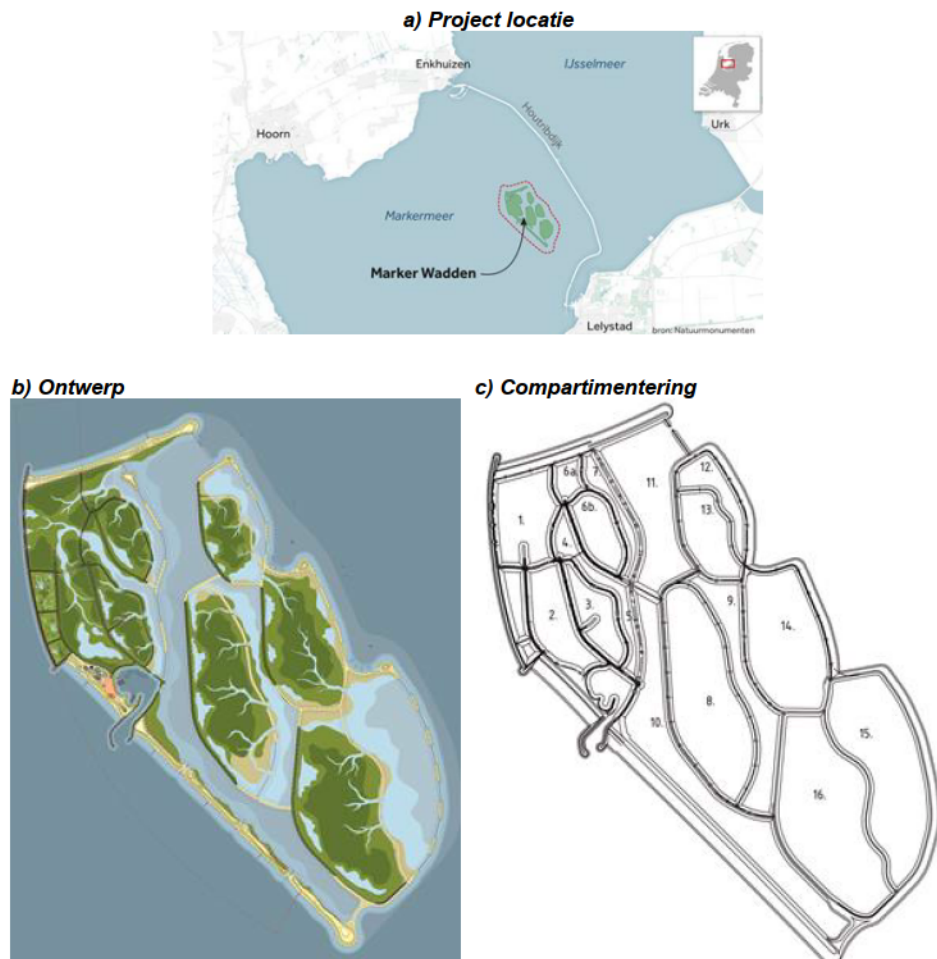


MEMO

Hoogteontwikkeling 'plas dras' eilanden A t/m D: Verificatie eisen, analyse processen, lessons learned en uitvoeringsaspecten

INLEIDING

De Marker Wadden is een natuurgebied in het Markermeer. Het bestaat uit een aantal eilanden waarin een moeras habitat is gecreëerd door Boskalis in opdracht van Natuurmonumenten en Rijkswaterstaat. Voor een overzicht van de projectlocatie wordt verwezen naar Figuur 1.



Figuur 1: Overzicht van de Marker Wadden

Het Markermeer is in 1976 ontstaan met de aanleg van de Houtribdijk. De waterkwaliteit is sindsdien snel verslechterd door vertroebeling van het water. De biodiversiteit is hard achteruit gegaan door vermindering van het aantal waterplanten, schelpdieren en vissen wat weer een negatieve invloed heeft gehad op de vogelstand. Het project 'Marker Wadden' draagt bij aan het natuurherstel van het Markermeer. De eilanden zijn door Boskalis in 4 jaar tijd gerealiseerd door klei en slib rondom de eilanden van de waterbodem te verwijderen en vast te leggen in verschillende compartimenten met natuurvriendelijke oevers. Dit vermindert de hoeveelheid vertroebeling waardoor de waterbodem weer tot leven komt. Rondom de eilanden ontstaan luwtegebieden met ondiep water en het gebied wordt weer een stuk aantrekkelijker voor de biodiversiteit omdat op grote schaal rietvelden en gradiënten in waterdieptes zijn aangelegd.

De Marker Wadden is qua project uniek in Nederland en een van de grootste in zijn soort in West-Europa. De aanleg was een complex proces waarbij een goede balans moest worden gevonden tussen soms conflicterende contractuele eisen en wensen van de opdrachtgever en de uitdagende werkomstandigheden. Door middel van adaptief management is de ontwikkeling van de eilanden, de fysische processen, vegetatie, en natuurontwikkeling gemonitord om het bouwproces te kunnen bijsturen en snel tot een zichtbaar resultaat te komen, zie Figuur 2. De goede samenwerking met de opdrachtgever was hierin essentieel o.a. vormgegeven door meerdere inhoudelijke kennissessies.



Figuur 2: Principe van Adaptive management (bron: CEDA Position Paper integrating adaptive environmental management into dredging projects, Maart 2015)

5 Jaar na de start van de werkzaamheden zijn de eerste tekenen van natuurherstel reeds zichtbaar door de grote hoeveelheid vegetatie en de aantrekkingskracht op diverse (trek)vogels. Tot slot wordt het gebruik van innovatieve technieken omtrent het bouwen met klei en slib met interesse gevolgd in de rest van de wereld waar zand als een schaarse bouwstof wordt gezien.

WERKMETHODE EN VERIFICATIE EISEN

Zoals beschreven zijn de Markerwadden aangelegd door klei en slib vast te leggen in verschillende compartimenten. De compartimentering zelf is gemaakt met dammen van zand wat op locatie is gewonnen. In totaal zijn 16 compartimenten gerealiseerd (zie Figuur 1c). Voor de naamgeving en fasering van de compartimenten wordt verwezen naar Tabel 1.

Tabel 1: Fasering van de modules

Module aanduiding	Compartiment	Fasering
Module A	1	Het eerste eiland. Gevuld door Boskalis in 4 slagen van 2016 t/m 2017.
	2	
	3	
	4	
	5	
Module B	6a	
	6b	
	7	
	11	
Module C	8	Het tweede eiland. Gevuld door Boskalis in 5 slagen van 2017 t/m 2019. Het vulmateriaal is deels afkomstig van de slibvangput ca. 5 km verderop.
	9	
	10	
Module D	12	Het derde eiland (D1). Gevuld door Boskalis in 5 slagen van 2017 t/m 2019. Het vulmateriaal is deels afkomstig van de Markermeerdijken.
	13	
	14	Het vierde eiland (D2). Gevuld door Boskalis in 6 slagen van 2017 t/m 2019 met materiaal wat deels afkomstig is van de Markermeerdijken. Het compartiment is ook deels gevuld door Van Oord.
	15	Het vijfde eiland (D3). Gevuld door Boskalis in 5 slagen vanaf 2017 t/m 2019 met materiaal wat deels afkomstig is uit de slibvangput ca. 5 km verderop. Het compartiment is ook deels gevuld door Van Oord.
	16	

De compartimenten zijn gecreëerd door eerst zanddammen op te spuiten (2016). Tussen 2016 en 2019 zijn de eilanden gevuld met holocene klei en fijn sediment. Het materiaal is voor een gedeelte aangevoerd vanuit de slibvangput (ca. 5 km verderop) en de Markermeerdijken. Laatstgenoemde wordt momenteel versterkt.

Per module zijn een 4-tal habitat types voorzien. Voor elk habitat type geldt een bandbreedte aan de opleverhoogte:

- Plas dras hoog (max. NAP+0m, min. NAP-0.2m)
- Plas dras laag (max. NAP-0.2m, min. NAP-0.4m)
- Beschut ondiep hoog (max. NAP-0.4m, min. NAP-1.0m)
- Beschut ondiep laag (max. NAP-1.0m, min. NAP-2.0m)

Bij oplevering op 31 december 2020 moet aan een aantal hoogte-eisen worden voldaan. Daarnaast is er nog 15 maanden een garantieplicht op de hoogteligging. Voor een overzicht van de eisen wordt verwezen naar Tabel 2. De eisen hebben enkel betrekking op het habitat type 'plas dras'. Beschut ondiep wordt in voorliggende memo buiten beschouwing gelaten.

Tabel 2: Eisen van toepassing op de compartimenten

Eis code	Eis	Eis tekst
HT1.1-01	Maaiveldhoogte plas-dras	Het maaiveld van het plas-dras dient tussen plus en min 20 cm t.o.v. zomerpeil te liggen. <u>Toelichting:</u> Een maaiveld blijvend hoger dan 20 cm boven zomerpeil is niet gewenst omdat anders het risico op ongewenste bosvorming te groot wordt.
HT1.1-02	Toegestane afwijking op HT1.1-01	In maximaal 20% van het oppervlakte plas dras mag (als afwijking op eis HT1.1_01) het maaiveld hoger te liggen dan 20 cm boven zomerpeil. <u>Toelichting:</u> Met deze eis wordt de Oprachtnemer o.a. ruimte geboden overhoogte" aan te leggen om (deels) beheersmaatregelen te nemen i.v.m. de garantie verplichting genoemd in Annex XV."
HT1.1-03	Aandeel oppervlakte boven zomerpeil	Minstens 50 % van het oppervlakte plas-dras dient boven zomerpeil te liggen.
HT1.1-U-01	Toegestane afwijking op HT1.1-01	In maximaal 20% van het oppervlakte plas dras mag (als afwijking op eis HT1.1_01) het maaiveld hoger te liggen dan 20 cm boven zomerpeil. <u>Toelichting:</u> Met deze eis wordt de Oprachtnemer o.a. ruimte geboden overhoogte' aan te leggen om (deels) beheersmaatregelen te nemen i.v.m. de garantie verplichting genoemd in Annex XV.'
HT1.1-UA-01	Maaiveldhoogte plas-dras	Het maaiveld van het plas-dras dient tussen NAP+0m en NAP-0,4m te liggen.
HT1.1-UA-02	Aandeel oppervlakte boven zomerpeil	Minstens 50 % van het oppervlakte plas-dras dient te liggen tussen NAP+0m en NAP-0,2m.
HT1.1-UA-09	Bijsturen microreliëf	De zettings- en consolidatie gegevens die vrij komen uit het monitoringprogramma tijdens het vullen en consolideren van de compartimenten worden omgezet in prognoses (in hoogtelijnen) voor het ontstaan van het microreliëf. Deze prognoses worden beoordeeld door een deskundige . Als de prognoses leiden tot een reliëf dat sterk afwijkt van het in het DO Ruimtelijke Kwaliteit wordt de landschapsarchitect betrokken bij de keuze om wel of niet bij te sturen

Opgemerkt wordt dat:

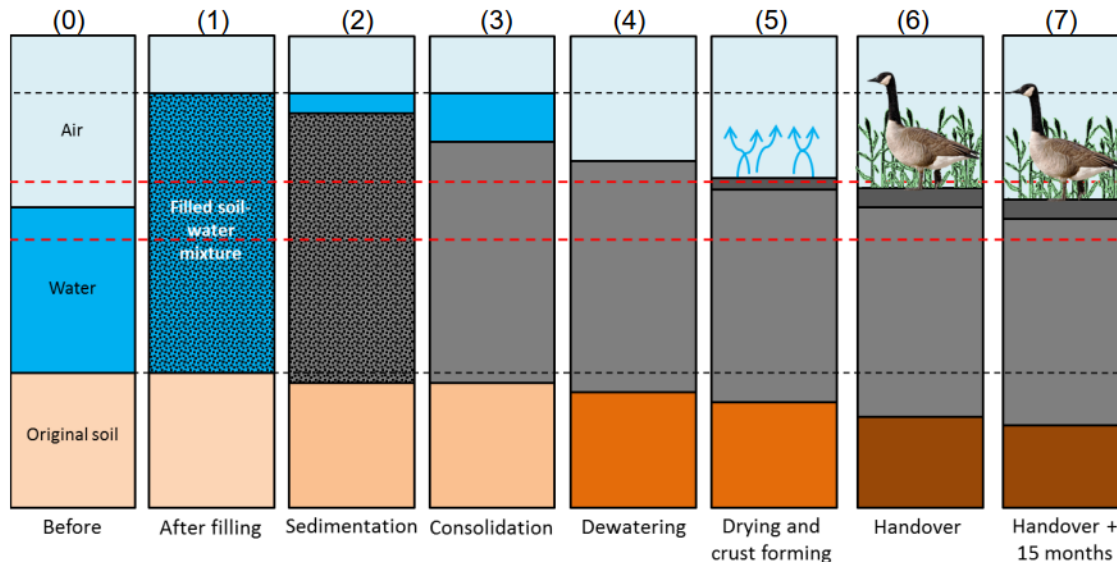
- De bandbreedte van plas-dras zoals omschreven in eis HT1.1-01 komt op hetzelfde neer als die van HT1.1-UA-01. Het zomerpeil bedraagt NAP-0.2m.
- De eistekst horend bij eis HT1.1-02 is identiek aan die van HT1.1-U-01.
- De eistekst horend bij HT1.1-03 wordt 'overruled' door die van HT1.1-UA-02. Laatstgenoemde is begrensd tot NAP+0.2m.

Tot slot wordt opgemerkt dat een deel van de vulslagen in compartimenten D2 en D3 is uitgevoerd door Van Oord met materiaal uit de zandwininput direct ten zuiden van het project. In deze compartimenten is niet exact bekend hoeveel materiaal is aangebracht, met welke samenstelling, in welk tijdsbestek en op welke spuitlocatie. Dit bemoeilijkt het aantonen van de eisen en mede daarom is een VTW opgesteld voor de allocatie van risico's en verantwoordelijkheden binnen de projectscope van Boskalis (VTW-0063).

In navolgende secties wordt eerst kort toegelicht wat we verstaan onder "hoogteontwikkeling". Vervolgens wordt beschreven hoe deze is gemonitord. Daarna worden de monitoringsgegevens geanalyseerd en worden een aantal onderliggende processen in meer detail toegelicht. Tot slot worden de belangrijkste nauwkeurigheden en onzekerheden samengevat die invloed hebben gehad op de monitoring en de interpretatie van de resultaten.

HOOGTEONTWIKKELING

In Figuur 3 is het principe van hoogteontwikkeling gevisualiseerd door middel van een aantal belangrijke fysische processen. De figuur laat in verschillende stappen zien hoe de hoogteontwikkeling tot stand komt vanaf start werkzaamheden tot 15 maanden na oplevering:



Figuur 3: Hoogteontwikkeling van de compartimenten. Schematisch weergegeven: Maximale vullingsgraad van compartiment (tussen zwarte lijnen) en plas-dras zone (tussen rode lijnen)

Naar de hoogteontwikkeling van slibdepots is uitgebreid onderzoek gedaan, zowel in de ontwerpfase als in de eerste fase van de aanleg. De verschillende onderzoeken zoals onderdeel van het adaptief management proces (zie Figuur 2) zijn in onderstaande referentielijst opgenomen. Een 2-tal onderzoeken m.b.v. containerproeven zijn uitgevoerd op het Boskalis terrein in Papendrecht [2] [3].

- 10.2.e
- [1] *Sludge depot modelling for self-weight consolidation and atmospheric drying.* [redacted] et. al. (2015)
- [2] *Consolidation behaviour of soft cohesive soils, the correlation between different scale model tests – Case study of the Marker Wadden,* [redacted] (2016) 10.2.e
<https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:6af68b7f-ec8b-4784-ba9b-802fa2acc16d/datastream/OBJ/download>
- [3] *Desiccation, crust formation & consolidation of soft, cohesive soil due to atmospheric conditions – A case study of the Marker Wadden,* [redacted] (2017) 10.2.e
<https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:8912fb03-5abc-4dfc-b176-f85db58460a7/datastream/OBJ/download>
- [4] *Diverse presentaties tijdens kennissessie met opdrachtgever*
- [5] *Afwerkniveaus zanddammen en stranden: Module A en B, 13084-5-R-02-0-PTUR*
- [6] *Afwerkniveaus zanddammen: Module C en D, 13084-5-R-03-0-PTUR*

De hoogteontwikkeling van de compartimenten verandert in de tijd door consolidatie. De consolidatie van het vulmateriaal en de ondergrond zoals weergegeven in Figuur 3 zijn in feite 2 gescheiden processen met een cumulatief effect aan maaiveld. De consolidatie van het vullingsmateriaal wordt "eigen gewicht consolidatie" genoemd. De consolidatie van de ondergrond wordt aangeduid met "zetting".

- Bij **eigen gewicht consolidatie** spelen een aantal zaken tegelijkertijd een rol zoals sedimentatie, consolidatie, korstvorming en vegetatie (ontwatering door vegetatie en versterking korst). De dichtheid van het grond/water mengsel neemt toe met diepte en bereikt een evenwichtssituatie onder

het eigen gewicht. Na verloop van tijd vormt er een korst door uitdroging van de toplaag en door het opkomen van vegetatie. De combinatie van deze processen veranderen de staat van het vulmateriaal geleidelijk van een vloeistof naar een vaste stof doordat het materiaal ontwaterd.

- Bij **zetting** in de ondergrond worden de spanningen tussen de korrelcontacten in een vaste stof verhoogd en wordt een tijdsafhankelijk zettingsproces in gang gezet. Hierbij verandert de structuur van de grond (plastische vervorming) en dit proces kan nog jaren doorgaan na het vullen van een depot ("kruip zetting").

De achtergrond van eigen gewicht consolidatie is complex omdat verschillende processen tegelijkertijd optreden. Het is moeilijk na te bootsen in een gecontroleerde omgeving (zie ook uitkomsten van de containerproeven) en lastig om de resultaten op te schalen naar de omvang van een project omdat daarbij ook de aanbrengmethode, ruimtelijke variabiliteit en weersomstandigheden een belangrijke rol spelen. Zo zijn er gedurende uitvoering enkele uitzonderlijke warme en droge zomers geweest. Om hier meer grip op te krijgen zijn de volgende stappen gezet:

- Container proeven [2] [3]
- SIC testen (Deltares) i.c.m. modelberekeningen (Delcon)
- Mud-bug metingen in het stort
- Korst dikte metingen
- Periodiek hoogtemetingen (drone Survey)

In de praktijk is gebleken dat alleen de periodieke hoogtemetingen een praktische bron van informatie is, waarmee inzicht wordt verkregen in de hoogteontwikkeling van de eilanden. Dit heeft een aantal redenen:

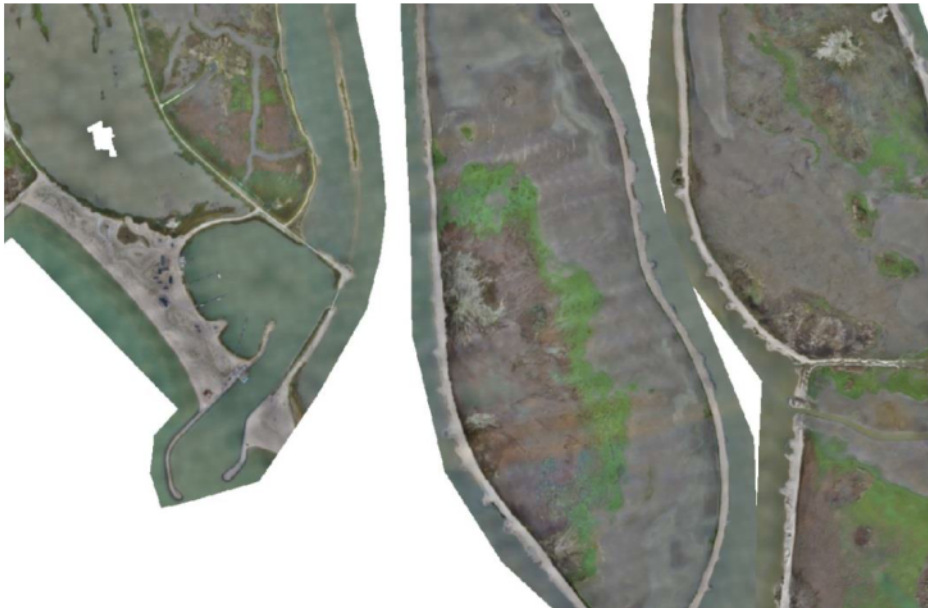
- De modelberekeningen kunnen alleen gebruikt worden voor de consolidatiefase als het materiaal onder water is. Processen als korstvorming en effect van vegetatie zijn nog in geen enkel model goed gevat. Tevens is dat nog onderdeel van lopend wetenschappelijk onderzoek. Daarnaast zijn de modellen 1D, dus beschrijven alleen de processen in een uitsnede van de kolom. De compartimenten in de Marker Wadden zijn bij uitstek inhomogeen in de ruimte, en 3d processen spelen een rol
- Containerproeven gaven inzicht in bepaalde processen (vooral onder water gedrag) en koppeling met het model. Korstvormingsprocessen waren echter moeilijk te bepalen, mede doordat meteorologische condities niet vergelijkbaar waren met die in het veld.
- Mud-bug metingen gaan alleen goed in net gevuld materiaal. Als korstvorming optreedt kunnen deze metingen niet meer worden uitgevoerd
- Korstdikte metingen zijn niet betrouwbaar omdat er geen eenduidige definitie is van wat 'de korst' precies is. In de praktijk wordt de korst (geleidelijk) gevormd door verschillende processen. Er is geen scherpe transitie van korst naar slap materiaal die elke keer op dezelfde manier kan worden gemeten. Het meten van de korstdikte is in de praktijk praktisch niet gemakkelijk uitvoerbaar.

Bovenstaande beperkingen maakt het moeilijk om de processen van eigen gewicht consolidatie en zetting los van elkaar te kunnen analyseren. De totale hoogteontwikkeling in de compartimenten kan daarom niet worden onderbouwd d.m.v. modelberekeningen en zal gebaseerd moeten worden op basis van veldmetingen. In onderstaande sectie wordt wel nader ingegaan op monitoring van eigen gewicht consolidatie, korstvorming en zetting.

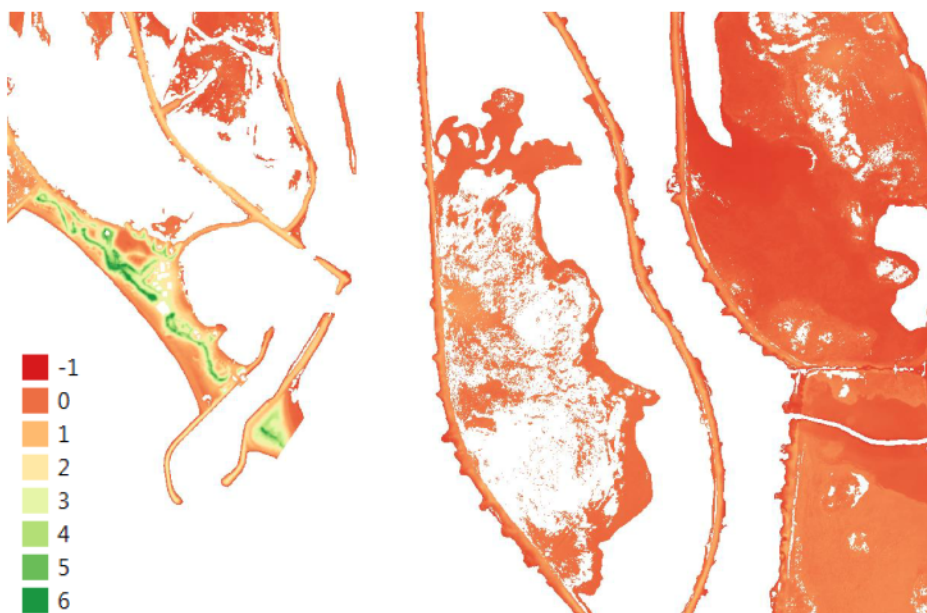
MONITORING

Monitoring Hoogteontwikkeling

Zoals beschreven in de voorgaande sectie is de hoogteontwikkeling van de compartimenten gemonitord door periodiek (4x per jaar) een survey uit te voeren met een drone. Tijdens een campagne worden gelijktijdig hoge resolutie foto's genomen en wordt de hoogte van het nieuwe maaiveld ingemeten m.b.v. fotogrammetrie zie Figuur 4 en Figuur 5.



Figuur 4: Periodieke survey (Q3 2020). Hoge resolutie foto voor het onderscheiden van korst, water en vegetatie

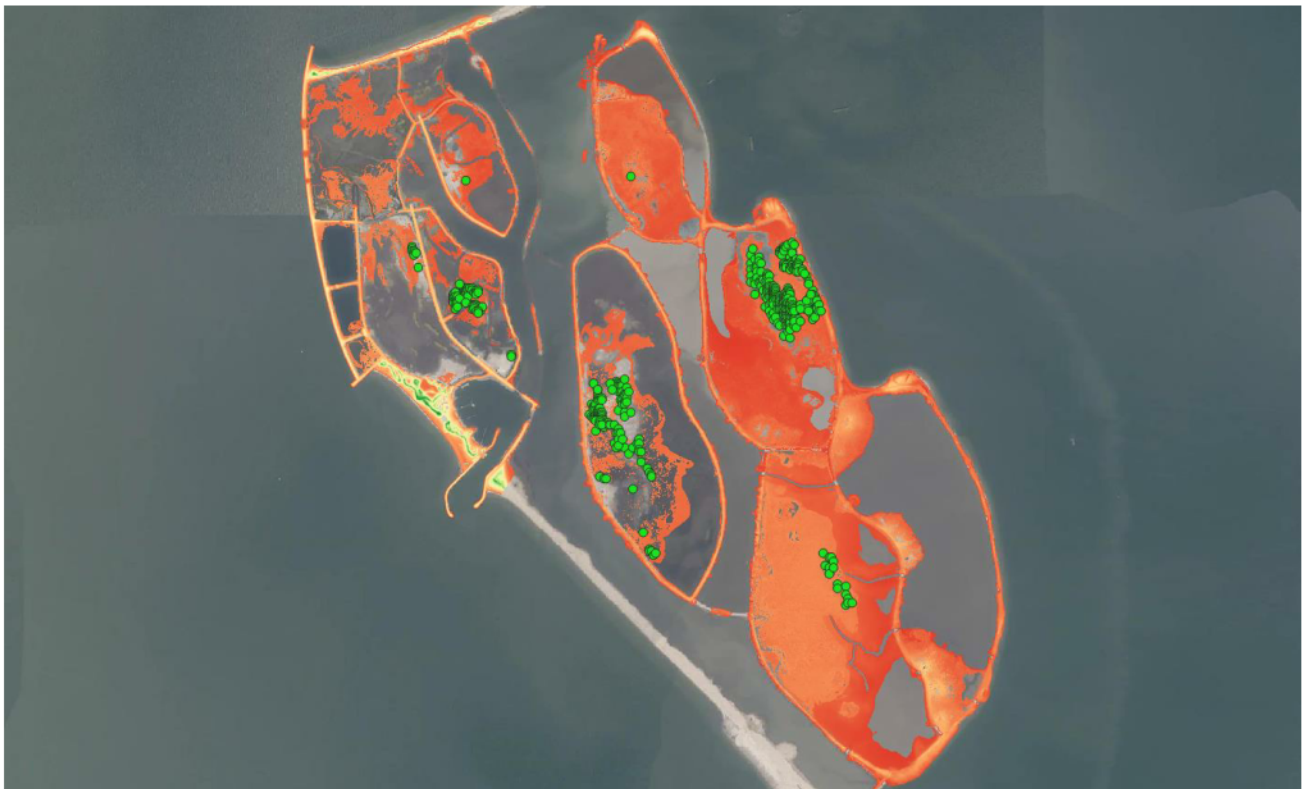


Figuur 5: Periodieke survey (Q3 2020). Hoogtemeting van de korst in [m] t.o.v. NAP.

De ruwe data wordt softwarematig gefilterd om afwijkende reflecties t.g.v. vegetatie en water te elimineren. Deze data is niet bruikbaar en dat is de reden waarom een survey nooit 100% vlakdekkend is. Dit brengt de volgende uitdagingen met zich mee:

- Als de compartimenten net gevuld zijn met holoceen materiaal, is de waterstand in het stort hoog en wordt er relatief weinig bruikbare data ingewonnen.
- Het water in de compartimenten wordt op hetzelfde peil gehouden als het Markermeer. In de zomer staat het water relatief hoog (NAP-0.2m) en kan er dus minder worden gemeten.
- Naarmate de tijd verstrijkt zakken sommige delen onder de waterlijn waardoor het oppervlak aan ingewonnen (bruikbare) data afneemt
- Naarmate de tijd verstrijkt begint er zich vegetatie te ontwikkelen waardoor het oppervlak aan ingewonnen (bruikbare) data afneemt. Vooral bij de laatste metingen heeft dit het te meten oppervlak behoorlijk beperkt.

