



Vlaanderen
is wetenschap



24_062_1
WL rapporten

Opbouw van sliblagen te Zeebrugge

Analyse van een baggervrije periode

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

Opbouw van sliblagen te Zeebrugge

Analyse van een baggervrije periode

Meire, D.; Vanlede, J.

Juridische kennisgeving

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

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

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

Copyright en wijze van citeren

© Vlaamse overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Waterbouwkundig Laboratorium 2026
D/2026/3241/091

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Meire, D.; Vanlede, J. (2026). Opbouw van sliblagen te Zeebrugge: Analyse van een baggervrije periode. Versie 4.0. WL Rapporten, 24_062_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

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

Documentidentificatie

Opdrachtgever:	aMT	Ref.:	WL2026R24_062_1
Trefwoorden (3-5):	Slib, baggeren, Zeebrugge, densiteitsprikken, nautische bodem		
Kennisdomeinen:	Hydraulica en sediment > Sediment > Baggeren en storten > in-situ metingen Hydraulica en sediment > Sediment > Nautische bodem > in-situ metingen		
Tekst (p.):	40	Bijlagen (p.):	2
Vertrouwelijk:	☒ Nee ☒ Online beschikbaar		

Auteur(s):	Meire, D.
------------	-----------

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Vanlede, J.	Getekend door: Vanlede Joris Dries S Getekend op: 2026-06-15 11:27:48 +02:00 Reden: Ik keur dit document goed  
Projectleider:	Meire, D.	Getekend door: Meire Dieter Willy S Getekend op: 2026-06-29 16:27:21 +02:00 Reden: Ik keur dit document goed  

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Bellafkih, K.	Getekend door: Bellafkih Abdelkarim Getekend op: 2026-06-15 10:59:16 +02:00 Reden: Ik keur dit document goed  
-----------------	---------------	--

Abstract

Afdeling Maritieme Toegang is verantwoordelijk voor het op diepte houden van de haven van Zeebrugge, die gekenmerkt wordt door sterke sedimentatie van fijn, cohesief materiaal en dikke sliblagen. Gedurende een periode van ongeveer 1 maand in de zomer van 2023 werden geen onderhoudsbaggerwerken uitgevoerd en frequent densiteitsprikken uitgevoerd om de natuurlijke evolutie van de sliblagen op te volgen. In dit rapport worden deze densiteitsprikken in drie zones (CDNB, Albert II dok en ZP1) geanalyseerd.

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de tabellen.....	VII
Lijst van de figuren	VIII
1 Inleiding	1
1.1 Situering	1
1.2 Stroming in de haven van Zeebrugge	2
1.3 Sedimentdynamiek in de Noordzee.....	3
1.4 Sliblagen in Zeebrugge	4
1.4.1 Beschrijving.....	4
1.4.2 Sedimentatiesnelheden.....	5
2 Beschrijving van de baggervrije periode	7
2.1 Overzicht van de metingen	7
2.2 Priklocaties	8
2.3 Densiteitsmetingen	11
2.3.1 Admodus.....	11
2.3.2 Verwerking van de data.....	11
2.3.3 Single Beam data	12
2.4 Hydrodynamische condities.....	12
2.4.1 Getijcondities.....	12
2.4.2 Golfcondities.....	13
3 Prikmetingen	15
3.1 CDNB	15
3.1.1 Algemene beschrijving van slibcondities.....	15
3.1.2 Intensieve meetcampagne	16
3.2 Albert II dok.....	20
3.3 ZP1.....	23
3.4 Analyse	26
3.4.1 Herhalingsmetingen.....	26
3.4.2 Gradiënt in het A2 dok.....	32
3.4.3 Toename droge stof gehalte.....	36

4	Conclusie.....	39
5	Referenties	40
Bijlage 1	Overzicht van priklocaties Zeebrugge.....	B1
Bijlage 2	Gemiddelde transecten ZP1	B2

Lijst van de tabellen

Tabel 1: Overzicht van de beschikbare densiteitsmetingen rond de baggervrije periode (in vet tijdens baggervrije periode) met aanduiding van de meetlocaties en de fase van het getij).....	7
Tabel 2: Belangrijkste getijstatistieken tijdens de meetperiode en de baggervrije periode	13
Tabel 3: Belangrijkste statistieken van de golfcondities [cm] tijdens de meetperiode en de baggervrije periode	14
Tabel 4: Overzicht van het verschil in diepteligging [m] voor verschillende parameters, op de meetdagen waarop 2 metingen werden uitgevoerd.....	27
Tabel 5: Overzicht van de helling [m/m] van de verschillende densiteitsniveaus op de verschillende prikmetingen	34

Lijst van de figuren

Figuur 1: Satellietfoto (juni 2023) van de haven van Zeebrugge (bron: Google Earth).	1
Figuur 2: Stromingspatronen voor gemiddeld doottij (boven); gemiddeld tij (midden) en gemiddeld springtij (onder) op het ogenblik (HW – 20min) van maximale neervorming in de voorhaven van Zeebrugge (uit De Maerschallck et al., 2024)	2
Figuur 3: Locatie van de OD Nature tripod metingen (uit De Maerschallck et al., 2020)	3
Figuur 4: Verloop van de sedimentconcentratie nabij de bodem (onder) en hoger in de waterkolom (boven) in het herfst & winterseizoen (blauw) en lente en zomerseizoen (rood) bij meetlocatie MOW1. De kolommen weerspiegelen situaties bij doottij tot springtij, van links naar rechts (uit De Maerschallck et al., 2020).....	4
Figuur 5: Verloop van de top sliblaag langsheen het CDNB, voor 2 peilingen in 2012 (uit Dujardin et al., 2014)	5
Figuur 6: Verloop van de top sliblaag langsheen de lichtenlijn van het Albert II dok, voor 2 peilingen in 2012 (uit Dujardin et al., 2014)	5
Figuur 7: Dagelijkse baggerhoeveelheden in de twee weken na de baggervrije periode per zone	8
Figuur 8: Priklocatie van de intensieve meetcampagne in het Albert II dok.....	9
Figuur 9: Priklocaties van de intensieve meetcampagne in CDNB.....	10
Figuur 10: Priklocaties van de intensieve meetcampagne in ZP1	10
Figuur 11: Overzicht van de diepteligging van de 1,10 g/cm ³ ; 1,15 g/cm ³ en 1,20 g/cm ³ densiteitswaarde en de water-slib overgang op basis van een densiteitsprofiel met de Admodus. Eveneens zijn de 210 kHz en 33 kHz reflector weergegeven.	11
Figuur 12: Verloop van hoog- en laagwaters ter hoogte van de Zeebrugge Leopold II dam, met aanduiding van de baggervrije periode in grijze achtergrond	13
Figuur 13: Verloop van de gemiddelde, maximale en minimale golfcondities ter hoogte van de Zandopvangkade, bepaald per dag.	14
Figuur 14: Overzicht van de diepteligging van de 210 kHz (volle lijnen) en 33 kHz reflector langsheen 2 raaien in de lengterichting van CDNB. Verticale lijnen geven locatie Albert II dok weer.	15
Figuur 15: Verloop van de ligging van de 210 kHz reflectie langs 3 transecten (boven = oostelijk, onder = westelijk) in CDNB, met aanduiding van de baggervrije periode (grijze achtergrond)	17
Figuur 16: Verloop van de ligging van de 33 kHz reflectie langs 3 transecten (boven = oostelijk, onder = westelijk) in CDNB, met aanduiding van de baggervrije periode (grijze achtergrond)	17
Figuur 17: Ligging van de 1,10 t/m ³ langs 3 transecten boven = oostelijk, onder = westelijk) in CDNB, met aanduiding van de baggervrije periode (grijze achtergrond)	18
Figuur 18: Ligging van de 1,20 t/m ³ gedurende de meetcampagne langs 3 transecten boven = oostelijk, onder = westelijk) in CDNB, met aanduiding van de baggervrije periode (grijze achtergrond)	18
Figuur 19: Gemiddelde ligging van de densiteitsniveaus over alle priklocaties in CDNB op de verschillende tijdstippen.....	19
Figuur 21: Verloop van de ligging van de 210 kHz reflectie langs 2 transecten in het A2 dok	21

Figuur 22: Verloop van de ligging van de 33 kHz reflectie langs 2 transecten in het A2 dok	21
Figuur 23: Verloop van de ligging van de 1,1 t/m ³ diepteligging langsheen 2 transecten in het A2 dok	22
Figuur 24: Verloop van de ligging van de 1,2 t/m ³ diepteligging langsheen 2 transecten in het A2 dok	22
Figuur 25: Verloop van de ligging van de 210 kHz reflectie langs 3 transecten in ZP1	23
Figuur 26: : Verloop van de ligging van de 33 kHz reflectie langs 3 transecten in ZP1	24
Figuur 27: Verloop van de ligging van de 1,1 t/m ³ reflectie langs 3 transecten in ZP1.....	24
Figuur 28: Verloop van de ligging van de 1,2 t/m ³ reflectie langs 3 transecten in ZP1.....	25
Figuur 29: Gemiddeld verloop, van de verschillende prikken op transect 1 in ZP1, van de ligging van de 210 kHz en 33 kHz reflectoren enerzijds en 1,1 t/m ³ en 1,2 t/m ³ densiteitsdieptes	25
Figuur 30: Aanduiding van meetperiode in het A2 dok (blauw), ZP1 (oranje) en CDNB (rood) op 18/07 (links) en 04/08 (rechts)	26
Figuur 31: Verschil in diepteligging van de water-slib overgang, 1,10 g/cm ³ , 1,15 g/cm ³ en 1,20 g/cm ³ bepaald op de Admodus data en het verschil op de 210 kHz en 33 kHz reflector de voor de 2 metingen op 18/07 (boven) en 04/08 (onder) in het Albert II dok	28
Figuur 32: Verschil in diepteligging van de water-slib overgang, 1,10 g/cm ³ , 1,15 g/cm ³ en 1,20 g/cm ³ bepaald op de Admodus data en het verschil op de 210 kHz en 33 kHz reflector de voor de 2 metingen op 18/07 (boven) en 04/08 (onder) in CDNB	29
Figuur 33: Verschil in diepteligging van de water-slib overgang, 1,10 g/cm ³ , 1,15 g/cm ³ en 1,20 g/cm ³ bepaald op de Admodus data en het verschil op de 210 kHz en 33 kHz reflector de voor de 2 metingen op 18/07 (boven) en 04/08 (onder) in ZP1	30
Figuur 34: Afstand langs de lichtenlijn en indicatie van een aantal kenmerkende punten hierop die zijn weergegeven in Figuur 35 (uit Dujardin et al. 2016).....	31
Figuur 35: Verloop van de 210 reflector gedurende een tijcyclus voor doortij (links) en springtij (rechts). Uit Dujardin et al. 2016.	31
Figuur 36: Gradiënt van de water-slib overgang op beide transecten in het Albert II dok (rechts CDNB)	33
Figuur 37: Gradiënt van de diepteligging van de 1,15 g/cm ³ op beide transecten in het Albert II dok (rechts CDNB)	33
Figuur 38: Helling van de verschillende densiteitslagen langsheen de 2 beschouwde transecten (volle en lege symbolen) in het Albert II dok	35
Figuur 39: Evolutie in sedimenthoeveelheid [g/cm ²] t.o.v. vaste referentiediepte (16,25 mLAT) voor de metingen in het CDNB	36
Figuur 40: Evolutie in sedimenthoeveelheid [g/cm ²] t.o.v. vaste referentiediepte (16,2 mLAT) voor de metingen in het Albert II dok.....	37
Figuur 41: Evolutie in sedimenthoeveelheid [kg/m ²] t.o.v. vaste referentiediepte (16,2 mLAT) voor de metingen in het Albert II dok.....	37
Figuur 42: Evolutie in sedimenthoeveelheid [g/cm ²] t.o.v. vaste referentiediepte (16,1 of 15,5 mLAT) voor de metingen in ZP1.....	38
Figuur 43: Evolutie in sedimenthoeveelheid [kg/m ²] t.o.v. vaste referentiediepte (16,1 of 15,5 mLAT) voor de metingen in ZP1.....	38

Figuur 44: Overzicht van priklocaties in Zeebrugge, met aanduiding van zones die intensief bemeten werden B1

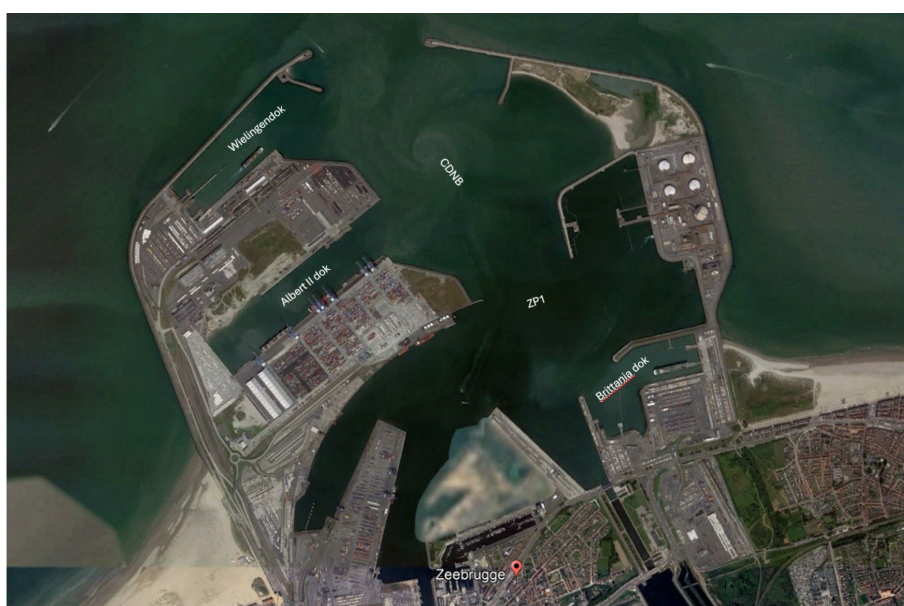
Figuur 45: Gemiddeld verloop, van de verschillende prikken op transect 2, van de ligging van de 210 kHz en 33 kHz reflectoren enerzijds en 1,1 t/m³ en 1,2 t/m³ dichtheidsdieptes in ZP1 B2

Figuur 46: Gemiddeld verloop, van de verschillende prikken op transect 3, van de ligging van de 210 kHz en 33 kHz reflectoren enerzijds en 1,1 t/m³ en 1,2 t/m³ dichtheidsdieptes in ZP1 B2

1 Inleiding

1.1 Situering

De haven van Zeebrugge aan zeewaartse zijde bestaat uit 2 havendammen, een centrale toegangsgeul (CDNB) en verschillende dokken die hierop aansluiten (Albert II dok, Wielingendok, Britannia dok,...). Reeds sinds de aanleg van de haven wordt een sterke sedimentatie van fijn, cohesief materiaal waargenomen die leidt tot een metersdikke sliblaag. Vanwege deze dikke sliblagen werd door Delefortrie et al. (2004) een nautische bodem definitie opgesteld, gebaseerd op de diepteligging van deze sliblaag, met name de waterslib overgang en de $1,20 \text{ t/m}^3$ densiteitsniveau. Deze criteria bepalen de toegankelijkheid van de haven.



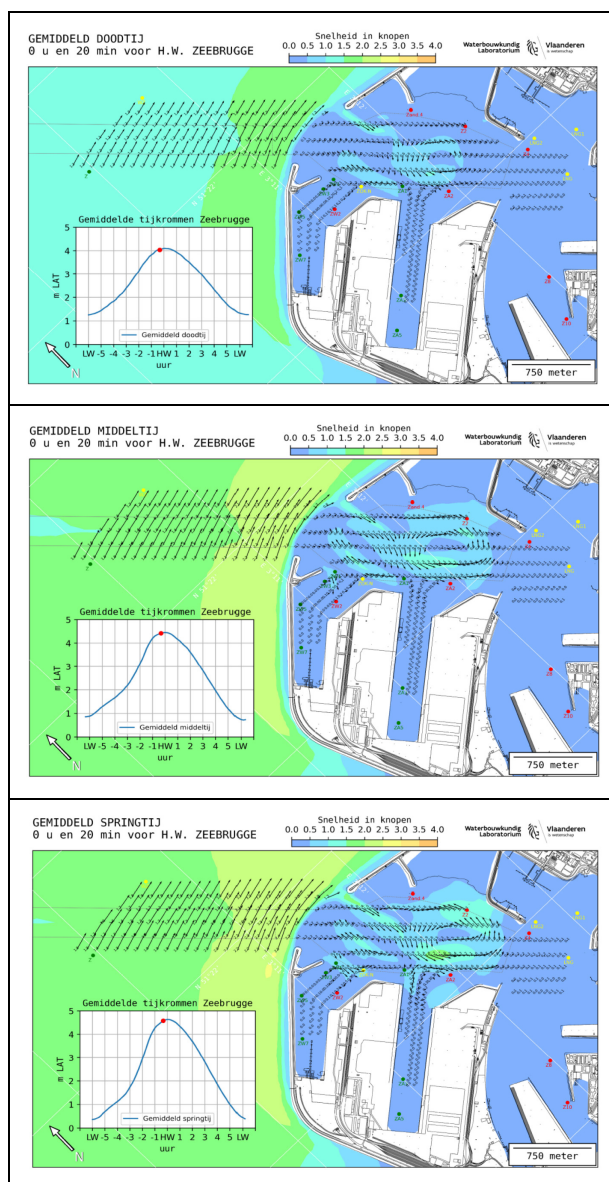
Figuur 1: Satellietfoto (juni 2023) van de haven van Zeebrugge (bron: Google Earth).

De afdeling Maritieme Toegang (aMT) is verantwoordelijk voor het uitvoeren van de baggerwerken in de haven van Zeebrugge. Naar aanleiding van een korte periode gedurende de zomer van 2023 waarin geen baggerwerken werden uitgevoerd, werd aan het Waterbouwkundig Laboratorium gevraagd om de natuurlijke evolutie van de opbouw van de sliblagen te bestuderen, op basis van densiteitsprikken uitgevoerd door Vlaamse Hydrografie.

In secties 1.2 t.e.m. 1.4 wordt een korte beschrijving gegeven van de stroming in de haven van Zeebrugge, de sedimentdynamiek ter hoogte van de haven in de Noordzee en voorgaande studies die de dynamiek van sliblagen in de haven zelf beschouwden. In hoofdstuk 2 wordt een overzicht gegeven van de metingen en omstandigheden tijdens de beschouwde baggervrije periode. In hoofdstuk 3 worden de densiteitsprikken beschreven en geanalyseerd.

1.2 Stroming in de haven van Zeebrugge

Recent werd een nieuwe stroomatlas voor de haven van Zeebrugge opgesteld (De Maerschalck et al. 2024). Hierbij wordt voor een gemiddeld getij, doodtij en springtij het stromingspatroon in de voorhaven van Zeebrugge weergegeven (zie Figuur 2). Voor een gemiddeld doodtij is geen verhoging van de stroming waarneembaar in het Albert II dok en ZP1 (Figuur 2, boven). Voor een gemiddeld tij (Figuur 2, midden) wordt beperkt stroming voorspeld ter hoogte van de ingang van het Albert II dok, ter hoogte van ZP1 wordt geen getijstroming verwacht.



