhoogte. Voor de haalgolf wordt de gemiddelde waterspiegeldaling opgemeten met de druksensor op locatie 4 beschouwd, voor de secundaire golfhoogte wordt de hoogste golfhoogte van de golfrein opgemeten met de waterpeilmeter op locatie 5 beschouwd. De verhouding h_d/H_i voor respectievelijk de haal- en de secundaire golf wordt gegeven in Figuur 42. Bemerk dat op een aantal scheepspassages na de verhouding groter is dan nul wat wil zeggen dat de kruinhoogte boven het gemiddeld peil uitkomt.



Figuur 42 – Dichtheidsdistributie verhouding kruinhoogte ten opzichte van inkomende golfhoogte (haalgolf en secundaire golf)

Een vergelijking tussen de berekende en de opgemeten transmissiecoëfficiënt voor zowel de haalgolf als voor de secundaire golf wordt gegeven in Figuur 43. Voor de haalgolf valt op dat bij peilen onder ca. 6.0 m TAW de berekende transmissiecoëfficiënt merkkelijk lager is dan de opgemeten transmissiecoëfficiënt. Voor de secundaire golfhoogte daarentegen overschat de berekende transmissiecoëfficiënt de opgemeten transmissiecoëfficiënt.



Figuur 43 – Vergelijking berekende transmissiecoëfficiënt ten opzichte van gemeten transmissiecoëfficiënt

Uit de vergelijking van de opgemeten en berekende transmissiecoëfficiënt volgt dat de formuleringsen uit Cur201 niet toepasbaar zijn voor de specifieke situatie van de Leie. Zowel niet voor de transmissie van de haalgolf als voor de transmissie van de secundaire golf. De CUR-publicatie 201 betreft een breuksteenberm, die dient ter bescherming van een achterliggende oever tegen door schepen veroorzaakte golven. Deze toepassing is in overeenstemming met de situatie aan de Leie. Wel wordt aangegeven dat de nauwkeurigheid van de relatie niet groot is maar dat er snel een indicatie gevonden wordt van de kruinhoogte. De transmissiecoëfficiënt uit CUR201 is overgenomen uit van der Meer (1991). Raadpleging van dit document leert dat de relaties opgesteld zijn op basis van verschillende uitgevoerde schaalmodelonderzoeken naar laagkruinige golfbrekers. Deze schaalmodelonderzoeken betreffen golfgootproeven met een loodrechte invallende al dan niet regelmatige golf. Voor de primaire golf zijn deze niet representatief omdat dit één waterspiegeldaling met een relatief lange duurtijd betreft. Ook voor scheepsgeïnduceerde secundaire golven is deze formule niet representatief omdat het hier schuin invallende tot (parallel) meelopende golven betreft, zie Figuur 44.



Figuur 44 – Invallend secundair golfpatroon naar de oever toe tijdens scheepspassage nr. 390

Op basis van de resultaten voor de transmissie van de haalgolf in functie van de waterspiegeldaling en het peil in de Leie uit paragraaf 5.2.3 lijkt het mogelijk om voor de specifieke breuksteenberm een relatie op te stellen. De parameters hierbij betreffen de grootte van de waterspiegeldaling, het peil van de Leie ten opzichte van het kruinpeil van de breuksteenberm en het peil van de bovenzijde van de damwand, al dan niet met aanvullend de duurtijd van de waterspiegeldaling.

De studie naar de waterstroming in de plasberm en doorheen de breuksteenberm bij passage van een schip wordt bij schrijven van dit rapport opgenomen in een thesis (AJ 2024-2025). Ook worden najaar 2025 metingen gepland bij een verhoogd peil. Op basis van de inzichten uit het thesisonderzoek en de aanvullende metingen bij verhoogd peil kan een formule voor de transmissie van de primaire golf opgesteld worden. Een belangrijke bemerking hierbij is dat zomer 2024 een aanzienlijke waterstroming doorheen de breuksteenberm werd vastgesteld maar dat verwacht wordt dat de permeabiliteit van de berm in de loop van de tijd zal afnemen.

9 Conclusies

In het kader van het Seine-Scheldeproject wordt de Leie opgewaardeerd naar een CEMT-klasse Vb vaarweg. Dit omvat de verbreding en verdieping van de Leie. Daarnaast worden, flankerend, ook natuurvriendelijke oevers, vispassages, fauna-uitstapplaatsen, ... voorzien om de Leie als rivier te herstellen. De aanleg van de natuurvriendelijke oever is in 2022 gestart in het afwaartse deel van pand 140.

De Vlaamse Waterweg afdeling Regio West (contactpersoon: Stéphan Creëlle) heeft aan afdeling Waterbouwkundig Laboratorium gevraagd om een evaluatie uit te voeren van de golfdempende werking van de vooroevers en een validatie van de ontwerpmethodiek. Voor deze validatie werd door WL een in situ meetcampagne uitgevoerd die liep van 2 juli 2024 tot en met 16 juli 2024.

De factual data verwerking van deze meting is behandeld in een eerste rapport (Vercruysse & De Roo, 2026).

Onderhavig tweede rapport beschrijft de verdere analyse van de metingen, de validatie van formules voor scheepsgeïnduceerde belasting en transmissie en de validatie van de belasting uit de ontwerpmemo.

Voor elk van de 613 niet door andere schepen verstoorde scheepspassages werd een karakterisatie van de haalgolf en secundaire golf uitgevoerd. Deze karakterisatie werd naar analogie met het ontwerp uitgevoerd op basis van de Rock Manual. Volgend op de karakterisatie is een vergelijking uitgevoerd tussen de metingen en de maatgevende vaarsnelheden en golfhoogtes uit het ontwerp. Voor ontwerp werd de vaarsnelheid gelijkgesteld aan de maximaal toegelaten vaarsnelheid, zowel voor geladen als ongeladen schepen. Uit de vergelijking met de metingen volgde dat de ontwerpsnelheid eerder representatief is voor geladen schepen maar een onderschatting betreft in geval van ongeladen schepen.

Het valt op dat voor CEMT I en II schepen de in ontwerp berekende haalgolf een sterke overschatting betreft ten opzichte van de metingen. Voor de grotere CEMT classificaties is de overeenkomst beter voor ongeladen schepen maar voor geladen schepen betreft de ontwerpwaarde eveneens een overschatting. Op vlak van secundaire golfhoogte betreft de ontwerpwaarde een onderschatting van de meting. Bemerkt hierbij dat er aannames werden gedaan bij het ontwerp (o.m. vaarsnelheid, vaarwegprofiel, positie van schip) waardoor de ontwerpsituatie niet 1 op 1 overeenkomt met de metingen. Een validatie van de formules werd hierom uitgevoerd aan de hand van een hind cast van de gemeten scheepspassages.

Voor de metingen in de Leie valt op dat de grootte van de haalgolf toeneemt met de CEMT classificatie. De maximale waterspiegeldaling bij de scheepspassage van een CEMT Va loopt op tot ca. 0.50 m. Er wordt geen systematisch verschil gevonden tussen geladen en ongeladen schepen. Wanneer ook de duurtijd meegenomen wordt, volgt wel dat de waterspiegeldaling langer aanhoudt bij een geladen schip waardoor ook de belasting toeneemt. Op vlak van secundaire golfhoogte worden de hoogste waarden gevonden voor CEMT klasse I en III en recreatievaartuigen, i.e. tot een 0.40 m.

Het gemiddeld waterpeil overschreed tijdens de opgemeten scheepspassages het kruinpeil van de berm niet. Uit de metingen volgde daardoor dat de secundaire golf zo goed als volledig gedempt wordt. De haalgolf zet zich wel gedempt door in de plasberm. Wat opvalt is dat voor een CEMT III, IV en Va gelijkaardige waterspiegeldalingen in de plasberm gemeten worden. De grotere haalgolf die optreedt in de Leie bij een toename van de CEMT klasse zet zich niet door in de plasberm. De vermoedelijk verklaring hiervoor betreft de damwandplank met bovenzijde op 5.26 m TAW, een verdere waterspiegeldaling onder deze kruin resulteert niet in een verdere daling van het peil in de plasberm.