Het komt regelmatig voor dat data simpelweg ontbreekt in bepaalde vluchtgegevens, vanwege de heersende omstandigheden (te nat / te begroeid). Dit is goed zichtbaar in Figuur 6 waarbij per compartiment het aantal punten is weergegeven die in elke survey terugkomen (Q3 2018 t/m Q3 2020).



Figuur 6: Beschikbare punten in modules A t/m D (Q3 2018 t/m Q3 2020)

Bovenstaande figuur laat zien dat het beschikbare aantal punten laag is in verhouding tot het ingemeten oppervlak en het wordt steeds minder naarmate de tijd verstrijkt. Voor een chronologisch overzicht van de hoogteontwikkeling wordt verwezen naar bijlage 1.

De aanleg van modules A en B gaat terug tot 2016 en de eilanden zijn in de tussentijd sterk begroeid. Door de vegetatie in deze modules blijven er anno 2020 weinig punten over. In modules C en D speelt water een belangrijke rol. Grote delen van modules C en D hebben in 2019 nog onder water gestaan na een laatste vulslag. Daarom is hier het aantal punten (met name in D3) zeer beperkt.

Verder laat Figuur 6 goed zien dat het ingemeten oppervlak nooit hetzelfde is als het totale oppervlak van de compartimenten. Hierdoor is het niet mogelijk om een goede relatie te leggen met de eisen die zijn gesteld in Tabel 2. Deze gelden immers over het totale oppervlak van de compartimenten en bovendien moeten de eisen worden gemiddeld over alle compartimenten samen. Door de beperkte dekking van de data is een exacte analyse van de oppervlaktes per hoogteklasses niet mogelijk. In het vervolg van de memo zullen we daarom uiteen zetten hoe we verder omgaan met dit gegeven.

Monitoring zetting ondergrond

Opgemerkt wordt dat met drone metingen alleen de hoogteontwikkeling van het maaiveld wordt gemonitord zonder daarbij onderscheid te maken tussen 'eigen gewicht consolidatie' en 'zetting'. De begaanbaarheid van het stort was te slecht voor het plaatsen van zakbaken waarmee de zettingen in een compartiment gemonitord konden worden. Op de zanddammen zijn daarentegen wel zakbaken geplaatst (72x). Hier is het zettingsgedrag van de ondergrond dus wel in kaart gebracht [5] [6]. Voor een overzicht van deze zakbaken wordt verwezen naar Figuur 7.



Figuur 7: Overzicht zakbaken

Monitoring eigen gewicht consolidatie

Het gedrag van het holoceen materiaal (eigen gewicht consolidatie) is met name gebaseerd op monitoring van de eerste twee vulslagen toen er nog een enkel groot compartiment was in A en B. Hierna werd het meten van de effecten ten behoeve van het begrijpen van de processen praktisch moeilijk uitvoerbaar. Dit, mede door het grillig verloop van de dichtheidsmetingen na meerdere vulslagen, maar ook door de praktische uitdagingen met het meten van dichtheidsprofielen op het moment dat het holoceen boven water kwam. Echter, op basis van de metingen van de eerste vulslagen is het algemene gedrag goed te beschrijven. De holocene klei die gebruikt wordt voor de aanleg van de eilanden ondergaat twee veranderingen in het aanlegproces: eenmaal bij winning, en eenmaal tijdens consolidatie. Het materiaal begint als in-situ materiaal in de winput. Door de snijkopzuiger wordt het materiaal losgesneden, gemengd met water en hydraulisch geperst naar het stort. De dichtheid van het materiaal neemt af door het vermengen met water en er vindt scheiding van het materiaal plaats. Eenmaal in het stort consolideert het materiaal, treedt het water uit, en

neemt de dichtheid van het gestorte materiaal weer toe. Tenzij anders vermeld wordt in dit memo met dichtheid de totale natte dichtheid bedoeld.

De eigenschappen van het in-situ materiaal zijn onder andere bepaald op basis van boringen. De dichtheden en materiaaleigenschappen op verschillende hoogtes zijn hierbij bepaald. De dichtheid van het vulmateriaal varieert tussen 1100 kg/m³ en 1900 kg/m³ en is gemiddeld ongeveer 1400 kg/m³.

De eigenschappen na het persen zijn bepaald op basis van dichtheidsmetingen in de compartimenten en survey volumes in de winput en compartimenten. De dichtheidsmetingen zijn voornamelijk uitgevoerd met de "Mudbug".

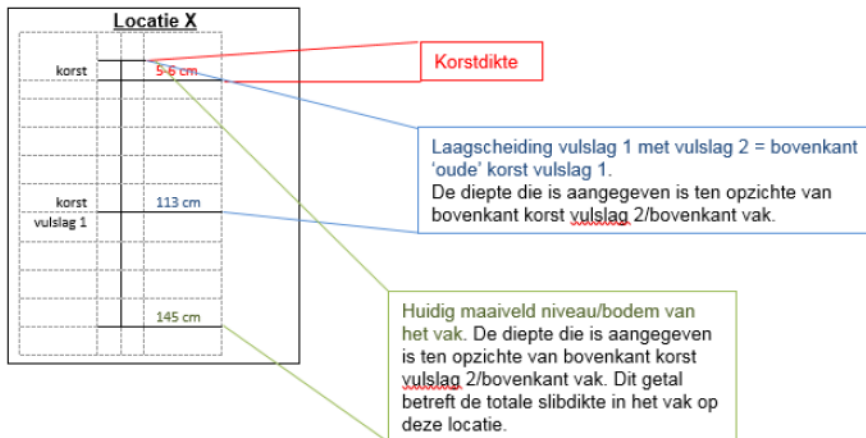
De mudbugmetingen zijn uitgevoerd in alle compartimenten op een aantal locaties verspreid over het stort en op een aantal momenten in de tijd. De locaties van de dichtheidsmetingen in compartimenten zijn weergegeven in Figuur 8. Vanwege de verwachte heterogeniteit van het stort zijn de dichtheidsprofielen gemeten op locaties waar direct materiaal in de compartimenten is gebracht (spuitmond) en waar materiaal naar toe is gestroomd.



Figuur 8: De locaties van de dichtheidsmetingen tijdens en na de eerste twee vulslagen (roze getallen 1 t/m 12). Andere locaties zijn bij latere vulslagen bemeaten

Monitoring korstvorming

Begin 2019 is aanvullend grondonderzoek uitgevoerd in compartimenten C en D naar aanleiding van periodieke kennis overleggen tussen ON en OG, om meer inzicht te krijgen in de onderliggende processen van hoogteontwikkeling. Het doel hiervan was om meer informatie in te winnen over de samenstelling en ontwikkeling (dikte) van de korst. Vanwege de slechte begaanbaarheid is dit onderzoek laagdrempelig uitgevoerd met een zuigerboor, torvane en fieldvane. De opbouw van de verschillende vulslagen zou inzichtelijk gemaakt kunnen worden volgens onderstaande principeschets.



Figuur 9: Voorbeeld boorbeschrijving

De korst zou los gestoken worden met een schop en worden opgemeten. In het gat zou een zuigerboor worden neergelaten om (on)geroerde monsters te nemen voor analyse in het laboratorium:

- Dichtheid en watergehalte
- Korrelverdeling d.m.v. laserdiffractie
- Korrelverdeling d.m.v. zeping (korrels > 63µm) + hydrometer (korrels ≤ 63µm)
- Ongedraineerde schuifsterkte

Het grondonderzoek heeft plaatsgevonden in modules C en D op de volgende locaties:



Figuur 10: Locaties aanvullend grondonderzoek

ANALYSE

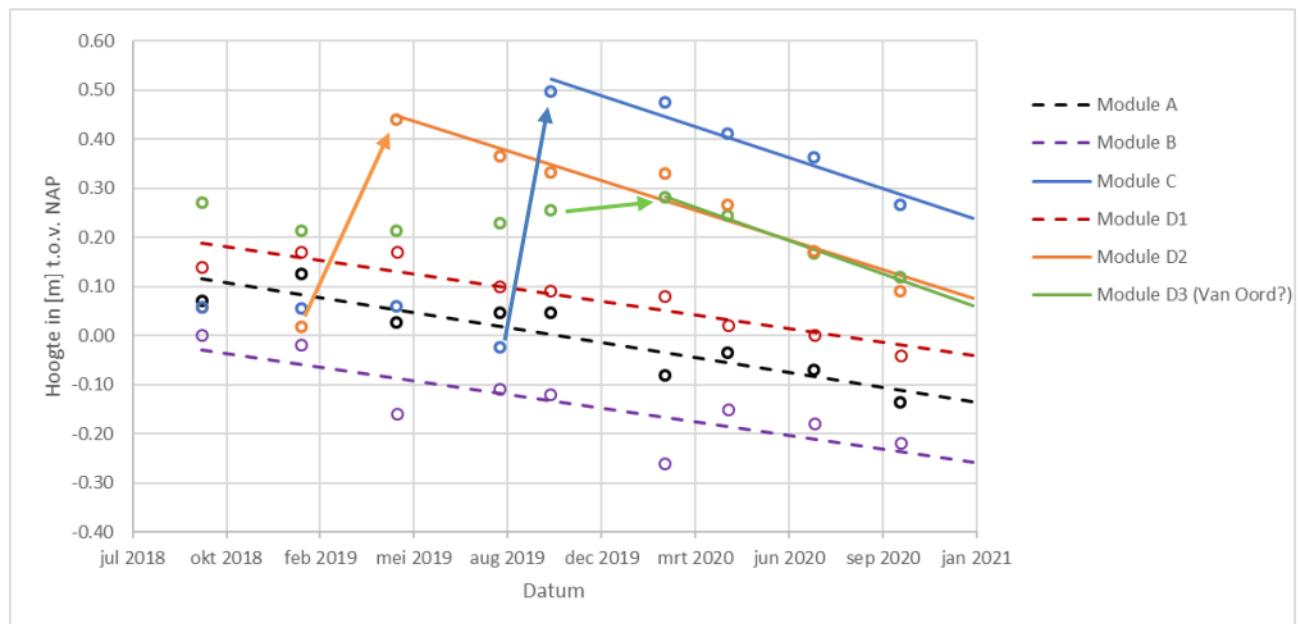
Hoogteontwikkeling

De periodieke drone metingen zijn gebruikt om een prognose te maken van de verwachte hoogteontwikkeling in de verschillende modules. Voor het analyseren van de gegevens is onderstaand stappenplan gevolgd:

1. Project onderverdelen in een vast grid met punten (10 x 10m).
2. Per module inventariseren hoeveel punten in alle peilingen bruikbare data opleveren (filteren op vegetatie en water).
3. Per module de hoogteontwikkeling inzichtelijk maken.

Voor de ruwe data uit bovenstaand stappenplan wordt verwezen naar bijlage 2. Hieruit blijkt dat er steeds minder bruikbare data overblijft en dat deze clusteren op de hoge delen van de compartimenten in de buurt van perslocaties. Hierdoor is de analyse niet representatief voor o.a. het gedrag van het holoceen in het gehele compartiment. Wij verwachten echter dat de hoogteontwikkeling op basis van deze punten een bovengrens benadering is (maximale daling). De lagere delen zijn immers tegelijkertijd aangebracht, en met name de delen die onder water staan zullen minder (snel) dalen omdat er minder gewicht (kleinere laagdikte + lagere dichtheid) in het spel is om eigengewicht consolidatie en zetting op gang te houden. Bovendien zal de hoeveelheid zetting gelijkmatig optreden voor modules C en D omdat de dikte van het Holocene pakket redelijk homogeen is (zie volgende sectie, Figuur 12).

De gemiddelde hoogteontwikkeling op basis van de weinig beschikbare punten is per module samengevat in Figuur 11.



Figuur 11: Tijd-zettingsverloop t/m oplevering. Laatste ophoogslag indicatief weergegeven (pijlen)

Op basis van Figuur 11 wordt het volgende geobserveerd:

- A, B en D1: gemiddelde maaiveld daling van 5 – 10 cm / jaar.
- C, D2 en D3: gemiddelde maaiveld daling van 20 – 25 cm / jaar.

Modules A, B en D1 zijn de eerste compartimenten die zijn gevuld in 2016. De laatste vulslag heeft begin 2018 plaatsgevonden en de huidige maaiveld daling is relatief vlak vergeleken met modules die later in

uitvoering zijn gegaan. De gemiddelde hoogte van module B lijkt relatief laag te liggen. Modules A en D1 liggen nog boven het zomerpeil (NAP-0.2m) maar dat beeld kan zijn vertekend omdat de modules sterk zijn begroeid. Daardoor is het aantal metingen beperkt.

Modules C en D2 zijn recent nog gevuld (2019). Deze modules liggen nu nog relatief hoog. Dat is ook goed te zien als men buiten rondloopt, vooral bij module C. De beschikbare metingen laten echter zien dat het maaiveld nog relatief snel daalt. Verwacht wordt dat over ca. 1 à 1.5 jaar een daling wordt waargenomen die vergelijkbaar is met wat nu bij modules A, B en D1 wordt gemeten.

Bij Module D3 is minder duidelijk wanneer de laatste vulslag heeft plaatsgevonden omdat dit compartiment geleidelijk is gevuld. Verder bestaat het vermoeden dat er slib in het compartiment is gestroomd door het stortwater wat door Van Oord in het naastliggende compartiment (Beschut Ondiep) is geloosd. Dit kan echter niet worden geverifieerd. Op basis van de laatste 4 metingen wordt verwacht dat module D3 qua maaiveld daling kan worden ingedeeld bij modules C en D2.

De volgende kanttekeningen worden geplaatst bij Figuur 11:

- De genoemde snelheden zijn gebaseerd op punten die al vanaf het begin hoog lagen. Deze locaties lagen in de buurt van de spuitmonden waar ontmenging van materiaal heeft plaatsgevonden. Hier bezinken de zware delen (zand) terwijl de fijne delen (silt/klei) uitvloeien naar de lagere delen van het stort. Hierdoor is de karakteristiek van het materiaal (bijvoorbeeld dichtheid en korrelgrootte) verschillend tussen de spuitlocatie en locaties waar niet gespoten is. Dit heeft ook gevolgen voor het constitutieve gedrag (relatie porositeit - permeabiliteit en relatie porositeit - korrelspanning) en hierdoor op het consolidatiegedrag.
- Verwacht wordt dat op de lage delen van het stort minder zetting zal optreden. Geprobeerd is om ook de hoogteontwikkeling per hoogteklasse inzichtelijk te maken maar dit is niet gelukt omdat de data niet evenredig is verdeeld. Rond het zomerpeil (NAP-0.2m) neemt het aantal geschikte metingen snel af omdat de punten op een gegeven moment onder water zakken.
- Verwacht wordt dat het verloop van de hoogteontwikkeling niet lineair is maar logaritmisch in de tijd en op den duur af gaat afvlakken. Dit effect wordt mogelijk gemaskeerd door verschillende processen die niet gelijktijdig optreden (eigen gewicht consolidatie & zetting).

Per module is de verwachte hoogteontwikkeling ingeschat en samengevat in onderstaande tabel:

Tabel 3: Verwachte hoogteontwikkeling

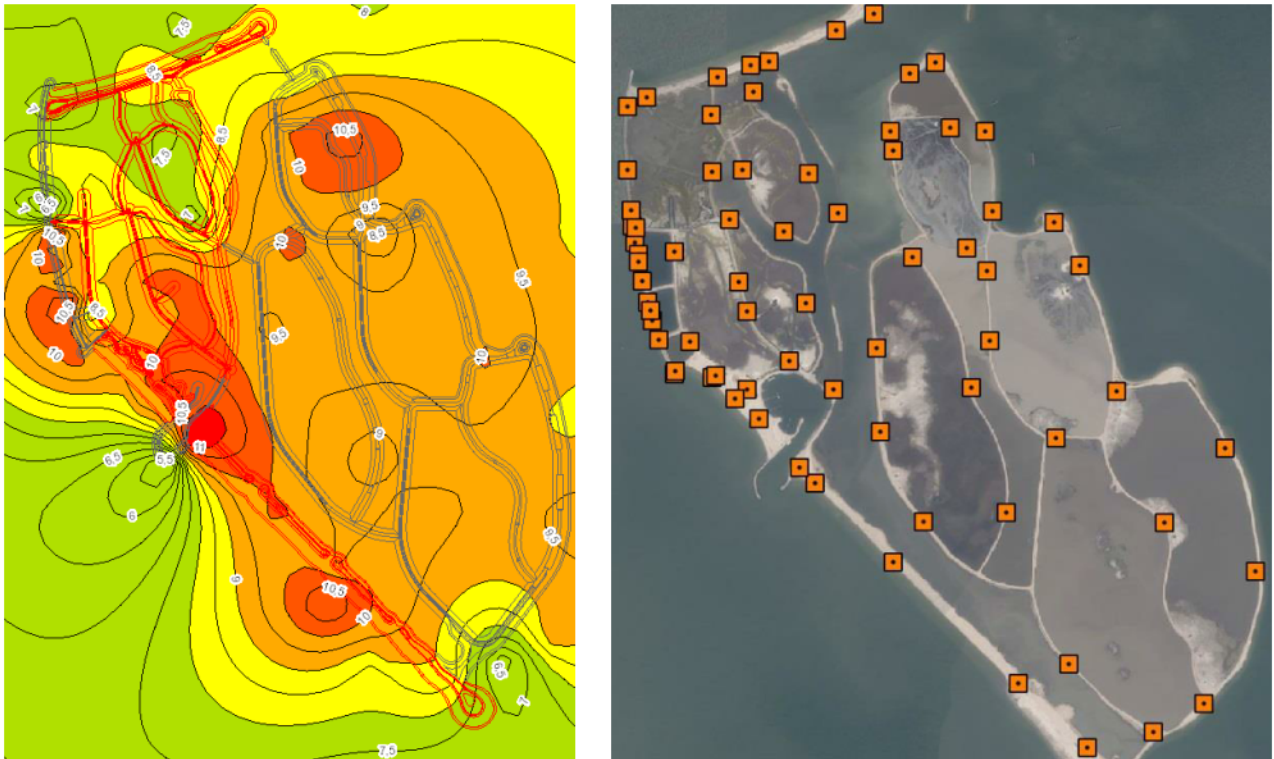
Compartiment	Hoogteontwikkeling in [cm]		
	Nu (Q3 2020) t/m oplevering	Gedurende de garantieperiode (15 maanden na oplevering)	Totaal
A	3	7	10
B	3	7	10
C	5	20	25
D1	3	7	10
D2	5	20	25
D3	5	20	25

Zoals reeds benoemd is eigen gewicht consolidatie moeilijk te meten. Bovenstaande prognose is daarom gebaseerd op de uitgevoerde veldmetingen en expert judgement.

Analyse zetting ondergrond

De zetting van de ondergrond is sterk afhankelijk van de belasting van de samendrukbare holocene lagen. De holocene deklaag varieert in dikte tussen 7 en 11m, zie Figuur 12. De grootste variatie in dikte bedraagt max. 4m en zit met name in de noordwest hoek van het project waar modules A en B liggen. De variatie is minder groot in modules C en D (max. 1m). De zetting in laatstgenoemde modules zal dan ook minder fluctueren

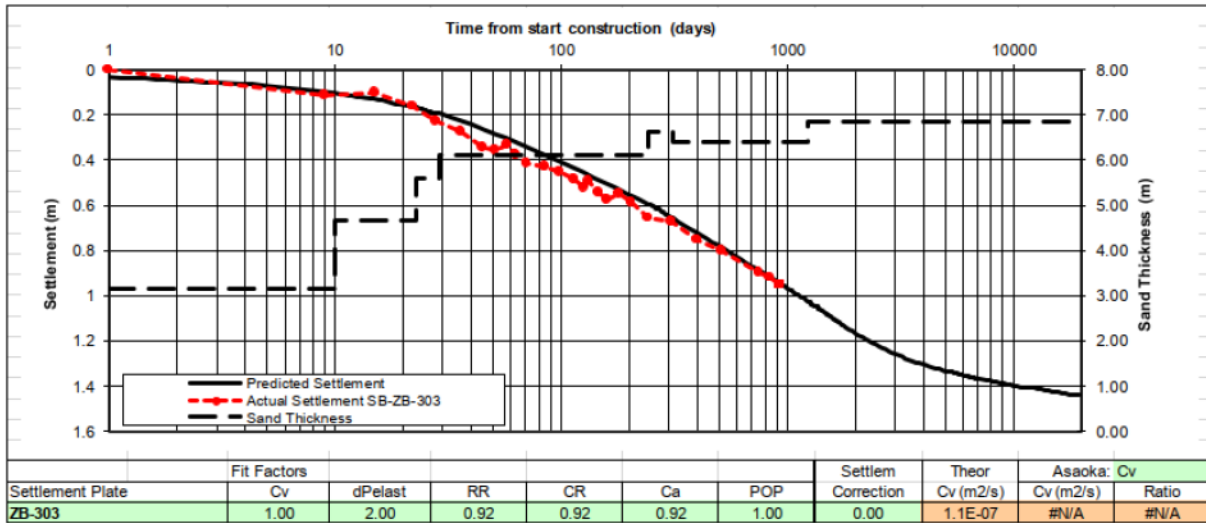
onder een gelijke belasting en dit zal zijn weerslag hebben op de hoogteontwikkeling van deze compartimenten.



Figuur 12: Indicatie van de dikte van de holocene kleilaag in de originele bodem onder het projectgebied

De hoeveelheid restzetting na oplevering is ingeschat op basis van de uitgevoerde zakbaakfits [5] [6]. De zakbaken ter plaatse van de zanddammen zijn gebruikt om de zettingsparameters van het ontwerp te 'ijken', deze lijken in werkelijkheid iets gunstiger te zijn dan aangenomen, zie Figuur 13. De samendrukbaarheid is met een factor 0.9 verlaagd om een goede aansluiting te krijgen op de metingen. De consolidatie snelheid is onveranderd gebleven. Met deze geijkte parameters is de hoeveelheid restzetting binnen de compartimenten ingeschat op ca. 5 a 10 cm over een periode van 15 maanden.

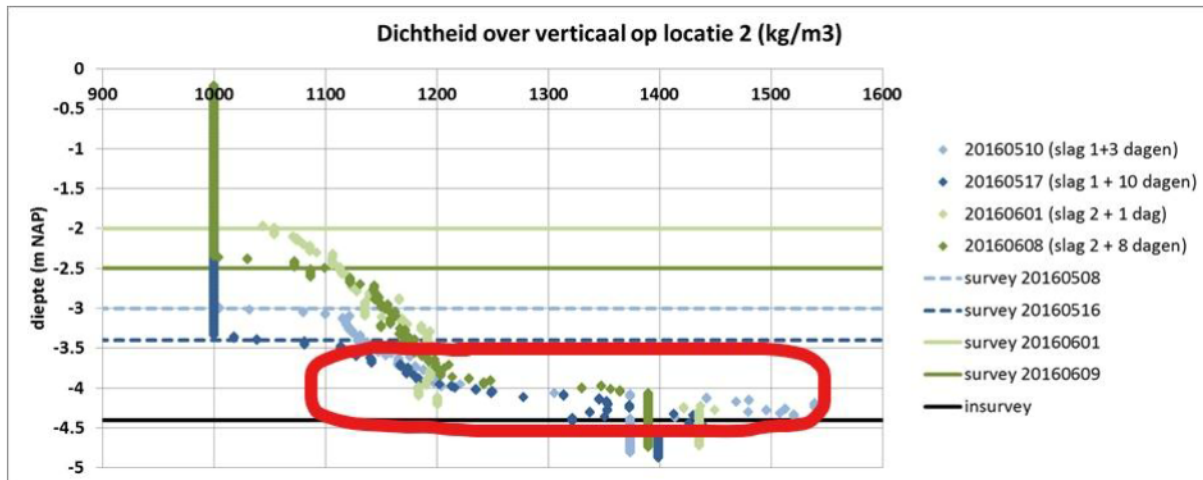
Verder wordt opgemerkt dat het zettingsgedrag over het algemeen logaritmsch verloopt en dus snel afneemt. Zo is te zien dat vanaf het laatste meetpunt (rode bolletjes) het ca. 1000 dagen duurt voordat er 20 cm is opgetreden. De volgende 20 cm treedt op en in een periode van ca. 8000 dagen (Figuur 13). In de compartimenten waar niet is opgehoogd met zand maar met holocene klei zullen de verschillen nog groter zijn.



Figuur 13: Zakbaakfit in module D (ZB-303) onder de zanddam

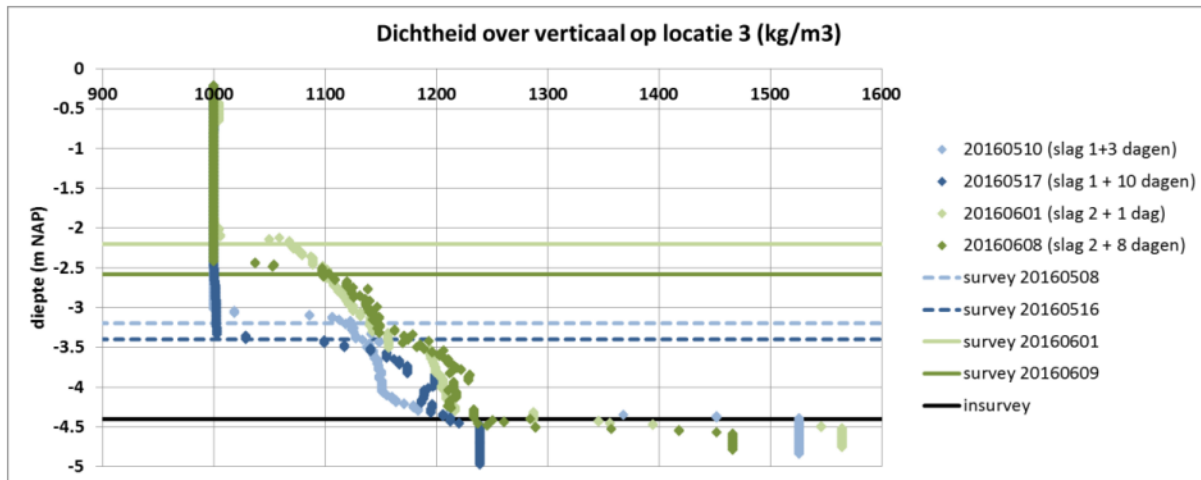
Analyse eigen gewicht consolidatie en gedrag holoceen

Het verschil van een perslocatie en een niet-pers locatie kwam duidelijk in naar voren uit de Mudbug metingen uitgevoerd in modules A en B, zie Figuur 8. Twee voorbeelden van de heterogeniteit tussen perslocaties en niet-perslocaties zijn te zien in Figuur 14.

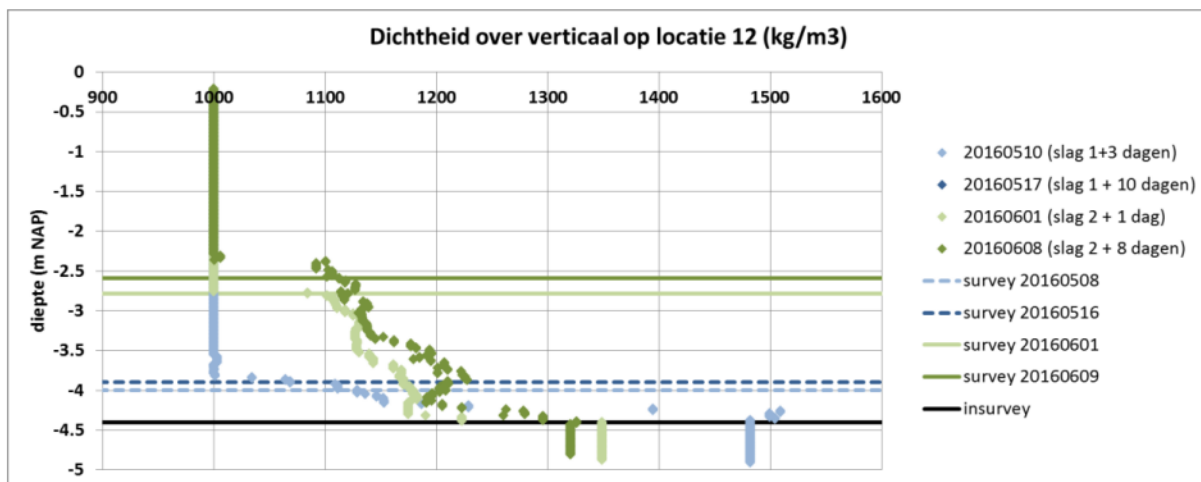


Figuur 14 Dichtheid profielen en survey hoogtes voor Mudbug locatie 2 (Noord-midden) na de eerste (blauw) en na de tweede (groen) vulslag. Rode ovaal geeft de laag met hogere dichtheid weer. .

