



**Vlaanderen**  
is wetenschap

12\_082\_4  
WL rapporten

# Experimenteel onderzoek naar het consolidatie gedrag van cohesief sediment

Deelrapport 4 – Executive summary report STT

DEPARTEMENT  
MOBILITEIT &  
OPENBARE  
WERKEN

[waterbouwkundiglaboratorium.be](http://waterbouwkundiglaboratorium.be)

# Experimenteel onderzoek naar het consolidatie gedrag van cohesief sediment

## Deelrapport 4 – Executive Summary report STT

Van Oyen, T.; Vanlede J.; Claeys S.; Verwaest, T.; 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 2017  
D/2017/3241/86

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

**Van Oyen, T.; Vanlede J.; Claey S.; Verwaest, T.; Mostaert, F.** (2017). Experimenteel onderzoek naar het consolidatie gedrag van cohesief sediment: Deelrapport 4 – Executive Summary report STT. Versie 4.0. WL Rapporten, 12\_082\_4. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

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

#### Documentidentificatie

|                 |                                                |                                                        |                 |
|-----------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------|
| Opdrachtgever:  | Afdeling Maritieme Toegang                     | Ref.:                                                  | WL2017R12_082_4 |
| Keywords (3-5): | Cohesief sediment, consolidatie, bagger werken |                                                        |                 |
| Tekst (p.):     | 12                                             | Bijlagen (p.):                                         | /               |
| Vertrouwelijk:  | <input checked="" type="checkbox"/> Nee        | <input checked="" type="checkbox"/> Online beschikbaar |                 |

|            |                                    |
|------------|------------------------------------|
| Auteur(s): | Van Oyen, T.; Claey S.; Vanlede J. |
|------------|------------------------------------|

#### Controle

|                | Naam                 | Handtekening                                                                         |
|----------------|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Revisor(en):   | Claey S.; Vanlede J. |  |
| Projectleider: | Van Oyen, T.         |   |

#### Goedkeuring

|                              |              |                                                                                      |
|------------------------------|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Coördinator onderzoeksgroep: | Verwaest, T. |  |
| Afdelingshoofd:              | Mostaert, F. |  |



# Abstract

Dit document beschrijft de hoofdpunten van het uitgevoerde onderzoek in het kader van consoliderend sediment en nautische bodem. In eerste instantie is een protocol opgesteld om de reologische eigenschappen van cohesief geconsolideerd sediment in kaart te brengen in het labo. Daarnaast zijn verschillende instrumenten om fysische kenmerken van cohesief materiaal in-situ te bemeten, onder gecontroleerde omstandigheden geëvalueerd. Ook is een haalbaarheidsstudie uitgevoerd om na te gaan of het mogelijk is om de weerstand van een schip ten gevolge van een slibbodem te kunnen simuleren met CFD. De resultaten hiervan zijn voornamelijk positief. Een uitgebreide set van consolidatie kolom experimenten zijn uitgevoerd om na te gaan of de bagger methodiek toegepast in de haven van Emden ook kan worden toegepast in Vlaamse havens. De experimenten tonen aan dat de consolidatie eigenschappen van het slib van de haven van Emden significant verschilt van sediment van andere havens. De tot op heden uitgevoerde experimenten kunnen echter geen uitsluitsel hiertoe bieden. Suggesties voor aanvullend onderzoek worden geformuleerd.



# Inhoudstafel

|                                                                                                                   |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Abstract .....                                                                                                    | III |
| Inhoudstafel.....                                                                                                 | V   |
| Lijst van de tabellen.....                                                                                        | VI  |
| Lijst van de figuren .....                                                                                        | VII |
| 1    Introductie .....                                                                                            | 1   |
| 2    Welke parameters kunnen gebruikt worden voor het definiëren van de reologische eigenschappen van slib? ..... | 2   |
| 3    Welk toestel kan ingezet worden om deze reologische parameters te meten? .....                               | 4   |
| 3.1    Reologie .....                                                                                             | 4   |
| 3.2    Densiteit .....                                                                                            | 5   |
| 3.3    Vervolgtraject .....                                                                                       | 5   |
| 4    Kunnen andere parameters gebruikt worden om de nautische diepte te bepalen? .....                            | 6   |
| 5    Is het mogelijk om de baggermethodiek van de haven van Emden toe te passen bij de Vlaamse havens? .....      | 7   |
| 5.1    Fysische experimenten en methodologie .....                                                                | 7   |
| 5.2    Resultaten.....                                                                                            | 9   |
| 6    Samenvattende Conclusies en aanbevelingen .....                                                              | 11  |
| 7    Bibliografie .....                                                                                           | 12  |

## Lijst van de tabellen

|                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------|----|
| Tabel 1 - EPS (ECP) bepaling van de verschillende slib-soorten ..... | 10 |
|----------------------------------------------------------------------|----|

## Lijst van de figuren

|                                                                                                                                         |   |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|
| Figuur 1 - Voorbeeld resultaat van de opgestelde methodiek.....                                                                         | 3 |
| Figuur 2 - Krachtmetingen op een cilinder die door slib wordt getrokken. ....                                                           | 6 |
| Figuur 3 - Voorbeeld foto van de consolidatie kolom opstelling en van stijgbuisjes naast een consolidatie kolom.....                    | 8 |
| Figuur 4 - Evolutie in tijd van het slib niveau voor slib van verschillende havens.....                                                 | 9 |
| Figuur 5 - Peak shear stress (bij 1 revolutie per minuut) uitgezet t.o.v. densiteit, en dit voor slib van de verschillende havens. .... | 9 |



# 1 Introductie

Onderhoudsbaggerwerken van vaargeulen in en nabij een haven vormen een significante kosten post op het werkingsbudget van een haven. In een haven is de stroming over het algemeen sterk gereduceerd waardoor sediment die met de stroming in de haven wordt meegenomen, vaak niet meer maar buiten wordt getransporteerd. Ook staat de verminderde stroming toe dat zeer fijn gesuspenseerd materiaal kan bezinken uit de waterkolom. Netto treedt er hierdoor sedimentatie op, wat de veilige toegang van schepen in het gevaar kan brengen.

