

19_079_5 WL rapporten

Proefstortingen Westerschelde

Deelrapport 5 Stromings- en sedimenttransport metingen ter hoogte van de diepe put van Hansweert – proefstorting 2021

DEPARTEMENT MOBILITEIT & OPENBARE WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

Proefstortingen Westerschelde

Deelrapport 5 – Stromings- en sedimenttransport metingen ter hoogte van de diepe put van Hansweert – proefstorting 2021

Plancke, Y.; Meire, D.



Cover figuur © Vlaamse overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Waterbouwkundig Laboratorium

Juridische kennisgeving

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

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

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

Copyright en wijze van citeren

© Vlaamse overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Waterbouwkundig Laboratorium 2022 D/2022/3241/185

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Plancke, Y.; Meire, D. (2022). Proefstortingen Westerschelde: Deelrapport 5 – Stromings- en sedimenttransport metingen ter hoogte van de diepe put van Hansweert – proefstorting 2021. Versie 3.0. WL Rapporten, 19_079_5. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

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

Documentidentificatie

Opdrachtgever:	Maritieme Toegang		Ref.:	WL2022F	19_079_5
Trefwoorden (3-5):	Stroming, sediment, monitoring, Westerschelde				
Kennisdomeinen:	Hydrodynamica > Stroomsnelhed	nen > In si	tu metinge	n	
	Sediment > Sedimenttransport > In situ metingen				
Tekst (p.):	41		Bijlagen	(p.):	24
Vertrouwelijk:	🛛 Nee 🖾 Online b		eschikbaar		

Auteur(s): Plancke, Y.

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Meire D	Getekend door:Dieter Meire (Signature) Getekend op:2022-10-17 14:06:23 +02:0 Reden:Ik keur dit document goed
Revisor(en).	Welle, D.	Dierex Heise
Projectleider:	Plancke, Y.	Getekend door:Yves Plancke (Signature) Getekend op:2022-09-28 13:15:14 +02:0 Reden:Ik keur dit document goed Yves Plancke

Goedkeuring

		Getekend door:Abdelkarim Bellatkin (Sign Getekend op:2022-09-26 10:37:18 +02:0 Reden:Ik keur dit document goed
Afdelingshoofd:	Bellafkih, K.	Авмескалт Вешаркі



Abstract

In het kader van de nieuwe stortstrategie van onderhoudsbaggerspecie in de Westerschelde werden aan de hand van proefstortingen een aantal potentiële nieuwe stortzones verkend. Eén van deze stortzones bevindt zich ter hoogte van de diepe put van Hansweert. Uit eerdere stortproeven (2016-2017) is gebleken dat de initiële stabiliteit van de gestorte specie beperkt is. In mei en juni 2021 vond een nieuwe proefstorting plaats ter hoogte van de diepe put van Hansweert. Om de effecten op met name het sedimenttransport in te schatten, werden door het Waterbouwkundig Laboratorium 2 meetframes geplaatst nabij de stortzone. Deze meetframes werden uitgerust met toestellen voor het meten van de stroming en het sedimenttransport. Ze werden 2 weken voor de aanvang van de stortingen geplaatst en hebben een aaneengesloten periode van 6 weken gemeten.

De metingen van sedimenttransport gebeurden met indirecte meettechnieken (optische en akoestische backscatter). Om de gemeten signalen om te zetten naar sedimentconcentratie werden 2 kalibratiemetingen uitgevoerd. Voor zowel de akoestische (geknikte exponentiële relatie) als de optische (verschillende respons binnen de getijcyclus) sensoren bleek eenvoudige regressie onvoldoende en moest een complexere relatie opgesteld worden. De metingen van de stroomsnelheden en de (afgeleide) sedimentconcentratie laten vervolgens toe het sedimenttransport te berekenen.

Aan de hand van een ensemble-analyse is nagegaan of het sedimenttransport verschilt in de periode zonder en met stortingen. Wanneer de eerste periode met stortingen vergeleken wordt met de periode voor aanvang de stortingen, is er voor beide meetlocaties een (lichte) toename in het sedimenttransport waar te nemen. Wanneer de tweede periode met stortingen vergeleken wordt met de periode voor aanvang de stortingen, is er voor meetlocatie "oranje" een (lichte) afname in het sedimenttransport waar te nemen, terwijl positie "geel" quasi gelijk is in beide periodes. Uit de analyse blijkt dat de variatie in het sedimenttransport tussen enerzijds individuele getijcycli bij gemiddeld getij, de variatie over een springtijdoodtij-cyclus en anderzijds de onzekerheden in de berekening van het gemeten sedimenttransporten, een factor 10 groter zijn dan de te verwachten veranderingen in sedimenttransport door de stortingen (bij een proefstortingen van 1 Mm³). Ook met betrekking tot de wijziging in sedimenttransport naar het Middelgat kan gesteld worden dat de bijdrage van de proefstorting klein is ten opzichte van het natuurlijke transport en de variatie hierin.

Inhoudstafel

A	ostr	act .		I	11		
In	hou	Idsta	afel	r	V		
Li	jst v	an c	le tal	bellenV	/1		
Li	jst v	an c	le fig	urenV	11		
1	I	nlei	ding		1		
2	F	Proe	fstor	ting DPHW 2021	2		
	2.1		Stor	tzone diepe put van Hansweert	2		
	2.2		Verl	oop van de stortingen	3		
3	E	Besc	hrijvi	ing meetcampagne	5		
	3.1		Mee	tlocaties	5		
	3.2		Mee	tframes	8		
	3.3		Kalik	pratiemetingen	9		
	3.4		Mee	ttechnieken 1	1		
	3	3.4.1	_	Wind en waterstanden 1	1		
3.4.2 Stroming		Stroming 1	1				
	3	3.4.3	}	Sedimenttransport 1	3		
	3	3.4.4	Ļ	Sedimentconcentratie	4		
3.4.5 Korrelgrootte		Korrelgrootte 1	5				
	3	3.4.6	6	Overige parameters	5		
	3.5		Verv	verking indirecte meettechnieken1	7		
	3	3.5.1	-	Sedimentconcentratie op basis van optische signalen1	7		
	3	3.5.2	2	Sedimentconcentratie op basis van akoestische backscatter 1	7		
4	F	Resu	ltate	n - kalibratiemetingen	9		
4.1 Optische backscatter		sche backscatter 1	9				
	4.2		Akoe	estische backscatter 2	2		
4.2		4.2.1	-	AquaDopp2	2		
	Z	4.2.2	2	AWAC	3		
	4.3		Sedi	menttransport 2	4		
5	F	Resu	ltate	n langdurige metingen 2	5		
	5.1		Win	d 2	5		
	5.2	2 Waterstanden					
	5.3	3 ADCP					

	5.3.	1	Stroming	27
	5.3.	2	Sedimentconcentratie en transport	28
	5.4	OB	S	29
	5.4.	1	Sedimentconcentratie	29
	5.4.	2	Verloop op het einde van de meetcampagne	29
6	Ana	lyse	effect stortingen	31
	6.1	Pos	sitie "geel"	32
	6.1.	1	Akoestische backscatter	32
	6.1.	2	Optische backscatter	33
	6.2	Pos	sitie "oranje"	35
	6.2.	1	Akoestische backscatter	35
	6.2.	2	Optische backscatter	35
	6.3	Inso	chatting te verwachten verandering sedimenttransport	37
7	Con	clusi	ies en aanbevelingen	38
	7.1	Cor	nclusies	38
	7.2	Aar	nbevelingen	39
8	Refe	erent	ties	40
В	ijlage 1	S	Stroming en SSC frame "GEEL"	B1
В	ijlage 2	S	Stroming en SSC frame "ORANJE"	B10
В	ijlage 3	S	SSC obv. optische backscatter	B19
Bijlage 4 Karakteristiek verloop SSC obv. OBS		B24		

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Overzicht meetlocaties	7
Tabel 2 – Overzicht meettoestellen op meetframes	8
Tabel 3 – Overzicht karakteristieken ADCP-toestellen	12
Tabel 4 – Overzicht ingezette meettoestellen Opmerking: "B+XX cm" houdt in dat het toestel XX cm boven bodem/onderkant kalibratieframe gemonteerd is	<i>de</i> 16
Tabel 5 – Overzicht periodes voor de analyse van het sedimenttransport	31

Lijst van de figuren

Figuur 1 – Overzicht studiegebied met stortzone DPHW (witte vakken) en deelzone stortproef 2021 (gele rechthoek) en positie meetframes (gele en rode ster)
Figuur 2 – Verloop van de storthoeveelheden (cumulatief en per trip) tijdens de proefstorting Groene lijn geeft meetperiode van de frames weer, groene markers geven kalibratiecampagnes weer
Figuur 3 – Verschilkaart DPHW proefstorting 2021 Bron: (IMDC, 2021)
Figuur 4 – Mediane korrelgrootte van gestorte specie proefstorting DPHW 2021 Bron: (Plancke & Bastiaensen, 2021)
Figuur 5 – Bodemligging (in m NAP) ter hoogte van de zoekzones: Middelgat (boven) - drempel van Hansweert (onder) Opname 02/02/2021 (rood) en 18/02/2021 (blauw)
Figuur 6 – Illustratief verloop van waterstand en snelheden bij springtij voor oostelijk en westelijk meetframe
Figuur 7 – Ingezette meetframes tijdens meetcampagne: schematische opstelling (links) en in situ toestand (rechts)
Figuur 8 – Kalibratieframe met verschillende meettoestellen gebruikt tijdens meetcampagne 10
Figuur 9 – AquaDopp: dimensies (links, in mm), principe van werking (midden) en types (rechts) 12
Figuur 10 – AWAC: dimensies (links, midden, in mm) en principe van werking (rechts)
Figuur 11 – Delftse fles op frame
Figuur 12 – Kalibratie OBS met opsplitsing in verschillende perioden (per uur) 20
Figuur 13 – Mediane korrelgrootte en densiteit van het sediment gemeten met LISST-100X 20
Figuur 14 – Kalibratie OBS met opsplitsing in verschillende perioden: geaggregeerd 21
Figuur 15 – Sedimentconcentratie uit turbiditeit (lijn) na toepassing van verschillende kalibratiecurves OBS (o.b.v. staalname 2 ^e kalibratiemeting) en vergelijking met gemeten sedimentconcentratie uit pompstalen (geel bol)
Figuur 16 – Kalibratie ABS uit AquaDopp 22
Figuur 17 – Kalibratie ABS uit AWAC
Figuur 18 – Vergelijking sedimenttransport Delftse fles en AquaDopp en korrelgrootte uit Delftse fles 24
Figuur 19 – Verloop windsnelheid en -richting ter hoogte van Hansweert
Figuur 20 – Verloop waterstanden en getijverschil te Hansweert 26
Figuur 21 – Verloop stroomsnelheid (boven), sedimentconcentratie (midden) en diepte-geïntegreerd sedimenttransport (onder) op positie "geel" voor de eerste week van de meetperiode
Figuur 22 – Verloop sedimentconcentratie voor frame "geel" (boven) en "oranje" (onder) tijdens de 2 ^e week van de meetperiode
Figuur 23 – Verloop sedimentconcentratie voor frame "geel" (boven) en "oranje" (onder) tijdens de voorlaatste week van de meetperiode
Figuur 24 – Turbiditeitssensoren frame "geel" na ophalen meetframes

Figuur 44 – Verloop stroomsnelheid (boven), sedimentconcentratie (midden) en diepte-geïntegreerd sedimenttransport (onder) op positie "oranje" voor de 7 ^e week van de meetperiode
Figuur 45 – Verloop stroomsnelheid (boven), sedimentconcentratie (midden) en diepte-geïntegreerd sedimenttransport (onder) op positie "oranje" voor de 8 ^e week van de meetperiode B18
Figuur 46 – Verloop sedimentconcentratie voor frame "geel" (boven) en "oranje" (onder) voor de 1 ^e week van de meetperiode
Figuur 47 – Verloop sedimentconcentratie voor frame "geel" (boven) en "oranje" (onder) voor de 2 ^e week van de meetperiode
Figuur 48 – Verloop sedimentconcentratie voor frame "geel" (boven) en "oranje" (onder) voor de 3 ^e week van de meetperiode
Figuur 49 – Verloop sedimentconcentratie voor frame "geel" (boven) en "oranje" (onder) voor de 4 ^e week van de meetperiode
Figuur 50 – Verloop sedimentconcentratie voor frame "geel" (boven) en "oranje" (onder) voor de 5 ^e week van de meetperiode
Figuur 51 – Verloop sedimentconcentratie voor frame "geel" (boven) en "oranje" (onder) voor de 6 ^e week van de meetperiode
Figuur 52 – Verloop sedimentconcentratie voor frame "geel" (boven) en "oranje" (onder) voor de 7 ^e week van de meetperiode
Figuur 53 – Verloop sedimentconcentratie voor frame "geel" (boven) en "oranje" (onder) voor de 8 ^e week van de meetperiode
Figuur 54 – Karakteristiek verloop (ensemble-analyse) van de sedimentconcentratie (bovenste OBS) op positie "geel"
Figuur 55 – Karakteristiek verloop (ensemble-analyse) van de sedimentconcentratie (bovenste OBS) op positie "oranje"

1 Inleiding

In het kader van de verruiming van de vaargeul in de Westerschelde en de Beneden Zeeschelde werd een stortstrategie ontwikkeld waarbij de onderhoudsspecie deels in de hoofdgeulen, deels in de nevengeulen en deels langs een aantal plaatranden wordt teruggestort. Deze strategie werd ook na het aflopen van de vergunningstermijn van 5 jaar verdergezet in de vigerende vergunning.