Figuur 2: Stromingspatronen voor gemiddeld doodtij (boven); gemiddeld tij (midden) en gemiddeld springtij (onder) op ogenblik (HW – 20min) van maximale neervorming in de voorhaven van Zeebrugge (uit De Maerschalck et al., 2024)

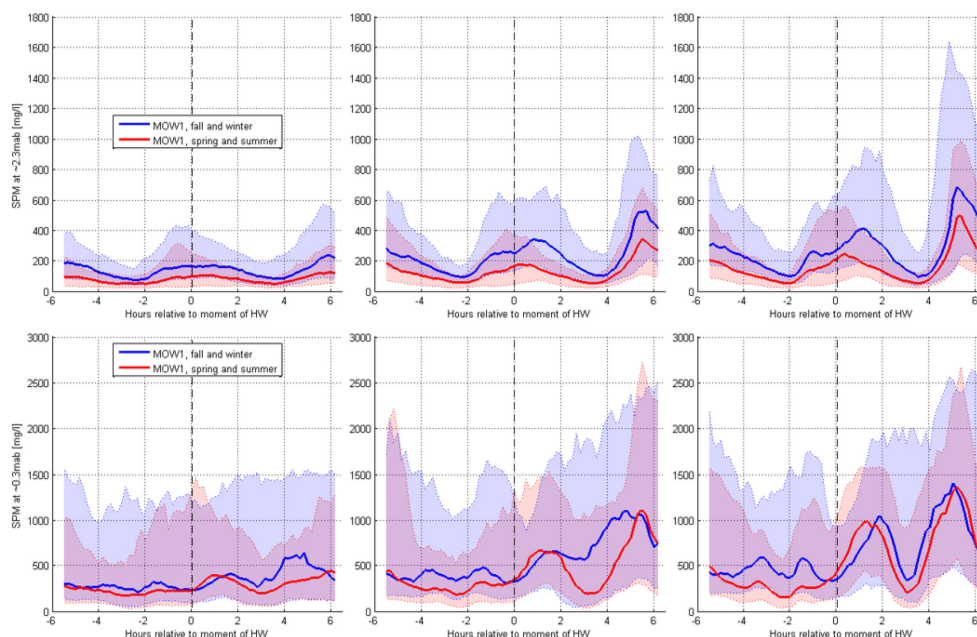
Het maximale bereik van de getijstrooming in de voorhaven valt tussen 1 uur voor hoogwater en het moment van hoogwater, bij gemiddeld springtij (Figuur 2, onder). Aan het uiteinde van het Albert II dok wordt verhoogde getijstrooming waargenomen (in neervorm). In CDNB strekt de neer zich uit tot ongeveer ter hoogte van de Leopold II dam, dus juist afwaarts van de ZP1 meetlocaties. In Figuur 8 t.e.m. Figuur 10 is de locatie van de densiteitsmetingen weergegeven op het moment van deze maximale stroming in het havenbekken voor de locaties in het Albert II dok, CDNB en ZP1.

1.3 Sedimentdynamiek in de Noordzee

Naast de stroming in de haven zal ook de sedimentdynamiek rond de haven, in de Noordzee, een invloed hebben op de import van slib en bijgevolg de variatie in de topslib laag. In De Maerschallck et al. (2020) werden (tripod) metingen van OD Natuur (KBIN) geanalyseerd bij MOW1, Blankenberge and WZbuoy voor de periode van 2008 tot 2013. De locaties zijn weergegeven in Figuur 3. In het algemeen worden lagere SPM concentraties verwacht in de zomer dan in de winter. Dan zijn er immers gemiddeld grotere golven, meer storm en meer windinvloed. Dat kan ook worden geobserveerd op basis van diepte gemiddelde seizoenale sedimentconcentraties die worden afgeleid van satellietbeelden (Van den Eynde et al., 2007; Fettweis et al., 2007) en uit het gemiddeld verloop van de geanalyseerde metingen (rode vs. blauwe curves in Figuur 4 uit De Maerschallck et al., 2020). Naast de seizoenale variatie is ook de variatie doorheen de springtij – doottij cyclus belangrijk, zoals weergegeven in Figuur 4. Bij doottij (Figuur 4, linkse kolom) is er een beperkte variatie van de sedimentconcentraties doorheen een gemiddeld getij. Voor gemiddeld en springtij is een duidelijke toename van de concentratie waar te nemen in de periode rond hoogwater en juist voor laagwater. De concentratie gedurende deze pieken is grootte orde 2 tot 3 keer de gemiddelde concentratie bij doottij.



Figuur 3: Locatie van de OD Nature tripod metingen (uit De Maerschallck et al., 2020)



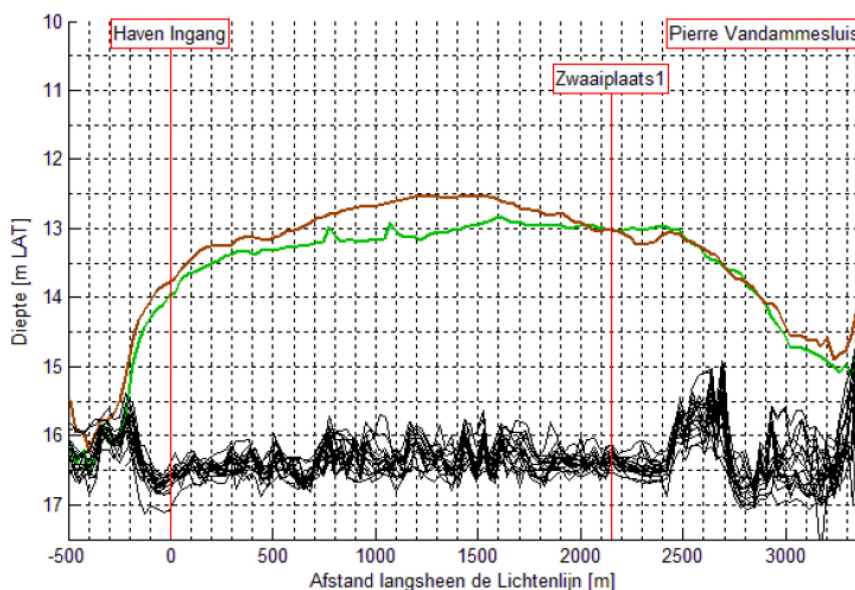
Figuur 4: Verloop van de sedimentconcentratie nabij de bodem (onder) en hoger in de waterkolom (boven) in het herfst & winterseizoen (blauw) en lente en zomerseizoen (rood) bij meetlocatie MOW1. De kolommen weerspiegelen situaties bij doortij tot springtij, van links naar rechts (uit De Maerschalck et al., 2020)

1.4 Sliblagen in Zeebrugge

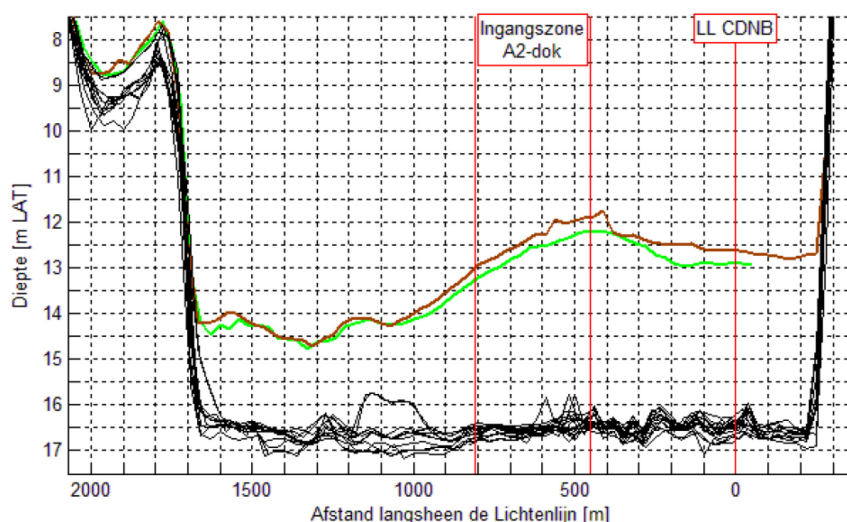
De evolutie van de ligging van de top van de sliblaag is het resultaat van de combinatie van aanslibbing, baggerwerken, opwoeling van sediment (resuspensie) en consolidatie. Een analyse van de sliblagen in Zeebrugge is onder andere uitgevoerd en beschreven in Dujardin et al. (2014), Dujardin et al. (2016) en Vanlede et al. (2022).

1.4.1 Beschrijving

In Dujardin et al. (2014) is een beschrijving weergegeven van de ligging van de sliblagen en werden een aantal karakteristieken van de toplaag van het slib in Zeebrugge in kaart gebracht. In Figuur 5 is het verloop van de top sliblaag, de overgang van de waterlaag naar de sliblaag, weergegeven langsheen de centrale toegangsgeul van de haven (CDNB). Deze top sliblaag is bepaald op basis van de reflectie van het 210 kHz SingleBeam signaal. Vanaf de doorgang na de koppen (-200m) is er een sterke toename van de ligging van de top sliblaag. Een maximum wordt bereikt net voorbij het Albert II dok (in Figuur 5 gelegen ca. 1100m langs de Lichtenlijn). Verder richting de Vandammesluis (in ZP1) neemt de hoogte van de top sliblaag opnieuw af. In Figuur 6 is het verloop van de topslib laag weergegeven langsheen de lichtenlijn van het Albert II dok. Hierbij kan een stijging worden opgemerkt van de lichtenlijn van CDNB richting de ingang van het Albert II dok. Vanaf hier daalt de ligging van de topslib laag tot een afstand van ca. 1000 m langsheen de lichtenlijn, waarna de topsliblaag min of meer een constante ligging heeft (zone 1000 – 1700 m).



Figuur 5: Verloop van de top sliblaag langsheen het CDNB, voor 2 peilingen in 2012 (uit Dujardin et al., 2014)



Figuur 6: Verloop van de top sliblaag langsheen de lichtenlijn van het Albert II dok, voor 2 peilingen in 2012 (uit Dujardin et al., 2014)

1.4.2 Sedimentatiesnelheden

Vanlede et al (2019) geven een analyse van de aanslibbingsmechanismes in de haven. Sediment komt de haven binnen via advectie van gesuspendeerd sediment vanuit de Noordzee. Eerdere analyses toonden slechts een zwakke correlatie aan tussen de sedimentimport en de zoetwaterimport of de golfcondities in de Noordzee. Drie belangrijke tijdschalen werden geïdentificeerd: intra-getij, springtij/doodtij en seizoenaal. Intratidaal geldt dat de sedimentimport is geconcentreerd in de periode van 2u voor HW tot HW. De sedimentconcentratie in de Noordzee is 2 tot 3 keer hoger tijdens springtij dan doottij, en een vergelijkbare springtij/doodtij cyclus is ook waarneembaar in de sedimentimport. De sedimentconcentratie kent aanzienlijke seizoensveranderingen: lager in de lente en zomer, hoger in de herfst en winter. Dit patroon komt overeen met de SSC-seizoensgebondenheid in het Belgische kustgebied. De 210 kHz reflector is ook ondieper in de winter, en sedimentlagen hebben een lagere dichtheid in de winter vergeleken met de zomer.

In de zomer heeft 65% van het sediment tussen de 210 kHz en 33 kHz reflectoren een dichtheid van minder dan 1,18 g/l; dit stijgt naar 80% in de winter.

In Dujardin et al. (2016) wordt een inschatting gemaakt van de natuurlijke evolutie van het topslib, op basis van (bagger)gegevens van 1999 tot 2011. Deze inschatting wordt gemaakt vanuit de veronderstelling dat, op een langere termijn, de evolutie of aangroei van topslib en baggerwerken in evenwicht zijn. Voor CDNB wordt dan een evolutie van 1,7 cm/dag ingeschat voor het topslib, met een baggerhoeveelheid van $2,5 \cdot 10^6$ TDS/jaar. Op basis van de peilingen wordt een seizoenale variatie vastgesteld in CDNB voor de toename van het topslib van ca. $1,1 \pm 0,9$ cm/dag in de lente en ca. $0,5 \pm 0,9$ cm/dag in de andere seizoenen. In Albert II dok wordt een toename van de topslib laag bepaald van $0,5 \pm 1,4$ cm/dag in de lente en 1,1 tot 1,9 cm/dag van zomer tot herfst (zie ook Tabel 9 en 10 in Dujardin et al., 2016).

In de evolutie van het 1,2 t/m³ niveau werd door Dujardin et al. (2016) een seizoenale trend beschouwd (data periode 2005 – 2011). Door het gebrek aan frequente metingen was een analyse op springtij-doodtij niveau niet mogelijk. Hierbij werd een aangroei van ca. 1,5 cm/dag ingeschat in de winter en de lente in CDNB. In de zomer en herfst werden iets lagere waarden ingeschat (gelegen tussen 0,5 en 1 cm/dag).

2 Beschrijving van de baggervrije periode

Op basis van BIS gegevens is er een baggervrije periode in het CDNB tussen 17/07/2023 om 5:12 en 11/08/2023 om 22:19. Er werd dus gedurende een periode van 26 dagen niet gebaggerd in de haven van Zeebrugge. De periode tussen de eerste en de laatste peiling binnen de baggervrije periode bedraagt 24 dagen. In sectie 2.1 is een overzicht weergegeven van de beschouwde metingen, in sectie 2.2 een overzicht van de priklocaties en in sectie 2.3 een overzicht van de instrumenten waarmee de metingen werden uitgevoerd. In sectie 2.4 is een overzicht weergegeven van de hydrodynamische condities (getij, golven) gedurende de meetperiode in de haven van Zeebrugge.

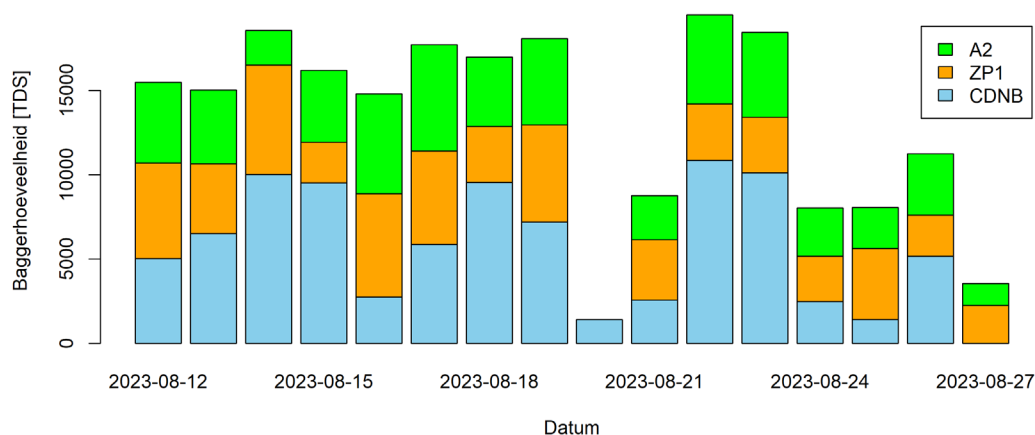
2.1 Overzicht van de metingen

Op verschillende tijdstippen werden dichtheitsprofielen opgemeten, zowel in het Albert II dok als in CDNB en ZP1. In Tabel 1 onderstaand is een overzicht weergegeven van het tijdstip van de metingen, de periode van de metingen in het getij en het tijdstip tussen de verschillende metingen. Binnen de beschouwde periode zijn 8 prikmomenten beschikbaar (7 voor CDNB). De laatste meting voorafgaand aan de beschouwde periode (14/07) valt 3 dagen voor het stoppen van de baggerwerken. De eerste meting na het opstarten van het baggeren valt 5 dagen na de opstart (18/08).

Tabel 1: Overzicht van de beschikbare dichtheitsmetingen rond de baggervrije periode (in vet tijdens baggervrije periode) met aanduiding van de meetlocaties en de fase van het getij)

Tijdstip	Meetlocaties	Fase van het getij
14/07/2023	A2	Opgaand (HW – 2u)
18/07/2023	A2, ZP1, CDNB	Opgaand (LW +1u)
18/07/2023	A2, ZP1, CDNB	Opgaand (HW)
20/07/2023	A2, ZP1, CDNB	Opgaand (HW – 3u)
25/07/2023	A2, ZP1	Opgaand (LW +1u) Afgaand (LW – 3u)
04/08/2023	A2, ZP1, CDNB	Afgaand (LW – 1u)
04/08/2023	A2, ZP1, CDNB	Opgaand (LW + 3u)
8/08/2023	A2, ZP1, CDNB	Afgaand (LW – 2u)
10/08/2023	A2, ZP1, CDNB	Afgaand (LW – 2u)
16/08/2023	A2, ZP1, CDNB	Opgaand (LW + 2u)
22/08/2023	A2, ZP1, CDNB	Opgaand (LW + 2u)

In Figuur 7 zijn voor de volledigheid ook de baggergegevens weergegeven voor de verschillende zones in Zeebrugge, in de twee weken na de baggervrije periode (waarin ook peilingen beschikbaar zijn (zie Tabel 1).

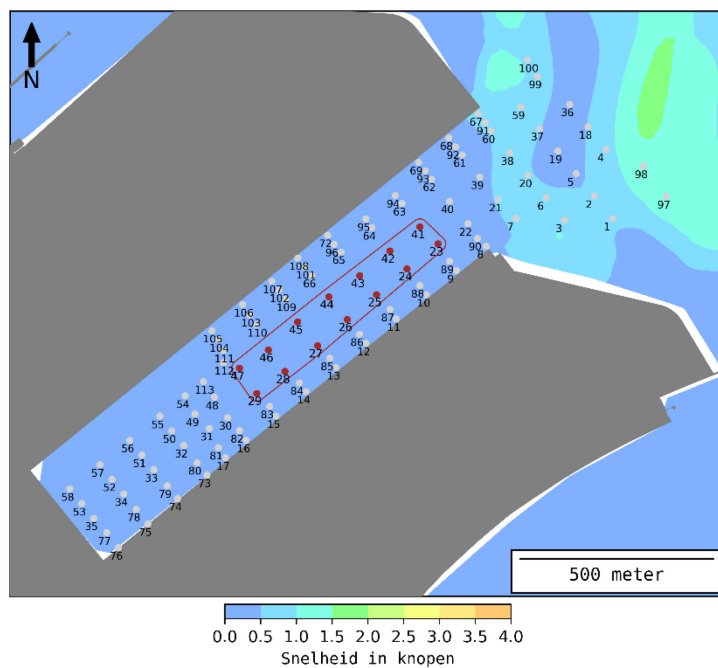


Figuur 7: Dagelijkse baggerhoeveelheden in de twee weken na de baggervrije periode per zone

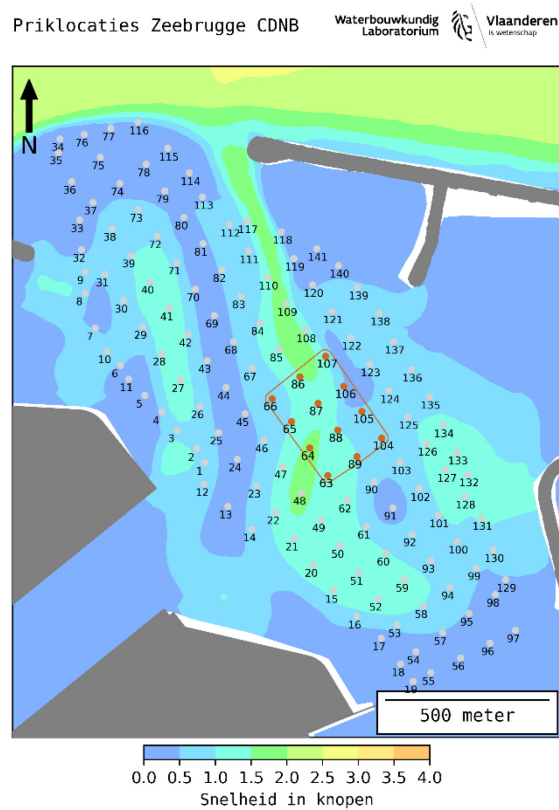
2.2 Priklocaties

Intensieve peilingen werden uitgevoerd in het CDB, ZP1 en Albert II dok. In het Albert II dok werden 14 locaties geselecteerd centraal in het dok, zoals weergegeven in Figuur 9. In ZP1 werden 12 locaties geselecteerd, eveneens centraal in de zone (zie Figuur 10). In CDB werden 12 locaties geselecteerd centraal rond de lichtenlijn, ter hoogte van het Albert II dok (zie Figuur 8). In ZP1 werden eveneens 12 locaties geselecteerd Figuur 10. Als achtergrond in Figuur 8 t.e.m. Figuur 10 zijn de resultaten van de stroomatlas van Zeebrugge weergegeven (De Maerschalck et al., 2024), voor de situatie bij springtij (HW - 40min). Hierbij is het duidelijk dat de beschouwde locaties in het Albert II dok en ZP1 niet gelegen zijn in zones met een hogere stroomsterkte, voor de locatie te CDB is de invloed van de neer bij maximale vloed wel aanwezig.