Om het operationele baggerbeleid in de Vlaamse havens te ondersteunen, met de doelstelling om die op termijn te kunnen optimaliseren, werd over de afgelopen 3 jaar een onderzoektraject uitgevoerd in het Waterbouwkundig Labo binnen het bestek WL\_2011\_07 (Studie reologie nautische bodem en projectbeheer SlibTestTank). Het onderzoek had als doelstelling mee een antwoord te bieden op de volgende beheersvragen:

- 1- Welke parameters kunnen gebruikt worden voor het definiëren van de reologische eigenschappen van slib?
- 2- Welk toestel kan ingezet worden om deze reologische parameters te meten (in-situ)?
- 3- Kunnen andere parameters gedefinieerd worden om de nautische diepte te bepalen?
- 4- Is het mogelijk om de baggermethodiek van de haven van Emden toegepast worden op de Vlaamse havens?

Dit document beschrijft de hoofdpunten van het uitgevoerde onderzoek en de stappen voorwaarts die gezet zijn t.o.v. de gestelde beheersvragen. Conclusies worden gegeven in de laatste sectie, samen met aanbevelingen voor verder onderzoek.

## 2 Welke parameters kunnen gebruikt worden voor het definiëren van de reologische eigenschappen van slib?

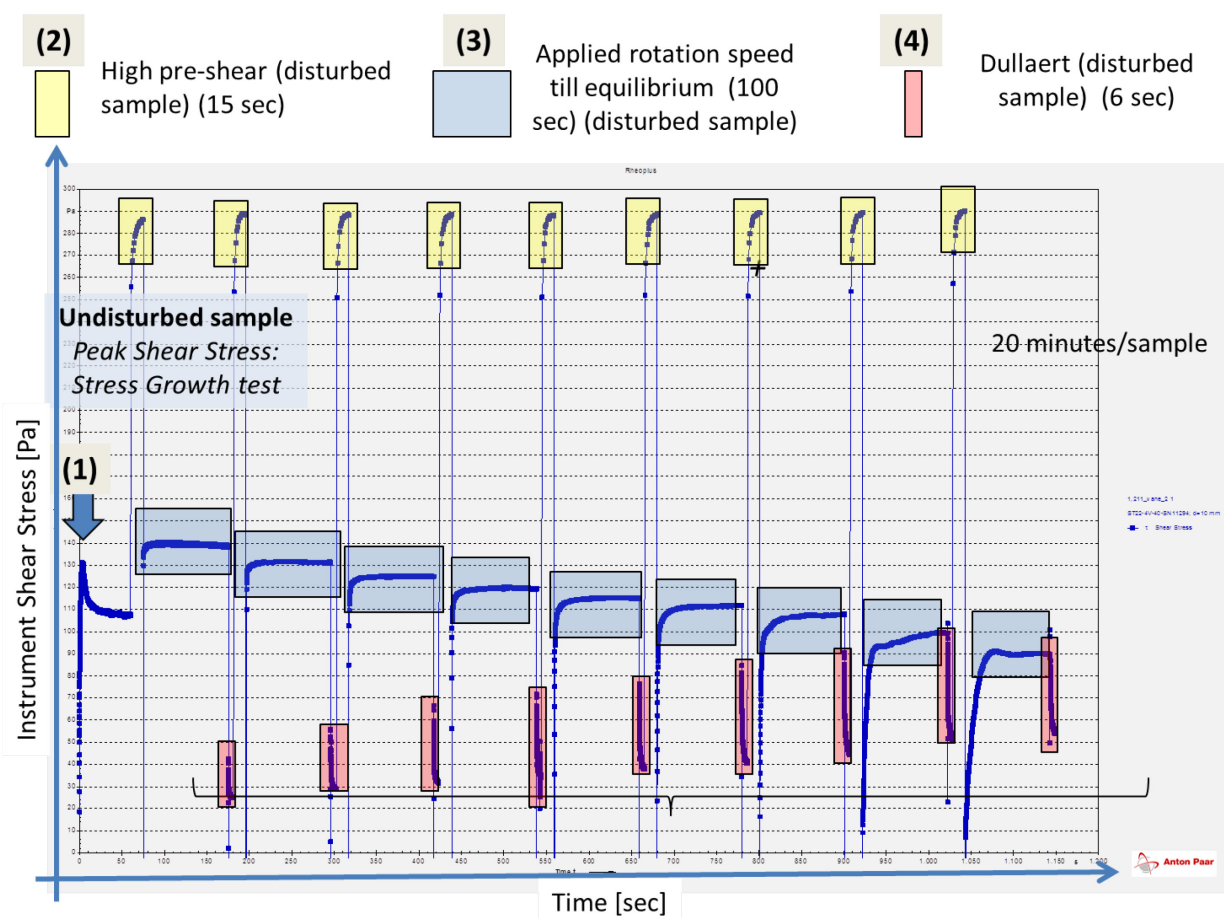
Een methodiek is uitgewerkt om de verschillende reologische eigenschappen van geconsolideerd cohesief sediment consistent te bemeten (Claeys, et al., concept) m.b.v. een reometer (Anton Paar Physica MCR-301).