Ter voorbereiding van de nieuwe (vanaf 2022) stortstrategie werd, na voorbereidend onderzoek (Arcadis, 2015), in 2016 een vergunning verkregen voor het uitvoeren van proefstortingen (maximaal 2 campagnes met storthoeveelheid van maximaal 1 Mm³ per campagne) in de Westerschelde, waaronder 2 locaties in de diepe delen van de vaargeul (Inloop Ossenisse (INOS) en diepe put van Hansweert (DPHW)). Deze proefstortingen werden opgevolgd met multibeam echo-sounder (MBES) peilingen, met als doel de stabiliteit van de gestorte specie op te kunnen volgen. Uit deze resultaten bleek dat de stabiliteit eerder beperkt was, zowel initieel (tijdens en vlak de stortingen) als op de langere (~ 1 jaar) termijn. Om een beter inzicht te krijgen in de sedimentverspreiding, werden aanvullende acties ondernomen:

- 1. Inschatten van de sedimentverspreiding tijdens het storten aan de hand van een meetcampagne tijdens de 2^e proefstortcampagne (juli 2017) (Plancke *et al.*, 2017)
- 2. Inschatten van het sedimenttransport in en nabij de diepe put van Hansweert.
- 3. Herhaling van de proefstortingen om op basis van aanvullende metingen een beter inzicht te krijgen van de sedimentverspreiding. Hiervoor werd in de eerste helft van 2019 een nieuwe vergunning bekomen en zullen in de loop van 2019-2021 nieuwe proefstortingen (telkens 1 Mm³) georganiseerd worden.

Voorliggend rapport gaat dieper in op de laatste twee acties uit bovenstaande lijst. In mei en juni 2021 vond een nieuwe proefstorting plaats ter hoogte van de diepe put van Hansweert (DPHW). Om de effecten op met name het sedimenttransport in te schatten, werden door het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) 2 meetframes geplaatst nabij de stortzone. Deze meetframes werden uitgerust met toestellen voor het meten van de stroming en het sedimenttransport. Ze werden 2 weken voor de aanvang van de stortingen geplaatst en hebben een aaneengesloten periode van 6 weken gemeten. Voorliggend rapport beschrijft de resultaten van deze meetcampagne en gaat na of er een verschil in stroming en sedimenttransport kan vastgesteld worden in de periode voor en tijdens de uitvoering van de stortingen.

Bij het uitvoeren van terreinmetingen zijn verschillende partijen betrokken die niet op de voorgrond verschijnen. Vandaar een woord van dank aan zij die hebben meegewerkt aan het tot stand komen van deze meetcampagne: Erwin De Backer en Styn Claeys voor de mobilisatie van de meetframes en het meetschip, de bemanningen van de MS Zeeschelde, MS Pierre Petit en MS Veremans voor het uitvoeren van de metingen en de collega's van het sedimentologisch laboratorium voor het analyseren van de genomen stalen.

2 Proefstorting DPHW 2021

2.1 Stortzone diepe put van Hansweert

De diepe put van Hansweert is gelegen in het midden deel van de Westerschelde op de overgang tussen macrocel 4 en 5. De put wordt in het zuiden begrensd door de Platen van Ossenisse, terwijl de noordelijk grens vastligt door de dijken en de ingang tot het Kanaal door Zuid-Beveland (Figuur 1). De diepe put van Hansweert is een dynamisch gebied waarbij de diepte lokaal oploopt tot 35 m onder het laagwater. Uit eerdere metingen is gebleken dat de uitgevoerde stortingen een kleine stabiliteit (~ 50%) kennen op de middellange (~ weken/maanden) termijn (IMDC, 2019) en dat de stroming een 3-dimensionaal karakter kent (Plancke *et al.*, 2017).



Figuur 1 – Overzicht studiegebied met stortzone DPHW (witte vakken) en deelzone stortproef 2021 (gele **rechthoek**) en positie meetframes (gele en rode **ster**)

Eerdere meetcampagnes (Plancke *et al.*, 2019, 2020) en CFD-modellering (IMDC, 2020) hebben getracht de verspreiding van de gestorte specie op korte termijn (~ minuten) in beeld te brengen. Hieruit volgde dat tijdens en onmiddellijk na de storting ca. 0-10% van de gestorte specie door de stroming wordt getransporteerd. Het overgrote deel van de specie komt dus terecht op de bodem, waar het zich uitspreidt in een donut-vorm, met een buitendiameter van ca. 250 m. Het verschil tussen de initiële stabiliteit en de stabiliteit op middellange termijn duidt erop dat er een belangrijk sedimenttransport dient plaats te vinden in de eerste uren/dagen na de storting. Voorliggende meetcampagne richt zich op de mogelijke verandering in het sedimenttransport op deze tijdschaal. Hiervoor werden op 2 locaties nabij¹ de proefstortingen meetframes uitgezet.

¹ Metingen ter hoogte in de stortzone is praktisch onmogelijk. De keuze van de meetlocaties gebeurde rekening houdend met een aantal praktische randvoorwaarden, zie § 3.1.

2.2 Verloop van de stortingen

De proefstorting in de DPHW vond plaats van 4 mei 2021 tot en met 28 juni 2021 (Figuur 2). Over een periode van bijna 8 weken werd 1 Mm³ zanderige specie gestort. In het midden van de periode werd gedurende 1 week niet gestort vanwege een andere baggeropdracht waarvan de specie niet in de DPHW kon worden gestort. De stortingen in de DPHW vonden geconcentreerd plaats in de stortvakken 90-92 en 124-126 (Figuur 1). De vakken werden gekozen met als doel na te gaan of de gestorte specie zich in de richting van het Middelgat zou verspreiden.



Figuur 2 – Verloop van de storthoeveelheden (cumulatief en per trip) tijdens de proefstorting Groene lijn geeft meetperiode van de frames weer, groene markers geven kalibratiecampagnes weer

Figuur 3 geeft de verschilkaart weer van de multibeam echosounder (MBES) opnames voor en na de stortproef. Hierop is duidelijk het effect van de stortingen te zien in en rond de geselecteerde stortvakken: in de noordwestelijke zone zorgen de stortingen voor een verhoging van de bodem met meer dan 2 m. Per trip werd tevens een sedimentstaal genomen uit het beun van het baggerschip. Van deze stalen werd de korrelgrootte bepaald met behulp van laserdiffractie (Plancke & Bastiaensen, 2021). Uit deze analyse volgt dat het gestorte materiaal grotendeels bestaat uit fijn tot medium zand met een mediane korrelgrootte variërend tussen 150 en 300 μ m (Figuur 4).



Figuur 3 – Verschilkaart DPHW proefstorting 2021 | Bron: (IMDC, 2021)



Figuur 4 – Mediane korrelgrootte van gestorte specie proefstorting DPHW 2021 | Bron: (Plancke & Bastiaensen, 2021)

3 Beschrijving meetcampagne

Het doel van de meetcampagne is het in beeld brengen van het sedimenttransport nabij de stortzone DPHW voor (referentie) en tijdens de uitvoering van de proefstortingen. Om dit te realiseren worden 2 meetframes ingezet die gedurende meerdere weken autonoom de stroming en de sedimentconcentratie kunnen meten, met een interval van 5 minuten, wat voldoende is om de intra-getij-variatie in beeld te brengen. Aangezien het Schelde-estuarium gekenmerkt wordt door een sterk dubbeldaags getij, met daarenboven nog een aanzienlijke variatie binnen een springtij-doodtij-cyclus, is ervoor gekozen de referentieperiode (voor aanvang van de stortingen) gelijk aan één springtij-doodtij-cyclus te nemen. De metingen lopen vervolgens door, zodat ook minstens één springtij-doodtij-cyclus bemeten wordt waarin de stortactiviteiten plaatsvinden. Dit moet toelaten een analyse te maken van het sedimenttransport voor en tijdens de proefstortingen, rekening houdend met de variatie op de tijdschaal van zowel één getijcyclus als een springtij-doodtij-cyclus.

In de volgende paragrafen wordt ingegaan op de keuze van de meetlocaties alsook de beschrijving van de verschillende meettoestellen en de bijbehorende verwerkingen van de meetgegevens.

3.1 Meetlocaties

De diepe put van Hansweert wordt gekenmerkt door enerzijds een grote diepte (tot 35 m onder laagwater) waarin zich ook de vaargeul voor zeevaart bevindt, en anderzijds een sterke dynamiek. Dit maakt het praktisch onmogelijk om de meetframes in de onmiddellijke omgeving van de stortvakken te plaatsen.

De gestorte specie kan zich verspreiden in verschillende richtingen. Een bezorgdheid is de "retourstroom" naar de drempel van Hansweert, wat zou kunnen leiden tot hogere baggervolumes. Een andere bezorgdheid is de verspreiding naar het Middelgat, een nevengeul die gedurende verschillende decennia een afname van het watervolume kent (Schrijver, 2021). Initieel was het de bedoeling om één meetframes te plaatsen nabij beide interessegebieden. Uit multibeam-peilingen voorafgaand aan de proefstorting bleek echter dat de morfologische dynamiek nabij de drempel van Hansweert zeer groot is. De bodemveranderingen, ten gevolge van migratie van bodemvormen, bleken groter te zijn dan 50 cm over 2 weken (Figuur 5 - onder). Dit kan leiden tot het bedekken van de meettoestellen op de meetframes², met het bijkomende risico dat het meetframes niet meer veilig kan opgehaald worden. Ter hoogte van de ingang van het Middelgat is deze dynamiek veel minder aanwezig (Figuur 5 - boven). Daarom werd besloten beide meetframes uit te zetten nabij de ingang van het Middelgat.

Naast de lokale morfodynamiek (migratie van bodemvormen), zijn er ook nautische beperkingen waarmee rekening dient gehouden te worden. Zo moeten de meetframes buiten het betonde nevenvaarwater geplaatst worden. De 2 meetframes werden geplaatst langs beide zijdes van het nevenvaarwater van het Middelgat.

Met behulp van het numerieke model dat ingezet wordt voor de opvolging van de plaatrandstortingen (Vos *et al.*, 2012), werd een inschatting gemaakt van de lokale hydrodynamische condities bij springtij. Langs de oostelijke rand van het nevenvaarwater (rode boeien) is er een groot verschil tussen de eb- en vloedstroming: waar de vloedstroming piekt tot ca. 80 cm/s ongeveer 60' voor hoogwater, blijft de ebstroming beperkt tot 50 cm/s. Deze waarde bij eb ligt rond de stroomsnelheid die tijdens in situ metingen (Ides *et al.*, 2007) werd vastgesteld om sediment (zand ~ 200 μ m) in beweging te krijgen. Langs de westelijke rand van het nevenvaarwater (groene boeien) zijn de maximale eb- en vloedstroming gelijkaardig (80 cm/s).

² In eerdere meetcampagnes uitgevoerd door Rijkswaterstaat in deze omgeving, werden ADCP-toestellen die op de bodem uitgelegd werden, volledig bedekt door zand (pers. comm. RWS).

Deze waarde ligt hoger dan het begin van beweging van zand, waardoor kan verwacht worden dat op deze locatie zowel bij eb als bij vloed zandtransport zal optreden.

Op basis van deze analyse werden de posities van beide meetframes vastgelegd. Ter hoogte van de groene boeienzijde (nabij de kardinale boei "OH-MG") werd het eerste meetframe geplaatst. Deze positie is gelegen op een afstand van ca. 1000 m van de stortzone. Dit meetframe werd gemarkeerd met een gele blaas en wordt dan ook "FRAME GEEL" genoemd. Ter hoogte van de rode boeienzijde (tussen de rode boeien "40B" en "MG14") werd het tweede meetframe geplaatst. Deze positie is gelegen op een afstand van ca. 500 m van de stortzone. Dit meetframe geplaatst op een afstand van ca. 500 m van de stortzone. Dit meetframe werd gemarkeerd met een oranje blaas en wordt dan ook "FRAME ORANJE" genoemd. De exacte posities zijn terug te vinden in Tabel 1.

Bij de plaatsing van "FRAME GEEL" werd de lijn niet snel genoeg gevierd waardoor is kortstondig spanning op de lijn kwam. Een duikinspectie leerde dat dit ervoor gezorgd had dat het frame gekanteld op de bodem lag. Op 23/04/2021, 4 dagen na de eerste plaatsing, werd het frame opgehaald, werden de meettoestellen gecontroleerd en werd het frame teruggeplaatst. De meetgegevens van de periode 19-23/04/2021 kunnen niet gebruikt worden voor de beoogde analyse.