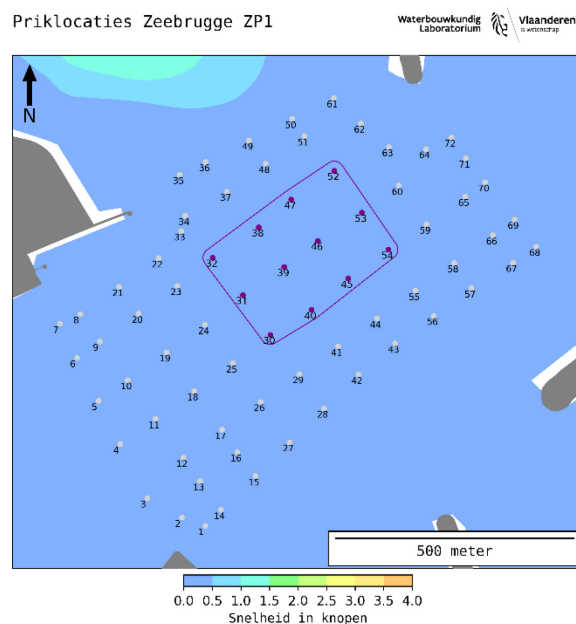
Priklocaties Zeebrugge A2

Waterbouwkundig
LaboratoriumVlaanderen
in wetenschap

Figuur 8: Priklocatie van de intensieve meetcampagne in het Albert II dok



Figuur 9: Priklocaties van de intensieve meetcampagne in CDN

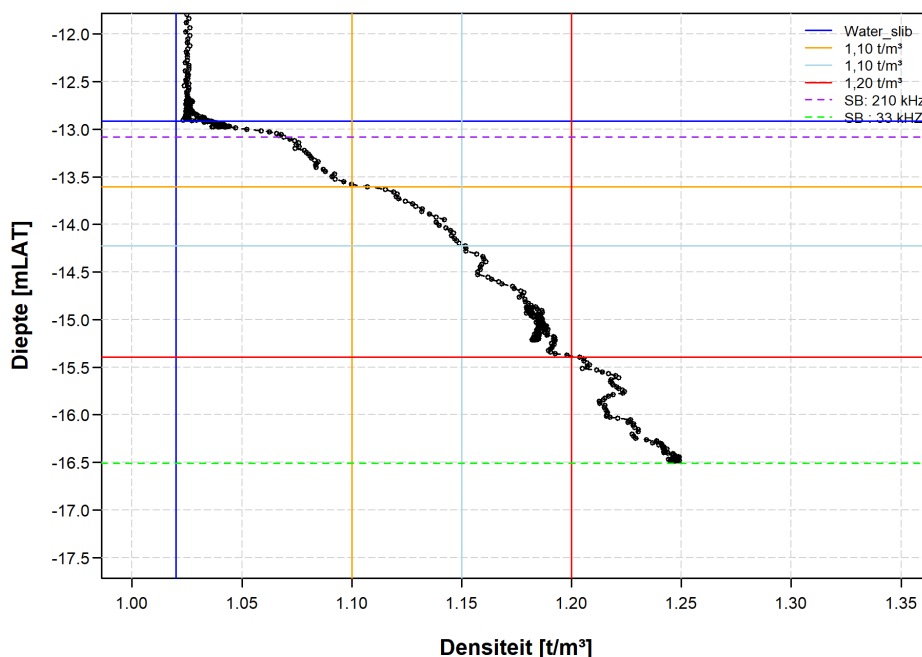


Figuur 10: Priklocaties van de intensieve meetcampagne in ZP1

2.3 Densiteitsmetingen

2.3.1 Admodus

De densiteitsprofielen uitgevoerd door Vlaamse Hydrografie worden uitgevoerd met het Admodus USP toestel. Een meer uitvoerige beschrijving van het werkingsmechanisme en het gebruik van het toestel is terug te vinden in Meire et al. (2020). Een voorbeeld van zo'n densiteitsprofiel is weergegeven in Figuur 11. De ruwe meetdata wordt gevalideerd op basis van een vaste methodiek, zoals weergegeven in sectie 2.3.2.



Figuur 11: Overzicht van de diepteligging van de 1,10 g/cm³; 1,15 g/cm³ en 1,20 g/cm³ dichtheitswaarde en de water-slib overgang op basis van een densiteitsprofiel met de Admodus. Eveneens zijn de 210 kHz en 33 kHz reflector weergegeven.

2.3.2 Verwerking van de data

Elke meting met de Admodus genereert een *.csv file. Een lijst van metadata (priklocatie, datum, tijdstip) wordt gegenereerd op basis van de naamgeving van deze files. Uit elke meetfile worden vervolgens de meest relevante parameters bijgehouden (diepte, dichtheid, attenuatie).

Als eerste stap in de verwerking van de data wordt volgende filtering toegepast om outliers te verwijderen:

- metingen met absolute waarden kleiner dan 0,95 en groter dan 1,35 worden verwijderd
- opeenvolgende waarden met een dichtheitsverschil groter dan 0,3 g/cm³ worden verwijderd

Vervolgens wordt de dieptepositie van een aantal dichtheitswaarden bepaald, meer bepaald 1,10 g/cm³, 1,15 g/cm³ en 1,20 g/cm³, naast de water-slib overgang (hiervoor wordt 1,03 g/cm³ geselecteerd). Om een iets robuustere bepaling van de diepteligging van deze lagen te bekomen, wordt niet de eerste overschrijding van een threshold waarde weerhouden. Er wordt echter steeds rekening gehouden met 3 opeenvolgende meetwaarden. Wanneer deze drie opeenvolgende waarden groter zijn dan de beschouwde dichtheid threshold waarde, wordt de dieptemeting van de eerste van de deze 3 waarden weerhouden als diepteligging van deze threshold dichtheitswaarde.

Op een volledig densiteitsprofiel worden 4 karakteristieke dieptewaarden weerhouden:

- diepteligging water – slib overgang
- diepteligging 1,10 g/cm³
- diepteligging 1,15 g/cm³
- diepteligging 1,20 g/cm³

Op basis van het densiteitsprofiel wordt eveneens een profiel van de massaconcentratie in ton droge stof (c_{tds}) bepaald. Deze wordt berekend aan de hand van volgende formule:

$$c_{tds} = \frac{(\rho_{slib} - \rho_{water})}{(\rho_{sed} - \rho_{water})} \rho_{sed}$$

waarbij $\rho_{sed} = 2,65 \text{ g/cm}^3$; $\rho_{water} = \text{ca. } 1,018 \text{ g/cm}^3$ en $\rho_{slib} [\text{g/cm}^3]$ de meetwaarde van de Admodus (bulk densiteit). Voor het bepalen van het totale droge stof gehalte per prik (zoals gebruikt in sectie 3.4.3), wordt dit profiel van de massaconcentratie $[\text{TDS/m}^3]$ geïntegreerd over de diepte $[\text{TDS/m}^2]$.

2.3.3 Single Beam data

Naast de prikdata worden ook de data van de echosounder, single beam data aan 33 kHz en 210 kHz, ingelezen. De locatie van de prik wordt ook weerhouden op basis van de single beam data. De single beam data wordt opgemeten juist voor het opmeten van het densiteitsprofiel met de Admodus USP. Waarden van de single beam kleiner dan 10 mLAT, zowel voor de 33kHz en 210 kHz data, worden niet weerhouden en op NA gezet.

2.4 Hydrodynamische condities

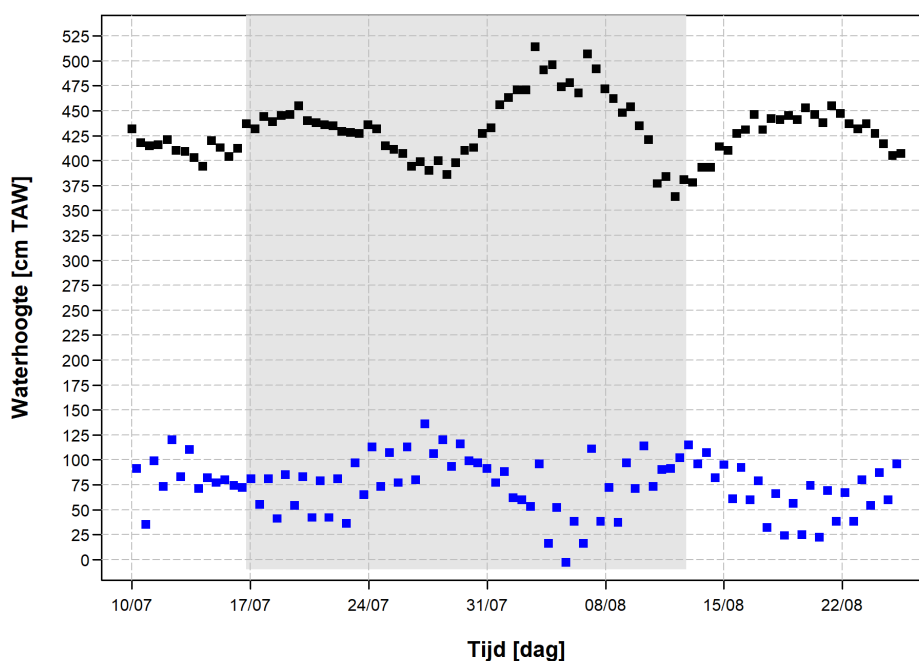
De metingen die gebruikt worden voor het beschrijven van de hydrodynamische condities gedurende de baggervrije periode werden afgehaald van de website Meetnet Vlaamse Banken. Hierbij wordt enerzijds het getij weergegeven, opgemeten aan de Leopold II dam. Anderzijds worden de golfcondities weergegeven op basis van de significante golfhoogte, gemeten ter hoogte van de Zandopvangkade.

2.4.1 Getijcondities

De baggervrije periode wordt gedefinieerd als de periode van 17/07/2023 tot 12/08/2023 en is als grijze achtergrond weergegeven in Figuur 12. In Figuur 12 is een langere periode weergegeven die overeen komt de peilingen die voor en na deze baggervrije periode beschikbaar waren (zie Tabel 1). In Tabel 2 zijn de belangrijkste getijkarakteristieken weergegeven gedurende de volledige periode en de baggervrije periode. Het is duidelijk (Figuur 12) dat de getijden met de grootste getijverschillen (zowel hoogste hoogwaters als laagste laagwaters) optreden naar het einde van de baggervrije periode, tussen 3 en 6 augustus.

Tabel 2: Belangrijkste getijstatistieken tijdens de meetperiode en de baggervrije periode

	Meetperiode			Baggervrije periode		
	Min	Gem	Max	Min	Gem	Max
Hoogwater	364	431	514	364	433	514
Laagwater	-3	74	136	-3	78	136
Tijverschil	254	356	491	254	354	491



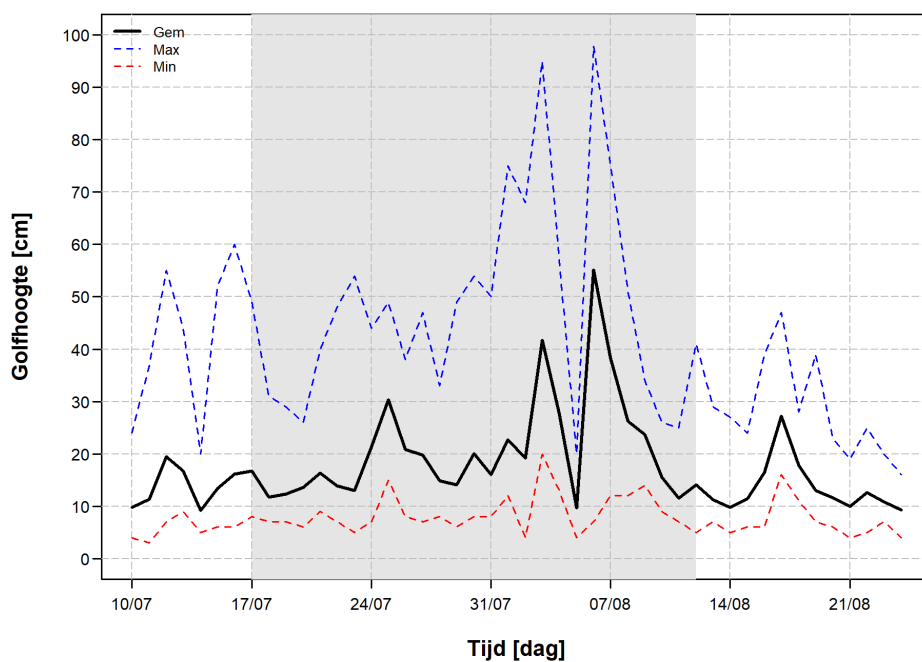
Figuur 12: Verloop van hoog- en laagwaters ter hoogte van de Zeebrugge Leopold II dam, met aanduiding van de baggervrije periode in grijze achtergrond

2.4.2 Golfcondities

De golfcondities gedurende de intensieve meetcampagne zijn weergegeven in Tabel 3 en Figuur 5. De dagen met de sterkste golfcondities (gemiddelde significante golfhoogte van 41 cm en 55 cm) treden op respectievelijk 3/08 en 6/08 op. Dit moment valt samen met de springtijperiode met de grootste tijverschillen (zie sectie 2.4.1). Eerdere analyses toonden slechts een zwak verband aan tussen golfcondities en sedimentatie in de haven (Vanlede et al., 2022)

Tabel 3: Belangrijkste statistieken van de golfcondities [cm] tijdens de meetperiode en de baggervrije periode

	Meetperiode	Baggervrije periode
Minimum (gem.)	7,8	8,7
Gemiddelde	17,8	20,8
Maximum (gem.)	42,0	48,4



Figuur 13: Verloop van de gemiddelde, maximale en minimale golfcondities ter hoogte van de Zandopvangkade, bepaald per dag.

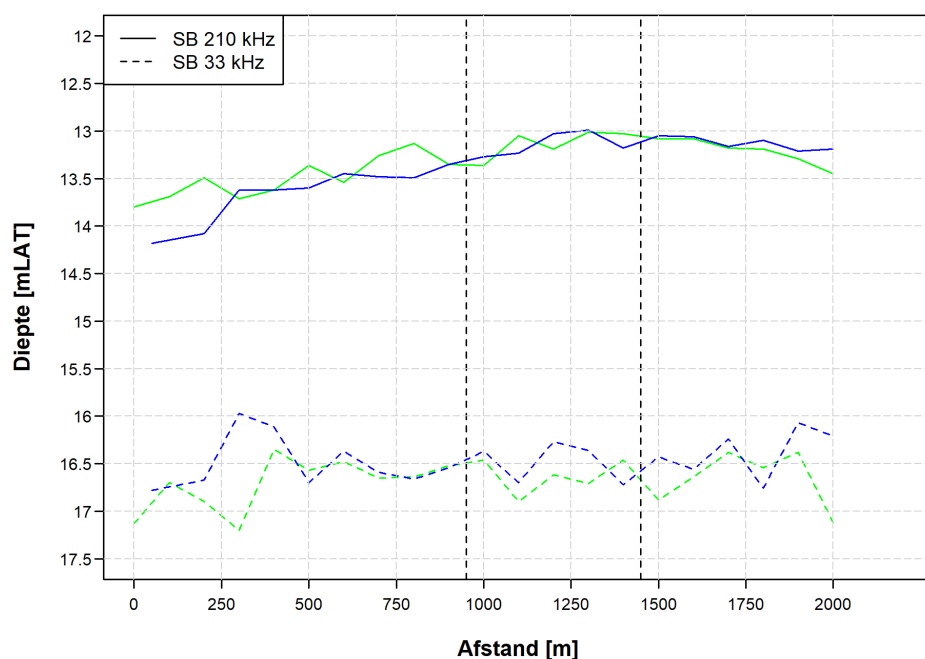
3 Prikmetingen

In dit hoofdstuk wordt per zone een beschrijving weergegeven van de prikmetingen. In sectie 3.4 wordt dieper ingegaan op een aantal aspecten van de metingen, zoals de herhalingen op 1 dag (sectie 3.4.1), de gradiënt van de sliblagen in het Albert II dok (sectie 3.4.2) en de toename van het droge stof gehalte doorheen de baggervrije periode (sectie 3.4.3).

3.1 CDNB

3.1.1 Algemene beschrijving van slibcondities

In het CDNB is 1 peiling (10/08) beschikbaar over de volledige intensieve meetcampagne, waarbij het volledige gebied werd opgemeten. Er werden 2 raaien geselecteerd (van respectievelijk priklocatie 76 tot 56 en 77 tot 96, zie Figuur 44), van aan de koppen tot ZP1.



Figuur 14: Overzicht van de diepteligging van de 210 kHz (volle lijnen) en 33 kHz reflector langsheen 2 raaien in de lengterichting van CDNB. Verticale lijnen geven locatie Albert II dok weer.

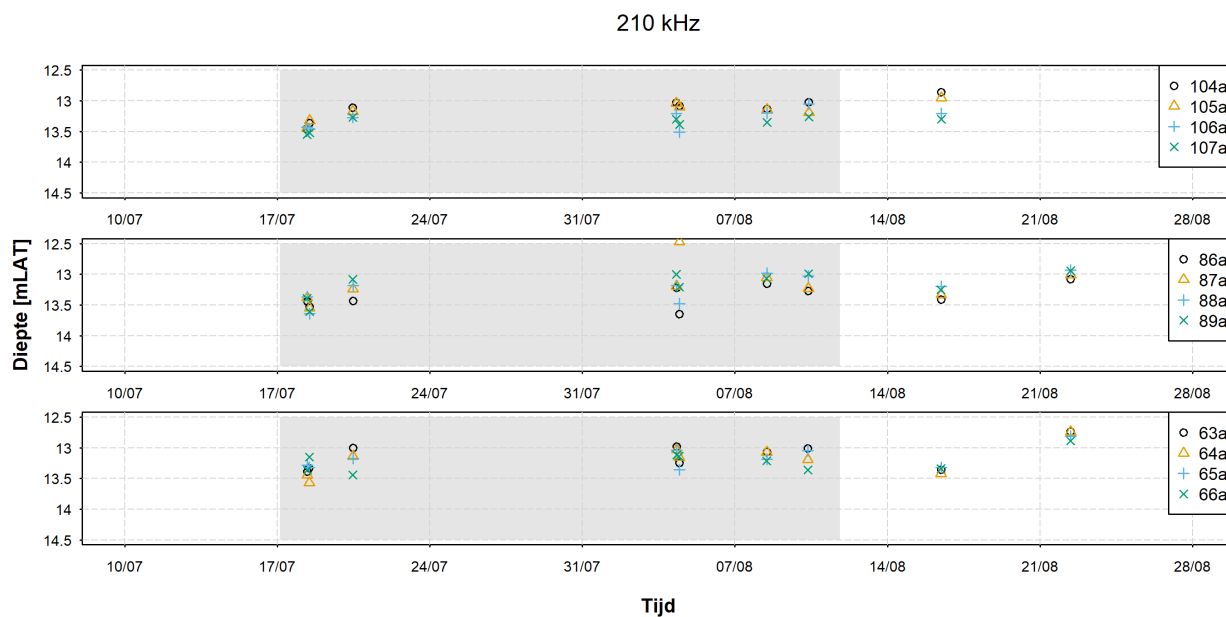
In Figuur 14 is het verloop van de 210 kHz en de 33 kHz weergegeven, langsheen deze raaien. De verticale lijnen geven de locatie van het Albert II dok weer en zijn eveneens de aflijning van de zone waarin frequent werd gepeild (zie Figuur 9). Er kan een zeer gelijkaardige verloop van de 210 kHz reflector worden waargenomen zoals beschreven in sectie 1.4. Deze stijgt van aan de koppen (rond 14 mLAT) totdat een maximum bereikt wordt ter hoogte van het Albert II dok (rond 13 mLAT). Richting ZP1 is opnieuw een beperkte afname van de reflectordiepte waar te nemen. In het verloop van de 33kHz reflector valt geen duidelijk patroon waar te nemen. Dit algemeen patroon komt goed overeen met de beschrijving uit Dujardin et al. (2016), weergegeven in Figuur 5.