Uit de transmissie van de haalgolf van de Leie naar de plasberm volgt dat de transmissie afneemt met de grootte van de waterspiegeldaling in de Leie en toeneemt bij een toename van het waterpeil. In de ontwerpmemo werd voor deze transmissie een formule gehanteerd. Nazicht van deze formule leert dat deze is opgesteld op basis van golfgootproeven voor golfbrekers en niet toepasbaar is voor de specifieke situatie van de plasberm met scheepsgeïnduceerde golven. Bij schrijven van dit rapport is een thesisonderzoek in uitvoering dat de waterstroming in de plasberm en doorheen de breuksteenberm onderzoekt.

Ook wordt een bijkomende meetcampagne bij een verhoogd peil gepland. Op basis van de bijkomende inzichten uit de thesis en een dataset met bijkomende metingen bij hogere peilen kan getracht worden een formule voor de transmissie op te stellen.

Van de scheepspassages waarbij de scheepsgegevens beschikbaar zijn uit de AIS analyse en waarbij er geen verstoring van oplopende of kruisende schepen is, wordt een hindcast berekening uitgevoerd van de vaarsnelheid en de grootte van de primaire- en secundaire golf. In de ontwerpmemo van de breuksteenbekleding werden formuleringen uit de Rock Manual en uit het rekenprogramma Dipro toegepast. Aanvullend zijn formuleringen uit een handboek van de Duitse Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) toegepast. Voor het bepalen van de ontwerpvaarsnelheid dient eerst de limiet vaarsnelheid bepaald te worden waarna een reductiecoëfficiënt toegepast wordt. Uit de vergelijking van de opgemeten vaarsnelheid ten opzichte van de limiet vaarsnelheid op basis van formuleringen uit de Rock Manual volgt dat de limiet vaarsnelheid zonder reductiecoëfficiënt een betere aanname is voor de ontwerp vaarsnelheid. Om de limiet vaarsnelheid o.b.v. het handboek van BAW om te rekenen naar een ontwerp vaarsnelheid kan voor geladen schepen een reductiecoëfficiënt 0.80 worden en voor ongeladen schepen een reductiecoëfficiënt 0.90 toegepast worden.

De berekende gemiddelde waterspiegeldaling wordt vergeleken met de haalgolf. Voor de relatief korte scheepspassages op de Leie lijkt de haalgolf representatiever dan de gemiddelde waterspiegeldaling. Uit de vergelijking van de gemeten met de berekende haalgolf volgt dat er een grote spreiding op de resultaten is. Voor de formulering uit de Rock Manual en het BAW handboek kan de berekening de meting zowel onder- als overschatten. De formulering van Dipro lijkt eerder tot een onderschatting te leiden. De secundaire golfhoogte werd berekend met een formulering uit de Rock Manual en het BAW handboek. Ook hier volgde een sterke spreiding op de resultaten. Voor de secundaire golfhoogte wordt bij de BAW formulering een duidelijk verschil opgemerkt tussen de geladen en ongeladen schepen. De maatgevende secundaire golfhoogte treedt echter op bij ongeladen schepen. Het BAW handboek beschrijft dat de onzekerheid op de secundaire golfhoogte groter is dan op de haalgolf. Dit lijkt zowel door de formuleringen van de Rock Manual als door de formuleringen van de BAW bevestigd te worden.

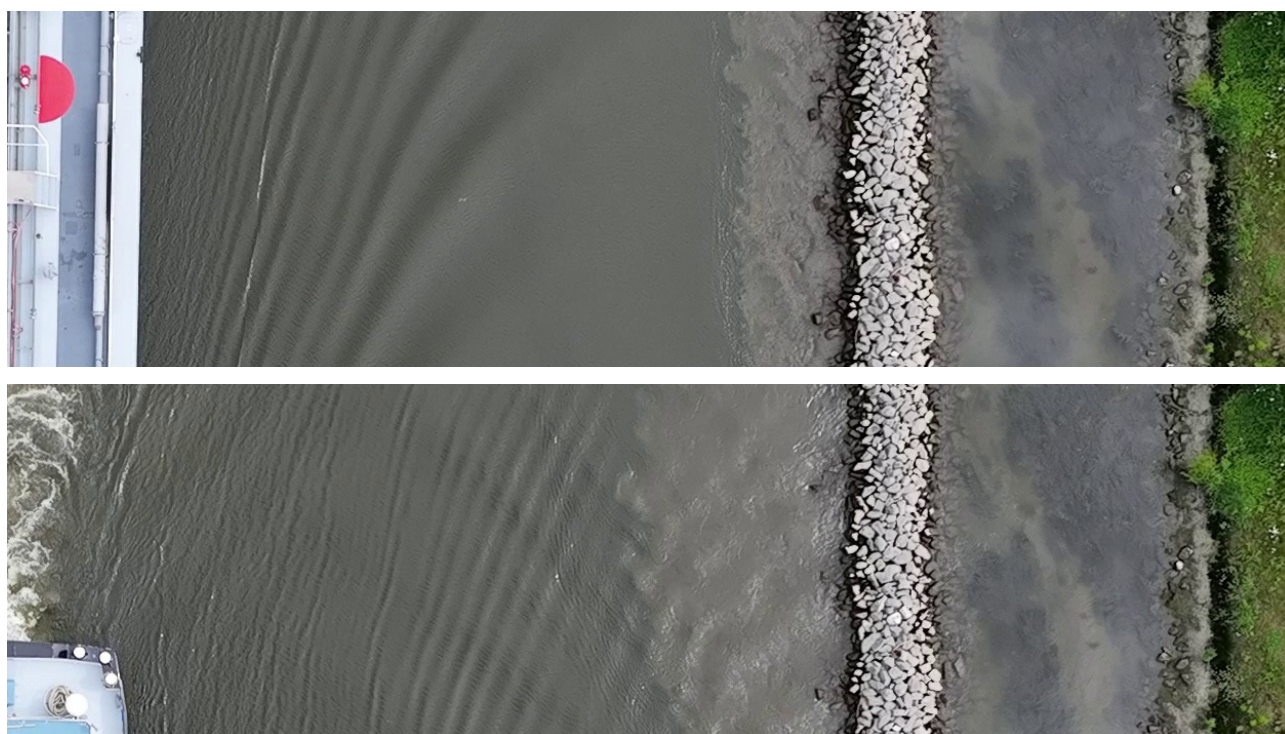
Het BAW handboek vermeldt dat voor het ontwerp van de oeverbescherming, waar mogelijk, de voorkeur gegeven dient te worden aan metingen. Dit omdat berekeningen gebaseerd zijn op theoretische aannames en vereenvoudigingen en hierdoor behept zijn met een grote onzekerheid. Voor de Leie wordt dit onderschreven voor de berekende haal- en secundaire golf. Voor de haalgolf wordt echter opgemerkt dat de toekomstige CEMT Vb duwvaartkonvoeien een grotere belasting zullen generen. Door de grotere scheepslengte neemt bij een gelijke vaarsnelheid de duurtijd van de belasting ook toe.

10 Referenties

- Bakker, J.J.M.; Rijkswaterstaat - Dienst Weg en Waterbouwkunde. Productgroep Oevers.** (1999). Natuurvriendelijke oevers: belasting en sterkte. *CUR-Publicatie*, 201. CUR: Gouda. ISBN 90-376-0470-6
- BAW.** (2010). Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen (GBB). *BAW-Merkblätter und -Richtlinien*
- Bfg; BAW.** (2016). Examinations of Technical-Biological Bank Protections on Inland Waterways Information Sheet: Determination of Ship-Wave Heights at the Bank
- Blaauw, H.G.; van de Kaa, E.** (1978). Erosion of bottom and sloping banks caused by the screw race of manoeuvring ships. *WL Publ.* 202
- Bundesanstalt für Wasserbau (BAW).** (2010). BAW Code of Practice Principles for the Design of Bank and Bottom Protection for Inland Waterways (GBB). ISBN 4972197264540. Available at: www.baw.de
- CIRIA; CUR.** (2007). Manual on the use of rock in hydraulic engineering (2nd edition)
- Claeys, J.** (2025). Experimental study of ship-induced water exchange between river Lys and its ecofriendly bank protection. MSc thesis. Ghent University, Faculty of Engineering and Architecture: Ghent
- De Roo, S.** (2013). Experimental Study of the Hydrodynamic Performance of a Nature-Friendly Bank Protection Subject to Ship Waves in a Confined, Non-Tidal Waterway. UGent. ISBN 9788578110796. 186 pp.
- De Vlaamse Waterweg afdeling regio West.** (2020). SEINE - SCHELDE - Leie Oeverwerken Pand 140 Zone A1 te Zulte ONTWORPEN TOESTAND DETAILS: VOOROEVER MET BREUKSTEENBERM EN PALENRIJ. pp.0
- Gates, E.T.; Herbich, J.B.** (1977). Mathematical model to predict the behavior of deep-draft vessels in restricted waterways Report TAMU-SG-77-206,
- Koedijk, O.C.** (2020). Richtlijnen Vaarwegen 2020. ISBN 9789090334233
- Przedwojski, B.; Blazejewski, R.; Pilarczyk, K.W.** (1995). River training techniques. Fundamentals, Design and Applications. ISBN 90-5410-196-2
- SBE.** (2020). SEINE-SCHELDE – STUDIE KALIBRATIE LEIE PAND 140 Memo Hydrodynamische randvoorwaarden. 24 pp.
- SBE nv.** (2020). Seine-Schelde - Studie kalibratie Leie pand 140. Hydrodynamische randvoorwaarden. Memo 14011-MEMO-VO-01-c
- van der Meer, J.W.** (1991). Stability and transmission at low-crested structures. *Publications - Delft Hydraulics*, 453. Delft Hydraulics Laboratory: Delft
- Vercruysse, J.B.; De Roo, S.** (2026). Leie – natuurvriendelijke oevers pand 140: deelrapport 1. Factual data rapportage monitoring. Versie 4.0. *WL Rapporten*, 22_075_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- Waterloopkundig Laboratorium.** (1997). Dipro 3.02n Gebruikershandleiding