Figuur 5 – Bodemligging (in m NAP) ter hoogte van de zoekzones: Middelgat (boven) - drempel van Hansweert (onder) Opname 02/02/2021 (rood) en 18/02/2021 (blauw)

Proefstortingen Westerschelde - Deelrapport 5 – Stromings- en sedimenttransport metingen ter hoogte van de diepe put van Hansweert – proefstorting 2021



Figuur 6 – Illustratief verloop van waterstand en snelheden bij springtij voor oostelijk en westelijk meetframe

|--|

Locatio	Positie [WGS84-UTM31]		Datum	Onmorking	
Locatie	Northing [m]	Easting [m]	Datum	Opmerking	
"FRAME GEEL"	568024	5699307	19/4–10/6/2021	Duikinspectie leerde dat bij plaatsing frame gekanteld was. Herplaatsing op 23/04/2021.	
"FRAME ORANJE"	568959	5699822	19/4–10/6/2021		
Kalibratie 1	567838	5699262	11/5/2021	Met gelijkaardige toestellen	
Kalibratie 2	568535	5698089	24/6/2021	Met toestellen van frames	

3.2 Meetframes

Tijdens de meetcampagne met de HYLAS-meetframes (Figuur 7) werden verschillende meettoestellen ingezet. Per meetframe werd zowel een Nortek AWAC (up-looking) als Nortek AquaDopp (down-looking) gemonteerd om het volledige verticale stroomsnelheidsprofiel te kunnen opmeten. Beide toestellen laten tevens toe een inschatting te maken van de sedimentconcentratie op basis van de sterkte van het akoestische backscatter (ABS) signaal.

Daarnaast werden per meetframe 2 YSI-multiparametersondes gemonteerd. De belangrijkste parameter in het kader van voorliggend onderzoek die met deze toestellen registreren, is de turbiditeit. Deze kan, na kalibratie, omgerekend worden naar sedimentconcentratie. Daarnaast wordt ook de conductiviteit, temperatuur en druk gemeten, waaruit de saliniteit kan berekend worden. De toestellen werden gemonteerd op 30 cm en 50 cm boven de onderkant de meetframes, om alzo het nabij-bodem sedimenttransport te meten.

In onderstaande Tabel 2 en Tabel 4 worden de verschillende toestellen alsook hun positie en meetinterval weergegeven.

Tabel 2 – Overzicht meettoestellen op meetframes

Frame	Toestel	Parameters	Positie	Meetinterval	Opmerkingen
	AWAC	Stroming, ABS	B+153 cm	60 s	Up-looking Cell size 50 cm
	AquaDopp	Stroming, ABS	B+107 cm	300 s	Down-looking Cell size 10 cm
	YSI	Turbiditeit, conductiviteit, temperatuur, druk	B+30cm	300 s	
	YSI	Turbiditeit, conductiviteit, temperatuur, druk	B+50cm	300 s	
	AWAC	Stroming, ABS	B+153 cm	60 s	Up-looking Cell size 50 cm
	AquaDopp	Stroming, ABS	B+131 cm	300 s	Down-looking Cell size 10 cm
	YSI	Turbiditeit, druk	B+30cm	300 s	
	YSI	Turbiditeit, conductiviteit, temperatuur, druk	B+50cm	300 s	



Figuur 7 - Ingezette meetframes tijdens meetcampagne: schematische opstelling (links) en in situ toestand (rechts)

3.3 Kalibratiemetingen

Zowel tijdens de meetperiode van de meetframes (11/05/2021) als nadien (24/06/2021), werd een kalibratiemeting uitgevoerd. De kalibratiemeting tijdens de meetperiode van de meetframes had tot doel water- en sedimentstalen te verzamelen in de onmiddellijke nabijheid van één van de meetframes ("FRAME GEEL") terwijl er met gelijkaardig meettoestellen als op de meetframes gemeten werd op een hogere meetfrequentie (1 meting per seconde \Leftrightarrow 1 meting per 5 minuten).

Daarnaast werden de meettoestellen die tijdens de meetperiode op de meetframes geïnstalleerd waren, na de meetperiode geïnstalleerd op een speciaal ontworpen "kalibratieframe" (Figuur 8). Hierop zijn alle toestellen samen gemonteerd, terwijl er een pompdarm aanwezig is voor het nemen van water- en sedimentstalen. Tevens werd ook de LISST-100X op dit kalibratieframe ingezet tijdens de kalibratiecampagne.

Aangezien tijdens de eerste kalibratiecampagne de gemeten sedimentconcentraties zeer laag bleven, is ervoor gekozen de kalibratie uit te voeren op basis van de tweede kalibratiecampagne. Dit biedt het voordeel dat de staalname gebeurt op exact dezelfde locatie als waar de ingezette toestellen hun signaal registreren, alsook dat een grotere range van sedimentconcentratie beschikbaar is, wat voordelig is voor de kalibratie. De resultaten van de eerste kalibratiecampagne zullen gebruikt worden als validatie voor de gemeten sedimenttransporten (directe vs. indirecte meettechnieken).



Figuur 8 – Kalibratieframe met verschillende meettoestellen gebruikt tijdens meetcampagne

De kalibratiemeting op 24 juni 2021 werd uitgevoerd tijdens de vloed. Aangezien een kalibratiemeting over een volledige getijcyclus praktisch (door geldende COVID19-maatregelen rond bemensing aan boord) onmogelijk was, is ervoor gekozen om tijdens de vloed te meten. De vloedperiode biedt het voordeel dat er een goede variatie in sedimenttransport optreedt, waarbij tevens de maximale transporten over een getijcyclus (bij maximum vloedstroming) plaatsvinden.

Tijdens de kalibratiemeting werden elke 10' pompstalen verzameld, waarvan in het sedimentologisch laboratorium de sedimentconcentratie bepaald werd. Tijdens de periode van maximum vloed werd de frequentie verhoogd naar één staal per 5'. Deze strategie laat toe de toestellen op het kalibratieframe te kalibreren die een meetsignaal hebben ter hoogte van de inlaat van de pompdarm (in casu 3 YSI-OBS-toestellen en de 2 AquaDopp-toestellen). Voor het 4^e YSI-OBS-toestel (eerder met de overige toestellen gekalibreerd op NTU) wordt uitgegaan dat de kalibratiecurve eveneens voor dit toestel toepasbaar is.

De AWAC was eveneens op het meetframe gemonteerd, maar in een up-looking positie. Hierdoor zijn er geen waterstalen beschikbaar in het meetbereik van dit toestel. Om de AWAC alsnog te kunnen kalibreren werd op een aantal momenten geprofileerd (van nabij de bodem naar het wateroppervlak en terug naar de bodem) met het kalibratieframe. De meetwaarden van de YSI-OBS tijdens de profilering worden ingezet om de akoestische backscatter van de AWAC te kalibreren. Hoewel de metingen niet exact op hetzelfde moment plaatsvinden, wordt ervan uitgegaan dat de gemeten waarden op een bepaalde diepte tijdens de profilering (duur ~ 1 à 2 minuten) weinig variëren. Op deze manier kan alsnog een kalibratie uitgevoerd worden voor de AWAC.

3.4 Meettechnieken

Tijdens de meetcampagne en de kalibratiecampagne werden verschillende toestellen ingezet voor het meten van zowel de stroming als het sedimenttransport. Het sedimenttransport werd zowel "direct" gemeten als "indirect", waarbij een optisch of akoestisch signaal geconverteerd wordt naar sedimentconcentratie (via waterstalen), wat in combinatie met een stroomsnelheid uiteindelijk een sedimenttransport geeft. Tabel 4 geeft een overzicht van welke toestellen waar en wanneer werden ingezet, alsook de grootheden die gemeten werden met de toestellen. De verschillende ingezette meettechnieken worden hieronder kort beschreven.

3.4.1 Wind en waterstanden

Voor de windgegevens alsook de waterstanden werd beroep gedaan op de databank van Rijkswaterstaat (https://waterberichtgeving.rws.nl/water-en-weer/dataleveringen/ophalen-opgetreden-data). De metingen van de anemometer en de waterstandsmeter Hansweert worden gebruikt in dit rapport.

3.4.2 Stroming

Aanderaa Seaguard

Tijdens de eerste kalibratiecampagne (d.d. 11/5/2021) werd de Aanderaa Seaguard ingezet voor het meten van de stroming (en de turbiditeit) nabij de bodem. Het meetprincipe van de snelheid is gebaseerd op het Dopplereffect. De Aanderaa Seaguard meet de snelheid in een punt (eigenlijk in een sfeer rondom het meettoestel). Tijdens deze meetcampagne was dit meettoestel gemonteerd op het frame van de Delftse fles, met als doel de stroomsnelheid nabij de bodem (50 cm boven de bodem) te meten. Deze zone wordt niet door de down-looking ADCP in het schip bemeten omwille van het side-lobe-effect. De Aanderaa Seaguard werd ingesteld om één meting (voor alle parameters, i.e. stroming, druk, conductiviteit, temperatuur, turbiditeit) uit te voeren elke 5 seconden.

ADCP

De stroming werd gemeten aan de hand van een Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP). De meetframes werden uitgerust met zowel een down-looking als up-looking ADCP. Een Nortek AquaDopp (Figuur 9) werd bovenaan het frame gemonteerd als down-looking ADCP. Op deze manier kan de stroming nabij de bodem in beeld gebracht worden. Een Nortek AWAC (Figuur 10) werd bovenaan het frame gemonteerd als up-looking ADCP. Op deze manier kan de stroming in de waterkolom in beeld gebracht worden. De karakteristieken van beide toestellen zijn weergegeven in Tabel 3. Daar de blanking distance van beide toestellen is er een zone van ca. 150 cm nabij de bovenkant van het meetframe waar geen stromingsinformatie kan worden ingewonnen. Dit kan eventueel via interpolatie aangevuld worden.

Tijdens de eerste kalibratiemeting werd een RDI Workhorse ADCP (600 kHz) gebruikt. Aangezien de meetfrequentie afwijkt van de beide Nortek toestelllen, is deze enkel ingezet om een beeld te krijgen van de stroming en akoestische backscatter (ABS) tijdens de kalibratiemeting. De ABS werd niet omgerekend naar een sedimentconcentratie aangezien deze relatie niet toepasbaar is op de Nortek toestellen.



Figuur 9 – AquaDopp: dimensies (links, in mm), principe van werking (midden) en types (rechts)



Figuur 10 – AWAC: dimensies (links, midden, in mm) en principe van werking (rechts)

Tabel 3 – Overzicht karakteristieken ADCP-toestellen

	Toesteleige	enschappen	
Туре	Nortek AquaDopp	Nortek AWAC	
Frequentie	2000 kHz	1000 kHz	
Configuratie	Down-looking vanop meetframe	Up-looking vanop meetframe	
Beam hoek	25°	25°	
Aantal beams	3	3+1 (golven)	
Accuraatheid	1% ± 0,5 cm/s	1% ± 0,5 cm/s	
	Instel	lingen	
Cel grootte	0,10 m	0,50 m	
Eerste cel (midden)	0,30 m	0,90 m	
Aantal cellen	17	40	
Profile interval	300 s [1s @ kalibratie]	60 s [1s @ kalibratie]	
Average interval	60 s [1s @ kalibratie]	30 s [1s @ kalibratie]	
Opmerkingen	GEEL: verticaal toestel ORANJE: horizontaal toestel Geen golfmetinger		

3.4.3 Sedimenttransport

Delftse fles

Tijdens de eerste kalibratiecampagne (d.d. 11/5/2021) werd de Delftse fles op frame ingezet voor het meten ("directe" meettechniek) van het sedimenttransport nabij de bodem (bodem + 50 cm). De Delftse fles bestaat uit een bronzen lichaam met vooraan een kleine inlaatopening en achteraan vier openingen waardoor het water uitstroomt. Bij deze meetcampagne is gebruik gemaakt van de inlaatdiameter van 3,8 mm waarbij de 4 openingen aan de achterwand open gelaten worden. Door de uitwendige vorm ontstaat een drukverschil tussen inlaat en uitlaatopeningen dat de ladingsverliezen binnen het toestel ongeveer evenaart voor alle stroomsnelheden. Binnen moet het water en het sediment door een labyrint waarin de snelheid geleidelijk afneemt, zodat de sedimentdeeltjes groter dan 50 micron zich afzetten binnen het lichaam. De duur van de bemonstering kan worden aangepast aan de stroomsnelheid en sedimentconcentratie opdat het monster voldoende vaste stof zou bevatten. Het "gefilterd" volume water kan dus verschillende liters of zelfs tientallen liters bedragen. De fout die gemaakt wordt door de extra sedimentinvoer tijdens het neer- en ophalen van de Delftse fles is in het algemeen verwaarloosbaar. Gewoonlijk is het sedimentmonster groot genoeg om de korrelverdeling te bepalen. Daar de inlaatopening en de bemonsteringstijd gekend is, kan uit het gemeten volume sediment, mits een aanname voor de porositeit en de densiteit van het sediment, het sedimenttransport berekend worden.

Figuur 11 – Delftse fles op frame



Indirecte meettechnieken

Bij de indirecte meettechnieken wordt het gemeten signaal omgezet naar de sedimentconcentratie na kalibratie op basis van water- en sedimentstalen. Vermenigvuldigen van de sedimentconcentratie met de gemeten snelheid op dezelfde hoogte en hetzelfde moment laat toe het sedimenttransport te berekenen (zie verder).