Tijdens de eerste vulslag was locatie 2 een perslocatie en is er dik materiaal terecht gekomen (rood omcirkeld). Tijdens de tweede vulslag was locatie 2 geen perslocatie en is enkel dunner uitloopmateriaal over de eerdere vulslag heen gekomen. Onderstaande figuren zijn representatief voor locaties waar niet geperst wordt maar het materiaal in stroomt.



Figuur 15 Dichtheid profielen en survey hoogtes voor Mudbug locatie 3 (Noordoost) na de eerste (blauw) en na de tweede (groen) vulslag.



Figuur 16 Dichtheid profielen en survey hoogtes voor Mudbug locatie 12 (Zuidoost) na de eerste (blauw) en na de tweede (groen) vulslag

Uit de dichtheidsprofielen zoals weergegeven in Figuur 14 t/m Figuur 16 komen een aantal waardevolle inzichten naar voren over de eigenschappen en het gedrag van het gestorte materiaal. Deze worden hieronder kort toegelicht.

Scheiding van dun en dik materiaal

Het materiaal wordt in het snij- en aanbrengproces grofweg opgesplitst in 2 fracties: dun en dik materiaal. Dun materiaal kan bij aanbreng worden gedefinieerd als materiaal met een dichtheid minder dan 1200 kg/m³. Kort na het persen is er vrijwel geen materiaal meer te zien met een dichtheid <1100kg/m³ en wordt het dunne materiaal min of meer geleidelijk opgebouwd van 1100kg/m³ naar 1200kg/m³. Het dunne materiaal is holocene klei die goed gemengd is met het proceswater. Van de dunne fractie wordt aangenomen dat het een gemiddelde dichtheid heeft van 1150kg/m³, enkele dagen na aanbreng van de laag. Dik materiaal bestaat onder andere uit kleiballen die niet uiteengevallen zijn bij het snijproces en uit zwaardere (zand)fracties. Aannemelijk is dat in de openingen tussen de kleiballen ook een aandeel dun materiaal zal zitten. De Mudbug blijft op de zwaardere fracties (rond 1400kg/m³) vast zitten. Van de dikke fractie (met onder meer niet opgeloste kleiballen uit de in-situ winput) wordt aangenomen dat het een dichtheid heeft van 1400kg/m³ zoals ook in de winput aanwezig is. Daarnaast bepaald uiteraard ook de

variabiliteit van de dichtheid uit de winput de dichtheid in het stort. Een extra scheiding kan plaatsvinden doordat het veen en de organische klei relatief lagere dichtheden heeft dan de andere fracties in de winput.

Behoud van dik materiaal nabij perslocaties

Mudbug locatie 2 (Figuur 14) was tijdens de eerste vulslag een perslocatie. Tijdens de tweede vulslag was het geen perslocatie. Mudbug locatie 3 en 12 (respectievelijk Figuur 15 en Figuur 16) waren bij beide vulslagen geen perslocatie. Er wordt enkel dik materiaal achtergelaten op Mudbug locatie 2, en daarbij is te zien dat het dikke materiaal is geplaatst tijdens vulslag 1.

Uitloop van dun materiaal over het vulgebied

De eerste vulslagen in modules A en B zijn uitgevoerd van het zuiden richting het noorden. Bij de eerste Mudbug meting na de vulslag zijn de noordelijke delen nog maar net aangelegd en hebben de zuidelijke delen al enige tijd gehad om te consolideren en uit te vlakken. Het uitvlakken is bijvoorbeeld te zien bij de twee noordelijke Mudbug locaties (locatie 2 en 3) vergeleken met de zuidelijke Mudbug locatie (locatie 12). Gelijk na het afronden van de totale vulslag is het materiaal in de noordelijke locaties hoger dan in de zuidelijke locatie. Een week na afronden van de totale vulslag zijn de noordelijke locaties flink gezakt, terwijl er in het zuiden juist een beetje materiaal bij lijkt gekomen. Dit effect is niet alleen zichtbaar in de dichtheidsprofielen, maar ook in de surveys die zijn uitgevoerd. Dit duidt erop dat slap materiaal van noord naar zuid is 'gestroomd'. Dit is een voorbeeld van uitvlakking door hoogteverschillen.

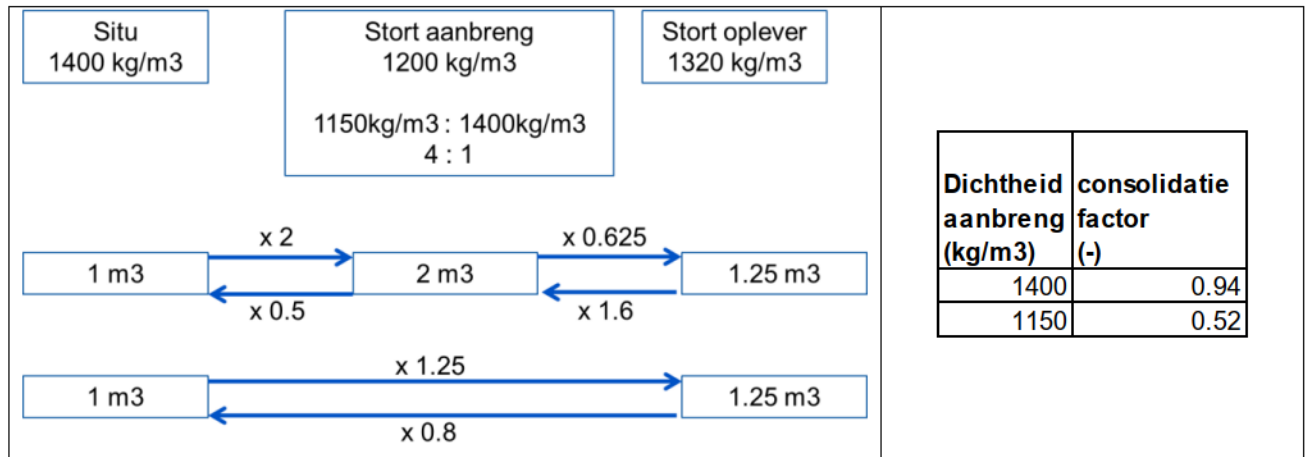
Verhouding dun-dik materiaal

De verhouding tussen het dunne en dikke materiaal is van belang om te bepalen wat de gemiddelde uitlevering vlak na aanbrengen is. Het is daarmee ook van belang de verhouding van de perslocaties ten opzichte van de uitstroom-locaties te bepalen. Ongeveer de helft van het totale oppervlak was een perslocatie. De andere helft was een uitstroomlocatie. Van de Mudbug metingen die op een perslocatie zijn uitgevoerd is de volume-verhouding tussen dik en dun materiaal bepaald. Waar geperst werd was de volumeverdeling 40% dik en 60% dun. Met bovenstaande kan een gemiddeld profiel bepaald worden met een gemiddelde dichtheid van circa 1200kg/m³. Deze bepaling is gedaan op basis van wat na de eerste 2 vulslagen is gemeten. Ander winput materiaal, andere persafstanden, andere vulmethodes etc. kunnen invloed hebben op deze dichtheid.

Uitleveringsfactoren

Initieel werd rekening gehouden met een bulking / uitlevering van in-situ tot oplevering van 1.67. Een half jaar na start aanleg leek dit een overschatting te zijn en was de uitlevering meer in de orde van 1.25 was. Dit zou betekenen dat er bij benadering 1/3 meer in-situ materiaal nodig is om de beoogde eindvolumes te behalen. Bulking wordt in dit geval simpelweg gedefinieerd als verhouding tussen dichtheid in het stort vs. dichtheid in de winput.

Met de rekenregels kon in een stap terug gerekend worden van oplevertkort naar situ-kuubs. De eerste rekenregels volgen uit de resultaten van monitoring. Hieruit volgt dat de uitlevering van situ naar stort initieel ongeveer 2 bedraagt, en dat deze richting oplevering zakt naar ongeveer 1.25. Deze regels staan in Figuur 17 weergegeven. Vervolgens wordt een vereenvoudiging gemaakt van de consolidatiefactor van de verschillende fracties van plaatsing tot oplevering. Het dikkere materiaal zal namelijk minder consolideren dan het dunnere materiaal.



Figuur 17: Kentallen voor aanvulling bepaling (geldig voor alle vulslagen). Links: de uitleveringsfactoren van situ tot aanbreg en tot de oplevering in het stort (gemiddelde dik en dun materiaal) (voor elke 1m³ situ-volume hebben we bij aanbrengen 2m³ en bij opleveren 1.25m³). Rechts: de verschillende consolidatiefactoren voor de twee verschillende aangebrachte fracties (een dunne laag halveert ongeveer van aanbrengen tot opleveren terwijl materiaal met een hoge dichtheid vrijwel gelijk blijft in volume)

Let op dat bulking/uitleveringsfactoren iets anders is dan bijvoorbeeld totale factoren om met 1 m³ winput materiaal een X m³ moeras te maken op een bepaalde hoogte. Hierbij spelen een aantal processen door elkaar, zoals:

- Eigen gewicht consolidatie
- Zetting ondergrond
- Verlies uit het stort buiten de grenzen
- 'Verlies' of verloop van materiaal van het ene naar het andere compartiment (zie ook hieronder)
- Korstvorming
- Effect vegetatie

Al deze processen treden tegelijk op, waardoor een eenvoudige analyse van al deze factoren onmogelijk is. Echter bovengenoemde processen zullen er wel voor zorgen dat de factor lager zal zijn dan de 1,25 die hierboven is genoemd.

Beperkingen in het nader bepalen van materiaal eigenschappen

Nadat het gebied in een aantal compartimenten opgedeeld was werd het nauwkeurig bepalen van het materiaalgedrag vlak na aanbrengen praktisch onhaalbaar, zie ook verdere dichtheidsprofielen in bijlage 3 voor compartimenten A en B. Dat is met name omdat eerder geplaatste lagen al enige tijd hebben kunnen consolideren en de nieuwe lagen daarmee gemengd werden. Ook werden tussentijds compartimenteringsdammen aangelegd waarmee significante volumes werden geïntroduceerd welke eerder geplaatste volumes (deels) afdekten en/of weg-persten. Tevens zorgden pijpen voor verbindingen tussen de compartimenten waardoor een vulslag in een compartiment niet uitsluitend ten goede komt van dat compartiment maar ook de volumes in de aangrenzende compartimenten beïnvloed. Vooral het slappe materiaal kon van het ene naar het andere compartiment stromen.

Analyse korstvorming

Tijdens uitvoering van het aanvullende grondonderzoek begin 2019 was de conclusie al snel dat de korst geleidelijk overgaat in het onderliggende materiaal en dit geen harde laagscheiding betreft van vast naar vloeibaar, zie Figuur 18. Wat 'de korst' precies is moet in de toekomst beter worden gedefinieerd om te voorkomen dat er in het veld telkens op een andere manier wordt gemeten. Als het stort beloopbaar is heeft de korst een minimale dikte die varieert van 10 tot 20 cm.



Figuur 18: korstdiktemeting

Na het verwijderen van de korst is een zuigerboor gebruikt om het onderliggende materiaal te bemonsteren. Het materiaal wat in de zuigerboor bleef zitten was erg zacht en zandig. Het inbrengen van de boor had direct een versturende werking op de monstername. Het materiaal bleef óf niet zitten óf werd samengedrukt tijdens het boren/uitdrukken. Dit maakte het praktisch onmogelijk om ongeroerde monsters te nemen. De monsters kwamen niet in 1 stuk naar boven en de lengte van de monsters kwam zelden overeen met de gestoken diepte. Van welke diepte de monsters dan komen is dan niet meer te achterhalen. Een voorbeeld van een 'geslaagd' monster is weergegeven in Figuur 19.



Figuur 19: Monstername aanvullend grondonderzoek (erg zandig)

Het meten van de ongedraineerde schuifsterkte met de fieldvane op vaste dieptes t.o.v. maaiveld (0.5m, 1.0m en 1.5m) had meer succes omdat de hoeveelheid monsterverstoring kleiner is. Daarbij moet opgemerkt worden dat het voor het vervolg verstandig is om een correctie uit te voeren voor de wrijving op de stangen en op meerdere plekken te meten. Per locatie zijn geroerde monsters verzameld voor beproeving in het laboratorium. Deze zijn onderzocht op:

- Dichtheid en watergehalte
- Korrelverdeling d.m.v. laserdiffractie
- Korrelverdeling d.m.v. zeving (korrels > 63µm) + hydrometer (korrels ≤ 63µm)
- Ongedraineerde schuifsterkte (torvane)

In totaal zijn 27 monsters naar het lab gebracht voor beproeving. Een 10-tal daarvan zijn geclassificeerd conform de luthum-silt-zand driehoek van NEN5104. De helft van de monsters valt in de categorie 'leem' (Lz1-Lz3: zwak tot sterk zandig) en de ander helft in de categorie 'klei' (Ks3-Ks4: sterk tot uiterst siltig). Opgemerkt wordt dat in Module D alleen leem is aangetroffen en in module C voornamelijk klei.

De resultaten van het uitgevoerde grond- en laboratoriumonderzoek zijn samengevat in onderstaande tabel. Geprobeerd is om de resultaten zo goed mogelijk te rangschikken naar de diepte maar gezien alle onzekerheden m.b.t. monsternamen en het beperkt aantal monsters moet hier niet teveel waarde aan worden gehecht. Daarom is per module ook een gemiddelde bepaald op basis van alle monsters. Opgemerkt wordt dat deze getallen niet representatief zijn voor het hele compartiment omdat alleen gemonsterd is waar de begaanbaarheid van het stort dat toeliet. Deze locaties bevinden zich in de buurt van de spuitmonden waar relatief veel zand is neergeslagen. Dit verklaart waarom relatief hoge dichtheden zijn gemeten en hoge fracties zand zijn aangetroffen. Wat ook niet moet worden onderschat is dat tijdens het bemonsteren water en slap materiaal makkelijk uit de boor loopt waardoor de gemeten 'situ' dichtheid hoger uitvalt.

Tabel 4: Resultaten grond- en labonderzoek

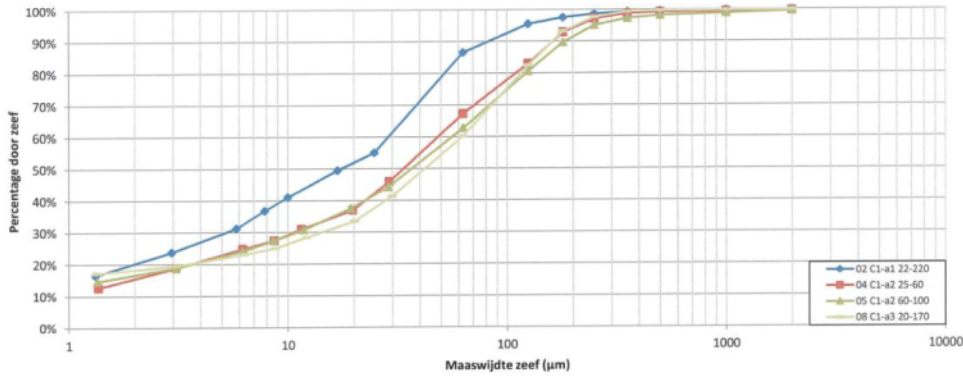
Module	Diepte in [m] t.o.v. MV	Su in [kPa]	Situ dichtheid in [Mg/m ³]	D50 In [µm]	Omschrijving
C	0 – 20 cm	8.5 kPa (TV)	1.51		Korst
	20 – 120cm	4 kPa (FV) 8 kPa (FV)	1.68		
	120 - 220cm	10 kPa (FV)	1.51		
	Gemiddeld		1.62 (n = 16)	14 - 42	Ks3+Ks4+Lz1 (klei / leem)
D1	0 – 20 cm	8.8 kPa (TV)	1.62		Korst
	20 – 120cm	11 kPa (FV) 9 kPa (FV)	1.76		
	120 - 220cm	16 kPa (FV)	1.78		
	Gemiddeld		1.71 (n = 11)	37 - 44	Lz3 (leem)

Opmerking bij de tabel:

TV: torvane uitgevoerd in het laboratorium

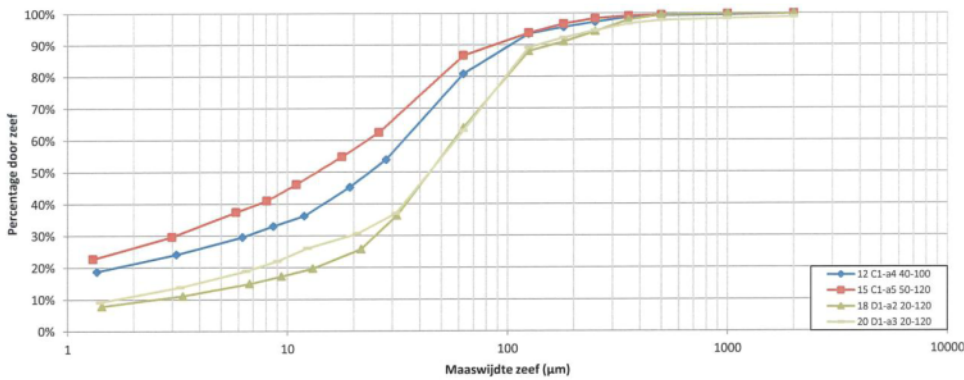
FV: fieldvane uitgevoerd in-situ

Voor een overzicht van de korrelverdelingen wordt verwezen naar Figuur 20 t/m Figuur 22. Op basis van de resultaten lijkt het alsof er in D1 grover materiaal is geperst en dat de ongedraineerde schuifsterkte wat meer is ontwikkeld.



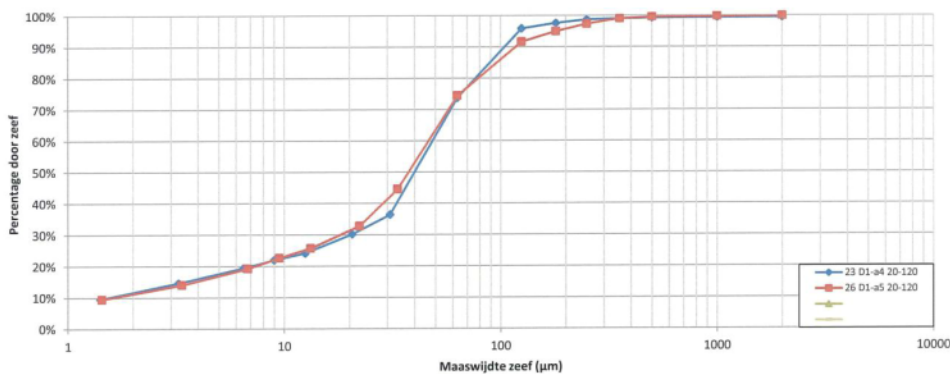
Nummer	Monster:		D10	D20	D30	D40	D50	D60	D70	D80	D90	% > 2mm	DMF	D60/D10
	Naam		µm	µm	µm	µm	µm	µm	µm	µm	µm		(totaal)	
1	02 C1-a1 22-220			2	5	9	17	29	38	52	81	0.0%		
2	04 C1-a2 25-60			4	11	23	34	48	71	109	162	0.3%		
3	05 C1-a2 60-100			4	11	22	37	56	83	122	182	0.4%		
4	08 C1-a3 20-170			3	14	28	42	62	85	116	161	0.0%		

Figuur 20: Zeving C1-a1 t/m a3



Nummer	Monster:		D10	D20	D30	D40	D50	D60	D70	D80	D90	% > 2mm	DMF	D60/D10
	Naam		µm	µm	µm	µm	µm	µm	µm	µm	µm		(totaal)	
1	12 C1-a4 40-100			2	6	14	24	34	45	61	103	0.1%		
2	15 C1-a5 50-120			3	7	14	23	34	49	87	159	0.1%		22.7
3	18 D1-a2 20-120		3	13	25	34	44	57	75	99	159	0.0%	57	22.7
4	20 D1-a3 20-120		2	7	19	34	44	58	75	98	138	1.2%	53	35.5

Figuur 21: Zeving C1-a4 + a5, D1-a2+a3



Nummer	Monster:		D10	D20	D30	D40	D50	D60	D70	D80	D90	% > 2mm	DMF	D60/D10
	Naam		µm	µm	µm	µm	µm	µm	µm	µm	µm		(totaal)	
1	23 D1-a4 20-120		1	7	20	33	40	48	59	76	104	0.5%	43	32.6
2	26 D1-a5 20-120		2	7	18	29	37	46	57	79	117	0.0%	44	29.6
3														
4														

Figuur 22: Zeving D1-a4+a5

NAUWKEURIGHEDEN, ONZEKERHEDEN EN AANBEVELINGEN VOOR MONITORING

In dit hoofdstuk worden een aantal onzekerheden kwalitatief en kwantitatief behandeld en wordt er, waar mogelijk, advies gegeven voor eventuele aanvullende monitoring om onzekerheden te verkleinen.

Afvlakkende effecten in hoogteontwikkeling

Er zijn meerdere afvlakkende effecten in de compartimenten te zien en te verwachten die effect hebben op de hoogteontwikkeling in het compartiment, maar die niet goed voorspeld kunnen worden. De effecten zijn niet goed van elkaar los te koppelen en daarmee individueel niet goed te kwantificeren:

- Wanneer een deel van een compartiment vanwege lage dichtheden snel consolideert zal het bovenste dunne materiaal van omliggende delen van het compartiment afstromen. Het effect van afstromen is kwantitatief afhankelijk van de tijd- en ruimteschaal.
- Korstvorming zal plaatsvinden op de hoger gelegen delen. Bij het vormen van een korst zal een deel van de toplaag toenemen in concentratie droge stof en daarmee in dikte afnemen. Deze afname is in de tenderfase ingeschat. In werkelijkheid blijkt dit echter moeilijk te bemeten en hangt dit af van de hoogte van het materiaal boven water. 'De korst' moet beter worden gedefinieerd omdat er in werkelijkheid geen harde scheiding is tussen vast en vloeibaar.
- Rietgroei kan ook een effect hebben op de hoogteontwikkeling van het hoger gelegen materiaal. Door de toename aan gewicht en het onttrekken van vocht aan de bovenzijde van de laag is te beargumenteren dat de hoogte zal reduceren. Echter, door de aanwezigheid van riet zou materiaal ook kunnen sedimenteren ter plaatse van het riet. Uitsluitel hierover en een kwantificatie is nog niet te geven. KIMA (Kennis en Innovatieprogramma Marker Wadden) doet hier op dit moment nog onderzoek naar. Bovendien was dit ook onderwerp van wetenschappelijk labonderzoek binnen het programma Smart Ecosystems (<https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:ae11c3e7-86f2-4c6a-8d53-ee8781d56a72/datastream/OBJ/download>).
- Wanneer er hoogteverschillen ontstaan in een compartiment zal door het drukverschil materiaal weggeperst kunnen worden. Hoe lager de dichtheid, hoe minder drukverschil er tussen aangrenzende delen van het compartiment kan blijven bestaan.
- Zetting van de ondergrond zal meer optreden op locaties waar meer materiaal is aangebracht en/of materiaal met een hogere dichtheid. De hoge delen zijn een voorbeeld waarin beide voorkomt. Omdat deze delen zich bij een spuitmond bevinden wordt hier meer materiaal afgezet en het materiaal is zandiger en heeft daardoor een hogere dichtheid.
- Uitvlakking door windgolfjes en stroming is mogelijk. Materiaal dat gemobiliseerd wordt op de bodem of in de waterkolom zal een neiging hebben zich richting de lageregelegen delen te bewegen.

Kleiballen

De mate waarin de holocene klei als kleiballen intact blijft in de persleiding en in het stort terecht komt is waarschijnlijk van invloed op de hoogte ontwikkeling. Een volume intact gebleven kleibal bevat meer tonnen droge stof dan eenzelfde volume gedispergeerde en geconsolideerde klei. Indien het gestorte materiaal naar verhouding veel kleiballen bevat moet er een groter winput-volume gebaggerd worden om op de gewenste hoogte uit te komen. Kleiballen zullen voornamelijk voorkomen vlakbij de spuitmonden. Hierdoor neemt de heterogeniteit in het stort toe, waardoor voorspellingen over het gedrag moeilijker worden.

Meetonnauwkeurigheden

De sensor van de Mudbug waarmee de dichtheid van het stort wordt gemeten is een vibrerende verticale pin van ongeveer 10 cm. Dit houdt in dat de dichtheid een gemiddelde is over de lengte van die pin. De Mudbug meet de druk ten behoeve van de dieptebeplating. Wanneer de Mudbug door materiaal met een hogere dichtheid heen gaat, dan neemt de druk meer toe voor elke meter dat de Mudbug zakt. Na een meetcampagne moeten de dieptebeplating van de Mudbug in de postprocessing gecorrigeerd worden voor dit druk-effect. Onnauwkeurigheden in de dichtheidsbeplating werken hiermee door in de dieptebeplating van de dichtheden.

Zodra het stort niet meer met de Mudbug gemeten kan worden moet worden overgeschakeld op traditioneel grondonderzoek (boringen). De begaanbaarheid speelt dan een steeds grote rol omdat deze direct invloed heeft op de verdeling van de ingewonnen gegevens. De ingewonnen gegevens zijn een bovengrens (qua dichtheid) omdat ze representatief zijn voor locaties waar de begaanbaarheid 'goed' is. Bovendien moet ook niet worden onderschat de begaanbaarheid invloed heeft op de wijze van bemonstering. Goede ongeroerde monsters nemen is lastig als je geen stabiele werkvloer hebt en al helemaal als je niet over het juist materiaal beschikt waarmee een maximale recovery wordt behaald. Daarbij komt dat de manier van conservering en transport naar het laboratorium ook weer extra onzekerheden introduceren die van invloed zijn op de proefresultaten.

Onnauwkeurigheden in de hoogteontwikkelingen met een Drone zijn inherent aan de nauwkeurigheden van de techniek van fotogrammetrie. Dit ligt in de orde grootte van 5 tot 10 cm in xy (platte vlak plaatsbepaling) en 5 cm in z (verticale) richting. Dit is het geval voor een duidelijk terrein, bijvoorbeeld droog holocene zonder vegetatie of de zanddammen / stranden. Door vegetatie neemt de nauwkeurigheid af. Hoe dichter de vegetatie hoe onnauwkeuriger de metingen worden, zoals ook eerder in de memo uitgelegd.

Verbinding tussen de compartimenten en migratie van materiaal

De compartimenten zijn met elkaar verbonden met landleidingen die door de dammen heen lopen. Dit betekent dat wanneer een compartiment wordt opgehoogd / gevuld er ook materiaal tussen de compartimenten kan migreren. Het is met name het dunne materiaal wat migreert via de leidingen. Wanneer een compartiment werd gevuld was duidelijk zichtbaar dat de direct aangrenzende compartimenten een deel van het dunne materiaal overnamen, met name als het perspunt in de buurt was van de verbindende leidingen. Het materiaal migreerde niet verder dan 1 compartiment. Hoeveel materiaal exact van het ene naar het andere compartiment stroomt kan niet worden bepaald, waardoor de exacte vulvolumes per individueel compartiment minder nauwkeurig te bepalen zijn naarmate de compartimenten verder gevuld worden.

Gasbellen in het veld

Tijdens de metingen werd duidelijk dat er op een aantal plaatsen gas / lucht aanwezig is in de compartimenten. Het gas was met name ongunstig omdat het de dichtheidmetingen verstoort en soms zelfs onbruikbaar maakt vanaf de hoogte waarop gasbellen gevonden worden. Het is niet vastgesteld of het volume dat de gasbellen inneemt significant is in termen van vulvolumes.

Aanbevelingen monitoring

Om de processen rondom de hoogteontwikkeling beter te begrijpen zouden een aantal parameters beter in kaart moeten worden gebracht:

- Hoogte van het stort (ook onder water en tussen de vegetatie)
- Samenstelling van het stort (waar ligt klei, veen, zand etc. en hoe dik is het)
- Dichtheidsprofielen i.c.m. met bovenstaande.