Bijlage A Dempingscorrectie druksensoren

Een uitdaging bij het gebruik van druksensoren voor het uitvoeren van golfmetingen is dat oppervlakte golven gedempt worden in de waterkolom. Deze damping neemt toe met een toename van de frequentie en met een toename van de waterdiepte. Om deze reden dient op de opgemeten drukmetingen in de Leie een correctie uitgevoerd te worden. Deze correctie kan opgesteld worden op basis van de lineaire golftheorie. Het is echter onduidelijk of deze theoretische correctie toepasbaar is voor de drukmetingen in de Leie. Doordat de drukmeters hier geplaatst zijn net voor de damwandplanken worden deze beïnvloed door het uitstromen van de plasberm doorheen de breuksteenberm en de golfreflectie, zie Figuur 34.



boven: leeglopen plasberm / onder: reflectie secundaire golf

Figuur 45 – Illustratie wateroppervlak nabij breuksteenberm bij scheepspassage nr. 389

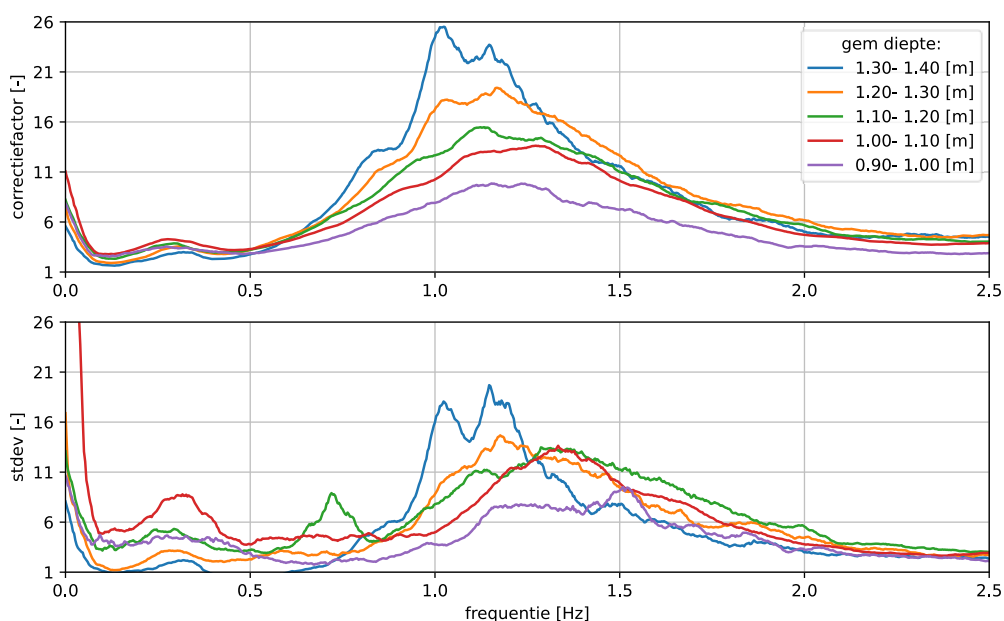
Besloten wordt om de correctie op te stellen op basis van een vergelijking tussen de druk- en waterpeilmeting op locatie 5. Uit de preverwerking volgt per scheepspassage een tijdreeks van 5 minuten met het opgemeten peil, de primaire golf en de secundaire golf (zie ref 1). De correctie is enkel benodigd op de secundaire golf. De secundaire golf wordt per scheepspassage door middel van een Fourier transformatie¹ omgezet van het tijdsdomein naar het frequentiedomein. De verhouding van het energiespectrum van de waterpeilmeting ten opzichte van het energiespectrum van de drukmeting betreft de benodigde correctie. Deze correctie wordt niet scheepspassage per scheepspassage bepaald maar op basis van een bundeling van scheepspassages in functie van de gemiddelde diepte. De toegepaste bereiken en het aantal scheepspassages per bereik worden gegeven in Tabel 5.

¹ Scipy.rfft

Tabel 5 – Aantal beschouwde scheepspassages golfcorrectie i.f.v. diepte

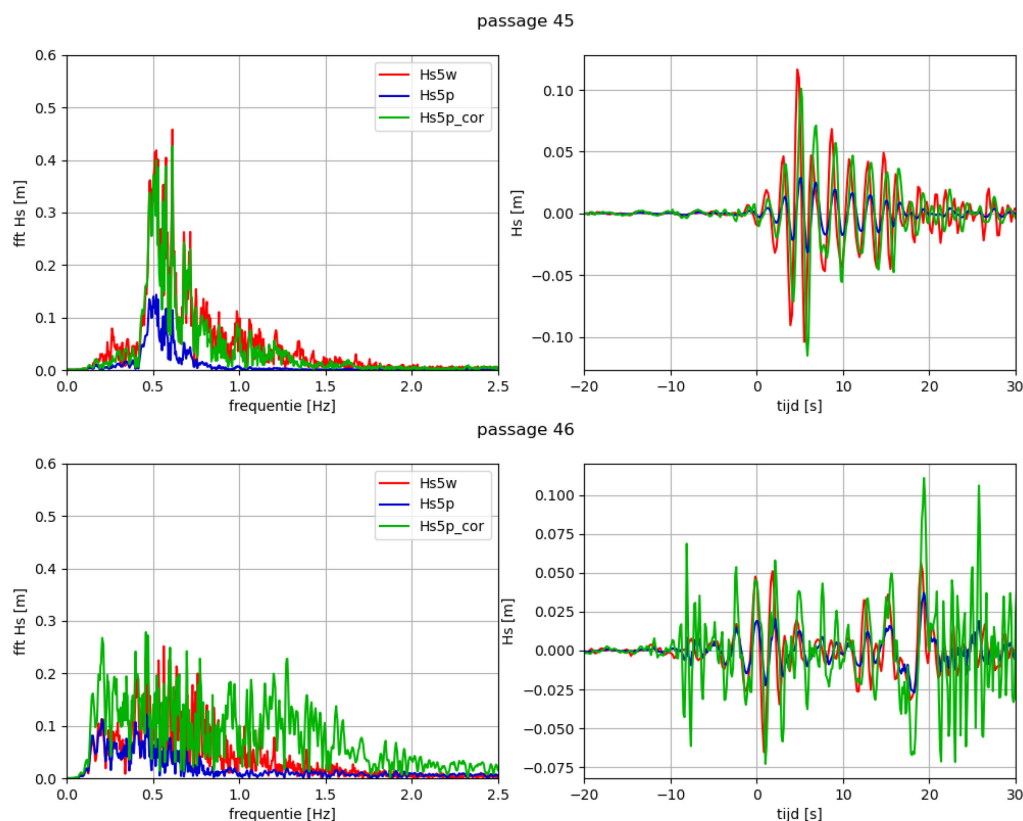
Diepte druksensor	0.90 – 1.00 m	1.00 – 1.10 m	1.10 – 1.20 m	1.20 – 1.30 m	1.30 – 1.40 m
#	69	418	213	90	31

Per bereik wordt de gemiddelde verhouding van de energiespectra en de standaarddeviatie bepaald, zie Figuur 46. Deze verhouding betreft de toegepaste correctie, lees versterking van de drukmeting, in functie van de frequentie. Bemerkt dat de correctie het grootste is bij een frequentie 1.0 Hz tot 1.3 Hz maar dat ook de standaarddeviatie sterk toeneemt in deze band.