3.4.4 Sedimentconcentratie

Staalname

Tijdens de meetcampagnes werden op regelmatige tijdstippen water- en sedimentstalen genomen met behulp van een pomp. De waterstalen werden opgeslagen in flessen van 1000 ml. De sedimentconcentratie werd hierop later in het laboratorium bepaald via filtratie. Er werd geopteerd om enkel de totale (en geen aparte zand- en slibfractie) sedimentfractie te bepalen, gebruik makend van een filter van 0,45 µm.

Aan de hand van deze sedimentconcentraties kan een ijkingskromme worden opgesteld voor de indirecte meettechnieken en kan het meetsignaal omgezet worden in sedimentconcentraties.

Optische backscatter (OBS)

Tijdens de meetcampagne werd gebruik gemaakt van een YSI-6600 en een Aanderaa Saeguard multiparametersonde, die uitgerust zijn met een turbiditeitsensor. Deze sensor steunt op het principe van de verstrooiing van licht, een relatieve maat voor de lokale sedimentconcentratie (zowel slib als zand). Om de meting om te zetten naar sedimentconcentratie, is een ijking van de meetsensor vereist omdat de verschillende vaste stoffen volgens samenstelling en grootte een andere lichtverstrooiing geven. Tijdens de meetperiode werd de YSI-sonde ingesteld om één meting uit te voeren elke 300 seconden. Tijdens de kalibratiemetingen werden de meettoestellen ingesteld om één meting uit te voeren elke seconde.

Optische transmissie

Tijdens de kalibratiecampagnes werd gebruik gemaakt van de LISST-100X. Dit toestel maakt gebruik van laserdiffractie en scatter- en transmissiemeters om de sedimentconcentratie en de korrelgrootte te bepalen. Het uitgezonden laserlicht wordt door de aanwezige sedimentdeeltjes verstrooid onder een bepaalde hoek, afhankelijk van de eigenschappen van de sedimentdeeltjes. 32 concentrische detectors (elk overeenkomend met een bepaalde verstrooiingshoek) detecteren het verstrooide lichtsignaal en laten toe zowel, op basis van de relatieve verdeling van het opgevangen signaal (in μ I/I, i.e. volumeconcentratie) op de verschillende detectoren, de korrelgrootte te bepalen, als, op basis van de intensiteit van het opgevangen licht, de sedimentconcentratie te bepalen. De LISST-100X werd gemonteerd op een kubusvormig frame (Figuur 8) dat in de waterkolom gehangen werd, nabij de bodem. Het toestel werd ingesteld om één meting uit te voeren elke seconde.

Akoestische backscatter (ABS)

De sterkte van het gereflecteerde akoestische signaal van de ADCP (acoustic backscatter – ABS) is een maat voor de sedimentconcentratie. Hiervoor dient de gemeten intensiteit van het gereflecteerde signaal gecorrigeerd te worden voor de diepte, geluidsverliezen in het water en absorptie door het sediment (zie § 3.5.1) en dient een ijking te gebeuren op basis van de waterstalen.

3.4.5 Korrelgrootte

De LISST-100X, ingezet tijdens de kalibratiemetingen, laat toe in situ de korrelgrootte te bepalen. Voor de beschrijving wordt verwezen naar § 3.4.4.

Daarnaast werd op de stalen verzameld met de Delftse fles in het laboratorium de korrelgrootteverdeling bepaald. Dit gebeurt door middel van laserdiffractie met behulp van de Mastersizer 2000 (Malvern Instruments). De analyse wordt uitgevoerd volgens een vastgelegd protocol. Hierbij wordt het staal eerst gezeefd op een zeef met maaswijdte 2 mm. Vervolgens wordt een representatief deelstaal genomen dat in het toestel wordt ingebracht. Alvorens de korrelgrootte te bepalen, wordt het ingebrachte staal onderworpen aan een ultrasone voorbehandeling, met als doel eventueel vlokken op te breken. Vervolgens wordt de korrelgrootte 3-maal bepaald op hetzelfde staal en wordt een gemiddelde kromme bepaald. Hiervan worden tenslotte de karakteristieke korreldiameters (D10, D35, D50, D65, D90) afgeleid.

3.4.6 Overige parameters

Voor de bepaling van de sedimentconcentratie uit het akoestische backscatter signaal dient de saliniteit en de temperatuur van het water ingegeven worden. De multiparameter-toestellen (YSI 6600 (meetframes) en Aanderaa Seaguard (eerste kalibratiemeting)) beschikken hiervoor over een conductiviteit-, druk- en temperatuursensor. De saliniteit van het water kan aan de hand van deze 3 parameters berekend worden met behulp van de UNESCO-formule (UNESCO, 1983). Wegens de beperkte afhankelijkheid van de druk, werd deze parameter niet meegenomen in de berekeningen.

Tabel 4 – Overzicht ingezette meettoestellen Opmerking: "B+XX cm" houdt in dat het toestel XX cm boven de bodem/onderkant kalibratieframe gemonteerd is

	FRAME GEEL	FRAME ORANJE	KALIBRATIE 1	KALIBRATIE 1
Meetperiode	19/4 – 10/6/2021	19/4 – 10/6/2021	11/05/2021 (vloed)	24/06/2021 (vloed)
Nortek AquaDopp	Down-looking op frame Stroming + ABS	Down-looking op frame Stroming + ABS		Down-looking op kal-frame Stroming + ABS
Nortek AWAC	Up-looking op frame Stroming + ABS	Up-looking op frame Stroming + ABS		Up-looking op kal-frame Stroming + ABS
RDI Workhorse			Down-looking vanop schip Stroming + ABS	Up-looking Stroming + ABS
YSI 6600	Op frame B+30 cm en B+50 cm Turbiditeit, conductiviteit, druk, temperatuur	Op frame B+30 cm en B+50 cm Turbiditeit, conductiviteit, druk, temperatuur	Profilerend Turbiditeit, conductiviteit, druk, temperatuur	Op kal-frame B+30 en B+50 cm Turbiditeit, conductiviteit, druk, temperatuur
Aanderaa Seaguard			B+50 cm (frame Delftse fles) Turbiditeit, snelheid, conductiviteit, druk, temp.	
Pomp			Profilerend Water- en sedimentstalen	Op kal-frame B+30 cm Water- en sedimentstalen
LISST-100X			Profilerend Optische transmissie + korrelgrootte	Op kal-frame B+70 cm Optische transmissie + korrelgrootte
Delftse fles			B+50 cm Sedimenttransport + korrelgrootte	

3.5 Verwerking indirecte meettechnieken

3.5.1 Sedimentconcentratie op basis van optische signalen

Om het signaal van turbiditeit bekomen uit de optische backscatter toestellen (YSI 6600) om te kunnen rekenen naar een sedimentconcentratie, werden tijdens de tweede kalibratiemeting pompstalen genomen ter hoogte van de sensor. Elke sedimentconcentratie, bepaald via filtratie, van een pompstaal wordt gerelateerd aan de turbiditeit van de OBS op moment van de staalname. Op basis van deze koppels (turbiditeit, SSC) wordt de ijking uitgevoerd tussen het OBS-signaal en de bijbehorende sedimentconcentratie.

Deze ijkingscurve opgesteld tijdens de kalibratiemeting, wordt vervolgens toegepast op de volledige meetreeks van turbiditeit wanneer het toestel op het meetframe was geïnstalleerd. Op deze wijze wordt een continue meetreeks van de sedimentconcentratie verkregen.

3.5.2 Sedimentconcentratie op basis van akoestische backscatter

Om de sedimentconcentratie af te leiden uit de akoestische backscatter, dient vooreerst de gemeten intensiteit van het gereflecteerde signaal gecorrigeerd te worden voor de diepte, geluidsverliezen in het water en absorptie door het sediment. De methodiek die binnen voorliggend rapport is gebruikt is analoog aan deze van (Landers *et al.*, 2016) en bevat volgende stappen:

- 1. Converteren interne units (counts) naar log schaal (dB)
- 2. Range normalization corrigeren van de ruwe intensiteit van de backscatter ABS (dB) voor geluidsabsorptie in water en door sediment
- 3. Kalibratie van het genormaliseerde backscatter signal cABS (dB) op basis van pompstalen waaruit de SSC is bepaald via filtratie (mg/l)
- 4. Omrekenen van cABS (dB) naar SSC (mg/l) met kalibratieformule

Vooraleer deze stappen worden toegepast, vindt een validatie van de metingen plaats. Hierbij worden enerzijds de niet-bemeten cellen verwijderd en worden anderzijds slechte metingen verwijderd.

Validatie metingen

De ADCP geeft resultaten voor het volledige bereik van de cellen. Voor de Nortek AquaDopp (down-looking vanop meetframe) kan op basis van de hoogte waarop het toestel bevestigd was op het meetframe, berekend worden welke cellen betrouwbare resultaten geven. De metingen beneden dit niveau werden verwijderd. Voor de Nortek AWAC (up-looking vanop meetframe) reflecteert het akoestische signaal op het wateroppervlak. De metingen boven dit niveau werden verwijderd.

Stap 1: Converteren interne units naar log schaal

Lohrmann (2001) stelt dat de interne units (counts) geconverteerd kunnen worden naar decibels (dB) via een lineaire omrekening met een range van 70 dB. Binnen deze range (overeenkomend met 1 tot 10000 mg/l) bedraagt de schaalfactor (toestel-afhankelijk) $K_c = 0,44$ counts/dB (range 0,40 tot 0,47). Buiten deze range is de conversie niet-lineair.

$$K_c = 0.44 \, dB/count$$

Stap 2: Range normalization

De tweede stap omvat het corrigeren van het ruwe ABS-signaal naar een gecorrigeerd signal (cABS). De correcties die uitgevoerd dienen te worden omvatten 3 factoren: akoestische spreiding, water absorptie en sediment absorptie. Voor een uitgebreide beschrijving wordt verwezen naar (Landers *et al.*, 2016; Lohrmann, 2001).

akoestische spreiding =
$$20 \log_{10} R$$

water absorptie =
$$2\alpha_w R$$
 $\left(\alpha_w = water \ absorptie \ in \frac{dB}{m}\right)$
sediment absorptie = $20R \int \alpha_P dr$ $\left(\alpha_P = sediment \ absorptie \ in \frac{dB}{m}\right)$
 $R = range = z/\cos(hoek \ van \ bundel)$

De water absorptie is afhankelijk van de densiteit van het water (en dus saliniteit), de druk en de frequentie van het uitgezonden akoestische signaal.

Hoewel de sediment absorptie bij lage (< 1 g/l) concentratie meestal verwaarloosbaar is, wordt hij expliciet meegenomen. Deze coëfficiënt α_p wordt berekend volgens de hybride manier ((Landers *et al.*, 2016) gebaseerd op (Urick, 1983) en (Sheng & Hay, 1988)).

De range normalization levert de gecorrigeerde/normaliseerde akoestische backscatter (cABS) volgens volgende formule:

$$cABS = Amp * K_c + akoestische spreiding + water absorptie + sediment absorptie$$

Stap 3: kalibratie cABS naar SSC

In de volgende stap wordt de gecorrigeerde akoestische backscatter (cABS) vergeleken met de sedimentconcentratie bekomen uit de pompstalen. Hiertoe wordt de cABS geselecteerd op het moment van de staalname (bin) en wordt de overeenkomstige cel bepaald op basis van de diepte waarop de staalname plaatsvond. Dit laat toe een ijking uit te voeren tussen het cABS-signaal en de bijbehorende sedimentconcentratie.

Daarnaast bevonden de OBS-sensoren zich op het kalibratieframe. Daar waar de pompstalen met een interval van 5 of 10 minuten werden verzameld, bieden de uit de turbiditeit afgeleide sedimentconcentraties het voordeel dat ze een grotere³ temporele resolutie kennen, terwijl er informatie beschikbaar is 2 verschillende hoogten. Dit laat toe de absorptie doorheen de waterkolom te beschouwen in de kalibratie. In hoofdstuk 4 wordt hier dieper op ingegaan.

Stap 4: converteren van cABS naar SSC

De kalibratiecurve uit de vorige stap wordt tenslotte toegepast op de volledige meetreeks van cABS. Op deze manier kan de cABS geconverteerd worden naar een sedimentconcentratie.

³ Resultaten werden gemiddeld naar minuut-gemiddelde waarden om de variatie in de sedimentconcentratie op de tijdschaal van individuele metingen weg te nemen.

4 Resultaten - kalibratiemetingen

4.1 Optische backscatter

Voor het opstellen van de kalibratiecurve voor de OBS, wordt het gemeten turbiditeitssignaal (in NTU) vergeleken met de sedimentconcentratie van het pompstaal op het zelfde moment. Drie YSI-toestellen waren op het kalibratieframe gemonteerd op dezelfde hoogte als de inlaat van de pompdarm. De gemeten turbiditeitswaarden van deze 3 toestellen ("geel-boven", "oranje-boven" en "oranje-onder") bleken tijdens de kalibratie gelijkaardig. Dit bevestigt dat de toestellen onderling uitwisselbaar zijn, mits laboratorium kalibratie van het turbiditeitssignaal (NTU).