3.1.2 Intensieve meetcampagne

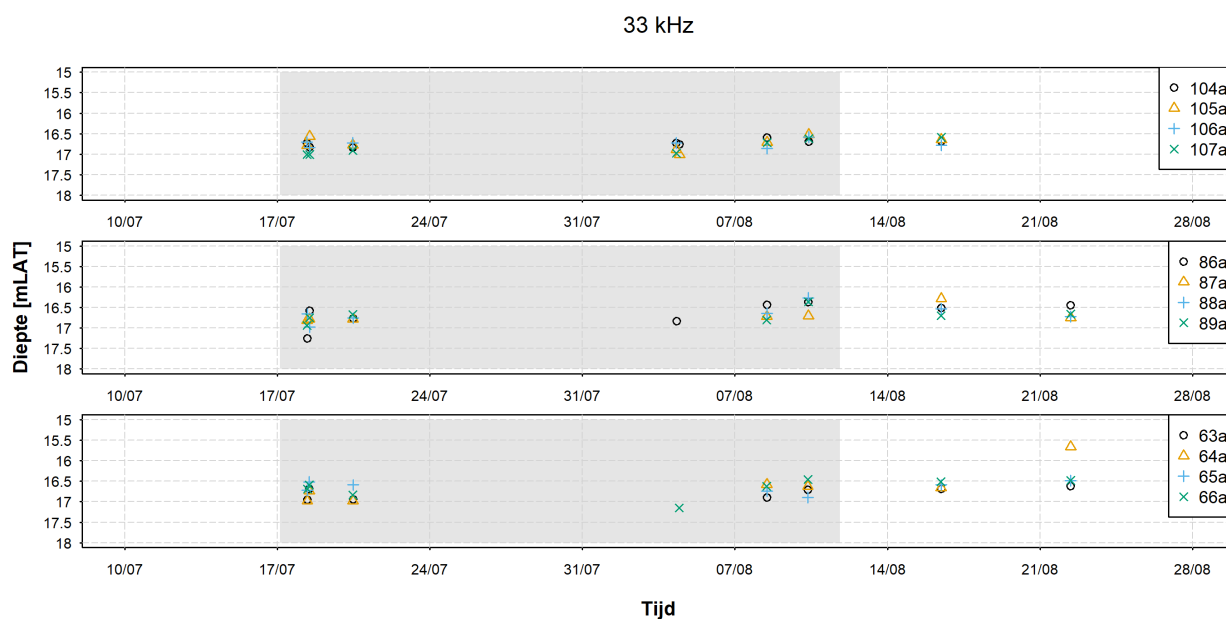
In CDNB werden tijdens de baggervrije periode 6 metingen uitgevoerd. Op 18/07 en 4/08 werden 2 prikken uitgevoerd. In totaal werden 12 priklocaties intensief bemeten (Figuur 9). De resultaten zijn weergegeven in 3 transecten volgens de lengterichting van het dok (N-NW=> Z-ZO) en per parameter (SB 210 kHz, SB 33 kHz, 1,1 t/m³ en 1,2 t/m³; zie Figuur 15 t.e.m. Figuur 18). De afstand langsheen elk transect bedraagt ongeveer 300 m.

Op basis van de SB210 kHz (Figuur 15) kan een lichte sedimentatie worden waargenomen gedurende de meetcampagne. Er kan geen duidelijk ruimtelijk patroon worden waargenomen, al lijkt het centrale transect iets minder te stijgen. Voor de ligging van de 1,1 t/m³ (Figuur 17) kan geen duidelijk verschil worden waargenomen gedurende de baggervrije periode voor de meest oostelijke raai (Figuur 17, boven). In het centrale en westelijk transect (Figuur 17 midden en onder) is wel sedimentatie waarneembaar, met een diepte die een kleine halve meter afneemt. Op de meting van 5/08 valt de spreiding in de metingen op, in sectie 3.4.1 wordt hier dieper op ingegaan. De beperkte variatie die kan worden waargenomen in de ligging van de 1,2 t/m³ volgt eerder een springtij-doodtij patroon, met iets hogere waarden op 4/08 en 22/08 dan tussenin, dan een duidelijk patroon volgens de baggervrije periode (zonder en met baggeren). Dit patroon lijkt ook iets uitgesprokener voor het meest afwaartse meetpunten (prikns 63 en 104).

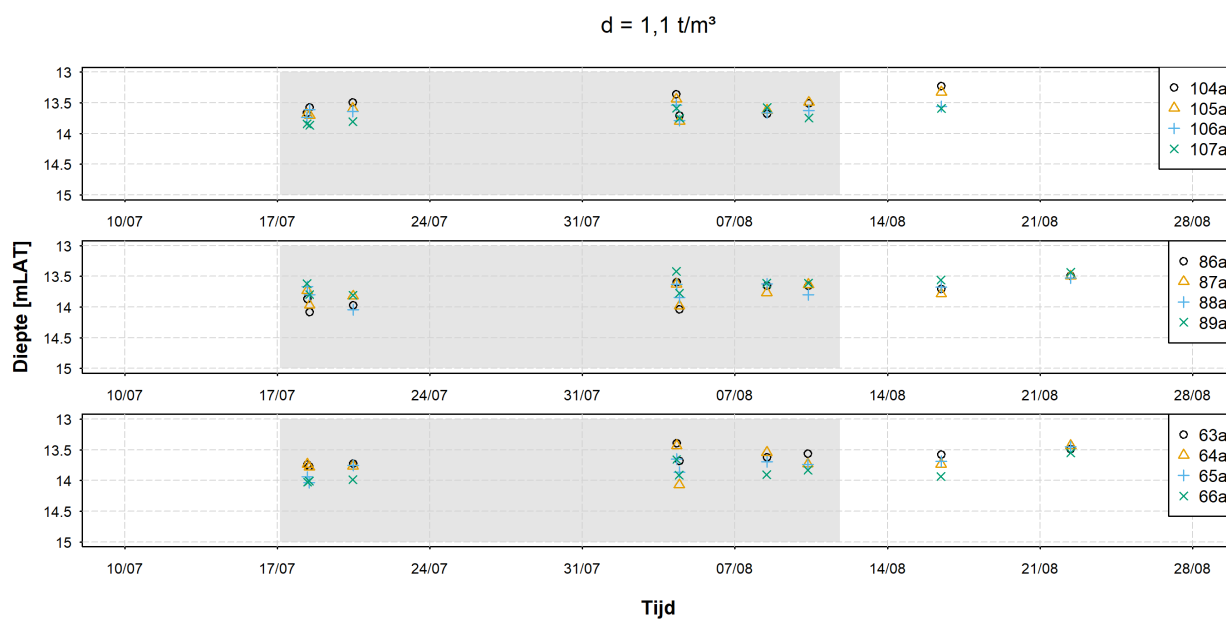
Aangezien weinig ruimtelijke variatie te zien is in Figuur 14 t.e.m. Figuur 18 werd een samenvattende figuur gemaakt van de gemiddelde ligging van de verschillende densiteitsniveaus over alle meetpunten in CDNB (Figuur 19). Op basis hiervan kan een gemiddelde stijging van de topslib laag van $1,2 \pm 0,5$ cm/dag worden bepaald voor deze zone (verschil laatste en eerste meting in baggervrije periode). Dit is gelijkaardig als de waarden gevonden in Dujardin et al. (2016), zie sectie 1.4.2. Op basis van het verloop van de stijging kan echter wel opgemerkt worden dat de grootste stijging de eerste dagen plaatsvindt, ca. 10 cm/dag, waarna nog nauwelijks een stijging kan worden opgemerkt (0,3 cm/dag).



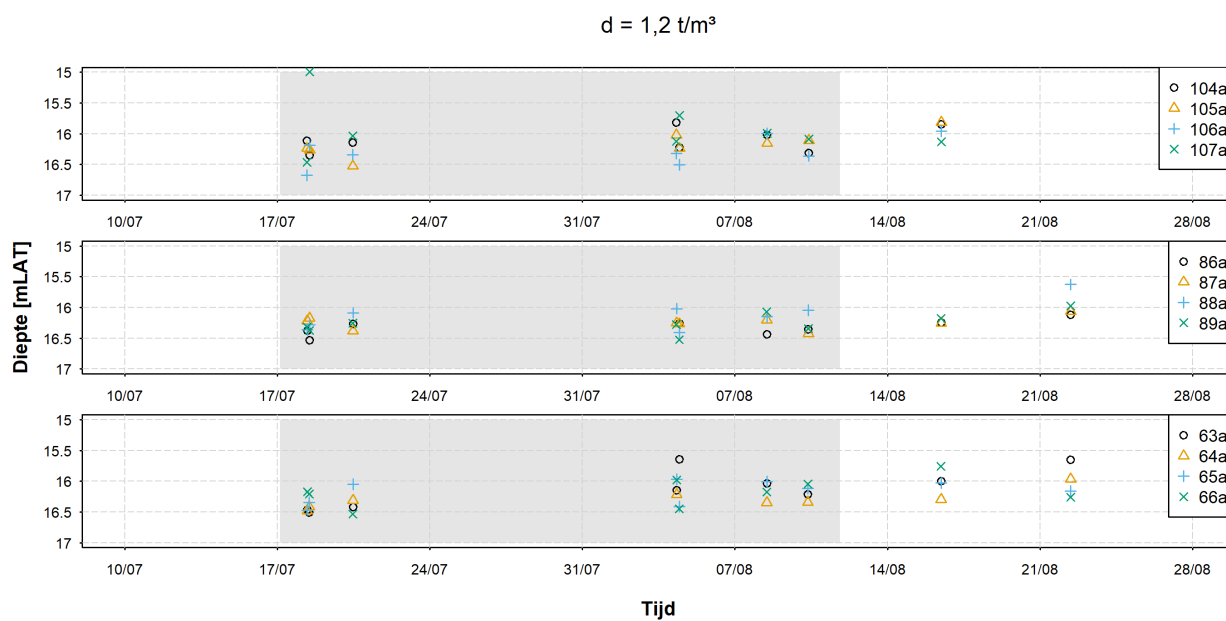
Figuur 15: Verloop van de ligging van de 210 kHz reflectie langs 3 transecten (boven = oostelijk, onder = westelijk) in CDNB, met aanduiding van de baggervrije periode (grijze achtergrond)



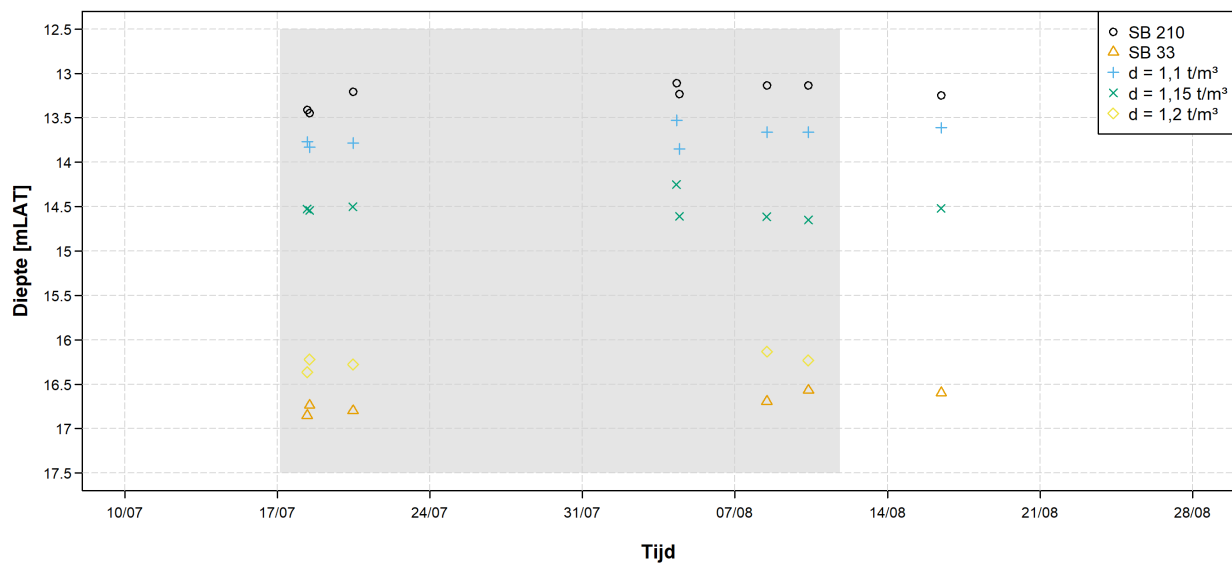
Figuur 16: Verloop van de ligging van de 33 kHz reflectie langs 3 transecten (boven = oostelijk, onder = westelijk) in CDNB, met aanduiding van de baggervrije periode (grijze achtergrond)



Figuur 17: Ligging van de $1,10 \text{ t/m}^3$ langs 3 transecten boven = oostelijk, onder = westelijk) in CDNB, met aanduiding van de baggervrije periode (grijze achtergrond)



Figuur 18: Ligging van de $1,20 \text{ t/m}^3$ gedurende de meetcampagne langs 3 transecten boven = oostelijk, onder = westelijk) in CDNB, met aanduiding van de baggervrije periode (grijze achtergrond)



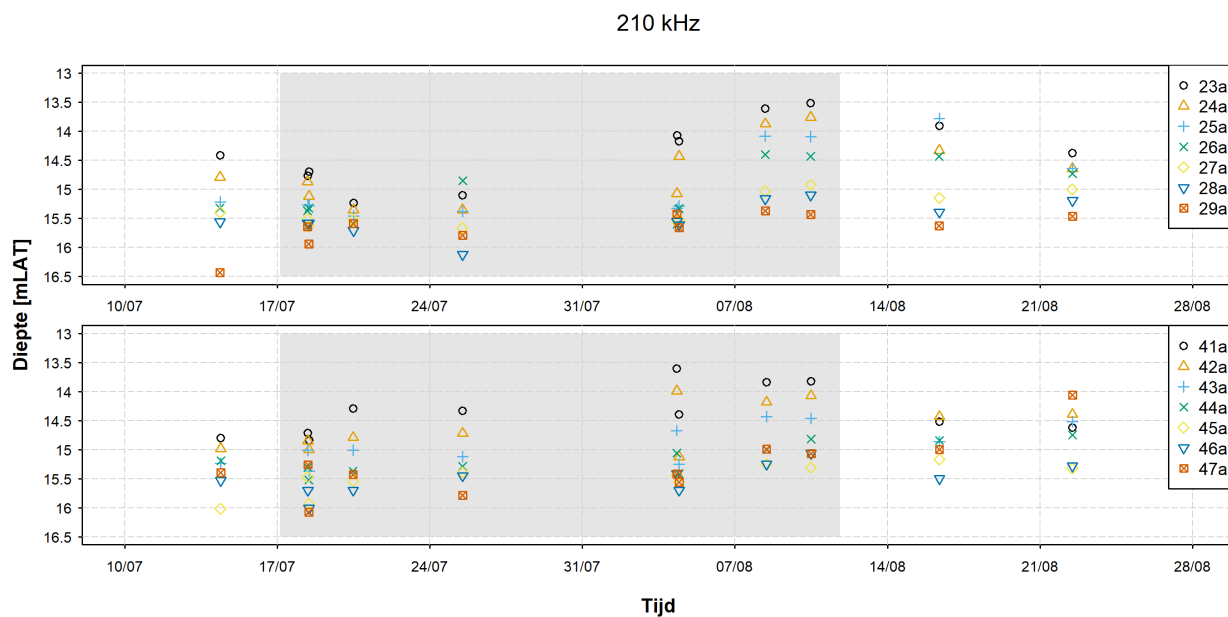
Figuur 19: Gemiddelde ligging van de densiteitsniveaus over alle priklocaties in CDNB op de verschillende tijdstippen

3.2 Albert II dok

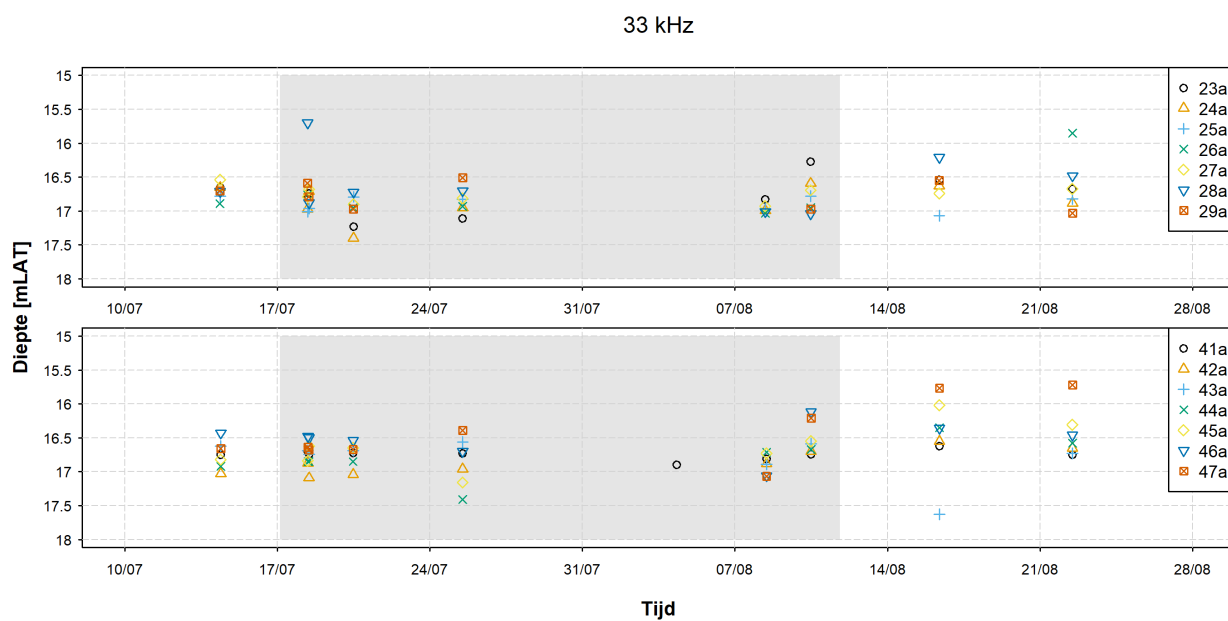
In het Albert II dok zijn 14 meetlocaties intensiever bemeten gedurende de baggervrije periode, zoals weergegeven in Figuur 8. De resultaten zijn steeds weergegeven volgens 2 transecten: priklocaties 41 tot 47 vormen het noordelijkste transect, priklocaties 23 tot 29 vormen het zuidelijke transect. Elk transect heeft een lengte van 600 m, met meetpunten elke 100 meter. De laterale afstand tussen de transecten is ca. 75 m. In Figuur 21 t.e.m. Figuur 24 is respectievelijk het verloop van de diepteligging van de 210 kHz, de 33 kHz, de 1,1 t/m³ en de 1,2 t/m³ weergegeven.

In het verloop van de water-slib interface (210 kHz) valt een duidelijke sprong te noteren tussen de metingen van 25/07 en 04/08. De gemiddelde toename van deze water-slib overgang tussen beide peilingen is $0,30 \pm 0,40$ m. De meest uitgesproken toename is in de meest afwaartse punten (richting CDNB), met respectievelijk 1,03 m en 0,73 m. Naast deze sterke toename tussen beide peilingen valt ook de sterke gradiënt op in deze water slib overgang vanaf de kant aan CDNB (priklocaties 23 en 41) richting het einde van het dok, die ook een duidelijke springtij – doodtij variatie kent. Dit wordt verder uitgewerkt in sectie 3.4.2 en is ook overeenkomend met de algemene beschrijving in sectie 1.4.1. Over de volledige baggervrije periode wordt een sedimentatiesnelheid voor de topslib laag van $3,6 \pm 1,7$ cm/dag en $2,3 \pm 1,2$ cm/dag voor respectievelijk het noordelijke en zuidelijke transect gevonden. Dit is hoger dan weergegeven in Durjardin et al. (2016), zie sectie 1.4.2.

