



Vlaanderen
is wetenschap

12_160_1
WL rapporten

Studie naar meettechnieken voor het onderzoeken van de opbouw van sliblagen in het Deurganckdok

Deelrapport 1
Bundeling van de belangrijkste resultaten uit 3 masterproeven
uitgevoerd op de Universiteit Antwerpen

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

Studie naar meettechnieken voor het onderzoeken van de opbouw van sliblagen in het Deurganckdok

Deelrapport 1 – Bundeling van de belangrijkste resultaten uit 3 masterproeven uitgevoerd op de Universiteit Antwerpen

Plancke, Y.; Meire, D.; Mostaert, F.

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 2018
D/2018/3241/238

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Plancke, Y.; Meire, D.; Mostaert, F. (2018). Studie naar meettechnieken voor het onderzoeken van de opbouw van sliblagen in het Deurganckdok: Deelrapport 1 – Bundeling van de belangrijkste resultaten uit 3 masterproeven uitgevoerd op de Universiteit Antwerpen. Versie 3.0. WL Rapporten, 12_160_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

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

Documentidentificatie

Opdrachtgever:	Waterbouwkundig Laboratorium	Ref.:	WL2018R12_160_1
Keywords (3-5):	Slib, haven van Antwerpen, meettechnieken, nautische bodem		
Tekst (p.):	63	Bijlagen (p.):	7
Vertrouwelijk:	☒ Nee	☒ Online beschikbaar	

Auteur(s)	Plancke, Y.
-----------	-------------

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Meire, D.	
Projectleider:	Plancke, Y.	

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Mostaert, F.	
-----------------	--------------	--



Abstract

Binnen het gebied van de haven van Antwerpen worden quasi continu onderhoudsbaggerwerken uitgevoerd om de gewenste diepgang in de vaargeul en langs terminals te kunnen garanderen. Deze werken vinden hoofdzakelijk plaats in de Schelde, maar ook achter de sluizen vinden regelmatig baggerwerken plaats. Sinds de opening van het Deurganckdok in 2005 vormt de afzetting en de ontwikkelingen in de karakteristieken van het afgezette slib ook hier een aandachtspunt. Om een beter inzicht te krijgen in deze problematiek en met name de optimale meettechnieken, werden door de Universiteit van Antwerpen verschillende masterproeven uitgevoerd, in samenwerking met het Havenbedrijf Antwerpen NV en het Waterbouwkundig Laboratorium. Voorliggend rapport bundelt de resultaten van 3 masterproeven die in de afgelopen jaren succesvol werden voltooid.

De masterproeven hadden allen tot doelstelling een aantal meettechnieken, die in situ sediment-eigenschappen karakteriseren (in casu reologie, densiteit), te verkennen en te vergelijken. Hierbij is gekozen om de vergelijking uit te voeren op slib uit het Deurganckdok, zowel in gecontroleerde testopstellingen als in situ in het dok, opdat eveneens nieuwe inzichten konden opgedaan worden inzake de opbouw van slib in dit getijdendok in de haven van Antwerpen.

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de tabellen.....	VII
Lijst van de figuren	VIII
Dankwoord	1
1 Inleiding	2
1.1 Situering.....	2
1.2 Probleemstelling.....	2
1.3 Doelstelling	3
2 Methodologie	4
2.1 Meetlocaties	4
2.1.1 Proefopstelling “buispaal” Zeebrugge.....	4
2.1.2 Proefopstelling “sedimenttesttank” (STT).....	5
2.1.3 Deurganckdok.....	6
2.2 Meettechnieken	7
2.2.1 GraviProbe	7
2.2.2 Rheotune	8
2.2.3 Admodus USP	8
2.2.4 Beeker-sampler	9
2.2.5 Laboratorium analyses	10
2.2.6 Single beam echo sounder (SBES)	11
3 Testopstelling Zeebrugge	13
3.1 Opzet van de metingen	13
3.2 Resultaten.....	14
3.2.1 Experimenten zonder getij	15
3.2.2 Experimenten met getij.....	17
4 Testopstelling STT	19
4.1 Opzet van de metingen	19
4.2 Resultaten.....	19
4.2.1 Admodus USP	19
4.2.2 Rheotune	22

5	Deurganckdok.....	25
5.1	Opzet van de metingen	25
5.1.1	Temporele variatie op de korte en middellange termijn (2013)	25
5.1.2	Temporele variatie op de korte en middellange termijn (2015-2016).....	26
5.1.3	Spatiale variatie op één moment (2018)	28
5.2	Resultaten.....	30
5.2.1	Temporele variatie op de korte en middellange termijn (2013)	30
5.2.2	Temporele variatie op de korte en middellange termijn (2015-2016).....	41
5.2.3	Spatiale variatie op één moment	54
6	Conclusies en aanbevelingen	61
6.1	Conclusies	61
6.2	Aanbevelingen	62
7	Referenties	63
8	Bijlage A – detail ligging meetpunten 2018.....	B1
9	Bijlage B – vergelijking dichtheitsprofielen.....	B3

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Overzicht meetmomenten in het Deurganckdok	25
Tabel 2 – Overzicht periodes zonder onderhoudsbaggerwerken met een sleephopperzuiger in het Deurganckdok.....	26
Tabel 3 – Overzicht beschikbare metingen 2015 - 2016	41
Tabel 4 – Overzicht verschil in diepteligging (Rheotune – Admodus-USP) overschrijding densiteit	54

Lijst van de figuren

Figuur 1 – Testopstelling en emmer (links) – stootlaag zand (midden) – vullen met DGD-slib (rechts)	4
Figuur 2 – Testopstelling sedimenttesttank (links) met detail opbouw sedimentlagen (rechts)	5
Figuur 3 – Luchtfoto Deurganckdok met het studiegebied (geel)	6
Figuur 4 – GraviProbe	7
Figuur 5 – Foto van de Rheotune (Stema, 2017)	8
Figuur 6 – Foto van de Admodus USP (Geo-matching, 2018)	9
Figuur 7 – Beeker-sampler (links) – detail snijkop (midden) – opstelling voor opdelen in deelstalen (rechts)	10
Figuur 8 – Mastersizer (links) – DMA-38 dichtheidsmeter (midden) – MCR-301 reometer (rechts)	11
Figuur 9 – Variatie sterkte sediment bij identieke dichtheid (links: sterkst – rechts: zwakst)	12
Figuur 10 – Peilboot I (links) – GraviProbe-meting in Deurganckdok (rechts)	12
Figuur 11 – Overzicht uitgevoerde metingen	13
Figuur 12 – Gegenereerd getij in de testopstelling in Zeebrugge	14
Figuur 13 – Korrelgrootte en fractie organisch materiaal sediment [foutbalken korrelgrootte geven d35 en d65-waarde weer]	14
Figuur 14 – Evolutie van de dichtheid: GraviProbe (-) en Beeker (□)	15
Figuur 15 – Evolutie van de sterkte: GraviProbe (-) en Beeker (□)	16
Figuur 16 – Evolutie van de dichtheid: GraviProbe (-) en Beeker (□)	17
Figuur 17 – Evolutie van de sterkte: GraviProbe (-) en Beeker (□)	18
Figuur 18 – Dichtheidsverloop over de diepte: Admodus USP (-) en Beeker (□)	20
Figuur 19 – Dichtheidsverloop over de diepte: Rheotune (-) en Beeker (□)	23
Figuur 20 – Vergelijking dichtheid substalen Beeker-sampler en Admodus (□) en Rheotune (o)	23
Figuur 21 – Sterkte-verloop over de diepte: Rheotune (-) en Beeker (□)	24
Figuur 22 – Overzicht ligging meetpunten (D.X_L.Y)	25
Figuur 23 – Overzicht beschikbare metingen en periodes zonder baggerwerken met sleephopper (groene kader)	26
Figuur 24 – Overzicht ligging meetpunten dichtheidsprofiel (oranje) en raaien SBES (grijs)	27
Figuur 25 – Overzicht ligging meetpunten Admodus-USP (oranje), Rheotune (blauw) en meerpalen (wit) in het Deurganckdok tijdens de meetcampagne in 2018	29
Figuur 26 – Vergelijking ligging diepte waarop dichtheid > 1020 kg/m ³ en SBES-diepte volgens 210 kHz (staalnummer op x-as)	30
Figuur 27 – Waarde van de gemeten dichtheid (na diepte-correctie) ter hoogte van de diepte op basis van de SBES – 33 kHz (staalnummer op x-as diepte-correctie zorgt voor samenvallen van 210 kHz-sigitaal en 1020 kg/m ³).	31
Figuur 28 – Waarde van de gemeten sterkte (na diepte-correctie) ter hoogte van de diepte op basis van de SBES – 33 kHz (staalnummer op x-as diepte-correctie zorgt voor goede overeenkomst tussen 210 kHz-sigitaal en sterkte ~ 0 kPa)	31

Figuur 29 - Evolutie van de densiteit (T0 (-) -> T2 (--)): GraviProbe en SingleBeam Echosounder – Dwarsprofiel 1	33
Figuur 30 - Evolutie van de densiteit (T0 (-) -> T2 (--)): GraviProbe en SingleBeam Echosounder – Dwarsprofiel 2	33
Figuur 31 - Evolutie van de densiteit (T0 (-) -> T2 (--)): GraviProbe en SingleBeam Echosounder – Dwarsprofiel 3	34
Figuur 32 - Evolutie van de densiteit (T0 (-) -> T2 (--)): GraviProbe en SingleBeam Echosounder – Dwarsprofiel 4	34
Figuur 33 - Evolutie van de densiteit (T0 (-) -> T2 (--)): GraviProbe en SingleBeam Echosounder – Dwarsprofiel 5	35
Figuur 34 - Evolutie van de sterkte (T0 (-) -> T2 (--)): GraviProbe en SingleBeam Echosounder – Dwarsprofiel 1	36
Figuur 35 - Evolutie van de sterkte (T0 (-) -> T2 (--)): GraviProbe en SingleBeam Echosounder – Dwarsprofiel 2	36
Figuur 36 - Evolutie van de sterkte (T0 (-) -> T2 (--)): GraviProbe en SingleBeam Echosounder – Dwarsprofiel 3	37
Figuur 37 - Evolutie van de sterkte (T0 (-) -> T2 (--)): GraviProbe en SingleBeam Echosounder – Dwarsprofiel 4	37
Figuur 38 - Evolutie van de sterkte (T0 (-) -> T2 (--)): GraviProbe en SingleBeam Echosounder – Dwarsprofiel 5	38
Figuur 39 - Ligging van iso-sterkte-lijnen (T0) en diepteligging SBES – Dwarsprofiel 1	38
Figuur 40 - Evolutie van de densiteit: GraviProbe (- -) en Beeker (-o-)	39
Figuur 41 - Evolutie van de sterkte: GraviProbe (TCPR) (- -) en Beeker (yield stress) (-o-)	40
Figuur 42 – Overzicht ligging meetpunten densiteitsprofiel (oranje) en meetraaien SBES (grijs) en uitgevoerde raaien (geel) ter hoogte van de drempel en de ingang van het dok	42
Figuur 43 – Diepteligging 2015 op basis van SBES peiling	43
Figuur 44 – Variatie densiteit over de verticale (2015)	43
Figuur 45 – Diepteligging 2016 op basis van SBES peiling	44
Figuur 46 – Variatie densiteit over de verticale (2016)	44
Figuur 47 – Diepteligging 2015 op basis van SBES peiling	46
Figuur 48 – Variatie densiteit over de verticale (2015)	46
Figuur 49 – Diepteligging 2016 op basis van SBES peiling	47
Figuur 50 – Variatie densiteit over de verticale (2016)	47
Figuur 51 – Overzicht ligging meetpunten densiteitsprofiel (oranje) en meetraaien SBES (grijs) en uitgevoerde raaien (geel) ter hoogte van het midden en einde van het dok	48
Figuur 52 – Diepteligging 2015 op basis van SBES peiling	49
Figuur 53 – Variatie densiteit over de verticale (2015)	49
Figuur 54 – Diepteligging 2016 op basis van SBES peiling	50
Figuur 55 – Variatie densiteit over de verticale (2016)	50
Figuur 56 – Diepteligging 2015 op basis van SBES peiling	52
Figuur 57 – Variatie densiteit over de verticale (2015)	52

Figuur 58 – Diepteligging 2016 op basis van SBES peiling	53
Figuur 59 – Variatie densiteit over de verticale (2016)	53
Figuur 60 – Vergelijking (Admodus-USP en Rheotune) densiteitsprofielen op zelfde locaties in het Deurganckdok campagne 2018	54
Figuur 61 – Vergelijking diepte waarop bepaalde densiteit wordt overschreden met bepaald meettoestel	55
Figuur 62 – Vergelijking diepteligging densiteit op de langsraai langs de afwaartse (boven) en opwaartse (onder) zijde van het dok.....	56
Figuur 63 – Vergelijking diepteligging densiteit op de dwarsraai ter hoogte van het begin (boven) en einde (onder) van het dok	58
Figuur 64 – Vergelijking diepteligging densiteit op een langsraai nabij de kaaimuur (-) en 60 m van de kaaimuur (-).....	59
Figuur 65 – Vergelijking diepteligging densiteiten nabij de kaaimuur en 30 m van de kaaimuur.....	60
Figuur 66 – Vergelijking diepteligging densiteiten nabij de kaaimuur en 60 m van de kaaimuur.....	60
Figuur 67 – Ligging meetpunten Admodus-USP en Rheotune tijdens campagne 2018 Ingang (boven) van en midden-vooraan (onder) in het Deurganckdok.....	B1
Figuur 68 – Ligging meetpunten Admodus-USP en Rheotune tijdens campagne 2018 Midden-achteraan (boven) en einde (onder) van het Deurganckdok.....	B2
Figuur 69 – Vergelijking (Admodus-USP en Rheotune) densiteitsprofielen op zelfde locaties in het Deurganckdok campagne 2018	B3
Figuur 70 – Vergelijking (Admodus-USP en Rheotune) densiteitsprofielen op zelfde locaties in het Deurganckdok campagne 2018	B4
Figuur 71 – Vergelijking (Admodus-USP en Rheotune) densiteitsprofielen op zelfde locaties in het Deurganckdok campagne 2018	B5
Figuur 72 – Vergelijking (Admodus-USP en Rheotune) densiteitsprofielen op zelfde locaties in het Deurganckdok campagne 2018	B6
Figuur 73 – Vergelijking (Admodus-USP en Rheotune) densiteitsprofielen op zelfde locaties in het Deurganckdok campagne 2018	B7

Dankwoord

Dit rapport is een bundeling en verdere uitwerking van de resultaten bekomen in het kader van drie masterproeven uitgevoerd aan de Universiteit Antwerpen. De studenten (Niels Ligtvoet, Mohamed Ouhida en Stéphanie Broosus) liggen aan de basis van dit rapport en worden dan ook erkend voor het geleverde werk. Daarnaast was dit onderzoek niet mogelijk zonder de bijdrage van een aantal partijen: het Waterbouwkundig Laboratorium voor het uitvoeren van de proeven in de STT en de analyses van de stalen, alsook het begeleiden van het onderzoek; het Havenbedrijf Antwerpen voor het begeleiden en financieren van een aantal van de in situ meetcampagnes, alsook de assistentie bij de uitvoering van de metingen; DotOcean voor het ter beschikking stellen van de testopstelling in Zeebrugge; de afdeling Maritieme Toegang voor het aanleveren van het slib uit het Deurganckdok en het financieren van de langetermijn metingen in het Deurganckdok; de Vlaamse Hydrografie voor het uitvoeren van de peilingen; DAB Vloot voor het ter beschikking stellen van de benodigde meetschepen.

1 Inleiding

1.1 Situering

Binnen het gebied van de haven van Antwerpen worden quasi continu onderhoudsbaggerwerken uitgevoerd om de gewenste diepgang in de vaargeul en langs terminals te kunnen garanderen. Deze werken vinden hoofdzakelijk plaats in de Schelde, maar ook achter de sluizen vinden regelmatig baggerwerken plaats. Door de ligging van het Antwerps havengebied ter hoogte van het zogeheten turbiditeitsmaximum, bestaat het te baggeren materiaal grotendeels uit zeer fijne sedimenten (klei, silt en zeer fijn zand). Aangezien dit sediment slechts traag consolideert, is de vraag gerezen in welke mate deze sedimenten (vaak “slib” genoemd) doorvaarbaar zijn (Vantorre & Coen, 1988). Tot voor kort was deze vraag minder relevant voor de haven van Antwerpen, doordat dit probleem zich enkel voordeed achter de sluizen, waar de dikte van de sliblaag beperkt is. Sinds de exploitatie van het Deurganckdok, een getijdendok op de linkeroever van de Schelde geopend in juli 2005, is dit probleem ook in het Antwerps havengebied belangrijk geworden, nog niet zozeer naar de doorvaarbaarheid van het slib, maar eerder naar de invloed ervan op afgemeerde schepen ter hoogte van de commerciële ligplaatsen (waarbij een deel van de kiel van het schip bij laagwater in de sliblaag kan komen te liggen).

Om een beter inzicht te krijgen in deze problematiek en met name de optimale meettechnieken, werd door het Havenbedrijf Antwerpen NV en het Waterbouwkundig Laboratorium in de afgelopen jaren verschillende onderzoeksvoorstellen geformuleerd aan de Universiteit Antwerpen (voormalige Artesis Hogeschool Antwerpen) in de vorm van masterproeven (promotor Yves Plancke).

Voorliggend rapport bundelt de resultaten van 3 masterproeven die in de afgelopen jaren succesvol werden voltooid:

- (1) Niels Ligtvoet - “Vergelijking van meetsystemen en analyse van meetresultaten voor het meten van aanslibbing in dokken in de haven van Antwerpen” (2012-2013)
- (2) Mohamed Ouhida – “Onderzoek naar de opbouw van sliblagen in en de vergelijking van meetsystemen voor het meten van aanslibbing in de dokken van de haven van Antwerpen” (2017-2018)
- (3) Stéphanie Broosus – “Onderzoek naar de opbouw van sliblagen in en de vergelijking van meetsystemen voor het meten van aanslibbing in de dokken van de haven van Antwerpen” (2017-2018)

Gelet op het beperkte tijdsbestek voor het uitvoeren en rapporteren van de masterproef, is besloten voorliggend rapport te maken, waarbij vertrokken is van de resultaten uit de masterproeven (Broosus, 2018; Ligtvoet, 2013; Ouhida, 2018), doch een aantal aanvullende analyse werden uitgevoerd.

1.2 Probleemstelling

De doorvaarbaarheid van slib wordt gerelateerd aan bepaalde eigenschappen van het sediment. In (MarCom Working Group 30, 1997) wordt de doorvaarbaarheid verbonden aan het concept “nautische bodem”. De “nautische bodem” is het niveau waar de fysische eigenschappen van het sediment de grens bereiken waarbij contact tussen de kiel en de bodem ofwel schade veroorzaken, ofwel onaanvaardbare gevolgen hebben voor de controleerbaarheid en manoeuvreerbaarheid van het schip. Door de moeilijkheid om de mechanische eigenschappen van het sediment in situ te meten, wordt tot op heden vaak de densiteit gebruikt om de nautische bodem te definiëren (Fontein & Byrd, 2007). De grenswaarde die wordt gebruikt voor verschillende havens varieert van 1,15 tot 1,30 t/m³ (MarCom Working Group 30, 1997).

Aangezien de sterkte van het sediment niet één op één gerelateerd is aan de densiteit, zijn er recent een aantal toestellen op de markt gekomen die de reologische eigenschappen van het sedimenten in situ trachten te meten. Mits een goede validatie van de techniek, zou op termijn overgestapt kunnen worden naar een sterkte-criterium, dat fysisch relevanter is doordat het gerelateerd is aan de weerstand die het schip ervaart bij het varen boven of door de sliblaag.

De technieken die vandaag de dag beschikbaar zijn voor het in beeld brengen van de densiteit, zijn veelal gebaseerd op puntsgewijze technieken ("prikken"). Om de baggerwerken aan te kunnen sturen is het echter van belang om te kunnen beschikken over ruimtelijk dekkende informatie van de sedimenteigenschappen. Hiertoe zal een relatie moeten gelegd worden tussen ruimtelijk dekkende informatie (bv. reflectie van akoestische signaal cfr. single-beam echo sounder (SBES)) en de puntsgewijze informatie van de sedimenteigenschappen.

1.3 Doelstelling

De bovenvermelde masterproeven hadden allen tot doelstelling een aantal meettechnieken, die in situ sediment-eigenschappen karakteriseren, te verkennen en te vergelijken. Hierbij is gekozen om de vergelijking uit te voeren op slib uit het Deurganckdok opdat eveneens nieuwe inzichten konden opgedaan worden inzake de opbouw van slib in dit getijdendok in de haven van Antwerpen.

Volgende onderzoeksvragen werden geformuleerd:

- Hoe gedraagt het slib uit Deurganckdok zich in de tijd op het vlak van sedimenteigenschappen?
 - In een gecontroleerde omgeving
 - In situ in het Deurganckdok
- Hoe relateren de meetresultaten met verschillende meettechnieken zich ten opzichte van elkaar op het vlak van:
 - Densiteit
 - Sterkte
- Kan puntsgewijze informatie omtrent sedimenteigenschappen gerelateerd worden aan ruimtelijke dekkende informatie uit akoestische reflecties?
- Is er in het Deurganckdok een relatie tussen de eigenschappen van het slib ter hoogte van de commerciële ligplaatsen en de aangrenzende zones?

2 Methodologie

In dit hoofdstuk worden achtereenvolgens de meetlocaties en de meetmethodes beschreven.

2.1 Meetlocaties

Voor het uitvoeren van het onderzoek is gekozen om zowel in een gecontroleerde omgeving als in situ (in het Deurganckdok) proeven te doen.

2.1.1 Proefopstelling “buispaal” Zeebrugge

Om het gedrag van het slib te kunnen isoleren van zoveel mogelijk omgevingsfactoren, werd door DotOcean een proefopstelling opgetrokken in het Prins Filipsdok in Zeebrugge (Figuur 1). Deze opstelling werd specifiek gebruikt voor het testen van de GraviProbe (Ligtvoet, 2013). Hier werd een buispaal ingeheid met een lengte van ca. 24 m. Deze diepte werd gekozen om steeds een optimale valsnelheid van de GraviProbe te bekomen. In deze buispaal werd vervolgens een 4 m hoge stalen emmer ingebracht die onderaan gevuld was 50 cm zand (stootlaag, tevens verticale referentie) en vervolgens met het te onderzoeken sediment.

Figuur 1 – Testopstelling en emmer (links) – stootlaag zand (midden) – vullen met DGD-slib (rechts)



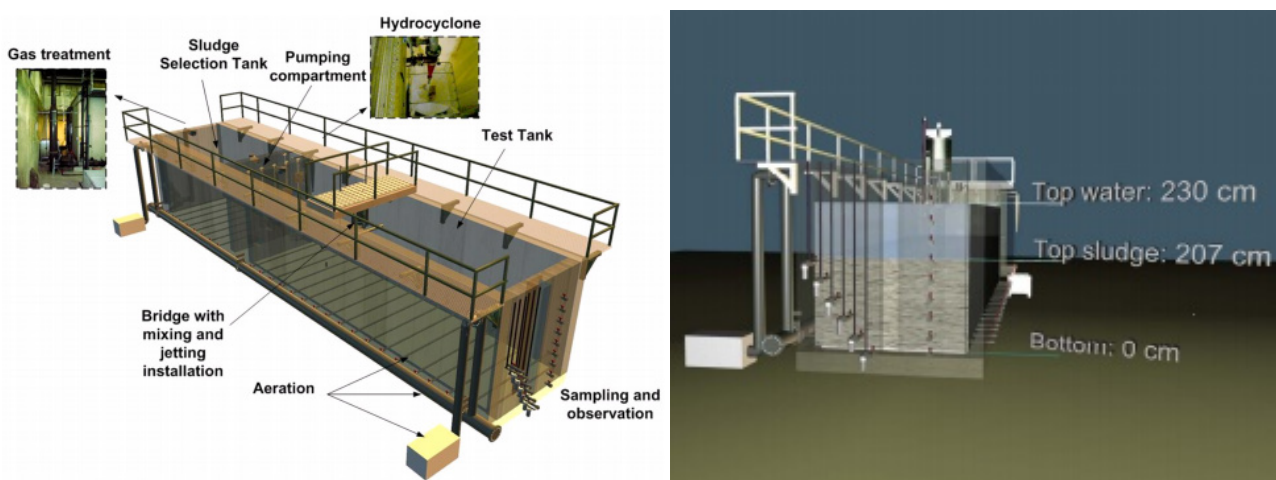
Voor de hierna beschreven proeven werd gebruik gemaakt van sediment uit het Deurganckdok. Tijdens het reguliere onderhoudsbaggerwerk, werd een hoeveelheid sediment uit het Deurganckdok overgepompt in een tankwagen die het sediment naar de testopstelling bracht (Figuur 1). Door enerzijds het baggeren en anderzijds het overpompen (baggerschip => tankwagen en tankwagen => emmer), werd het sediment volledig opgebroken zodat alle mogelijks aanwezige sterkte verwijderd werd.

2.1.2 Proefopstelling “sedimenttesttank” (STT)

De sedimenttesttank (STT) is een multifunctionele betonnen tank (Figuur 2) waarin onderzoek uitgevoerd wordt naar diverse aspecten van sedimentbodems. De tank is zo opgebouwd dat men het kan opdelen in verschillende compartimenten om slib te gebruiken met diverse eigenschappen. Er kan een verticaal profiel gecreëerd worden met verschillende sliblagen om zo de reële situatie na te bootsen. Men kan ook verschillende slibbehandelingstechnieken toepassen op het slib zoals beluchting en waterinjectie.

De STT bestaat uit drie hoofdcomponenten. De sediment selectie tank (SST) dient enerzijds als tijdelijke opslag van sedimentmengsels en anderzijds voor het mengen en/of scheiden van soorten sedimenten. Het kan eventueel ook dienen als tweede testtank voor verder onderzoek. Deze SST beschikt over beluchtingsbuizen voor het mengen en oxideren van het sediment en een bestralingsinstallatie voor mengen zonder beluchting. Tussen de twee tanks zit een pompcontainer (PC) voor het verpompen van het slib (van de overloop door de kleppen die de testtank verbinden met de pompcontainer) naar de andere tank. De pompcontainer wordt ook gebruikt voor het pompen van het slibmengsel naar de cycloon voor de scheiding in korrelgrootte. Tenslotte is er ook nog de testtank (TT). Het grootste deel van de sedimentmetingen zal hierin plaatsvinden. Het beschikt over een observatievenster, beluchtingsbuizen, bestralingsinstallatie, een akoestische sedimentniveau sensor en een gasdetectiesysteem. Net zoals in elke component van de sedimenttesttank beschikt het ook over een afscherming voor het licht. Een ander onderdeel van de sedimenttesttank is de mobiele brug. Men gebruikt dit platform voor het nemen van monsters en het uitvoeren van de proeven.

Figuur 2 – Testopstelling sedimenttesttank (links) met detail opbouw sedimentlagen (rechts)



Binnen de verschillende masterproeven werden zelf geen proeven uitgevoerd in de STT. Wel werden door het Waterbouwkundig Laboratorium resultaten ter beschikking gesteld die door de student werden geanalyseerd.

2.1.3 Deurganckdok

In de proefopstelling werd het gedrag van het Deurganckdok-slib onderzocht los van de omgevingsfactoren. Aangezien in de realiteit deze omgevingsfactoren een belangrijke rol kunnen spelen, werden ook een proeven in situ uitgevoerd. Het studiegebied bevindt zich in het Deurganckdok, een getijdedok op de linker Schelde-oever met een lengte van ca. 2500 m, een breedte van ca. 450 m en een bodemligging op -17 mTAW, met centraal een sleuf op -19 m TAW. Half-dagelijks stromen onder invloed van het getij grote hoeveelheden water en sediment in en uit het dok. Ter hoogte van het dok heeft het getij een range heeft van 5m bij gemiddeld getij, tot bijna 6 m bij springtij. Naast de getijvulling (komberging), spelen ook de neervorming ter hoogte van de aansluiting van het dok op de Schelde en densiteitstroming een belangrijke rol in de water- en sedimentuitwisseling.

Bij de eerste masterproef (Ligtvoet, 2013) werd in overleg met de afdeling Maritieme Toegang een zone achteraan het Deurganckdok afgebakend (Figuur 3) waar gedurende verschillende weken geen onderhoudsbaggerwerk zou plaatsvinden. In de overige zones van het Deurganckdok werden in deze periode mogelijks wel onderhoudsbaggerwerken uitgevoerd, doch de invloed hiervan op het studiegebied wordt als beperkt verondersteld. Wel dient opgemerkt te worden dat in het studiegebied scheepvaart mogelijk is, zodat de bodem niet volledig vrij was van menselijke verstoring.

Figuur 3 – Luchtfoto Deurganckdok met het studiegebied (geel)



Bij de overige masterproeven (Broosus, 2018; Ouhida, 2018) werd metingen uitgevoerd over het volledige dok. Ten opzichte van de eerste masterproef dient opgemerkt te worden dat op 10 juni 2016 de Kieldrechtssluis in gebruik is genomen. Deze sluis verbindt het Deurganckdok met de Waaslandhaven op linkeroever. Hierdoor vindt niet enkel scheepvaart plaats met een bestemming in het Deurganckdok, maar ook scheepvaart dat het Deurganckdok gebruikt als vaargeul van en naar de Waaslandhaven. Deze extra trafiek kan een invloed (extra verstoring) hebben op de opbouw van de sliblagen in het dok.

2.2 Meettechnieken

In het kader van de verschillende masterproeven werden verschillende directe en indirecte meettechnieken gebruikt. Deze worden in de volgende paragrafen beschreven.

2.2.1 GraviProbe

De GraviProbe (Figuur 4) is een vrije val impact instrument dat gedurende zijn val de onderwater sedimentlagen analyseert. Het beschikt over hoogfrequente (tot 2 kHz) druksensoren, inclino- en accelerometers om hieruit sedimenteigenschappen af te leiden. Het toestel wordt in de waterkolom losgelaten in vrije val om zo zijn terminale snelheid (ca. 7 m/s) te bepalen voor indringing in het sediment (hiervoor is ca. 15 m waterkolom nodig). Wanneer het toestel in contact komt met het sediment, zal het, afhankelijk van de sedimenteigenschappen (o.a. dichtheid, reologie), met een bepaalde snelheid afremmen. Met behulp van een dynamisch model worden de meetdata (diepte, acceleratie, dichtheid, verdringingsweerstand) omgezet in sediment-eigenschappen (dichtheid, ongedraineerde schuifspanning, conusweerstand en viscositeit). (bron: www.dotocean.eu)

Figuur 4 – GraviProbe



Tijdens de meetcampagnes (zowel in de proefopstelling van dotOcean als in het Deurganckdok), wordt de GraviProbe aan een touw bevestigd, dat op zijn beurt vastzit aan een winch. Het touw, verzwaard met een valgewicht, wordt eerst neergelaten tot voorbij de helft van de diepte, waarna de GraviProbe vanop een platform (proefopstelling) of het schip (Deurganckdok) losgelaten wordt om in vrije val richting bodem te vallen. Van zodra de GraviProbe de bodem heeft bereikt, wordt met behulp van de winch het geheel opgehaald. Per locatie werden telkens meerdere prikken uitgevoerd om abnormaliteiten uit te sluiten. Op deze manier werden sequentieel de meetpunten opgemeten. Tijdens de in situ meetcampagne werden ca. 10 punten per uur bemonsterd, aangezien het schip zich steeds naar het volgende meetpunt moest manoeuvreren. Na een reeks metingen werd het toestel verbonden met de laptop waar de resultaten gedownload werden en een eerste controle plaatsvond. Nadien werd met behulp van een verwerkingsprogramma de sedimenteigenschappen over de volledige diepte bepaald en werden deze in de vorm van een Excel-file opgeleverd.

Dit toestel werd enkel in (Ligtvoet, 2013) gebruikt.

2.2.2 Rheotune

De Rheotune (Figuur 5) is een toestel dat de reologie meet op basis van trilvork technologie. De respons van de geproduceerde trilling van het ene been van de trilvork op het andere been (zowel de frequentie als de amplitude) wordt bepaald door de reologische karakteristieken van dit medium. Op basis van de reologische karakteristieken kan eveneens de densiteit afgeleid worden. Het toestel is gemaakt voor het opmeten van verticale profielen van reologie en densiteit in vloeibare tot half vloeibare media zoals sliblagen.

Figuur 5 - Foto van de Rheotune (Stema, 2017)



Het werkingsprincipe van de Rheotune is gebaseerd op het trilvork principe om densiteiten te meten. De geïnduceerde harmonische beweging in het in-situ materiaal, veroorzaakt door de trilvork, wordt hierbij gerelateerd aan de dichtheid, weerstand en viscositeit van het slib. Voor een meer uitgebreide beschrijving van het toestel alsook de praktische procedure bij het uitvoeren van de metingen, wordt verwezen naar (Meire *et al.*, s.d.).

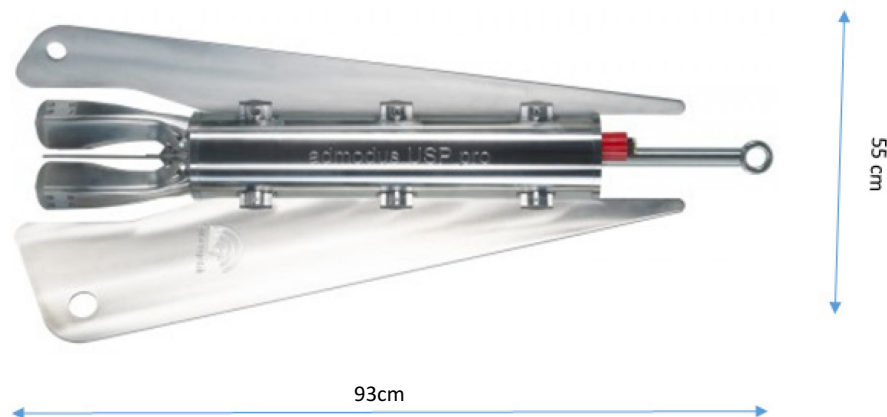
Dit toestel werd zowel in (Ouhida, 2018) als (Broosus, 2018) gebruikt.

2.2.3 Admodus USP

De “Admodus USP pro” (Figuur 6) is een akoestische meetinstrument, ontwikkeld door Synergetik (<https://admodus.de/en/products/usp-pro/>). De Admodus USP wordt gebruikt om een diepteprofiel op te meten voor de volgende parameters: densiteit, temperatuur, geluidssnelheid en akoestische demping, afhankelijk van de frequentie. Met behulp van de druk sensor en 3D versnellingsmeter worden ook de

diepte, daalsnelheid en de hellingshoek gemeten gedurende het neerlaten. De Admodus USP kan gekoppeld worden aan een externe GPS, waardoor de exacte geografische positie kan worden opgeslagen.

Figuur 6 - Foto van de Admodus USP (Geo-matching, 2018)



Op basis van metingen van de akoestische impedantie van het medium (Z_{med}), de geluidssnelheid in het medium (c_{med}) en de ultrasonische transmissie karakteristieken van het medium (reflectiecoëfficiënt r) kan de dichtheid van het medium bepaald worden volgens volgende formule:

$$\rho_{med, surface} = \frac{Z_{med}}{c_{med}} \quad \text{met} \quad Z_{med} = \rho_{sensor} \cdot c_{sensor} \cdot \frac{1+r}{1-r} \quad \text{en} \quad c_{med} = \frac{d_b}{t_b}$$

Voor een meer uitgebreide beschrijving van het toestel alsook de praktische procedure bij het uitvoeren van de metingen, wordt verwezen naar (Meire *et al.*, s.d.).

Dit toestel werd zowel in (Ouhida, 2018) als (Broosus, 2018) gebruikt.