Figuur 1 illustreert de data die bekomen wordt wanneer de opgestelde methodiek wordt gevolgd. De methode heeft als doel om enerzijds de *elastische* karakteristieken van het geconsolideerd cohesief materiaal te bemeten. Dit wordt gekwantificeerd in het eerste gedeelte van het protocol (zie (1) in Figuur 1) en leidt tot een waarde van de **peak shear stress**. Conceptueel, geeft de peak shear stress een indicatie voor de initiële weerstand dat een schip zou voelen wanneer het door ongeroerd slib zou varen. Hierbij moet wel in acht genomen worden dat de peak shear stress afhankelijk is van de constante opgelegde vervormingssnelheid ("strain-rate"), tijd van opgelegde vervormingssnelheid en resulterende totale vervorming ("total strain"), alsook de vormparameters van het contact element (roerder, boeg van schip, ...), waardoor een 1-op-1 vergelijking niet mogelijk is.

De volgende stappen in het protocol dienen om ook de *visco-plastische* eigenschappen van het slib in kaart te brengen. Hierbij wordt beoogd om een verband tussen de evenwicht schuifspanning en een opgelegde vervormingssnelheid op te stellen (**equilibrium flow curve – EFC curve**). Aan de hand van de EFC curve kunnen dan reologische parameters afgeleid worden zoals: **Bingham stress**, **yield stress** en **Bingham viscosity**. Deze parameters zijn een goede basis om de (visco-plastische) reologische kenmerken van het slib te kwantificeren en onderling te vergelijken.

Een post-processing toolbox is aangemaakt om de beschreven parameters (semi-)automatisch uit ruwe data (opgeleverd door de Anton Paar) te halen, zie Claeys, et al. (concept). Ook is een stand-alone grafische gebruikersinterface gemaakt die snelle analyses toelaat in het laboratorium (Heredia G., 2016). De methodiek werd ook internationaal afgetoetst op de InterCOH 2015 conferentie (Claeys, et al., 2015b).

Figuur 1 - Voorbeeld resultaat van de opgestelde methodiek.



## 3 Welk toestel kan ingezet worden om deze reologische parameters te meten?

### 3.1 Reologie

De reologische karakteristieken van consoliderend cohesief sediment zijn, in-situ, moeilijk te begroten. Een onderwater reometer die snel en efficiënt het geconsolideerd sediment representatief kan meten is op dit ogenblik niet beschikbaar op de markt. Daarnaast, is het ook niet duidelijk welke reologische slibparameter (en grootte) de maximale weerstand vertegenwoordigt die een schip mag ondervinden om nog veilig in en uit de haven te varen, zie Sectie 4-. M.a.w. een vertaling van de reologische slibeigenschappen naar vaargedrag kan, voorlopig, maar beperkt gebeuren:

- Een absolute reologische laboratorium waarde kan, voorlopig, niet gehanteerd worden voor het detecteren van de nautische bodem (=scheepvaart).
- Ook kan de link met de gemeten parameters, door bestaande in-situ reologische meetinstrumenten, en het laboratorium nog niet eenduidig worden gelegd.

Het meten van densiteit, inclusief gehanteerde veiligheidsmarge, is voorlopig het meest betrouwbaar voor het bepalen van de nautische bodem.

Toch werden verschillende in-situ meetinstrumenten getest door de gegevens te vergelijken met de resultaten van de reometer laboratoriumtesten uitgevoerd op ongeroerde slibstalen.

In de Sediment Test Tank werden sliblagen aangebracht met een verticale reologisch- en densiteitgradiënt. Het slibpakket bestond uit horizontale lagen die bemonsterd werden met de Beekersampler. Doordat de horizontale lagen lateraal weinig verschillen, kon met verschillende in-situ instrumenten deze verticale gradiënt worden opgemeten. Door telkens op een andere locatie te prikken kon ongeroerd bemeten slib worden.

De gevoeligheid van de in-situ instrumenten om de verticale weerstandgradiënt te kunnen detecteren werd nagegaan. Echter zoals boven vermeld is de link naar weerstanden die schepen ondervinden tijdens het doorvaren van slib (nog) niet eenduidig te leggen.

Volgende instrumenten werden getest:

- In de Sediment Test tank (WL2009R751\_1a\_rev3\_0)
  - Rheotune ("WL2013R751\_1a\_5rev3\_0")
  - Graviprobe ("WL2013R751\_1a\_7rev3\_0")
  - Admodus USP ("WL2013R751\_1a\_14rev3\_0"), DRDP (WL2013R751\_1a\_3rev3\_0)
  - Rheocable & Accelero probe ("WL2013R751\_1a\_6rev3\_0")
  - Mechanische In-situ Rheometer (MIR)
- In-situ Zeebrugge (WL2010R751\_1a\_rev1-Zeebrugge)
  - Rheotune
  - Rheocable
  - Admodus USP
  - Mechanische In-situ Rheometer (MIR)

## 3.2 Densiteit

Op basis van experimenteel onderzoek uitgevoerd door Delefortrie, Vantorre, & Eloit (2004) wordt, op dit ogenblik, de nautische diepte bepaald aan de hand van twee niveaus: (i) het niveau waarbij het consoliderend materiaal een densiteit van  $1.2 \text{ ton/m}^3$  heeft; en (ii) het niveau waarbij 7% van de kiel van een schip door slib met een densiteit minder dan  $1.2 \text{ ton/m}^3$  vaart (het top-slib).