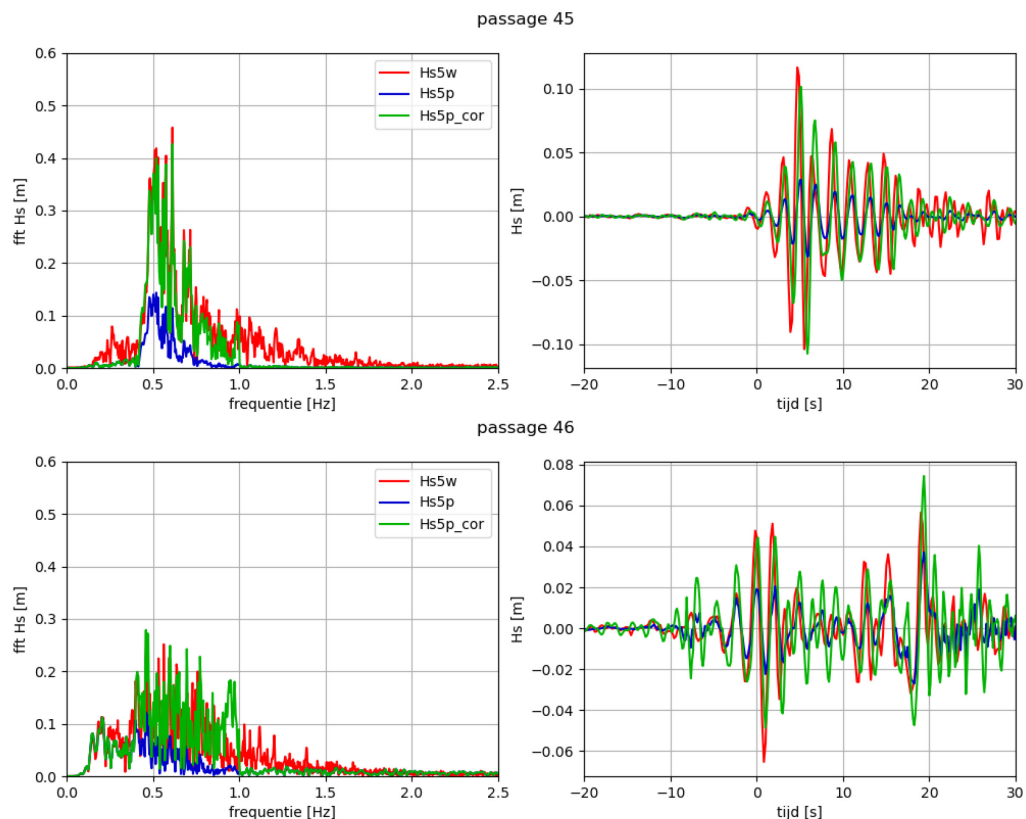
Figuur 46 – Correctiefactor op secundaire golfhoogte gebruik makende van drukmetingen Leie i.f.v. gem diepte

Als eerste test worden de bekomen verhoudingen in de band 0.1 Hz tot 2.5 Hz toegepast als correctie. Uit de vergelijking van de uitkomst in het tijdsdomein volgt dat dit gemengde resultaten geeft. Dit wordt geïllustreerd in Figuur 47 voor twee voorbeeldscheepspassages.



Figuur 47 – Illustratie resultaat correctie secundaire golfhoogte bij toepassing correctiefactor overheen spectrum 0.1 Hz tot 2.5 Hz

Voor de scheepspassage met een duidelijke concentratie van golfamplitude bij een frequentie 0.5 Hz – bv. scheepspassage nr. 45 – is er een goede overeenkomst. Voor de scheepspassage waarbij er een minder duidelijke concentratie is van de golfamplitude – scheepspassage nr. 46 – leidt de correctie tot een aanzienlijke overschatting. Bemerkt hiernaast dat uit Figuur 46 ook een merkelijke toename van de standaarddeviatie volgt bij een frequentie boven 1.0 Hz. Om deze redenen wordt besloten om de correctie uit Figuur 46 toe te passen tussen 0.4 Hz en 1.0 Hz. Het resultaat hiervan op de twee voorbeeldscheepspassages uit Figuur 47 wordt gegeven in Figuur 48. Aangezien de verhouding tussen beide spectra het grootste is bij een frequentie 1.0 tot 1.3 Hz, is er in het energiespectrum een duidelijke verstoring waarneembaar. In het tijdsdomein is de invloed op de eerste voorbeeldscheepspassage – nr. 45 – eerder beperkt. Voor de tweede voorbeeldscheepspassage – nr. 46 – heeft het beperken van de correctie tot een frequentie 1.0 Hz een duidelijk beter resultaat.



Figuur 48 – Illustratie resultaat correctie secundaire golfhoogte bij toepassing correctiefactor overheen spectrum 0.4 Hz tot 1.0 Hz

De hierboven opgestelde correctie werd uiteindelijk niet toegepast op de drukmetingen. Door het beperkte verschil in afstand tussen locatie 4 en 5, de grote gelijkheid tussen locatie 4 en 5 en het behoud van het vaarwegprofiel werd voor de metingen aangenomen dat de secundaire golfhoogte opgemeten met de waterpeilmeting op locatie 5 ook representatief is voor locatie 4.

Bijlage B CEMT classificatie en lading

De bepaling van de CEMT classificatie en of een schip geladen of ongeladen is, wordt uitgevoerd op basis van Richtlijnen Vaarwegen 2020 (Koedijk, 2020) zie Tabel 6.

Tabel 6 – Kenmerken van maatgevende motorschepen

CEMT-klasse	breedte (m)	lengte (m)	diepgang (m)		strijkhoogte (m)	laadverm. (ton)	motorverm. (kW)	boegschroef (kW)
			geladen	leeg				
I	5,05	38,5	2,5	1,2	4,25	365	175	100
II	6,6	50 - 55	2,6	1,4	5,25	535 - 615	240 - 300	130
III	8,2	67 - 85	2,7	1,5	5,35	910 - 1250	490 - 640	160 - 210
IV	9,5	80 - 105	3,0	1,6	5,55	1370 - 2040	750 - 1070	250
Va	11,4	110 - 135	3,5	1,8	6,40	2900 - 3735	1375 - 1750	435 - 705
Vla	17,0	135	4,0	2,0	8,75	6000	2400	1135

Richtlijnen Vaarwegen 2020

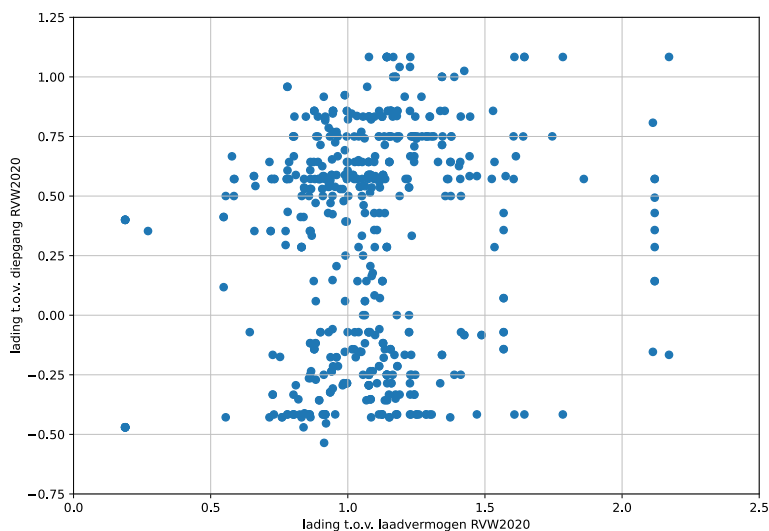
De bepaling van de CEMT classificatie wordt uitgevoerd op basis van de lengte, zie Tabel 7. Bemerk dat op deze wijze een kleine fout gemaakt wordt waarbij CEMT III schepen met een breedte tussen 80 m en 85 m geclassificeerd kunnen worden als een CEMT IV schip. Bemerk dat daarnaast ook duwbotten en andere werkschepen met een afmeting kleiner dan 35 m onder recreatie worden geclassificeerd. Ook het onderscheid tussen een motorjacht en een kajuitboot is niet mogelijk op basis van de afmetingen.