2.2.4 Beeker-sampler

De Beeker-sampler (Figuur 7) wordt gebruikt om ongeroerde monsters te nemen van de ondergrond onder water. De Beeker-sampler bestaat uit een snijkop, doorzichtige PVC-buis (in dit geval 200 cm lang) en een zuiger. Door het stationair ophangen van de zuiger en het neerdrukken van de behuizing, wordt een onderdruk gecreëerd in de buis die een ongeroerd staal neemt van de te onderzoeken bodem. In de snijkop is een rubberband aanwezig die met behulp van een compressor onder druk kan gezet worden om de buis onderaan af te sluiten. Alzo verkrijgt men een ongeroerd monster in de buis, dat vervolgens kan onderverdeeld worden in deelstalen van ongeveer 10 cm. Deze techniek is bruikbaar bij beperkte waterdieptes (enkele meters). (bron: <http://www.eijkelpkamp.com>)

In de proefopstelling, waarbij een emmer van 4 m werd gebruikt, werden twee monsters van telkens ca. 200 cm genomen. Bij het eerste monster werd de top van het monster op het wateroppervlak gelegd, bij het tweede monster werd de top gelegd op ongeveer 2 m van de top van de stalen emmer. Op deze manier kon een volledig verticaal profiel over de hoogte van de emmer bepaald worden. Bij de tweede monsternamen werd in sommige gevallen onderaan zand teruggevonden, afkomstig van de stootlaag.

Figuur 7 – Beeker-sampler (links) – detail snijkop (midden) – opstelling voor opdelen in deelstalen (rechts)



Voor de bemonstering in het Deurganckdok moest een verzwaring aangebracht worden op de behuizing (in deze studie een loden “vis” van 100 kg) om de techniek te kunnen toepassen op grote waterdieptes (hier 20 m diepte). Bij deze bemonstering deed zich het probleem voor dat de dieptemeting niet nauwkeurig is (er werd geen bijkomende dieptemeting (cfr. druksonde) op de toestel gemonteerd). Deze wordt bepaald aan de hand van de lengte van de kabel waaraan het toestel is bevestigd, doch kan afwijken door het niet perfect verticaal naar beneden laten van het toestel op grote diepte.

Dit toestel werd enkel in (Ligtvoet, 2013) gebruikt.

2.2.5 Laboratorium analyses

Na het nemen van de monsters en het onderverdelen in deelstalen, werden deze in het laboratorium volgende parameters bepaald:

- Densiteit
- Reologie
- Organisch materiaal
- Korrelgrootte

Korrelgrootte

Om de korrelgrootteverdeling te bepalen werd gebruik gemaakt van de Malvern Mastersizer 2000 (<http://www.malvern.com>). Dit toestel (Figuur 8 – links) maakt gebruik van laserdiffRACTIE om de korrelgrootteverdeling van een staal te bepalen. Hierbij wordt laserlicht op een wolk van deeltjes geschoten (hier een subsample van de Beeker-sampler stalen), waarbij de sedimentdeeltjes het licht verstrooien onder verschillende hoeken. De verstrooide lichtstralen worden gemeten met fotodetectoren geplaatst in verschillende hoeken. Vanuit deze sensormeting kan via de licht-verstrooiingstheorie van Mie (begin 20e eeuw) de deeltjesgrootte afgeleid worden.

Densiteit

Om de densiteit te bepalen werd gebruik gemaakt van de Anton Paar DMA 38 (<http://www.anton-paar.com/>). De werking van dit toestel (Figuur 8 – midden) is gebaseerd op de oscillerende U-buis methode. Hierbij wordt de vloeistof in een U-vormige buis geïnjecteerd. Hierbij komt de buis in een trilling volgens de eigenfrequentie. Door een specifieke meting van de eigenfrequentie en een correctie wordt de dichtheid van de vloeistof bepaald. Door de hoge temperatuurafhankelijkheid van de densiteit van een vloeistof/mengsel, wordt het toestel accuraat gethermostateerd. Dit toestel biedt een viscositeitscorrectie om een correct resultaat te bekomen over een groot gebied van viscositeit, alsook een referentie oscillator, waardoor de resultaten representatief weergegeven kunnen worden met één enkele correctie.

In de praktijk wordt van elk Beeker-monster een substaal genomen met behulp van een spuit. Dit staal wordt in het toestel geïnjecteerd waarna de densiteit wordt bepaald. De output van dit toestel zijn de SG 20/20 alsook de SG 20/4, een relatieve densiteit, vergeleken met de densiteit van water op 4 °C en 20 °C.

Reologie

De reologie van het staal wordt bepaald met behulp van de Anton Paar MCR-301-reometer (Figuur 8 – rechts) (<http://www.anton-paar.com/>). Aan de hand van een vinproef wordt voor verschillende toerentallen de relatie tussen de schuifspanning en de vervorming gemeten. In het kader van dit onderzoek werd gebruik gemaakt van de bestaande protocollen. Tijdens het onderzoek, werd uit parallel lopend onderzoek geconcludeerd dat deze methodologie voor- en nadelen heeft, waardoor de gemeten sterkte met nodige voorzichtig dient geïnterpreteerd te worden (zie Intermezzo 1).

Figuur 8 – Mastersizer (links) – DMA-38 densiteitsmeter (midden) – MCR-301 reometer (rechts)



2.2.6 Single beam echo sounder (SBES)

Voor het uitvoeren van de dieptepeiling wordt gebruik gemaakt van een Single Beam EchoSounder (SBES). Dit toestel wordt onderaan een hydrografisch vaartuig gemonteerd en bepaald met behulp van een akoestisch signaal de afstand tussen het toestel en de bodem. Bij een SBES wordt een akoestisch signaal uitgezonden op 2 frequenties, namelijk 33 kHz en 210 kHz. De hoge frequentie (210 kHz) hangt samen met een kleinere golflengte en reflecteert op de eerste overgang tussen water en sediment, wat overeenkomt met de “toplaag van het slib”. De lage frequentie (33 kHz) hangt samen met een grotere golflengte en penetreert in het sediment tot op de “harde bodem”.

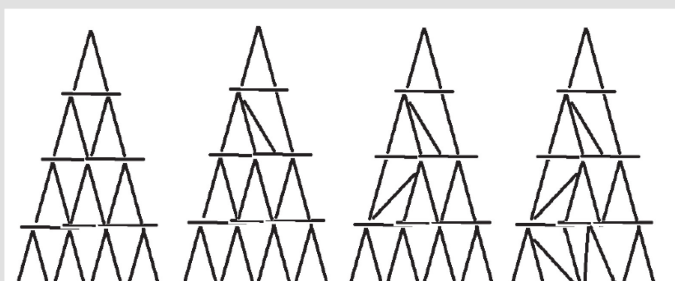
In de praktijk is het echter niet per definitie gegarandeerd dat de reflecties op deze overgangen plaatsvinden, aangezien binnen een sedimentpakket overgangen (verschil in structuur, densiteit) kunnen aanwezig zijn die aanleiding geven tot reflectie van het akoestisch signaal. Hierdoor kan deze techniek niet zomaar toegepast worden om bepaalde iso-densiteitsniveaus te bepalen.

De in situ SBES-metingen werden uitgevoerd met volgende hydrografische vaartuigen: MS HONDIUS (DAB Vloot – Vlaamse Overheid), PEILBOOT 1 (Figuur 10) en ECHO (beiden Havenbedrijf Antwerpen).

Intermezzo 1: Sterkte-opbouw van sediment en het meten ervan

Een staal bodemsediment, en in het bijzonder de kleiige sedimenten die binnen dit onderzoek gebruikt werden, bestaat een structuur van afzonderlijke deeltjes (klei schijfjes). Deze structuur bepaalt de fysische sterkte van het staal, en kan dan ook verschillen ondanks eenzelfde densiteit. Dit kan vergeleken worden met een kaartenhuisje (Figuur 9): hoewel de hoeveelheid kaarten identiek blijft ("densiteit"), neemt de sterkte af door een verschillende structuur. Naast deze fysische sterkte, zullen de thixotrope eigenschappen van klei zorgen voor een bijkomende sterkte.

Figuur 9 – Variatie sterkte sediment bij identieke densiteit (links: sterkst – rechts: zwakst)



In de realiteit zal een schip initieel de combinatie van beide sterktes ervaren. Door het slib te varen zal de structuur van het slib wijzigen en zal ook de sterkte wijzigen. Dit zelfde doet zich voor bij het bepalen van de sterkte aan de hand van een Beeker-sampler: door in situ een staal te nemen zal de structuur mogelijks beïnvloed worden. Het transport van het staal vormt een bijkomende potentiële verstoring van de structuur. Wanneer in het labo vervolgens het staal in de reometer geanalyseerd wordt, zal door de rotatie van de vin de structuur (zowel fysisch als thixotroop) volledig opgebroken worden. Dit impliceert dat het meten van de werkelijke sterkte, zoals ook ervaren door een schip, zeer moeilijk in laboratoriumomstandigheden kan worden bepaald.

Figuur 10 – Peilboot I (links) – GraviProbe-meting in Deurganckdok (rechts)



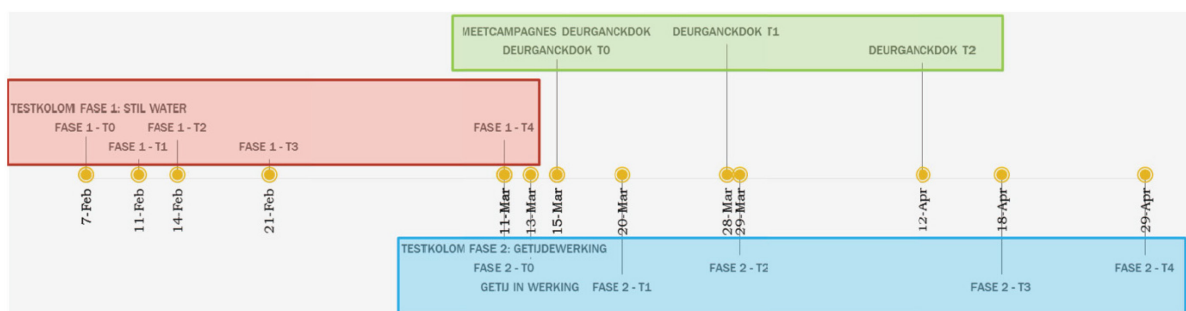
3 Testopstelling Zeebrugge

3.1 Opzet van de metingen

Om het gedrag van het slib uit het Deurganckdok in gecontroleerde omstandigheden te onderzoeken, werd gebruik gemaakt van de proefopstelling te Zeebrugge. In deze proefopstelling werden twee afzonderlijke sets van experimenten uitgevoerd: enerzijds werd het gedrag bestudeerd met een constante waterstand (naar analogie met sedimenten uit andere havens), anderzijds werd een waterstandsvariatie opgelegd naar analogie met de getijcondities die in de realiteit in het Deurganckdok optreden.

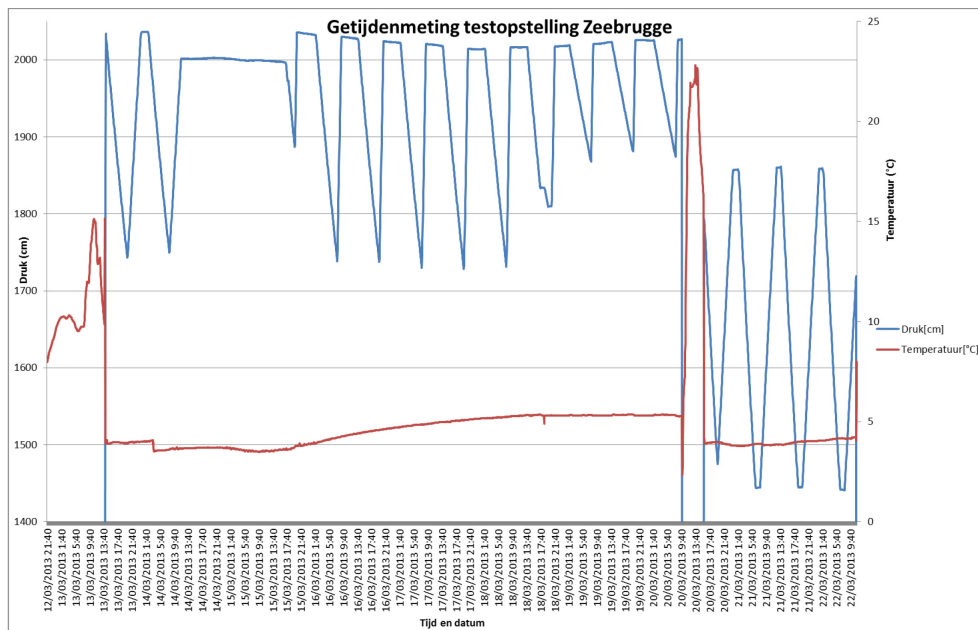
In beide cycli werd gedurende minstens 4 weken het gedrag van het slib onderzocht, waarbij op regelmatige tijdstippen (wekelijks) een meting uitgevoerd met de GraviProbe, terwijl bij aanvang en op het einde ook met behulp van de Beeker-sampler een volledig profiel bemeten werd. Daar de variatie in het gedrag van het slib relatief traag ging, werd besloten de cyclus met getij door te laten lopen over een periode van 16 weken, om de opbouw van sterkte in het slib te realiseren. Hierbij werd ook tijdens de cyclus een bijkomende Beeker-sampler genomen. Figuur 11 geeft een overzicht van de uitgevoerde metingen. Met betrekking tot de cyclus met getij dient opgemerkt te worden dat een aanvullende meting werd uitgevoerd op 4 juli 2013 (T5).

Figuur 11 – Overzicht uitgevoerde metingen



Voor de tweede cyclus van metingen, met simulatie van getijcondities, werd met behulp van twee pompompen een waterstandsvariatie gecreëerd. Figuur 12 geeft een overzicht van de drukvariatie in de buispaal tijdens de cyclus met getij. Uit deze figuur blijkt dat tijdens de opstartfase (12/03/2013 – 15/03/2013) de waterstandsvariatie niet volgens de beoogde doelstelling verliep. In de week erna werd een grotere variatie (ca. 3 m) gerealiseerd, doch pas vanaf 20/03/2013 is er sprake van een waterstandsvariatie die qua vorm gelijkaardig is aan het getij in het Deurganckdok, terwijl het verschil in waterstand (ca. 4 m) eerder overeenstemt met doodtij-condities.

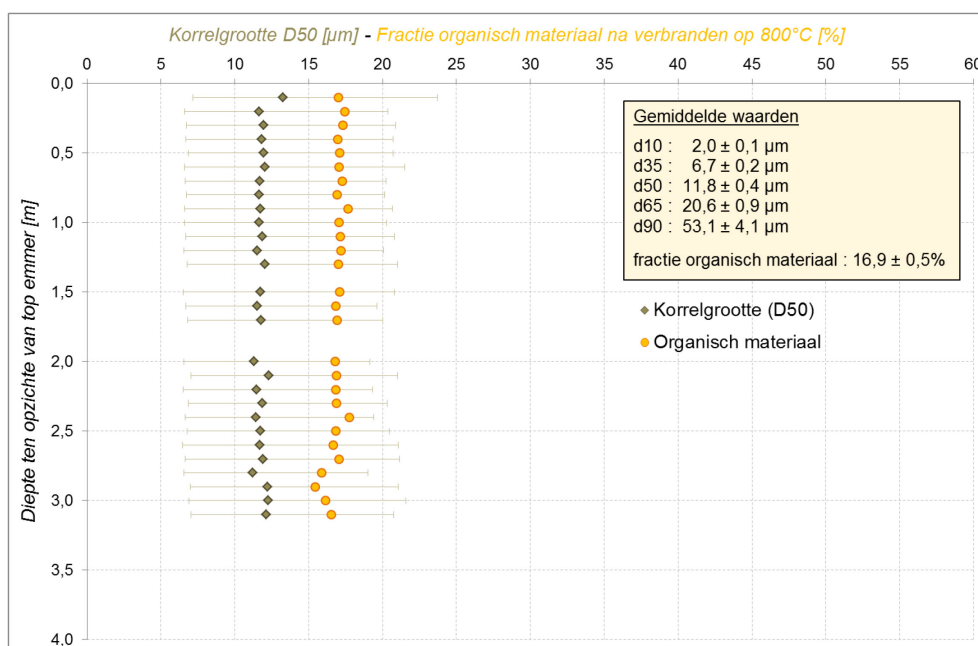
Figuur 12 – Gegeneerd getij in de testopstelling in Zeebrugge



3.2 Resultaten

De staalname met behulp van de Beeker-sampler laat toe de sedimenteigenschappen te bepalen van het bemonsterde sediment. Figuur 13 geeft het verloop in de diepte weer van de korrelgrootte (d35-d50-d65) en de fractie organisch materiaal van het sediment uit het Deurganckdok. Het sediment bestaat uit fijn siltige sedimenten ($d_{50} \sim 12 \mu\text{m}$) en heeft een percentage van ca. 17% aan organisch materiaal.

Figuur 13 – Korrelgrootte en fractie organisch materiaal sediment
[foutbalken korrelgrootte geven d35 en d65-waarde weer]



3.2.1 Experimenten zonder getij

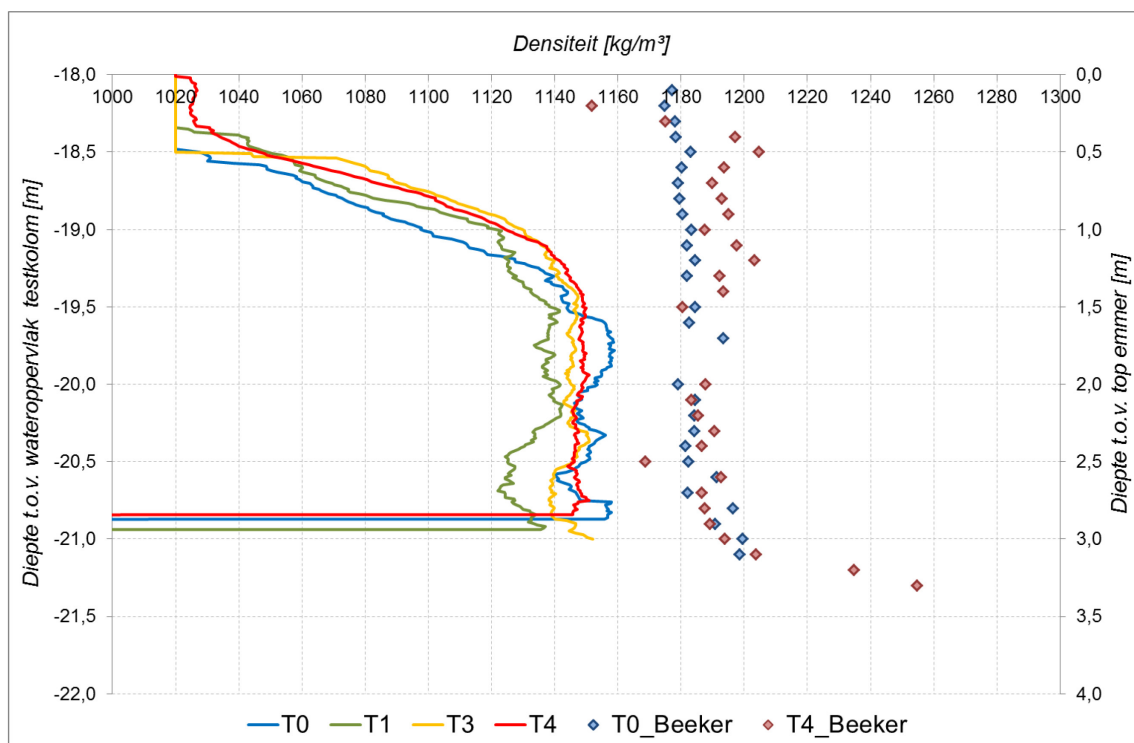
Gedurende een periode van 32 dagen werden 5 metingen uitgevoerd met behulp van de GraviProbe waarbij zowel het densiteits- als sterkteprofiel werd opgemeten. De derde meting (T2, na 7 dagen) was niet succesvol, waardoor in de volgende paragrafen 4 metingen besproken worden.

Densiteit

Figuur 14 geeft de ontwikkeling van het verloop van de densiteit weer op basis van 4 metingen met de GraviProbe en 2 bemonsteringen met de Beeker-sampler. Een eerste vaststelling is het verschil tussen de gemeten densiteit met de GraviProbe en de densiteit van de substalen van de Beeker-sampler (Anton Paar DMA 38). De waarde van de substalen ligt systematisch hoger dan deze uit de GraviProbe. Het verschil is het sterkst in het bovenste deel van de emmer met het sediment (18 tot 19 m onder wateroppervlak). De GraviProbe vertoont hier een geleidelijke overgang, terwijl de substalen eerder een constant verloop hebben. De oorzaak van het verschil is vermoedelijk te wijten aan het meetprincipe van de GraviProbe waarbij gebruik gemaakt wordt van druksensoren ter hoogte van de punt en de staart van het toestel. Wanneer slechts een deel van het toestel zich in de sliblaag bevindt (in casu punt in slib, staart nog in het water), zal de bepaling van de densiteit foutief rekening houden met de waarde gemeten te hoogte van de staart. Deze metingen in deze overgangszone zijn dus niet bruikbaar. Van zodra de GraviProbe volledig in de sliblaag is gepenetreerd (op een diepte van 19,5 m onder oppervlak, i.e. ca. 1m (lengte toestel) onder de top van de sliblaag) is het verschil met de substalen kleiner maar nog wel aanzienlijk ($\sim 40 \text{ kg/m}^3$). Op een diepte van ca. 21m bereikt het toestel de bodem van de emmer (stootlaag) in de opstelling.

Wanneer de evolutie in de tijd wordt bekeken, zijn er maar zeer kleine verschillen waar te nemen. Op basis van de substalen van de Beeker-sampler is er een afname ($\sim 25 \text{ kg/m}^3$) van de densiteit in het bovenste staal, in combinatie met een beperkte toename ($\sim 10 \text{ kg/m}^3$) in de onderliggende stalen (bovenste meter). Dit kan wijzen op een consolidatie van het slib in de bovenste laag. Uit de metingen met de GraviProbe kan geen duidelijke trend teruggevonden worden.

Figuur 14 – Evolutie van de densiteit: GraviProbe (-) en Beeker (□)

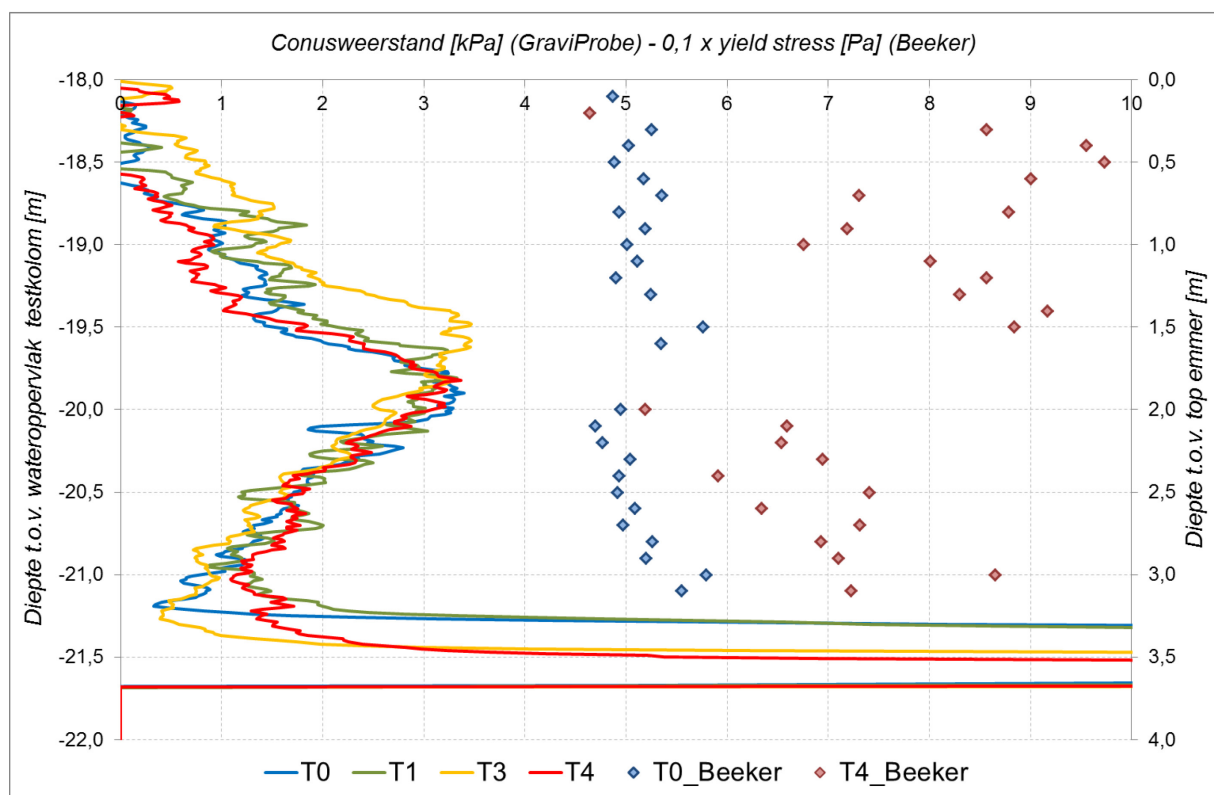


Sterkte

Figuur 15 geeft de ontwikkeling van het verloop van de sterkte weer op basis van 4 metingen met de GraviProbe en 2 bemonsteringen met de Beeker-sampler. Een eerste vaststelling is het verschil tussen de gemeten sterkte met de GraviProbe en de sterkte van de substalen van de Beeker-sampler. Cruciaal hierbij is het verschil in bepaling van de sterkte, waarbij de GraviProbe de weerstand van de sonde meet bij het penetreren van de sliblaag, terwijl de vloeierkte die bepaald wordt op de substalen gebeurt door het uitvoeren van de vintest in de reometer. Dit zorgt ervoor dat beide “sterktes” niet zomaar onderling vergeleken kunnen/mogen worden.

Wanneer de evolutie in de tijd wordt bekeken, zien we in de substalen van de Beeker-sampler een duidelijke toename van de vloeierkte (50 Pa => 70-90 Pa). Hierbij valt het op dat met name in de bovenste helft van de sliblaag de toename het sterkste is. Dit hangt mogelijk samen met de vaststelling in de evolutie van de densiteit, die zich vooral in de bovenste helft manifesteerde. Mogelijks vindt de consolidatie plaats in het bovenste deel, en (nog) niet in de onderste laag. In tegenstelling tot de substalen, is de variatie in de gemeten sterkte met de GraviProbe zeer beperkt, zonder duidelijke trend.

Figuur 15 – Evolutie van de sterkte: GraviProbe (-) en Beeker (□)



3.2.2 Experimenten met getij

Voor aanvang van de tweede meetcyclus werd het slib in de emmer gemengd met een mixer. Deze bevond zich ca. 1 m boven de bodem. De mixer opereerde 2 uur lang op een diepte van 1 m boven de bodem, en werd vervolgens 1 m opgehaald om hier nogmaals 2 uur het sediment op te woelen.

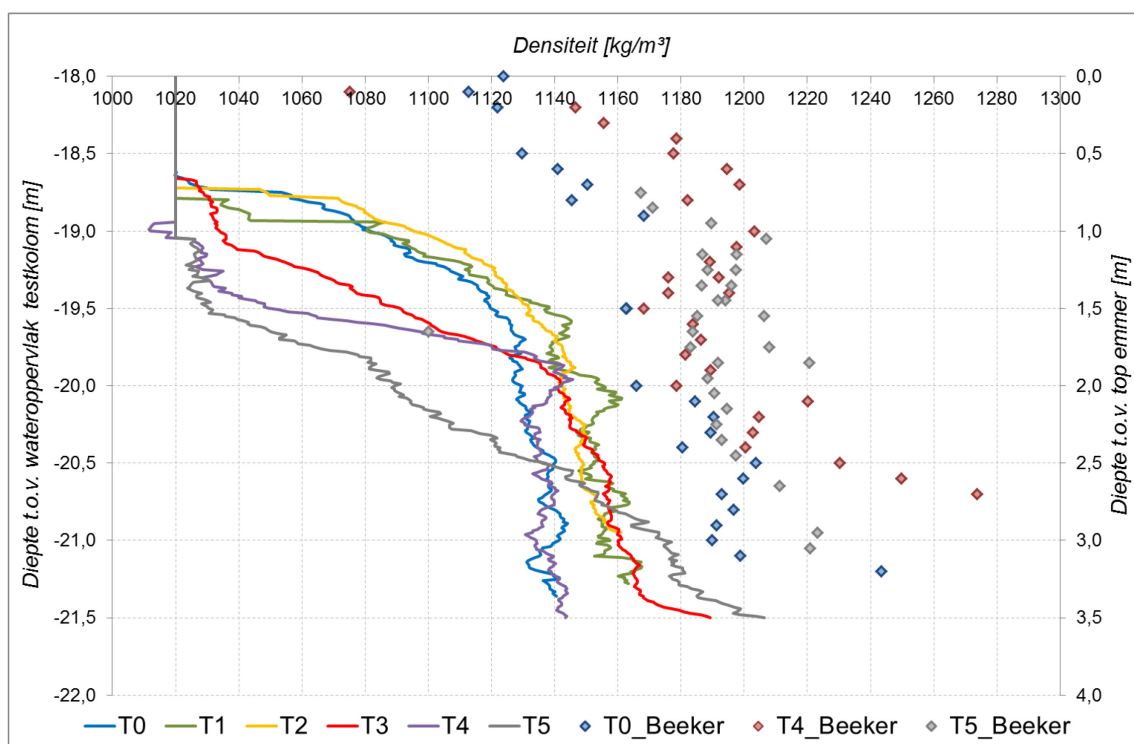
Densiteit

Figuur 16 geeft de ontwikkeling van het verloop van de densiteit weer op basis van 6 metingen met de GraviProbe en 3 bemonsteringen met de Beeker-sampler. Ook hier kan dezelfde vaststelling gedaan omtrent het verschil in gemeten densiteit met de GraviProbe ten opzichte van de substalen (zie § 3.2.1).

De evolutie in de tijd van de densiteit van de Beeker-substalen vertoont enkele verwachte maar ook onverwachte veranderingen. Zo is er tussen de T0 en de T4 een toename van de densiteit zowel in het bovenste deel als in het onderste deel van de sliblaag. Deze ontwikkeling houdt in dat de sedimentmassa in de bemonsterde zone toegenomen moet zijn tussen beide momenten. Dit is mogelijk, maar zou impliceren dat een deel van het sediment in de T0-toestand zich boven de emmer moet bevinden. Dit zou kunnen verklaard worden door het mixen van het sediment voor aanvang van de tweede meetcyclus. Tussen T4 en T5 is er een afname van de densiteit in de bovenste laag van 1 m, terwijl in de middenste laag (19 tot 20 m onder oppervlak) de densiteit toeneemt. De ontwikkeling kan gelieerd worden aan de consolidatie van het sediment. Onderaan is er echter een afname van de densiteit, wat tegen de verwachting is.

De evolutie die met de GraviProbe werd gemeten vertoont logisch verloop: vanaf de T2 (18 dagen na aanvang) zakt de top van sliblaag geleidelijk (ca. 1 m op 14 weken). In het middenste en onderste deel vertoont de densiteit initieel (T0-T1) een toename om vervolgens (T1-T3) quasi constant te blijven. De T4 wijkt hiervan af (reductie densiteit), waarna de consolidatie zich doorzet tussen 8 en 16 weken na aanvang van de cyclus. Hierbij neemt de densiteit in het middenste deel af ($1140 \text{ kg/m}^3 \Rightarrow 1100 \text{ kg/m}^3$), terwijl onderaan de densiteit toeneemt ($1150 \text{ kg/m}^3 \Rightarrow 1180 \text{ kg/m}^3$).

Figuur 16 – Evolutie van de densiteit: GraviProbe (-) en Beeker (□)



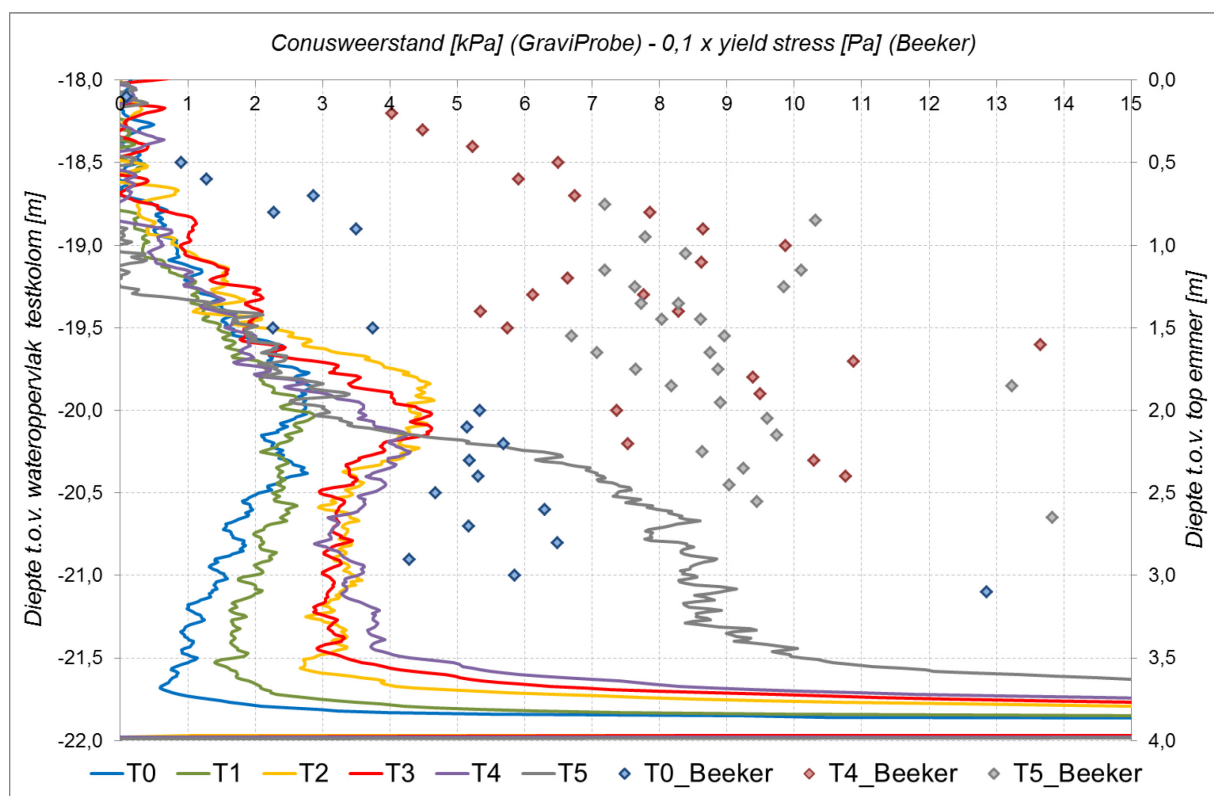
Sterkte

Figuur 17 geeft de ontwikkeling van het verloop van de sterkte weer op basis van 6 metingen met de GraviProbe en 2 bemonsteringen met de Beeker-sampler. Ook hier kan dezelfde vaststelling gedaan omtrent het verschil in gemeten sterkte met de GraviProbe ten opzichte van de substalen (zie § 3.2.1).

De evolutie in de tijd van de sterkte van de Beeker-substalen toont een duidelijke toename tussen de T0 en de T4, en dit over de volledige diepte. Tussen de T4 en de T5 is er geen duidelijke trend aanwezig.

De evolutie die met de GraviProbe werd gemeten voldoet beter aan de verwachtingen: tussen de T1 en T2 is er in het onderste deel een duidelijke toename (2 kPa => 3 à 4 kPa) van de sterkte; vervolgens blijft het verloop tot de T4 eerder gelijk; tussen de T4 en T5 is er een duidelijke toename (3 à 4 kPa => 8 à 10 kPa) in de sterkte te zien in de onderste, wat goed overeenkomt met de ontwikkeling in de densiteit in dit deel van de sliblaag.