Dit lijkt simpeler dan het in werkelijkheid is voor een werk in uitvoering van deze omvang maar als de mogelijkheden en middelen (in bijvoorbeeld tijd en geld) ongelimiteerd zijn zou het volgende gedaan kunnen worden:

- Van te voren plekken begaanbaar maken voor later (bv. platformen of steigers met stalen buispalen).
- Equipment gebruiken dat mobiel is, maar waar tegelijkertijd ook ruimte is om boringen te verwerken. Een hovercraft is te klein om veel spullen in mee te nemen, een moeraskraan verstoort het proces misschien teveel.
- Meer investeren in remote- en automatische monitoring (zakbaken, waterspanningsmeters, zettingsmeetslangen etc.). Omdat de compartimenten zo groot zijn en de begaanbaarheid beperkt wil je zo min mogelijk afhankelijk zijn van meetcampagnes op site.
- Klein gedeelte van het stort inrichten als 'proeftuin'. In een gecontroleerde omgeving van beperkte omvang (niet te groot dat je niets kan meten, niet te klein dat de randen invloed hebben op de

meetresultaten) is het makkelijker om verschillende processen individueel te monitoren. In een gecontroleerde omgeving kan het stort ook voor langere tijd met rust gelaten worden waardoor verschillende processen niet door elkaar gaan lopen wat de interpretatie van de gegevens als snel te complex maakt. Dit is eigenlijk wat is geprobeerd in de dun slib compartimenten.

- Beter in kaart brengen welk materiaal uit de winput waar in het stort wordt aangebracht. Dit vereist een hele goede grondbalans (boekhouding) en kennis van de eigenschappen van elke laag uit de winput. De huidige manier van aanbrengen introduceert onzekerheden omdat er beperkte informatie is van wat en waar wordt geperst. Hoe het zich dan door het stort verspreidt maakt het een extreem lastige puzzel.

Een aantal aspecten zijn nu al in ontwikkeling op andere projecten en kunnen ingezet worden om de onderliggende processen beter te begrijpen. Maar om deze geschikt te maken voor een project als de Markerwadden moeten deze project specifiek worden gemaakt.

Voor metingen van hoogteontwikkeling met een drone kan bijvoorbeeld gebruik gemaakt worden van laser altimetrie in plaats van fotogrammetrie. Echter lost dit het probleem van vegetatie niet op. Er zal nog steeds filter technieken nodig zijn om voor vegetatie te corrigeren, wat een bewerkelijke methode blijft. Daarnaast zijn de resultaten nog steeds beperkt als er dichte vegetatie staat (bijvoorbeeld dichte rietvegetatie binnen de enclosures werkt niet). Laser altimetrie kan niet door de vegetatie heen meten, dus er zal altijd holoceen zichtbaar moeten zijn voor deze techniek.

Een andere techniek in ontwikkeling is remote sensing. Echter is dat minder geschikt voor hoogtemetingen en is ook minder nauwkeurig dan fotogrammetrie / laser altimetrie. Deze techniek is meer geschikt voor classificering van vegetatietypes en bepalen van kwaliteit, vegetatiegroei, etc.

Zakbaken en waterspanningsmeters kunnen al remote en automatisch worden uitgelezen. De instrumenten moeten alleen wel bestand worden gemaakt tegen de hoge stroomsnelheden van slib tijdens het vullen. De kans op verzakking en scheefstand moet niet worden onderschat. Bovendien blijven deze instrumenten permanent staan en gaan ze niet perse op in de omgeving.

De ontwikkeling van dichtheid zou je idealiter ook willen doorzetten als het materiaal al langere tijd boven water ligt. Op dat moment heb je echter niets meer aan een Mudbug en is heel ander in-situ monitoringsequipement nodig (bijvoorbeeld: 'Nuclear density cone penetrometer') wat ook op locatie moet kunnen komen en bestand moet zijn tegen de heterogeniteit van het stort. De vraag is of dat passend is binnen de doelstellingen en schaal van het project.

Deze laatste vraag is ook relevant voor de omvang van aanvullend onderzoek en/of monitoring omdat je voldoende dekingsgraad nodig hebt om wat te kunnen zeggen over het gedrag over een groot oppervlakte. Exacte voorbeelden die vergelijkbaar zijn met de Markerwadden zijn er niet omdat de benodigde dekingsgraad afhangt van de functie. Om enkele voorbeelden te geven:

- Bij het winnen van klei op een winlocatie moet er 1 boring per 1.000 m² gemaakt en geanalyseerd per 50 cm (RAW22.07.15/22.07.17) om een volledig beeld te krijgen van de geschiktheid van het materiaal.
- Ook de EC7 geeft richting hoeveel terreinproeven uitgevoerd moeten worden voor het een ontwerp van een constructie om op een betrouwbare wijze inzicht te krijgen in de opbouw en eigenschappen van de gehele ondergrond. Afhankelijk van de verwachte variatie wordt een gemiddelde onderlinge afstand van 25m, 20m of 15m gegeven (zie NEN 997-1 par. 3.2.3).

Kanttekening is natuurlijk dat de RAW en Eurocode van toepassing zijn om een bepaalde functie goed te kunnen vervullen of om schade te voorkomen aan constructies met menselijk letsel tot gevolg of grote financiële consequenties. Deze richtlijnen en normen zijn niet van toepassing op een nat stort maar geven wel inzicht wat er bij komt kijken (hoeveel monitoringslocaties nodig zijn) om een bepaalde onzekerheid te beperken.

Alles overziende kan de algemene conclusie worden getrokken dat de doelstellingen van het project niet op een lijn liggen met als je wetenschappelijk zou willen begrijpen hoe het holoceen zich in het stort gedraagt. De vraag is bijvoorbeeld of de hoeveelheid monitoring en locaties niet het uiteindelijke eindbeeld van het project beïnvloed. Daarnaast is natuurlijke variatie in het project juist een meerwaarde, maar bemoeilijkt sterk de mate van onderzoek dat mogelijk is.

Het valt daarom aan te bevelen om de bovenstaande gedachten te toetsen met ervaringen en uitkomsten van het KIMA onderzoek in de dun slib compartimenten. De ervaring met bemonstering en analyse die is opgedaan in de dun slib compartimenten kan aanvullende waarde hebben, omdat dit op een kleinere ruimtelijke schaal is uitgevoerd. Belangrijkste vraag die beide teams dan zouden kunnen bespreken is in hoeverre de lessen opgeschaald kunnen worden bij grotere compartimenten.

LESSONS LEARNED / UITVOERINGSASPECTEN

CONCLUSIES EN DISCUSSIE T.A.V. VERIFICATIE HOOGTE-EISEN

De Marker Wadden is qua project uniek in Nederland en een van de grootse in zijn soort in West-Europa. De aanleg was een complex proces waarbij een goede balans moest worden gevonden tussen soms conflicterende contractuele eisen en wensen van de opdrachtgever en de uitdagende werkomstandigheden. Door middel van adaptief management is de ontwikkeling van de eilanden, de fysische processen, vegetatie, en natuurontwikkeling gemonitord om het bouwproces te kunnen bijsturen en snel tot een zichtbaar resultaat te komen, zie Figuur 2. De goede samenwerking met de opdrachtgever was hierin essentieel o.a. vormgegeven door meerdere inhoudelijke kennissessies.

Bij de oplevering op 31 december 2020 tot 15 maanden daarna moet aan een aantal hoogte-eisen worden voldaan. Voor een overzicht van de eisen wordt verwezen naar Tabel 2.

De totale hoogteontwikkeling in de compartimenten kan niet worden onderbouwd d.m.v. modelberekeningen door de complexiteit van de onderliggende processen (interactie tussen de fysische processen, vegetatie en natuurontwikkeling) en een aantal praktische beperkingen die terug te herleiden zijn naar de slechte begaanbaarheid en sterke heterogeniteit van het stort. De hoogteontwikkeling is daarom gebaseerd op basis van veldmetingen met een drone.

Opgemerkt wordt dat ook deze metingen slechts beperkt bruikbaar zijn voor een nauwkeurige prognose en koppeling met de eisen. Door de beperkte dekking van de data is een exacte analyse van de oppervlaktes per hoogteklasses niet mogelijk. Door vegetatie en water vervallen veel meetpunten waardoor nooit een vlakdekkende kaart kan worden geproduceerd waarmee de eisen kunnen worden aangetoond.

Op basis van de beperkte veldmetingen en expert judgement wordt verwacht dat de modules nog minstens 10 (A,B en D1) à 25 (C, D2 en D3) cm zullen zakken tot 15 maanden na oplevering, zie Tabel 3.

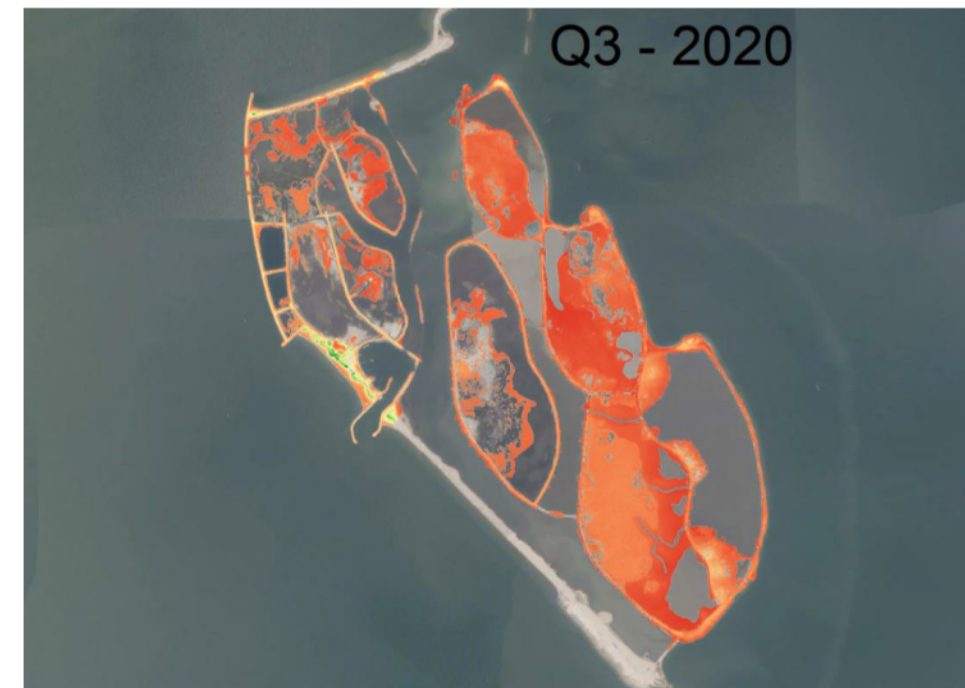
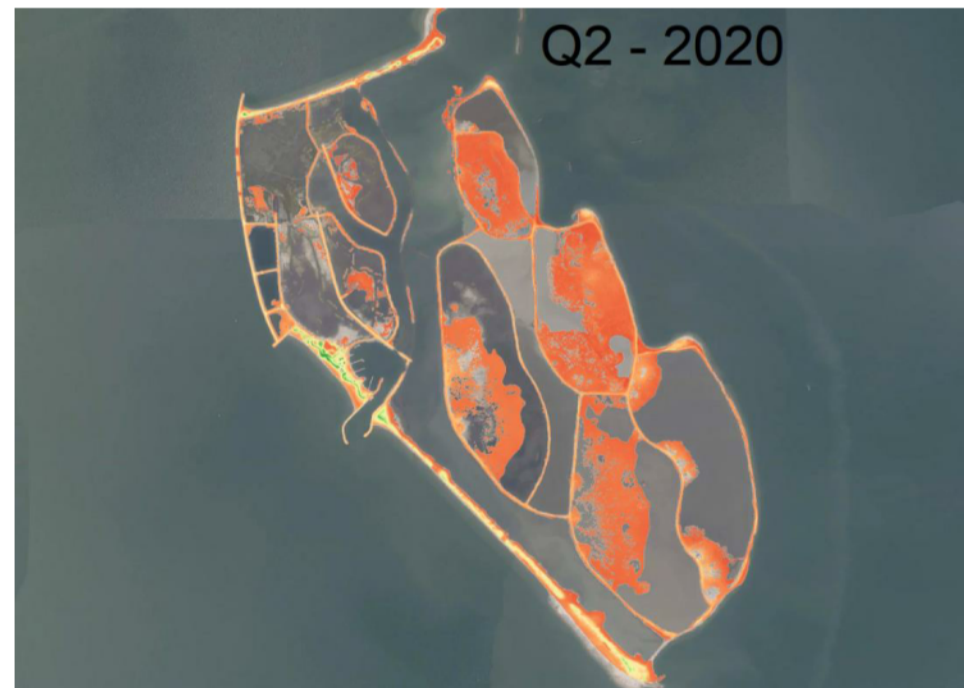
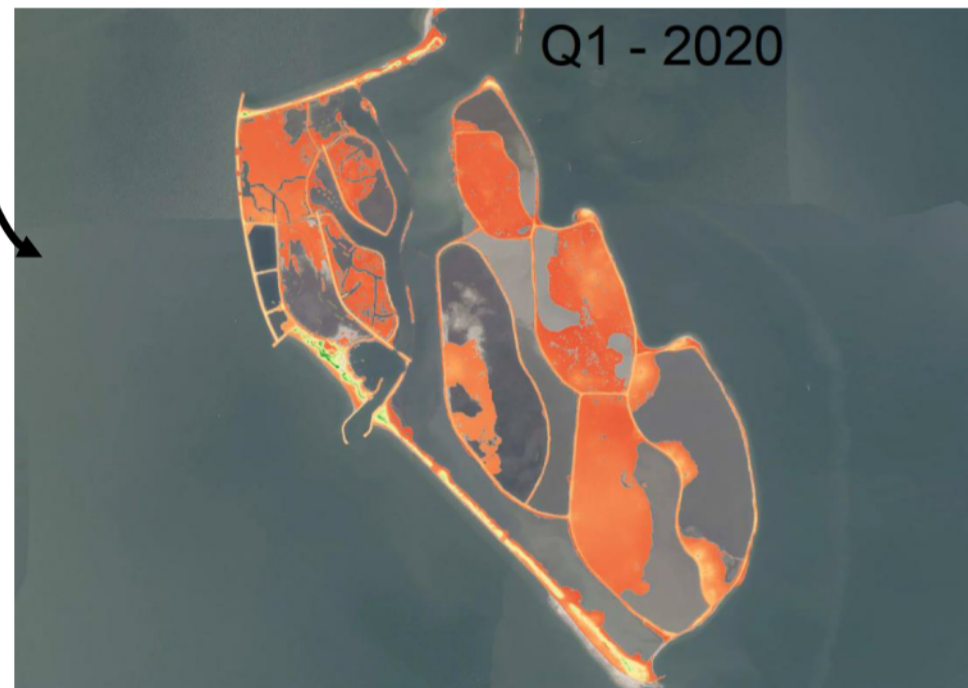
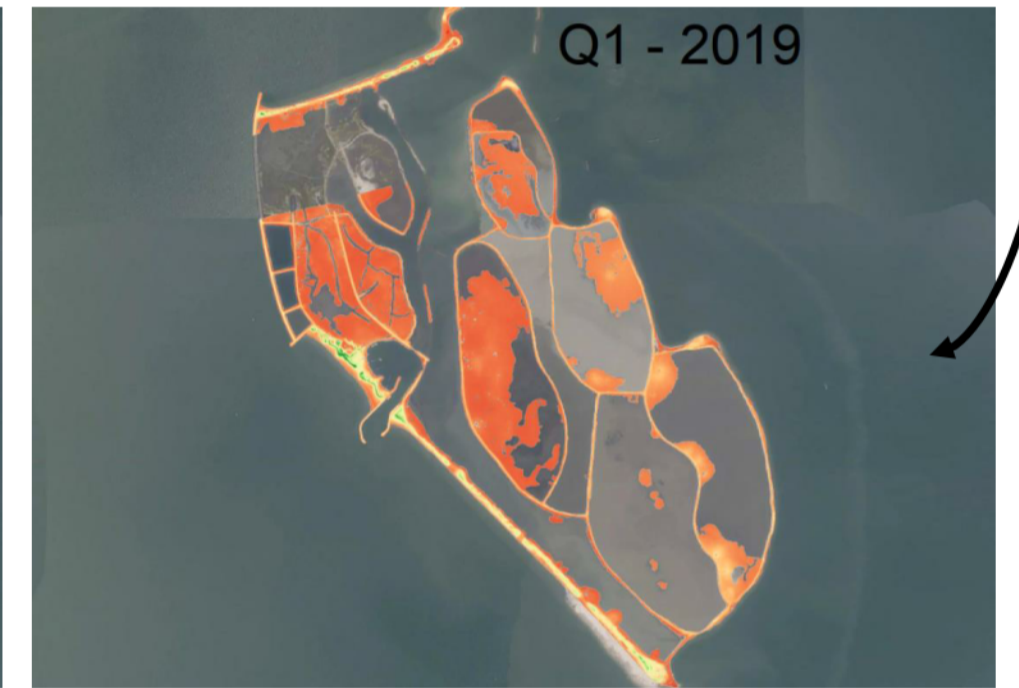
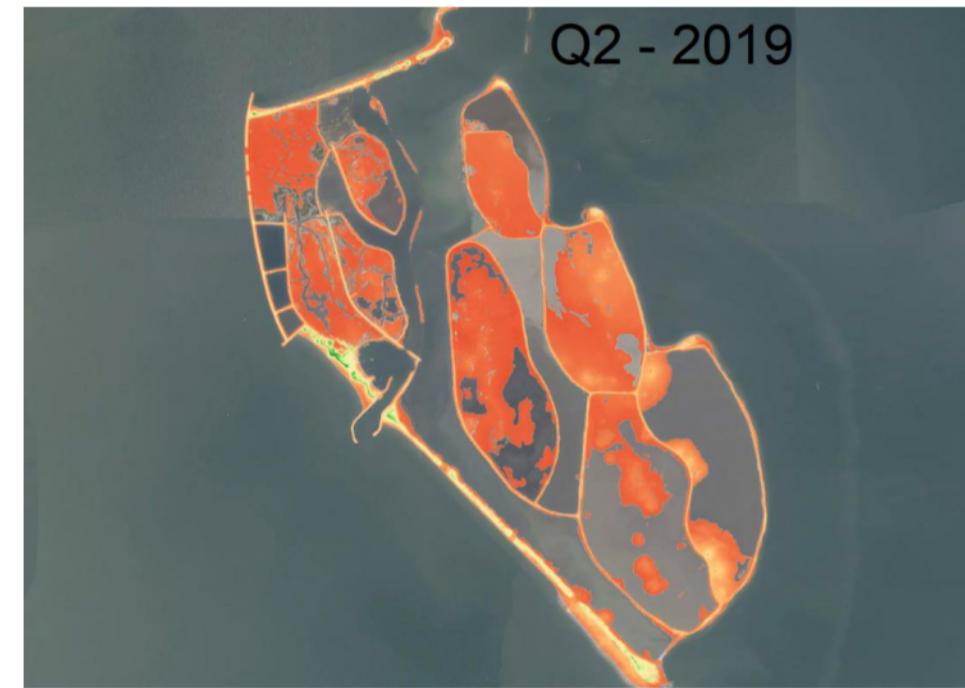
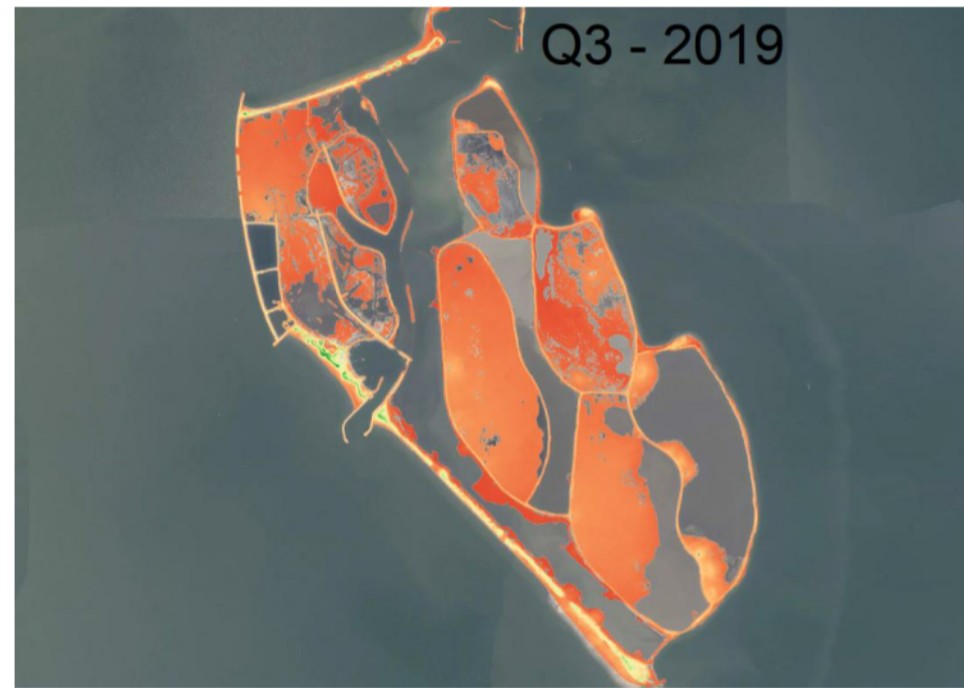
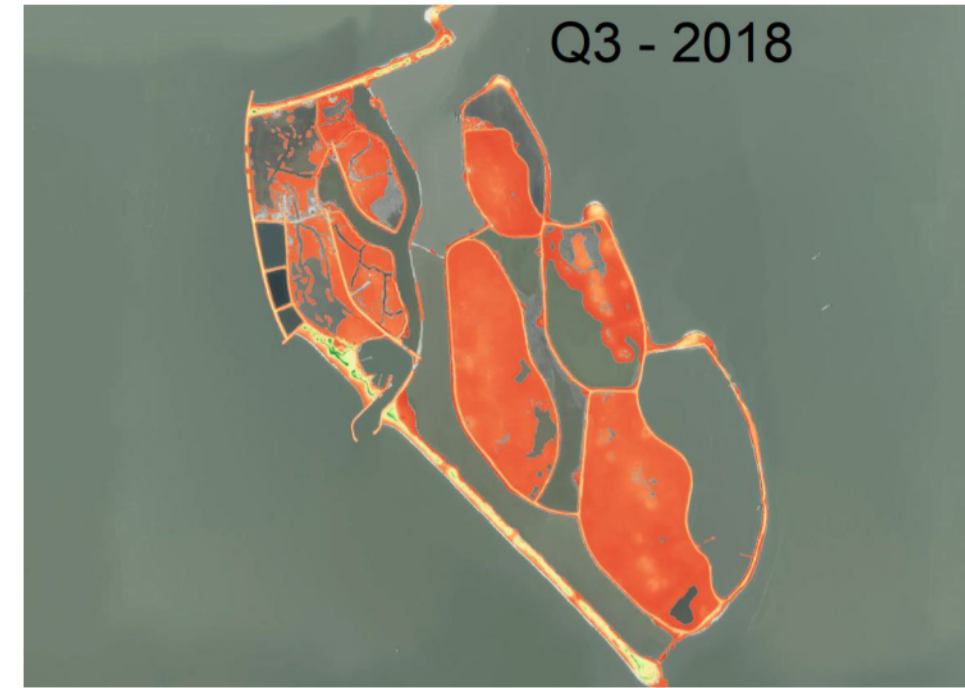
Verwacht wordt dat deze maaiveldddaling zich zal concentreren rondom de gebieden die nu (te) hoog liggen omdat daar door ontmenging meer zand in de ondergrond zit. De lagere delen van de modules zullen naar verwachting langzamer zakken omdat deze ook deels onder water staan. Dit betekent concreet dat het oppervlak Plas dras "hoog" (max. NAP+0m, min. NAP-0.2m) na oplevering nog groter zal worden en dat Plas dras "laag" (max. NAP-0.2m, min. NAP-0.4m) verhoudingsgewijs meer blijft zoals het nu is.

In relatie tot de gestelde eisen liggen de modules nu waarschijnlijk iets te hoog maar de exacte hoogteverdeling kan niet met metingen worden onderbouwd. Verwacht wordt dat de totale verdeling van het benodigde oppervlak in de toekomst beter in lijn komt te liggen met de gestelde eisen door een doorgaande maaiveldddaling die op den duur zal afvlakken. Hier is in de uitvoering al rekening mee gehouden door de compartimenten op tijd bij te vullen zodat het maaiveld bij oplevering niet te laag komt te liggen.

Bijlagen

	<u>Nr.</u>
Survey (Q3 2018 t/m Q3 2020)	1
Hoogteontwikkeling per eiland	2
Resultaten dichtheidsmetingen (mudbug)	3