Uit een eerste screening van de resultaten bleek er een onderscheid aanwezig te zijn in de verschillende respons van de OBS-sensoren. Een mogelijke verklaring hiervoor is een verschil in sediment dat getransporteerd wordt gedurende de getijcyclus: uit eerdere metingen in de Westerschelde (Plancke *et al.*, 2008; Plancke & Paridaens, 2012) is gebleken dat gedurende een groot deel van de getijcyclus vooral transport is van fijnere fracties; enkel rond het moment van maximale vloedstroming is er dominantie van zandtransport. Dit sluit aan met de theoretische beschrijvingen, waarbij het zandtransport schaalt met de snelheid tot de macht 3 à 5 (Engelund & Hansen, 1967).

Omwille van deze eerdere ervaringen, werd een deling gemaakt van de pompstalen, dit per blok van 60' (Figuur 12). Hieruit blijkt dat de relatie in de periode HW-60' tot HW duidelijk een anders is dan tijdens de rest van de vloedfase. De metingen met de LISST-100X laten toe meer inzicht te krijgen in de variatie van de mediane korrelgrootte (D50) en de densiteit van het sediment (Figuur 13). Hieruit blijkt dat de D50 op 2 momenten toeneemt: tijdens de eerste piek (HW-210') schommelt de densiteit⁴ van het sediment rond 1300 kg/m³, wat duidt op de aanwezigheid van vlokken die getransporteerd worden; tijdens de tweede piek (HW-60') ligt de densiteit aanzienlijk hoger (2000 kg/m³ en meer), wat duidt om een groter belang van primaire partikels (waarschijnlijk zandkorrels).

Op basis van deze (visuele) vaststellingen werd een indeling gehanteerd waarbij de stalen in de periode rond maximale vloedstroming (HW-90' tot HW) en de overige stalen afzonderlijk beschouwd werden (Figuur 14). Deze figuur toont tevens de theoretische verwachte respons van de OBS, waarbij de sediment-gerelateerde eigenschappen overgenomen werden uit (Fremau, 2019), die de coëfficiënten bepaald voor sediment afkomstig uit het Schelde-estuarium. Hieruit blijkt dat de relatie voor periode HW-90' – HW neigt naar de relatie voor zuiver zand, terwijl de relatie voor de periode tot HW-90' nauw aansluit bij de relatie voor zuiver slib. Dit bevestigt bovenstaande hypothese rond het verschil in sediment dat tijdens de getijcyclus wordt getransporteerd door de stroming. De ebfase werd niet bemeten tijdens de kalibratiemetingen. Aangezien de ebstroming in het algemeen lager is dat de stroming rond maximum vloed, is ervoor gekozen de relatie opgesteld voor het begin van de vloedfase, ook toe te passen voor de ebfase.

Dit levert volgende kalibratie voor de OBS-sensoren (toegepast voor alle YSI-toestellen):

- Maximum vloed (HW-90' tot HW):
- SSC [mg/l] = 15,1 x Turbiditeit [NTU] 287,3
- Rest getijcyclus (HW+30' tot HW-120'):
- SSC [mg/l] = 1,59 x Turbiditeit [NTU] +33,8 lineaire overgang tussen beide relaties
- Periode van 30' voor en na maximum vloed:

Hoewel de verschillende sensoren op NTU zijn gekalibreerd, blijkt er in situ een variatie aanwezig te zijn: de bovenste 3 punten (Figuur 14) vertonen een variatie in de gemeten NTU-waarde (52-77 NTU) terwijl dit een meting op één bepaald moment (en één pompstaal ~ 900 mg/l) betreft. Deze variatie kan te wijten zijn aan in situ variatie op de ruimteschaal van het frame of verschil in gemeten turbiditeit per toestel.

⁴ Deze wordt berekend uit de verhouding van de massaconcentratie (pompstalen) en de gemeten volumeconcentratie (LISST-100X).



Figuur 12 – Kalibratie OBS met opsplitsing in verschillende perioden (per uur)



Figuur 13 – Mediane korrelgrootte en densiteit van het sediment gemeten met LISST-100X



Figuur 14 - Kalibratie OBS met opsplitsing in verschillende perioden: geaggregeerd

Figuur 15 toont het verloop van de sedimentconcentratie afgeleid uit de gemeten turbiditeit na toepassing van de verschillende kalibratiecurves. Hieruit blijkt dat het toepassen van de relatie opgesteld op basis van de pompstalen rond maximum vloed (donker groene curve) aanleiding geeft tot een overschatting van de SSC in het merendeel van de vloedfase. Het toepassen van de relatie opgesteld op basis van de pompstalen van het begin van vloed (rode curve) leidt dan weer tot een sterke onderschatting van de SSC bij maximum vloed. De combinatie van beide relaties (oranje curve) leidt tot een goede overeenstemming over de volledige periode. Deze werkwijze wordt dan ook aangehouden bij het omrekenen naar SSC van de gemeten turbiditeitswaarden.



Figuur 15 – Sedimentconcentratie uit turbiditeit (lijn) na toepassing van verschillende kalibratiecurves OBS (o.b.v. staalname 2^e kalibratiemeting) en vergelijking met gemeten sedimentconcentratie uit pompstalen (geel bol)

4.2 Akoestische backscatter

4.2.1 AquaDopp

Voor het opstellen van de kalibratiecurve voor de ABS, wordt het gemeten akoestische backscatter-signaal (in dB) vergeleken met de sedimentconcentratie van het pompstaal op het zelfde moment. De beide AquaDopp-toestellen waren op het kalibratieframe gemonteerd zodanig dat een meting plaatsvond ter hoogte van de inlaat van de pompdarm. De gemeten ABS-waarden van deze 2 bleken tijdens de kalibratie gelijkaardig, waardoor ook hier één kalibratiecurve werd gehanteerd voor beide toestellen.

Analoog aan de vaststelling bij de OBS, is er ook hier een verschillende respons terug te vinden. Het verschil treedt vanaf een bepaalde (hier 82 dB) waarde van de gecorrigeerde ABS. Dit is gelijkaardig aan een eerdere meting in dit deel van de Westerschelde (Vandebroek *et al.*, 2017), waarbij gekozen werd voor een "geknikte" kalibratiecurve. In voorliggend rapport wordt een gelijkaardige werkwijze gevolgd: eerst wordt een kalibratiecurve opgesteld voor alle punten beneden 82 dB; vervolgens wordt een kalibratiecurve opgesteld voor alle punten boven 82 dB, waarbij de curve "geforceerd" wordt door de waarde uit de eerste stap voor 82 dB. Op deze manier sluiten beide curves aan elkaar aan. Dit levert volgende kalibratie voor de ABSsensoren (toegepast voor beide AquaDopp-toestellen):

- cABS \leq 82 dB: SSC [mg/l] = 1,99 x exp(cABS [dB] x 0,05)
- cABS > 82 dB: SSC [mg/l] = 128,2 x exp((cABS [dB] 82) x 0,24)

Figuur 16 geeft deze relatie weer. Daarnaast toont de figuur de aparte kalibratiecurves, alsook het effect wanneer deze buiten de voorgestelde range zouden worden toegepast: beide relaties zouden tot een aanzienlijke onderschatting van de sedimentconcentratie leiden. De combinatie van beide relaties leidt tot een goede overeenstemming, en deze werkwijze wordt dan ook aangehouden bij het omrekenen naar SSC van de cABS-waarden.



Figuur 16 – Kalibratie ABS uit AquaDopp

4.2.2 AWAC

Voor het opstellen van de kalibratiecurve voor de ABS uit de AWAC-toestellen, zijn geen pompstalen beschikbaar (zie § 3.3). Daardoor dient een alternatieve werkwijze gevolgd te worden, waarbij gebruik gemaakt wordt van uit de turbiditeitswaarden (OBS) afgeleide SSC. Daarnaast werden de meting niet simultaan uitgevoerd op dezelfde hoogte, waardoor volgende werkwijze toegepast wordt:

- 1. Bepalen van de momenten (5) waarop een profilering met het kalibratieframe werd uitgevoerd tijdens de meting
- 2. Bepalen van de gemiddelde ABS boven het kalibratieframe gedurende de 15 seconden voorafgaand aan de profilering
- 3. Bepalen van de SSC (via de turbiditeit⁵) tijdens de profilering op dezelfde hoogte als waar ABS informatie beschikbaar is uit de vorige stap (de afwijking in de tijd tussen beide metingen blijft beperkt tot maximaal 66")
- 4. Opstellen relatie tussen het cABS-signaal en de SSC afgeleid uit de turbiditeit (Figuur 17)

Door de eerder beperkte dataset, is er hier geen duidelijk onderscheid in de respons van ABS zichtbaar. Er wordt dan ook gekozen om slechts met één kalibratie voor de ABS-sensoren (toegepast voor beide AWAC-toestellen) te werken:

SSC [mg/l] = 0,11 x exp(cABS [dB] x 0,08)

Deze relatie wordt toegepast voor het omrekenen naar SSC van de cABS-waarden van de AWAC-toestellen.



Figuur 17 – Kalibratie ABS uit AWAC

⁵ Doordat de OBS "geel-onder" (op 60 cm) en "geel-boven" (op 30 cm van de onderkant van het kalibratieframe) op verschillende hoogtes de turbiditeit registreerden, is soms op eenzelfde moment informatie beschikbaar in 2 verschillen cellen van de AWAC.

4.3 Sedimenttransport

Tijdens de eerste kalibratiemeting (11/05/2021) werden in de nabijheid van de positie "geel" waterstalen genomen, maar werd ook het sedimenttransport gemeten met de Delftse fles. Met Delftse fles werd op een directe manier het sedimenttransport (hier op 50 cm boven de bodem) gemeten. Deze directe meting wordt vergeleken met de sedimenttransporten afgeleid uit de gemeten stroomsnelheid en de uit de akoestische backscatter afgeleide sedimentconcentratie. Dit kan worden gedaan voor de AquaDopp op frame geel, aangezien deze ook een signaal meet op 50 cm boven de bodem. Figuur 18 toont de beide sedimenttransporten: hieruit blijkt dat de transporten van eenzelfde grootteorde zijn, maar een aantal verschillen kennen. Zo lijkt het sedimenttransport op basis van de akoestische meting systematisch hoger te zijn dan het transport aan de hand van de Delftse fles. Dit kan verklaard worden doordat de Delftse fles in principe de fractie kleiner dan 63 μ m niet capteert, terwijl dit wel in het akoestisch backscatter-signaal geregistreerd wordt (lage cABS-waarden geven nog steeds aanleiding tot (lage) SSC-waarden, terwijl het zandtransport quasi nul is). De hogere transportwaarden bij de Delftse fles rond 11u en 12u (Figuur 18) kunnen te wijten zijn aan een slechte meting (e.g. bij de meting van 12u zat de kabel rond de fles), maar aangezien dit geen zekerheid is, werden de meetwaarden behouden in de grafiek.

Ondanks de verschillen in meettechniek en meetlocatie, vertonen de patronen een redelijke overeenkomst, wat vertrouwen geeft in de berekende transporten uit de akoestische meting.

Daarnaast bevestigen de metingen met de Delftse fles de hypothese (zie § 4.1 en 4.2) rond het verschil in sediment dat getransporteerd wordt: in de periode van een uur voor hoogwater blijken de verzamelde sedimentstalen een D50 te hebben van 80-130 μ m (i.e. zeer fijn zand), terwijl in de rest van de vloedfase de D50 kleiner is dan 60 μ m (silt, klei). Dit bevestigt de keuze om de kalibratiecurves op te delen over de getijcyclus.



Figuur 18 – Vergelijking sedimenttransport Delftse fles en AquaDopp en korrelgrootte uit Delftse fles

5 Resultaten langdurige metingen

In de volgende paragrafen worden de resultaten gepresenteerd van de verschillende toestellen die tijdens de meetcampagne werden ingezet. Aangezien alle technieken op een indirecte manier de sedimentconcentratie meten, werden de hier gepresenteerde waarden afgeleid na omrekening van het gemeten signaal (optische of akoestische backscatter). Combinatie van de sedimentconcentratie met de snelheid laat toe het sedimenttransport te bepalen.

5.1 Wind

Figuur 19 geeft het verloop van de windsnelheid en -richting weer te Hansweert. Over het grootste deel van de meetcampagne bleef de wind beperkt tot 3 à 4 Beaufort (34 - 79 dm/s), maar tijdens 2 deelperioden (rond 4 en 21 mei 2021) was er een krachtige wind met snelheden tot 180 dm/s (7 à 8 Beaufort). Bij het begin van de meetperiode kwam de wind hoofdzakelijk uit noordelijke richting. Deze draaide naar zuidelijke richting in het midden van de meetperiode (3-24 mei 2021), om nadien opnieuw naar noordelijke richting te draaien tegen het eind van de meetperiode.