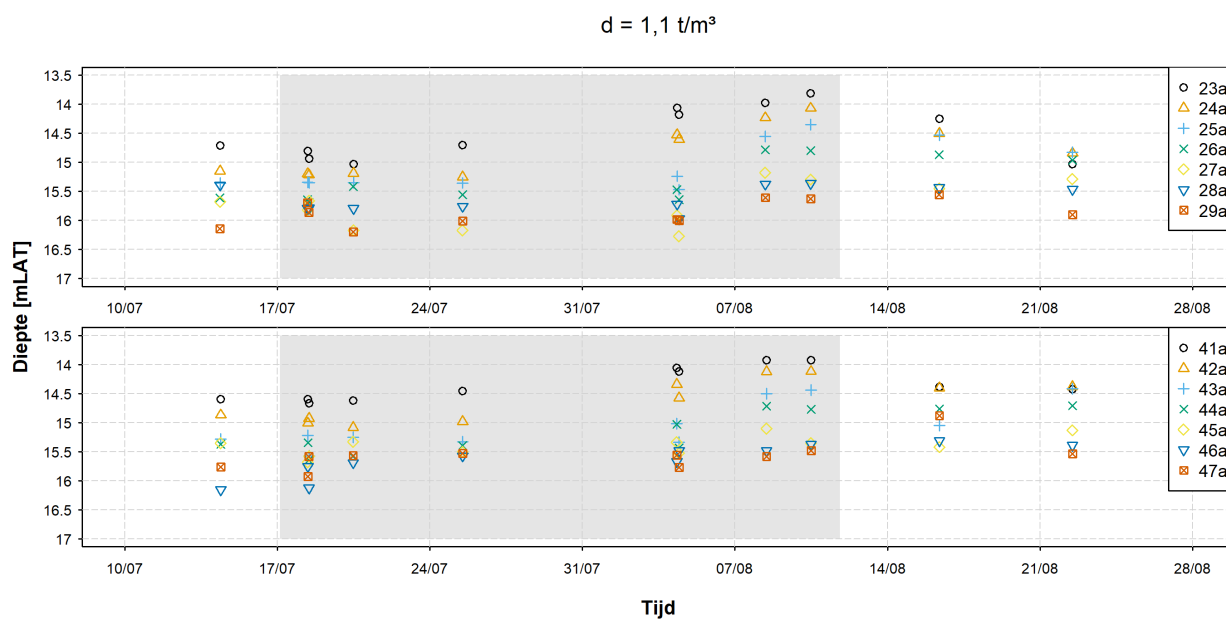
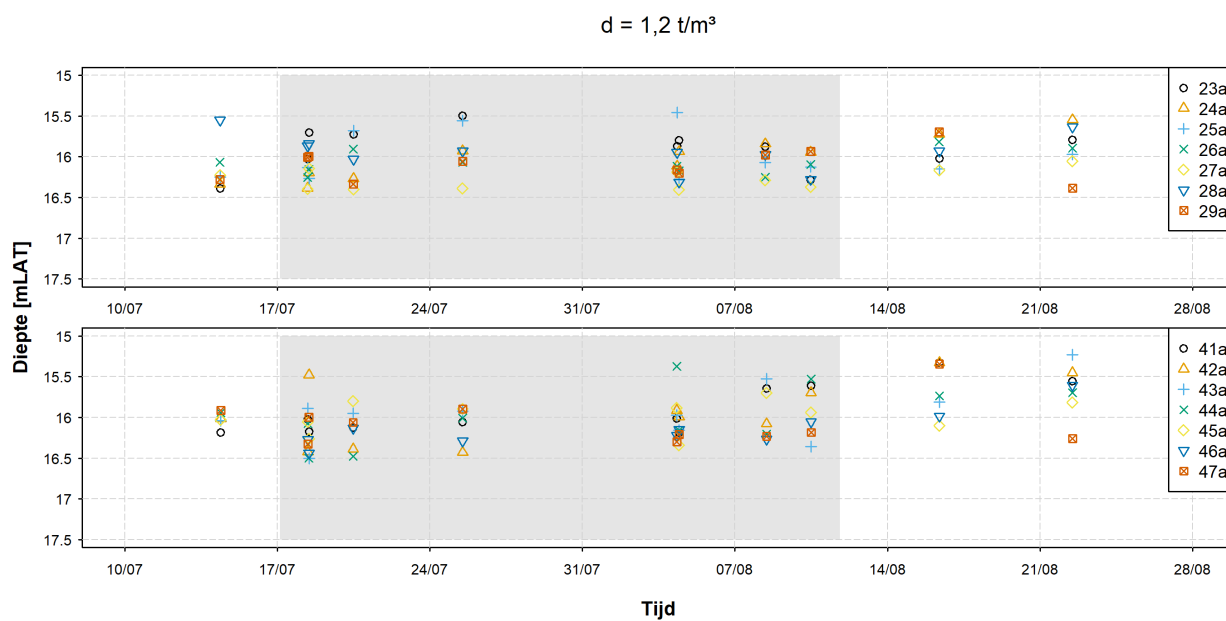
In het verloop van de 33 kHz langsheen deze transecten (Figuur 22) is daarentegen geen duidelijke gradiënt te noteren. Een duidelijk verloop over de beschouwde periode ontbreekt eveneens. De hoogste waarden worden waargenomen na de baggervrije periode, met name in het zuidelijke transect. Voor de 1,1 t/m³ wordt een gelijkaardig verloop als gradiënt waargenomen, zoals beschreven voor de water-slib overgang. Voor de 1,2 t/m³ wordt geen duidelijk patroon waargenomen over de beschouwde meetperiode. Het gemiddelde verschil tussen de verschillende priklocaties van de ligging van de 1,20 t/m³ is $0,85 \pm 0,15$ m, voor de ligging van de 1,1 t/m³ is dit verschil $1,64 \pm 0,25$ m.



Figuur 20: Verloop van de ligging van de 210 kHz reflectie langs 2 transecten in het A2 dok



Figuur 21: Verloop van de ligging van de 33 kHz reflectie langs 2 transecten in het A2 dok

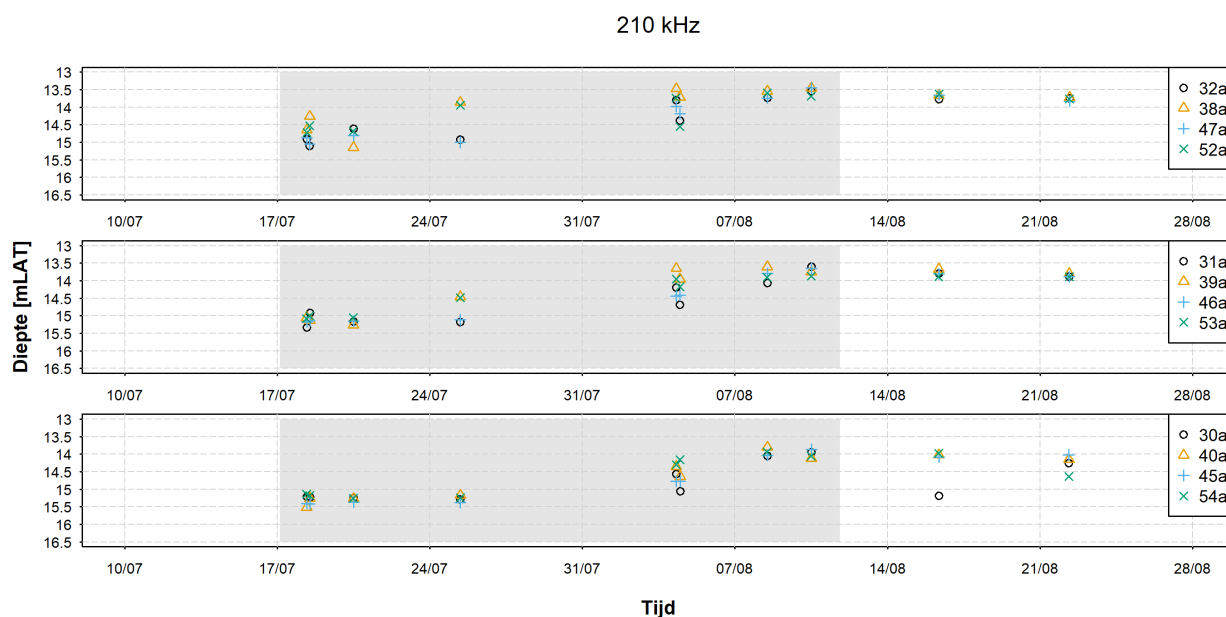
Figuur 22: Verloop van de ligging van de $1,1 \text{ t/m}^3$ diepteligging langsheen 2 transecten in het A2 dokFiguur 23: Verloop van de ligging van de $1,2 \text{ t/m}^3$ diepteligging langsheen 2 transecten in het A2 dok

3.3 ZP1

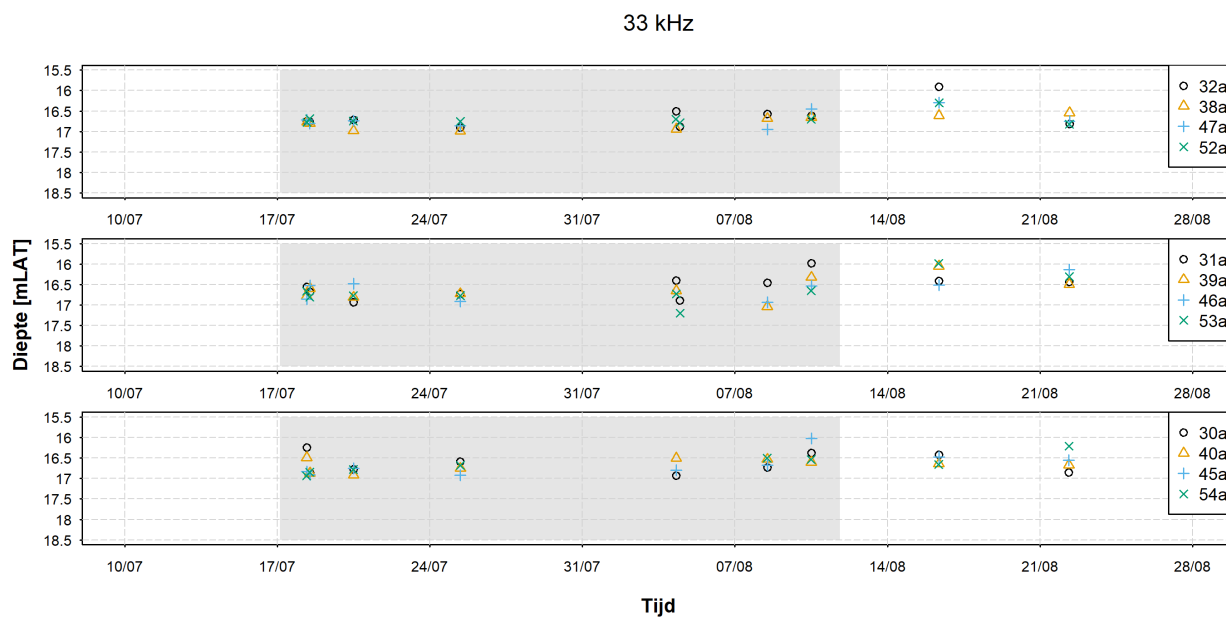
In ZP1 zijn er 12 meetlocaties intensiever bemeten gedurende de baggervrije periode, zoals weergegeven in Figuur 10. De resultaten zijn steeds weergegeven volgens 3 transecten, deze zijn oost- westelijk georiënteerd, dus loodrecht op de lengterichting van CDNB.

Gelijkaardig met het A2 dok valt in de diepteligging van de 210 kHz reflector (Figuur 25) de sterke stijging op tussen de metingen van 27/07 en 04/08. De gemiddelde stijging van de water-slib overgang over de volledige beschouwde periode bedraagt ca. 1,5 m of gemiddeld 5,8 cm/dag. De water slib overgang komt dieper te liggen naarmate men verder weg beweegt van CDNB (van boven naar onder in Figuur 25), zoals eveneens weergegeven in de algemene beschrijving (Figuur 5). Minimale dieptes worden geobserveerd in de peiling van 10/08, waarna deze opnieuw verdiepen door baggerwerken. Voor de 33 kHz is er geen duidelijk verloop vast te stellen doorheen de meetperiode (Figuur 26). Voor de 1,2 t/m³ (Figuur 27) valt de consistent hogere ligging op van de meest westelijke punten (31,32) op in de 2 afwaartse transecten t.o.v. de andere punten. Dit patroon wordt niet teruggevonden in de 33 kHz.

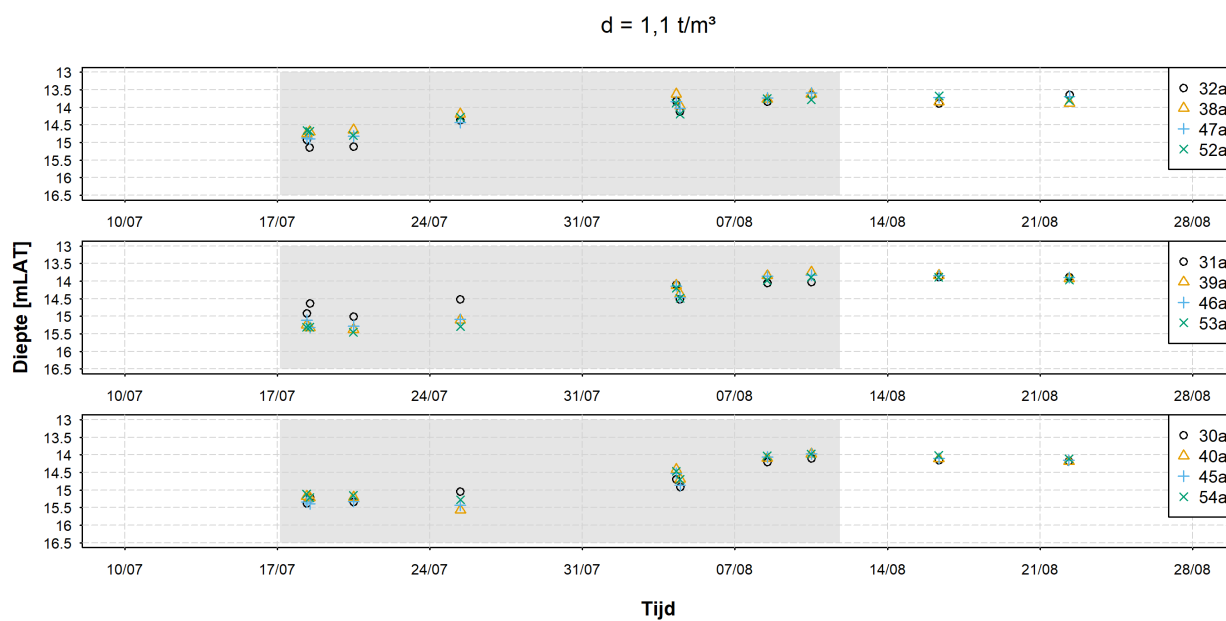
Dit verloop van de verschillende karakteristieke waarden is, voor het 1^e transect, nog eens samengevat in Figuur 29. Raai 2 en 3 zijn terug te vinden in Bijlage 2. Zowel de 210 kHz reflector en de 1,1 t/m³ vertonen een gelijke trend en sprong tussen 27/07 en 05/08. Voor de 1,2 t/m³ lijkt er een heel geleidelijke stijging te zijn (0,9 cm/dag). De 1,15 t/m³ volgt de 1,10 t/m³, al is de sterke sprong hier niet aanwezig en neemt de diepteligging van deze densiteit geleidelijker af.

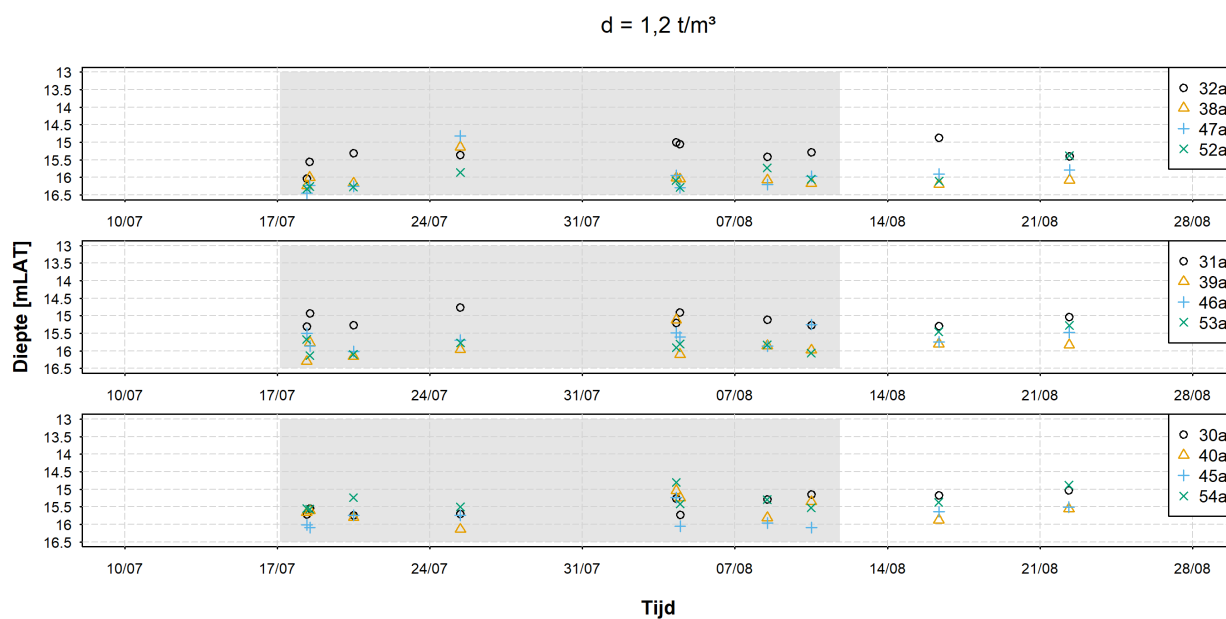


Figuur 24: Verloop van de ligging van de 210 kHz reflectie langs 3 transecten in ZP1

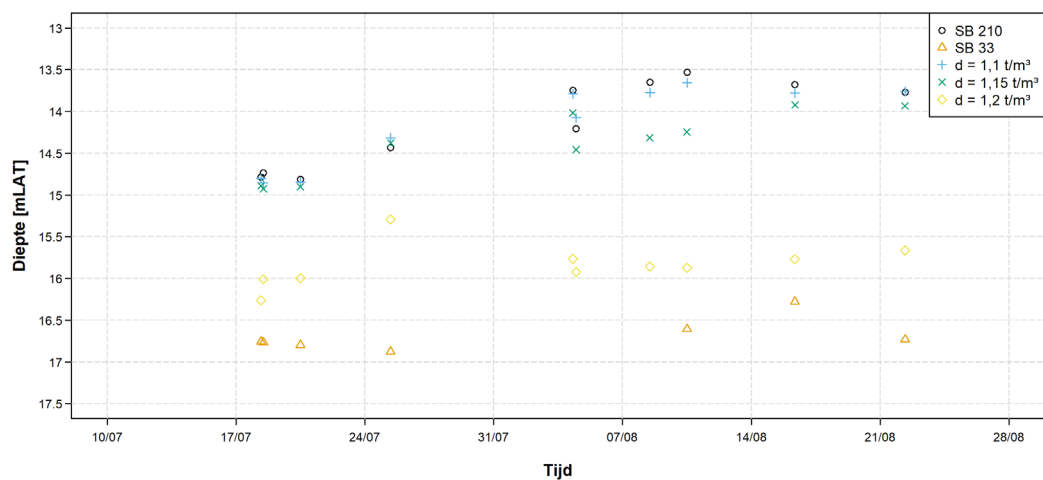


Figuur 25: : Verloop van de ligging van de 33 kHz reflectie langs 3 transecten in ZP1

Figuur 26: Verloop van de ligging van de $1,1 \text{ t/m}^3$ reflectie langs 3 transecten in ZP1



Figuur 27: Verloop van de ligging van de $1,2 \text{ t/m}^3$ reflectie langs 3 transecten in ZP1

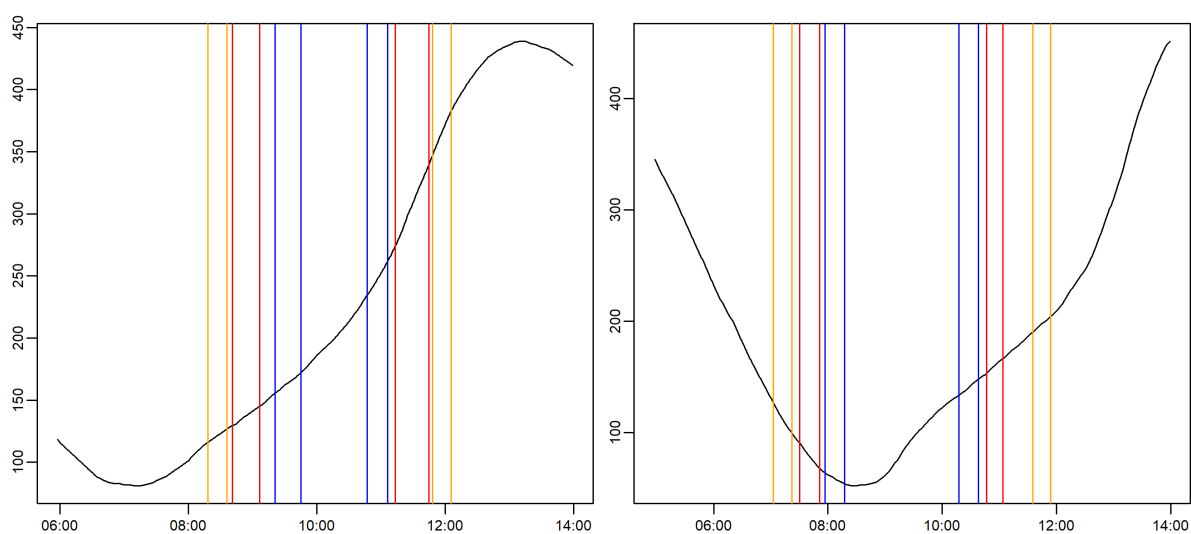


Figuur 28: Gemiddeld verloop, van de verschillende prikken op transect 1 in ZP1, van de ligging van de 210 kHz en 33 kHz reflectoren enerzijds en $1,1 \text{ t/m}^3$ en $1,2 \text{ t/m}^3$ dichtheitsdieptes

3.4 Analyse

3.4.1 Herhalingsmetingen

Zowel op 18/07 als op 04/08 werden twee intensievere meetcampagnes uitgevoerd, en dit zowel in A2, CDNB en ZP1. In Figuur 30 zijn de periode van de metingen weergegeven, voor zowel de meting op 18/07 als op 04/08. Het getijverschil op 18/07 bedraagt 3,58 m, op 04/08 is dit 4,22 m. De metingen van 18/07 zijn beide in de opgaande fase van het getij opgemeten, voor 04/08 was de eerste meting tijdens de eb fase, de tweede meting in de vloedfase. Het tijdsverschil tussen de metingen in ZP1 is steeds het grootst, voor het Albert II dok zijn deze het kleinst. Een samenvatting van de metingen is weergegeven in Tabel 4, de resultaten worden hieronder in meer detail besproken per zone.