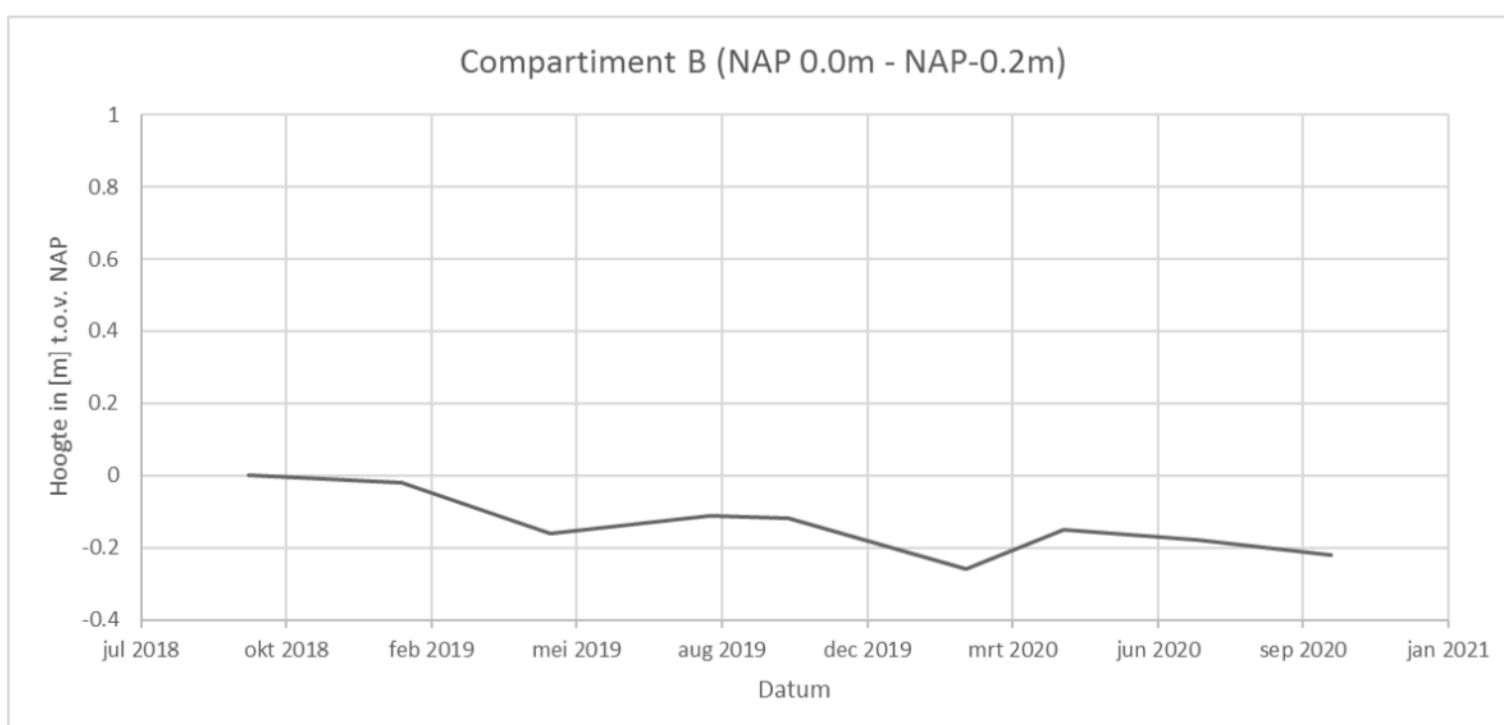
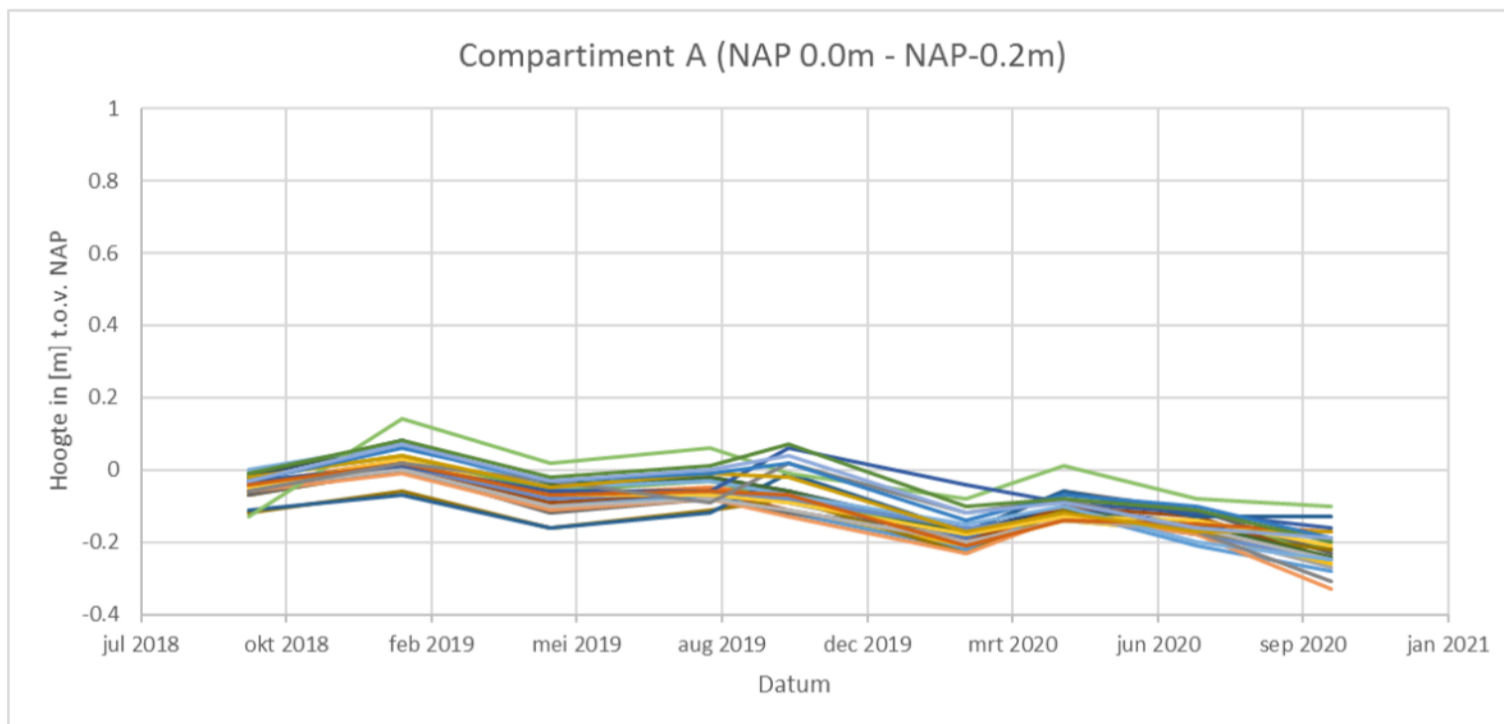
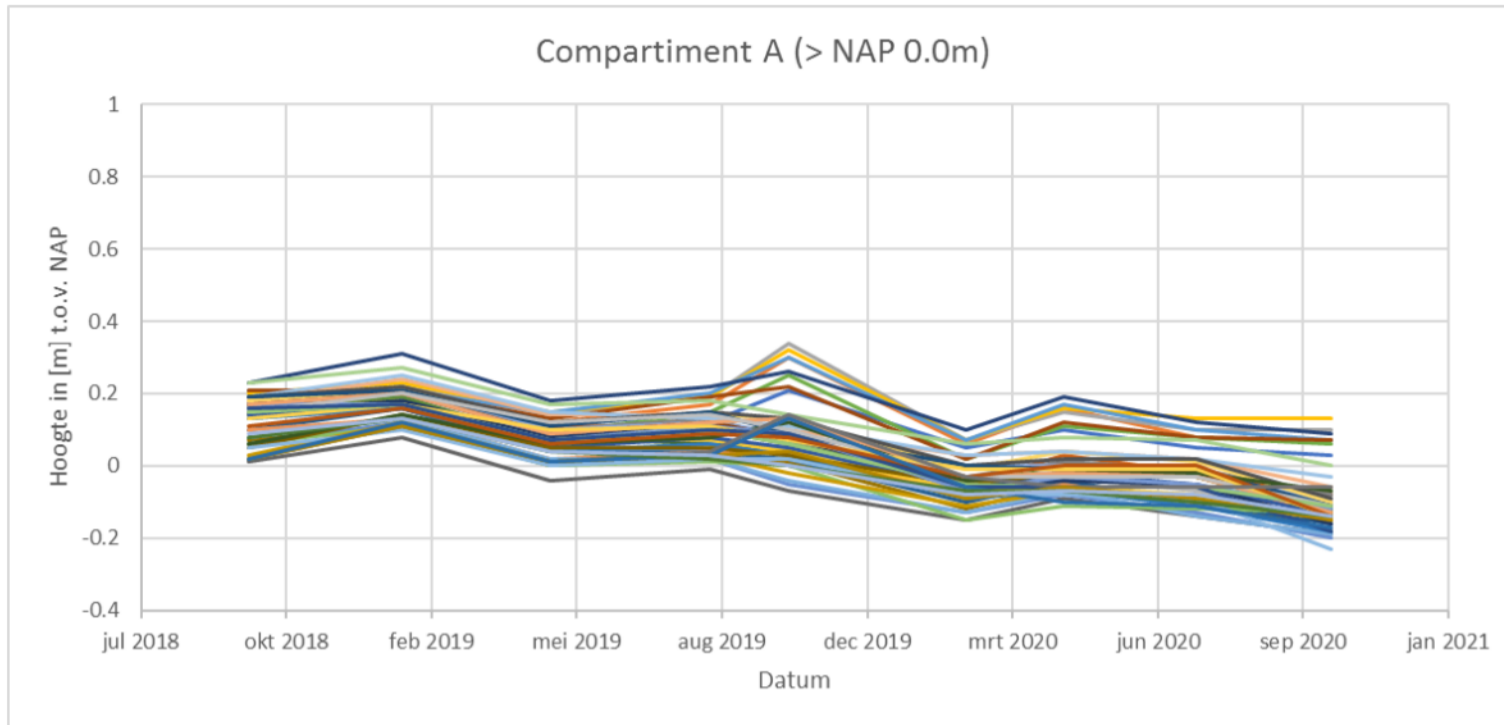
Bijlage 1: **Survey Q3 2018 t/m Q3 2020**



Bijlage 2: **Hoogteontwikkeling per eiland**

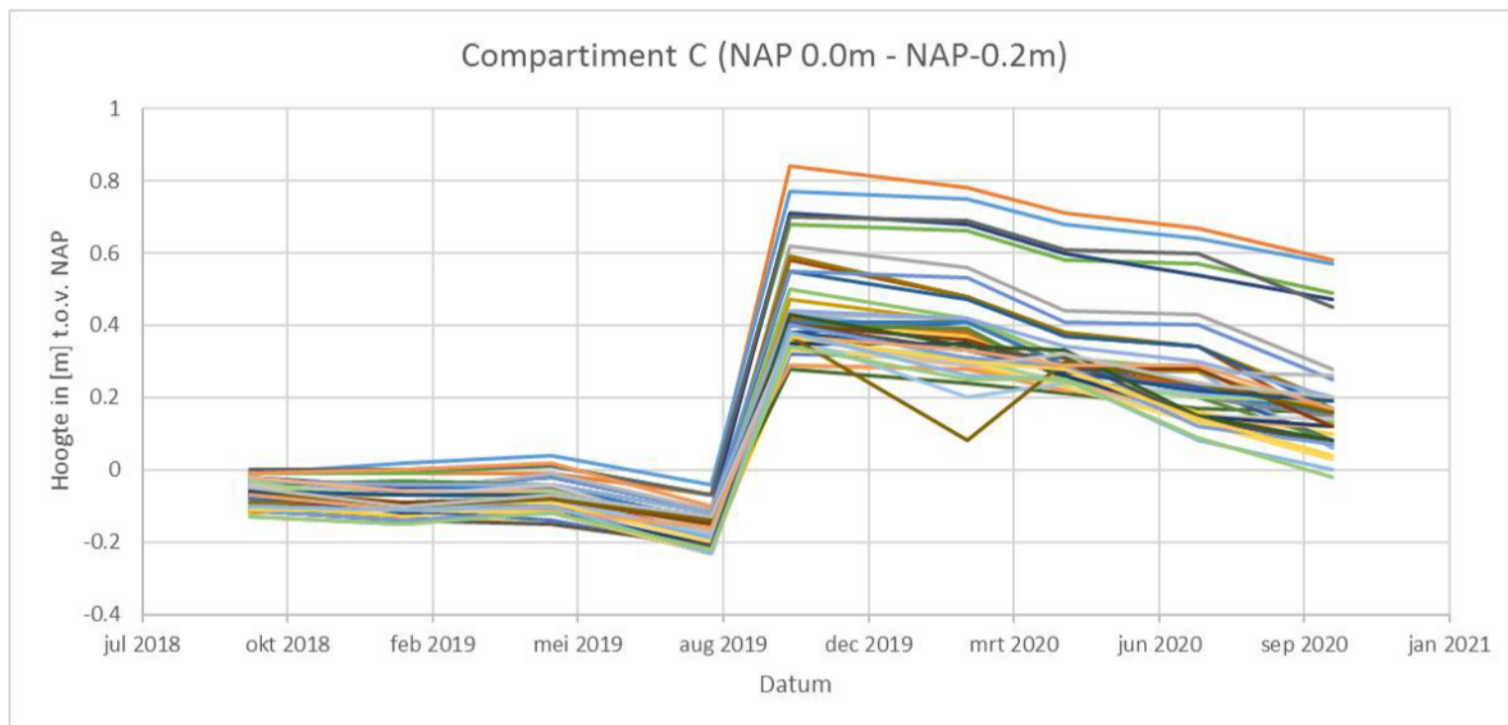
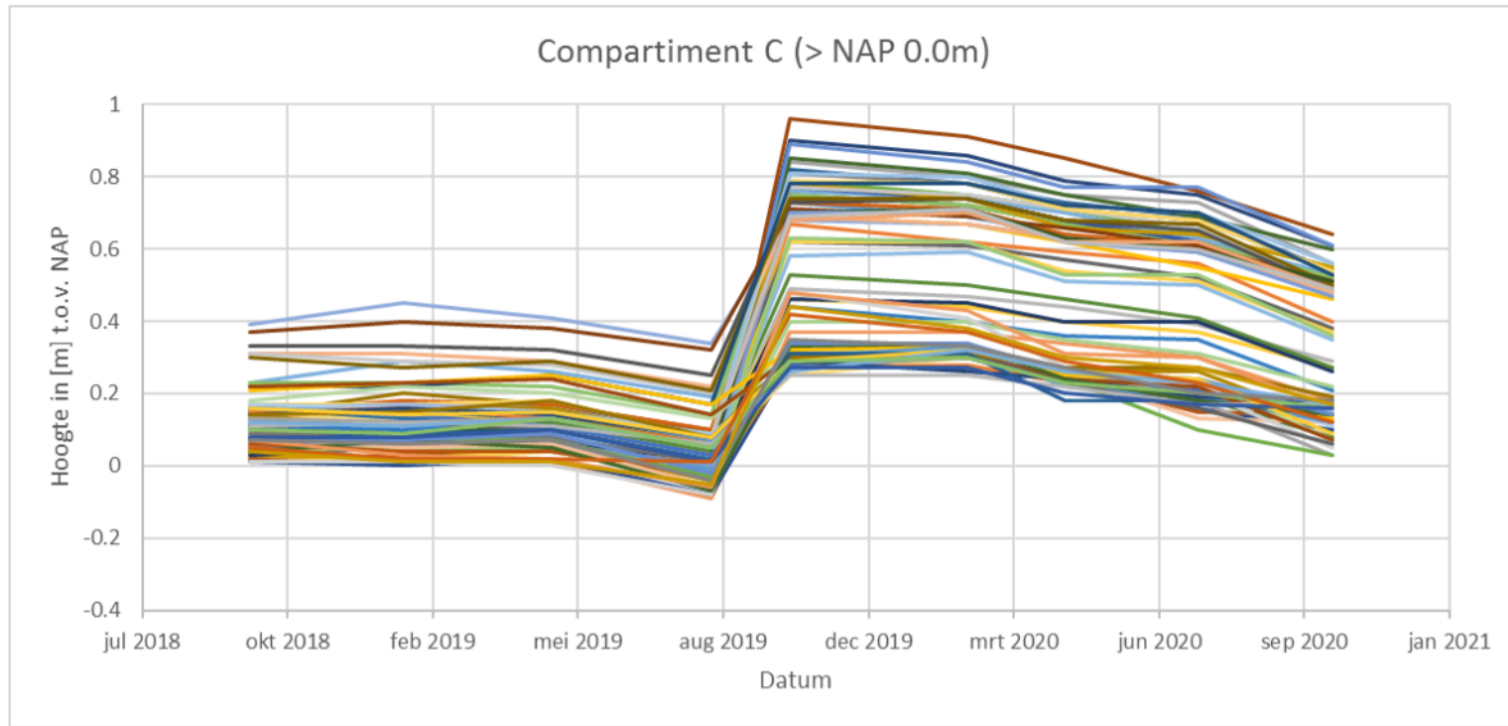
Eiland	Aantal punten	Max. hoogte (Q3 2018 – Q3 2020) NAP+0.34m	Min. hoogte (Q3 2018 – Q3 2020) NAP-0.33m	Dekkingsgraad foto (Q3 2020)
A	74			23.1 ha gemeten 77.0 ha totaal 30% dekking
B	1	NAP+0.0m	NAP-0.26m	8.4 ha gemeten 17.2 ha totaal 49% dekking





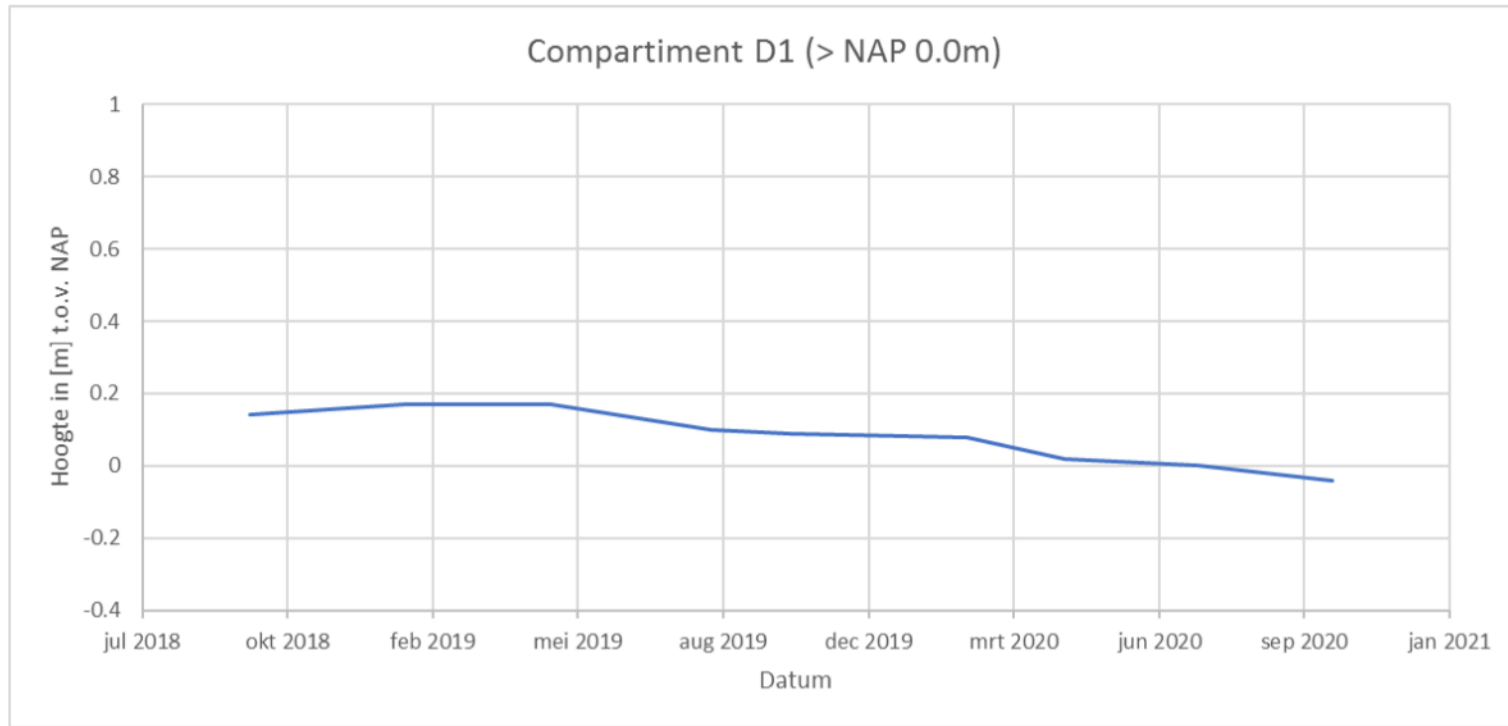
Eiland	Aantal punten	Max. hoogte (Q3 2018 – Q2 2020) NAP+0.96m	Min. hoogte (Q3 2018 – Q2 2020) NAP-0.23m	Dekkingsgraad foto (Q2 2020)
C	118			18.9 ha gemeten 73.4 ha totaal 26% dekking





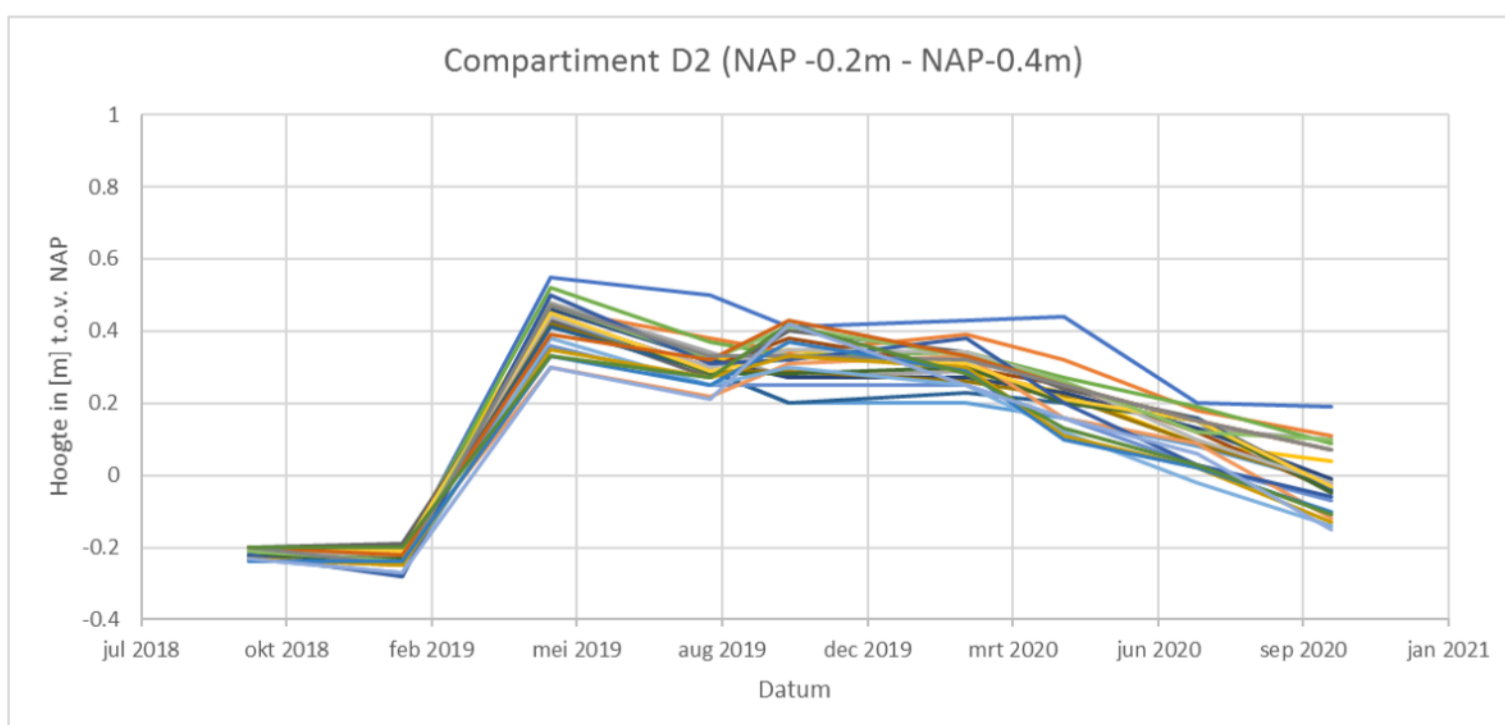
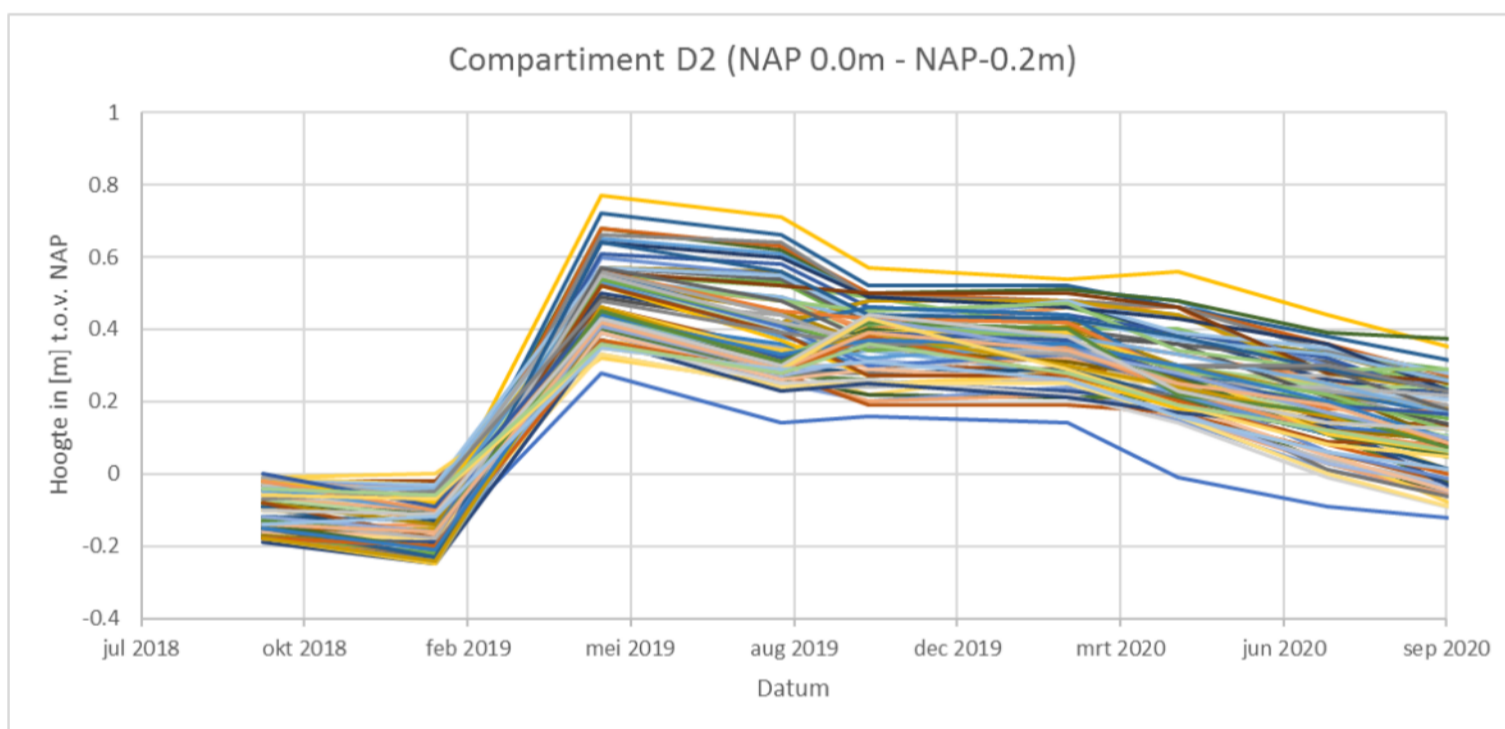
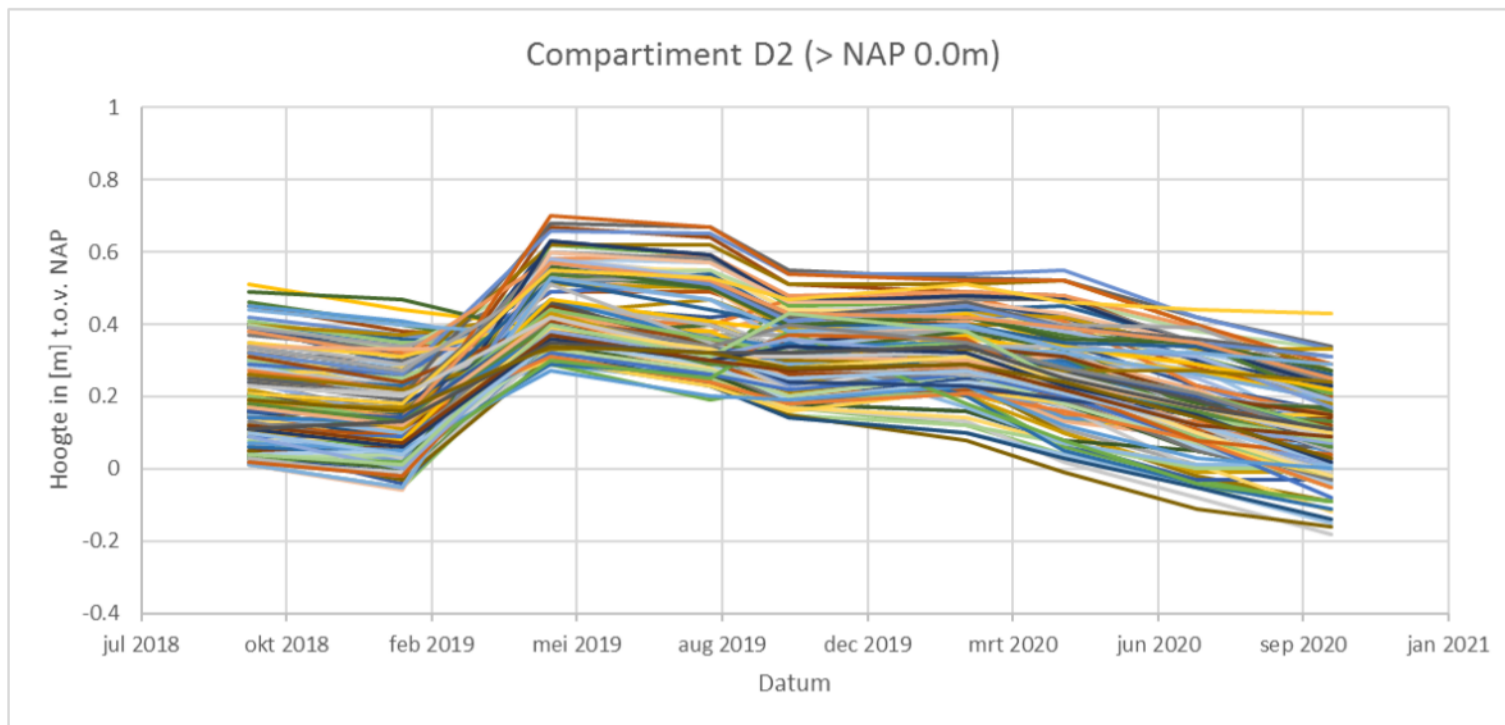
Eiland	Aantal punten	Max. hoogte (Q3 2018 – Q2 2020) NAP+0.17m	Min. hoogte (Q3 2018 – Q2 2020) NAP-0.04m	Dekkingsgraad foto (Q2 2020)
D1	1			20.9 ha gemeten 23.0 ha totaal 91 % dekking