Figuur 19 - Verloop windsnelheid en -richting ter hoogte van Hansweert

5.2 Waterstanden

Figuur 20 geeft het verloop van de waterstand te Hansweert en het getijverschil per getij (verschil tussen hoogwater en voorafgaand laagwater) weer. Over de periode 2011-2015 bedroeg het gemiddeld getijverschil te Hansweert 449 cm, terwijl dit bij springtij en doodtij respectievelijk 506 cm en 371 cm bedroeg (Hertoghs *et al.*, 2018). Tijdens de meetperiode werd ca. 3 springtij-doodtij-cycli bemeten. In het begin van de meetperiode deden zich enkele sterke springtijen voor (getijverschil van 568 cm), terwijl in de rest van de periode de variatie gelijkaardig is aan de gemiddelde variatie binnen een normale springtij-doodtij-cyclus.

Beide periodes met sterke zuidelijke wind vielen samen met een periode van doodtij (rond 4 en 21 mei 2021). Dit resulteerde in licht verhoogde waterstanden (t.o.v. astronomische voorspelling), maar de zuidelijke windrichting zorgt – bij gelijke windsterkte - voor een kleinere opzet (hier ~ 50 cm) dan een noordwestelijke windrichting. Tijdens de springtijen was het effect van de wind beperkt.



Figuur 20 – Verloop waterstanden en getijverschil te Hansweert
5.3 ADCP

De snelheden en de sedimentconcentratie (afgeleid uit de akoestische backscatter) werden gemeten door de AWAC (waterkolom) en de AquaDopp (nabij de bodem). De fysieke opstelling (zie § 3.2) op de meetframes en combinatie met de "blanking distance" van de toestellen, zorgt ervoor dat er een onbemeten zone ontstaat tussen de eerste cel van de (down-looking) AquaDopp en de eerste cel van de (up-looking) AWAC. Daarnaast is de ruimtelijke resolutie ("cell size") van beide toestellen verschillend: 10 cm bij de AquaDopp tegenover 50 cm bij de AWAC. Desalniettemin zijn de meetresultaten van beide toestellen samengesteld om informatie over quasi de volledige waterkolom te bekomen. Nabij de bodem (AquaDopp) en het wateroppervlak (AWAC) blijft er een onbemeten zone omwille van het side lobe effect (Nortek, 2017).

Voor het bepalen van het totale sedimenttransport werden de snelheid en de afgeleide sedimentconcentratie per cel vermenigvuldigd en geïntegreerd over de waterdiepte. Hiervoor werd gebruik gemaakt van de trapeziumregel. Nabij de bodem vond een extrapolatie plaats waarbij aangenomen werd dat het transport op de bodem 0 is. Nabij het wateroppervlak werd een extrapolatie uitgevoerd waarbij aangenomen werd dat het transport gelijk is aan het transport van de bovenste bemeten cel. Tijdens de verwerking bleek de sedimentconcentratie (afgeleid uit de ABS) in de onderste cel van de AWAC aanzienlijk hoger was dan de eerste cel van de AquaDopp (die meer dan een meter lager ligt in de waterkolom). Aangezien dit onlogisch is, werd de waarde in de eerste cel van de AWAC vervangen door een geïnterpoleerde waarde (tussen 2^e cel van de AWAC en de 1^e cel van de AWAC), waardoor het verticaal profiel samengesteld uit beide toestellen beter aansloot aan elkaar. Desalniettemin vertoont de overgang tussen beide toestellen nog afwijkingen ten opzichte van het verwachte verticale profiel.

5.3.1 Stroming

Bijlage 1Stroming en SSC frame "GEEL" en Bijlage 2Stroming en SSC frame "ORANJE" bevattende volledige resultaten van de gemeten stroming op beide locaties over de volledige meetperiode.

Locatie "geel", gelegen nabij de Molenplaat, kent een uitgesproken eb-dominant karakter op vlak van stromingen. De stroming tijdens de ebfase loopt hier op tot 1,5 m/s nabij het oppervlak, terwijl de vloedstroming, in het algemeen sterker dan de ebstroming, meestal beneden 1,0 m/s blijft. Voor deze locatie is ook duidelijk dat de initiële plaatsing niet goed uitgevoerd werd, wat tevens door een duikinspectie bevestigd werd. Het frame bevond zich tijdens de eerste 4 dagen in een gekantelde positie, wat aanleiding gaf tot foutieve metingen (Figuur 21 (boven)). Na het herplaatsen van het frame op 23 april 2021, tonen de resultaten wel het verwachte patroon en kunnen de resultaten gebruikt worden voor verdere analyse in Hoofdstuk 6.

Locatie "oranje", gelegen tussen het nevenvaarwater in het Middelgat en de linkeroever, kent meer klassiek patroon: bij springtij is de locatie vloed-dominant, terwijl bij gemiddeld en doodtij het verschil eerder beperkt is. Dit patroon werd reeds eerder teruggevonden bij andere langdurige metingen in het Middelgat (e.g. (Plancke *et al.*, 2008)). De stroomsnelheden zijn hier ook eerder beperkt, met maximale waarden rond 1,0 m/s blijft.

Hoewel de gemeten patronen gelijkenissen tonen met de gemodelleerde stroomsnelheden (Figuur 6), zijn er ook verschillen waar te nemen. Daar waar het model de dieptegemiddelde snelheid geeft, lijken de snelheden in de realiteit hoger te liggen dan in het model. Daarnaast gaf het model voor locatie "geel" een gelijkaardige maximale snelheid bij eb en bij vloed, terwijl uit de metingen eb-dominantie blijkt. Een verdere validatie van het model (met deze nieuwe metingen) is aan te bevelen. Proefstortingen Westerschelde - Deelrapport 5 – Stromings- en sedimenttransport metingen ter hoogte van de diepe put van Hansweert – proefstorting 2021



Figuur 21 – Verloop stroomsnelheid (boven), sedimentconcentratie (midden) en diepte-geïntegreerd sedimenttransport (onder) op positie "geel" voor de eerste week van de meetperiode

5.3.2 Sedimentconcentratie en transport

Bijlage 1 Stroming en SSC frame "GEEL" en Bijlage 2 Stroming en SSC frame "ORANJE" bevatten de volledige resultaten van de afgeleide sedimentconcentratie en berekende sedimenttransporten op beide locaties over de volledige meetperiode.

Op locatie "geel", gelegen nabij de Molenplaat, is het verschil in sedimentconcentratie het meest uitgesproken nabij de bodem (AquaDopp), met hogere waarden tijdens de ebfase (tot 150 mg/l) in vergelijking met de vloedfase (tot 80 mg/l). Dit manifesteert zich ook in de berekende totale transporten, die aanzienlijk hoger (factor 3) zijn bij eb (~ 1,2 kg/m/s) dan bij vloed (~ 0,4 kg/m/s). Dit verschil is zowel bij doodtij als bij springtij aanwezig, al komt het het sterkst tot uiting bij de sterkere getijden.

Voor locatie "oranje", gelegen tussen het nevenvaarwater in het Middelgat en de linkeroever, is het verschil in sedimentconcentratie gelijkaardig over de volledige waterkolom. Analoog aan de stromingen, is de sedimentconcentratie en het sedimenttransport bij springtij sterker bij vloed (~ 0,6 kg/m/s bij vloed vs. ~ 0,4 kg/m/s bij eb), terwijl bij doodtij de transporten bij eb en vloed gelijkaardig (~ 0,4 kg/m/s) zijn.

5.4 OBS

5.4.1 Sedimentconcentratie

Figuur 22 geeft het verloop van de afgeleide sedimentconcentratie weer tijdens de tweede week van de meetperiode. Voor zowel positie "geel" als "oranje", evenals voor de onderste en bovenste sensor, liggen de sedimentconcentratie tijdens maximum vloed aanzienlijk hoger dan tijdens de rest van de getijfase. Dit is toe te schrijven aan de keuze van de kalibratiestrategie, waarbij bij maximum vloed een andere relatie wordt toegepast. Deze keuze kan in vraag gesteld worden: tijdens de kalibratie bleek dit de beste overeenstemming te geven met de sedimentconcentratie in de pompstalen; echter uit de resultaten van de ADCP bleek dat de verwachte vloed-dominantie zich niet manifesteerde op de beide meetlocaties van de langdurige campagne. In de analyse zal hier dieper worden op ingegaan.



Figuur 22 – Verloop sedimentconcentratie voor frame "geel" (boven) en "oranje" (onder) tijdens de 2^e week van de meetperiode

5.4.2 Verloop op het einde van de meetcampagne

Naast de complexiteit van de kalibratie, bleek dat de sensoren op het einde van de langdurige meetcampagne een verloop kenden in het turbiditeitssignaal en dus ook in de SSC-waarden (Figuur 23). Dergelijk verloop heeft zich ook al tijdens andere meetcampagnes voorgedaan, waardoor de metingen onbruikbaar zijn. De oorzaak van dit verloop is de begroeiing (pokken, algen) op de sensoren, die ervoor zorgen dat het optische signaal totaal verstoord wordt. Ook bij deze meetcampagne bleek dit de oorzaak te zijn: ondanks het gebruik van de wisser, bleken de sensoren na 8 weken aangepast door voornamelijk begroeiing van pokken (Figuur 24). Bij bepaalde sensoren (geel boven) deed zich dit meer voor dan bij andere, maar aangezien het verloop overal zichtbaar is, worden de metingen vanaf 1 juni 2021 van de optische sensoren niet verder gebruikt.





Figuur 23 – Verloop sedimentconcentratie voor frame "geel" (boven) en "oranje" (onder) tijdens de voorlaatste week van de meetperiode





Figuur 24 – Turbiditeitssensoren frame "geel" na ophalen meetframes

6 Analyse effect stortingen

Het doel van de langdurige meetcampagne is na te gaan of er een toename van het sedimenttransport is ten gevolge van de stortingen in de stortlocatie diepe put van Hansweert. De locaties waar de meetframe geplaatst werden, liggen aan de ingang van het Middelgat en laten toe het sedimenttransport naar de nevengeul in beeld te brengen. In de volgende paragrafen zal het sedimenttransport ter hoogte van beide meetlocaties geanalyseerd worden, waarbij zowel gebruik gemaakt wordt van de akoestische en optische meettechnieken.

Om de vooropgestelde analyse uit te kunnen voeren, werd de langdurige meetperiode opgedeeld in 4 deelperiodes. Initieel was het de bedoeling een periode van 2 weken voor aanvang van de stortingen te vergelijken met een periode van 4 weken tijdens de stortingen. Echter, in de praktijk bleek na 3 weken van stortingen er een week te zijn te zijn zonder stortingen. Vandaar dat er geopteerd wordt voor een opdeling in 4 deelperiodes (Tabel 5). Voor het frame op positie "geel" vangt de eerste periode (voor aanvang van de storting) aan op 24 april 2021 (in tegenstelling tot "oranje" dat op 20 april start), dit omwille van het feit dat het frame gekanteld was tijdens de eerste 4 dagen.

Naast de opdeling in de deelperiodes met en zonder stortingen, spelen ook de hydrodynamische condities een belangrijke rol in de onderlinge vergelijkbaarheid. Zoals eerder aangetoond, zullen de snelheden, de sedimentconcentraties en zodanig ook de sedimenttransporten sterker zijn bij springtij dan bij doodtij. Dit aspect wordt dan ook expliciet meegenomen in de analyse, waarbij gekozen wordt om binnen de deelperiodes louter de gemiddelde getijcondities te beschouwen. De selectie gebeurt aan de hand van de getijfactor⁶, waarbij alle getijden met een getijfactor tussen 0,9 en 1,1 weerhouden werden. Deze keuze laat toe een voldoende aantal getijden te selecteren voor de analyse. De onderlinge vergelijking van de verschillende periodes, gebeurt aan de hand van een ensemble analyse. Hierbij wordt het sedimenttransport van de weerhouden getijden uitgedrukt in ten opzichte van het moment van hoogwater. De verschillende verlopen worden vervolgens teruggebracht tot een karakteristiek verloop, door per tijdstap (10') de mediaan (50^e percentiel) van het sedimenttransport van de verschillende weerhouden getijden te berekenen. Dit verloop kan tenslotte vergeleken worden voor de verschillende deelperiodes.

ID	Beschrijving	Aanvang	Einde	Aantal getijden
1	Voor aanvang stortingen Frame "geel" werd herplaatst (gekanteld)	20/04/2021 24/04/2021	04/05/2021	10 10
2	Eerste periode met stortingen	04/05/2021	24/05/2021	25
3	Periode zonder stortingen	24/05/2021	31/05/2021	3
4	Tweede periode met stortingen	31/05/2021	10/06/2021	14

Tabel 5 – Overzicht periodes voor de analyse van het sedimenttransport

⁶ Dit is de verhouding tussen getijverschil voor een bepaald getij tot het gemiddeld getijverschil uit de periode 2011-2015.

Proefstortingen Westerschelde - Deelrapport 5 – Stromings- en sedimenttransport metingen ter hoogte van de diepe put van Hansweert – proefstorting 2021

6.1 Positie "geel"

6.1.1 Akoestische backscatter

Figuur 25 geeft het karakteristieke verloop van het sedimenttransport weer voor de verschillende deelperiodes. Het verschil tussen de verschillende deelperiodes is minimaal. Voor de vloedfase valt het karakteristieke verloop quasi samen voor de 4 periodes. De 2^e (met stortingen) en 3^e (zonder stortingen) deelperiode geven een licht verhoogd sedimenttransport tijdens de ebfase (HW + 180' – HW + 240'). Het is moeilijk vast te stellen of deze verhoging toe te schrijven is aan het transport van de gestorte specie of niet. Tevens kan opgemerkt te worden dat in de periode 4 tot 24 mei 2021 meer getijden weerhouden werden in de analyse dan in bv. de eerste periode (25 vs. 10 getijden), wat aanleiding kan geven tot verschillen in het karakteristiek verloop (meer variatie bij meer getijden).