Figuur 17 – Evolutie van de sterkte: GraviProbe (-) en Beeker (□)



4 Testopstelling STT

4.1 Opzet van de metingen

De resultaten die ter beschikking werden gesteld voor het onderzoek in de masterproef zijn afkomstig van metingen in het verleden waarbij er twee cycli aan metingen zijn uitgevoerd. Tijdens een eerste cyclus (september 2012) werd gebruik gemaakt van de Admodus USP pro en een Beeker-sampler. Tijdens de andere cyclus (juni 2010) werd gebruik gemaakt van de Rheotune en een Beeker-sampler. Enkel een vergelijking tussen de staalname met de Beeker-sampler en een indirect meettoestel is mogelijk, de onderlinge vergelijking tussen de Admodus USP en de Rheotune is niet mogelijk.

Vooreerst werd de STT gevuld met slib afkomstig uit de haven van Zeebrugge waarbij 2 lagen met een verschillende densiteit werden aangemaakt (via consolidatie en verdunning). Eens de STT gevuld was met deze sliblagen, werden de metingen uitgevoerd. Hierbij werd het toestel met een continue en vaste snelheid vanaf de top van het waterniveau tot de bodem (20 cm vanaf de onderkant van STT) neergelaten. Bij de startpositie worden de toestellen net onder het topwaterniveau gedompeld. De maximale diepte onder het bovenste waterniveau is $230\text{cm} - 20\text{cm} = 210\text{cm}$. Het maximale slibniveau dat moet worden geprofileerd is $207\text{cm} - 20\text{cm} = 187\text{cm}$ (zie Figuur 2).

Per cyclus worden er telkens een aantal (3) metingen uitgevoerd met het meettoestel en wordt er één monster met de Beeker-sampler genomen. De puntmetingen van de afzonderlijke toestellen dienen zo dicht mogelijk naast elkaar uitgevoerd te worden om deze met elkaar te kunnen vergelijken. Deze mogen echter niet al te dicht bij elkaar gelegen zijn om elkaar niet te kunnen beïnvloeden. Hierdoor kan er reeds een verschil ontstaan tussen 2 metingen, omwille de laterale variatie in de sliblagen. Men kan wel vaststellen dat het laterale verschil in de slibkolom minimaal is door het volledige inkomende slib grondig te mengen. De evolutie van het slib tijdens sedimentatie en consolidatie in de hele tank zal zeer vergelijkbaar zijn. Men kan het best de metingen in het midden uitvoeren aangezien nog steeds kleine variatie zal optreden als gevolg van inhomogene menging nabij de wanden.

4.2 Resultaten

4.2.1 Admodus USP

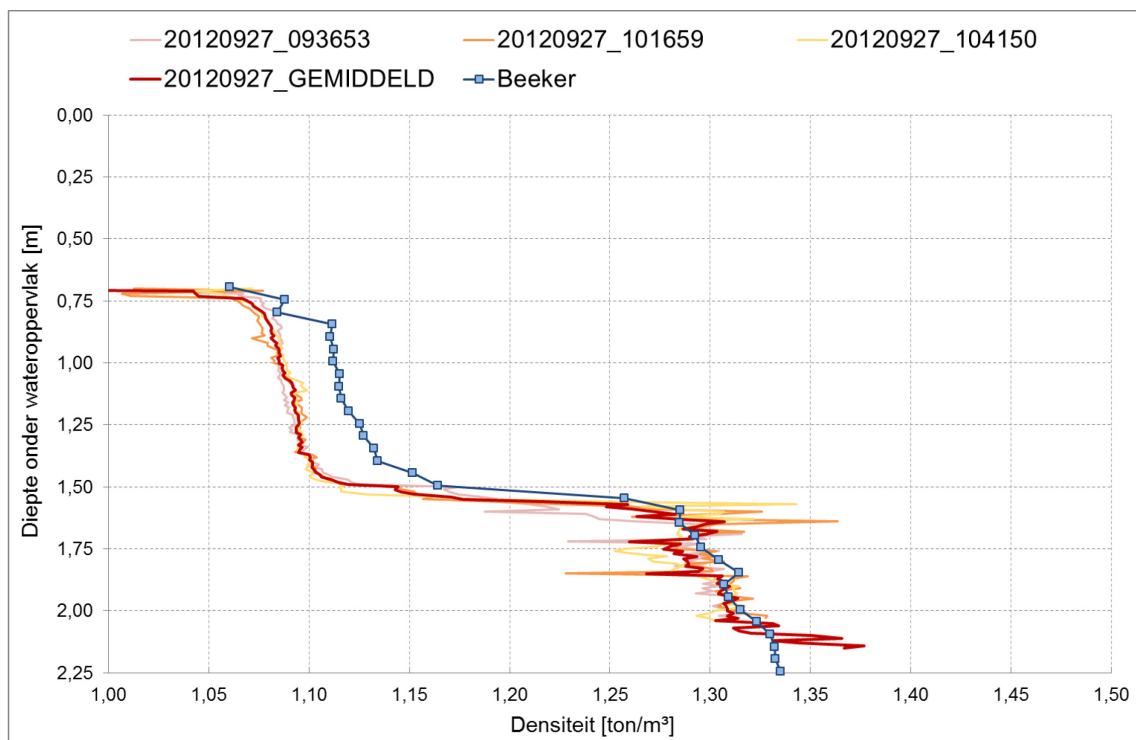
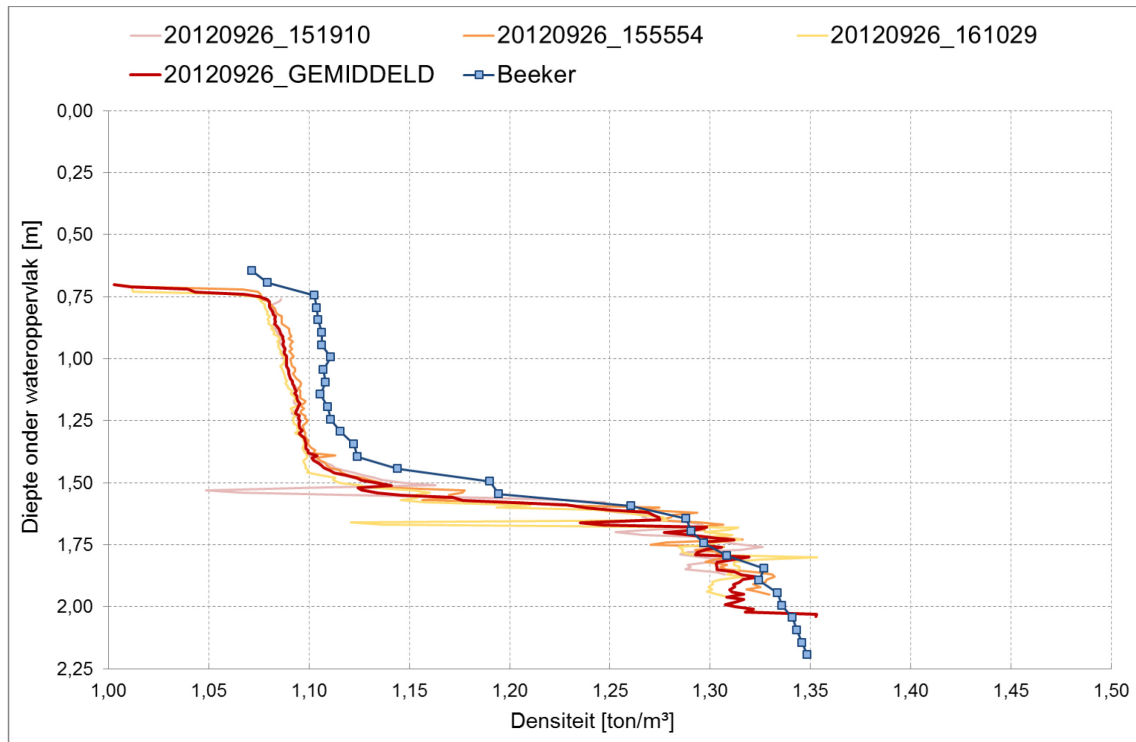
De vergelijking tussen de densiteit gemeten met de Admodus USP en de stalen genomen met de Beeker-sampler werden uitgevoerd voor “cyclus 10”, die plaatsvond op 26 en 27 september 2012. Op beide dagen werden telkens 3 verticale profielen opgemeten en werd er één Beeker-staal genomen dat opgedeeld werd in deelstalen van 5 cm waarvan de densiteit werd bepaald met behulp van de Anton Paar DMA 38. Waar de Admodus een resultaat geeft ten opzichte van het wateroppervlak, zijn de resultaten van de Beeker-sampler gerelateerd ten opzichte van de bodem. Om beide metingen onderling te kunnen vergelijken, werd uitgegaan dat de bodem op 225 cm^1 beneden het wateroppervlak lag en werd de positie van de deelstalen van de Beeker-sampler hiermee herrekend ten opzichte van het wateroppervlak.

Daar waar de Admodus hoogfrequent meet, bleek de verticale resolutie zeer hoog te zijn (enkele metingen per mm diepte). Om de hoeveelheid data te reduceren werd gekozen de verticale resolutie terug te brengen tot 1 waarde per cm, waarvoor een lineaire interpolatie uitgevoerd werd.

¹ Aangezien de substalen van de Beekersampler telkens 10 cm hoog zijn, werd een correctie toegepast die 5 cm kleiner (225 cm i.p.v. 230 cm) is dan hierboven vermeld, dit omwille van de keuze om de diepte te associëren met het midden van een substaal.

Figuur 18 geeft het verloop van de densiteit weer voor beide meetdagen. Hierbij worden zowel de individuele profielen gemeten met de Admodus getoond, als het gemiddelde van de 3 profielen, als het resultaat van de bemonstering met de Beeker-sampler.

Figuur 18 – Densiteitsverloop over de diepte: Admodus USP (-) en Beeker (□)
Dag 1 – 26/09/2012 (boven) en dag 2 – 27/09/2012 (onder)



Uit Figuur 18 kan geconcludeerd worden dat beide meettechnieken een goede overeenstemming vertonen. De overgangen tussen de bovenliggende waterlaag en de weinig geconsolideerde sliblaag enerzijds en de weinig geconsolideerde en meer geconsolideerde sliblaag anderzijds, worden quasi identiek weergegeven. Ook in de onderste (meer geconsolideerde) sliblaag liggen de resultaten van beide meettoestellen quasi op elkaar. Wel treedt er een verschil op in de bovenste (weinig geconsolideerde) sliblaag, waar de Admodus USP steeds een lagere waarde geeft dan de deelstalen van de Beeker-sampler. Het verschil bedraagt gemiddeld $0,025 \text{ ton/m}^3$ over beide dagen. Dit is ook zichtbaar in Figuur 20 waar de densiteit bepaald met de Admodus USP onder de 1-1-lijn ligt voor densiteiten lager dan $1,20 \text{ ton/m}^3$.

4.2.2 Rheotune

De vergelijking tussen de densiteit gemeten met de Rheotune en de stalen genomen met de Beeker-sampler werden uitgevoerd voor “cyclus 3”, die plaatsvond op 14 juni 2010. Er werden 6 verticale profielen opgemeten en werd er één Beeker-staal genomen dat opgedeeld werd in deelstalen van 5 cm waarvan de densiteit werd bepaald met behulp van de Anton Paar DMA 38. Waar de Rheotune een resultaat geeft ten opzichte van het wateroppervlak, zijn de resultaten van de Beeker-sampler gerelateerd ten opzichte van de bodem. Om beide metingen onderling te kunnen vergelijken, werd voor de Beeker-sampler een conversie uitgevoerd zodanig dat te water-slib-overgang op dezelfde diepte plaatsvond als bij de Rheotune.

Net zoals de Admodus, meet de Rheotune hoogfrequent, waarbij ca. 40 metingen per cm beschikbaar zijn². bleek de verticale resolutie zeer hoog te zijn (enkele metingen per mm diepte). Om de hoeveelheid data te reduceren werd gekozen de verticale resolutie terug te brengen tot 1 waarde per cm, waarbij een gemiddelde waarde werd bepaald op basis van de beschikbare data³.

Densiteit

Figuur 19 geeft het verloop van de densiteit weer waarbij zowel de individuele profielen gemeten met de Rheotune getoond worden, als het gemiddelde van de 6 profielen, als het resultaat van de bemonstering met de Beeker-sampler. Hieruit kan geconcludeerd worden dat beide meettechnieken een zeer goede overeenstemming vertonen. Zowel in de bovenste weinig geconsolideerde als in de onderste meer geconsolideerde sliblaag liggen de resultaten van beide meettoestellen quasi op elkaar. Het verschil bedraagt gemiddeld minder dan 0,001 ton/m³. Dit wordt eveneens getoond in Figuur 20 waar de densiteit bepaald met de Rheotune overal de 1-1-lijn volgt.

Reologie

Figuur 21 geeft het verloop van de sterkte weer waarbij zowel de individuele profielen gemeten met de Rheotune getoond worden, als het gemiddelde van de 6 profielen, als het resultaat van de bemonstering met de Beeker-sampler. Voor de substalen van de Beeker-sampler wordt zowel het verloop van de maximale shear stress (maximale waarde uit de verschillende rotatiesnelheden) als de vloeisterkte (yield stress, snijpunt met de y-as bij het veronderstellen van een lineaire relatie tussen rotatiesnelheid (> 100 tpm) en shear stress).

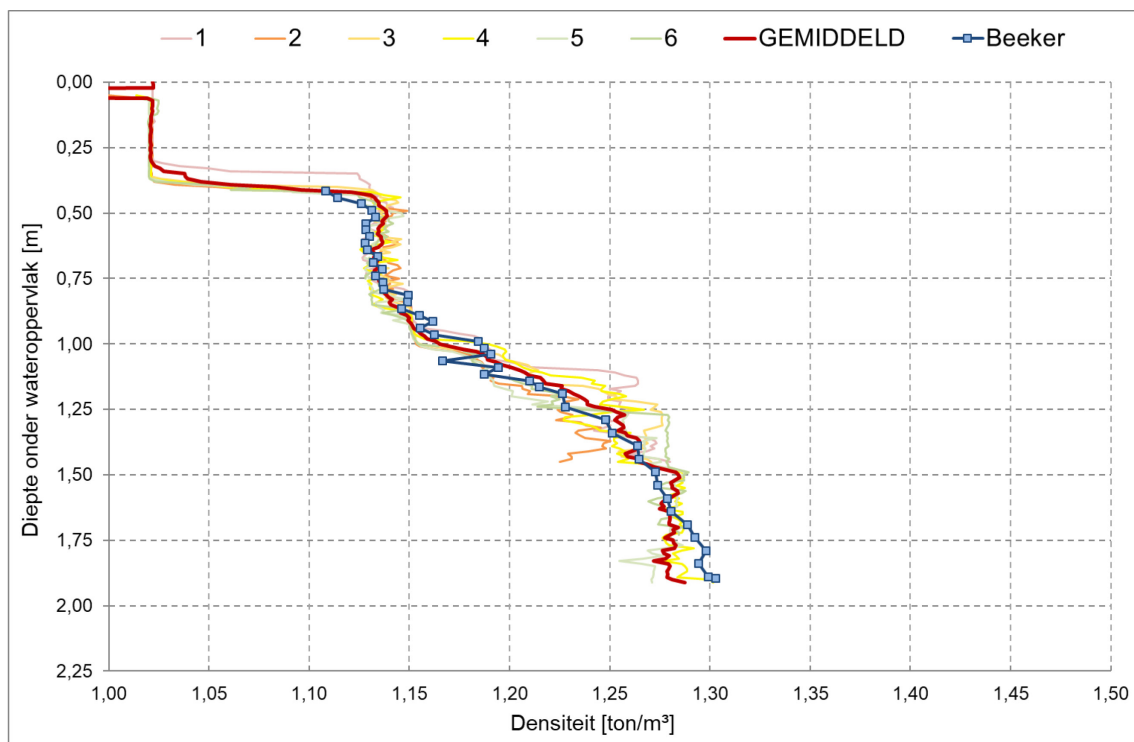
In de bovenste weinig geconsolideerde sliblaag komt de sterkte gemeten met de Rheotune zeer goed overeen met de vloeisterkte bepaald op de substalen. Voor de onderste meer geconsolideerde sliblaag is de vloeisterkte aanzienlijk kleiner dan de sterkte gemeten met de Rheotune. In deze onderste sliblaag ligt de maximale sterkte meer in de buurt van de sterkte gemeten met de Rheotune, doch ook deze is lager. Wanneer de maximale sterkte wordt vergeleken met de sterkte gemeten met de Rheotune in de bovenste sliblaag, is de maximale sterkte veel groter (factor 10).

Een belangrijke opmerking bij het vergelijken van de sterkte dient gemaakt te worden over het verschil in meetprincipe. De labo-analyse van de substalen van de Beeker-sampler maakt gebruik van een roterende vin die op verschillende (sequentieel opgelegd) rotatiesnelheden in het monster inwerken en waarvan de weerstand bepaald wordt. Bij de Rheotune vindt één meting plaats bij het penetreren van het medium, waarbij gebruik gemaakt wordt van het principe van een trilvork. Deze verschillende meettechnieken kunnen sowieso aanleiding geven in de sterkte van het medium dat bemeten wordt.

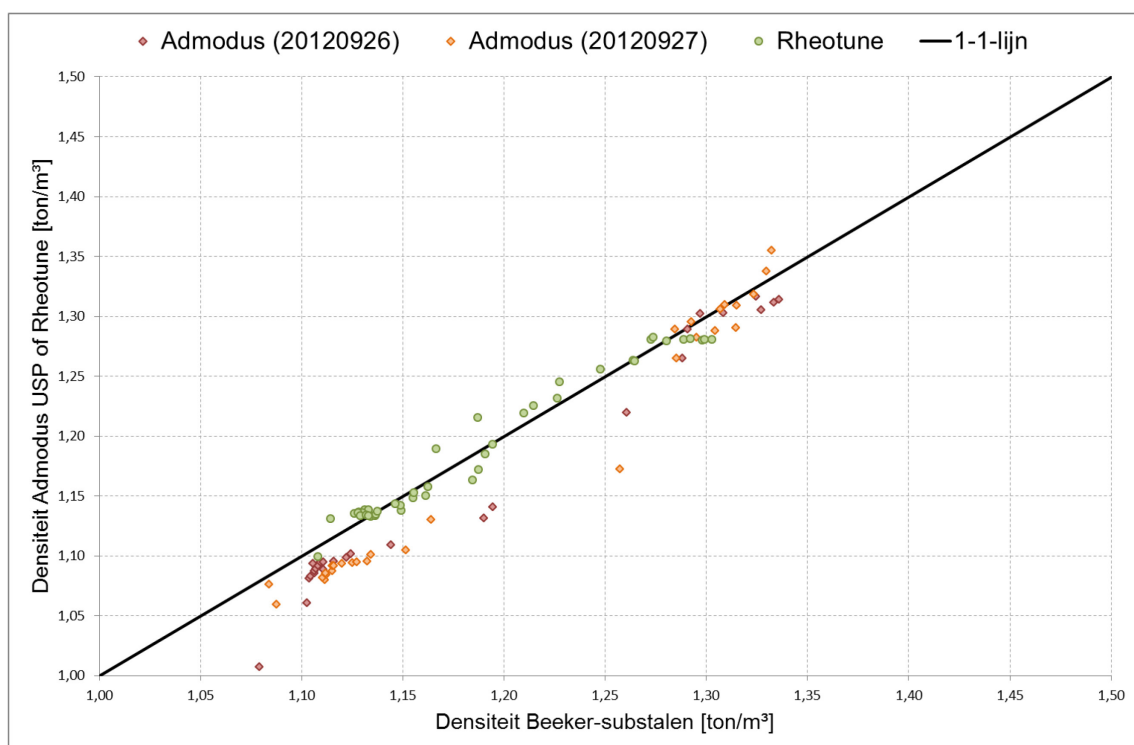
² De txt-files met de resultaten bevatten diepte informatie met aanduiding op cm niveau. Hierdoor staan er verschillende meetresultaten die schijnbaar op dezelfde diepte gemeten hebben, doch waarvan vermoed kan worden dat dit niet het geval is.

³ Een lineaire interpolatie zoals bij de Admodus bleek niet mogelijk door het ontbreken van diepte informatie op sub cm niveau.

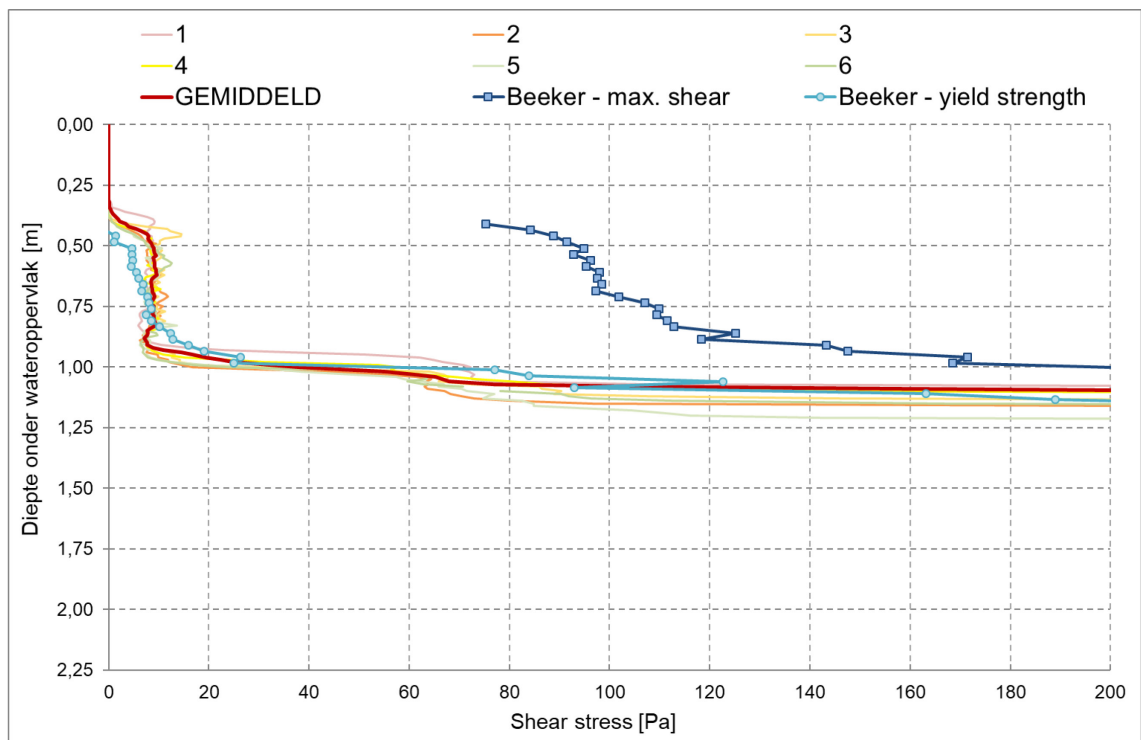
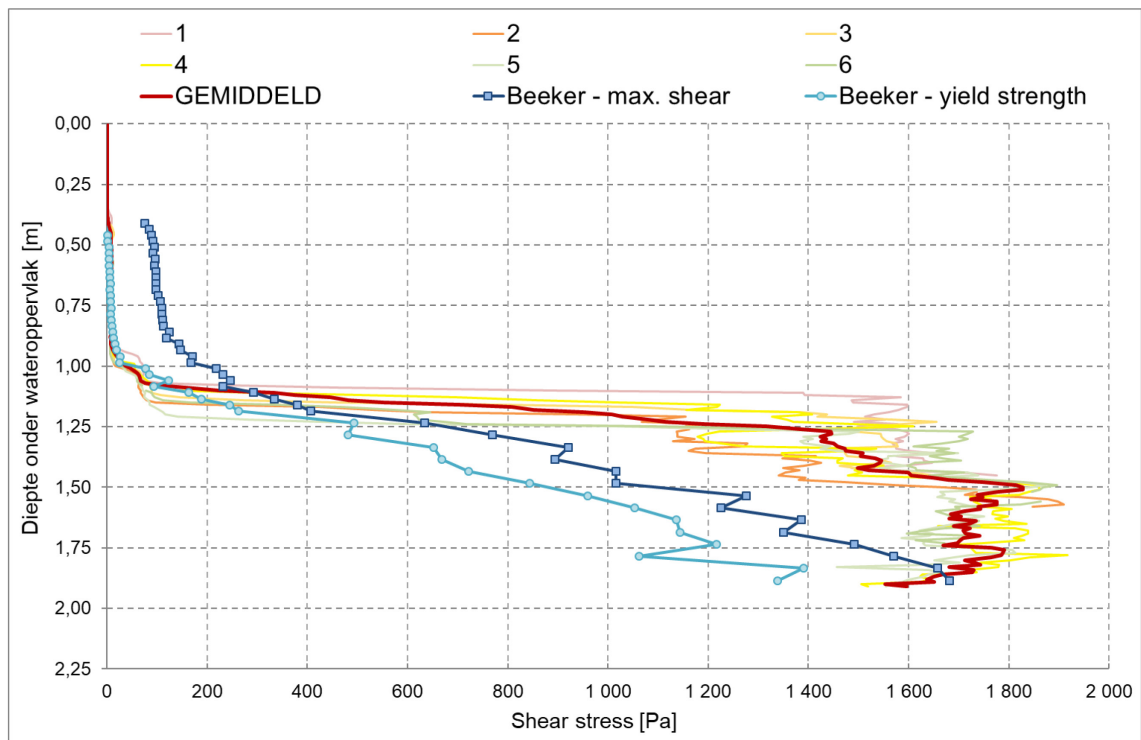
Figuur 19 – Densiteitsverloop over de diepte: Rheotune (-) en Beeker (□)



Figuur 20 – Vergelijking densiteit substalen Beeker-sampler en Admodus (□) en Rheotune (o)



Figuur 21 – Sterke-verloop over de diepte: Rheotune (-) en Beeker (□)
Volledig bereik (boven) en detail op laagste sterktes (onder)



5 Deurganckdok

5.1 Opzet van de metingen

5.1.1 Temporele variatie op de korte en middellange termijn (2013)

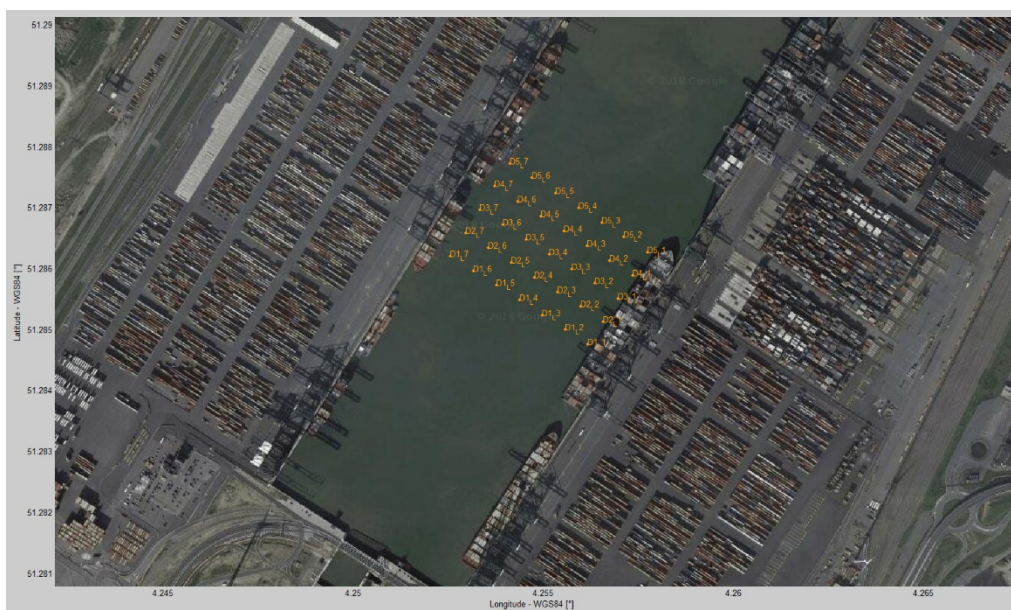
In het kader van de masterproef van (Ligtvoet, 2013) werden in een zone aan het eind van het Deurganckdok op 3 tijdstippen (tussenperiode van ca. 14 dagen, zie Tabel 1) metingen uitgevoerd met behulp van de GraviProbe. Gedurende deze periode werden er geen onderhoudsbaggerwerkzaamheden uitgevoerd in dit deel van het dok. Om na te gaan hoe het slib in het Deurganckdok zich gedraagt in de tijd, werd een grid opgemaakt van 5 parallelle raaien (met onderlinge tussenafstand van 50 m) met daarop telkens 7 meetpunten (tussenafstand eveneens 50 m), zie Figuur 22. Op deze punten werd elke campagne een dubbele prik uitgevoerd, om eventuele laat ontdekte meetfouten (bij het inlezen van de data) te voorkomen. Aan de hand van deze data werd per profiel een sterkteprofiel opgemaakt over de breedte van het dok. Op basis van de 3 meetcampagnes kon de evolutie van de sterkteopbouw doorheen de tijd van het slibpakket in Deurganckdok geanalyseerd worden.

Tabel 1 – Overzicht meetmomenten in het Deurganckdok

Tijdstip	Datum
T0	15/03/2013
T1	28/03/2013
T2	12/04/2013

Figuur 22 – Overzicht ligging meetpunten (D.X_L.Y)

D = “dwarsraai” (X=1-5, zuid-west => noord-oost) | L = “langsraai” (Y=1-7, zuid-oost => noord-west)



5.1.2 Temporele variatie op de korte en middellange termijn (2015-2016)

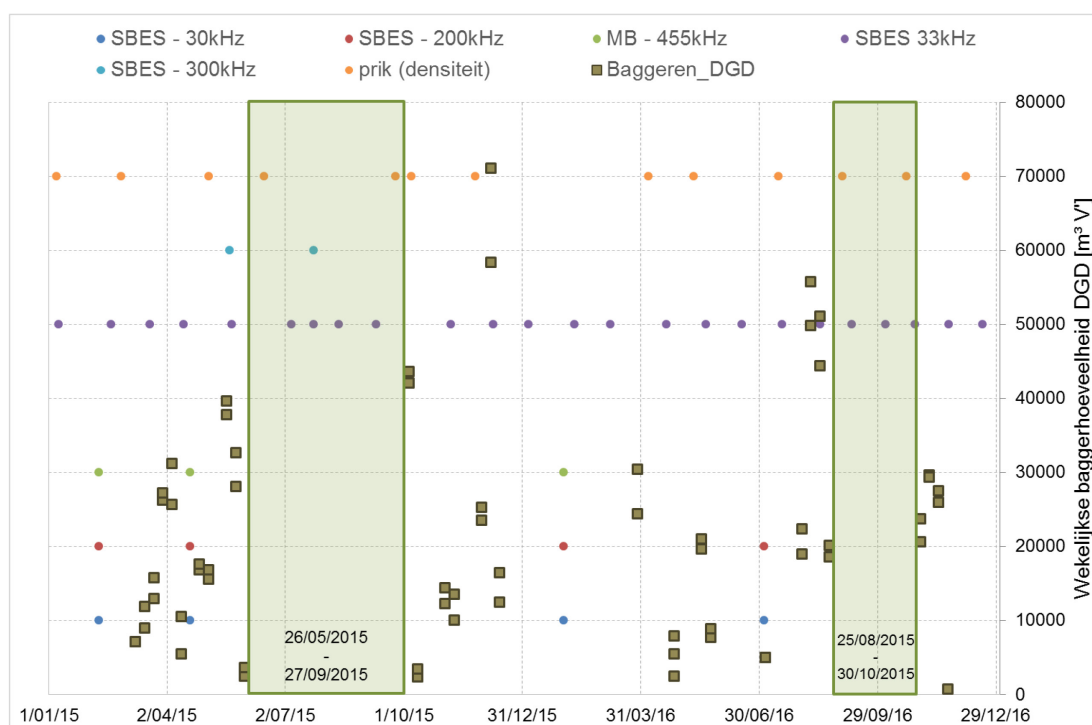
Een soortgelijke analyse als in (Ligtvoet, 2013) werd uitgevoerd voor de periode 2015-2016. Belangrijkste verschillen zijn dat in juni 2016 de Kieldrechtsluis in gebruik werd genomen, en dat voor deze jaren geen specifieke meetcampagne werd georganiseerd, maar dat gebruik gemaakt werd van reguliere gegevens. Deze reguliere gegevens zijn afkomstig uit de opvolging van de aanslibbingen in het Deurganckdok (International Marine and Dredging Consultants & Deltares, 2014) waarbij door de Vlaamse hydrografie op frequente basis SBES-peilingen uitgevoerd worden, alsook in opdracht van de Vlaamse hydrografie “densiteitsprikken” (m.b.v. Rheotune). Op basis van de periodes waarin onderhoudsbaggerwerken plaatsvonden en de momenten waarop metingen werden uitgevoerd (zie Figuur 23), werden 2 periodes (zie Tabel 2) geselecteerd waarin geen onderhoudsbaggerwerken met behulp van de sleeppopperzuiger plaatsvonden in het dok. Hierbij dient opgemerkt te worden dat in deze periodes de mogelijk bestaat (zeer reële kans) dat er nabij de commerciële ligplaatsen alsook ter hoogte van de drempel (aan de overgang tussen het dok en de Schelde), baggeracties plaatsvonden met behulp van de sweepbeam.

Beide periode worden ook in Figuur 23 weergegeven (kader) waarbij blijkt dat in beide periodes telkens 2 meetcampagnes voor densiteitsprikken plaatsvonden (bij begin en aan het eind van de periode), alsook meerdere SBES-peilingen werden uitgevoerd (zie Figuur 24 voor ligging meetpunten “prikken” en meetraaien SBES). Door de goede spreiding over de baggerloze periode, is deze informatie geschikt om te analyseren naar de opbouw van de sliblagen in het dok.

Tabel 2 – Overzicht periodes zonder onderhoudsbaggerwerken met een sleeppopperzuiger in het Deurganckdok

Periode	Startdatum	Einddatum
P1	26/05/2015	27/09/2015
P2	25/08/2016	30/10/2016

Figuur 23 – Overzicht beschikbare metingen en periodes zonder baggerwerken met sleeppopper (groene kader)



Figuur 24 – Overzicht ligging meetpunten densiteitsprofiel (oranje) en raaien SBES (grijs)



5.1.3 Spatiale variatie op één moment (2018)

In de week van 6 februari 2018 werd in opdracht van het Havenbedrijf Antwerpen een meetcampagne uitgevoerd in het Deurganckdok waarbij zowel de Admodus USP als de Rheotune werden ingezet. Het doel van deze meetcampagne was het in beeld brengen van de ruimtelijke variatie van de sliblagen in het Deurganckdok. Hiertoe werden 2 langsraaien (af- en opwaartse zijde van het dok) en 2 dwarsraaien (ter hoogte van ingang en einde van het dok) bemeten met 1 of beide toestellen (Figuur 25, in Bijlage A – detail ligging meetpunten 2018 zijn de meetpunten in detail weergegeven).

Daar waar beide toestellen ingezet werden op dezelfde locatie (selectie op basis van posities die maximaal 15 m afwijken van elkaar), is een onderlinge vergelijking mogelijk. Voor deze punten wordt zowel het verticaal densiteitsprofiel vergeleken, als de diepte waarop een bepaalde densiteit (1050 kg/m^3 , 1100 kg/m^3 , 1150 kg/m^3 , 1200 kg/m^3) voor het eerst overschreden wordt.

In de analyse worden de resultaten gepresenteerd van de langsraaien (af- en opwaartse zijde van het dok) en de dwarsraaien (einde en ingang). Voor elke raai werd op basis van de begin- en eindcoördinaat een serie van punten gedefinieerd met interval van 10 m. Voor elk punt werd binnen een straal van 20 m gezocht naar aanwezige meetpunten. Voor sommigen punten bleken er verschillende meetpunten binnen deze afstand te liggen. Hier werd gekozen voor het meetpunt dat het dichtst bij lag (met randvoorwaarde dat er voldoende metingen in de verticale werden uitgevoerd).