Tabel 7 – CEMT classificatie o.b.v. lengte

Ondergrens	CEMT	bovengrens
	recreatie	≤35
35 <	I	≤ 40
40 <	II	≤55
55 <	III	≤80
80 <	IV	≤ 105
110<	Va	≤ 135
135 <	+Va	

Het al dan niet geladen zijn van een schip heeft een invloed op de water en hierbij ook vaarsnelheid en golfbeweging. Om deze reden dient bepaald te worden of een schip al dan niet geladen is. Vanuit de vaarvergunning is zowel een diepgang als een netto lading beschikbaar. Het geladen zijn van een schip kan zowel op basis van de diepgang als op basis van de netto lading bepaald worden, voor beide wordt vergeleken met Richtlijnen Vaarwegen. Voor de bepaling van de lading op basis van de diepgang wordt vergeleken ten opzichte van de diepgang van een ongeladen en een geladen schip uit Richtlijnen Vaarwegen.

Voor de bepaling op basis van de lading wordt de netto lading uitgezet ten opzichte van het gemiddeld laadvermogen per CEMT classificatie uit Richtlijnen Vaarwegen. De op deze wijze bepaalde relatieve lading wordt uitgezet in Figuur 49. Bemerkt hierin dat voor de lading o.b.v. de diepgang negatieve waarden bekomen worden. Dit wil zeggen dat de afgeleide diepgang lager is dan de in Richtlijnen Vaarwegen 2020 opgegeven diepgang horende bij een ongeladen schip. De lading o.b.v. diepgang loopt op tot een 1.09. Voor de relatieve lading op basis van het gemiddelde laadvermogen valt op dat op enkele uitzonderingen na de waarden binnen het bereik 0.5 tot 2.0 liggen. Wat opvalt, is dat er geen enkel schip een netto lading 0 aangeeft in de vaarvergunning.



Figuur 49 – Relatieve lading t.o.v. diepgang en t.o.v. laadvermogen

Besloten wordt om voor de bepaling of een schip al dan niet geladen is te vertrekken van de lading op basis van de diepgang. Een relatieve lading t.o.v. diepgang kleiner of gelijk aan 0 wordt beschouwd als een ongeladen schip. Een relatieve lading t.o.v. diepgang groter dan 0.50 wordt beschouwd als een geladen schip.

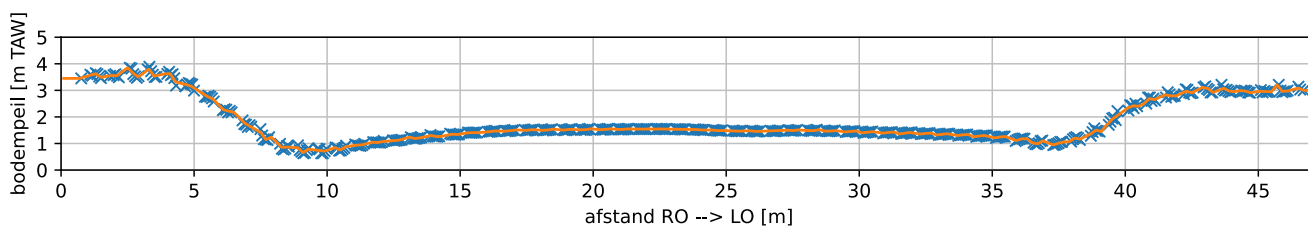
Bijlage C Vaarwegprofiel

Het vaarwegprofiel ter hoogte van de meetsectie wordt afgeleid uit de bathymetrische opmeting van januari 2023. Hiervoor wordt vanuit locatie P4 een loodrechte getrokken op de vaargeul. De locatie van het gehanteerde punt op rechteroever en linkeroever wordt gegeven in Tabel 8. De afstand tussen beide punten betreft een 47.2 m.

Tabel 8 – Punten aslijn bathymetrie

	Lambert72	
	X	Y
Ro (locatie P4)	184029.5260	87322.4110
Lo	184064.4363	87290.6123

Over deze lijn wordt in Cloudcompare een puntenwolk met strookbreedte ca. +/- 4 m uitgeknipt. De punten uit deze uitgeknipte puntenwolk worden vervolgens loodrecht op de aslijn geprojecteerd. Deze as wordt geresampled naar een punt per 0.20 m door het definiëren van een doorgaande as met startpunt 0.10 m en eindpunt 47.1 m en een stapgrootte 0.20 m. Voor het bodempeil wordt per punt het gemiddelde genomen van de beschikbare punten binnen een +/- 0.10 m. Als laatste worden de punten zonder beschikbare metingen opgevuld door middel van interpolatie. De op de aslijn geprojecteerde bathymetriemetingen en het hieruit afgeleide profiel worden gegeven in Figuur 50. Bemerk dat over vrijwel de volledige breedte bathymetriedata beschikbaar is.



(figuur met vaste verscaling assen)

Figuur 50 – Profiel meting

De afleiding van het kenmerkende afmetingen uit het vaarwegprofiel is gebaseerd op de uit de Rock Manual overgenomen Figuur 51.

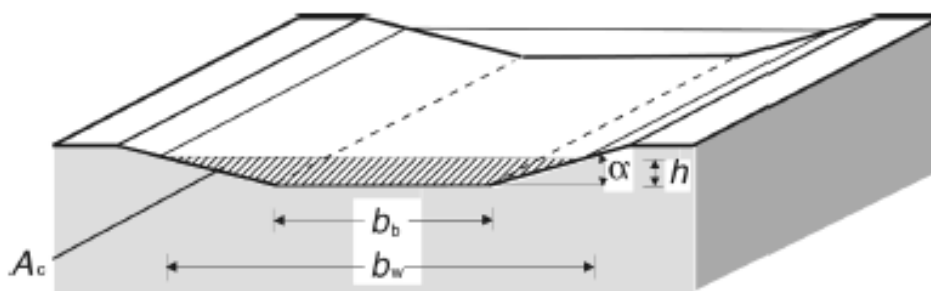


fig 4.81 uit (CIRIA; CUR, 2007)

Figuur 51 – Karakterisatie vaarwegprofiel o.b.v. Rock Manual

Het maximum bodempeil tussen de verdieping aan linker- en rechteroever bedraagt 1.55 m TAW. Het snijpunt van deze 1.55 m TAW met het talud op linker- en rechteroever wordt geselecteerd voor de breedte b_b . Concreet wordt op linkeroever het punt op $x = 7.3$ m geprikt en op rechteroever op $x = 39.2$ m geprikt. De breedte b_b bedraagt bijgevolg 31.9 m.

Het bodempeil wordt bepaald als het gemiddelde peil tussen 7.3 m en 39.2 m op dit profiel. Dit gemiddelde peil betreft een 1.32 m TAW. Bemerk dat op de uiteinden het bodemprofiel een lokale erosie kent tot een 0.7 m TAW aan linkeroever en een 1.0 m TAW aan rechteroever.

Voor de breedte B_w wordt de afstand tussen de damwandplanken gehanteerd. Uit de orthofoto wordt deze afstand bepaald op 46.2 m.

Voor de bepaling van de natte sectie – A_c – wordt een opdeling gemaakt in de natte sectie onder 4 m TAW en de natte sectie boven 4 m TAW. Uit de in Figuur 50 gegeven profielmeting wordt bepaald dat de sectie onder 4 m TAW een oppervlak van 101 m² vertegenwoordigt. De totale natte sectie van de waterweg wordt vervolgens als volgt bepaald:

$$A_c = A_c |< 4 \text{ m TAW}| + A_c |> 4 \text{ m TAW}|$$

$$A_c = 101 + B_w \cdot (P_{gem} - 4)$$

Met:

- A_c Doorsnede waterweg [m²]
- B_w Breedte tussen de damplanken = 46.2 m [m]
- P_{gem} Gemiddelde waterpeil [m TAW]

Voor de bepaling volgens Dipro (Waterloopkundig Laboratorium, 1997) dient de taludhelling en de natte sectie tussen het center van het schip en de oever bepaald te worden. Voor de taludhelling wordt de helling van het onderwatertalud beschouwd. Hiervoor worden op de profielmeting op het onderwatertalud de twee punten gegeven in Tabel 9 geprikt. Uit deze punten wordt een taludhelling 1.52 afgeleid.