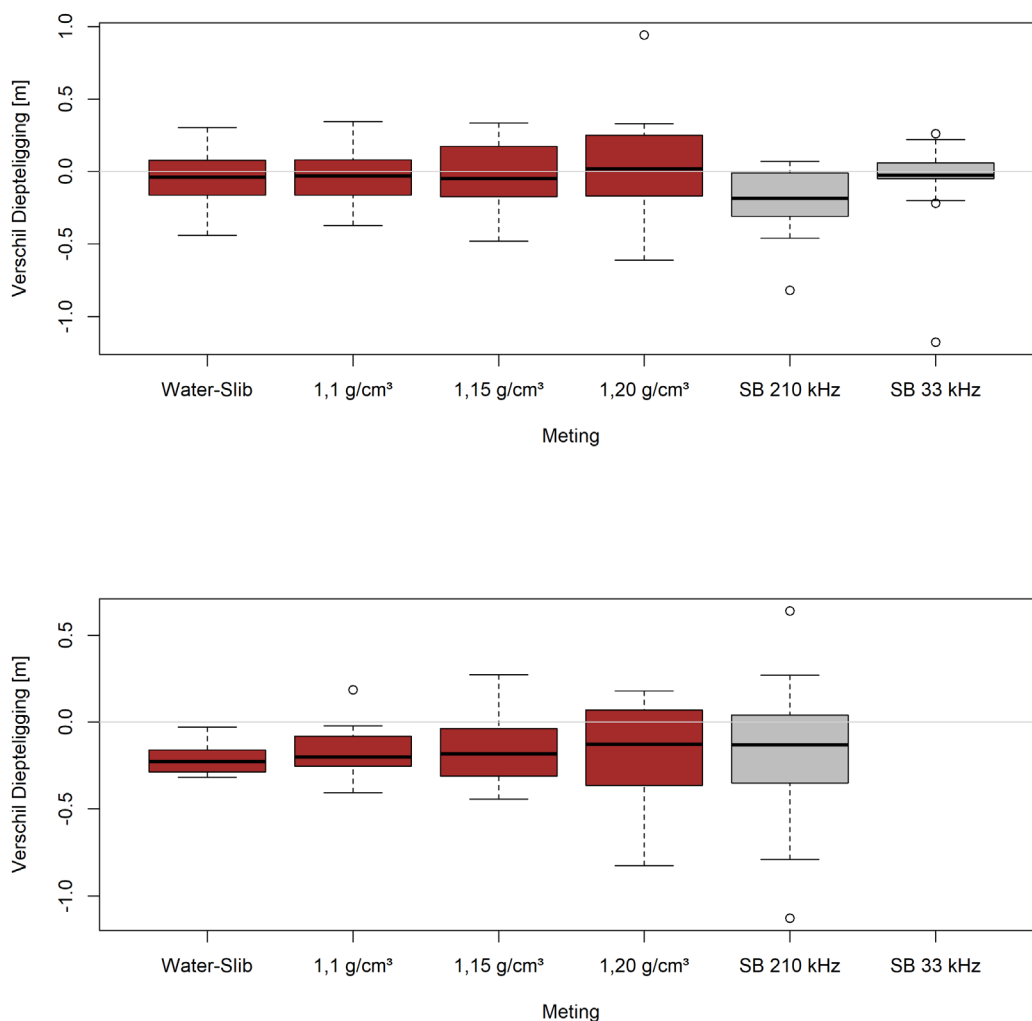


Figuur 29: Aanduiding van meetperiode in het A2 dok (blauw), ZP1 (oranje) en CDNB (rood) op 18/07 (links) en 04/08 (rechts)

Tabel 4: Overzicht van het verschil in diepteligging [m] voor verschillende parameters, op de meetdagen waarop 2 metingen werden uitgevoerd.

	Albert II		CDNB		ZP1	
	18/07	04/08	18/07	04/08	18/07	04/08
<i>Admodus</i>						
Water – slib	-0.03	-0.22	-0.04	-0.25	-0.01	-0.29
1,10 g/cm ³	-0.03	-0.20	-0.04	-0.27	-0.04	-0.29
1,15 g/cm ³	-0.05	-0.18	-0.01	-0.25	-0.04	-0.29
1,20 g/cm ³	0.02	-0.13	0.01	-0.21	0.12	-0.20
<i>Single beam</i>						
210 kHz	-0.19	-0.13	-0.04	-0.24	0.01	-0.26
33 kHz	-0.03	NA	0.14	NA	-0.06	-0.42

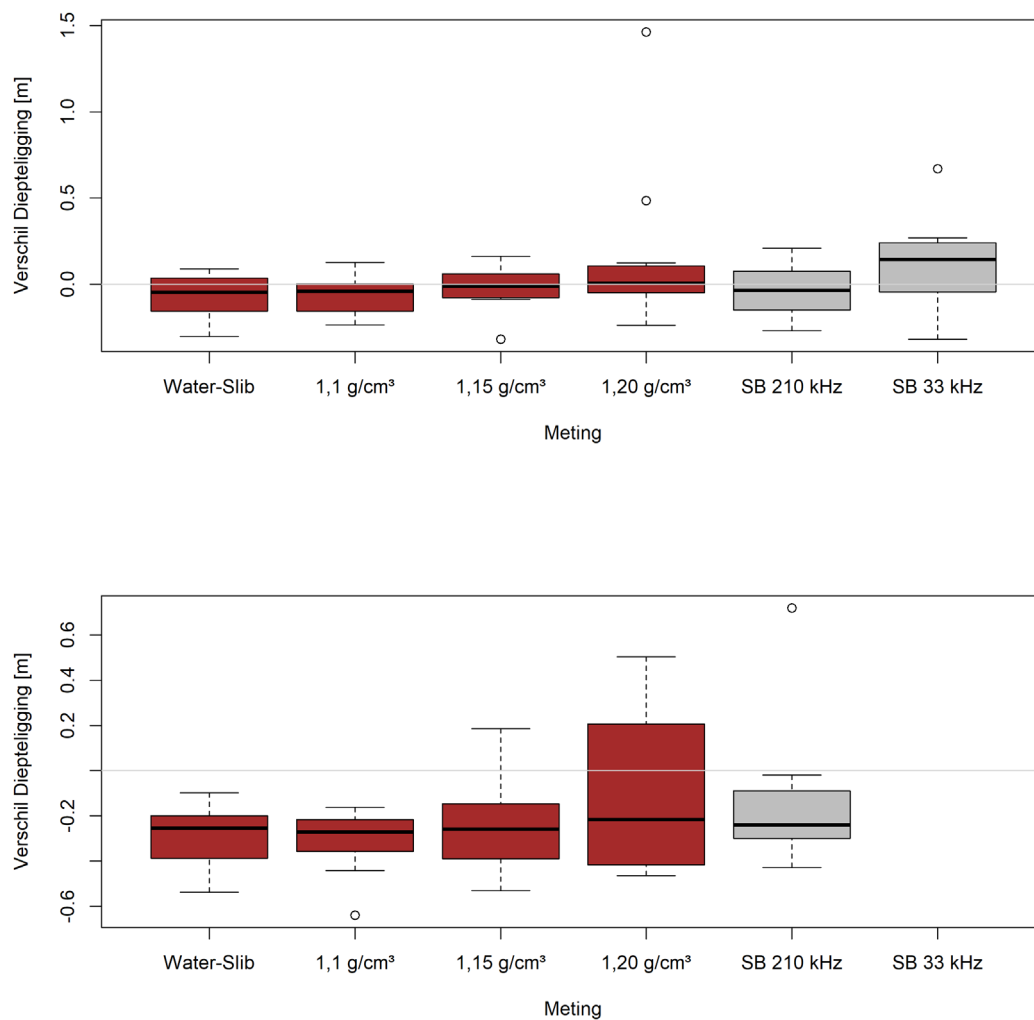
Het verschil in de metingen van het Albert II dok uitgevoerd op dezelfde dag zijn weergegeven in Figuur 31 aan de hand van boxplots. Op 18/07 (Figuur 31, boven) is er nagenoeg geen verschil tussen beide densiteitsmetingen, met een mediaan verschil van maximaal 5 centimeter (zie ook Tabel 4). Op de 210 kHz reflector is het gemiddeld verschil groter (ca. 19 cm). De spreiding, weergegeven door de grootte van de box, neemt enigszins verassend toe met toenemende densiteit, van ca. 25 cm voor de water slib overgang tot ca. 40 cm voor de 1,20 g/cm³. Voor de herhalingsmeting van 4/08 (Figuur 31, onder) kan een veel groter verschil worden opgemerkt. Het mediane verschil tussen beide metingen is ca. 20 cm, voor de ligging van de 1,20 g/cm³ is dit verschil iets kleiner (13 cm). Ook hier neemt de spreiding toe met de densiteit, van ca. 12 cm tot 40 cm. De single beam metingen (33kHz) zijn die dag niet betrouwbaar. De 210 kHz reflector kent een gelijkaardig verschil met de eerste meetdag.



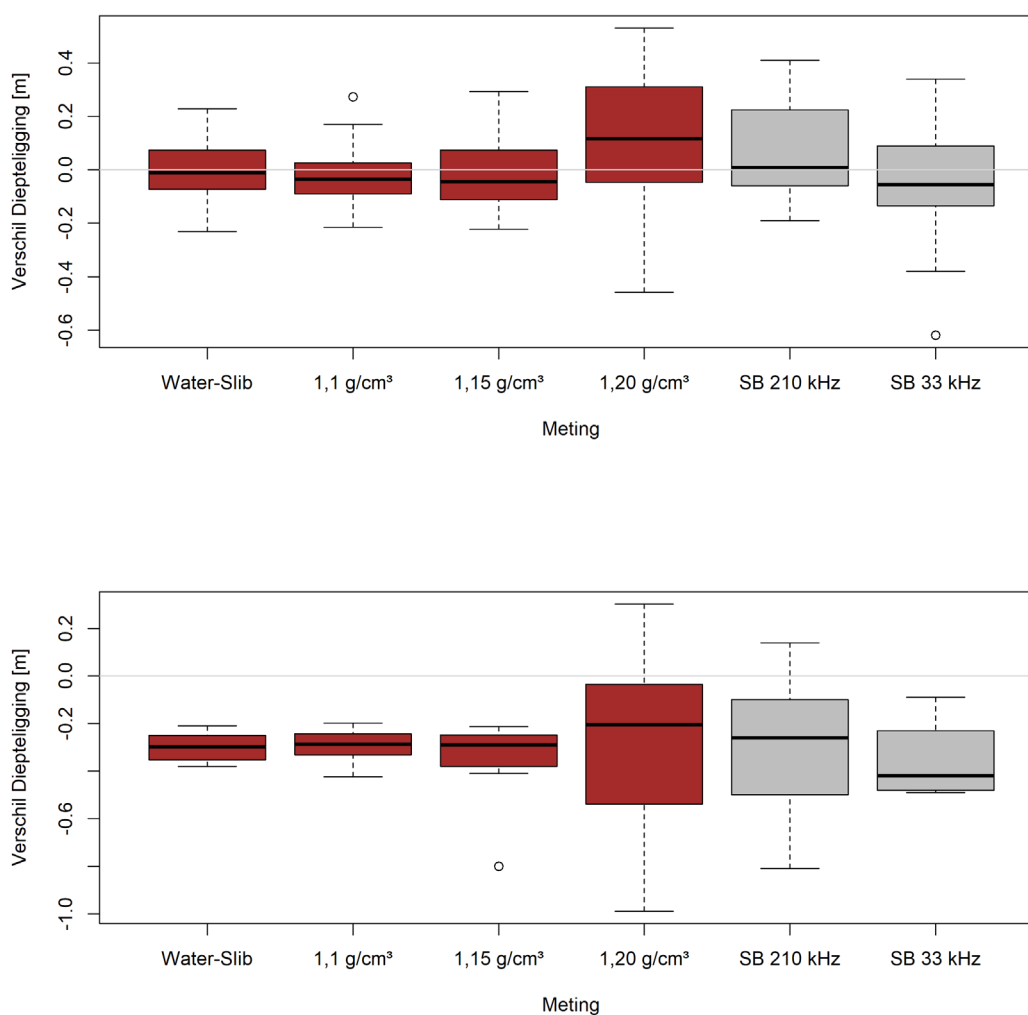
Figuur 30: Verschil in diepteligging van de water-slib overgang, 1,10 g/cm³, 1,15 g/cm³ en 1,20 g/cm³ bepaald op de Admodus data en het verschil op de 210 kHz en 33 kHz reflector de voor de 2 metingen op 18/07 (boven) en 04/08 (onder) in het Albert II dok

Op 18/07 is ook in CDNB en ZP1 de mediaan van het verschil voor alle afgeleide parameters klein (zie Figuur 32 en Figuur 33 boven), maximaal 4 cm. Uitzondering hierop zijn de metingen van de 1,20 g/cm³ in ZP1, die bij de 2^e meting een tiental cm hoger liggen. De spreiding op deze parameter is hier ook groter (boxgrootte van ca. 35 cm vs. 10 – 15 cm voor andere parameters). In CDNB is de spreiding op de data zeer gelijkaardig voor alle parameters.

Een heel ander beeld kan worden teruggevonden voor de metingen van 04/08, zowel in CDNB als ZP1, zie Figuur 32 en Figuur 33 onder. In het CDNB liggen alle afgeleide parameters van het densiteitsprofiel 20 tot 30 cm lager in de tweede meting. Ook al is de spreiding op de resultaten veel groter dan op 18/07 (20 tot 35 cm vs. 10 tot 20 cm), de resultaten van deze mediane verschillen zijn wel zeer consistent. Ook hier zijn deze tweede meetdag geen 33 kHz reflectorwaarden beschikbaar. Te ZP1 worden dezelfde grootte orde verschillen waargenomen. De spreiding op de 1,20 g/cm³ waarden is ook in deze meting duidelijk hoger dan de spreiding rond de andere parameters.

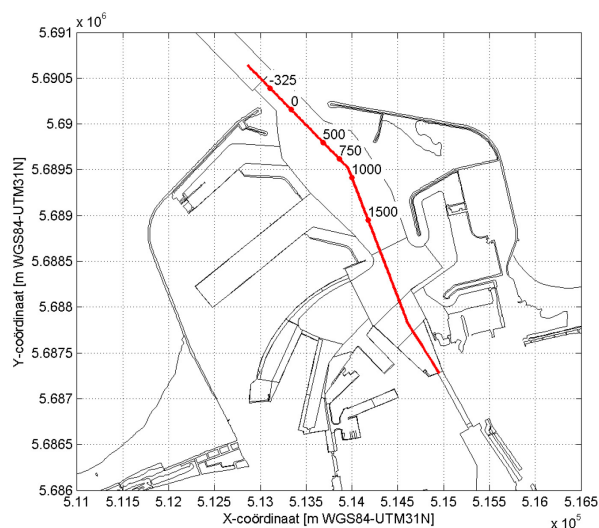


Figuur 31: Verschil in diepteligging van de water-slib overgang, 1,10 g/cm³, 1,15 g/cm³ en 1,20 g/cm³ bepaald op de Admodus data en het verschil op de 210 kHz en 33 kHz reflector de voor de 2 metingen op 18/07 (boven) en 04/08 (onder) in CDNB

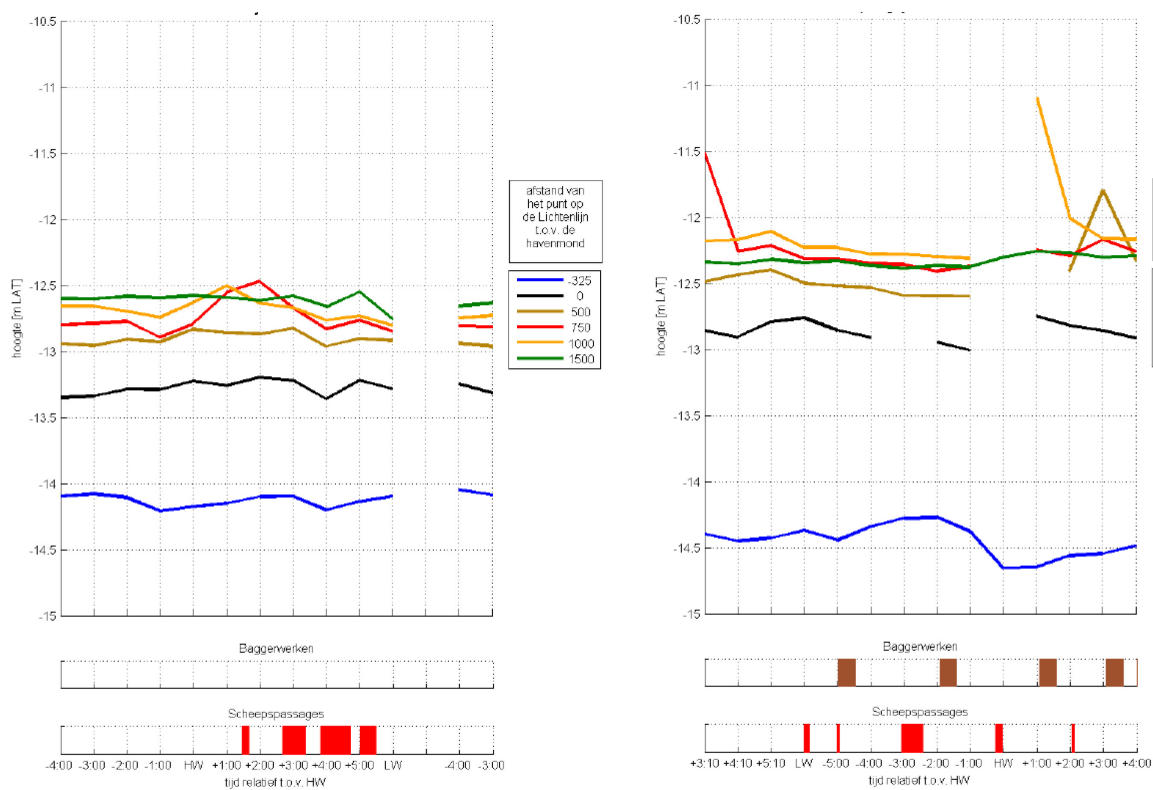


Figuur 32: Verschil in diepteligging van de water-slib overgang, 1,10 g/cm³, 1,15 g/cm³ en 1,20 g/cm³ bepaald op de Admodus data en het verschil op de 210 kHz en 33 kHz reflector de voor de 2 metingen op 18/07 (boven) en 04/08 (onder) in ZP1

Om deze meetresultaten te kaderen werden metingen gezocht in de literatuur waarin ook meerdere keren werd gemeten in een getijcyclus. In Dujardin et al. (2016) wordt een daling beschreven van de 210 kHz ligging bij het aantrekken van de vloed, het meest uitgesproken tussen 2u voor hoogwater en hoogwater. De hoogste waarden worden waargenomen 1 à 2 uur na hoogwater. Maximale stroomsnelheden in de voorhaven worden waargenomen vanaf 1 uur voor hoogwater. Deze beschrijving lijkt echter geen verklaring te geven voor de grote verschillen op 04/08, aangezien metingen juist voor en na laagwater werden uitgevoerd (zie Figuur 30).