De tweede conditie kan in-situ gecontroleerd worden door het top-slib niveau te bepalen m.b.v. een hoog frequente echo-sounder (210 kHz). Om de **densiteit** in-situ te bepalen bestaan er verschillende meet methodes (WL2013R751\_1a\_8ver3\_0):

- Admodus USP pro, HRDP
- “Navitracker 2011” later “Dens-X”
- Navitracker of (Vertical Density Profiler) VDP
- Densitune /Rheotune
- D2ART
- Graviprobe (densiteit)

Het maken van een keuze van te gebruiken instrumenten is niet eenvoudig. In rapport (WL2013R751\_1a\_8ver3\_0” wordt beschreven dat niet enkel de meetmethode, maar ook gebruiksvriendelijkheid, de ‘range afhankelijk van beoogde toepassing’, ‘al of niet willen van een radioactieve bron’ enz... bepalend zijn voor de keuze. Het is dan ook aan de gebruiker om met de vermelde informatie zijn keuze te maken (voordelen en beperkingen).

## 3.3 Vervolgtraject

Voor elk meetprincipe werd een meetinstrument aangekocht. Het Waterbouwkundig Laboratorium heeft aan AMT de nodige expertise en medewerking verleent voor het opmaken van het bestek, het evalueren van de offertes, oplevering en uittesten van de instrumenten.

Voor de inzet van de instrumenten op het terrein wordt de nodige ondersteuning gegeven: identificeren onderzoeksvragen (onderzoeklocaties, opvolgen baggeren, alternatieve baggermethodes), opmaken projectplan voor meetcampagnes, sediment analyses in Sedlab, wetenschappelijke bijstand en wetenschappelijke rapportage).

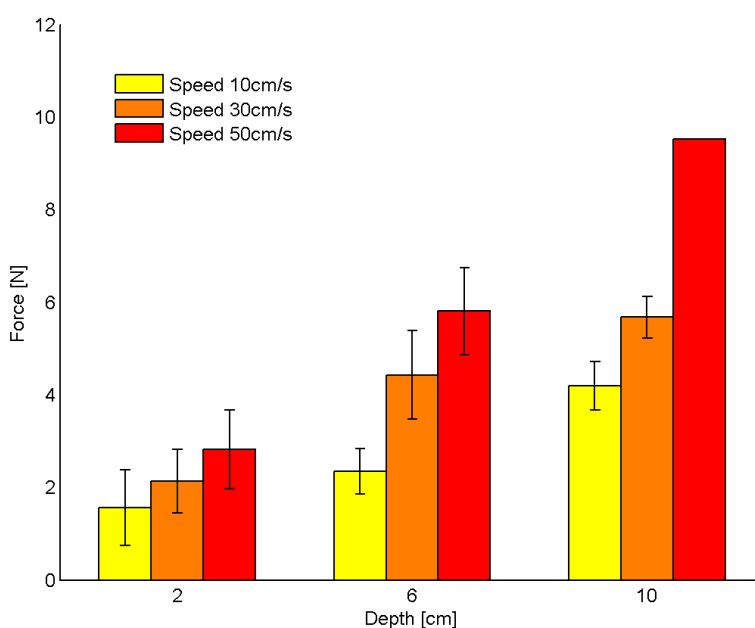
Vergelijken van instrumenten en uitvoeren van een haalbaarheidsstudie om de hierboven vermelde bepaalde reologische parameters in-situ op te meten kan enkel gebeuren door het uitvoeren van meetcampagnes met een laterale spreiding. De lokale variabiliteit kan worden uitgemiddeld door interpolatie en uitmiddeling over een grid aan meetpunten. De bekomen parameter kaarten van de verschillende meetmethode dienen te worden vergeleken.

## 4 Kunnen andere parameters gebruikt worden om de nautische diepte te bepalen?

Zoals beschreven in Sectie 3-, wordt de bepaling van de nautische diepte deels gerelateerd aan in-situ densiteitsbepaling. De weerstand tegen vervorming (reologie) van consoliderend slib verhoudt zich echter niet eenduidig tot de bemeten densiteit. De onderliggende onderzoeksvraag is of het mogelijk is om bijkomende slibeigenschappen naast densiteit (zoals reologische eigenschappen) op te schalen van laboschaal (metingen in labo op ongeroerde monsters) naar in-situ schaal (manoeuvregedrag van een schip dat in/boven een sliblaag met de bemeten eigenschappen vaart).

Om de haalbaarheid van deze onderzoekspiste te testen, werd in 2013 een haalbaarheidsonderzoek gestart: het project CFD Nautische Bodem. Hierbij werden de krachten op een voorwerp gesleept door slib opgemeten, samen met de slibeigenschappen.

Figuur 2 - Krachtmetingen op een cilinder die door slib wordt getrokken.



(Meshkati et al., 2016)

De belangrijkste conclusie is dat het mogelijk is om een reologisch model te implementeren in een CFD pakket. Berekeningen die worden gevoed met *gemeten* reologische eigenschappen van slib van een eenvoudig experiment, geven een redelijke overeenstemming met de gemeten krachten in de proefopstelling. Dit stemt hoopvol in de mogelijke toepassing van CFD berekeningen om op te schalen van reologische metingen op labo-schaal, naar krachten op een voorwerp dat door slib beweegt.

De resultaten van deze haalbaarheidsstudie tonen dus aan dat het in principe mogelijk moet zijn om de weerstand van een schip ten gevolge van een slibbodem te kunnen simuleren met CFD.