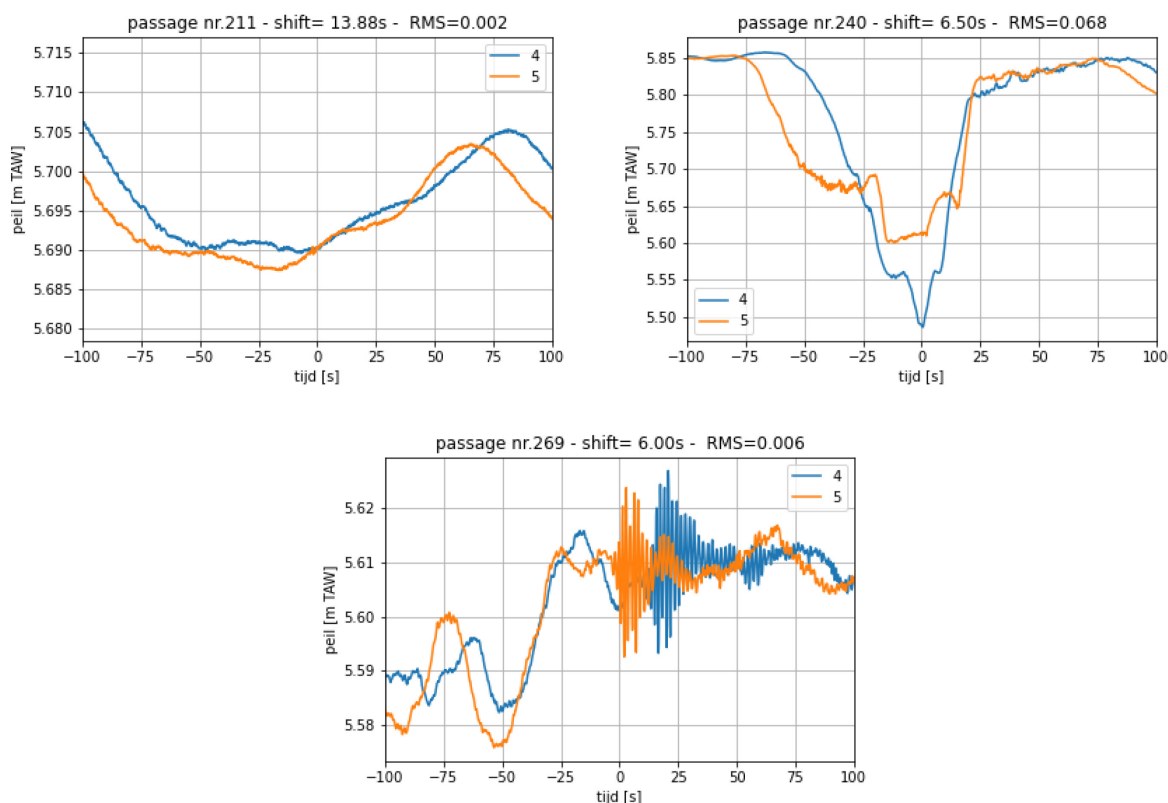
Tabel 9 – Punten bepaling taludhelling onderwatertalud

	H	V
punt kruin	4.8	3.2
punt teen	8.3	0.9
Δ	3.5	2.3
m:1	1.52	1

Bijlage D Controle snelheidsmeting

De snelheid van de schepen werd afgeleid door voor elke scheepspassage de faseverschuiving tussen de twee drukmetingen in de Leie (P- 4 en P5) te bepalen, zie (Vercruysse & De Roo, 2026). De op deze wijze bepaalde snelheid werd in kader van de verdere analyse visueel geverifieerd. In totaal zijn van de 755 bepaalde vaarsnelheden 64 snelheidsbepalingen ongeldig verklaard. Een voorbeeld van deze ongeldig verklaarde snelheidsbepalingen worden gegeven in Figuur 52. Bemerkt hierin dat deze opgedeeld kunnen worden in drie types:

- Vals positief. Naast de scheepspassages afgeleid uit de AIS data werden ook scheepspassages geselecteerd op basis van karakteristieke golfpatronen.
- Kruising van twee schepen, zie Figuur 52 rechtsboven.
- Plotse waterpeilschommeling, zie Figuur 52 onder. De faseverschuiving wordt bepaald op basis van de laag frequente schommeling in plaats van op basis van het hoger frequente karakteristieke secundair golfpatroon. Dit hoger frequente golfpatroon komt niet voor in de AIS en betreft vermoedelijk een recreatievaartuig. Moest de faseverschuiving voor deze scheepspassages uitgevoerd worden op de secundaire golfpatroon kan het aantal foutieve bepalingen nog sterk gereduceerd worden.

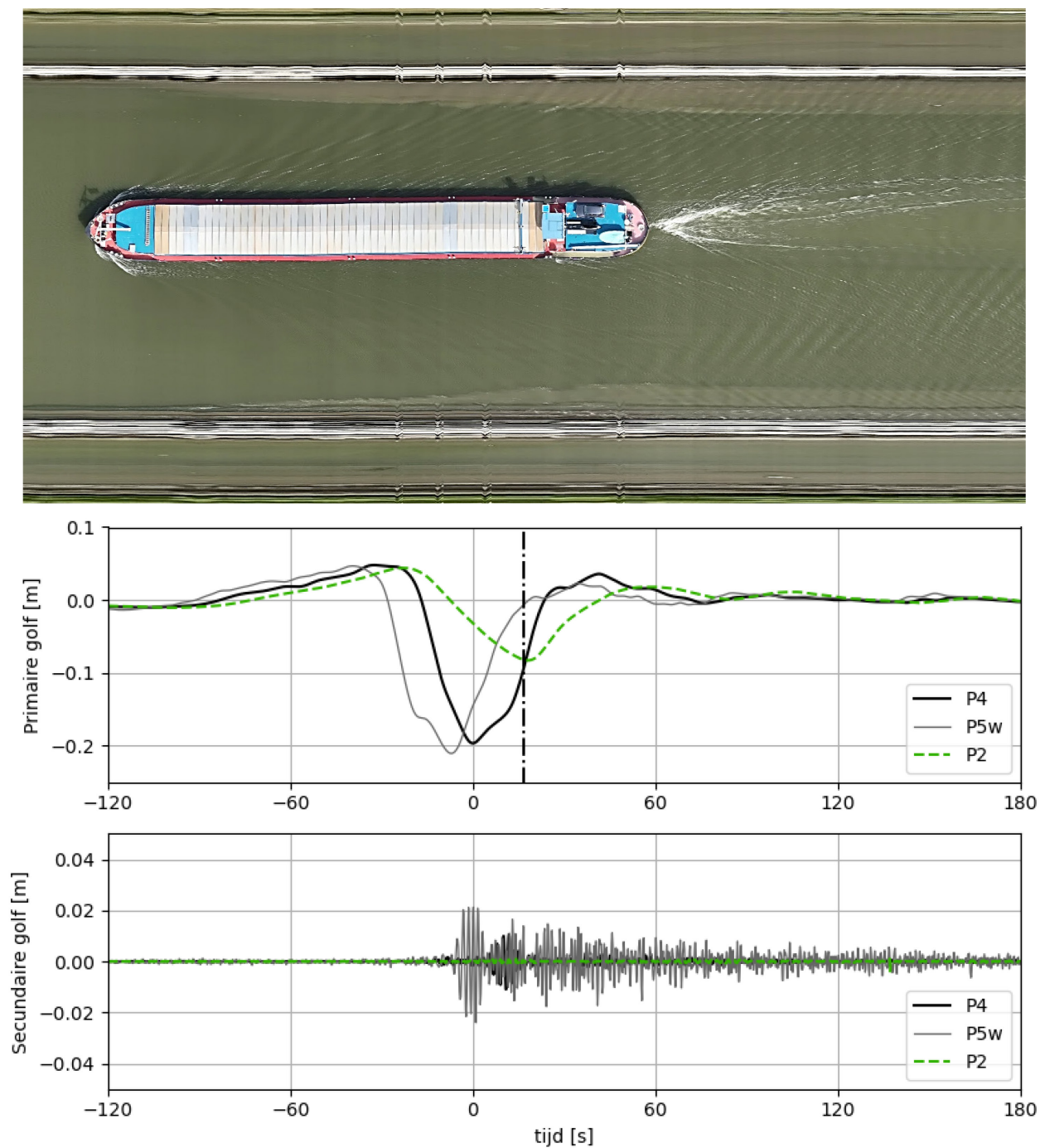


Figuur 52 – Voorbeelden van ongeldig verklaarde vaarsnelheidsberekeningen

Uit de AIS bepaling volgde dat een aantal AIS punten op een aanzienlijke afstand van de meetsectie lagen. Voor 2.5 % van de scheepspassages bedroeg de afstand tussen de twee punten meer dan 1 km. Gekozen wordt om de vaarsnelheid bepaald uit de AIS niet te gebruiken wanneer één van beide punten op een afstand van meer dan 150 m ligt van de meetraai.