Daarnaast was er de specifieke vraag om de relatie tussen de karakteristieken van de sliblaag ter hoogte van de commerciële ligplaatsen en de zone hieraan grenzend te onderzoeken. Deze vraag vindt haar oorsprong in de moeilijkheid om te meten ter hoogte van de commerciële ligplaatsen, dit door de hoge bezettingsgraad door zeeschepen. Wanneer een schip afgemeerd ligt aan de kaai, is het onmogelijk om metingen uit te voeren in deze zone. De vraag rijst of de gemeten karakteristieken net buiten de ligplaats (ca. 60 m van de kaaimuur) overeenkomen met deze ter hoogte van de ligplaats.

Figuur 25 – Overzicht ligging meetpunten Admodus-USP (oranje), Rheotune (blauw) en meerpalen (wit) in het Deurganckdok tijdens de meetcampagne in 2018



5.2 Resultaten

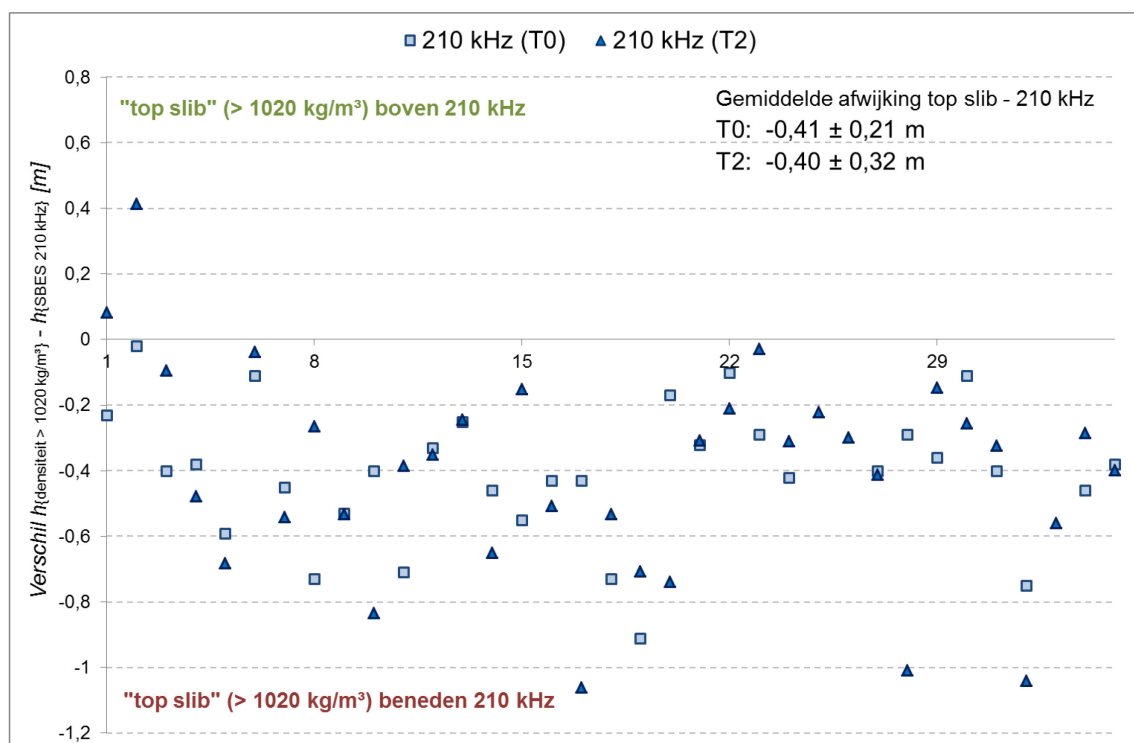
5.2.1 Temporele variatie op de korte en middellange termijn (2013)

De meetresultaten van de verschillende meetcampagnes worden hierna geanalyseerd. Hierbij wordt zowel de gemeten densiteit als de sterkte (conus-weerstand) vergeleken tussen de T0 en de T2. Vooraleer over te gaan tot de resultaten, dient opgemerkt te worden dat de dieptemeting van de GraviProbe vaak aanleiding gaf tot onlogische resultaten. Om dit te voorkomen, werd een verschuiving toegepast op de gemeten diepte zodat de eerste uitwijking van de densiteit ten opzichte van de waarde in het water (in casu⁴ brak $\rho \sim 1020 \text{ kg/m}^3$) niet boven de diepte van de SBES-peiling op 210 kHz kon liggen. Deze “correctie” werd op een identieke wijze toegepast op alle profielen, zowel voor de densiteit als de sterkte.

Figuur 26 toont het verschil tussen de diepte waarop de densiteit groter wordt dan 1020 kg/m^3 en de ligging van de topslib-laag op basis van de SBES-peiling (210 kHz). Zowel voor de T0 als voor de T2 blijkt dat de topsliblaag volgens de SBES-peiling ca. 40 cm boven deze van GraviProbe op basis van de densiteit ligt.

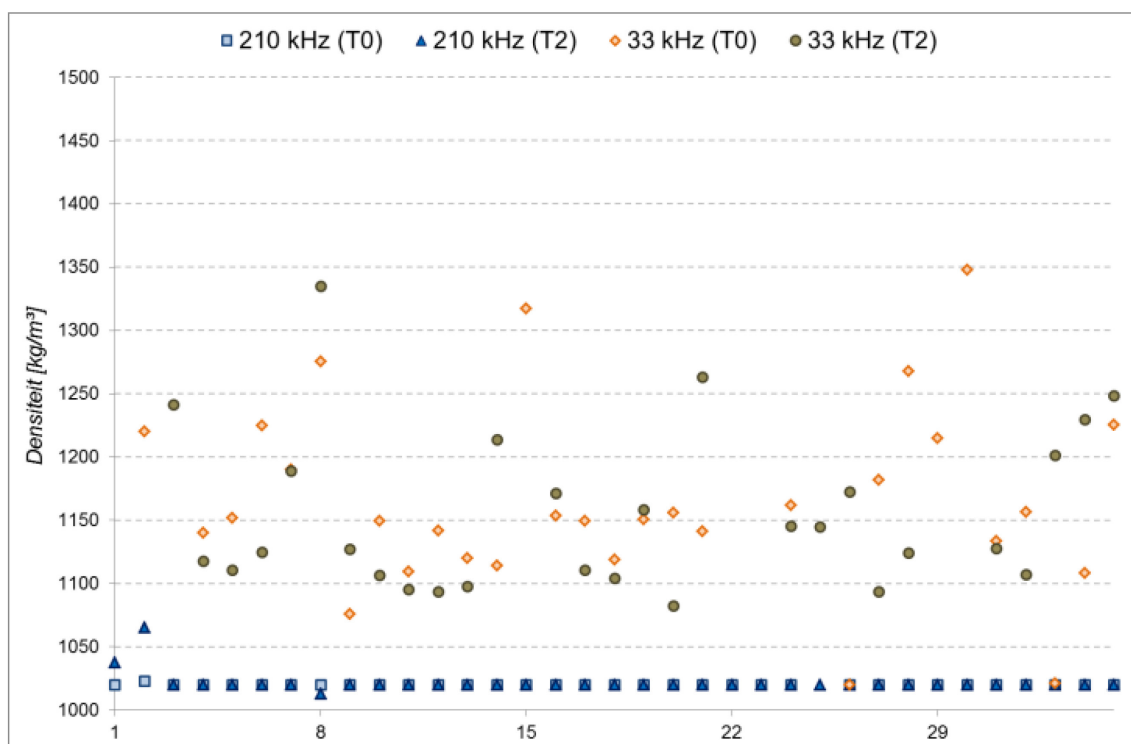
Wanneer na toepassing van de “correctie” van de diepte van de GraviProbe een vergelijking gemaakt wordt tussen de densiteit (Figuur 27) en de sterkte (Figuur 28) op de diepte van het 33 kHz signaal van de SBES, is er een grote variatie in de gevonden densiteit (meestal tussen 1100 en 1250 kg/m^3 , maar ook enkele waarden die hoger liggen) en sterkte (vaak lager dan 5 kPa , maar ook uitschieters tot 40 kPa). Een duidelijke relatie tussen de meetwaarde van het 33 kHz signaal van de SBES en de densiteit noch de sterke kan gevonden worden.

Figuur 26 - Vergelijking ligging diepte waarop densiteit $> 1020 \text{ kg/m}^3$ en SBES-diepte volgens 210 kHz (staalnummer op x-as)

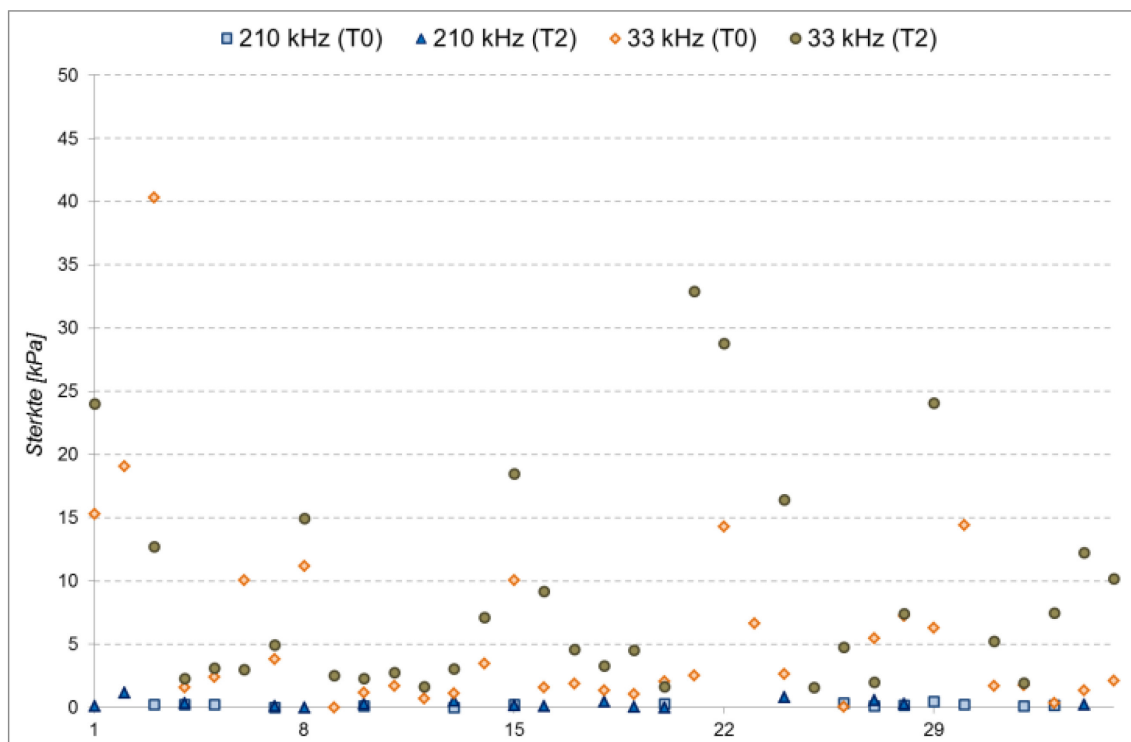


⁴ Op basis van eerdere metingen wordt in deze regio eerder een densiteit van 1010 kg/m^3 verwacht. Uit de resultaten files blijkt de minimale densiteit gemeten met de GraviProbe 1020 kg/m^3 te bedragen. Dit is vermoedelijk een toestel-instelling.

Figuur 27 - Waarde van de gemeten densiteit (na diepte-correctie) ter hoogte van de diepte op basis van de SBES – 33 kHz
(staalnummer op x-as | diepte-correctie zorgt voor samenvallen van 210 kHz-signaal en 1020 kg/m³)



Figuur 28 - Waarde van de gemeten sterkte (na diepte-correctie) ter hoogte van de diepte op basis van de SBES – 33 kHz
(staalnummer op x-as | diepte-correctie zorgt voor goede overeenkomst tussen 210 kHz-signaal en sterkte ~ 0 kPa)



Densiteit

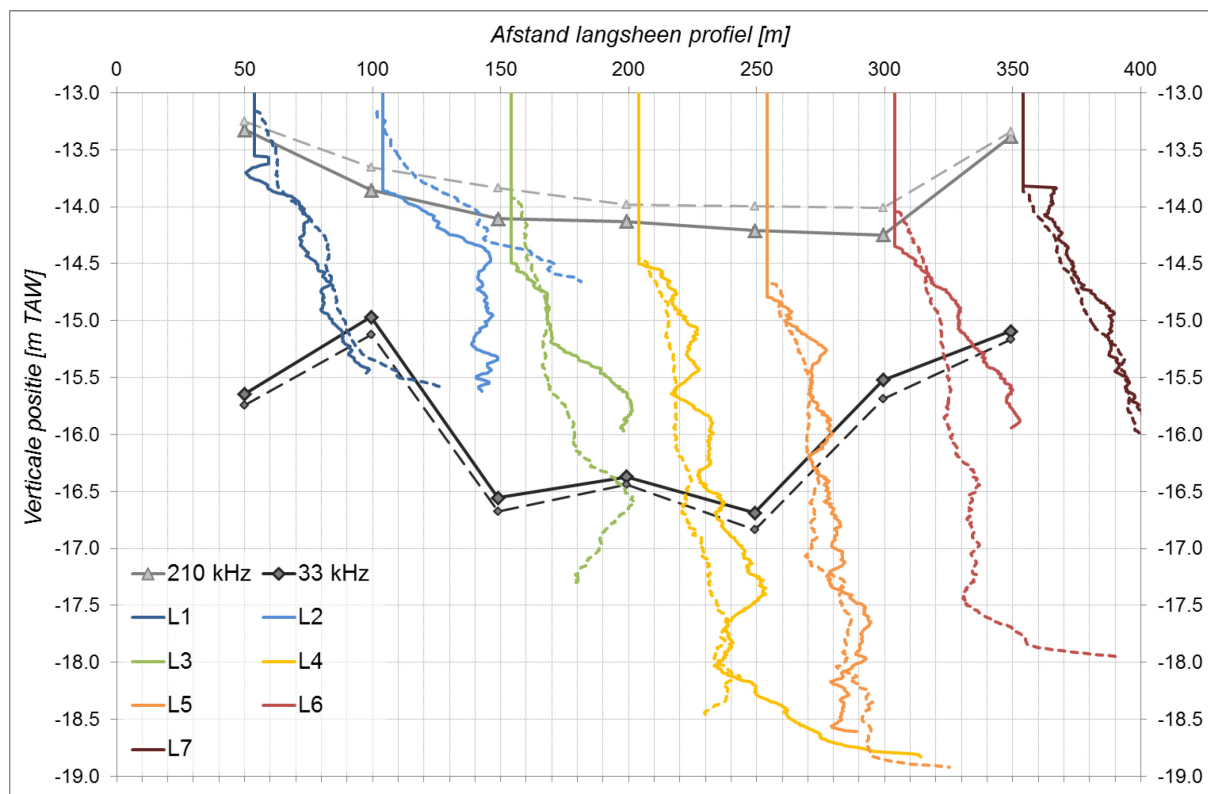
Figuur 29 tot en met Figuur 33 geeft het verloop van de densiteit weer over de verticale voor de 7 locaties gelegen op één dwarsraai. De diepte van deze profielen werd niet gecorrigeerd op basis van de eerste uitwijking ten opzichte van 1020 kg/m³ en de diepteligging van het 210 kHz signaal.

Voor dwarsraai 1 (gelegen aan het eind van het dok) is er een verhoging van de topslib-laag (op basis van 210 kHz signaal van de SBES). Op een aantal profielen (L1, L2, L3, L6) ligt het niveau waarop de densiteit toeneemt ten opzichte van deze van het water ook hoger, echter gelet op bovenstaande bemerking omtrent de bepaling van de densiteit dient dit met de nodige voorzichtigheid worden geïnterpreteerd. In het slibpakket zelf (tussen 210 kHz en 33 kHz), is de densiteit toegenomen tussen T0 en T2 voor punten L1 en L2, lijkt er een afname in densiteit te zijn voor de andere punten. Dit is zeer opmerkelijk aangezien er in deze periode geen onderhoudsbaggerwerken plaatsvonden en verwacht mag worden dat het slib eerder zal consolideren dan door een afname in densiteit gekenmerkt te worden.

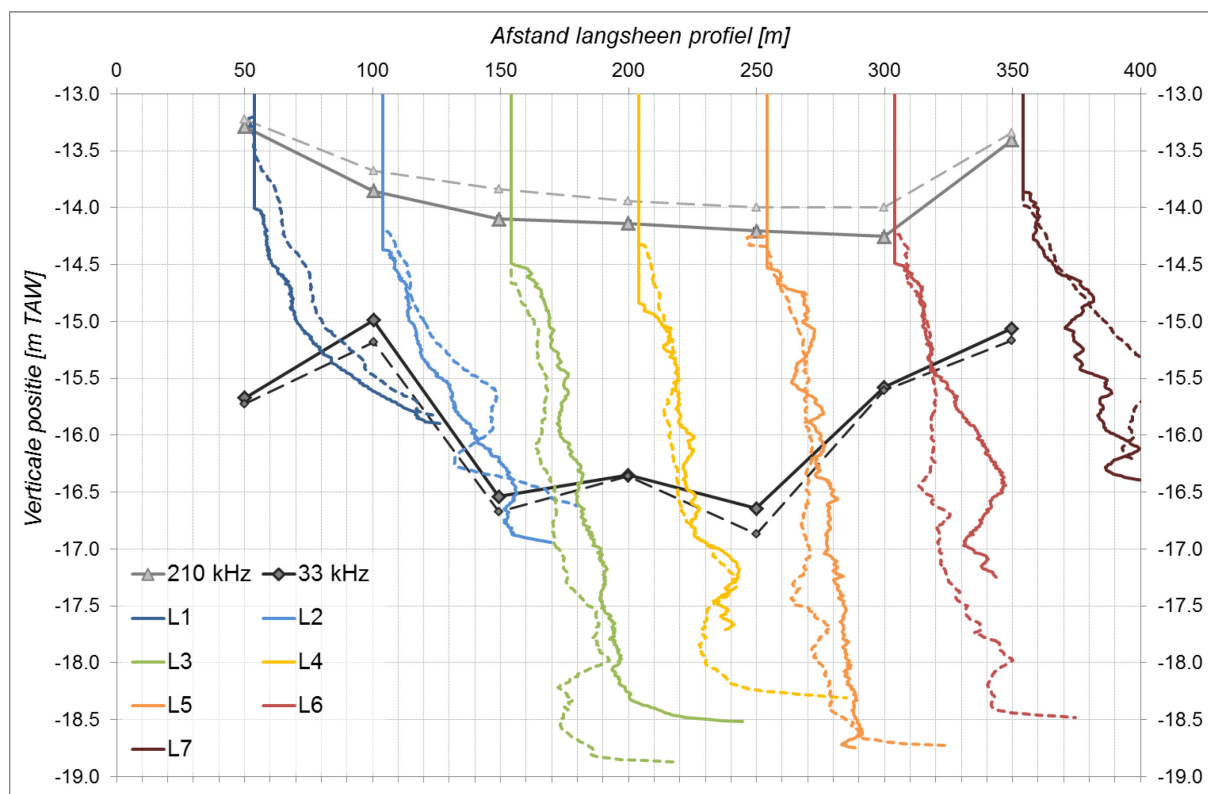
Voor dwarsraai 2 en 3 zijn de ontwikkelingen gelijkaardig aan deze voor dwarsraai 1. Dwarsraai 4 en 5 (meer naar het midden van het dok) vertonen eveneens een gelijkaardige ontwikkeling, echter een aantal punten kennen een afwijkend verloop. Punten D4_L5 en D5_L5 lijken in de initiële toestand pas slib te hebben op grotere diepte (lager dan -18 m TAW), waarbij de juistheid van de diepte dient in vraag gesteld te worden. Punten D4_L2, D5_L1 en D5_L2 worden alle 3 gekenmerkt door een toename van de densiteit tussen T0 en T2. Voor deze punten neemt het niveau waarop een densiteit van 1250 kg/m³ wordt bereikt met meer dan 50 cm toe gedurende de 4 weken tussen beide metingen. Dit voldoet aan de verwachting. In punten D4_L6 en D4_L7 treedt het omgekeerd op, wat dan weer vragen door rijzen rond de juistheid van de metingen alhier.

Leeswijzer grafieken: elke 50 m werd een verticaal densiteitsprofiel opgemeten. De resultaten worden getoond op Figuur 29 (D1) tot en met Figuur 33 (D5). De schaal van de densiteit bedraagt 50 kg/m³ per vak in de breedte, waarbij de densiteit 1000 kg/m³ bedraagt ter hoogte van de overeenkomstige positie op het profiel. Ter illustratie voor D1-L3 (groen profiel op Figuur 29): op de x-as komt 150 m (i.e. positie van het profiel) overeen met 1000 kg/m³. De verticale lijn rechts hiervan komt overeen met 1050 kg/m³, ... Ter hoogte van positie 200 m, zijn er 5 tussenliggende vakken gepaseerd, wat overeenkomt met een densiteit van $1000 + 5 \times 50 = 1250$ kg/m³. Deze waarde wordt op een diepte van ca. -15,75 m TAW bereikt voor de volle lijn (T0).

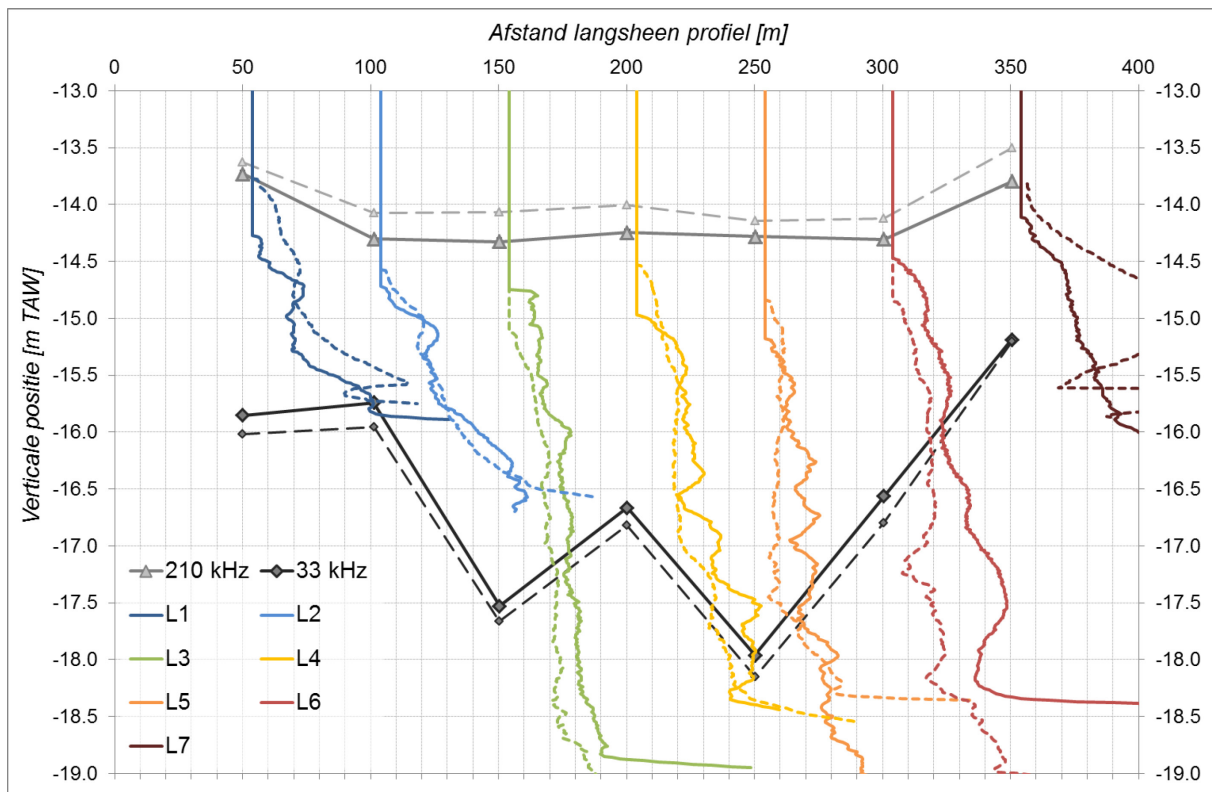
Figuur 29 - Evolutie van de densiteit (T0 (-) -> T2 (--)): GraviProbe en SingleBeam Echosounder – Dwarsprofiel 1



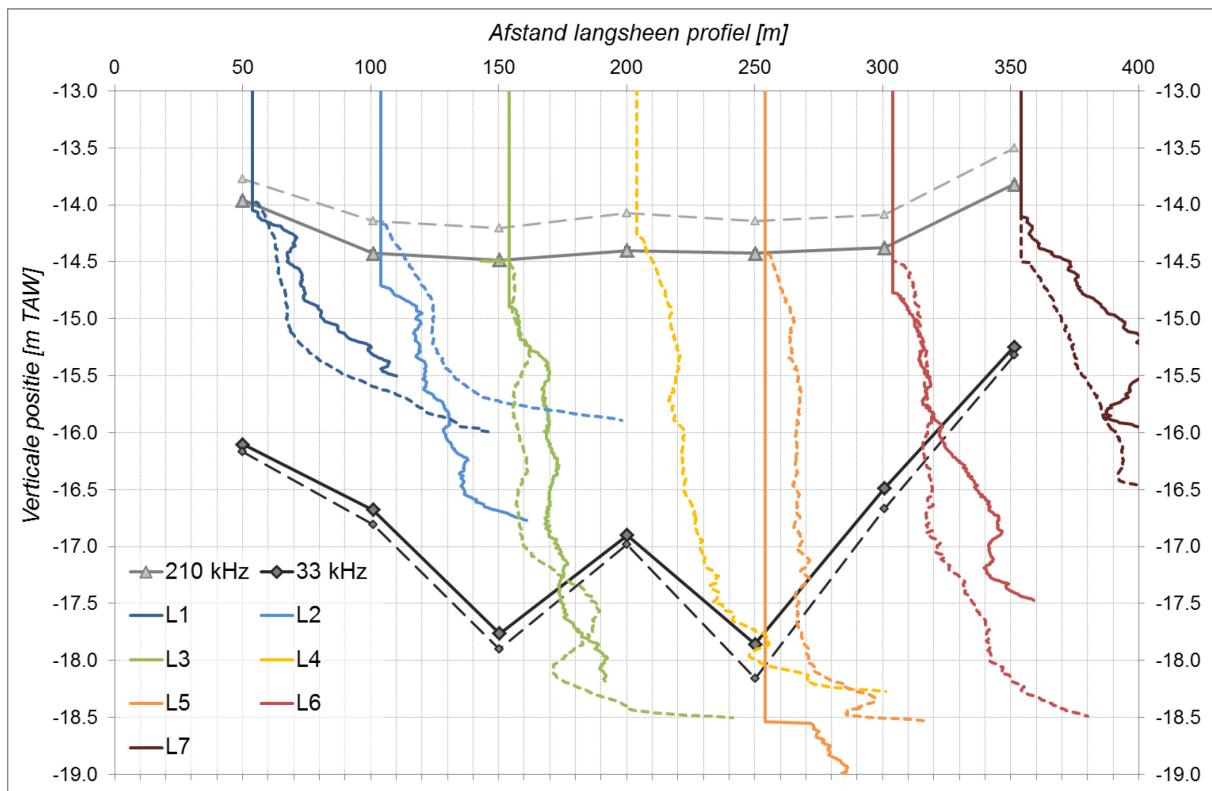
Figuur 30 - Evolutie van de densiteit (T0 (-) -> T2 (--)): GraviProbe en SingleBeam Echosounder – Dwarsprofiel 2



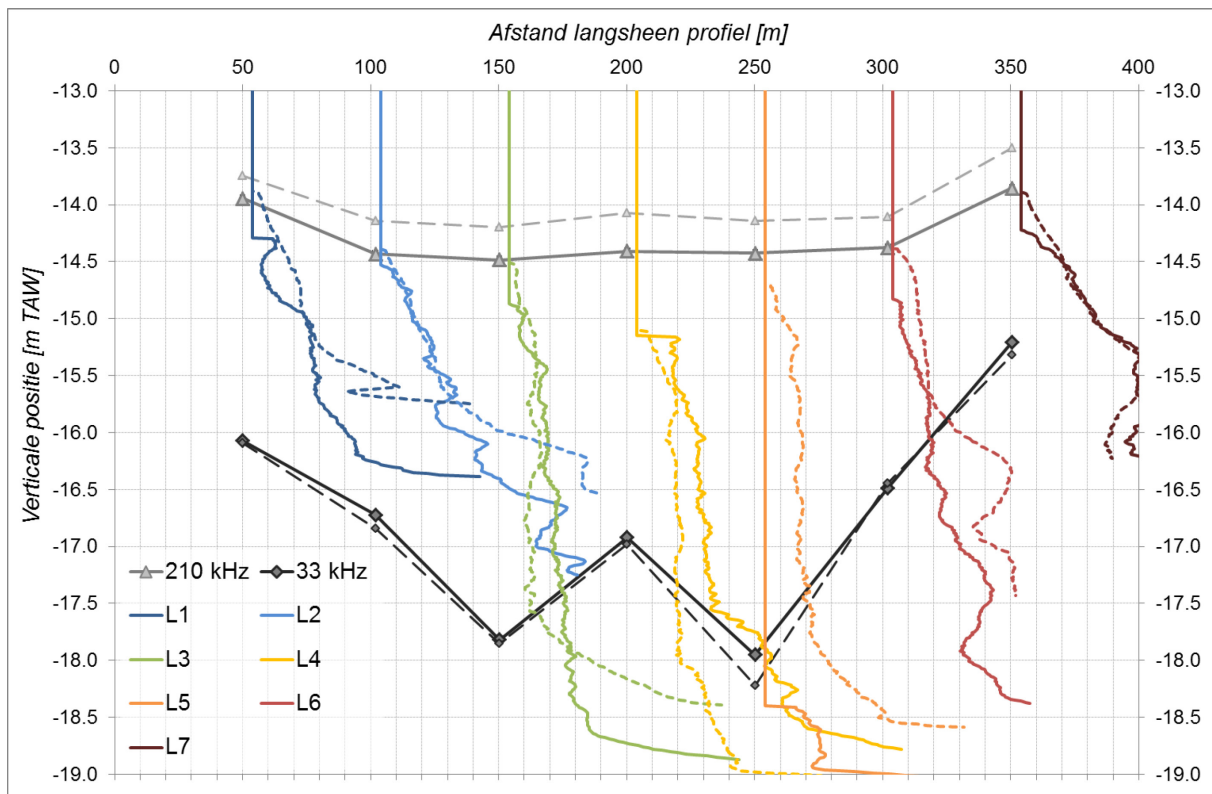
Figuur 31 - Evolutie van de densiteit (T0 (-) -> T2 (--)): GraviProbe en SingleBeam Echosounder – Dwarsprofiel 3



Figuur 32 - Evolutie van de densiteit (T0 (-) -> T2 (--)): GraviProbe en SingleBeam Echosounder – Dwarsprofiel 4



Figuur 33 - Evolutie van de densiteit (T0 (-) -> T2 (--)): GraviProbe en SingleBeam Echosounder – Dwarsprofiel 5



Reologie

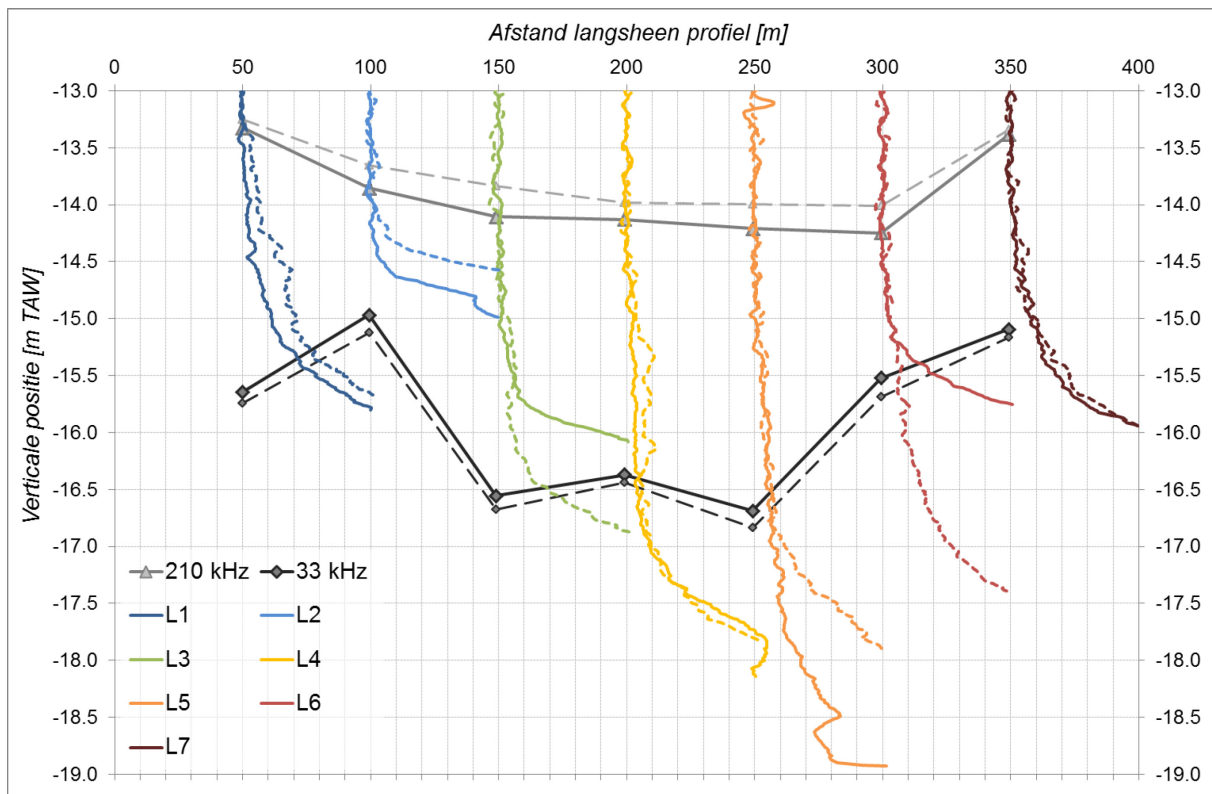
Figuur 34 tot en met Figuur 38 geeft het verloop van de sterkte (conus-weerstand) weer over de verticale voor de 7 locaties gelegen op één dwarsraai. De diepte van deze profielen werd niet gecorrigeerd op basis van de eerste uitwijking ten opzichte van 1020 kg/m³ en de diepteligging van het 210 kHz signaal.

Net zoals bij de densiteit doen zich hier ook ontwikkelingen voor die sterk verschillen van punt tot punt. Een aantal van deze ontwikkelingen vallen binnen de verwachting (opbouw van sterkte omwille van consolidatie gedurende de 4 weken), maar er zijn ook veel punten die een afwijkend gedrag vertonen.