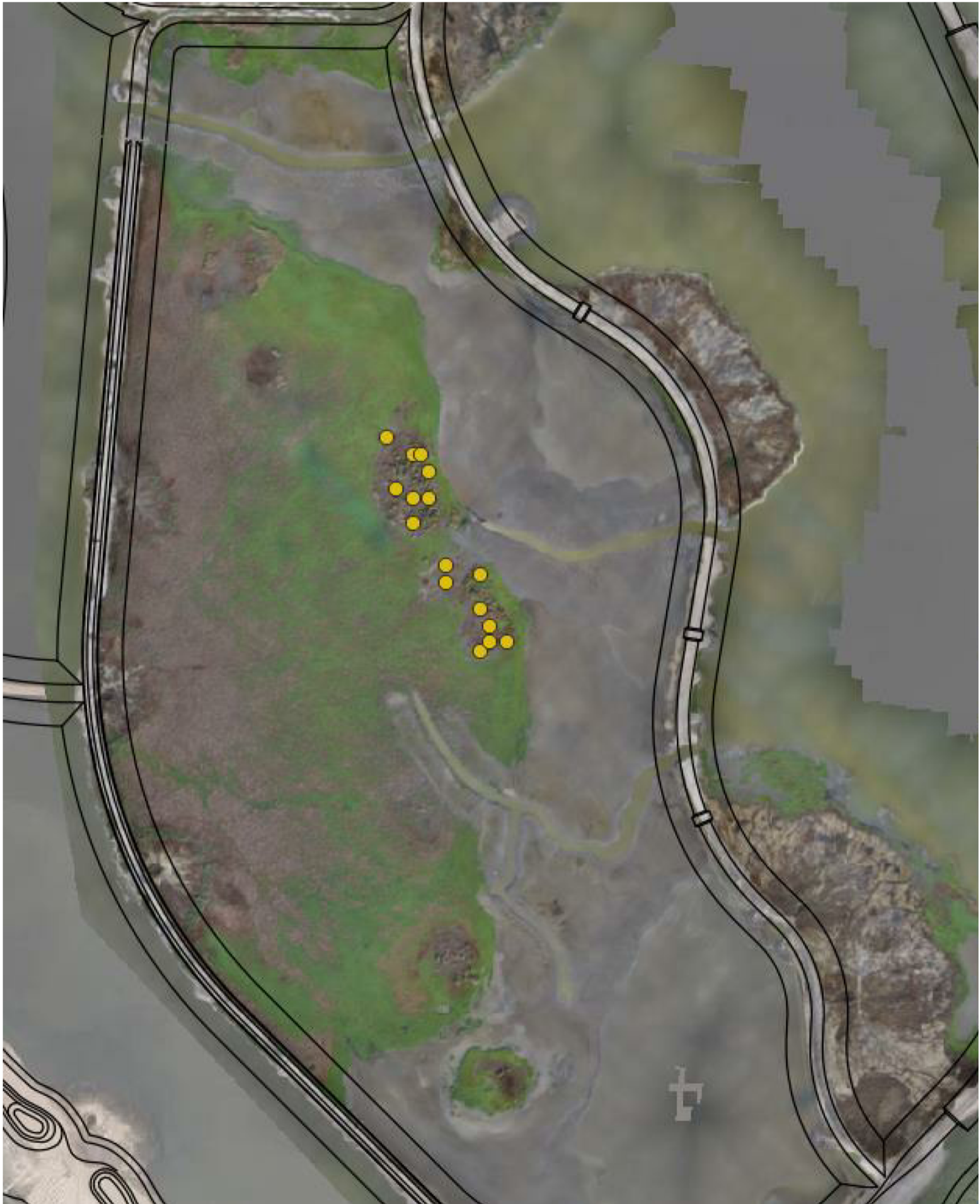


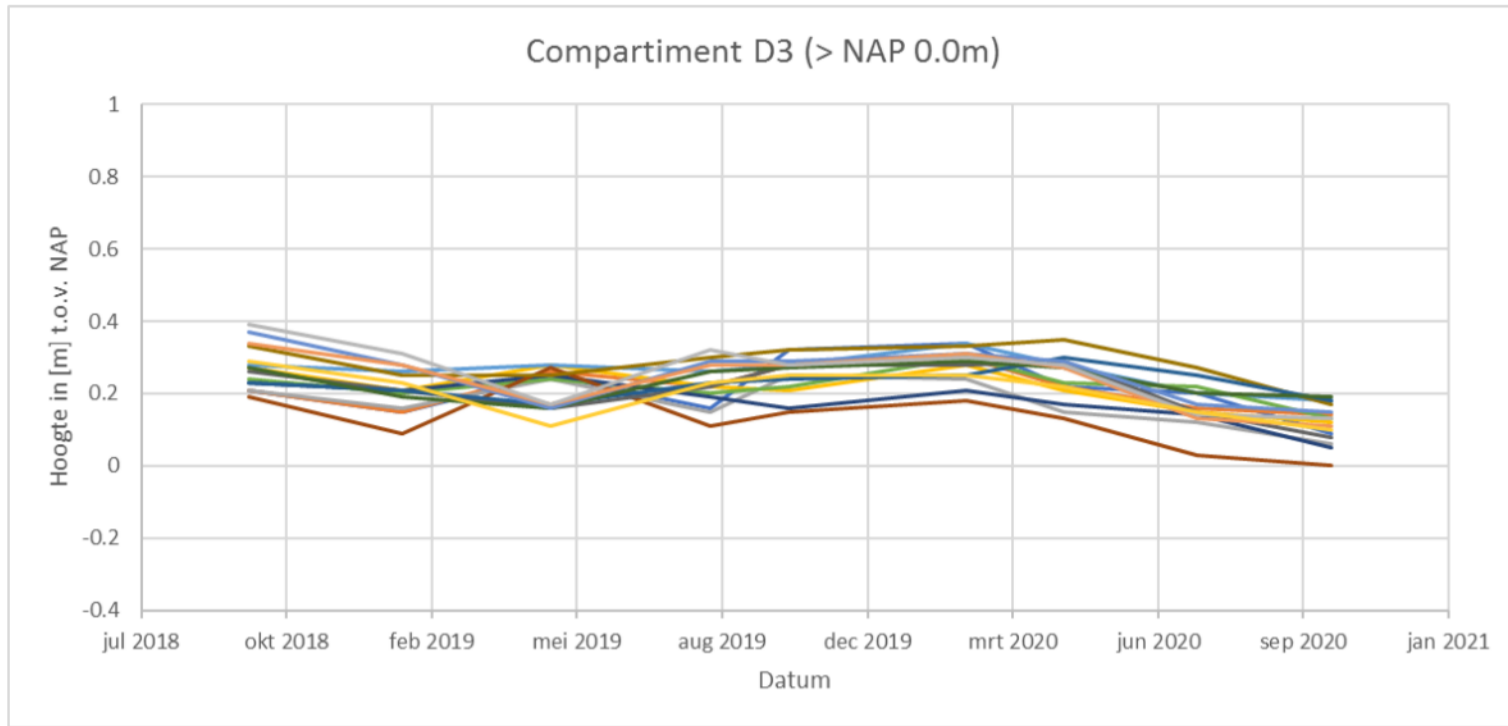
Eiland	Aantal punten	Max. hoogte (Q3 2018 – Q2 2020) NAP+0.77m	Min. hoogte (Q3 2018 – Q2 2020) NAP-0.28m	Dekkingsgraad foto (Q2 2020)
D2	251			43.3 ha gemeten 57.0 ha totaal 76 % dekking





Eiland	Aantal punten	Max. hoogte (Q3 2018 – Q2 2020) NAP+0.39m	Min. hoogte (Q3 2018 – Q2 2020) NAP0.0m	Dekkingsgraad foto (Q2 2020)
D3	16			70.7 ha gemeten 86.0 ha totaal 82 % dekking

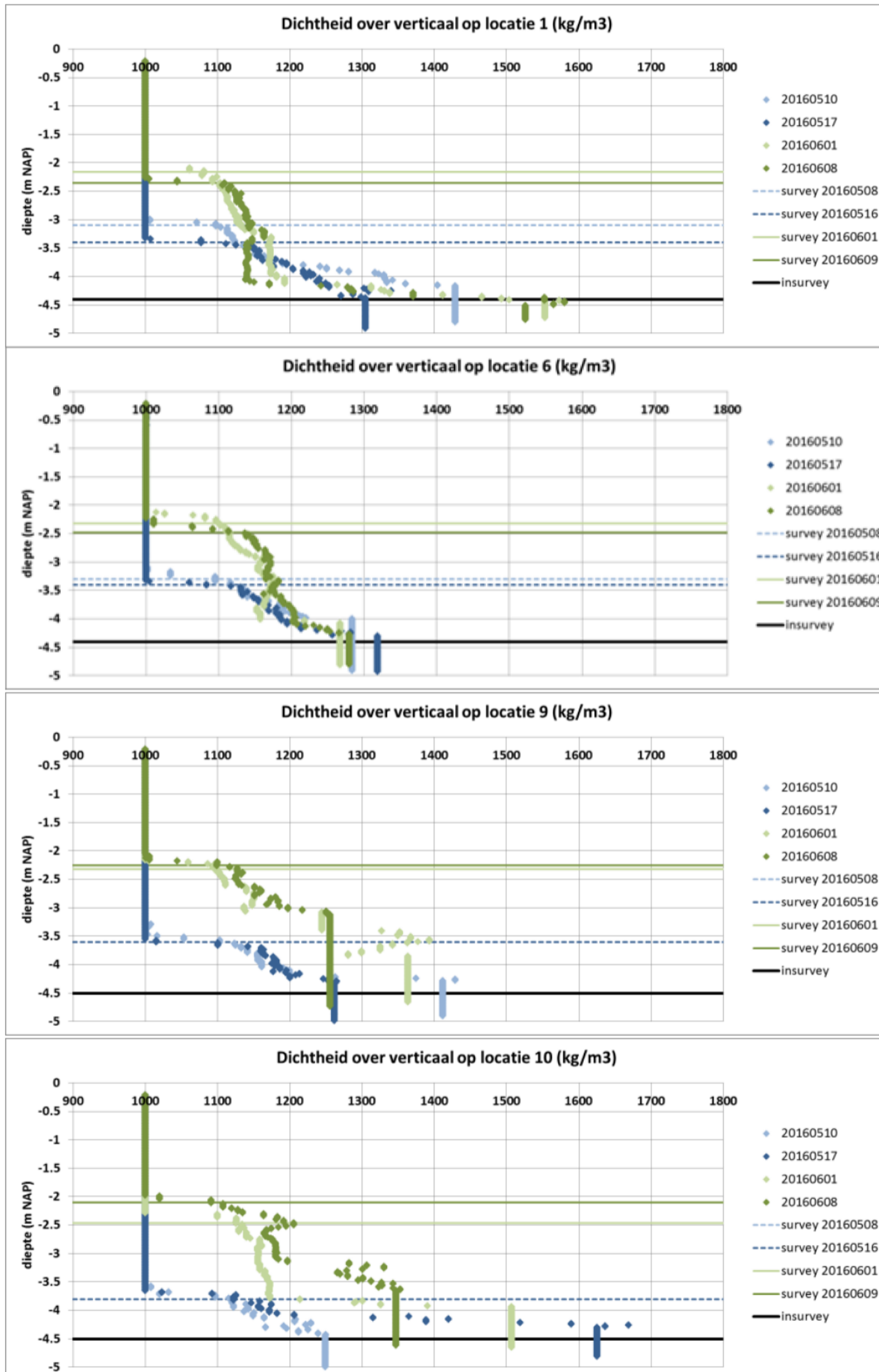




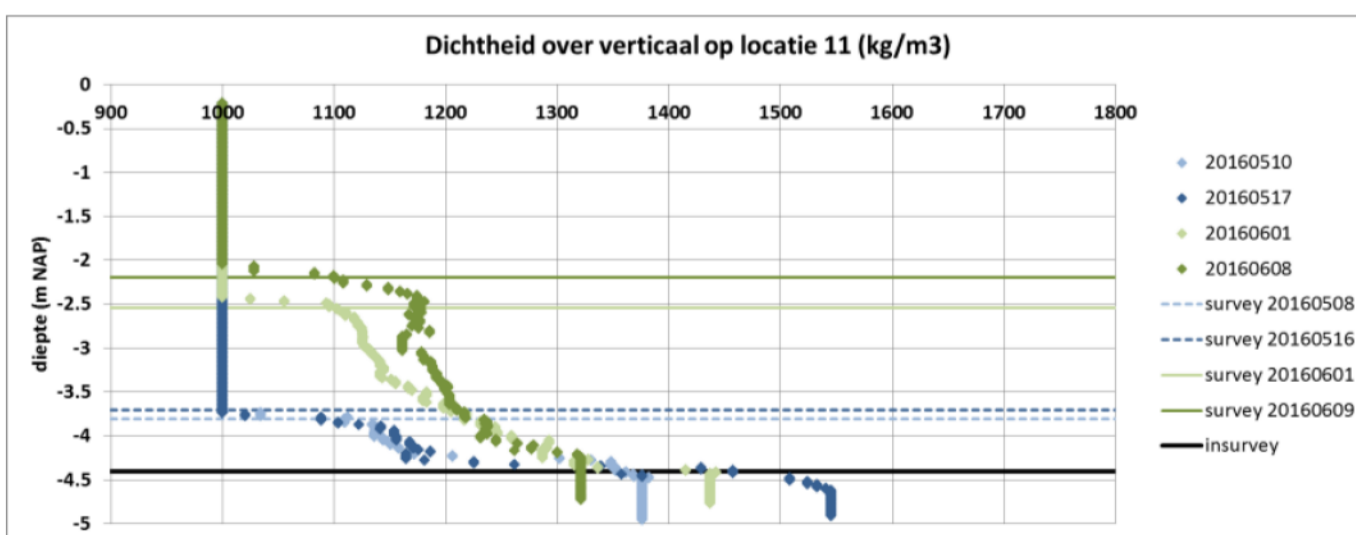
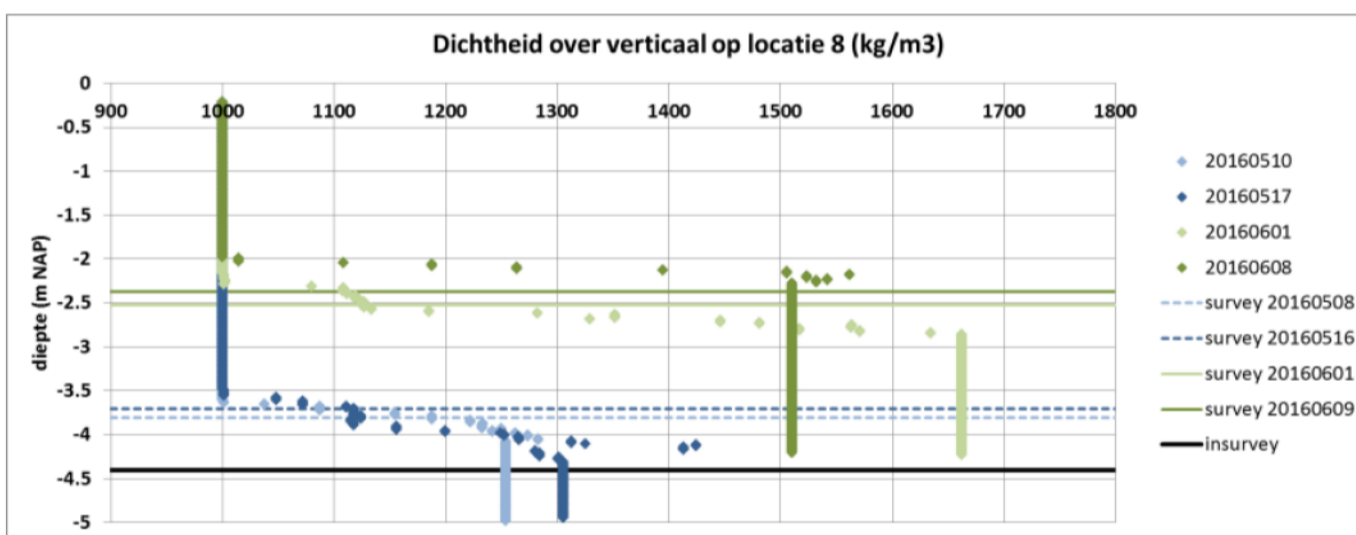
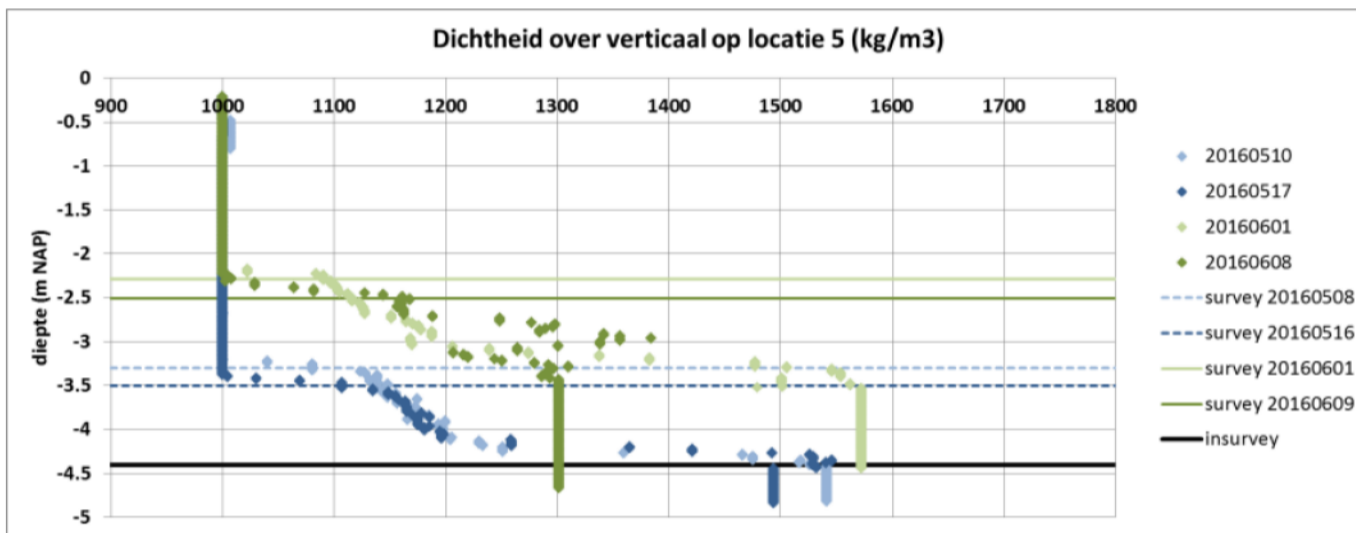
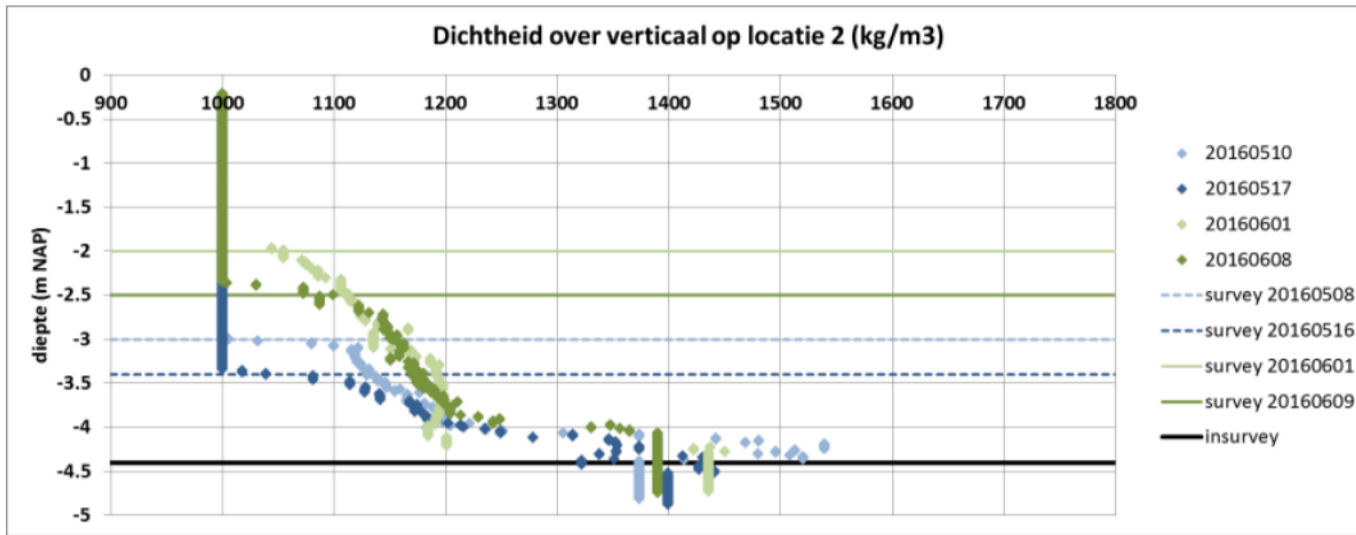
Bijlage 3: RESULTATEN DICHTHEIDSMETINGEN

EERSTE TWEE VULSLAGEN A en B

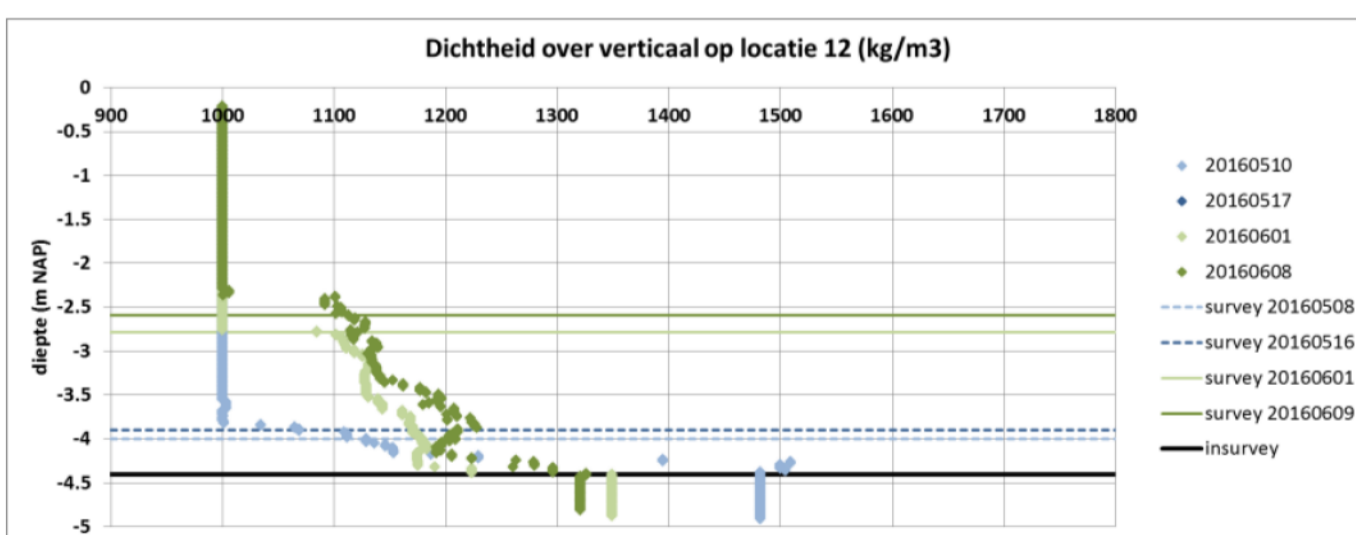
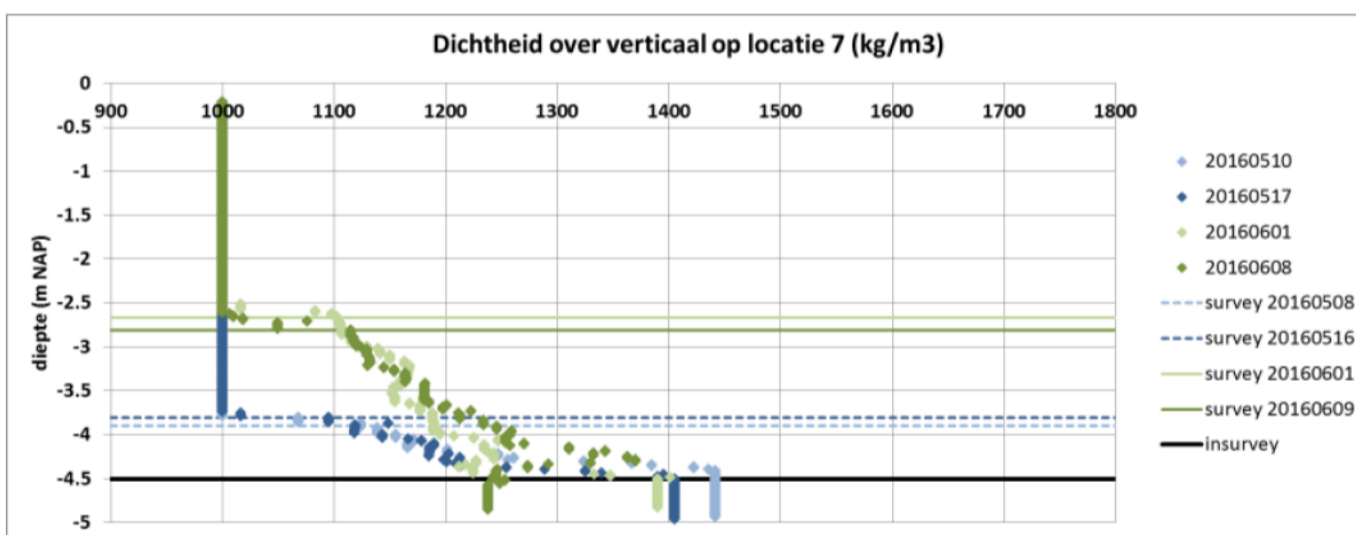
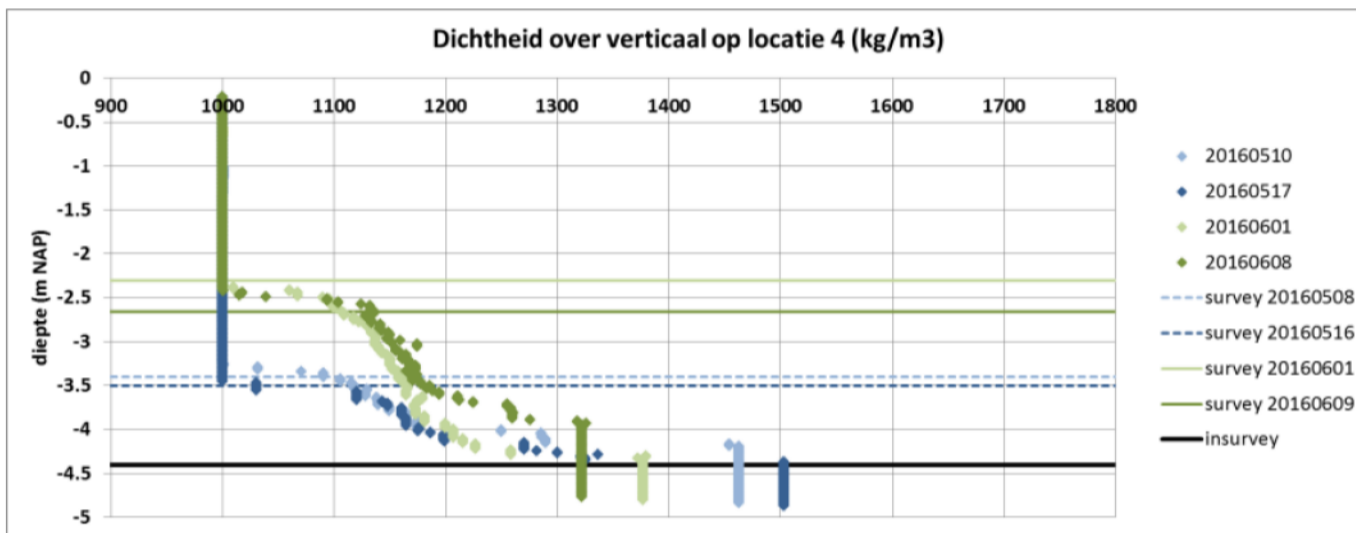
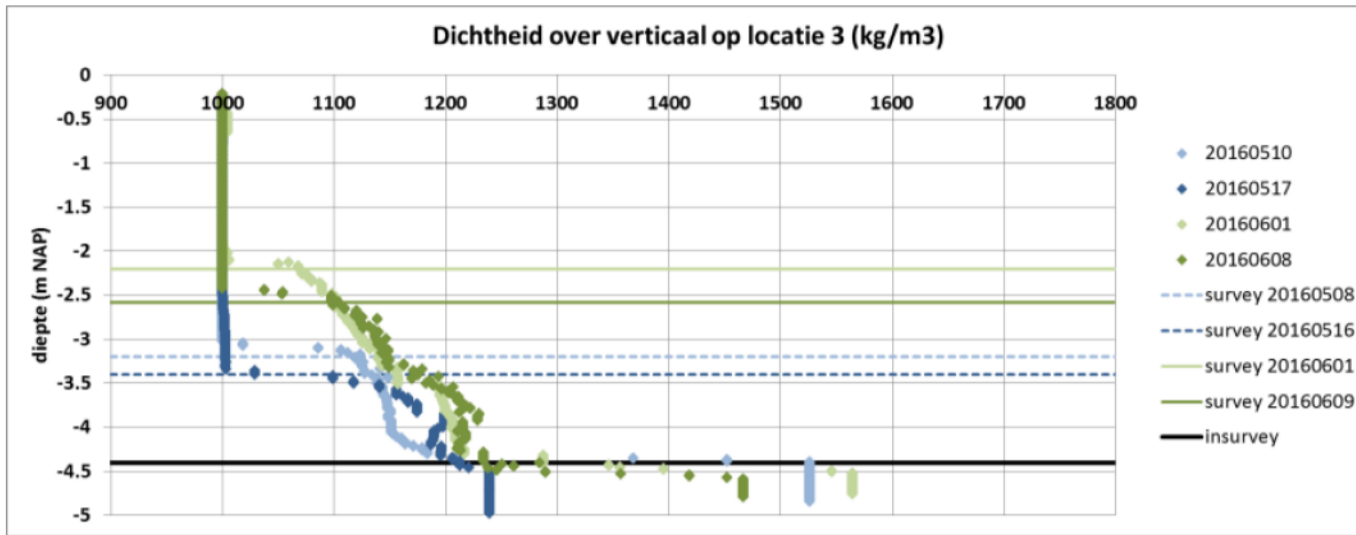
WESTELIJKE MUDBUG LOCATIES: 1, 6, 9, 10