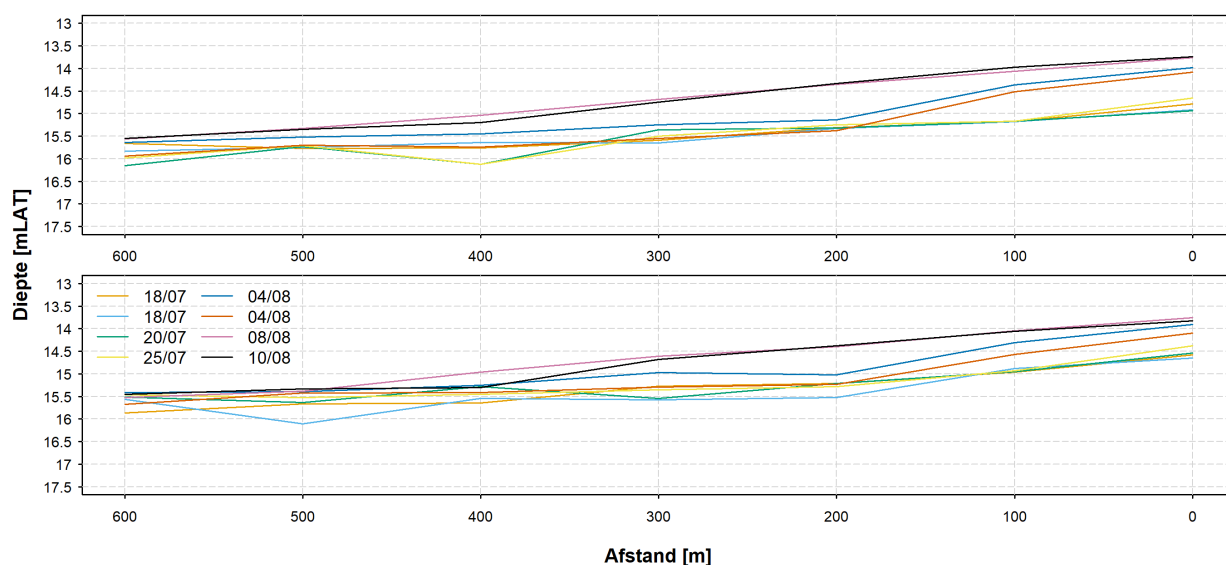
Figuur 33: Afstand langs de lichtenlijn en indicatie van een aantal kenmerkende punten hierop die zijn weergegeven in Figuur 35 (uit Dujardin et al. 2016)



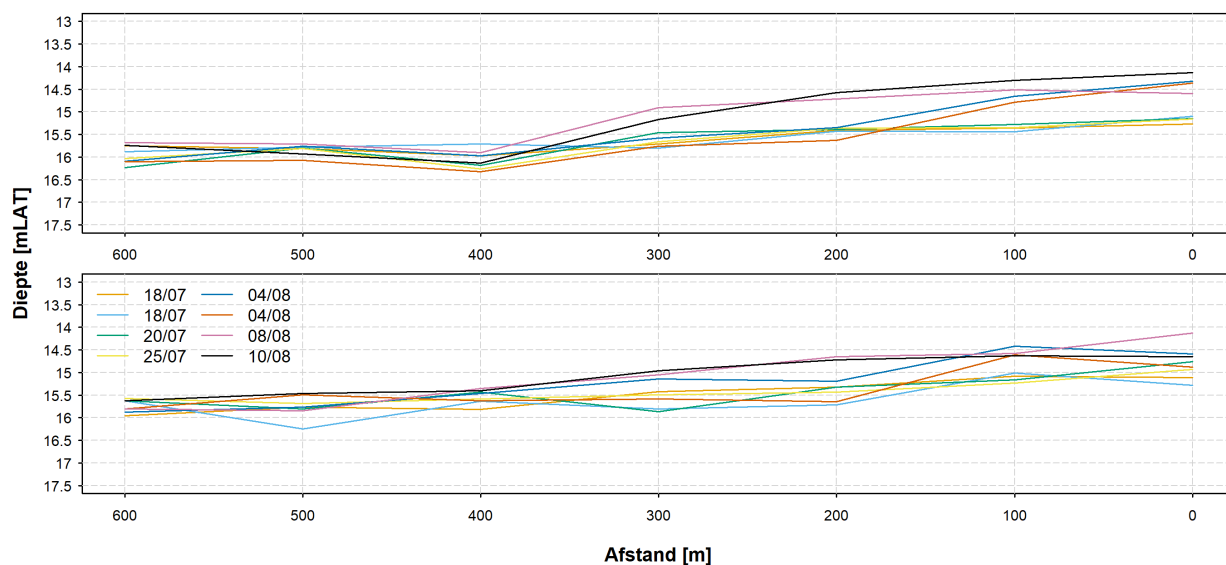
Figuur 34: Verloop van de 210 reflector gedurende een tijdcyclus voor doottij (links) en springtij (rechts). Uit Dujardin et al. 2016.

3.4.2 Gradiënt in het A2 dok

Naast de diepteligging wordt ook de helling van de densiteitslagen berekend. Dit werd enkel gedaan voor het Albert II dok, aangezien de transecten in ZP1 en CDNB zeer kort zijn (200 m), en hierdoor moeilijk conclusies kunnen worden getrokken. De transecten worden gedefinieerd als een noordelijk transect (priknummers 41 t/m 47) en een zuidelijk transect (priknummers 23 t/m 29). De gradiënt van zowel de water slib overgang (Figuur 36) als de $1,15 \text{ g/cm}^3$ densiteitslaag (Figuur 37) is weergegeven langsheen de 2 opgemeten transecten in het Albert II dok. Voor de verschillende parameters werd de helling bepaald langsheen deze transecten, op basis van een lineaire fit op de genormaliseerde data, waarbij de gemiddelde hoogteligging langs het traject werd afgetrokken.



Figuur 35: Gradiënt van de water-slib overgang op beide transecten in het Albert II dok (rechts CDNB)

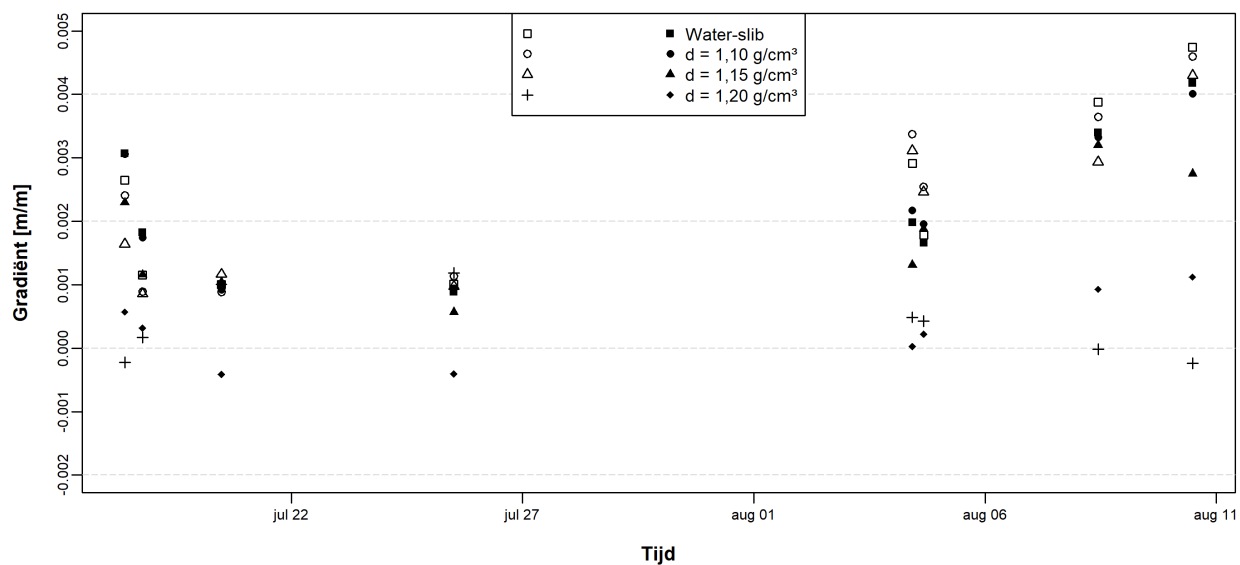


Figuur 36: Gradiënt van de diepteliggings van de 1,15 g/cm³ op beide transecten in het Albert II dok (rechts CDNB)

De resultaten van deze genormaliseerde fit zijn weergegeven in Figuur 38 en samengevat in Tabel 5. Het is duidelijk dat de helling afneemt in het begin van de baggervrije periode, overeenkomend met een overgang van springtij richting doottij. Vervolgens neemt de helling van de lagere densiteiten opnieuw toe (water slib overgang tot 1,15 g/cm³), met maximale waarden op de laatste meting van 10/08. Dit is consistent met de springtij/doottij variatie in sedimentimport in de haven, met een geschatte ratio van drie tot vier (Vanlede et al., 2022).

Tabel 5: Overzicht van de helling [m/m] van de verschillende densiteitsniveaus op de verschillende prikmetingen

Parameter	Transect	Helling					
		18/07	20/07	25/07	04/08	08/08	10/08
Water – slib overgang	T1	0.0026 ±0.0004 $R^2 = 0.85$	0.0010 ±0.0009 $R^2 = 0.15$	0.0010 ±0.0009 $R^2 = 0.18$	0.0017 ±0.0004 $R^2 = 0.54$	0.0038 ±0.0012 $R^2 = 0.38$	0.0047 ±0.001 $R^2 = 0.78$
	T2	0.0031 ±0.0005 $R^2 = 0.85$	0.0009 ±0.0008 $R^2 = 0.44$	0.0009 ±0.0005 $R^2 = 0.18$	0.0017 ±0.0004 $R^2 = 0.43$	0.0034 ±0.0008 $R^2 = 0.70$	0.0041 ±0.0006 $R^2 = 0.86$
D = 1,10	T1	0.0024 ±0.0003 $R^2 = 0.89$	0.0008 ±0.0008 $R^2 = 0.15$	0.0011 ±0.0009 $R^2 = 0.20$	0.0025 ±0.0009 $R^2 = 0.53$	0.0036 ±0.0011 $R^2 = 0.59$	0.0046 ±0.001 $R^2 = 0.78$
	T2	0.0031 ±0.0004 $R^2 = 0.89$	0.0009 ±0.0005 $R^2 = 0.36$	0.0009 ±0.0007 $R^2 = 0.18$	0.0019 ±0.0004 $R^2 = 0.36$	0.0033 ±0.0009 $R^2 = 0.72$	0.0040 ±0.0006 $R^2 = 0.85$
D = 1,15	T1	0.0016 ±0.0004 $R^2 = 0.76$	0.0011 ±0.0008 $R^2 = 0.15$	0.0011 ±0.0009 $R^2 = 0.20$	0.0025 ±0.0009 $R^2 = 0.53$	0.0036 ±0.0011 $R^2 = 0.59$	0.0046 ±0.001 $R^2 = 0.78$
	T2	0.0031 ±0.0004 $R^2 = 0.89$	0.0009 ±0.0005 $R^2 = 0.36$	0.0009 ±0.0007 $R^2 = 0.18$	0.0019 ±0.0004 $R^2 = 0.36$	0.0033 ±0.0009 $R^2 = 0.72$	0.0040 ±0.0006 $R^2 = 0.85$



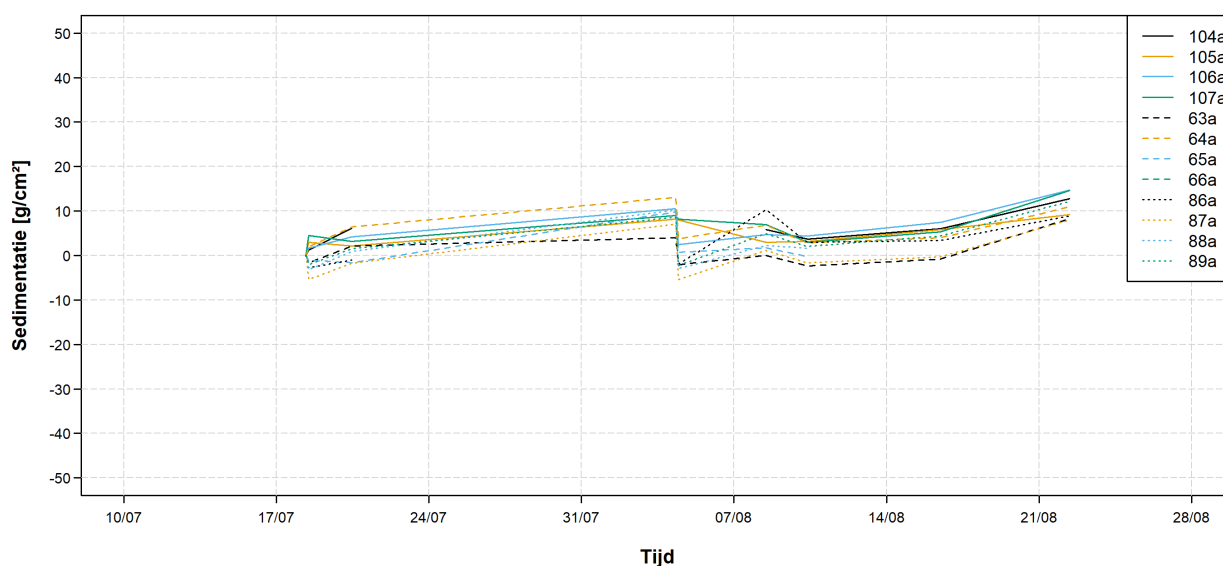
Figuur 37: Helling van de verschillende densiteitslagen langsheen de 2 beschouwde transecten (volle en lege symbolen) in het Albert II dok

3.4.3 Toename droge stof gehalte

Op basis van de prikgegevens kan de toename in droge stofgehalte (massa concentratie) bepaald worden per locatie, zoals beschreven in sectie 2.3.2. Hiervoor dient een vaste referentiediepte per zone te worden geselecteerd, welke gebaseerd is op de densiteitsprofielen.

CDNB

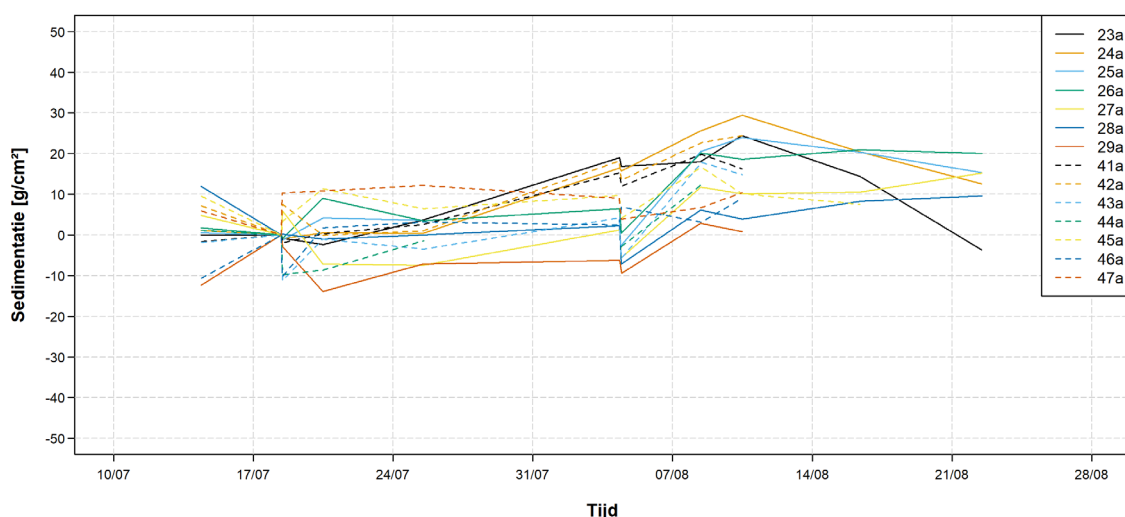
In CDNB zijn in totaal 7 metingen beschikbaar tijdens de baggervrije periode, waarvan 2 metingen een herhaling zijn op dezelfde dag (zie ook sectie 3.4.1). Als referentiediepte voor CDNB wordt 16,25 mLAT geselecteerd. In Figuur 39 is het verloop van de sedimentatie weergegeven op de verschillende priklocaties, uitgedrukt t.o.v. de beginsituatie op 18/07. In tegenstelling tot de verwachting kan hier geen duidelijke stijgende trend worden waargenomen. Tussen 18/07 en 04/08 (ochtend) is er wel een licht stijgende trend. Na de herhalingsmeting van 04/08 (zie ook sectie 3.4.1) is er een daling, en blijft de totale sedimenthoeveelheid lager dan voordien (op 10/08). Deze periode komt overeen met de springtijperiode. De kleinste toename van sedimenthoeveelheid lijkt op te treden aan de westelijke zijde van het CDNB, dit kan eventueel te wijten zijn aan het verplaatsen van sediment in de richting van Albert II dok.



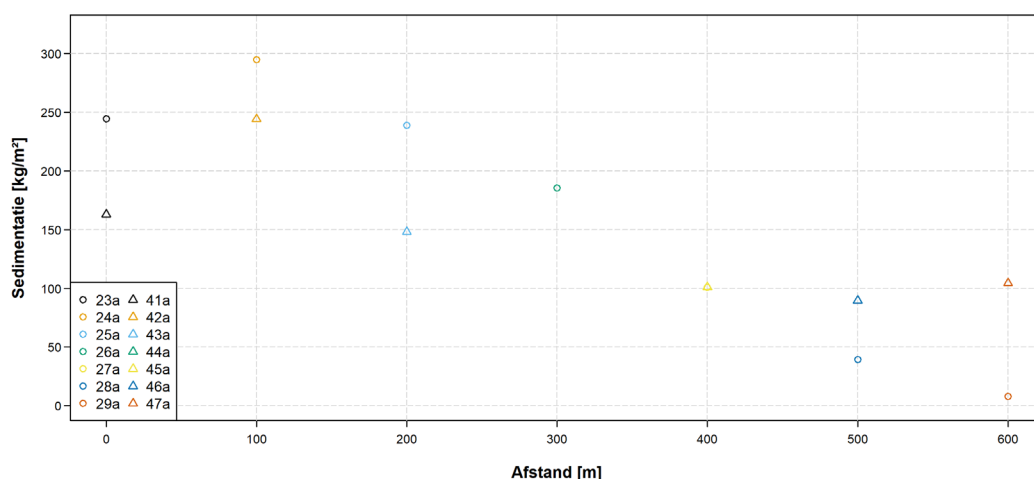
Figuur 38: Evolutie in sedimenthoeveelheid [g/cm^2] t.o.v. vaste referentiediepte (16,25 mLAT) voor de metingen in het CDNB

Albert II

Voor het Albert II dok wordt een vaste referentiediepte geselecteerd ($d = 16,2$ mLAT) van waaruit de ton droge stof per locatie wordt berekend. In Figuur 40 is de evolutie per priklocatie weergegeven, relatief ten opzichte van de eerste meting in de baggervrije periode. Op basis van de gemiddelde waarde op de laatste meting van de baggervrije periode (10/08) wordt een gemiddelde sedimentatie van $150 \text{ kg}/\text{m}^2$ berekend, voor de priklocaties in het Albert II dok. Dit komt overeen met een gemiddelde dagelijkse sedimentatie van ca. $6,5 \text{ kg}/\text{m}^2/\text{dag}$. Uit de beschrijving in sectie 3.2 is echter duidelijk dat deze sedimentatie niet constant is doorheen de tijd. In Figuur 41 is dit uitgezet per priklocatie, met maximale waarden tot $300 \text{ kg}/\text{m}^2$ afwaarts en 90 kg meer opwaarts (1 uitschieter van $20 \text{ kg}/\text{m}^2$).