## 5 Is het mogelijk om de baggermethodiek van de haven van Emden toe te passen bij de Vlaamse havens?

Het bagger-beleid van verschillende havens langs de Noordzee kan onderling sterk verschillen. In Vlaanderen wordt de veilige toegang tot havens over het algemeen gewaarborgd door het wegbaggeren van het geconsolideerd materiaal met een TSHD.

De haven van Emden (Duitsland) hanteert een sterk verschillende strategie, zie Wurpts & Torn (2005) en Greiser & Wurpts (2008). Meer bepaald, wordt het slib in de haven van Emden niet weggebaggerd, maar geconditioneerd opdat het door-vaarbaar blijft. Wurpts & Torn (2005) beschrijven dat het slib van Emden door-vaarbaar is, zelfs bij een hoge dichtheid, door de aanwezigheid van actieve biologische slijmen, die het materiaal verhinderen sterkte op te bouwen en te consolideren. Daarom wordt het slib ook frequent in contact gebracht met de lucht opdat het materiaal in een *bacterieel vriendelijke* staat blijft. Een kostenreductie van € 13.5 miljoen per jaar in 1988 naar € 1.2 miljoen per jaar in 2004 werd door deze andere aanpak gerealiseerd (Wurpts & Torn, 2005).

Het succes van deze aanpak roept dan meteen de vraag op: Kan deze alternatieve methode dan niet toegepast worden bij de Vlaamse havens? Hier vatten we de hoofdpunten van het uitgevoerd onderzoek om hier een eerste antwoord op te bieden samen. De details van de studie kunnen teruggevonden worden in (Meshkati Shahmirzadi *et al.*, 2015; Claeys, *et al.*, 2015a en Meshkati Shahmirzadi, *et al.*, 2016).

In de volgende sub-sectie wordt het fysische experiment besproken. Daarna worden de belangrijkste resultaten gepresenteerd en besproken.

### 5.1 Fysische experimenten en methodologie

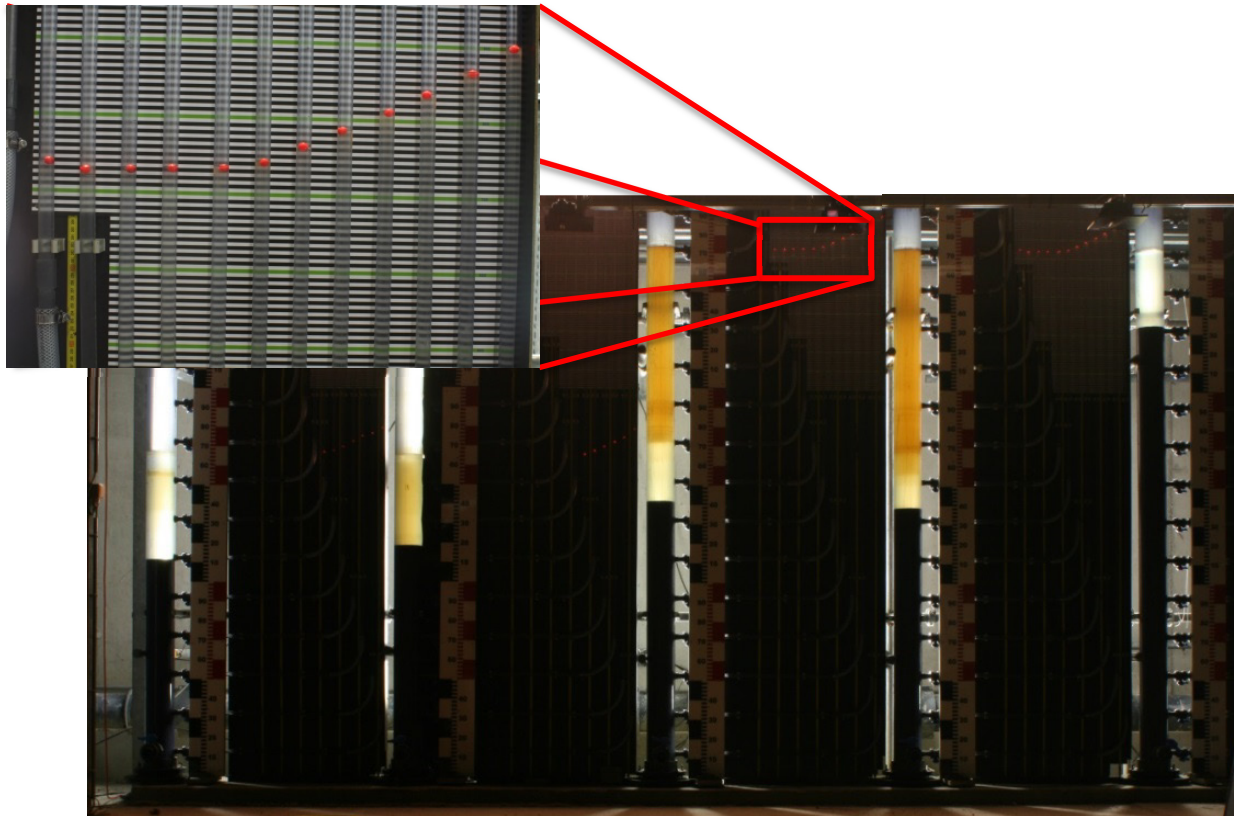
Om een duidelijker beeld te verkrijgen naar de toepasbaarheid van het baggerbeleid gehanteerd door de haven van Emden, is er gekozen om consolidatie kolom experimenten uit te voeren met slib van de haven van Emden, de havens van Zeebrugge en Deurganckdok, en additioneel ook met slib uit de havens van Rotterdam en IJmuiden voor de volledigheid. Dit type experiment is gekozen omdat het een directe vergelijking toelaat tussen het gedrag van de verschillende slib-types.