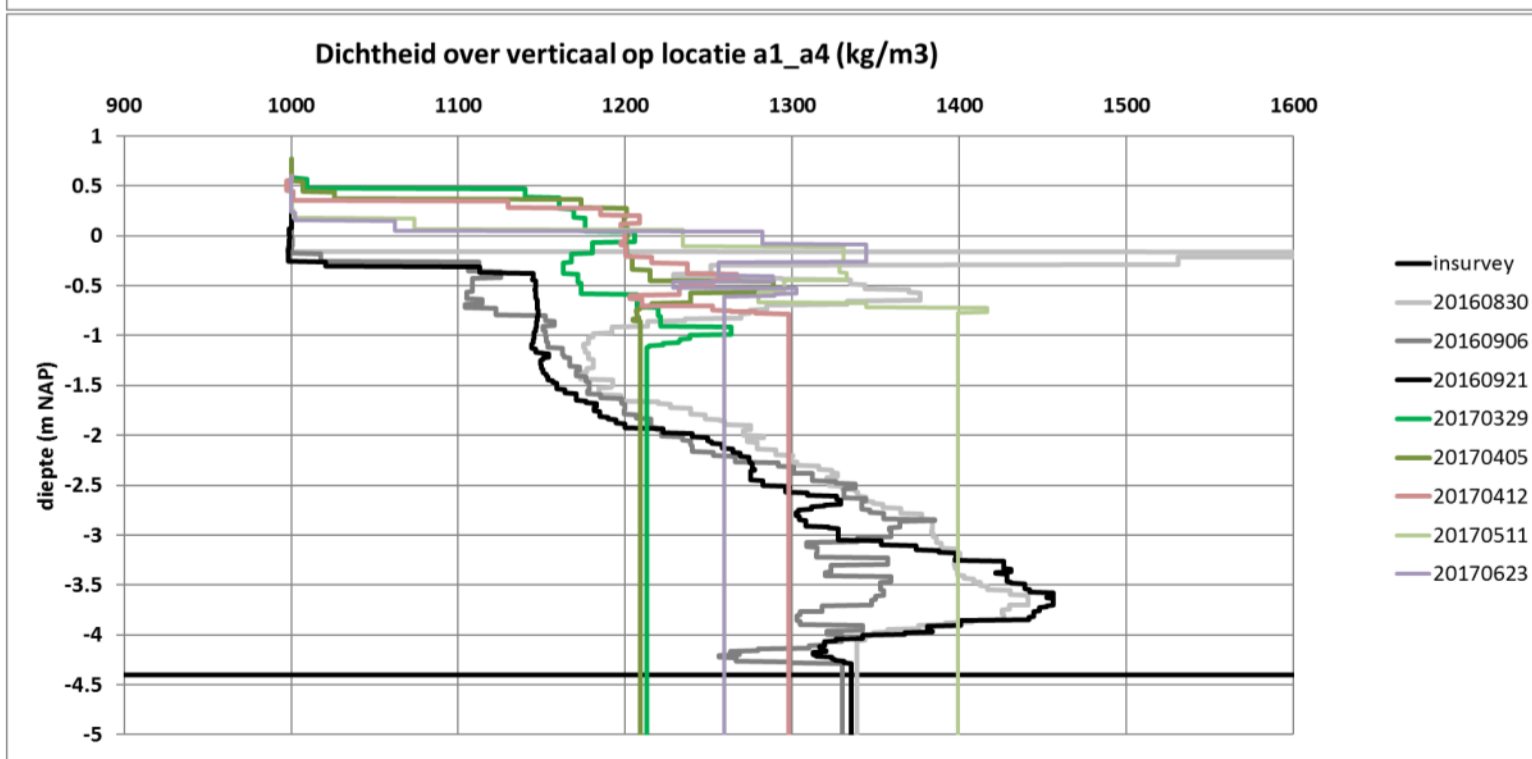
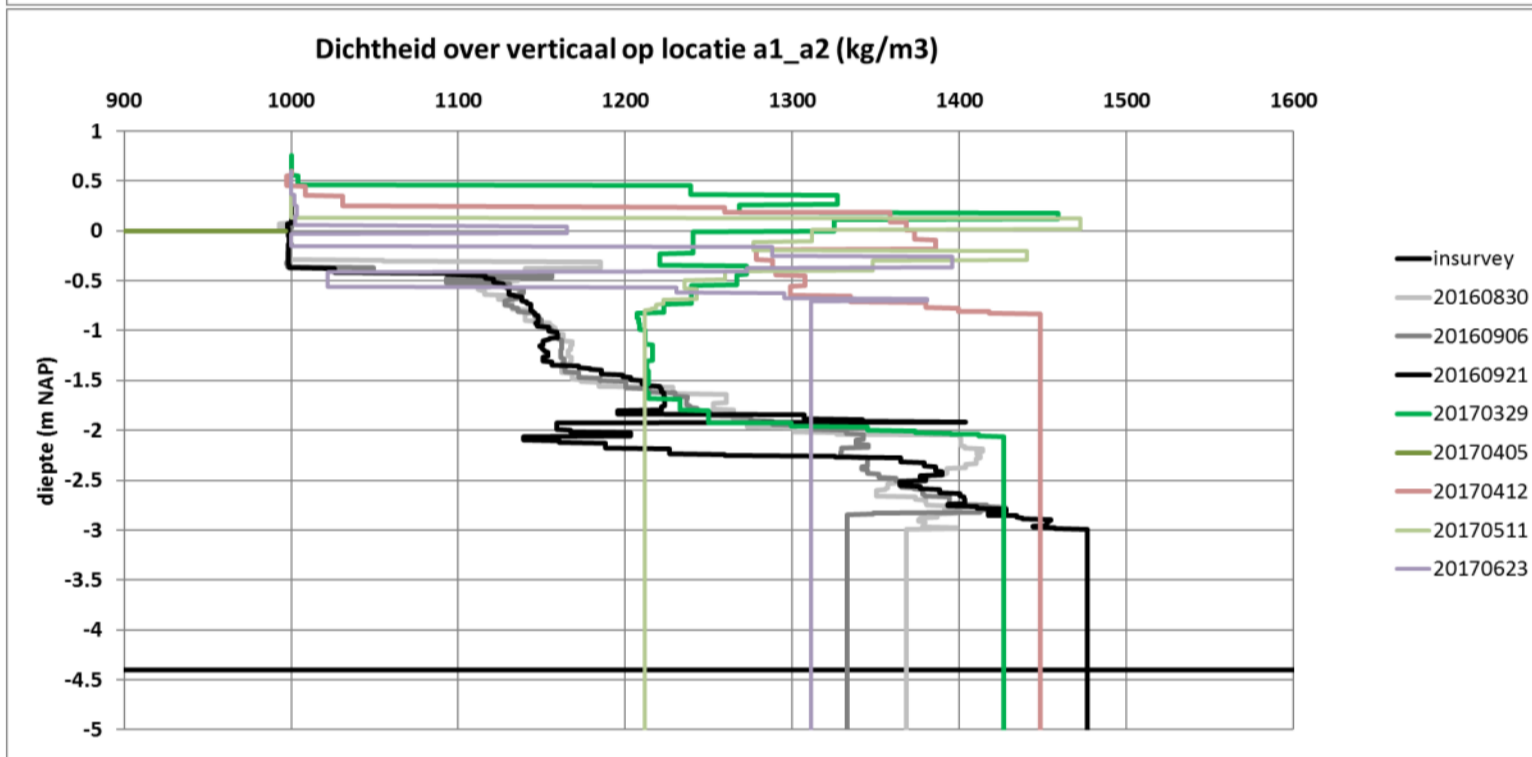
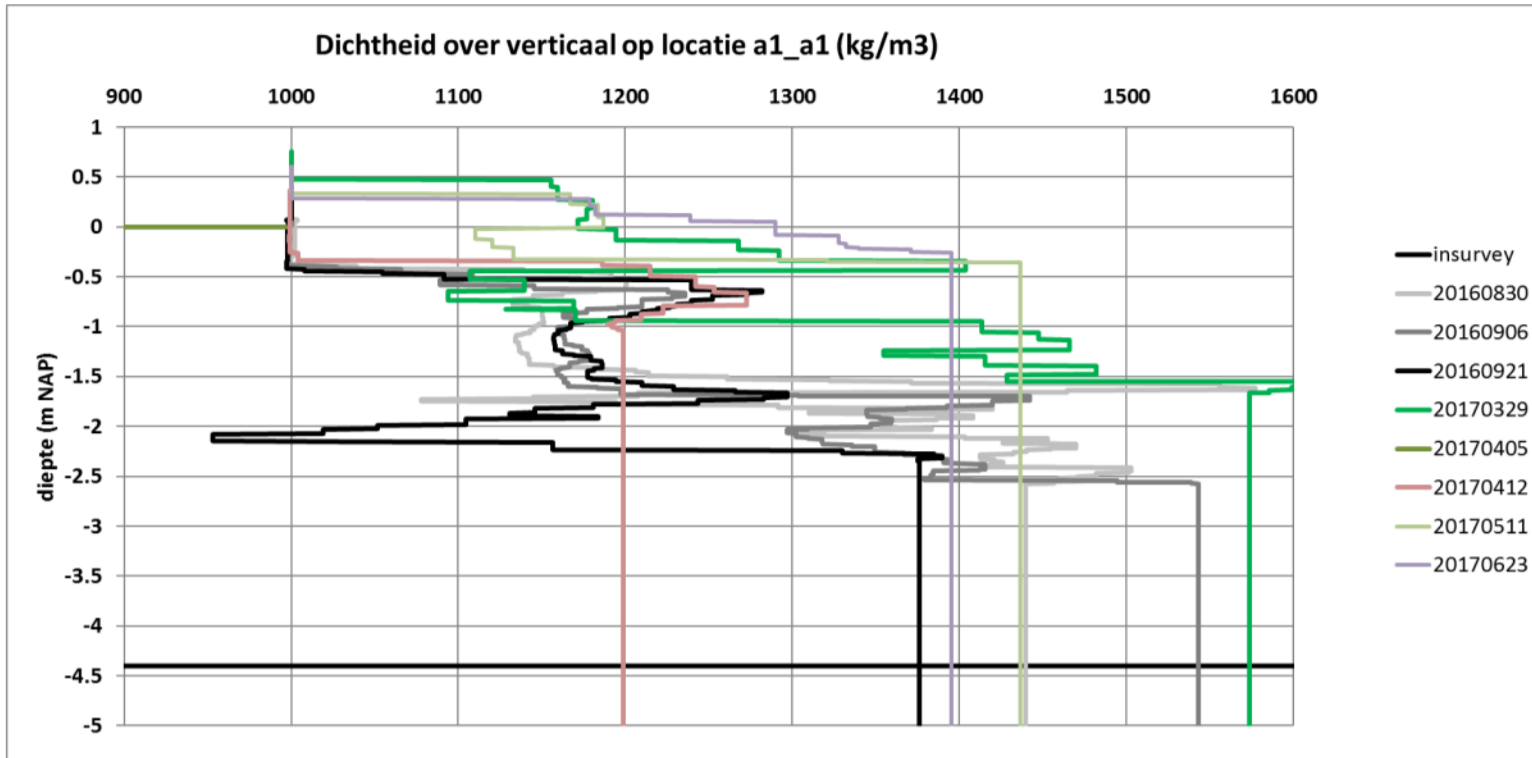
CENTRALE MUDBUG LOCATIES: 2, 5, 8, 11

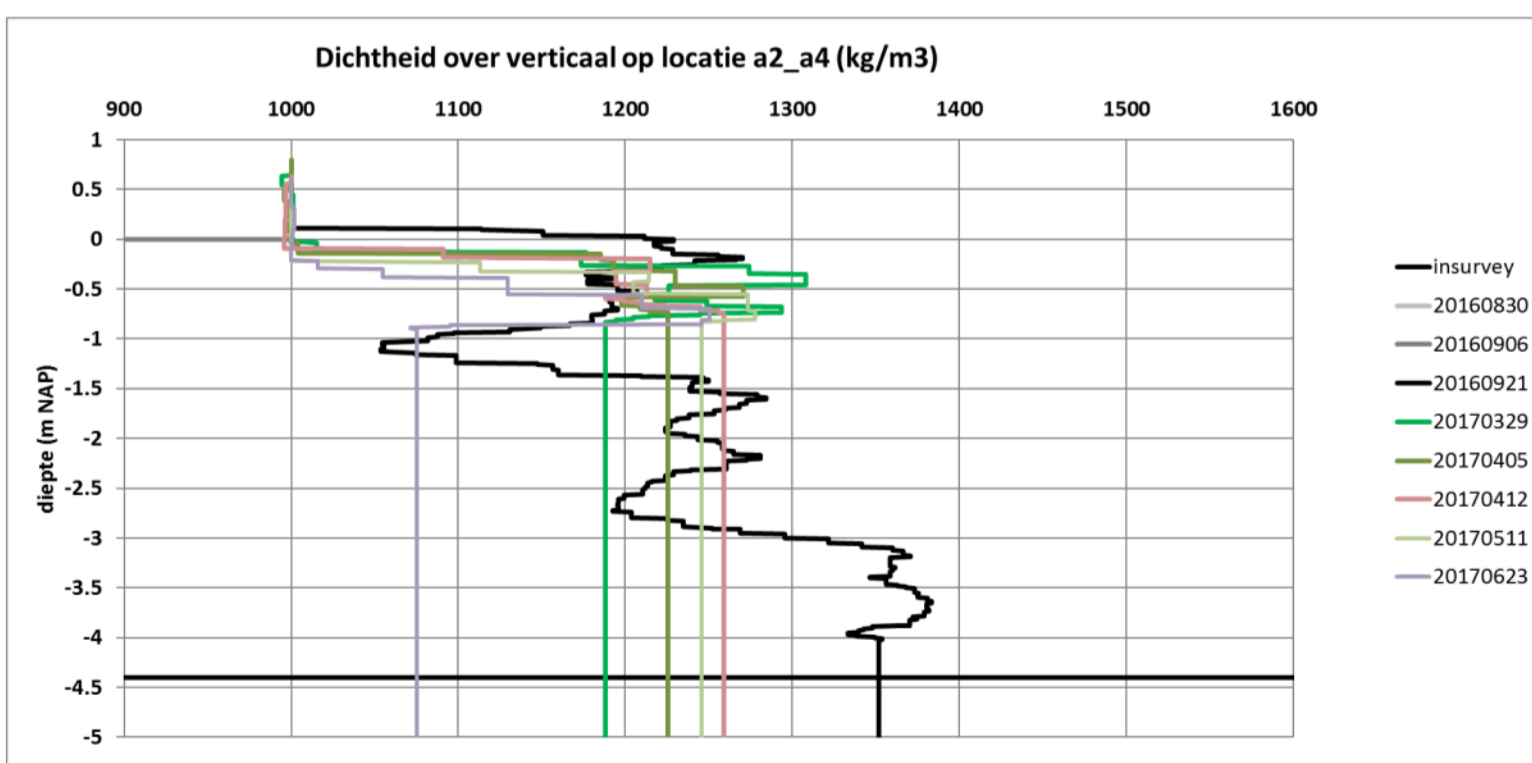
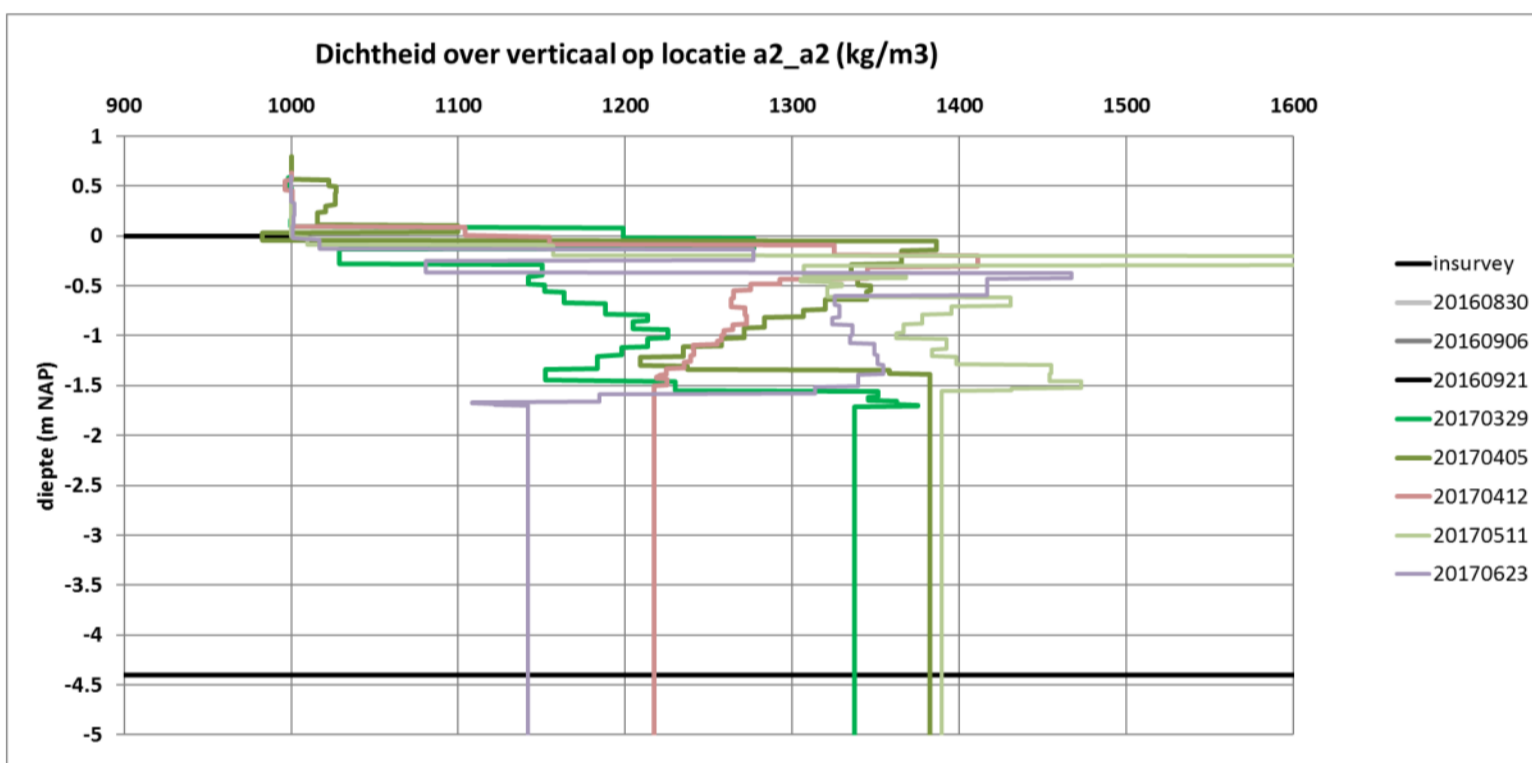
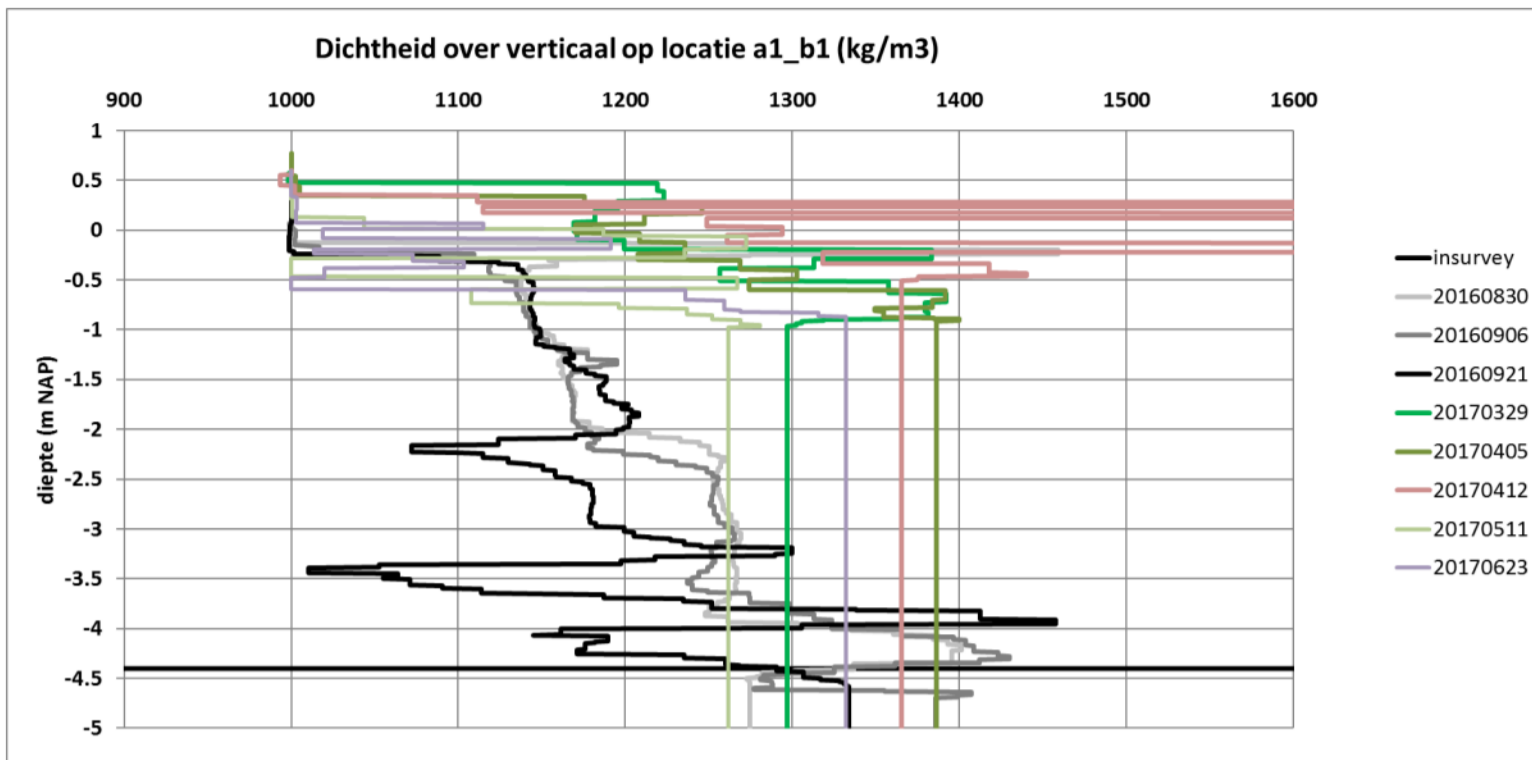