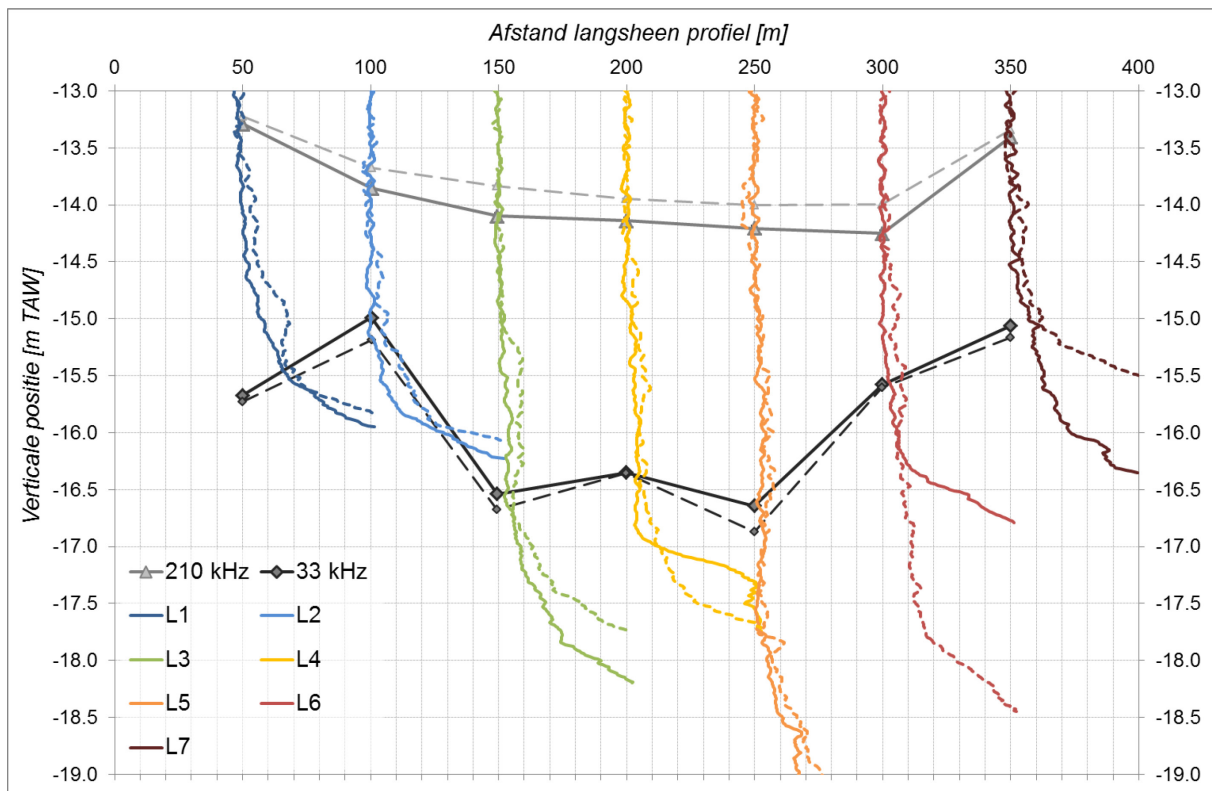
Figuur 39 toont de ligging van lijnen met gelijke sterkte voor dwarsraai 1 tijdens de T0 opname. Uit deze lijnen komt het getrapt aanlegprofiel van het dok (-17 m TAW nabij kaaimuur, -19 m TAW in centrale sleuf van 200 m breed) naar voor. Deze variatie in diepte van de lijnen met gelijke sterkte is het meest uitgesproken voor de hogere densiteiten (> 1100 kg/m³), maar kan ook teruggevonden worden in de topslib-laag (1020 kg/m³).

Leeswijzer grafieken: elke 50 m werd een verticaal sterkteprofiel opgemeten. De resultaten worden getoond op Figuur 34 (D1) tot en met Figuur 38 (D5). De schaal van de sterkte bedraagt 20 kPa per vak in de breedte, waarbij de sterkte 0 kPa bedraagt ter hoogte van de overeenkomstige positie op het profiel. Ter illustratie voor D1-L6 (rood profiel op Figuur 34): op de x-as komt 300 m (i.e. positie van het profiel) overeen met 0 kPa. De verticale lijn rechts hiervan komt overeen met 20 kPa, ... Ter hoogte van positie 350 m, zijn er 5 tussenliggende vakken gepaseerd, wat overeenkomt met een densiteit van $5 \times 20 = 100$ kPa. Deze waarde wordt op een diepte van ca. -15,75 m TAW bereikt voor de volle lijn (T0).

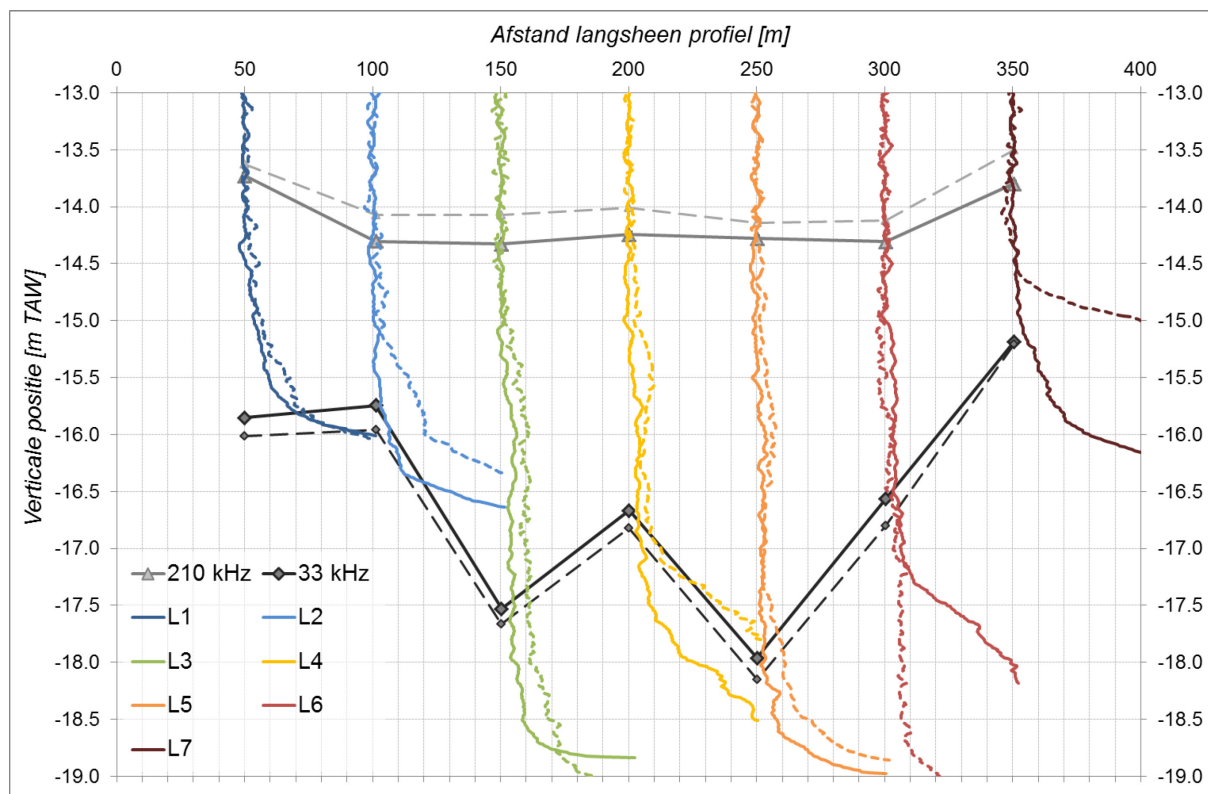
Figuur 34 - Evolutie van de sterkte (T0 (-) -> T2 (--)): GraviProbe en SingleBeam Echosounder – Dwarsprofiel 1



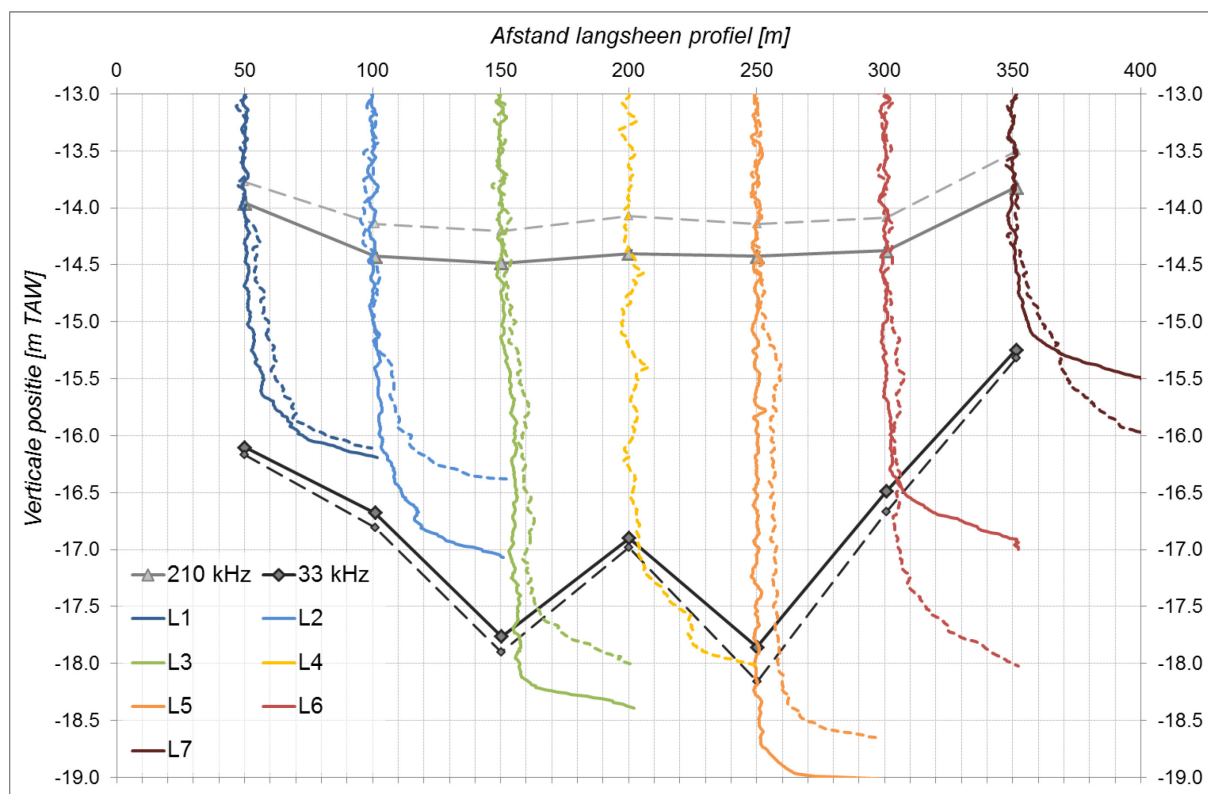
Figuur 35 - Evolutie van de sterkte (T0 (-) -> T2 (--)): GraviProbe en SingleBeam Echosounder – Dwarsprofiel 2



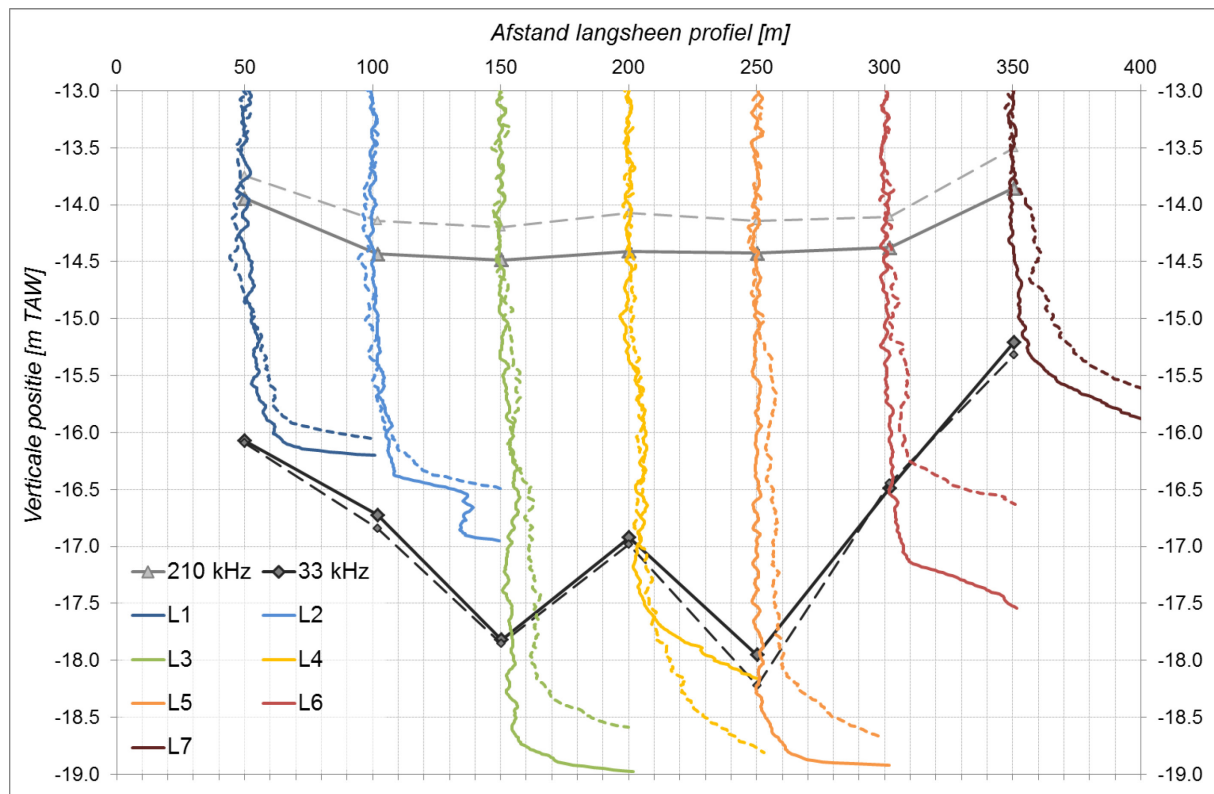
Figuur 36 - Evolutie van de sterkte (T0 (-) -> T2 (--)): GraviProbe en SingleBeam Echosounder – Dwarsprofiel 3



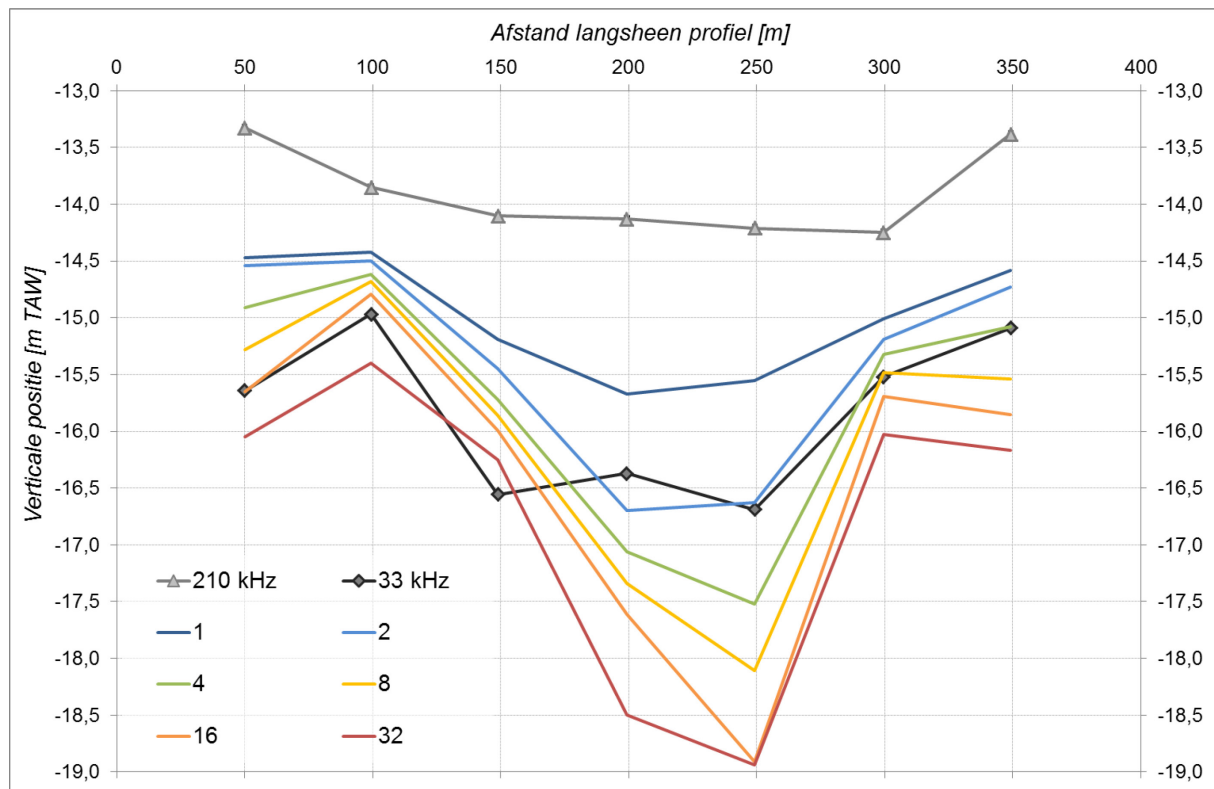
Figuur 37 - Evolutie van de sterkte (T0 (-) -> T2 (--)): GraviProbe en SingleBeam Echosounder – Dwarsprofiel 4



Figuur 38 - Evolutie van de sterkte (T0 (-) -> T2 (--)): GraviProbe en SingleBeam Echosounder – Dwarsprofiel 5



Figuur 39 - Ligging van iso-sterkte-lijnen (T0) en diepteligging SBES – Dwarsprofiel 1

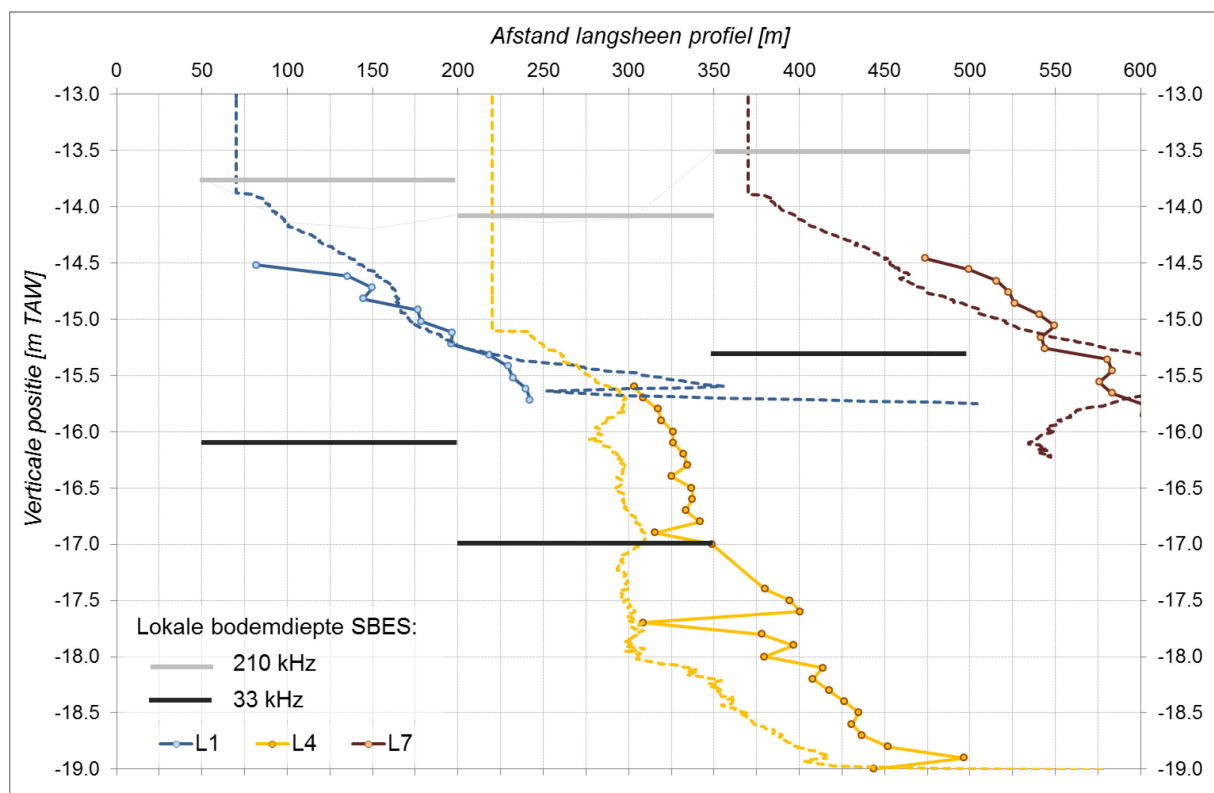


In situ vergelijking

Op 3 april 2013 werden er in het Deurganckdok in situ staalnames uitgevoerd met behulp van de Beeker-sampler aan boord van de MS Hondius. Gelet op de grote diepte in het dok werd een loden vis (100 kg) aan de Beeker-sampler bevestigd om de staalname op ca. 20 m diepte mogelijk te maken. Ondanks de uitdagende omstandigheden werden er 3 succesvolle bemonsteringen uitgevoerd. Deze resultaten (densiteit, sterkte) van de deelstalen werden vergeleken met de resultaten van de T2-campagne, uitgevoerd een week later. Hierbij dient opgemerkt te worden dat de bepaling van de exacte diepte van bemonstering niet mogelijk was (uitgevoerd met kraan zonder teller, geen druksensor op Beeker-sampler). Om alsnog de vergelijking mogelijk te maken, werd de diepte van de staalname bijgesteld zodat de overeenstemming van het verloop het best overeenkwam met dit van de GraviProbe-meting.

Figuur 40 toont de vergelijking van de gemeten densiteit van de GraviProbe en de deelstalen (m.b.v. Anton Paar DMA 38) voor de 3 profielen. Het eerste profiel (D5_L1) geeft een goede overeenstemming voor de middelste stalen en een lagere densiteit voor de bovenste en onderste substalen. In het tweede profiel (D5_L4) geven de substalen een hogere (25 – 50 kg/m³) densiteit ten opzichte van de GraviProbe. In het derde profiel (D5_L7) geven de bovenste substalen een hogere (~ 25 kg/m³) densiteit ten opzichte van de GraviProbe. In het onderste deel neemt de densiteit in de substalen toe, terwijl de GraviProbe een sterke toename gevolgd door een terugval kent. Een mogelijke verklaring kan enerzijds het verschillend moment van staalname zijn, en anderzijds een verschil in locatie, aangezien het schip bij het nemen van de Beeker-stalen niet perfect op positie kon blijven (niet gebruiken schroef tijdens staalname).

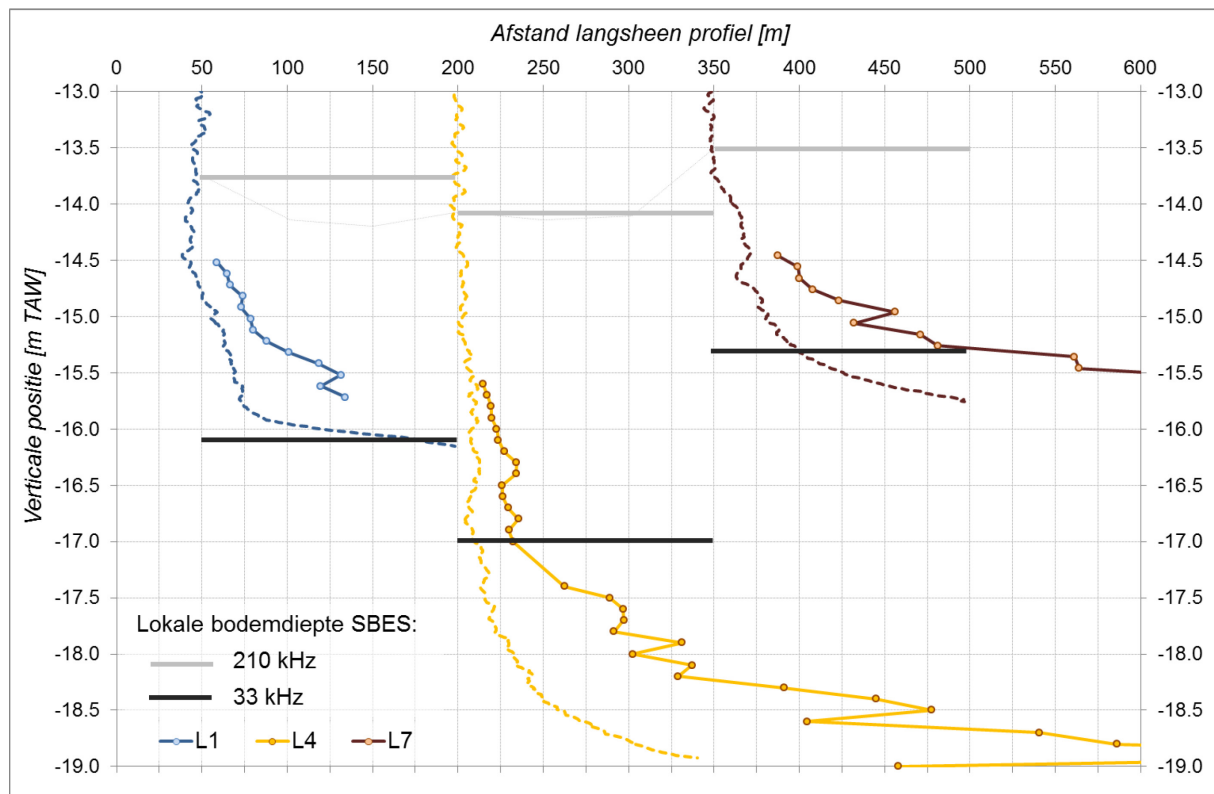
Figuur 40 - Evolutie van de densiteit: GraviProbe (- -) en Beeker (-o-)



Leeswijzer grafiek: de resultaten op bovenstaande figuur worden getoond met een schaal van de densiteit van 25 kg/m³ per vak in de breedte, waarbij de densiteit 1000 kg/m³ bedraagt ter hoogte van de overeenkomstige positie op het profiel.

Figuur 41 toont de vergelijking van de gemeten sterkte van de GraviProbe (conus-weerstand) en de deelstalen (vloeiersterkte via vinproef) voor de 3 profielen. Alle 3 de profielen geven een grotere sterkte op basis van de substalen dan op basis van de GraviProbe-meting. Zoals reeds eerder aangehaald is de bepaalde “sterkte” niet identiek (penetratie $\Leftrightarrow$ rotatie) wat sowieso aanleiding geeft tot een verschil. Wel kan opgemerkt worden dat het verloop in de diepte wel gelijkaardig is.

Figuur 41 - Evolutie van de sterkte: GraviProbe (TCPR) (- -) en Beeker (yield stress) (-o-)



Leeswijzer grafiek: de resultaten op bovenstaande figuur worden getoond met een schaal van de sterkte van 5 kPa per vak in de breedte, waarbij de sterkte 0 kPa bedraagt ter hoogte van de overeenkomstige positie op het profiel.

5.2.2 Temporele variatie op de korte en middellange termijn (2015-2016)

De ontwikkelingen op de korte en middellange termijn worden in de volgende paragrafen getoond voor enkele karakteristieke locaties in het dok:

- De drempel ter hoogte van de overgang tussen het dok en de Schelde
- De ingang van het dok, waar een neer aanwezig die voor extra water- en sedimentuitwisseling zorgt
- Het midden van het dok
- Het einde van het dok, nabij de Kioldrechtsluis

Voor elke zone werd een dwarsraai gedefinieerd waarop enerzijds metingen van de densiteit zijn gebeurd op een aantal punten ("prikken") en waarvoor anderzijds in de onmiddellijke omgeving SBES-peilingen beschikbaar zijn. Deze metingen werden geprojecteerd op de raai (ruimtelijk interval van 2 m) door te zoeken naar het dichtstbij liggende meetpunt uit de SBES-peiling.

Voor elke locatie wordt een analyse uitgevoerd voor 2 beschikbare periodes (P1 in 2015 en P2 in 2016) zonder onderhoudsbaggerwerkzaamheden met de sleephopperzuiger. Tabel 3 geeft een overzicht van de beschikbare metingen in beide periodes, alsook de gehanteerde kleuren in de figuren.

Tabel 3 – Overzicht beschikbare metingen 2015 - 2016

Periode	Moment van meten	Type meting	Opmerking
P1-T0	12 juni 2015	Rheotune	
P1-T0	7 juli 2015	SBES	
P1-T1	24 juli 2015	SBES	Slechts beperkt aantal meetgegevens
P1-T2	8 augustus 2015	SBES	
P1-T3	10 september 2015	SBES	
P1-T1	25 september 2015	Rheotune	
P1-T2	7 oktober 2015	Rheotune	
P2-T0	2 september 2016	Rheotune	
P2-T0	9 september 2016	SBES	
P2-T1	5 oktober 2016	SBES	
P2-T1	21 oktober 2016	Rheotune	
P2-T2	28 oktober 2016	SBES	

Raai ter hoogte van de drempel

Figuur 42 toont de ligging van de raai ter hoogte van de drempel alsook de meetpunten gelegen op deze raai. Figuur 43 en Figuur 44 tonen de evolutie van de diepteligging op basis van de SBES-peiling (210 kHz en 33 kHz), alsook de evolutie in het verticale densiteitsprofiel voor de meetpunten op deze raai voor de baggervrije periode in 2015. Tussen de T0 en de T2 is er een duidelijke toename in de sliblaag op deze raai, zowel op basis van de SBES-peiling als de densiteitsprikken. In het centrale deel van de raai neemt de diepte (zowel 210 kHz als 33 kHz) met ca. 50 cm af. Opmerkelijk is wel de toename in diepte (rond afstand 150 m) tussen de T2 en T3, wat mogelijks te wijten is aan werkzaamheden met de sweepbeam ter hoogte van de drempel.

De densiteitsprikken laten een gelijkaardige ontwikkeling zien in de top-sliblaag. De ontwikkelingen van de lagen met grotere densiteit zijn niet steeds zichtbaar (met name in het T1 moment), doordat het meettoestel schijnbaar een maximaal meetbare densiteit (ca. 1,25 t/m³) bereikt. De punten 0105 en 0106 laten wel een verhoging van ca. 150 cm zien in de meer compacte sliblaag (densiteit > 1,3 t/m³). Een vergelijking met de SBES-peilingen is hier niet mogelijk door een verschil in de momenten van opname.

Figuur 45 en Figuur 46 tonen de evolutie van de diepteligging op basis van de SBES-peiling (210 kHz en 33 kHz), alsook de evolutie in het verticale densiteitsprofiel voor de meetpunten op deze raai voor de baggervrije periode in 2016. Tussen de T0 en de T1 is er een duidelijke toename van de dikte van de sliblaag op deze raai, zowel op basis van de SBES-peiling als de densiteitsprikken. In het centrale deel van de raai neemt de diepte (zowel 210 kHz als 33 kHz) met ca. 150 cm af. Opmerkelijk is wel de toename in diepte (rond afstand 200-250 m) tussen de T1 en T2, wat mogelijks te wijten is aan werkzaamheden met de sweepbeam ter hoogte van de drempel.

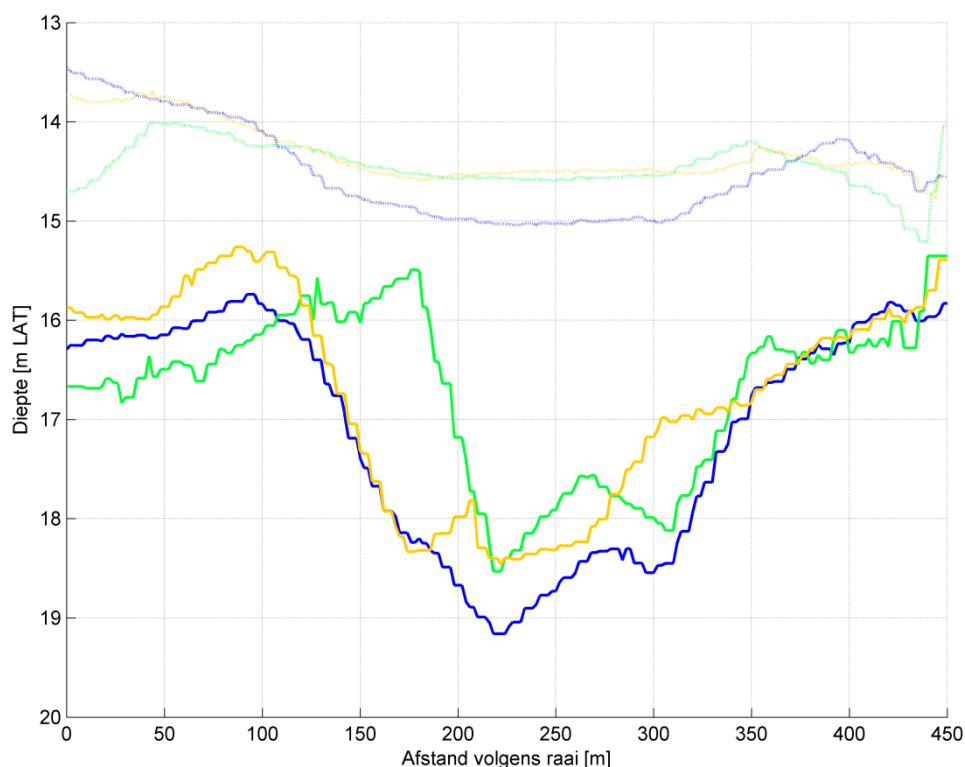
De densiteitsprikken laten een gelijkaardige ontwikkeling zien in de topslib-laag. Met name voor de punten 0104, 0105 en 0106 is er een toename van de sliblaag met ca. 50 cm, wat weliswaar aanzienlijk minder is dan op basis van de SBES-peilingen.