Het doel van het experiment is om de evolutie (in tijd en in de verticaal) te kunnen opvolgen van: (i) de hoogte van het slib; (ii) de reologische kenmerken van het slib (d.w.z. de weerstand het slib kan bieden tegen vervorming) en (iii) de fysische eigenschappen (b.v. dichtheid, percentage organisch materiaal) van het slib. Zoals hierboven reeds aangeduid is er gekozen om te werken met natuurlijk slib vanuit de verschillende havens.

Figuur 2 illustreert de gebruikte opstelling, zie ook Brouwers *et al.*, (2015). Ieder kolom wordt gevuld met slib met eenzelfde initiële dichtheid van  $1.1 \text{ ton/m}^3$ . Met behulp van een beeldverwerking-algoritme (Cattrysse *et al.*, 2015) wordt de evolutie van het slib niveau opgevolgd a.d.h.v. genomen foto's. Op vaste tijdstippen wordt het slib uit de kolommen bemonsterd met een Beekersampler en in verticale sub-samples verdeeld, zie ook (Jacobs & Van Oyen, concept). Deze sub-samples worden dan in het laboratorium verder geanalyseerd om de dichtheid, percentage organisch materiaal en reologische kenmerken, in de verticaal te bepalen. Zo wordt een data set opgebouwd die de evolutie van het consoliderend materiaal in tijd en in de verticaal beschrijft.

Additioneel, werd er ook nog een kwalitatieve mineralogische studie uitgevoerd door prof. Van Ranst (Universiteit Gent, Van Hoestenbergh *et al.*, (2015)), en een chemisch/biologische analyse door Aquaplus (Boey *et al.*, 2015).

Figuur 3 - Voorbeeld foto van de consolidatie kolom opstelling en van stijgbuisjes naast een consolidatie kolom.

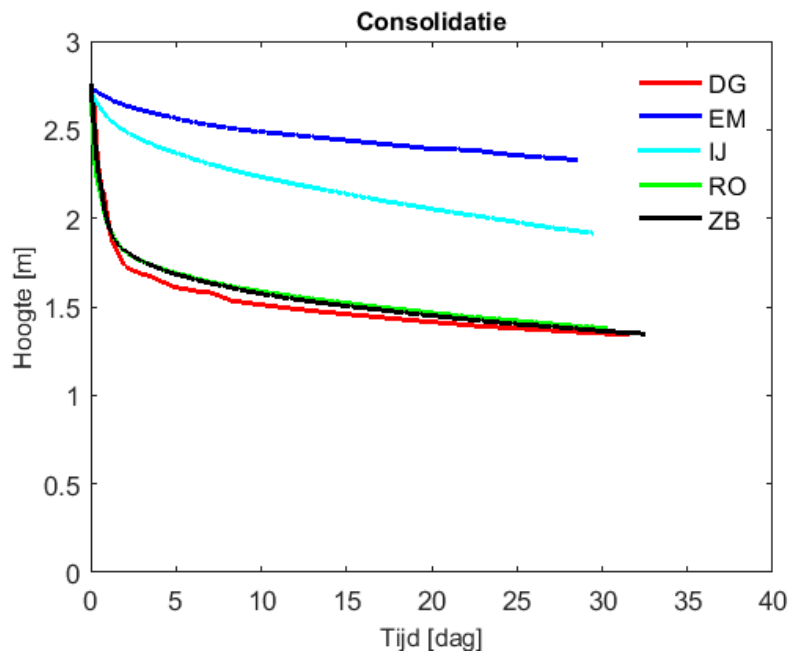


- a) voorbeeld foto van de consolidatie kolom opstelling. *Foto genomen met een vaste camera op een ruime afstand van de kolommen.*  
b) voorbeeld foto van de stijgbuisjes naast een consolidatie kolom. *Foto genomen met een vaste camera die dicht bij de stijgbuisjes is gemonteerd.*

## 5.2 Resultaten

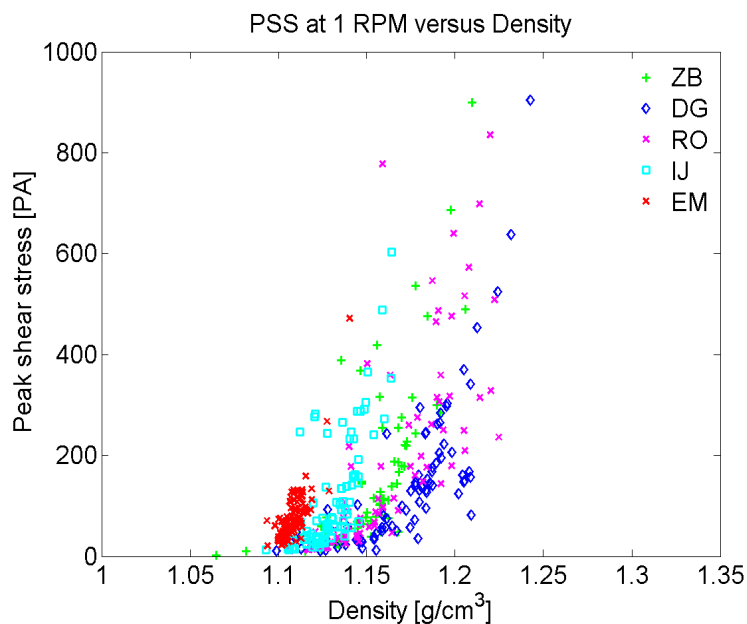
Figuur 3 toont de evolutie in tijd van het slibniveau van de verschillende havens. De figuur illustreert dat het consolidatie gedrag van het slib uit de haven van IJmuiden, en vooral de haven van Emden, opmerkelijk verschilt met de evolutie in het slibniveau van de havens van Rotterdam, Zeebrugge en Deurganckdok.