Figuur 25 – Karakteristiek verloop (ensemble-analyse) van het diepte-geïntegreerd sedimenttransport voor verschillende periodes op positie "geel" (volle lijn geeft verloop van betreffende periode weer, stippellijnen voor overige periodes)

6.1.2 Optische backscatter

In § 5.4.2 werd reeds het probleem met het verloop van de sedimentconcentratie op het einde van de meetcampagne aangehaald. Deze resultaten zijn onbruikbaar, waardoor de analyse zich beperkt tot de eerste 2 deelperiodes. Het karakteristieke verloop van de sedimentconcentratie voor de eerste 2 deelperiodes is gegeven in Figuur 26 en Figuur 54. In tegenstelling tot de sedimenttransport afgeleid uit de akoestische metingen, treedt hier wel een groot verschil op tussen beide periodes. Opvallend is dat de sedimentconcentratie in periode met stortingen aanzienlijk lager ligt dan in de periode zonder stortingen. Dit is tegen de verwachting en ook verschillende van de akoestische meetresultaten. Een potentiële verklaring kan liggen in de gehanteerde kalibratiecurve voor de OBS-sensoren. Eerder werd reeds aangehaald dat, ondanks het feit dat de dubbele kalibratiecurve de beste overeenkomst geeft voor het moment van de kalibratiemeting, dit niet noodzakelijk het beste resultaat geeft voor de langdurige metingen.



Figuur 26 – Karakteristiek verloop (ensemble-analyse) van de sedimentconcentratie (onderste OBS) op positie "geel" Periode zonder stortingen (boven – blauw) en periode met stortingen (onder – oranje) Grijze lijnen geeft verloop over individuele getijcyclus weer, stippellijn geeft karakteristiek verloop weer van andere periode Proefstortingen Westerschelde - Deelrapport 5 – Stromings- en sedimenttransport metingen ter hoogte van de diepe put van Hansweert – proefstorting 2021

Om de invloed te onderzoeken, werd eveneens een alternatieve kalibratiecurve (één regressie voor de volledige dataset, dus zonder onderscheid tijdens de getijcyclus) toegepast. Bij deze alternatieve benadering dient opgemerkt te worden dat de kalibratiecurve minder (in vergelijking met de subset voor maximum vloed) bepaald wordt door een beperkt aantal punten met hogere SSC-waarden. Deze kalibratiecurve kent dan ook een flauwere helling t.o.v. maximum vloed subset, maar is wel steiler t.o.v. de initiële vloedfase subset. Er kan vastgesteld worden dat het gebruik van één kalibratiecurve voor de lage turbiditeitswaarden aanleiding geeft tot negatieve SSC-waarden (Figuur 27). Deze kalibratiecurve geeft eveneens aanleiding tot een sterk verschil tussen beide periodes (Figuur 27). De resultaten van de optische metingen dienen met de nodige voorzichtigheid gebruikt te worden, en zullen bij de interpretatie verder niet gebruikt worden.



Figuur 27 – Invloed kalibratie op karakteristiek verloop van de sedimentconcentratie (onderste OBS) op positie "geel" Periode zonder stortingen (boven – blauw) en periode met stortingen (onder – oranje) Grijze lijnen geeft verloop over individuele getijcyclus weer, stippellijn geeft karakteristiek verloop weer van andere periode

6.2 Positie "oranje"

6.2.1 Akoestische backscatter

Figuur 28 geeft het karakteristieke verloop van het sedimenttransport weer voor de verschillende deelperiodes. Het verschil tussen de verschillende deelperiodes is minimaal. Voor de ebfase valt het karakteristieke verloop quasi samen voor de 4 periodes. De 2^e (met stortingen) en 3^e (zonder stortingen) deelperiode geven een licht verhoogd sedimenttransport tijdens de vloedfase (rond HW – 60'). Een soortgelijk verschil werd vastgesteld voor positie "geel", weliswaar in de ebfase. Ook hier is het moeilijk vast te stellen of deze verhoging toe te schrijven is aan het transport van de gestorte specie of niet.

6.2.2 Optische backscatter

Volledigheidshalve wordt het karakteristieke verloop van de sedimentconcentratie voor de eerste 2 deelperiodes is gegeven in Figuur 29 en Figuur 55. Zoals in § 6.1.2 reeds beschreven, zijn deze resultaten onbruikbaar. Er wordt dan ook niet verder ingegaan op deze resultaten.



Figuur 28 – Karakteristiek verloop (ensemble-analyse) van het diepte-geïntegreerd sedimenttransport voor verschillende periodes op positie "oranje" (volle lijn geeft verloop van betreffende periode weer, stippellijnen voor overige periodes)





6.3 Inschatting te verwachten verandering sedimenttransport

Om een inschatting te maken van de grootteorde van de wijziging in sedimenttransport ten gevolge van de verspreiding van de gestorte specie, kan het sedimenttransport berekend worden nodig voor de vastgestelde verliezen van de gestorte specie. Dergelijke inschatting gaat gepaard met een aantal aannames, maar biedt wel de mogelijkheid om de verwachte toename in sedimenttransport in te schatten.

Uit de MBES-peilingen is vastgesteld dat tijdens de proefstorting in de DPHW ca. 60% van het gestorte sedimentvolume teruggevonden wordt binnen de controlepolygoon (IMDC, 2021). Dit betekent dat tussen de aanvang van de stortingen (T52 dd. 28 april 2021) en de eerste peiling na het beëindigen van de proefstorting (T59 dd. 11 juli 2021) ca. 400000 m³ sediment is getransporteerd. Tussen beide peilingen zitten 142 getijcycli, wat resulteert – in de veronderstelling dat het transport geleidelijk over de periode gebeurt – in een gemiddeld transport van ca. 7000 ton/getij.

Het transport van het gestorte sediment vindt plaats in verschillende richtingen. Op Figuur 3 is te zien dat er sedimentatie optreedt zowel langs de op- als afwaarts zijde van de stortzone. In de veronderstelling dat het transport gelijkaardig is in beide richtingen, zal er ca. 3500 ton/getij in afwaartse richting getransporteerd worden. Aangezien het sediment zowel richting het Middelgat als de Overloop van Hansweert kan getransporteerd worden, kan een ruwe inschatting gemaakt worden dat ca. 1750 ton/getij richting het Middelgat wordt getransporteerd. Opgemerkt moet worden dat dit een ruwe inschatting betreft, gericht op het bepalen van de grootteorde van de verandering in sedimenttransport die hiermee overeenstemt. Het werkelijke transport richting Middelgat ligt waarschijnlijk lager aangezien de helicoïdale stroming in de bocht het sediment naar de binnenkant van de bocht (i.e. Overloop van Hansweert) transporteert (Deltares, 2021).

Uit eerdere metingen is gebleken dat maar een klein (< 10%) aandeel van het sediment als suspensie transport plaatsvindt. Hieruit kunnen we veronderstellen dat het sedimenttransport grotendeels in de onderste meter nabij de plaatsvindt. Daarnaast zal het transport naar het Middelgat over de volledige breedte (ca. 1500 m) van de geul kunnen optreden, wat resulteert in een potentieel transport van ca. 1,18 ton/getij/m.

Tenslotte dient het transport omgerekend te worden naar kg/m/s. Hiervoor nemen we aan dat het afwaartsgericht transport gespreid over de ebfase plaatsvindt, met uitzondering van de momenten rond kentering. Dit komt neer op een ebfase met transport van 5u. Omgerekend resulteert dit in een potentieel extra sediment van 0,065 kg/s/m om de vastgestelde verplaatsing van het gestorte sediment te realiseren, mits bovenstaande aannames.

In vergelijking met de gemeten sedimenttransport, zou dit een toename van 10% (positie "geel") tot 20% (positie "oranje") bij gemiddeld getijcondities. Echter, uit de metingen is gebleken dat de variatie in sedimenttransport tussen de individuele getijcycli bij gemiddeld getij al grootteorde 50% is. Daarnaast zal deze variatie nog groter zijn wanneer men een volledige springtij-doodtij-cyclus beschouwd. Daarnaast moet opgemerkt worden dat ook bij de berekening van het gemeten sedimenttransporten onzekerheden optreden. De belangrijkste factor hierbij is de omrekening van het indirecte sedimentconcentratie (i.e. gemeten ABS) naar de sedimentconcentratie (mg/l). Ook hier treedt een onzekerheid van ca. 50% op, wat ook terugkomt in de vergelijking met de directe meting met de Delftse fles (Figuur 18). Dit alles zorgt ervoor dat de te verwachten veranderingen in sedimenttransport door de stortingen (bij een proefstortingen van 1 Mm³) klein zijn in vergelijking met de natuurlijke variatie in sedimenttransport én de onzekerheden horende bij het meten van het sedimenttransport. Ook met betrekking tot de wijziging in sedimenttransport naar het Middelgat kan gesteld worden dat de bijdrage van de proefstorting klein is ten opzichte van het natuurlijke transport.

7 Conclusies en aanbevelingen

7.1 Conclusies

Ten behoeve van de stortstrategie van onderhoudsbaggerspecie in de Westerschelde werden proefstortingen uitgevoerd in een aantal potentiële nieuwe stortzones. Eén van deze stortzones bevindt zich ter hoogte van de diepe put van Hansweert. Omwille van de grote diepe heeft deze locatie de potentie veel sediment te bergen. Uit eerdere stortproeven (2016-2017) is gebleken dat de initiële (i.e. tijdens en in de eerste weken na de stortingen) stabiliteit van de gestorte specie klein is (50-60%). Uit de MBES-peilingen en eerdere meetcampagnes is echter moeilijk af te leiden waar deze specie naartoe getransporteerd wordt. Daarom werd een aanvullende meetcampagne opgezet, waarbij gedurende 6 weken (2 weken voor storten, 4 weken tijdens storten) met behulp van 2 meetframes de stroming en het sedimenttransport werd gemeten. De focus van deze meetcampagne lag op het in beeld brengen van het sedimenttransport naar het Middelgat. De positie van de meetframes werd gekozen rekening houdend met lokale morfodynamiek (migratie bodemvormen) en nautische randvoorwaarden (buiten nevenvaarwater). De plaatsing van de frames bleek complex, waarbij één van de frames herplaatst moest worden omdat dit bij de eerste plaatsing gekanteld bleek.

Aangezien het meten van sedimenttransport gebeurde met indirecte meettechnieken (optische en akoestische backscatter), werden 2 kalibratiemetingen uitgevoerd waarbij pompstalen genomen werden om een relatie op te stellen tussen het gemeten signaal en de sedimentconcentratie. Voor de akoestische sensoren bleek, net als bij eerdere campagnes (Vandebroek *et al.*, 2017), een geknikte exponentiële relatie de beste overeenkomst te geven. Hoewel de kalibratie plaatsvond voor beide type toestellen die aanwezig waren op het meetframe (AquaDopp (onderste deel waterkolom) en AWAC (bovenste deel waterkolom)), bleek de aansluiting van beide profielen niet perfect mogelijk. Om de aansluiting beter te laten verlopen werd de eerste cel van de AWAC verwijderd om alzo een logischer verticaal profiel te krijgen.

Voor de optische sensoren bleek een verschil in respons aanwezig te zijn binnen één getijcyclus. Een verschillende relatie werd opgemaakt voor enerzijds de periode van maximum vloed en anderzijds de rest van de getijcyclus. De achterliggende verklaring is te vinden in het verschil in sediment dat in deze periodes getransporteerd wordt: bij maximum vloed is het vooral zand dat getransporteerd wordt, terwijl in de rest van de getijcyclus ook slib en silt getransporteerd wordt. Deze sedimenten resulteren in een andere terugkaatsing van het optische signaal, wat de verschillende relaties verklaard. Ook dit werd reeds eerder vastgesteld bij sedimenttransportmetingen in de Westerschelde (Plancke & Paridaens, 2012). Bij de doorvertaling van deze resultaten naar de volledige meetperiode, bleek de keuze van de tijdsafhankelijke kalibratie aanleiding te geven tot grote verschillen over de getijcyclus. Het toepassen van één relatie bleek een verslechtering op te leveren, met negatieve (i.e. onrealistische) waarden in bepaalde periodes. Een bijkomend aandachtspunt bij de optische sensoren bleek de aangroei van algen in het laatste deel van de meetcampagne. De resultaten van de sensoren in de laatste weken zijn hierdoor niet bruikbaar voor de analyse. Gelet op deze moeilijkheden is dan ook gekozen om de analyse verder uit te voeren gebruik maken van de akoestische metingen.

De metingen van de stroomsnelheden en de (afgeleide) sedimentconcentratie laten toe het sedimenttransport te berekenen. Aan de hand van een ensemble-analyse is nagegaan of het sedimenttransport verschilt in de periode zonder en met stortingen. Aangezien er tijdens de uitvoering van de stortingen gedurende 1 week niet gestort werden, zijn 4 periodes beschikbaar voor de analyse. Aangezien er ook variatie in het sedimenttransport optreedt omwille van de getijden, is ervoor geopteerd de analyse uit te voeren voor de gemiddelde getijden (getijfactor tussen 0,9 en 1,1).