Figuur 42 – Overzicht ligging meetpunten densiteitsprofiel (oranje) en meetraaien SBES (grijs) en uitgevoerde raaien (geel) ter hoogte van de drempel en de ingang van het dok



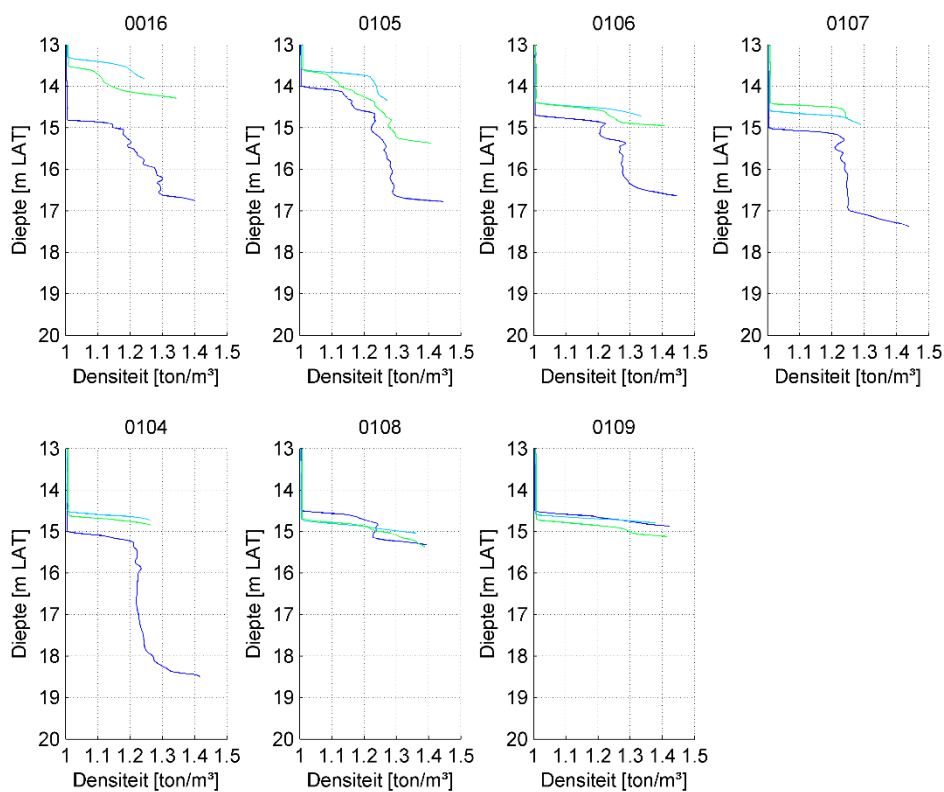
Figuur 43 – Diepteligging 2015 op basis van SBES peiling: volle lijn = 33 kHz, stippellijn = 210 kHz

20150707 | 20150724 | 20150812 | 20150910



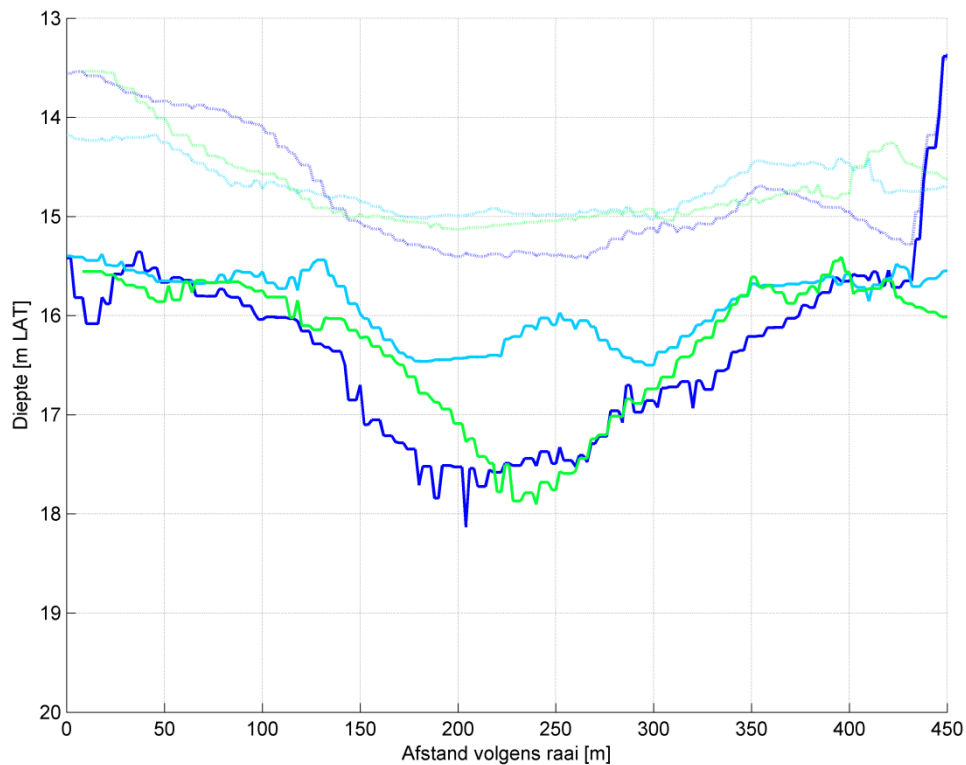
Figuur 44 – Variatie densiteit over de verticale (2015)

20150612 | 20150925 | 20151007



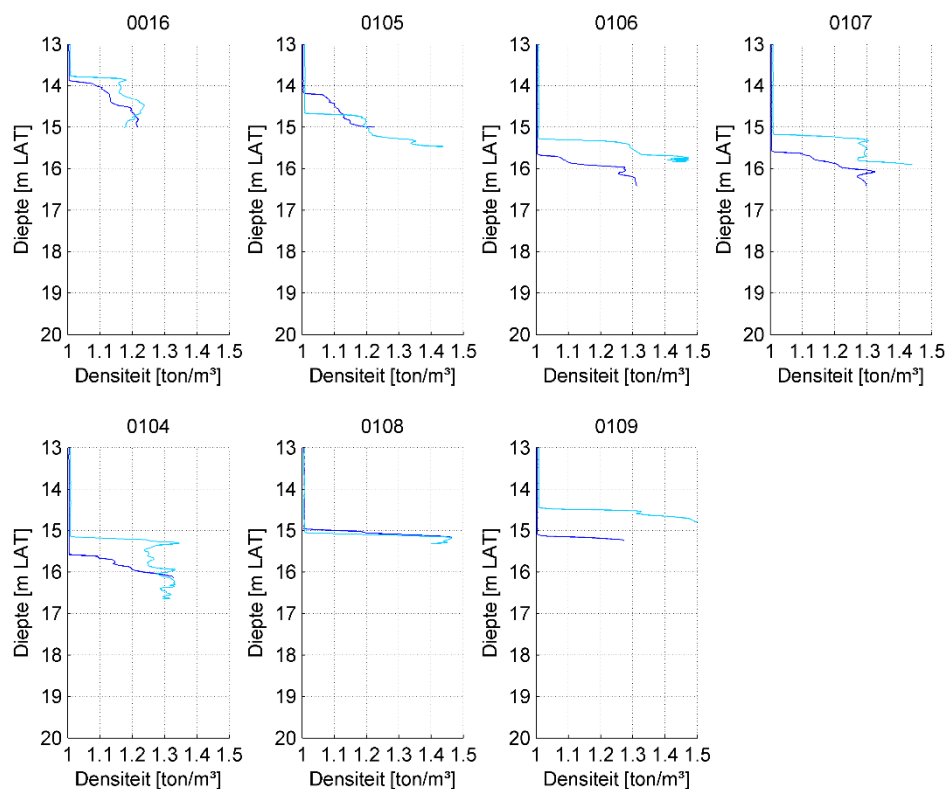
Figuur 45 – Diepteligging 2016 op basis van SBES peiling: volle lijn = 33 kHz, stippellijn = 210 kHz

20160909 | 20161005 | 20161028



Figuur 46 – Variatie densiteit over de verticale (2016)

20160902 | 20161021



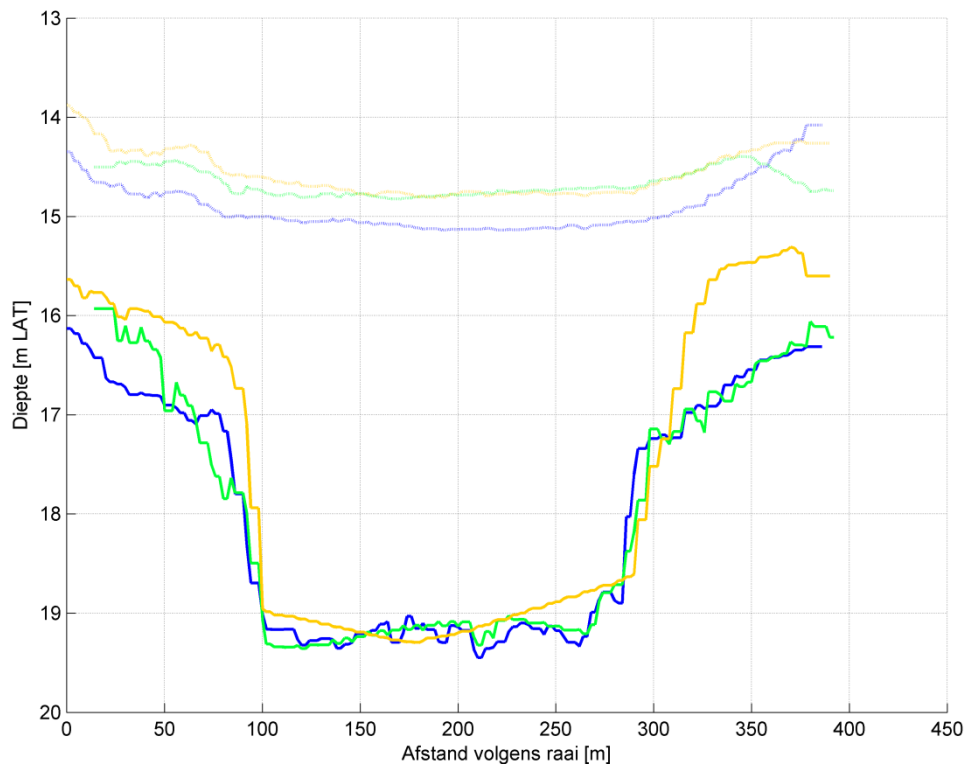
Raai ter hoogte van de ingang

Figuur 42 toont, in het geel, de ligging van de raai ter hoogte van de ingang van het dok alsook de meetpunten gelegen op deze raai. Figuur 47 en Figuur 48 tonen de evolutie van de diepteligging op basis van de SBES-peiling (210 kHz en 33 kHz), alsook de evolutie in het verticale densiteitsprofiel voor de meetpunten op deze raai voor de baggervrije periode in 2015. Tussen de T0 en de T2 zijn er quasi geen verschillen in de diepteligging op basis van de 33 kHz (op afname diepte langs noordzijde tot een afstand van 50 m), terwijl er wel een afname in de diepte van ca. 30 cm is op basis van de 210 kHz. Tussen de T2 en T3 is er weinig verschil in de 210 kHz diepteligging, terwijl de diepte buiten de centrale sleuf (zuidkant) op basis van de 33 kHz wel afneemt met ca. 100 cm. Door het ontbreken van densiteitsprikken binnen de periode, is deze ontwikkeling niet te verifiëren inzake densiteit. Wel is er een aanzienlijke toename in densiteit in de sliblaag tussen het begin en het einde van de baggervrije periode. Met name voor de centrale sleuf (punten 0088, 0073 en 0103) is dit opmerkelijk: daar waar de SBES-peiling weinig variatie geven, evolueert de ligging van de 1,3 t/m³ lijn van een diepte van ca. 19 m bij het begin van de periode naar ca. 15 m op het einde van de periode.

Figuur 49 en Figuur 50 tonen de evolutie van de diepteligging op basis van de SBES-peiling (210 kHz en 33 kHz), alsook de evolutie in het verticale densiteitsprofiel voor de meetpunten op deze raai voor de baggervrije periode in 2016. De 210 kHz peiling toont een afname van de diepte van ca. 50 cm. Dit komt ook tot uiting in de densiteitsprikken (top-sliblaag). De ontwikkeling van diepte op basis van de 33 kHz peiling laat een geleidelijke verondieping (150 cm over volledige periode) zien in de centrale sleuf. Buiten de centrale sleuf wijzigt de diepte weinig.

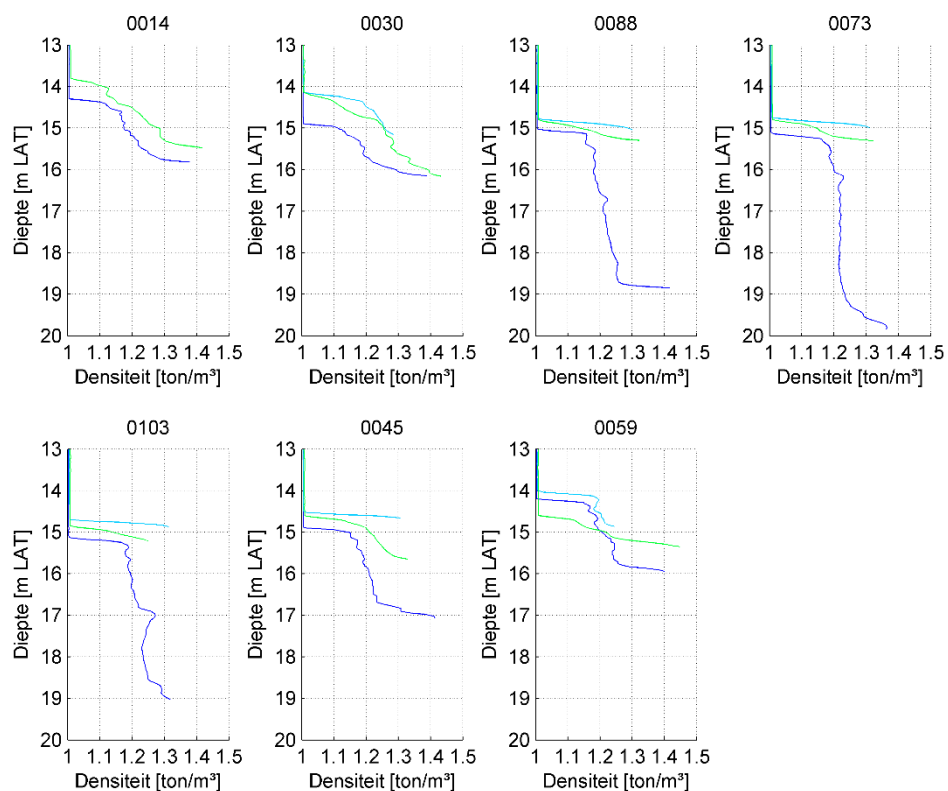
Figuur 47 – Diepteligging 2015 op basis van SBES peiling: volle lijn = 33 kHz, stippellijn = 210 kHz

20150707 | 20150724 | 20150812 | 20150910



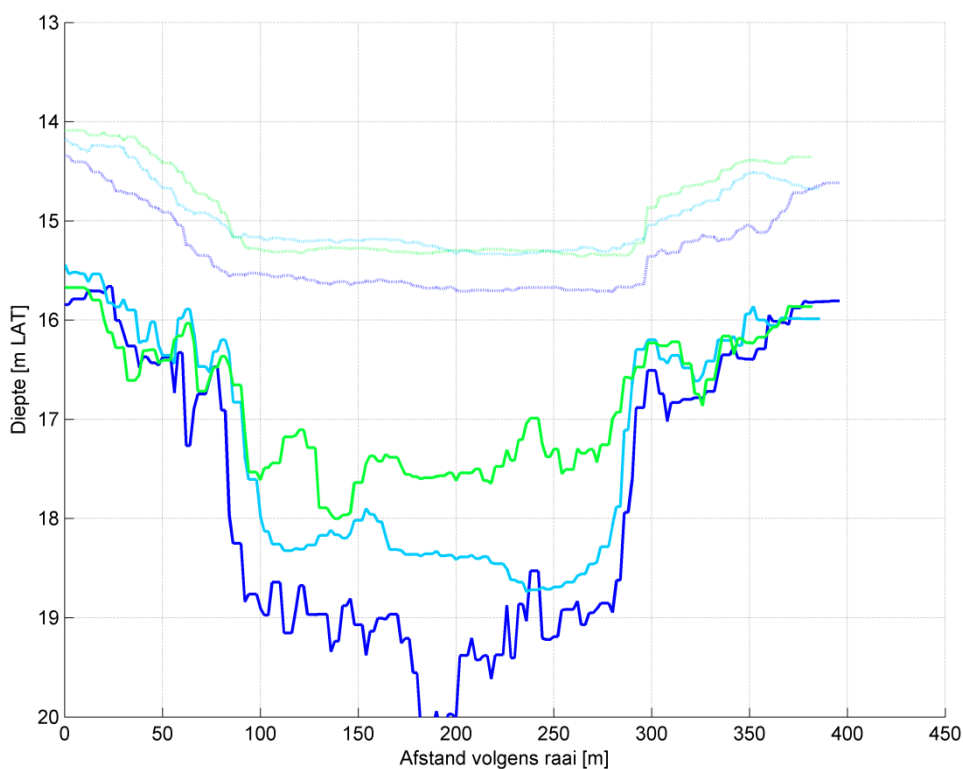
Figuur 48 – Variatie densiteit over de verticale (2015)

20150612 | 20150925 | 20151007



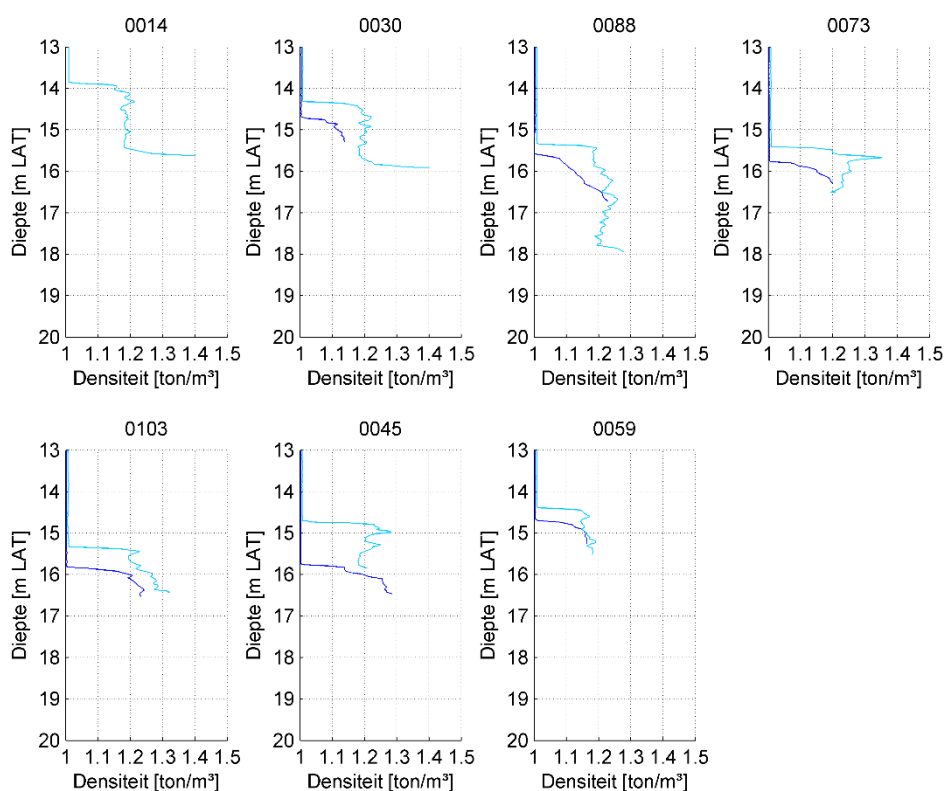
Figuur 49 – Diepteligging 2016 op basis van SBES peiling: volle lijn = 33 kHz, stippellijn = 210 kHz

20160909 | 20161005 | 20161028



Figuur 50 – Variatie densiteit over de verticale (2016)

20160902 | 20161021



Raai ter hoogte van het midden

Figuur 51 toont de ligging van de raai ter hoogte van het midden van het dok alsook de meetpunten gelegen op deze raai. Figuur 52 en Figuur 53 tonen de evolutie van de diepteligging op basis van de SBES-peiling (210 kHz en 33 kHz), alsook de evolutie in het verticale densiteitsprofiel voor de meetpunten op deze raai voor de baggervrije periode in 2015. Tussen de T0 en de T2 zijn er quasi geen verschillen in de diepteligging op basis van de 33 kHz, terwijl er wel een afname in de diepte is van ca. 50 cm aan de noordzijde tot 10 cm aan de zuidzijde, dit op basis van de 210 kHz. Tussen de T2 en T3 is er weinig verschil in de 210 kHz diepteligging, terwijl de diepte buiten de centrale sleuf op basis van de 33 kHz wel afneemt met ca. 20 cm. De densiteitsprikken geven enkele opmerkelijke resultaten: ter hoogte van de punten 0082, 0067 en 0097 komt de top-sliblaag lager te liggen in de tijd, dit terwijl de 210 kHz diepteligging afneemt. Daarnaast geven de meeste punten een verhoging weer van de densere sliblagen (bv. 1,2 t/m³ neemt tot 2 m toe voor punten 0024, 0067 en 0097), terwijl dit zich niet manifesteert in de SBES-peilingen.

Figuur 54 en Figuur 55 tonen de evolutie van de diepteligging op basis van de SBES-peiling (210 kHz en 33 kHz), alsook de evolutie in het verticale densiteitsprofiel voor de meetpunten op deze raai voor de baggervrije periode in 2016. De 210 kHz peiling toont een afname van de diepte van ca. 50 cm. Dit komt ook tot uiting in de densiteitsprikken (top-sliblaag voor punten 0082, 0067 en 0097). De ontwikkeling van diepte op basis van de 33 kHz peiling laat een geleidelijke verondieping (120 cm over volledige periode) zien in de centrale sleuf. Buiten de centrale sleuf wijzigt de diepte weinig.

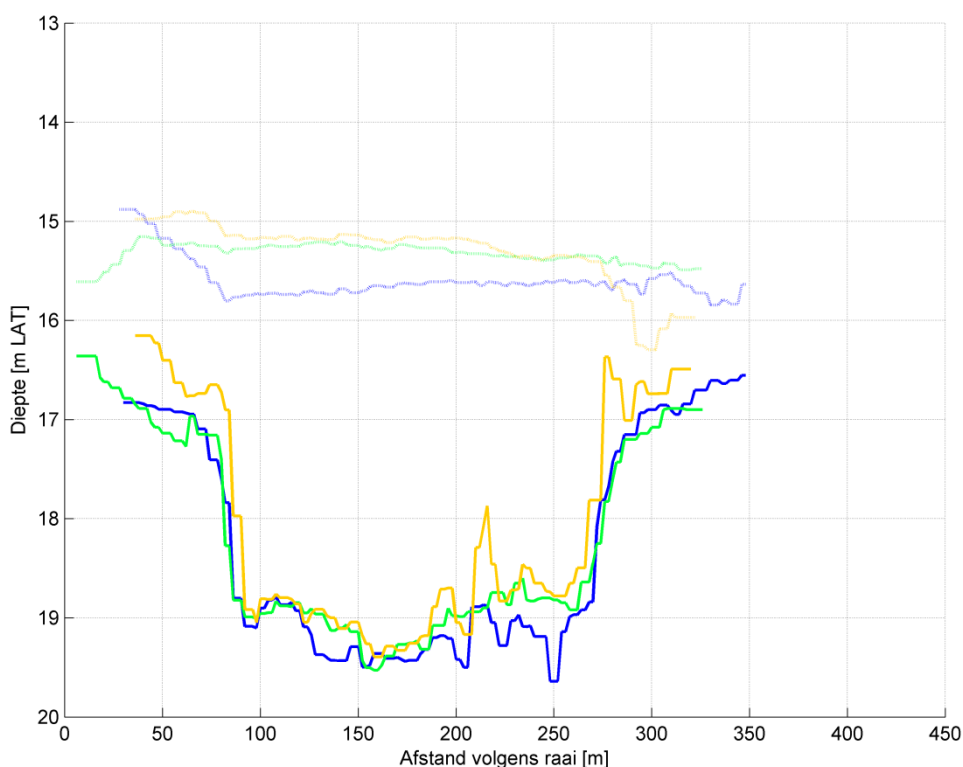
Het patroon op deze raai vertoont grote gelijkenissen met dit van de raai ter hoogte van de ingang.

Figuur 51 – Overzicht ligging meetpunten densiteitsprofiel (oranje) en meetraaien SBES (grijs) en uitgevoerde raaien (geel) ter hoogte van het midden en einde van het dok



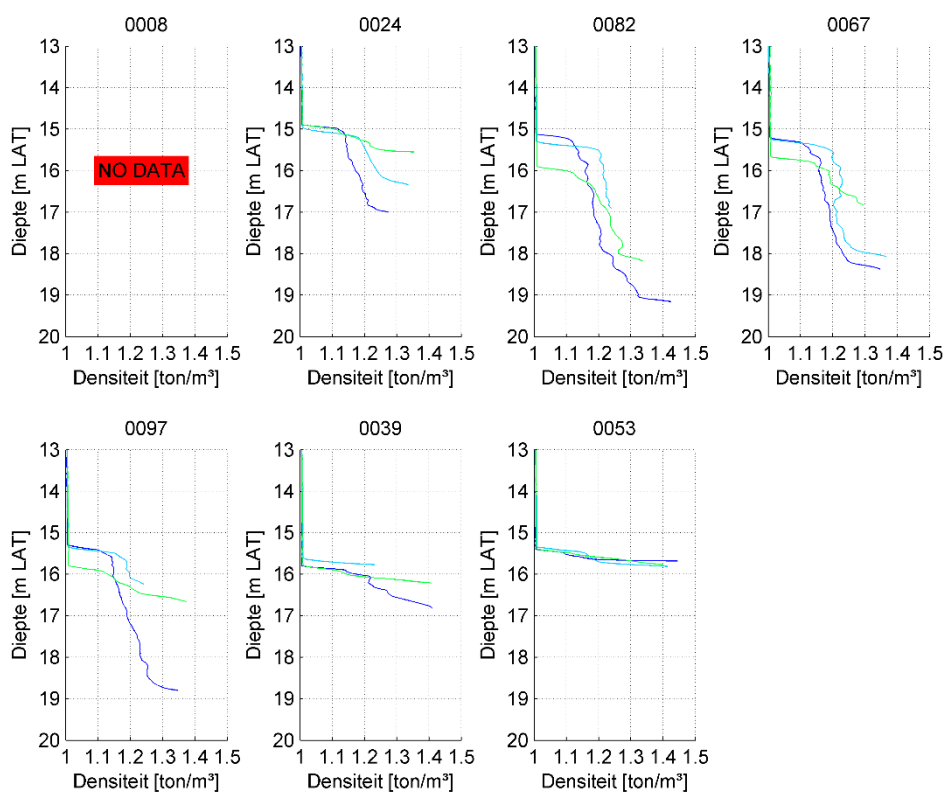
Figuur 52 – Diepteligging 2015 op basis van SBES peiling: volle lijn = 33 kHz, stippellijn = 210 kHz

20150707 | 20150724 | 20150812 | 20150910



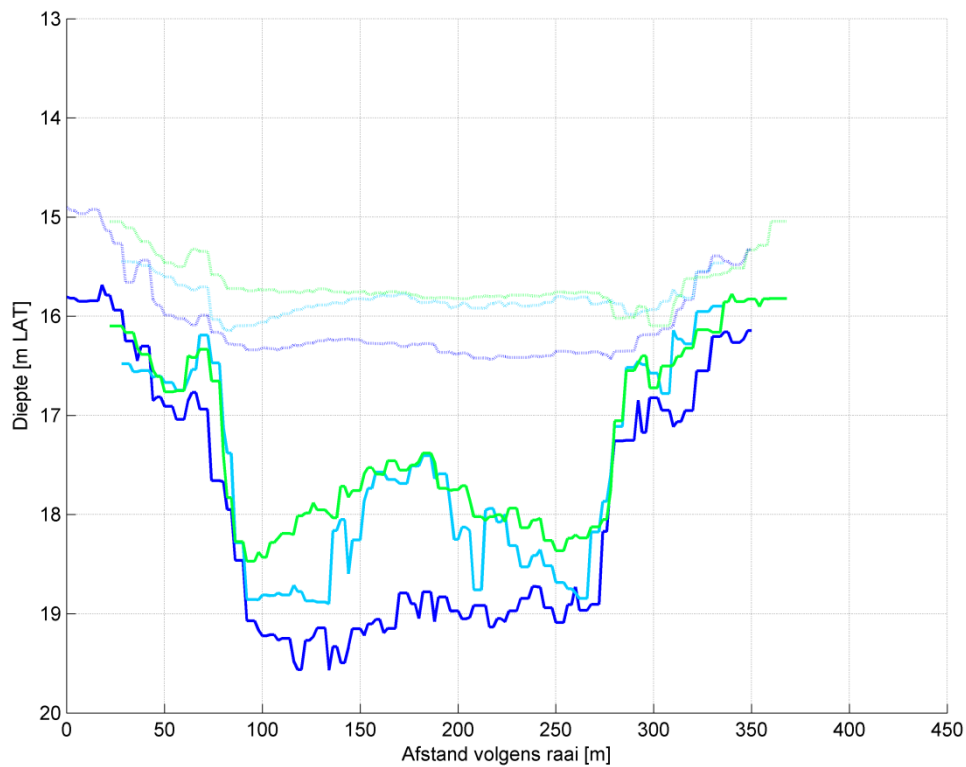
Figuur 53 – Variatie densiteit over de verticale (2015)

20150612 | 20150925 | 20151007



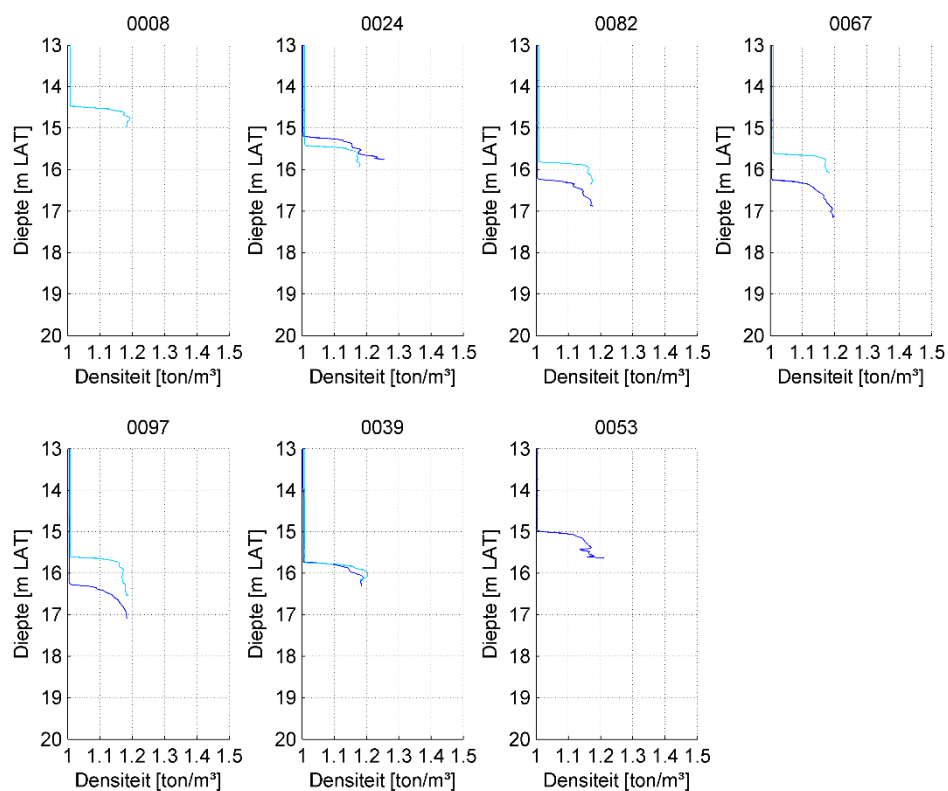
Figuur 54 – Diepteligging 2016 op basis van SBES peiling: volle lijn = 33 kHz, stippellijn = 210 kHz

20160909 | 20161005 | 20161028



Figuur 55 – Variatie densiteit over de verticale (2016)

20160902 | 20161021



Raai ter hoogte van het einde

Figuur 51 toont de ligging van de raai ter hoogte van van het einde van het dok alsook de meetpunten gelegen op deze raai. Figuur 56 en Figuur 57 tonen de evolutie van de diepteligging op basis van de SBES-peiling (210 kHz en 33 kHz), alsook de evolutie in het verticale densiteitsprofiel voor de meetpunten op deze raai voor de baggervrije periode in 2015. De resultaten van de SBES-peilingen vertonen een zeer chaotisch verloop. Dit kan toegeschreven worden aan de grotere afstand tussen de meetraaien van de SBES. Door de raai te kiezen ter hoogte van de densiteitsprikken, blijkt deze in het midden tussen SBES-metingen te vallen, waardoor de geprojecteerde gegevens de data van beide meetraaien combineert en aanleiding geeft de de variatie in diepte.

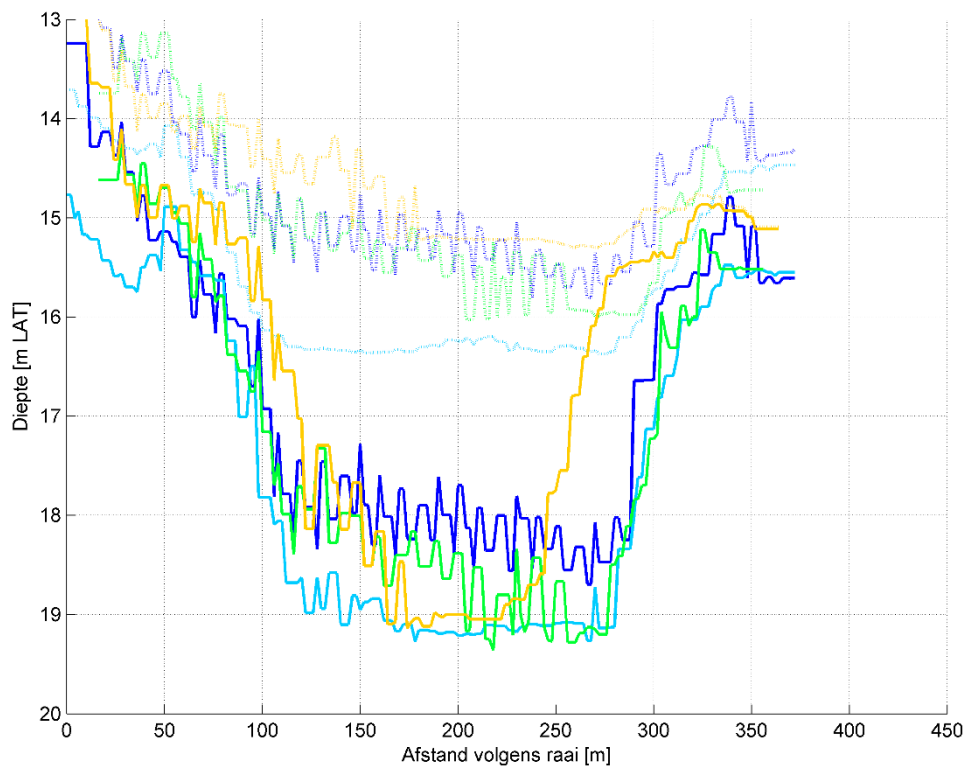
Opmerkelijk is het verloop in de diepteligging: tussen de T0 en T1 is er een toename in de diepte met ca. 100 cm, ondanks de afwezigheid van baggerwerken. Vervolgens neemt de diepte geleidelijk af tussen de T1 en de T3, iets wat zich het sterkste manifesteert in de 210 kHz peiling. De densiteitsprikken laten maar een zeer kleine variatie zien tussen het begin en het einde van de beschouwde periode.

Figuur 58 en Figuur 59 tonen de evolutie van de diepteligging op basis van de SBES-peiling (210 kHz en 33 kHz), alsook de evolutie in het verticale densiteitsprofiel voor de meetpunten op deze raai voor de baggervrije periode in 2016. Tussen de T0 en de T1 is er een duidelijke toename in de sliblaag op deze raai, zowel op basis van de SBES-peiling als de densiteitsprikken. In het centrale deel van de raai neemt de diepte (zowel 210 kHz als 33 kHz) met ca. 100 cm af. Tussen de T1 en T2 wijzigt de diepte amper op basis van de 33 kHz.

De densiteitsprikken laten een gelijkaardige ontwikkeling zien in de topslib-laag. Met name voor de punten 0017, 0075, 0060, 0090, 0032 en 0046 is er een toename van de sliblaag met ca. 50 cm, wat weliswaar minder is dan op basis van de SBES-peilingen.