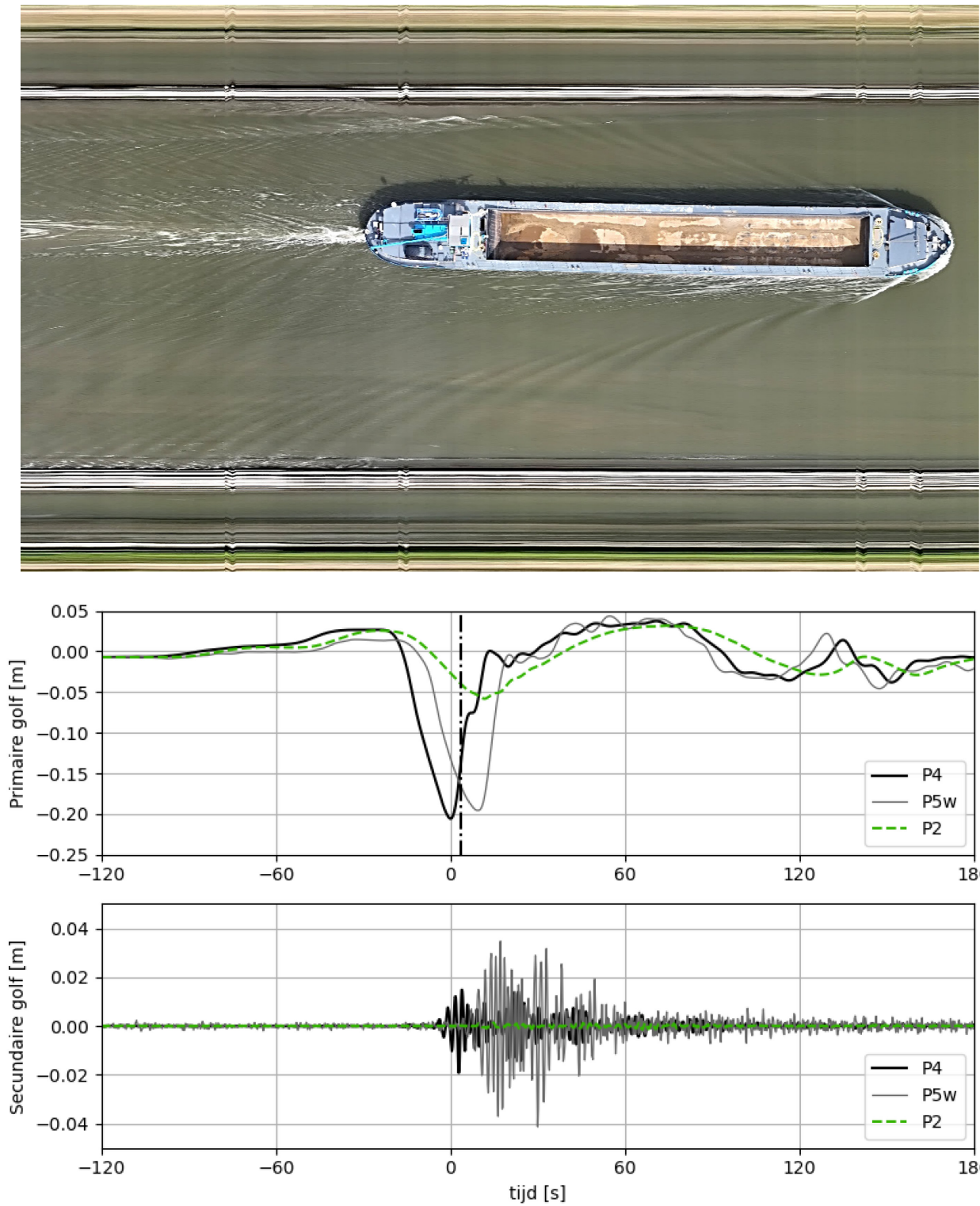
Besloten wordt om waar mogelijk de snelheid afgeleid uit de AIS data te gebruiken. Waar deze niet beschikbaar is, wordt de snelheid afgeleid uit de drukmetingen toegepast.

Bijlage E Passages met drone opname



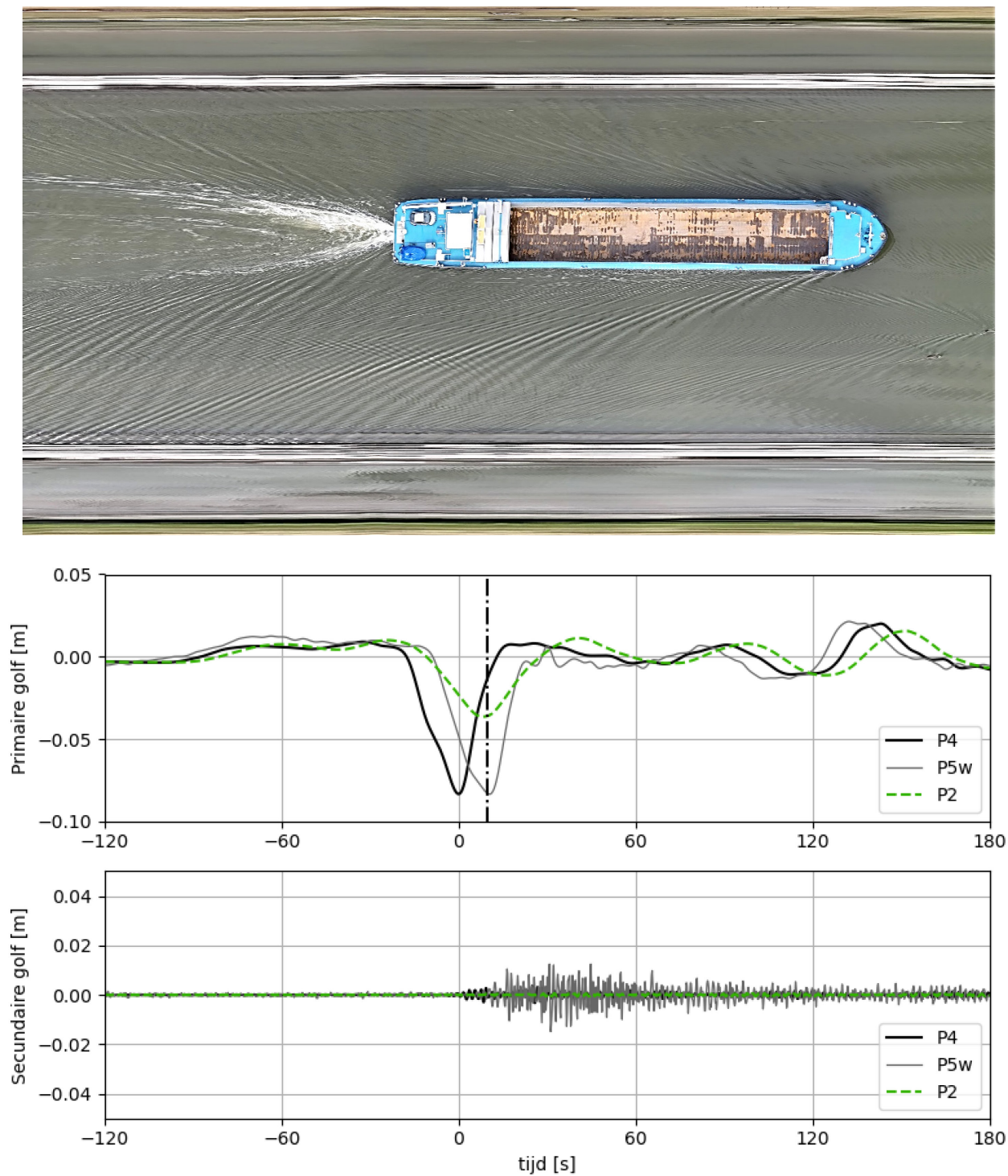
Passage	Peil [m TAW]	CEMT	LxB [mxm]	Diepgang [m]	Vaarrichting [-]	Ycs [m]	Vs [m/s]	VL [m/s]
384	5.67	CEMT IV	86x10	2.2	opvaart	-5.7	2.51	3.59