Wanneer de eerste periode met stortingen vergeleken wordt met de periode voor aanvang de stortingen, is er voor beide meetlocaties een (lichte) toename in het sedimenttransport waar te nemen. Voor positie "geel" treedt de toename op in de ebfase, terwijl voor positie "oranje" de toename eerder in de vloedfase is te zien. Wanneer de tweede periode met stortingen vergeleken wordt met de periode voor aanvang de stortingen, is er voor meetlocatie "oranje" een (lichte) afname in het sedimenttransport waar te nemen, terwijl positie "geel" quasi gelijk is in beide periodes.

Om de potentiële verschillen in te schatten is eveneens een benaderende berekening gemaakt van het effect op het sedimenttransport dat verwacht kan worden bij de vastgestelde stabiliteit van de gestorte specie uit de MBES-peilingen. Uit de analyse blijkt dat de variatie in het sedimenttransport tussen enerzijds individuele getijcycli bij gemiddeld getij, de variatie over een springtij-doodtij-cyclus en anderzijds de onzekerheden in de berekening van het gemeten sedimenttransporten, een factor 10 groter zijn dan de te verwachten veranderingen in sedimenttransport door de stortingen (bij een proefstortingen van 1 Mm³). Ook met betrekking tot de wijziging in sedimenttransport naar het Middelgat kan gesteld worden dat de bijdrage van de proefstorting klein is ten opzichte van het natuurlijke transport en de variatie hierin, en hierdoor niet kan vastgesteld worden in de metingen.

7.2 Aanbevelingen

Uit de kalibratiemetingen (dag 2) is het belang gebleken van de inzet van extra toestellen (e.g. LISST-100X) die toelaten eventuele variatie in sedimentsamenstelling te capteren. Uit deze, maar ook eerdere campagnes, is gebleken dat de korrelgrootte van het getransporteerde sediment kan variëren binnen één getijcyclus. Gelet op de verschillende respons van vooral de optische maar ook de akoestische sensoren op verschillende sedimenten (zand, silt, slib, vlokken) blijft dit een belangrijk aandachtspunt bij het uitvoeren van sedimenttransport-metingen in het Schelde-estuarium.

Bij de verwerking van de kalibratiecampagnes is het belang van de exacte overeenstemming in tijd en ruimte tussen de indirecte metingen en de staalname cruciaal gebleken. Het nemen van stalen "nabij" (i.e. 50 à 100 m vandaan) de meetframes zorgde voor onzekerheden waardoor een goede kalibratie niet mogelijk bleek met deze stalen en enkele een validatie mogelijk bleek met de directe sedimenttransportmetingen. Het verdient dan de aanbeveling de kalibratiemetingen uit te voeren met behulp van het kalibratieframe waarbij de toestellen in quasi de zelfde plaats gepositioneerd zijn als de staalname met behulp van de pomp. Uit de verwerking van optische sensoren is gebleken dat het signaal tussen de verschillende toestellen varieerde, wat te wijten kan zijn aan (1) ruimtelijke verschillen in sedimentconcentratie op de ruimteschaal van het frame of (2) verschillende respons van de turbiditeitsensoren, ondanks voorafgaandelijke kalibratie op NTU.

Aangezien deze stortlocatie in de nieuwe stortstrategie ingezet wordt, verdient het de aanbeveling de verspreiding van de gestorte specie op te volgen met behulp van MBES-peilingen. Voor de verspreiding van het gestorte sediment is de inschatting dat een half-jaarlijkse peiling (grotere polygoon) volstaat. Om de stabiliteit van de gestorte specie op te volgen, kunnen wel frequentere (e.g. 2-maandelijks) peilingen uitgevoerd worden over een kleinere oppervlakte (~ stortzone).

8 Referenties

Arcadis. (2015). PASSENDE BEOORDELING EN NATUURTOETS GEBRUIK PROEFSTORTLO CATIES VAARGEULONDERHOUD WESTERSCHELDE. 148 pp.

Deltares. (2021). Effecten van storten in diepe putten van de Westerschelde - Synthese van proefstortingen en modelanalyses. 43 pp.

Engelund, F.; Hansen, E. (1967). A monograph on sediment transport in alluvial streamsTechnical.: Copenhagen K.

Fremau, M. (2019). Kalibratie van een optisch indirect meettoestel voor het meten van sedimenttransport in een fysisch model. Universiteit Antwerpen. 56 pp.

Hertoghs, R.; Vereecken, H.; Boeckx, L.; Deschamps, M.; Mostaert, F. (2018). Vijfjarig overzicht van detijwaarnemingen in het Zeescheldebekken: tijdvak 2011-2015. Versie 4.0. WL Rapporten, 16_035_1.WaterbouwkundigLaboratorium:Antwerpen.Availablehttp://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=295302

Ides, S.; Plancke, Y.; De Mulder, T.; Mostaert, F. (2007). Alternatieve stortstrategie Westerschelde: verslag 13u meetcampagnes Walsoorden. *WL Rapporten*, 754/02B. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

IMDC. (2019). Monitoringprogramma Flexibel Storten, Voortgangsrapportage 2016-2017: Data- en analyserapport: Antweren. 347 pp.

IMDC. (2020). Report on CFD calculations disposal plumes

IMDC. (2021). Flexibel Storten Periode 3 - 2020-2021: Maandrapport juni-juli 2021

Landers, M.N.; Straub, T.D.; Wood, M.S.; Domanski, M.M. (2016). Sediment Acoustic Index Method for Computing Continuous Suspended-Sediment Concentrations. *U.S. Geol. Surv. Tech. Methods, B. 3, Chap. C5.* ISBN 9781411340619. 63 pp. Available at: http://pubs.usgs.gov/tm/03/c05/tm3c5.pdf

Lohrmann, A. (2001). Monitoring Sediment Concentration with acoustic backscattering instruments

Nortek. (2017). Nortek Manuals - The Comprehensive Manual. 153 pp.

Plancke, Y.; Bastiaensen, E. (2021). Proefstortingen Westerschelde: deelrapport 6. Analyse beunstalen bij de
uitvoering van de stortproeven 2021 in de Westerschelde. Versie 2.0. WL Rapporten, 19_079_6.
Waterbouwkundig
Laboratorium:Antwerpen.Available
at:
http://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=348394

Plancke, Y.; Claeys, S.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2017). Overleg Flexibel Storten: deelrapport 23. Stroming-
en sedimentmeting ter hoogte van de diepe put van Hansweert. Versie 3.0. WL Rapporten, 00_031_23.
WaterbouwkundigLaboratorium:Antwerpen.Availableat:http://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=289694Antwerpen.AvailableAttack

Plancke, Y.; Ides, S.; Peters, J.J. (2008). Determinatieonderzoek plaatrandstortingen: deelrapport 1. Historische morfologische analyse en interpretatie terreinmetingen. *WL Rapporten,* 791/06. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Plancke, Y.; Meire, D.; Mostaert, F. (2019). Overleg flexibel storten: deelrapport 31. Stromings- ensedimenttransport metingen ter hoogte van de diepe put van Hansweert. Versie 3.0. WL Rapporten,00_031_31.WaterbouwkundigLaboratorium:Antwerpen.Availableat:http://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=317491

Plancke, Y.; Meire, D.; Mostaert, F. (2020). Proefstortingen Westerschelde: deelrapport 1. Stromings- en sedimenttransport metingen ter hoogte van de diepe put van Hansweert – situatie TO. Versie 3.0. *WL Rapporten,* 19_079_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. Available at: http://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=328257

Plancke, Y.; Paridaens, K. (2012). Comparison of measurement techniques for monitoring sediment transport under field conditions, in the Scheldt estuary, *in*: (2012). *Hydraulic Measurements and Experimental Methods 2012 Conference (HMEM 2012), Snowbird, Utah, August 12-15, 2012.* American Society of Civil Engineers (ASCE). pp.[1-8]

Schrijver, M. (2021). Monitoring meergeulensysteem Westerschelde - Toetsing nevengeulen op criterium watervolume. 104 pp.

Sheng, J.; Hay, A.E. (1988). An examination of the spherical scatterer approximation in aqueous suspensions of sand. *J. Acoust. Soc. Am.* 83(2): 598–610. doi:10.1121/1.396153

UNESCO. (1983). Algorithms for computation of fundamental properties of seawater (Unesco technical papers in marine science No. 44)

Urick, R.J. (1983). Principles of Underwater Sound. 3rd ed. Peninsula Pub. ISBN 9780932146625. 444 pp.

Vandebroek, E.; Claeys, S.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2017). Agenda for the future – Mesoscale hydro- and sediment dynamics in the Schelde estuary: Sub report 10. Factual data report for measurements at Drempel van Hansweert in April/May 2016. Version 3.. *FHR reports,* 14_024_10. Antea Group: Antwerp. Available at: http://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=289804

Vos, G.; Plancke, Y.; Mostaert, F. (2012). Overleg flexibel storten: opvolgingsrapport 1 - Periode februari - juni 2010. *WL Rapporten*, 00_031. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Bijlage 1 Stroming en SSC frame "GEEL"



Figuur 30 – Verloop stroomsnelheid (boven), sedimentconcentratie (midden) en diepte-geïntegreerd sedimenttransport (onder) op positie "geel" voor de 1^e week van de meetperiode



Figuur 31 – Verloop stroomsnelheid (boven), sedimentconcentratie (midden) en diepte-geïntegreerd sedimenttransport (onder) op positie "geel" voor de 2^e week van de meetperiode



Figuur 32 – Verloop stroomsnelheid (boven), sedimentconcentratie (midden) en diepte-geïntegreerd sedimenttransport (onder) op positie "geel" voor de 3e week van de meetperiode



Figuur 33 – Verloop stroomsnelheid (boven), sedimentconcentratie (midden) en diepte-geïntegreerd sedimenttransport (onder) op positie "geel" voor de 4^e week van de meetperiode



Figuur 34 – Verloop stroomsnelheid (boven), sedimentconcentratie (midden) en diepte-geïntegreerd sedimenttransport (onder) op positie "geel" voor de 5e week van de meetperiode



Figuur 35 – Verloop stroomsnelheid (boven), sedimentconcentratie (midden) en diepte-geïntegreerd sedimenttransport (onder) op positie "geel" voor de 6e week van de meetperiode

05/28

05/27

j 0.3

0^(**) 05/24

05/25

05/26

05/29

05/30

0.4

0.2

0

05/31



Figuur 36 – Verloop stroomsnelheid (boven), sedimentconcentratie (midden) en diepte-geïntegreerd sedimenttransport (onder) op positie "geel" voor de 7e week van de meetperiode



Figuur 37 – Verloop stroomsnelheid (boven), sedimentconcentratie (midden) en diepte-geïntegreerd sedimenttransport (onder) op positie "geel" voor de 8e week van de meetperiode

Proefstortingen Westerschelde - Deelrapport 5 – Stromings- en sedimenttransport metingen ter hoogte van de diepe put van Hansweert – proefstorting 2021

Bijlage 2 Stroming en SSC frame "ORANJE"



Figuur 38 – Verloop stroomsnelheid (boven), sedimentconcentratie (midden) en diepte-geïntegreerd sedimenttransport (onder) op positie "oranje" voor de 1^e week van de meetperiode



Figuur 39 – Verloop stroomsnelheid (boven), sedimentconcentratie (midden) en diepte-geïntegreerd sedimenttransport (onder) op positie "oranje" voor de 2^e week van de meetperiode



Figuur 40 – Verloop stroomsnelheid (boven), sedimentconcentratie (midden) en diepte-geïntegreerd sedimenttransport (onder) op positie "oranje" voor de 3^e week van de meetperiode



Figuur 41 – Verloop stroomsnelheid (boven), sedimentconcentratie (midden) en diepte-geïntegreerd sedimenttransport (onder) op positie "oranje" voor de 4^e week van de meetperiode



Figuur 42 – Verloop stroomsnelheid (boven), sedimentconcentratie (midden) en diepte-geïntegreerd sedimenttransport (onder) op positie "oranje" voor de 5^e week van de meetperiode





Figuur 43 – Verloop stroomsnelheid (boven), sedimentconcentratie (midden) en diepte-geïntegreerd sedimenttransport (onder) op positie "oranje" voor de 6^e week van de meetperiode



Figuur 44 – Verloop stroomsnelheid (boven), sedimentconcentratie (midden) en diepte-geïntegreerd sedimenttransport (onder) op positie "oranje" voor de 7^e week van de meetperiode



Figuur 45 – Verloop stroomsnelheid (boven), sedimentconcentratie (midden) en diepte-geïntegreerd sedimenttransport (onder) op positie "oranje" voor de 8^e week van de meetperiode

Bijlage 3 SSC obv. optische backscatter















Figuur 49 – Verloop sedimentconcentratie voor frame "geel" (boven) en "oranje" (onder) voor de 4^e week van de meetperiode


















Bijlage 4 Karakteristiek verloop SSC obv. OBS











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