Figuur 4 - Evolutie in tijd van het slib niveau voor slib van verschillende havens



Deurganckdok (DG), Emden (EM), IJmuiden (IJ), Rotterdam (RO) en Zeebrugge (ZB).

Figuur 5 - Peak shear stress (bij 1 revolutie per minuut) uitgezet t.o.v. dichtheid, en dit voor slib van de verschillende havens.



Gelijklopend, vinden we ook dat de reologische eigenschappen van het slib van IJmuiden, en vooral van Emden, sterke verschillende karakteristieken vertoont in vergelijking met het slib van Rotterdam, Deurganckdok en Zeebrugge, zie Figuur 4. Specifiek, illustreert Figuur 4 dat het slib van Emden een hogere interne weerstand heeft bij een lagere densiteit dan de andere havens. Maar, zoals Figuur 3 laat zien, consolideert het slib van Emden slechts een weinig waardoor de interne weerstand uiteindelijk significant lager blijft dan die van de andere havens.

Een vergelijking van de sedimentkorrelgrootte distributie en de fractie organische materiaal in het slib van de verschillende havens (uitgevoerd in het WL-labo) kan het geobserveerde verschil tussen de havens onderling niet verklaren (Meshkati, et al., 2016).

Additioneel werd er daarom ook een analyse uitgevoerd om kwalitatief de mineralogische samenstelling van de klei deeltjes in kaart te brengen (Van Hoestenbergh *et al.*, 2015). Hieruit vinden we dat het slib van iedere haven opgebouwd is uit dezelfde componenten, namelijk smectiet, illiet en kaoliniet. Dus ook op basis van een kwalitatieve analyse van de mineralogische samenstelling is het verschil in het consolidatie gedrag moeilijk te duiden.

Tabel 1 - EPS (ECP) bepaling van de verschillende slib-soorten

|              | ECP<br>(mg glucose/gram slib) | DS (%) | ECP<br>(mg glucose/gram slib DS) |
|--------------|-------------------------------|--------|----------------------------------|
| Zeebrugge    | 2.34                          | 21.10  | 11.1                             |
| Emden        | 3.95                          | 21.00  | 18.8                             |
| Rotterdam    | 3.54                          | 55.50  | 6.4                              |
| Deurganckdok | 4.73                          | 29.80  | 15.9                             |
| IJmuiden     | 4.77                          | 30.10  | 15.8                             |

Een laatste analyse werd uitgevoerd door Aquaplus, waarbij alle stalen ook chemisch en biologisch geanalyseerd werden. Uit die chemische analyse blijkt dat het slib van Emden een hoge verhouding Na/Cl en Na/(Ca+Mg) heeft. Deze elementen zijn belangrijk in de klei mineralogie met betrekking tot de structuur van de kleimineralen, en bijgevolg waarschijnlijk ook bepalend voor het consolidatie gedrag. De biologische analyse had als doel om na te gaan of het verschil in consolidatiegedrag tussen de verschillende slibsoorten gerelateerd kan worden aan slijmvorming door microbiologische organismen, zoals aangehaald door (Greiser & Wurpts, 2008). Hiervoor werd de waarde van de polysachariden in de verschillende slibsoorten gemeten, zie Tabel 1. Hieruit blijkt dat het slib van Emden wel een beperkte verhoogde waarde heeft van deze substantie, maar deze lijkt niet significant.

Al deze resultaten samengenomen lijkt het ons dat de baggermethodiek in de haven van Emden niet rechttoe rechtaan kan toegepast worden in de Vlaamse havens. Waarschijnlijk zorgt de beluchting inderdaad voor een verhoogde bacteriële activiteit die het consolideren van het slib verhinderen. Maar, mogelijks is de effectiviteit van deze methodiek sterk samenhangend met de mineralogische samenstelling van het slib.

Rekening houdend met de resultaten van de chemische analyse lijkt het daarom wenselijk om de klei mineralogie van het slib van de verschillende havens ook kwantitatief te bepalen, om verdere uitsluitsel te bekomen over de oorzaak van het sterk verschillend consolidatie gedrag.

## 6 Samenvattende Conclusies en aanbevelingen

Een robuust en reproduceerbaar protocol is opgesteld om de reologische karakteristieken te bemeten van consoliderend slib. Dit protocol stelt ons in staat om slibsoorten onderling te vergelijken, en reologische analyses uitgevoerd door andere laboratoria beter te begrijpen. Ook laat het toe om de nodige parameters van de reologische eigenschappen van het slib te bepalen om een numeriek reologisch model te kunnen opbouwen van het slib.

Een haalbaarheidsstudie toont aan dat het in principe mogelijk moet zijn om de weerstand van een schip ten gevolge van een slibbodem te kunnen simuleren met CFD.

De verschillende mogelijke toestellen om in-situ densiteit te bemeten werden geanalyseerd, beschreven en onderzocht.

Vergelijkende consolidatie kolom experimenten zijn uitgevoerd om de mogelijke toepassing van de baggermethodiek gebruikt in de haven van Emden te onderzoeken. De experimenten illustreren dat het slib van de haven van Emden een sterk afwijkend consolidatie gedrag heeft, alsook andere reologische eigenschappen vertoont.