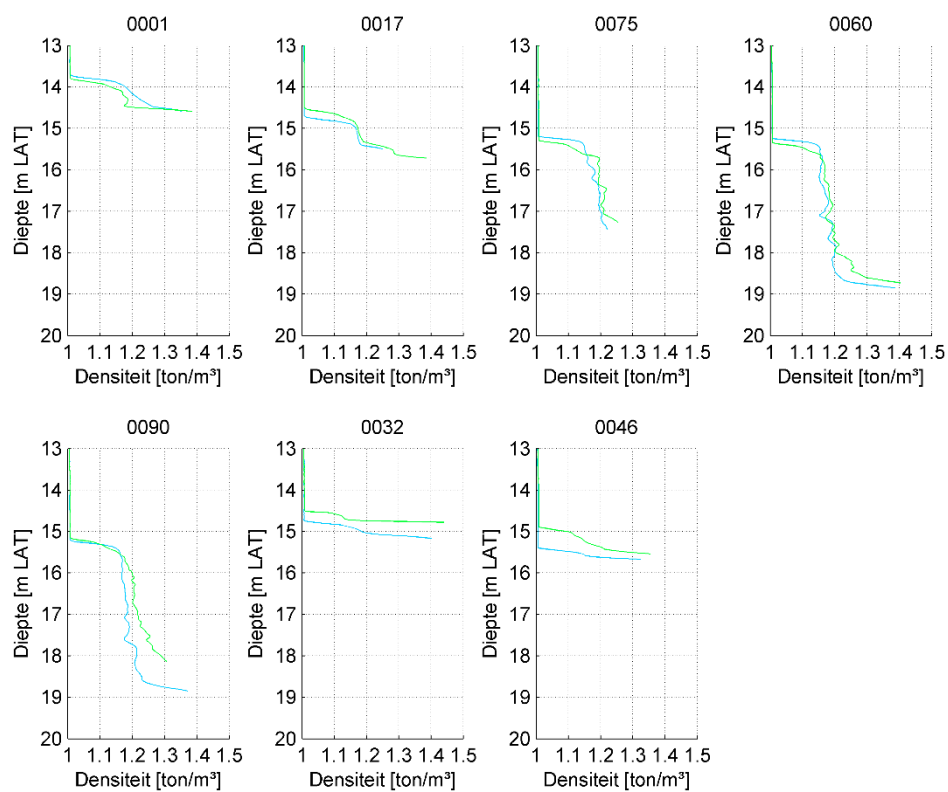
Figuur 56 – Diepteligging 2015 op basis van SBES peiling: volle lijn = 33 kHz, stippellijn = 210 kHz

20150707 | 20150724 | 20150812 | 20150910



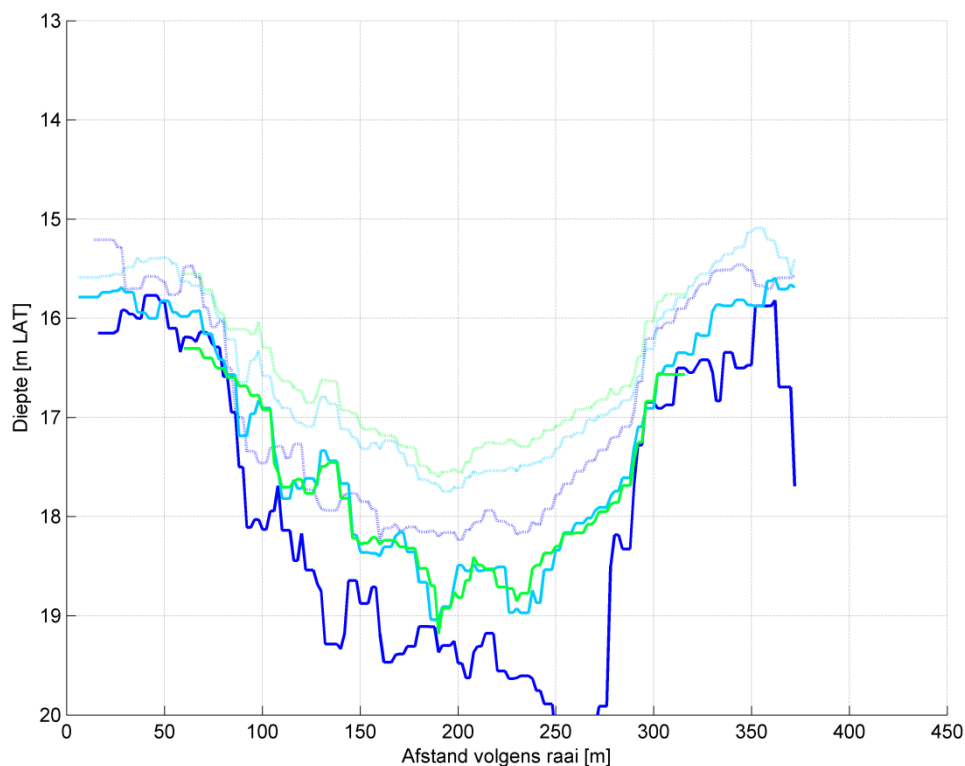
Figuur 57 – Variatie densiteit over de verticale (2015)

20150612 | 20150925 | 20151007



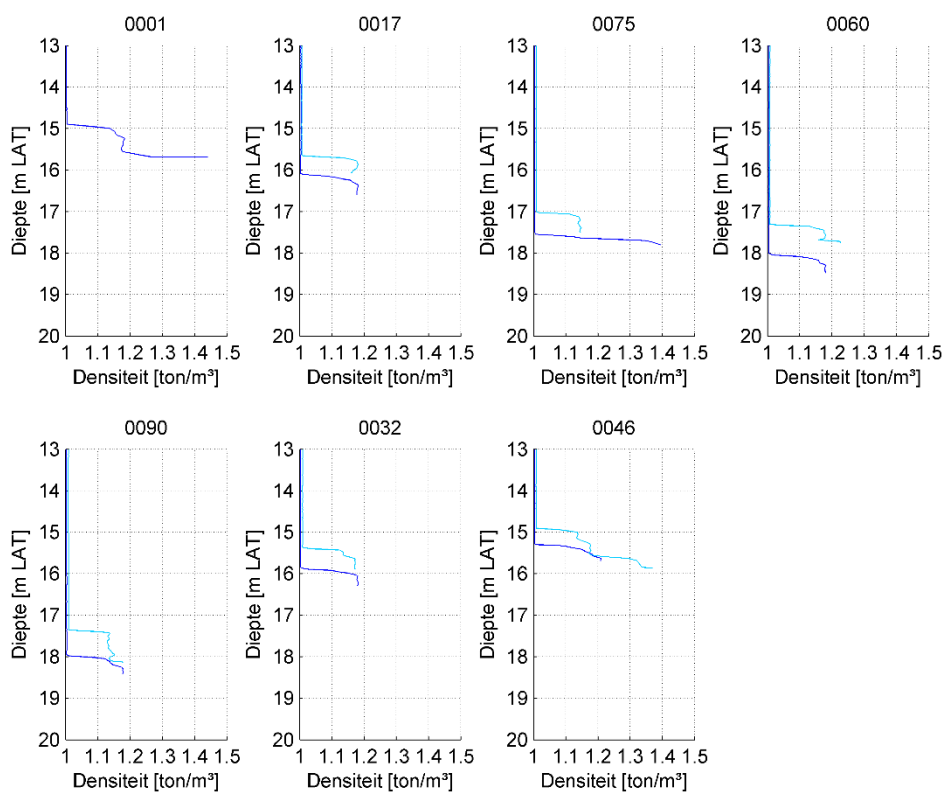
Figuur 58 – Diepteligging 2016 op basis van SBES peiling: volle lijn = 33 kHz, stippellijn = 210 kHz

20160909 | 20161005 | 20161028



Figuur 59 – Variatie densiteit over de verticale (2016)

20160902 | 20161021

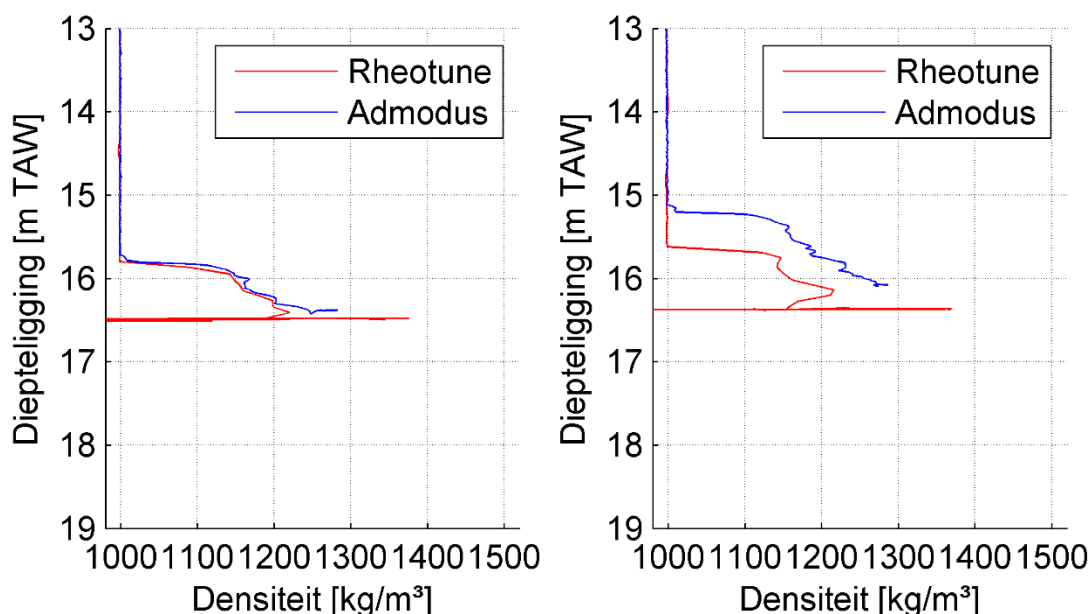


5.2.3 Spatiale variatie op één moment

Vergelijking meettoestellen

In Bijlage B – vergelijking densiteitsprofielen worden de densiteitsprofielen weergegeven voor alle locaties waar zowel metingen werden uitgevoerd met de Admodus-USP als de Rheotune. Figuur 60 toont ter illustratie 2 meetpunten die de variatie in overeenstemming aantonen: de linkse figuur toont een zeer goede overeenstemming tussen de densiteit gemeten met de Admodus-USP en de Rheotune, terwijl de rechtse figuur een duidelijke afwijking toont, vooral in de diepteligging van de top-sliblaag (ca. 50 cm verschil); daarnaast valt ook op dat de Rheotune “terugvalt” vanaf de waarden 1200 kg/m³ overschreden hebben, wat erop duidt dat de Rheotune een maximaal meetbare densiteit heeft.

Figuur 60 – Vergelijking (Admodus-USP en Rheotune) densiteitsprofielen op zelfde locaties in het Deurganckdok campagne 2018

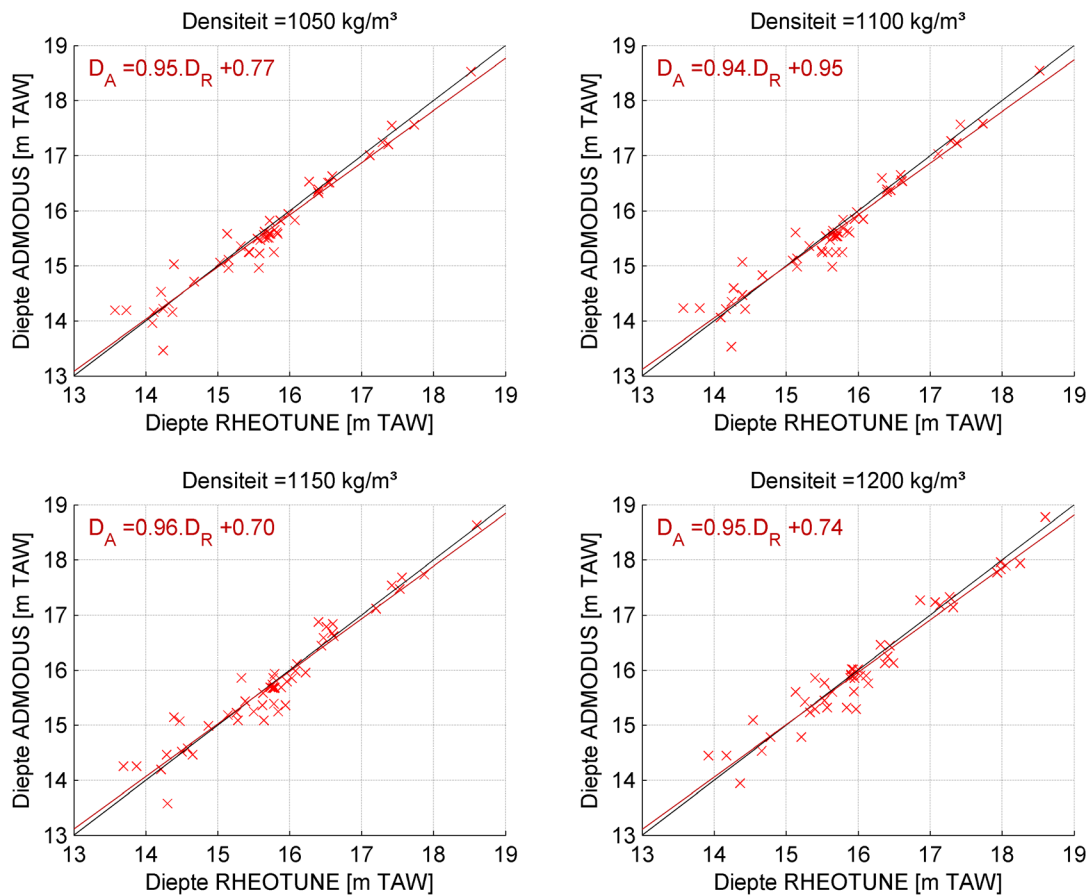


Figuur 61 toont de vergelijking tussen de diepte waarop de densiteit van respectievelijk 1050, 1100, 1150 en 1200 kg/m³ voor het eerst wordt overschreden door beide toestellen. Hieruit blijkt dat de waarden gespreid liggen rond de 1-1-lijn. Tabel 4 geeft een overzicht van de gemiddelde afwijkingen in de diepteligging voor verschillende densiteit. Hieruit blijkt dat de densiteit gemeten met Rheotune gemiddeld gezien enkele cm dieper ligt dan bij de Admodus-USP. Het grootste verschil (9 ± 24 cm) treedt op bij een densiteit van 1010 kg/m³, terwijl bij een densiteit van 1150 kg/m³ de gemiddelde afwijking zeer klein is (1 ± 30 cm). Hierbij dient opgemerkt te worden dat de gepresenteerde getallen gemiddelde waarden zijn en dat voor individuele metingen de afwijkingen groter (verschil tot 75 cm) zijn.

Tabel 4 – Overzicht verschil in diepteligging (Rheotune – Admodus-USP) overschrijding densiteit

1010	1050	1100	1150	1200
$0,09 \pm 0,24$ m	$0,05 \pm 0,26$ m	$0,05 \pm 0,27$ m	$0,01 \pm 0,30$ m	$0,05 \pm 0,27$ m

Figuur 61 – Vergelijking diepte waarop bepaalde densiteit wordt overschreden met bepaald meettoestel
Zwarte lijn: 1-1-lijn | x: diepte op gemeenschappelijke locatie | rode lijn: lineaire regressie



Ruimtelijke variatie – langsraaien

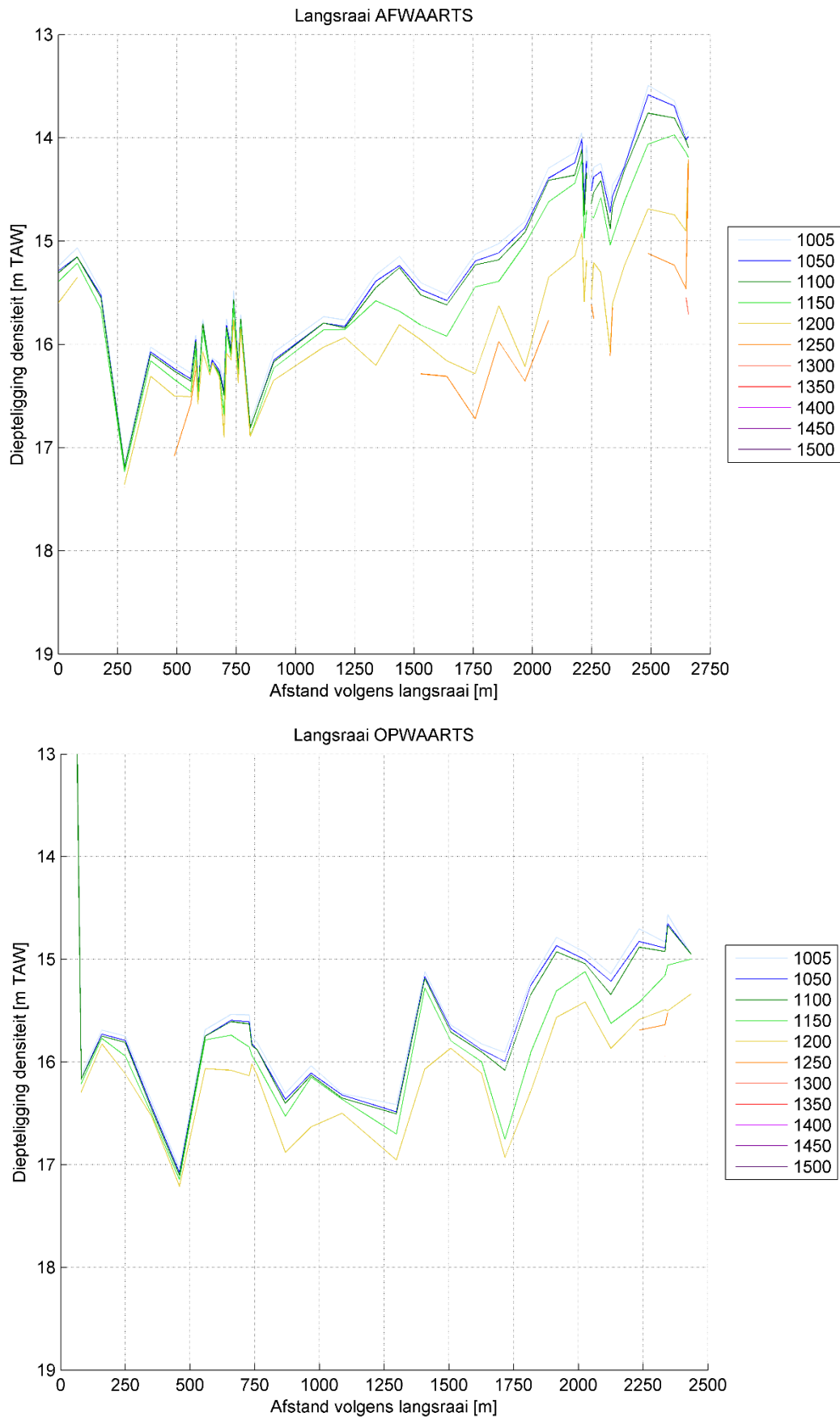
Zowel nabij de af- als opwaartse kaaimuur werd een langsraai gedefinieerd waarlangs verschillende diepteprofielen werden opgemeten met behulp van de Admodus-USP. Het begin van de raai werd achteraan het dok gekozen. Figuur 62 toont het verloop van de diepteligging van verschillende densiteiten.

De langsraai langs de afwaartse zijde vertoont achteraan het dok een geconsolideerd slibpakket: de top-slib (1005 kg/m³) is gelegen net onder -15 m TAW en de penetreerbare laag heeft een dikte van minder 30 cm (i.e. afstand tot 1200 kg/m³), terwijl de aanlegdiepte hier -17 m TAW bedraagt. Na 200 m neemt de diepte toe, al blijft de dikte van de sliblaag⁵ beperkt tot minder dan 30 cm. Naarmate meer naar de ingang van het dok gegaan wordt, komt enerzijds de top-sliblaag hoger te liggen (tot ca. -13,5 m TAW nabij de ingang) en vergroot anderzijds de dikte van de sliblaag (tot ca. 100 cm nabij de ingang).

De langsraai langs de opwaartse zijde vertoont een gelijkaardig verloop, maar heeft toch ook verschillen: helemaal achteraan is een geconsolideerd slibpakket aanwezig en naarmate meer naar de ingang gegaan wordt komt de top-sliblaag hoger te liggen. De toename is echter minder aan de afwaartse zijde, waarbij ter hoogte van de ingang de top-sliblaag op ca. -14,6 m TAW ligt, oftewel meer dan 1 m dieper dan langs de afwaartse zijde. Ook vertoont het verloop van de diepteligging van de densiteit veel grotere schommelingen dan langs de afwaartse zijde. Teslotte blijft de dikte van het slibpakket hier kleiner, met een dikte van ca. 50 cm ter hoogte van de ingang.

⁵ Hier gedefinieerd als afstand tussen de top-slib (1050 kg/m³) laag en de 1200 kg/m³-laag.

Figuur 62 – Vergelijking diepteligging densiteit op de langsraai langs de afwaartse (boven) en opwaartse (onder) zijde van het dok



Ruimtelijke variatie – dwarsraaien

Zowel ter hoogte van het einde (Figuur 51) als het begin (Figuur 42) van het dok werd een dwarsraai gedefinieerd waarlangs verschillende diepteprofielen werden opgemeten met behulp van de Admodus-USP. Het begin van de raai werd steeds langs de afwaartse kaaimuur gekozen. Figuur 63 toont het verloop van de diepteligging van verschillende densiteiten.

De dwarsraai aan het begin van het dok kent een verloop met grote gelijkenissen aan het aanlegprofiel: nabij de kaaimuren (over een breedte van ca. 100 m) werd het dok aangelegd op -17 m TAW, terwijl de centrale sleuf (met breedte van ca. 200 m) aangelegd werd op -19 m TAW. Dit profiel is herkenbaar in de diepteligging van de verschillende densiteiten. Ter hoogte van de afwaartse kaaimuur en de centrale sleuf bedraagt de dikte van de sliblaag ca. 100 cm. Nabij de opwaartse kaaimuur is dit minder dik. Daarnaast is ook de top-sliblaag hoger gelegen (-14 m TAW) langs de afwaartse kaaimuur dan bij de opwaartse kaaimuur (-14,5 m TAW). Dit komt overeen met de vaststellingen in de langsraaien (zie voorgaande alinea), al zijn de verschillen kleiner. Opmerkelijk is de vorm van de top-sliblaag: waar verwacht werd dat het vloeibare slib (densiteit $< 1050 \text{ kg/m}^3$) zich horizontaal zou uitspreiden over het dok, is dit niet het geval en volgt de top-sliblaag de onderliggende lagen!

De langsraai aan het einde van het dok vertoont een gelijkaardig verloop, maar heeft toch ook verschillen: de vorm van de aanlegdiepte is ook hier terug te zien, maar in tegenstelling tot de dwarsraai aan het begin is de dikte van de sliblaag aanzienlijk kleiner (ca. 50 cm); daarnaast is de top-sliblaag ca. 1 m dieper gelegen dan nabij de ingang, wat overeenkomt met de vaststellingen uit de langsraaien. Ook hier volgt de top-sliblaag de vorm van de onderliggende raaien, wat opmerkelijk is.

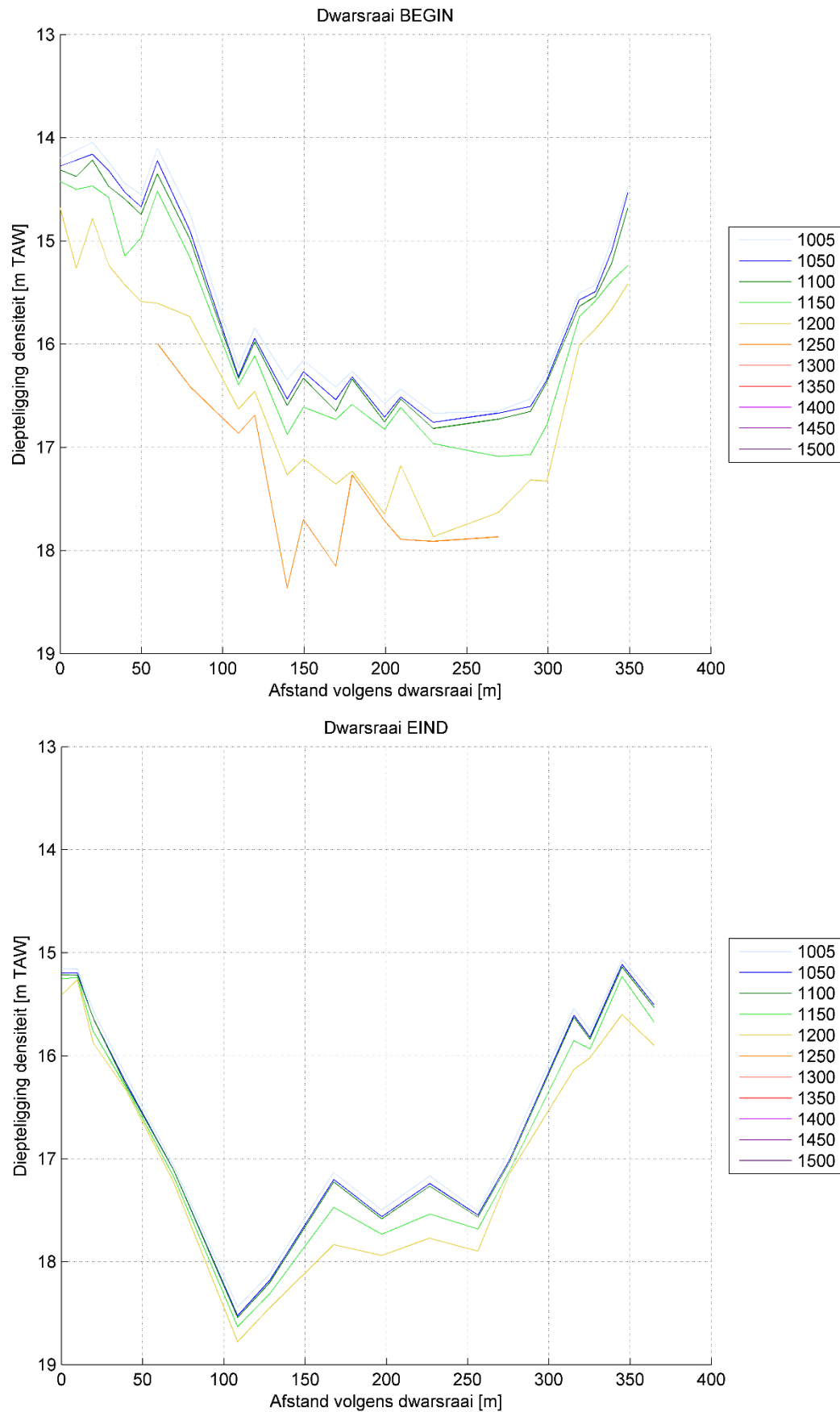
Ruimtelijke variatie – nabij kaaimuur

Achteraan het dok langs de afwaartse kaaimuur werd een zone bemeten op de commerciële ligplaats (i.e. zone van 60 m vanaf de kaaimuur). Hier werd op verschillende afstanden van de kaaimuur een langsraai gemeten. Aangezien de focus ligt op de relatie tussen de zone nabij de kaaimuur en deze buiten de commerciële ligplaats, werden 2 langsraaien gedefinieerd: één zeer dicht tegen de kaaimuur, één op 60 m van de kaaimuur. Figuur 64 toont hiervan het verloop van de diepteligging van verschillende densiteiten (afstand neemt toe van achteraan het dok naar voor). Aan het begin van de raai is het verschil tussen de diepteligging voor de verschillende densiteiten bijna 2 m. Na 60 m neemt dit verschil af tot minder dan 25 cm. Vervolgens neemt het verschil in diepteligging terug toe en fluctueert het rond 1 m. Er is dus geen éénduidige relatie tussen de diepteligging van een bepaalde densiteit nabij de kaaimuur en 60 m van de kaaimuur.

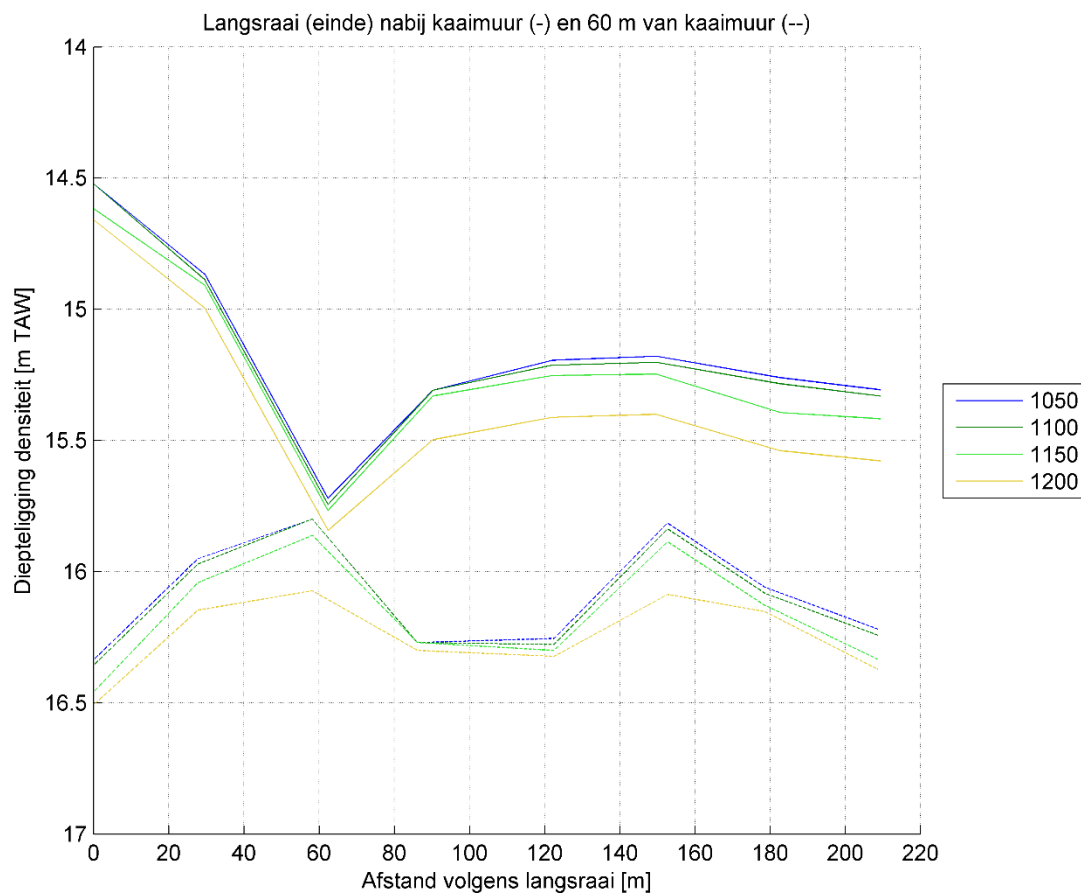
Naast deze raai achteraan het Deurganckdok, werden gedurende de meetcampagne ook op andere locaties soortgelijke metingen uitgevoerd. Aangezien het hier vooral om afzonderlijke punten ging, werd in de analyse een selectie gemaakt van koppels van punten die gelegen zijn op een dwarsraai op verschillende afstanden van de kaaimuur. Voor het punt nabij de kaaimuur werd een maximale afstand van 15 m genomen, terwijl voor deze punten vervolgens het overeenkomstige punt op respectievelijk 30 m en 60 m van de kaaimuur werd gezocht. Figuur 65 en Figuur 66 geeft de relatie weer tussen de diepteligging van een bepaalde densiteit nabij de kaaimuur ten opzichte van respectievelijk 30 m en 60 m van de kaaimuur. Deze figuren bevestigen bovenstaande vaststelling voor de langsraai: er is geen éénduidige relatie tussen de diepteligging. De verschillen in diepteligging kunnen oplopen tot $\pm 1 \text{ m}$, waarbij de verschillen groter zijn op 60 m van de kaaimuur (t.o.v. 30 m) en de verschillen toenemen bij toenemende densiteit. In het merendeel van de gevallen is de diepteligging van een bepaalde densiteit ondieper nabij de kaaimuur dan 30 m of 60 m er vandaan, maar er zijn ook punten waar dit niet het geval is.

Op basis van deze analyse, blijkt er dus geen duidelijke relatie te bestaan tussen de densiteit nabij de kaaimuur en 60 m er vandaan. Een mogelijke oorzaak is de invloed van de schroefwerking van de schepen, doch dit is niet specifiek onderzocht.

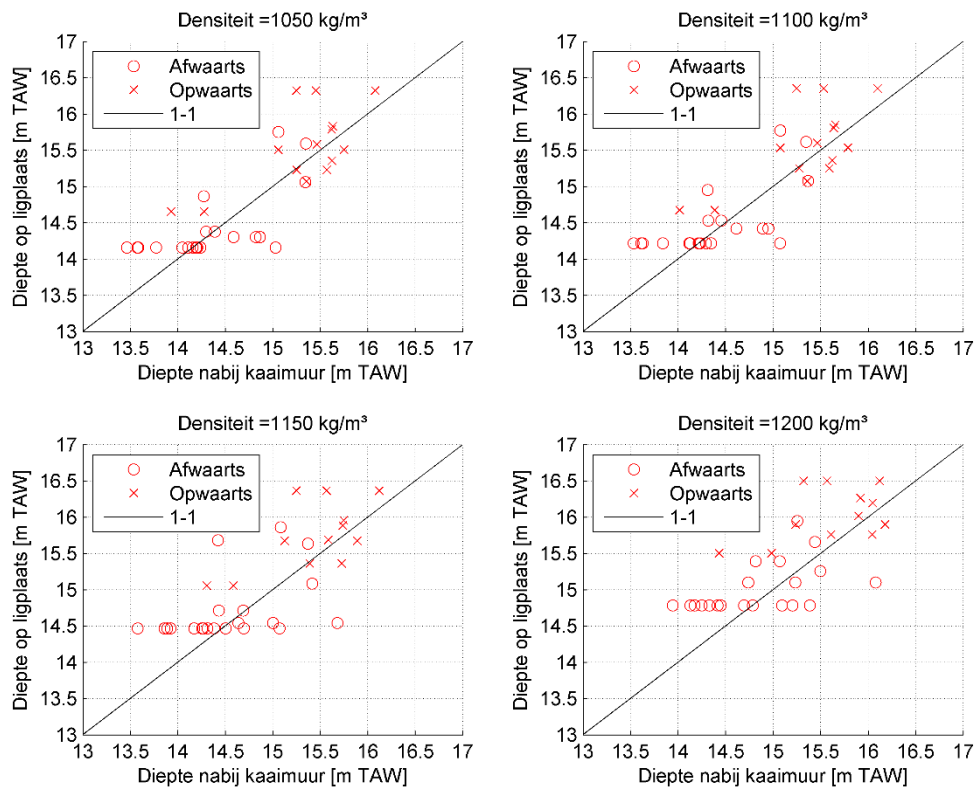
Figuur 63 – Vergelijking diepteligging densiteit op de dwarsraai ter hoogte van het begin (boven) en einde (onder) van het dok



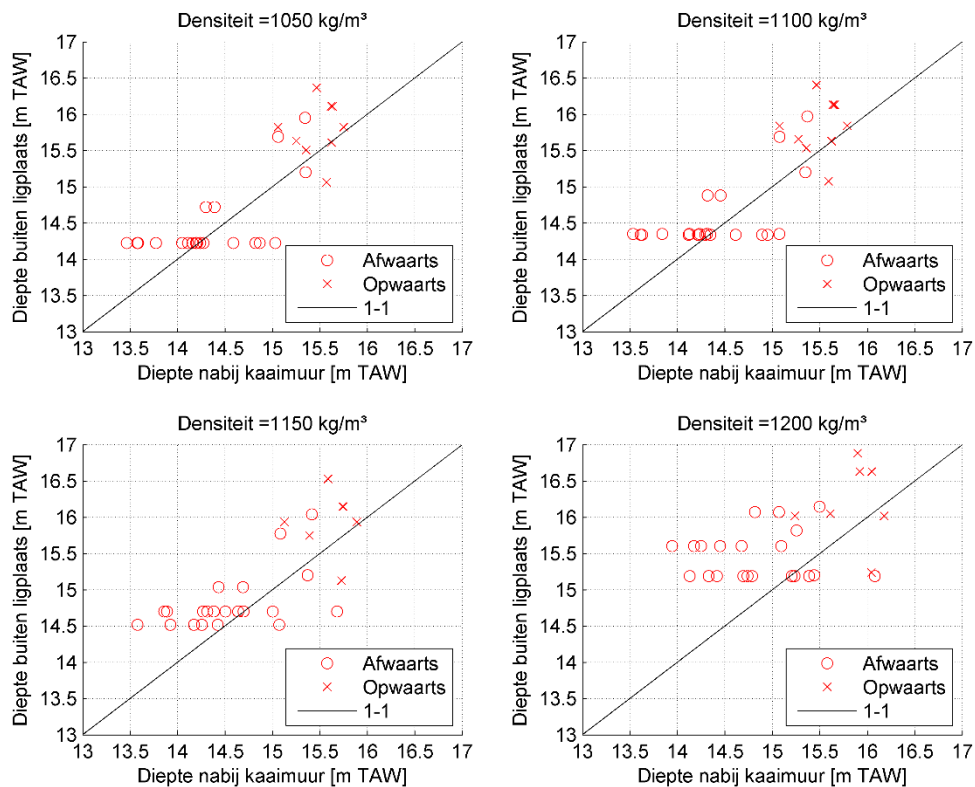
Figuur 64 – Vergelijking diepteligging densiteit op een langsraai nabij de kaaimuur (-) en 60 m van de kaaimuur (--)



Figuur 65 – Vergelijking diepteligging densiteiten nabij de kaaimuur en 30 m van de kaaimuur



Figuur 66 – Vergelijking diepteligging densiteiten nabij de kaaimuur en 60 m van de kaaimuur



6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

In het kader van 3 masterproeven op de Universiteit Antwerpen werden in de afgelopen jaren verschillende onderzoeken uitgevoerd naar het gedrag van slib uit het Deurganckdok, alsook de vergelijking van verschillende meettechnieken.