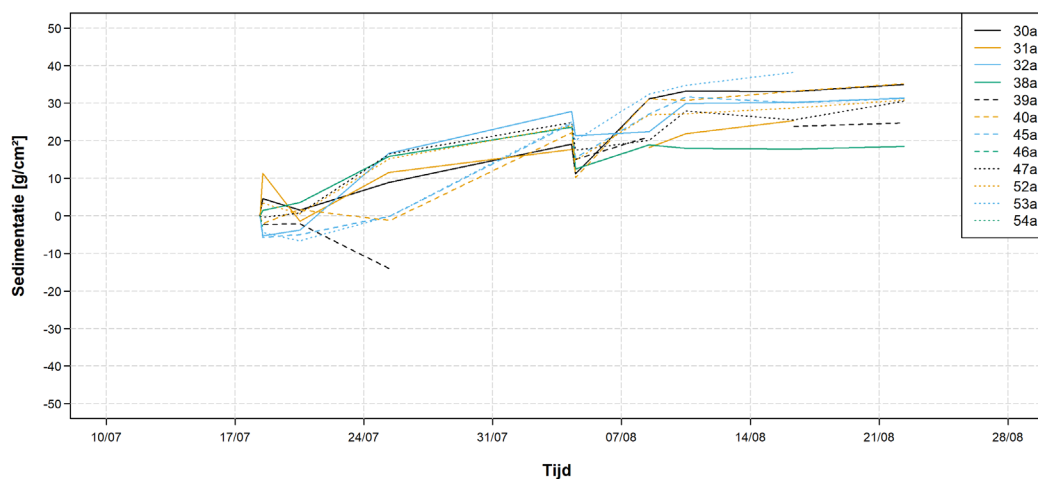
Figuur 39: Evolutie in sedimenthoeveelheid [g/cm²] t.o.v. vaste referentiediepte (16,2 mLAT) voor de metingen in het Albert II dok.



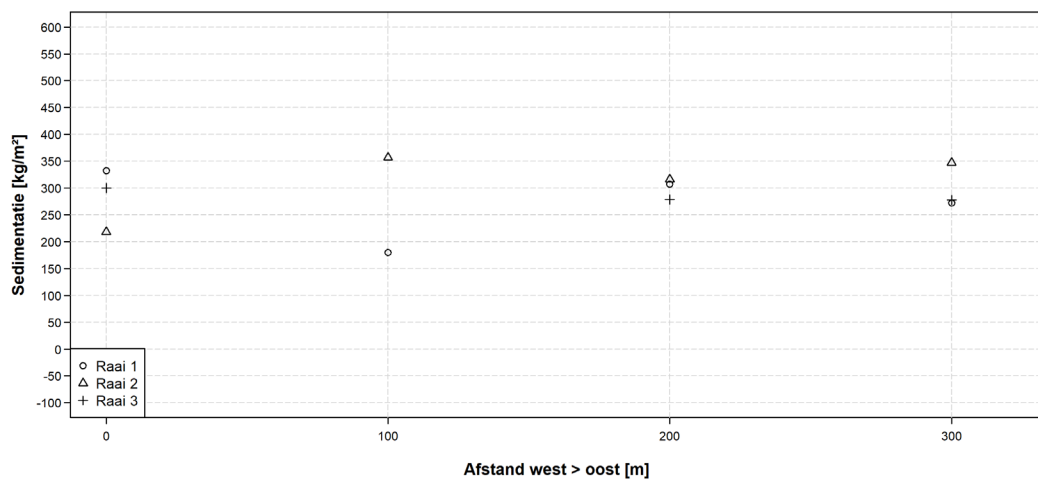
Figuur 40: Evolutie in sedimenthoeveelheid [kg/m²] t.o.v. vaste referentiediepte (16,2 mLAT) voor de metingen in het Albert II dok.

ZP1

In het ZP1 is meer variatie in de maximale diepte van de densiteitsprofielen. Daardoor werd hier geopteerd om voor prikken 30 t.e.m. 32 en (het transect dichtst tegen de Leopold II dam) een referentiediepte van 15,5 mLAT te hanteren, voor de andere locaties is dit 16,1 mLAT. Met uitzondering van de herhalingsmeting van 04/08 zien we een geleidelijke stijging van de sedimenthoeveelheid, zonder een duidelijk patroon. In Figuur 42 is dit gebruik aan patroon ook duidelijk. De gemiddelde sedimentatie per m² wordt op 280 kg geraamd, of 12 kg/m²/dag.



Figuur 41: Evolutie in sedimenthoeveelheid [g/cm²]
t.o.v. vaste referentiediepte (16,1 of 15,5 mLAT) voor de metingen in ZP1



Figuur 42: Evolutie in sedimenthoeveelheid [kg/m²]
t.o.v. vaste referentiediepte (16,1 of 15,5 mLAT) voor de metingen in ZP1.

4 Conclusie

In dit rapport worden de metingen beschreven die werden opgemeten tijdens een baggervrije periode van ongeveer 1 maand in de zomer van 2023 in de haven Zeebrugge. Densiteitsprofielen werden opgemeten in 3 zones binnen de haven, met name CDNB, Albert II dok en ZP1. De tijd tussen de eerste en laatste meting tijdens de beschouwde periode is 23 dagen, er werden tijdens een periode van 26 dagen niet gebaggerd. De minimale tijd tussen de prikmetingen varieerde tussen enkele uren (met herhalingsmetingen op 1 dag) tot maximaal 9 dagen.

Op 2 verschillende dagen zijn herhalingsmetingen uitgevoerd, op basis hiervan werd de robuustheid van de gemeten verticale niveaus binnen een getijcyclus bepaald. Op 18/07 werd slechts een beperkt verschil tussen beide metingen gevonden van ca. 5 cm voor alle densiteitsniveaus. Voor de herhaling op 04/08 is het verschil veel groter, ca. 20 tot 30 cm, en dit op alle locaties. Hiervoor kan geen sluitende verklaring worden gevonden.

Wanneer men de evolutie van de prikmetingen in de baggervrije periode analyseert, kan voor de metingen te CDNB relatief weinig verandering worden opgemerkt. De sedimentatiesnelheid van de topslib laag wordt ingeschat op $1,2 \pm 0,5$ cm/dag wat overeenkomt met de waarden berekend in Dujardin et al. (2016). Het valt wel op dat het grootste deel van deze sedimentatie wordt waargenomen tussen de eerste metingen (in springtij condities). Mogelijk is dit gerelateerd aan de springtij/doodtij variatie in sedimentimport in de haven, met een geschatte ratio van drie tot vier (Vanlede et al., 2022). Een andere mogelijke verklaring is dat de metingen in het begin van de baggervrije periode (18/07 en 20/07) rond HW werden uitgevoerd, wat overeenkomt met de intratidale piek in sedimentaanvoer (zie ook §1.4.2), terwijl andere metingen eerder rond LW werden uitgevoerd. In de andere densiteitsparameters kan geen duidelijk patroon worden teruggevonden. Consolidatie wordt niet (duidelijk) waargenomen.

In het A2 dok is ook een zeer duidelijke springtij doodtij variatie te zien. Er wordt hier een gemiddelde sedimentatie van de topslib opgemeten van gemiddeld 3 cm/dag, wat hoger is dan berekend in Dujardin et al. (2016). In de opgemeten zone van het Albert II dok wordt een sedimentatie van 150 kg/m^2 bepaald, die wel varieert van ca. 300 kg/m^2 aan de afwaartse zijde van het dok (richting CDNB) tot enkele tientallen kg/m^3 aan het opwaartse uiteinde van het gemeten transect (ca. 600 m in het dok). De helling van de topslib laag (in de lengterichting van het dok) neemt duidelijk af richting de doodtij periode (ca. 1 mm/m) en sterk toe richting de springtij periode (tot ca. 4,5 mm/m).

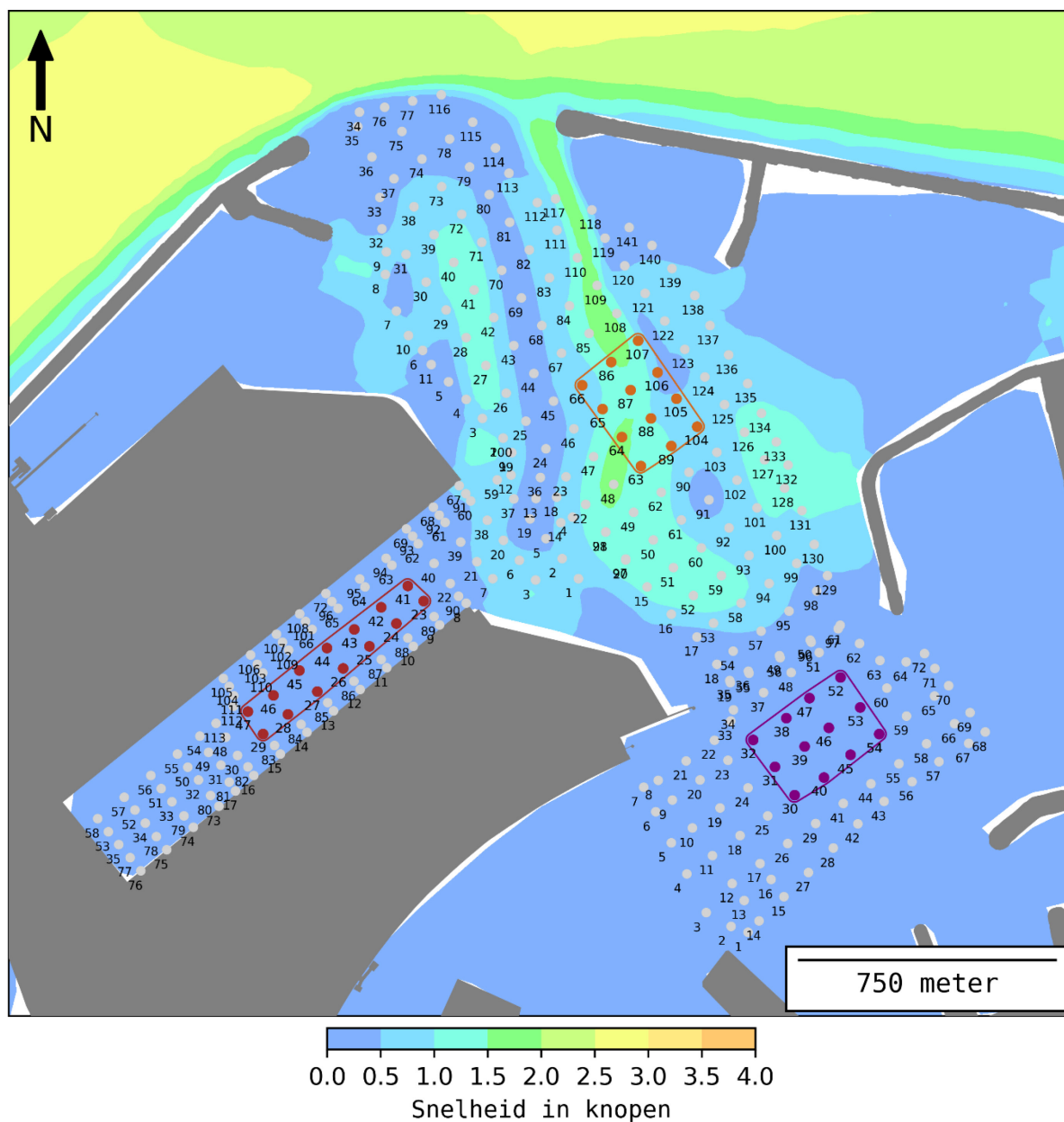
Bij ZP1, de meetlocaties het verst van de haveningang, worden de grootste gemiddelde sedimentatie snelheden bepaald op de metingen. Voor de top-slib laag wordt een gemiddelde sedimentatie van 5 – 6 cm/dag berekend, voor de $1,20 \text{ t/m}^3$ densiteitsniveau een sedimentatie van ca. 0,9 cm/dag. Over de volledige zone wordt een gemiddelde sedimentatie berekend op basis van de densiteitsprofielen van 280 kg/m^2 . In tegenstelling tot de metingen in Albert II dok kan hier geen duidelijk ruimtelijk patroon worden teruggevonden. Dit kan enerzijds liggen aan de ruimtelijke configuratie van de metingen, waarbij in het Albert II dok een langer transect werd bemeaten. Anderzijds kan ook de locatie een rol spelen. Ter hoogte van Albert II wordt nog een sterke stroming voorspeld bij springtij aan de afwaartse zijde van het dok (De Maerschalck et al., 2024). In ZP1 treedt dit niet meer op, wat aanleiding kan geven tot geleidelijkere overgangen.

5 Referenties

- Delefortrie, G.; Laforce, E.; Vantorre, M. (2004). Bepaling van de nautische bodem in de haven van Zeebrugge: onderzoek nautische implicaties. Fase B: eigenlijke onderzoeksfase. Eindrapport. WL Rapporten, 582. Universiteit Gent/Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.
- Dujardin, A.; Vanlede, J.; Vos, S.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2014). Invloedsfactoren op de ligging van de top van de sliblaag in het CDNB: Deelrapport 1 – Casestudy “zomer 2012”. Versie 2.0. WL Rapporten, 00_078. Waterbouwkundig Laboratorium & Antea Group: Antwerpen, België.
- Dujardin, A.; Vanlede, J.; Van Hoestenbergh, T.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2016). Invloedsfactoren op de ligging van de top van de sliblaag in het CDNB: Deelrapport 2 – Analyse periode 1999-2011. Versie 5.0. WL Rapporten, 00_078. Waterbouwkundig Laboratorium & Antea Group: Antwerpen, België.
- De Maerschalck, B.; Nguyen, D.; Vanlede, J.; Mostaert, F. (2020). Sediment Transport Model for the Port of Zeebrugge: Sub report 2 – Analysis of the OD Nature Tripod measurements. Version 3.0. FHR Reports, 00_067_2. Flanders Hydraulics Research & Antea Group: Antwerp.
- De Maerschalck, B.; Stark, J.; Debusscher, B.; Plancke, Y. (2024). Stroomatlas Zeebrugge: Deelrapport 17 – Stroomatlas 2024. Versie 4.0. WL Rapporten, 23_063_17. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- Fettweis, M.; Nechad, B.; Van den Eynde, D. (2007). An estimate of the suspended particulate matter (SPM) transport in the southern North Sea using SeaWiFS images, in situ measurements and numerical model results. *Cont. Shelf Res.* 27(10-11): 1568-1583
- Meire, D.; Ibanez, M.E.; Claeys, S.; Mostaert, F. (2020). Evaluatie van meetinstrumenten voor de bepaling van slib karakteristieken: deelrapport 1. Overzicht meetinstrumenten en analyse meetcampagne 3 m.b.t. dichtheitsinstrumenten. versie 5.0. *WL Rapporten*, 18_059_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. IX, 104 + 8 p. bijl. pp.
- Van den Eynde, D.; Nechad, B.; Fettweis, M.; Francken, F. (2007). Seasonal variability of suspended particulate matter observed from SeaWiFS images near the Belgian coast. *Estuarine and Coastal Fine Sediment Dynamics*
- Vanlede, J., Dujardin, A., Fettweis, M., Van Hoestenbergh, T., & Martens, C. (2019). Mud dynamics in the Port of Zeebrugge. *Ocean Dynamics*, 69(9), 1085–1099. <https://doi.org/10.1007/s10236-019-01273-3>
- Vanlede, J. D. S. M. (2022). Mud dynamics in the Belgian coastal zone and siltation in the harbor of Zeebrugge Vanlede, [TU Delft]. In TU Delft University. <https://doi.org/https://doi.org/10.4233/uuid:69e5aa74-9dd9-4915-8882-03b70506030a>

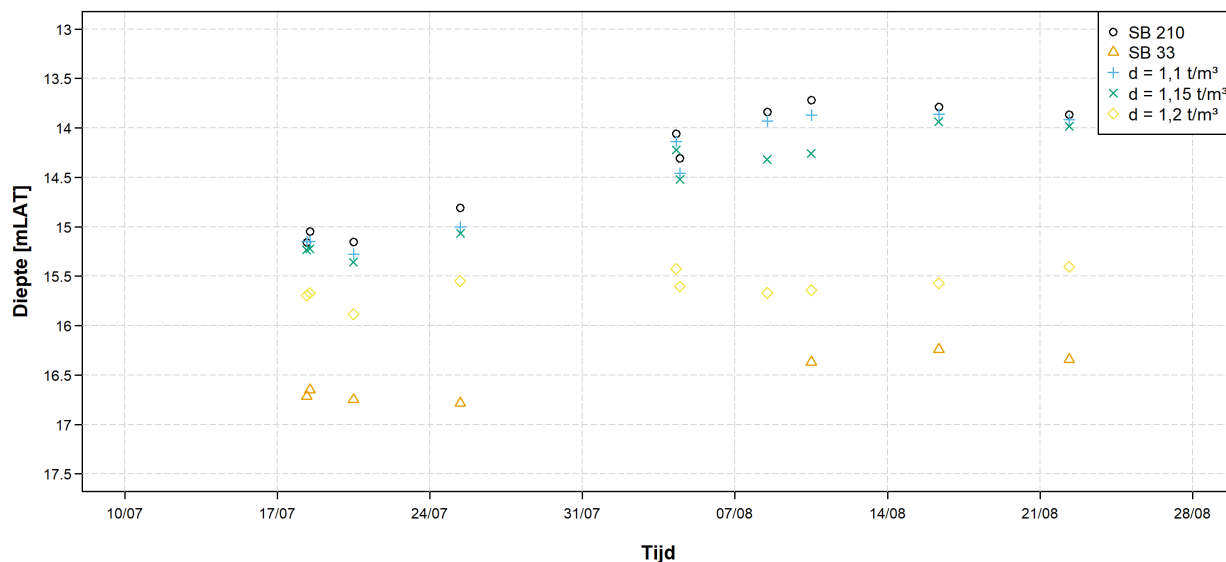
Bijlage 1 Overzicht van priklocaties Zeebrugge

Priklocaties Zeebrugge

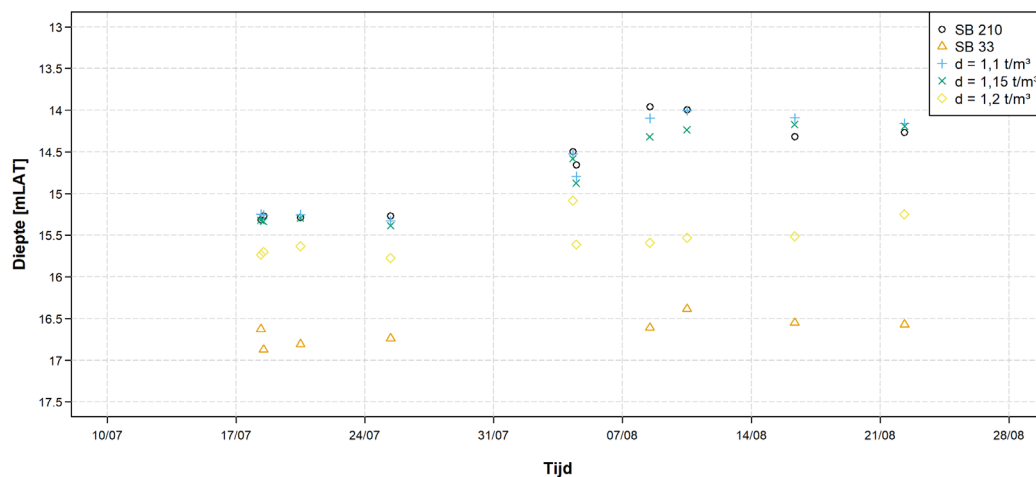


Figuur 43: Overzicht van priklocaties in Zeebrugge, met aanduiding van zones die intensief bemeten werden

Bijlage 2 Gemiddelde transecten ZP1



Figuur 44: Gemiddeld verloop, van de verschillende prikken op transect 2, van de ligging van de 210 kHz en 33 kHz reflectoren enerzijds en 1,1 t/m³ en 1,2 t/m³ densiteitsdieptes in ZP1



Figuur 45: Gemiddeld verloop, van de verschillende prikken op transect 3, van de ligging van de 210 kHz en 33 kHz reflectoren enerzijds en 1,1 t/m³ en 1,2 t/m³ densiteitsdieptes in ZP1

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