Analyses ter bepaling van de mineralogische, chemische en biologische eigenschappen suggereren dat de methodiek toegepast door de haven van Emden (beluchting) inderdaad een verhoogde biologische activiteit veroorzaakt, wat het consolidatie gedrag sterk kan beïnvloeden. In die zin, zou de toepassing van die methodiek mogelijk zijn ook in de Vlaamse havens. Echter, de analyses wijzen er ook op dat het slib van Emden een andere kwantitatieve mineralogische samenstelling heeft. Mogelijks is de gebruikte baggermethodiek enkel effectief/efficiënt in combinatie met de specifieke mineralogie karakteristiek voor het slib van de haven van Emden, en kan het dus niet worden toegepast in de Vlaamse havens.

De volgende aanbevelingen worden gemaakt voor verder onderzoek:

- 1- Om uitsluitsel te bekomen over de toepasbaarheid van de baggermethodiek van de haven van Emden:
  - a. Kwantitatieve bepaling van de mineralogische eigenschappen van de verschillende slibsoorten;
  - b. Consolidatie kolom experiment met slib uit de Ems rivier (die dus dezelfde mineralogische eigenschappen heeft, maar niet bloot is gesteld aan de baggermethodiek van de haven van Emden);
  - c. Het in kaart brengen van de verschillen in de zeta-potentiaal bij de verschillende slibsoorten.
- 2- Kwantificatie van het verband tussen in-situ bemeten parameters en reologische eigenschappen van consoliderend slib, en dit in de havens van Zeebrugge en Deurganckdok.
- 3- Het uittesten van (aangekochte en toekomstige) in-situ instrumentatie voor het opvolgen van de huidige baggertechniek. Maar eveneens het opvolgen van de wetenschap bij het uittesten van alternatieve baggermethododes, met goedgekeurde meetmethododes.
- 4- Verdere uitwerking van het mogelijk numeriek modelleren van scheepsgedrag bij het doorvaren van consoliderend slib.

## 7 Bibliografie

- Boey, I., Van Oyen, T., Claey, S., Vanlede, J., & Van Meel, K.** (2015). *Besluitvorming uitbestede diensten aan Aquaplus i.k.v. consolidatie kolom experiment.* .
- Brouwers, B., Shahmirzadi, M. E., Heyvaert, G., Oyen, T. V., & Jacobs, M.** (2015). *Modified physical setup for self-weight consolidation test.*
- Cattrysse, H., Shahmirzadi, M., & Oyen, T. V.** (2015). *User guide matlab digital visualization tools.*
- Claey, S., Staelens, P., Van Hoestenbergh, T., Van Oyen, T., Verwaest, T., & Mostaert, F.** (2015). *Experimental investigation on consolidation behavior of mud: Technical scientific brainstorming to prepare the consolidation project plan.*
- Claey, S., Staelens, P., Vanlede, J., Heredia, M., Meshkati Shahmirzadi, M. E., Van Oyen, T., et al.** (concept). *Sediment Related Nautical Research: Rheological Measurement Protocol for cohesive sediment.*
- Claey, S., Staelens, P., Vanlede, J., Heredia, M., Van Hoestenbergh, T., Van Oyen, T., et al.** (2015). A rheological lab measurement protocol for cohesive sediment. *13th International Conference on Cohesive Sediment Transport Processes* . Leuven, Belgium.
- Delefortrie, G., Vantorre, M., & Eloit, K.** (2004). Revision of the nautical bottom concept in the harbour of Zeebrugge through ship model testing and manoeuvring simulation. *International Marine Simulation Forum.* .
- Greiser, N., & Wurpts, R.** (2008). Microbiological impact on formation of rheological properties of fluid mud. *Chinese-German Joint Symposium on Hydraulic and Ocean Engineering.*
- Heredia G., M.** (2016). *WL-wiki page on GUI couette Tool.* Opgehaald van <http://wlwiki.vlaanderen.be/wiki/display/wlwiki/Couet+Tool%3A+Graphic+User+Interface>
- Jacobs, M., & Van Oyen, T.** (concept). *Handleiding voor het uitvoeren van consolidatie kolom experimenten.*
- Meshkati Shahmirzadi, M. E., Staelens, P., Claey, S., Cattrysse, H. V., Van Oyen, T., Vanlede, J., et al.** (2015). *Experimental investigation on consolidation behaviour of mud: Subreport 1- Methodology study.* .
- Meshkati Shahmirzadi, M. E., Staelens, P., Claey, S., Cattrysse, H., Van Hoestenbergh, T., Van Oyen, T., et al.** (2016). *Experimental investigation on consolidation behaviour of mud: Subreport 3 - data post-processing.* .
- Meshkati, S., Staelens, P., Claey, S., Cattrysse, H., Van Hoestenbergh, T., Van Oyen, T., et al.** (2016). *Experimental investigation on consolidation behavior of mud: Subreport 2- Factual data report.*
- Meshkati Shahmirzadi, M.E.; Vanlede, J.; Van Oyen, T.; Verwaest, T.; Mostaert, F.** (2016). CFD Nautical Bottom: Subreport 4 – Results Towing Tests. Version 4.0. WL Rapporten, 00\_048. Flanders Hydraulics Research & Antea: Antwerp, Belgium.
- Van Hoestenbergh, T., Claey, S., Van Oyen, T., & Van Ranst, E.** (2015). *Nautical bottom sediment research: chemical and mineralogical analyses of sediment samples.*
- Wurpts, R. W., & Torn, P.** (2005). 15 Years Experience with Fluid Mud: Definition of the Nautical Bottom with Rheological Parameters. *Terra et Aqua.*

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](mailto:waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be)

[www.waterbouwkundiglaboratorium.be](http://www.waterbouwkundiglaboratorium.be)