Een eerste serie proeven werd uitgevoerd in gecontroleerde omstandigheden waarbij de focus lag op de ontwikkelingen in densiteit en sterkte van het slib, alsook de vergelijking tussen directe (Beeker-sampler in combinatie met labo-analyses) en indirecte (GraviProbe, Rheotune, Admodus) meettechnieken. Uit de proevenreeks in de buispaal, bleek dat de opbouw van sterke in het slib eerder langzaam verliep. Tijdens de eerste reeks proeven zonder getij nam de sterkte in de sliblaag bijna niet toe. Pas bij de tweede reeks proeven, waarbij met een pomp het getij gesimuleerd werd en de duur van de proeven verhoogd werd, bleek er na ca. 16 weken sprake te zijn van consolidatie.

Zowel in de buispaal als in de sediment testtank werden toestellen vergeleken met directe staalnames. De GraviProbe vertoont een belangrijke afwijking in de gemeten densiteit en sterke ten opzichte van de directe staalname. Voor de sterkte dient er opgemerkt te worden dat de meetmethode in situ en in labo verschillend is, waardoor de gemeten waarden niet één op één onderling vergelijkbaar zijn. Wel bleek het kwalitatieve verloop inzake sterkte overeen te stemmen tussen de waarden van de GraviProbe en de staalname.

De Rheotune en de Admodus geven inzake densiteit een betere overeenstemming met de staalnames. Voor lagere ($< 1,15 \text{ t/m}^3$) densiteiten lag de waarde van de Admodus systematisch onder deze van de stalen. Voor hogere ($> 1,25 \text{ t/m}^3$) densiteiten bleek de waarde van de Rheotune onbetrouwbaar doordat de waarde plafonneerde. Voor de Rheotune was eveneens een vergelijking mogelijk met de gemeten sterkte. Ook hier geldt bovenstaande opmerking inzake meetmethode, waardoor een één op één vergelijking niet mogelijk is.

Een tweede serie proeven werd uitgevoerd in het Deurganckdok waarbij de focus lag op de ruimtelijke en temporele variatie in densiteit en sterkte van het slib, alsook de vergelijking tussen indirecte (GraviProbe, Rheotune, Admodus, SBES) meettechnieken. De metingen uitgevoerd in 2013 vertonen geen éénduidig beeld in de ontwikkelingen van de densiteit en sterkte (gemeten met de GraviProbe) in een periode zonder baggerwerken. De verwachte consolidatie kon niet in de metingen vastgesteld worden. De vergelijking tussen de SBES (210 kHz) en de top-sliblaag toont een systematisch verschil van ca. 40 cm, waarbij de top-sliblaag op basis van gemeten densiteit lager ligt dan 210 kHz-signaal. Wanneer de diepteligging van de top-sliblaag gelijk wordt genomen met de 210 kHz diepte, blijkt het 33 kHz niet overeen te komen met een bepaalde densiteit.

De vergelijking van de ontwikkelingen van de sliblaag in 2 geselecteerde baggervrije periodes in 2015-2016, waarin zowel SBES als Rheotune-metingen beschikbaar zijn, levert een verschillende beeld: voor sommige punten komt de ontwikkeling tussen de top-sliblaag en het 210 kHz-signaal goed overeen, voor andere punten verschilt de ontwikkeling aanzienlijk. Eén van de potentiële verklaringen is de nauwkeurigheid van de druksensor op de Rheotune. Uit vroegere metingen waarbij verschillende toestellen (elks met eigen druksensor) op één meetframe bevestigd werden, bleken afwijkingen tot 50 cm mogelijk te zijn.

Een laatste reeks proeven werd uitgevoerd in 2018. Hierbij werden in het Deurganckdok zowel met de Admodus als de Rheotune op verschillende punten metingen ("prikken") uitgevoerd. De onderlinge vergelijking tussen de gemeten densiteit geeft een redelijke overeenstemming voor de diepteligging van verschillende densiteiten. Gemiddeld bleek de afwijking kleiner te zijn dan 10 cm, waarbij individuele

metingen wel meer dan 50 cm konden verschillen. Voor de Rheotune bleek ook hier dat er een maximaal meetbare densiteit (ca. 1,25 t/m³) bleek te bestaan.

De ruimtelijke verdeling van de metingen bracht een aantal belangrijke verschillen aan het licht: enerzijds was er een toename van de diepteligging van de verschillende densiteiten (1,05 tot 1,2 t/m³) van vooraan het dok naar achteraan het dok; anderzijds bleek de dikte van de sliblaag groter te zijn langs de afwaartse kaaimuur ten opzichte van de opwaartse kaaimuur, met de grootste verschillen vooraan het dok (top-sliblaag op -14 m TAW aan de afwaartse kant ↔ -15 m TAW aan de opwaartse kant).

Een laatste vergelijking die gebeurde betrof de diepteligging van de densiteiten nabij de kaaimuur en buiten de ligplaats (60 m van de kaaimuur). Voor de beschikbare meetpunten bleek geen relatie te bestaan tussen de diepteligging van de verschillende densiteiten. Dit resulteert in de conclusie dat het meten van de eigenschappen van de sliblaag naast de commerciële ligplaats (60 m van kaaimuur) niet kan/mag doorvertaald worden naar de eigenschappen van de sliblaag op de ligplaats.

6.2 Aanbevelingen

De uitgevoerde onderzoeken hebben een aantal bijkomende onderzoeksvragen en aandachtspunten aan het licht gebracht. Een eerste belangrijk aandachtspunt betreft de nauwkeurigheid van de druksensoren van de verschillende meettoestellen. Het verdient de aanbeveling deze druksensoren voorafgaandelijk te kalibreren voor de range van het toepassingsgebied waarvoor zij ingezet worden. Voor een omgeving zoals het Deurganckdok met waterdieptes tot 25 m bij hoogwater in de centrale sleuf, is dit een uitdaging.

Een tweede aandachtspunt is het belang van in situ metingen in “onverstoorde” en “verstoorde” omstandigheden. Hierbij wordt gedacht aan in- en uitmetingen voor en na het aan- en afmeren van diepliggende schepen (effect schroefwerking), voor en na een specifieke baggercampagne (effect baggeren), tijdens een baggervrije periode in winter en zomer (seizoenaal effect en variatie van slibeigenschappen) of in een periode zonder baggerwerken (onverstoord, maar meerdere metingen gedurende deze periode).

Een andere aanbeveling betreft de vergelijking tussen meettechnieken: voor de inzet van de SBES is een specifiek aandachtspunt de invloed van de instellingen (transmit power, gain) van de SBES. Een meetcampagne waarbij deze instellingen stapsgewijs gewijzigd worden op één bepaald punt, kan mogelijk de relatie tussen het 33 kHz-signaal en de densiteit verbeteren. Een andere meerwaarde betreft het nemen van in situ direct stalen. Het uitvoeren van Beeker-stalen in situ is mogelijk, maar zeer arbeidsintensief en uitdagend. Dit is echter de enige validatie voor de verschillende indirecte meettechnieken.

Een laatste aanbeveling betreft de vergelijking tussen de gemeten sterktes van het slib: door het verschil in meetmethode (trilvork bij Rheotune – weerstand bij GraviProbe – vintest bij staalname) is een onderlinge één op één vergelijking uitgesloten. Het verdient de aanbeveling consensus te vinden over welke parameter relevant is voor de toepassing, nl. de invloed van het slib op de schepen die erdoor varen/erin liggen.

7 Referenties

Broosus, S. (2018). Onderzoek naar de opbouw van sliblagen in en de vergelijking van meetsystemen voor het meten van aanslibbing in de dokken van de haven van Antwerpen

Fontein, W.F.; Byrd, R.W. (2007). The nautical depth approach, a review for implementation. *WODCON XVIII Annu. Dredg. Semin.*

International Marine and Dredging Consultants; Deltares. (2014). Evaluation of the external effects on the situation in Deurganckdok (2012 -2014): report 1.8. Analysis of external effects on siltation processes and factors. *RPRT*. Flemish Government. Maritime Access Division: Antwerp

Ligtvoet, N. (2013). Vergelijking van meetsystemen en analyse van meetresultaten voor het meten van aanslibbing in dokken in de haven van Antwerpen

MarCom Working Group 30. (1997). Joint PIANC-IAPH report on approach channels: a guide for design (volume 2). *RPRT. PIANC Report*. PIANC = AIPCN: Brussel. ISBN 2-87223-087-4

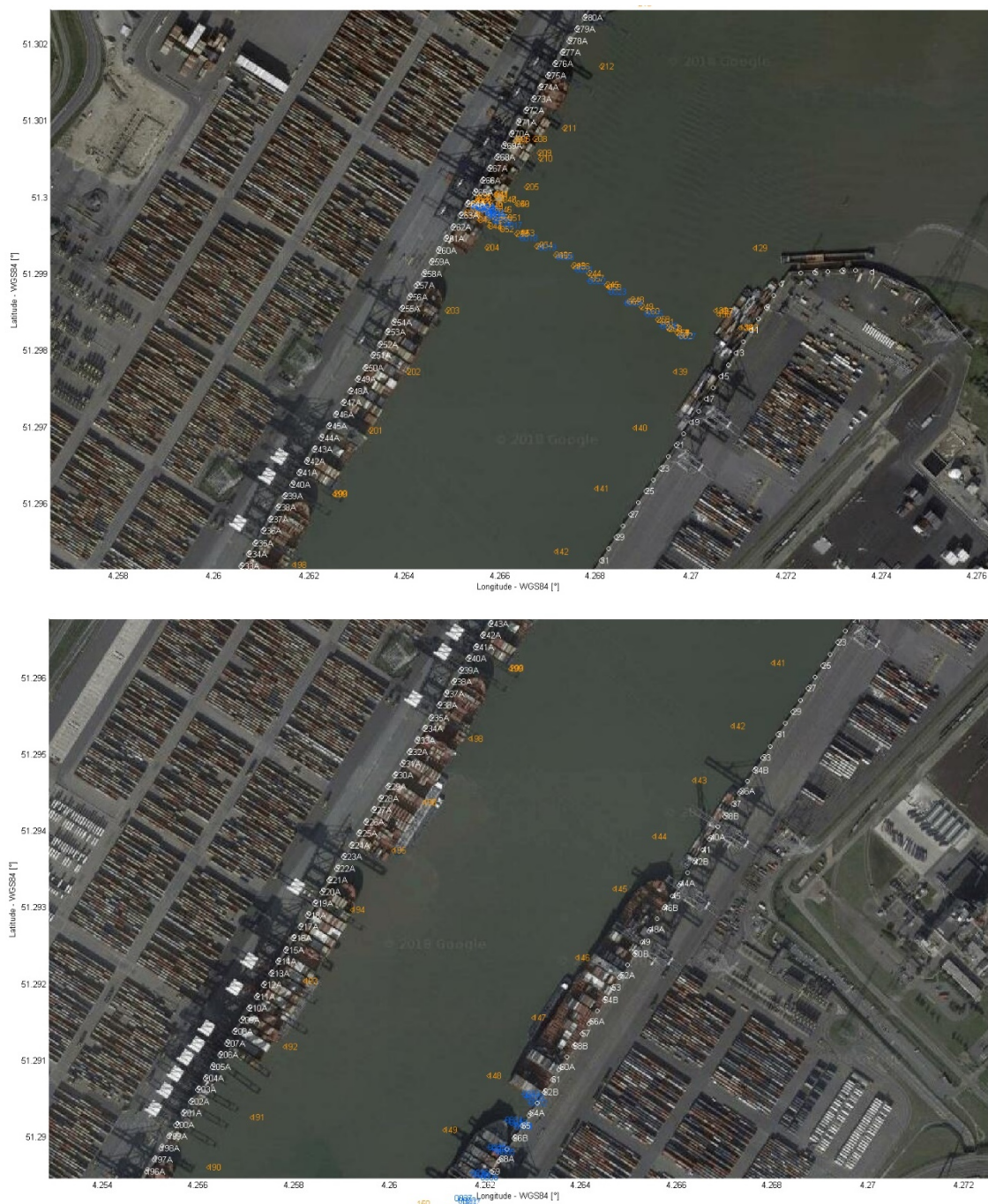
Meire, D.; Ibanez, M.; Claeys, S.; Mostaert, F. (S.d.). Evaluatie van densiteitsmeetinstrumenten: Deelrapport 1: overzicht van meetcampagne 3.: Antwerpen

Ouhida, M. (2018). Onderzoek naar de opbouw van sliblagen in en de vergelijking van meetsystemen voor het meten van aanslibbing in de dokken van de haven van Antwerpen

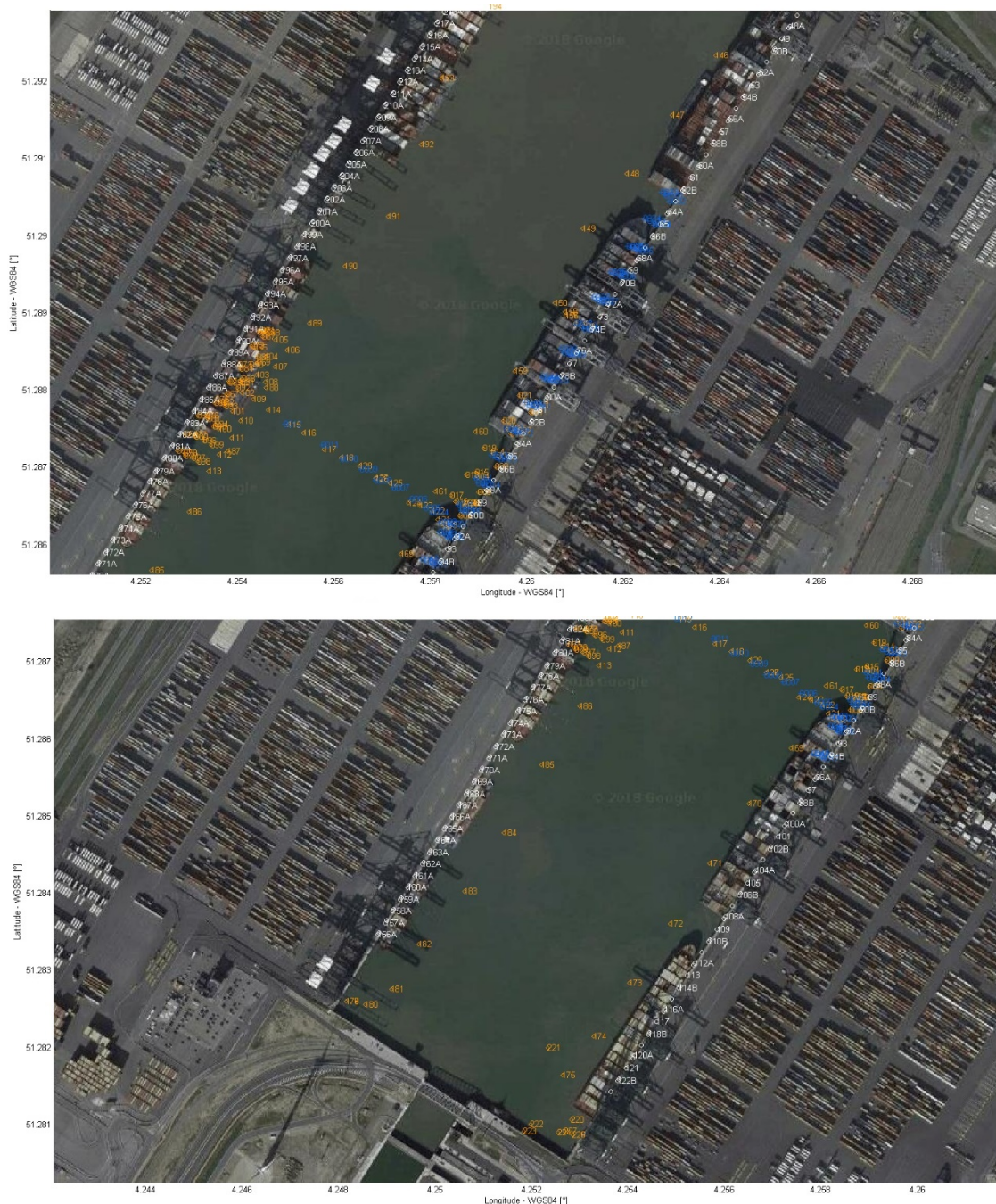
Vantorre, M.; Coen, I. (1988). On sinkage and trim of vessels navigating above a mud layer. *Terra Aqua Int. J. Public Work. Ports Waterw. Dev.* 40: 4.149-4.161

8 Bijlage A – detail ligging meetpunten 2018

Figuur 67 – Ligging meetpunten **Admodus-USP** en **Rheotune** tijdens campagne 2018
Ingang (boven) van en midden-vooraan (onder) in het Deurganckdok

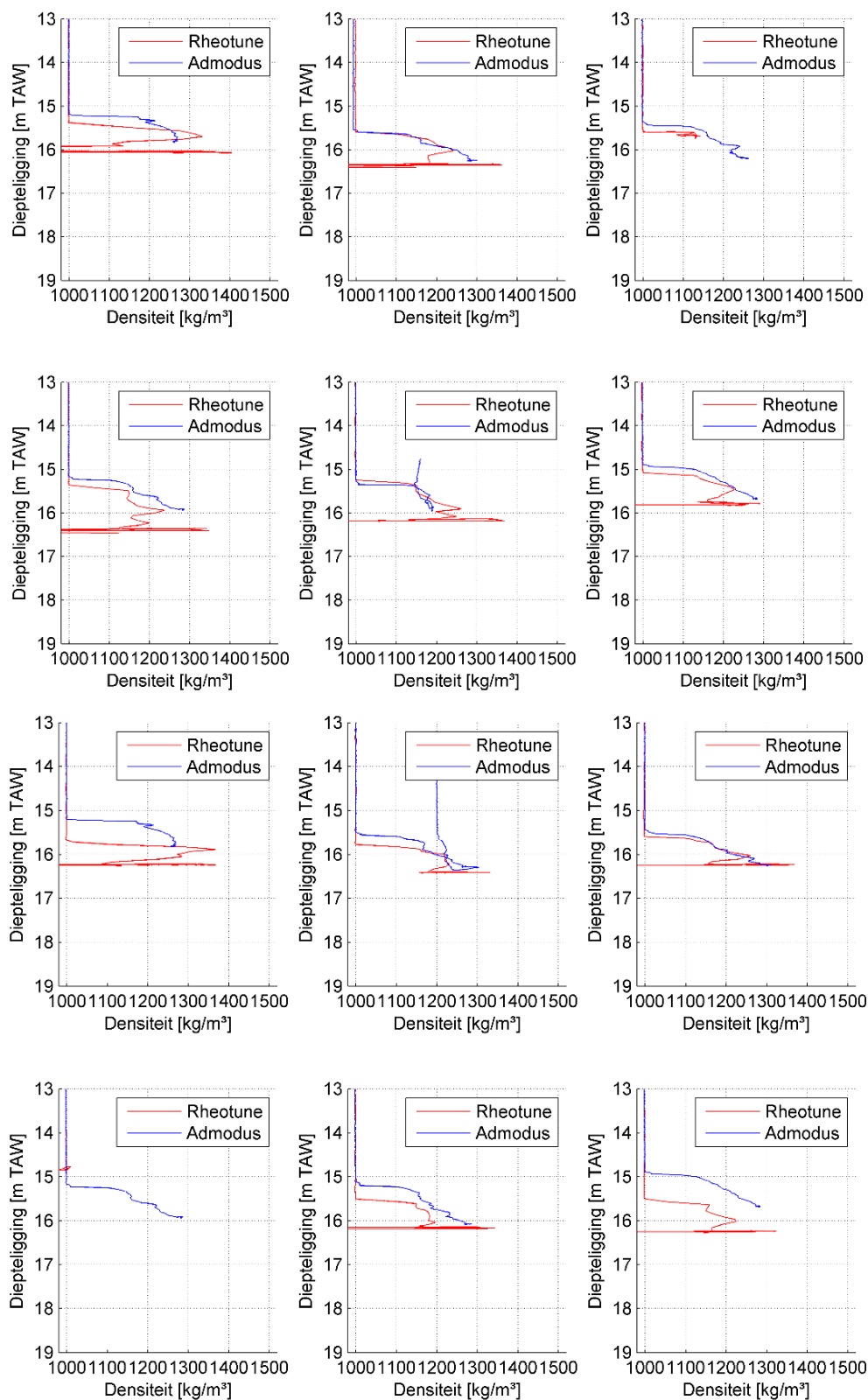


Figuur 68 – Ligging meetpunten **Admodus-USP** en **Rheotune** tijdens campagne 2018
Midden-achteraan (boven) en einde (onder) van het Deurganckdok

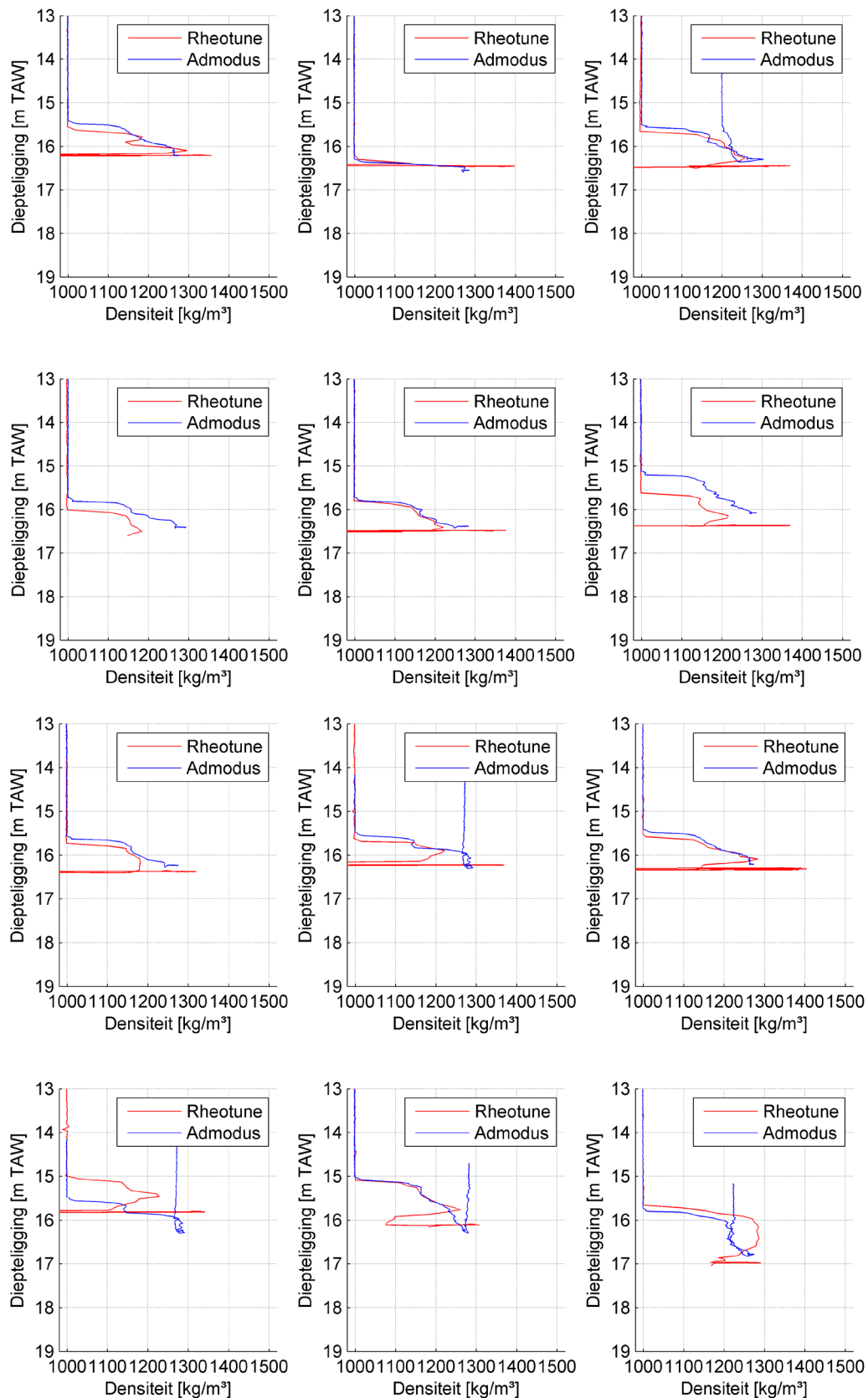


9 Bijlage B – vergelijking densiteitsprofielen

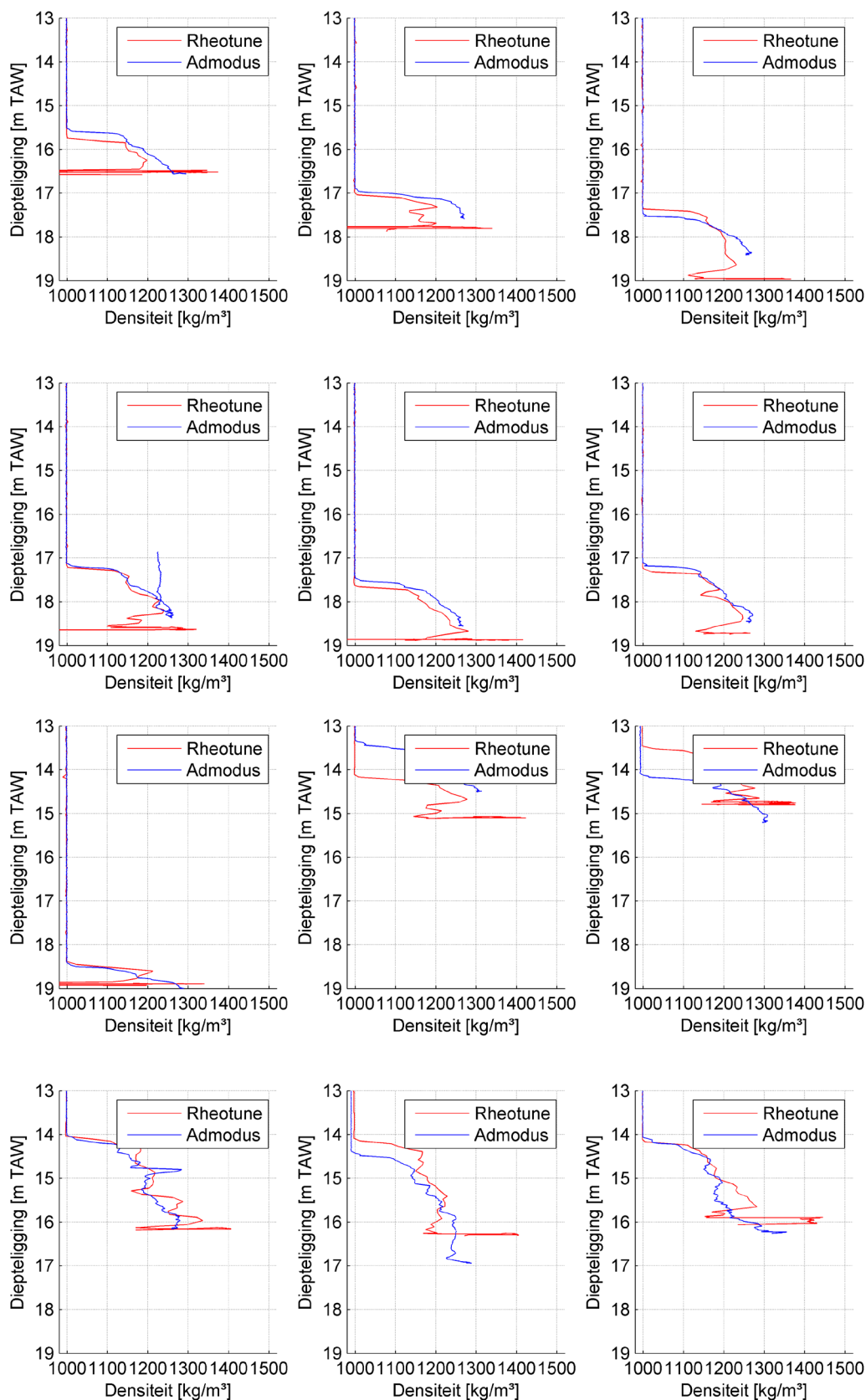
Figuur 69 – Vergelijking (Admodus-USP en Rheotune) densiteitsprofielen op zelfde locaties in het Deurganckdok campagne 2018



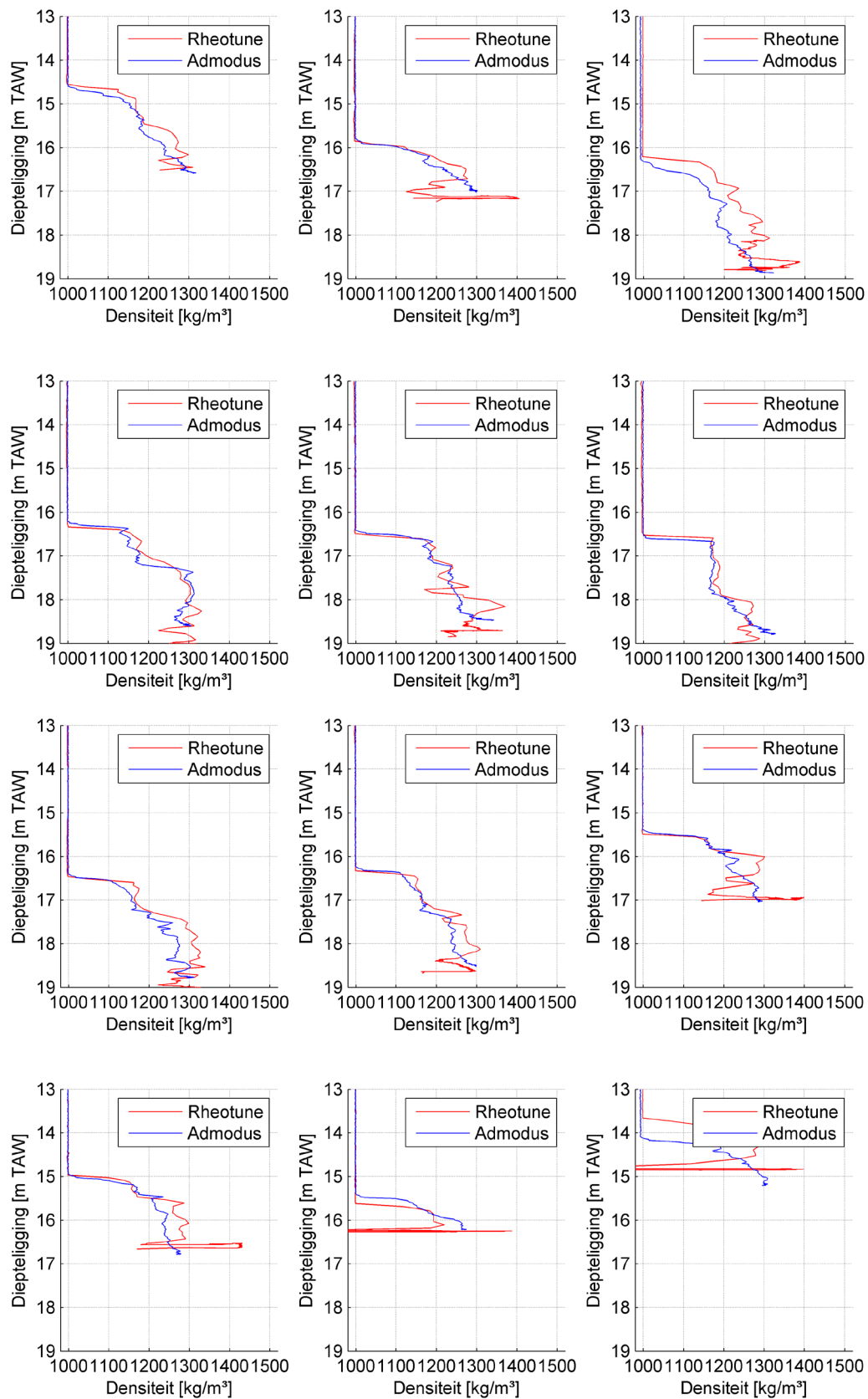
Figuur 70 – Vergelijking (Admodus-USP en Rheotune) densiteitsprofielen op zelfde locaties in het Deurganckdok campagne 2018



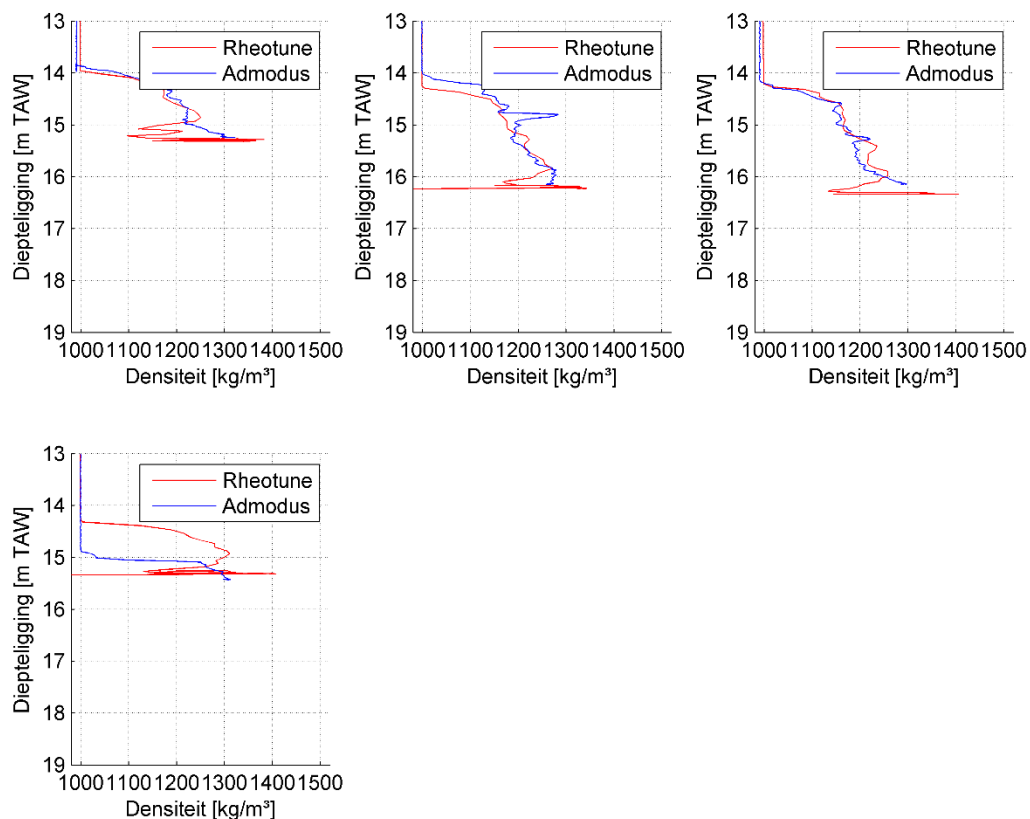
Figuur 71 – Vergelijking (Admodus-USP en Rheotune) densiteitsprofielen op zelfde locaties in het Deurganckdok campagne 2018



Figuur 72 – Vergelijking (Admodus-USP en Rheotune) densiteitsprofielen op zelfde locaties in het Deurganckdok campagne 2018



Figuur 73 – Vergelijking (Admodus-USP en Rheotune) densiteitsprofielen op zelfde locaties in het Deurganckdok campagne 2018



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