Figuur 53 – Scheepspassage nr. 384

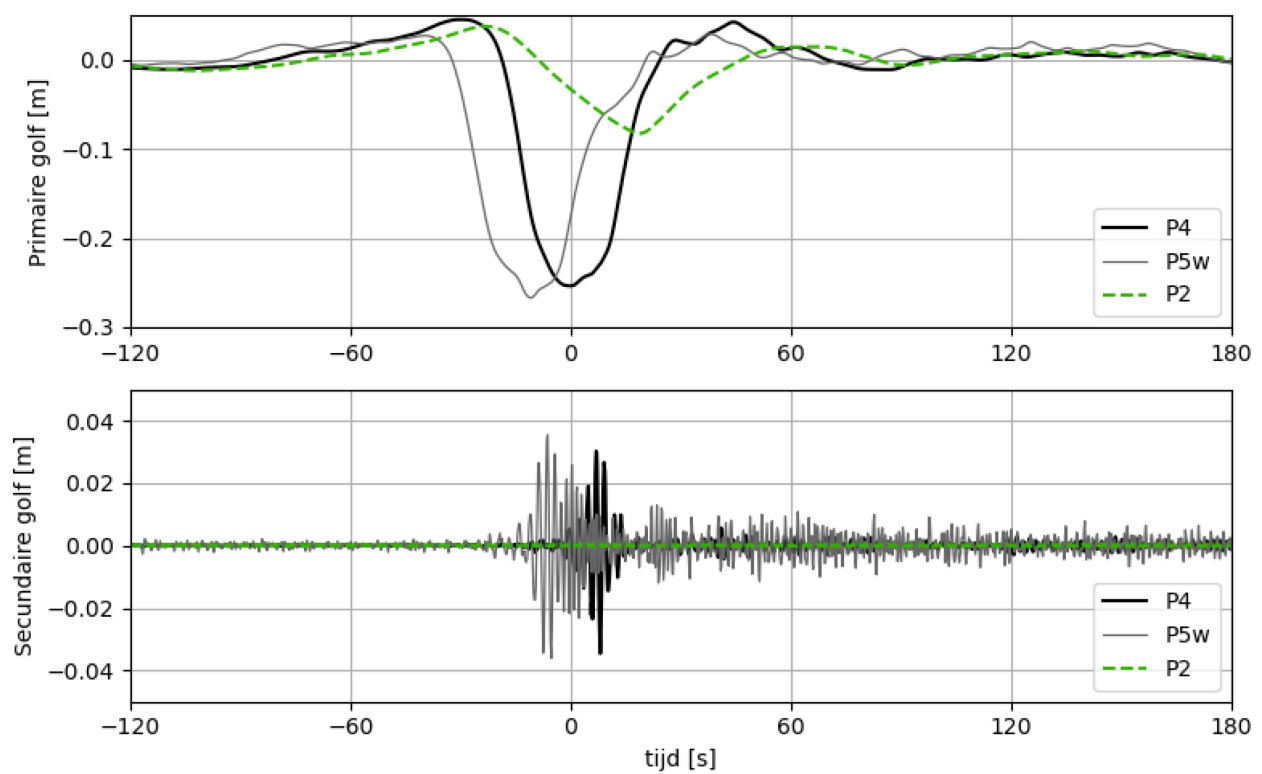


Passage	Peil [m TAW]	CEMT	LxB [mxm]	Diepgang [m]	Vaarrichting [-]	Ycs [m]	Vs [m/s]	VL [m/s]
385	5.63	CEMT IV	85x9	1.2	afvaart	-10.3	3.92	4.29

Figuur 54 – Scheepspassage nr. 385

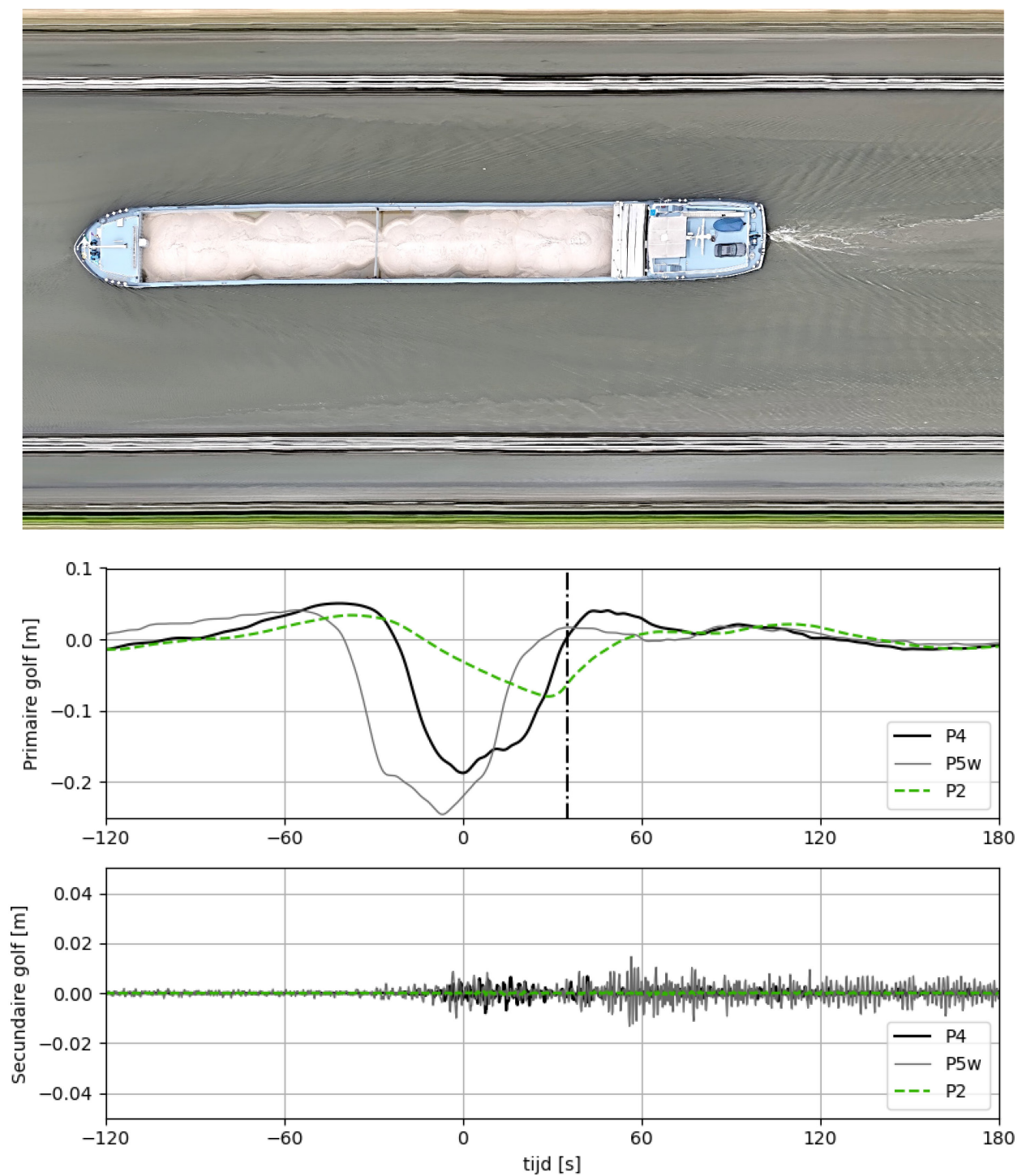


Figuur 55 – Scheepspassage nr. 387



Passage	Peil [m TAW]	CEMT	LxB [mxm]	Diepgang [m]	Vaarrichting [-]	Ycs [m]	Vs [m/s]	VL [m/s]
388	5.61	CEMT IV	85x9.5	/	opvaart	/	2.96	/

Figuur 56 – Scheepspassage nr. 388



Passage	Peil [m TAW]	CEMT	LxB [mxm]	Diepgang [m]	Vaarrichting [-]	Ycs [m]	Vs [m/s]	VL [m/s]
390	5.57	CEMT Va	110x10	2.8	opvaart	-0.2	2.19	4

Figuur 57 – Scheepspassage nr. 390

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