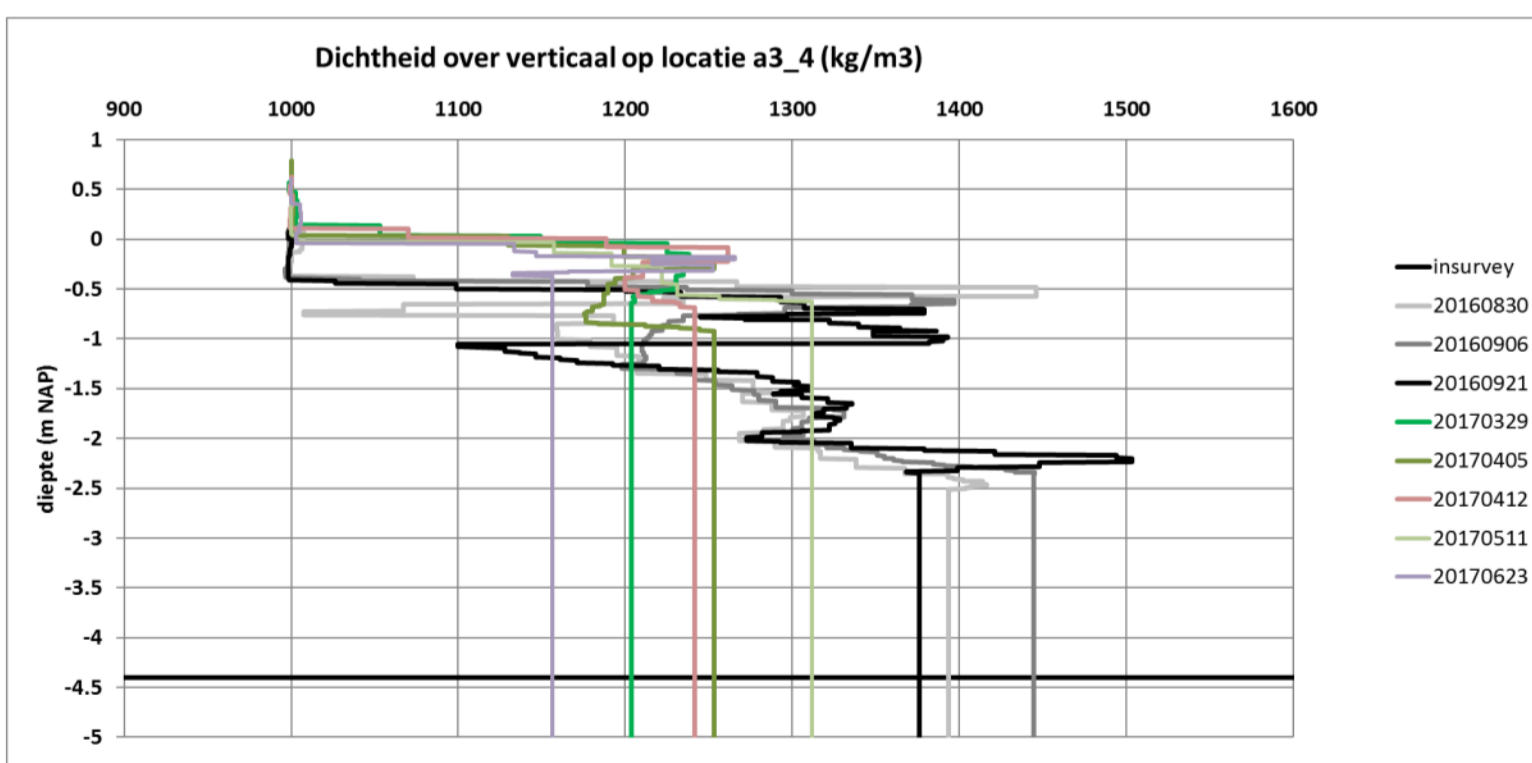
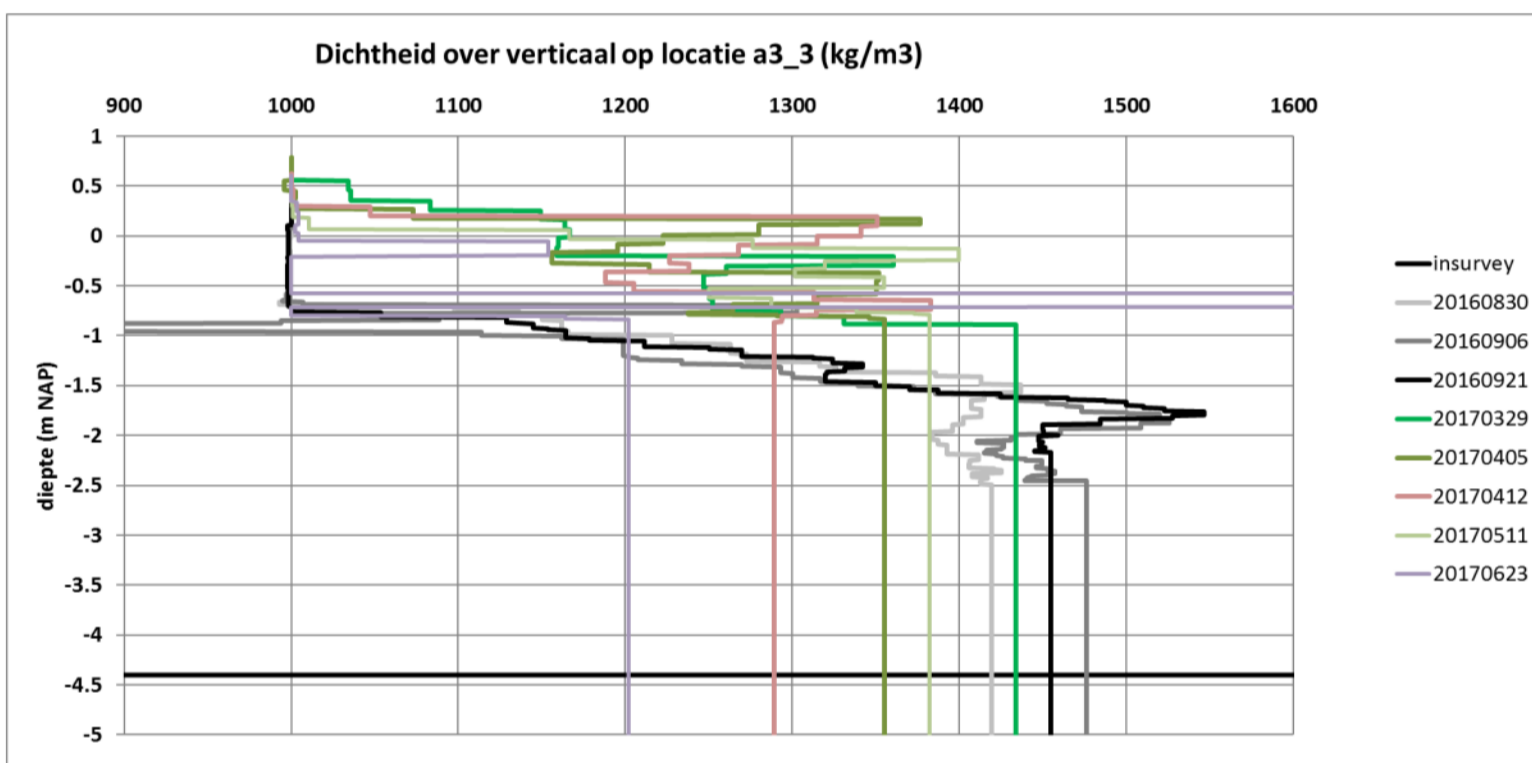
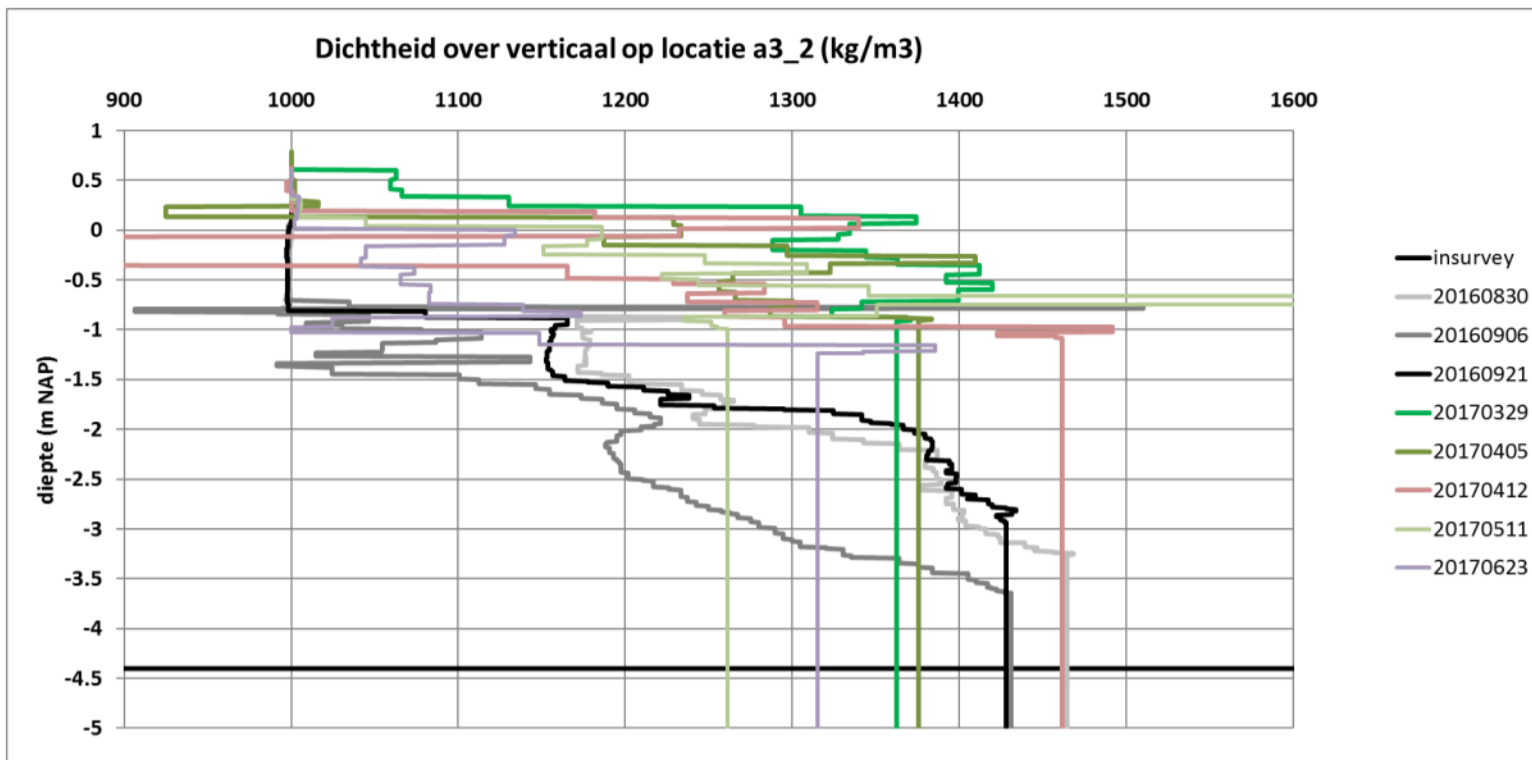
WESTELIJKE MUDBUG LOCATIES: 3, 4, 7, 12

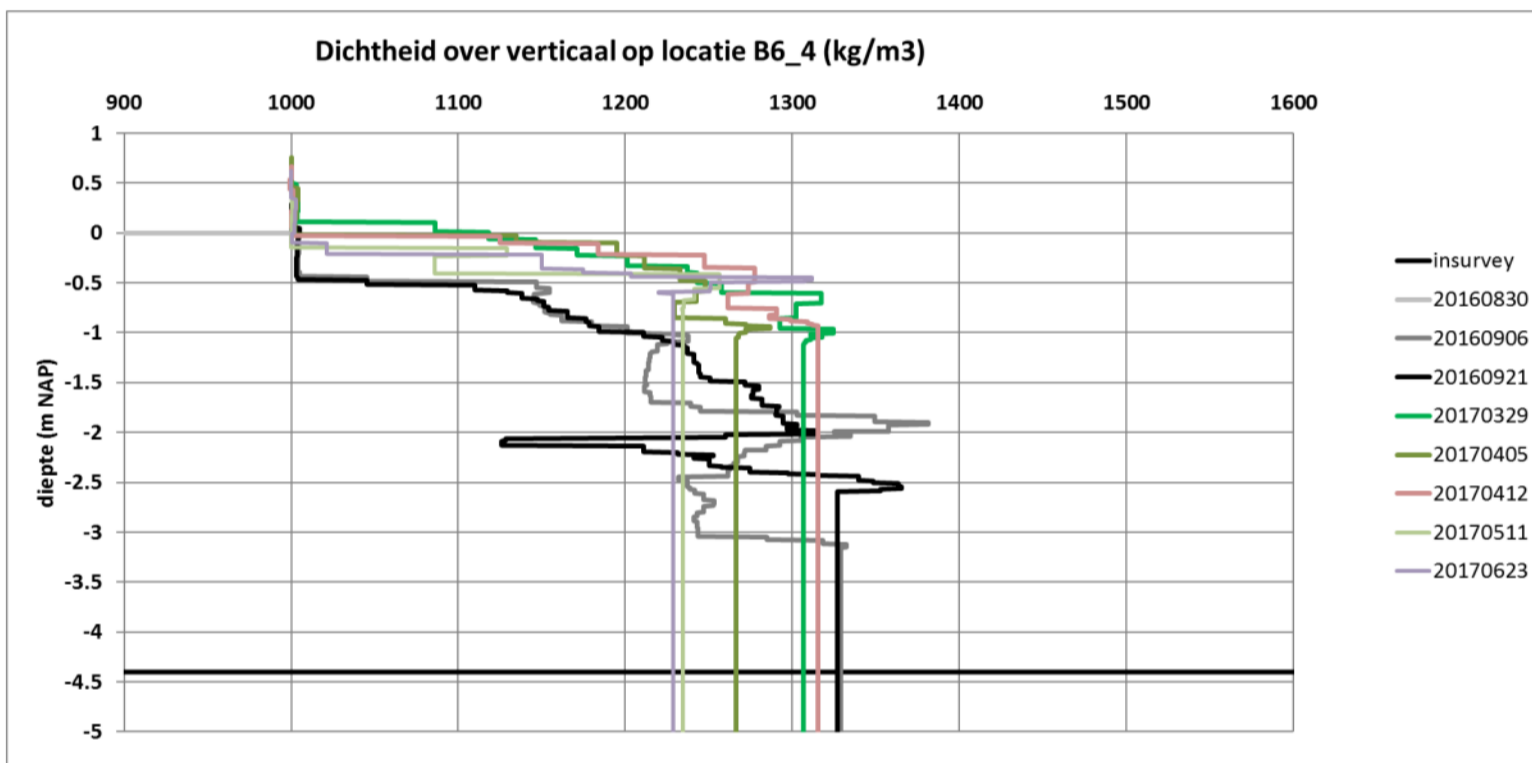
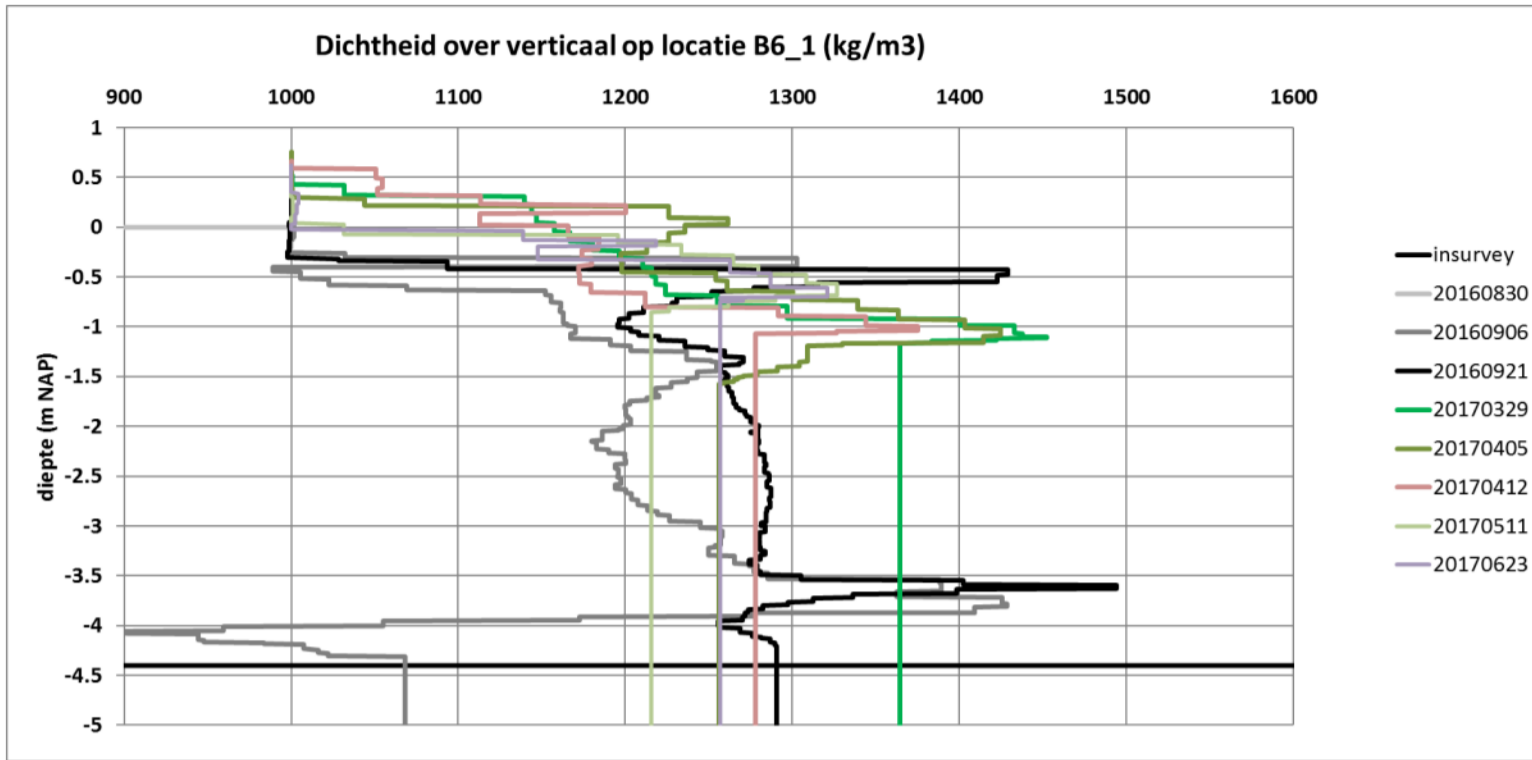


LATERE VULSLAGEN A EN B

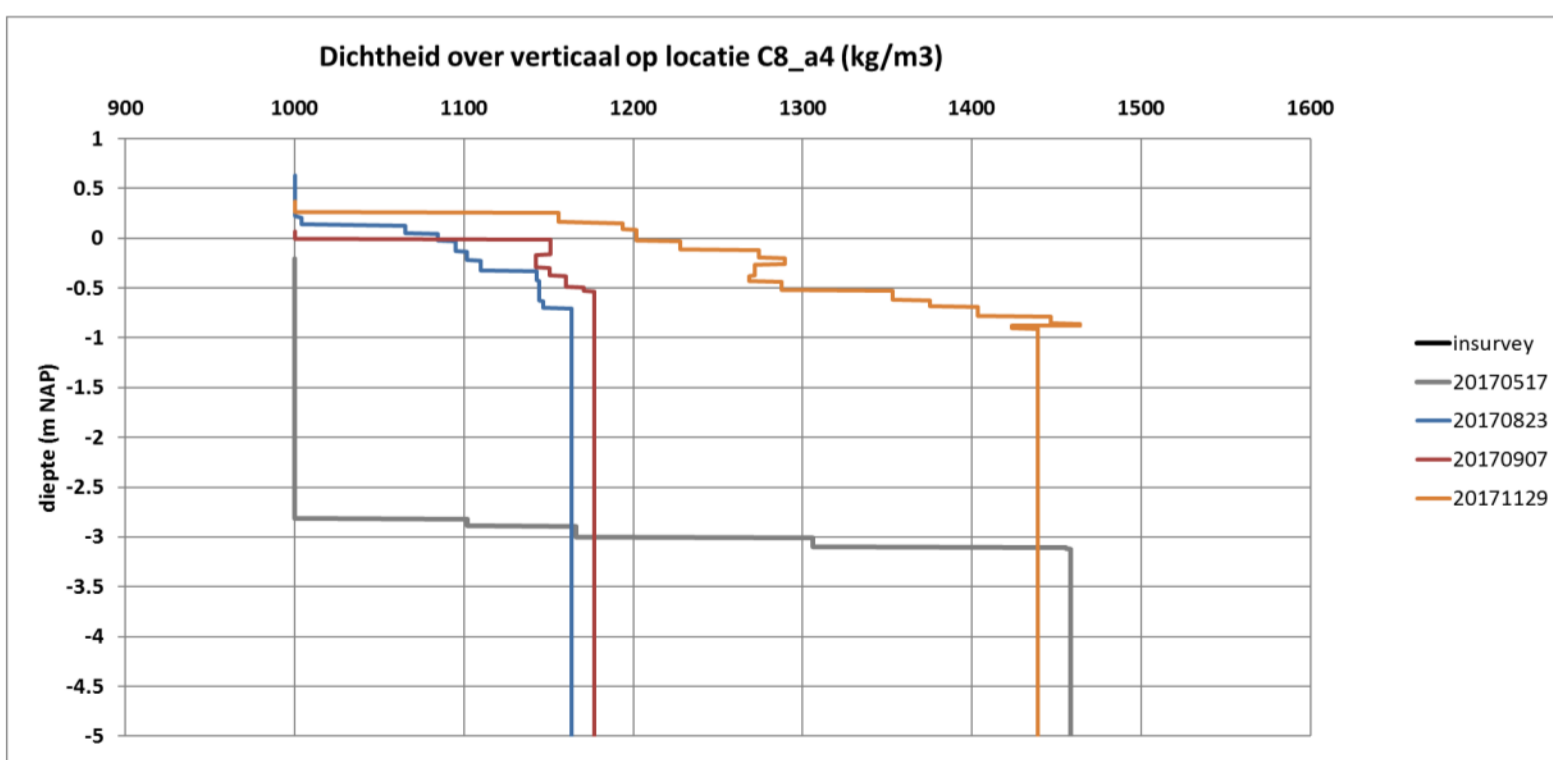
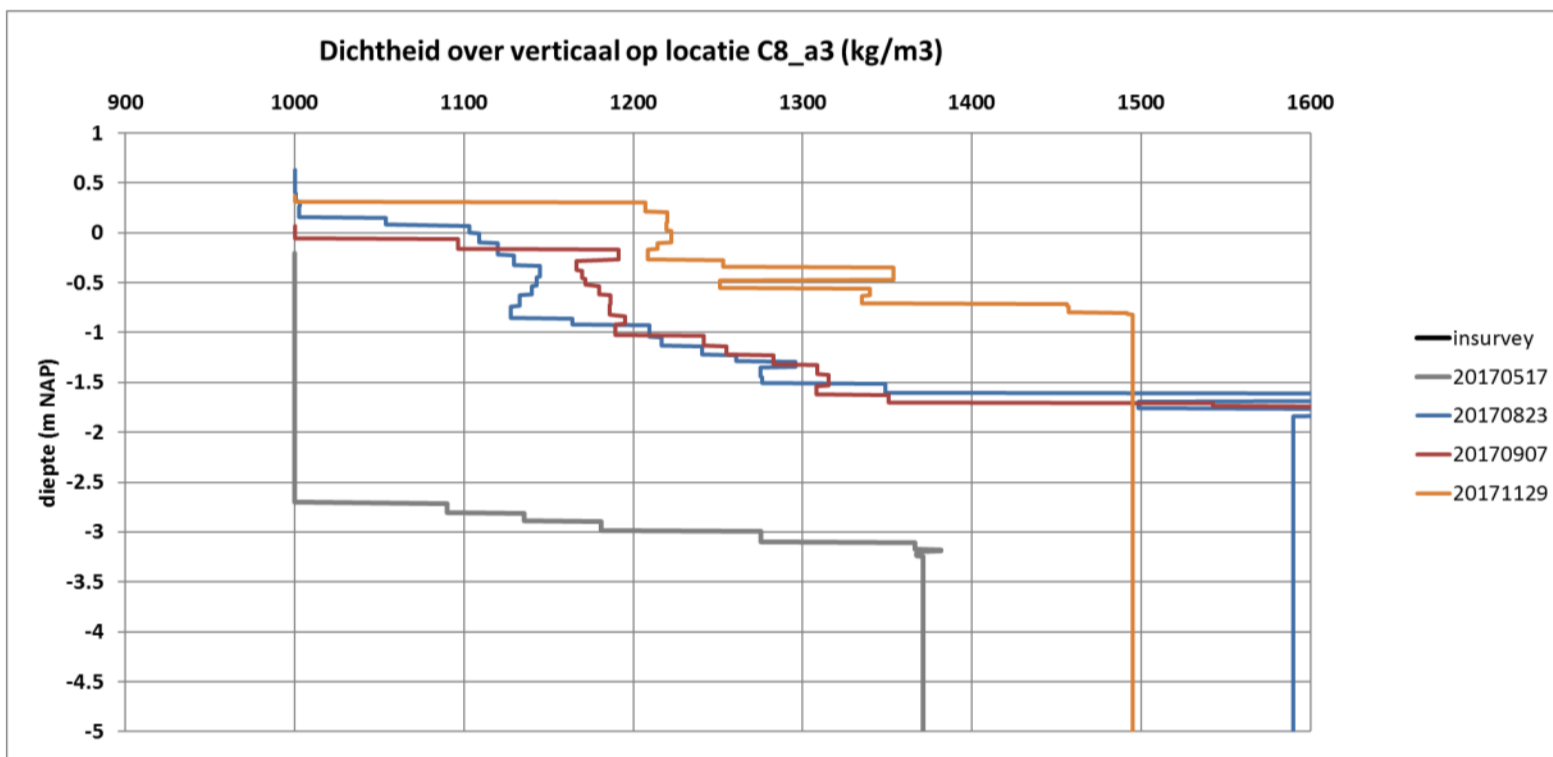
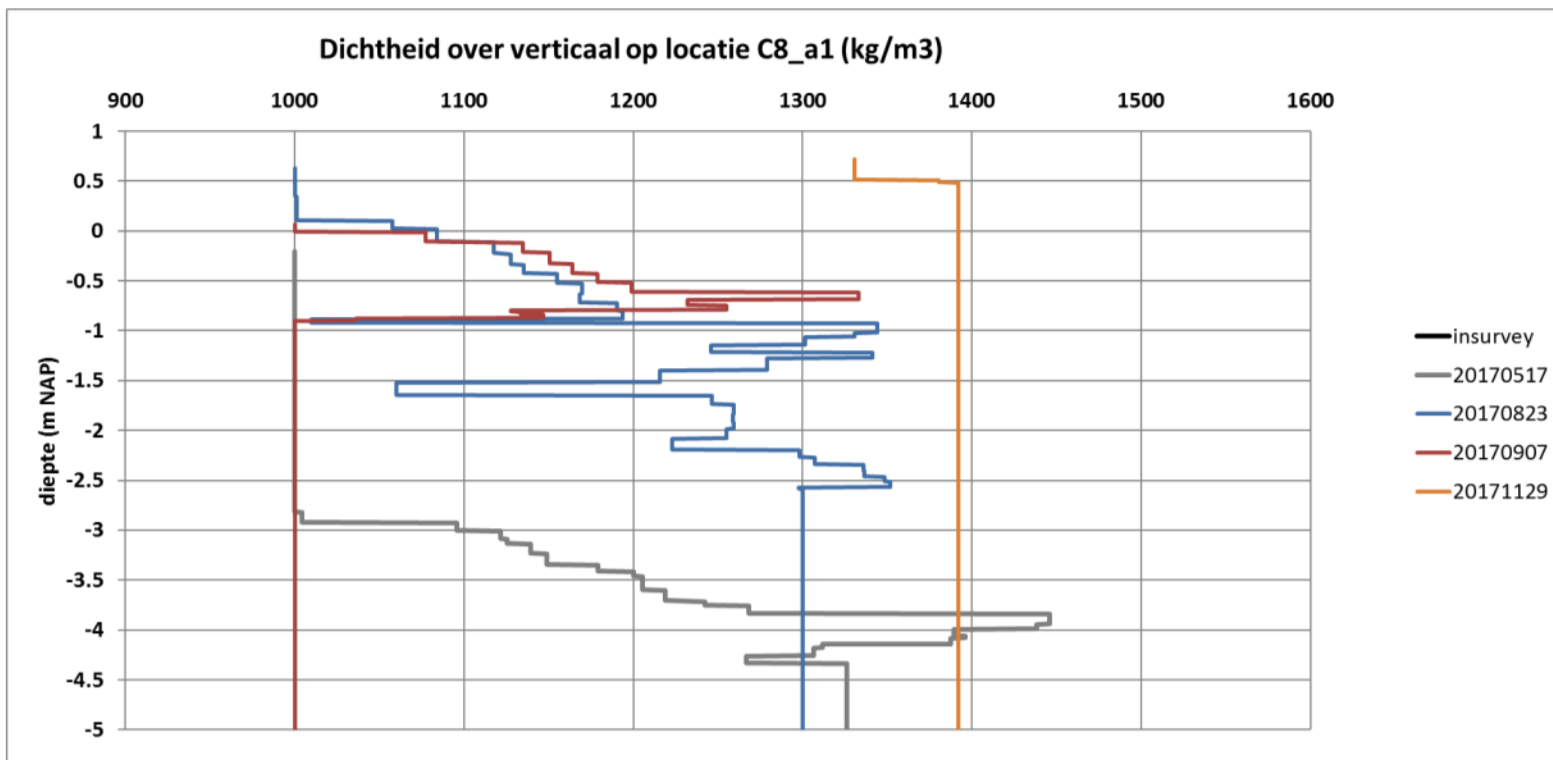


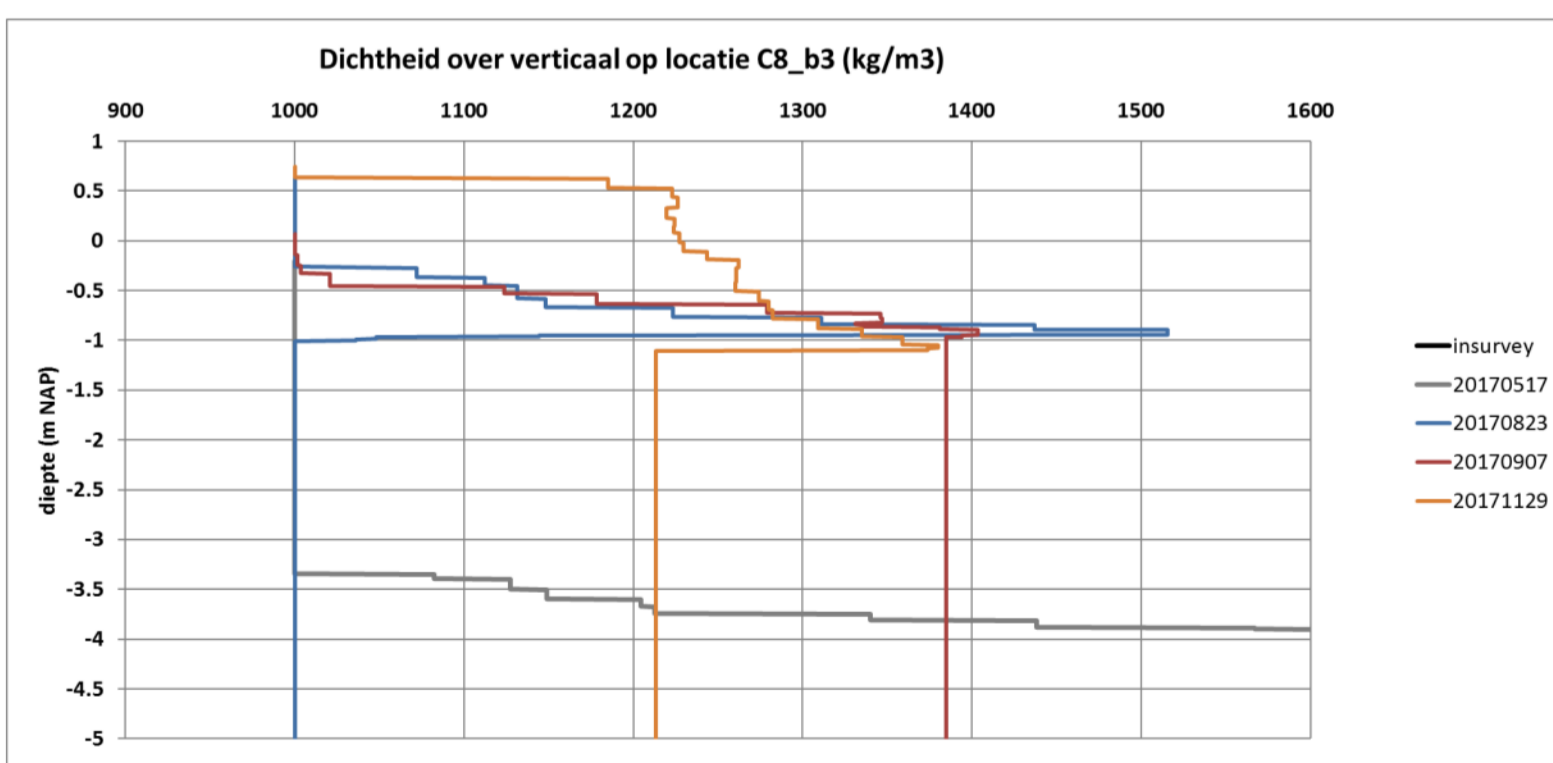
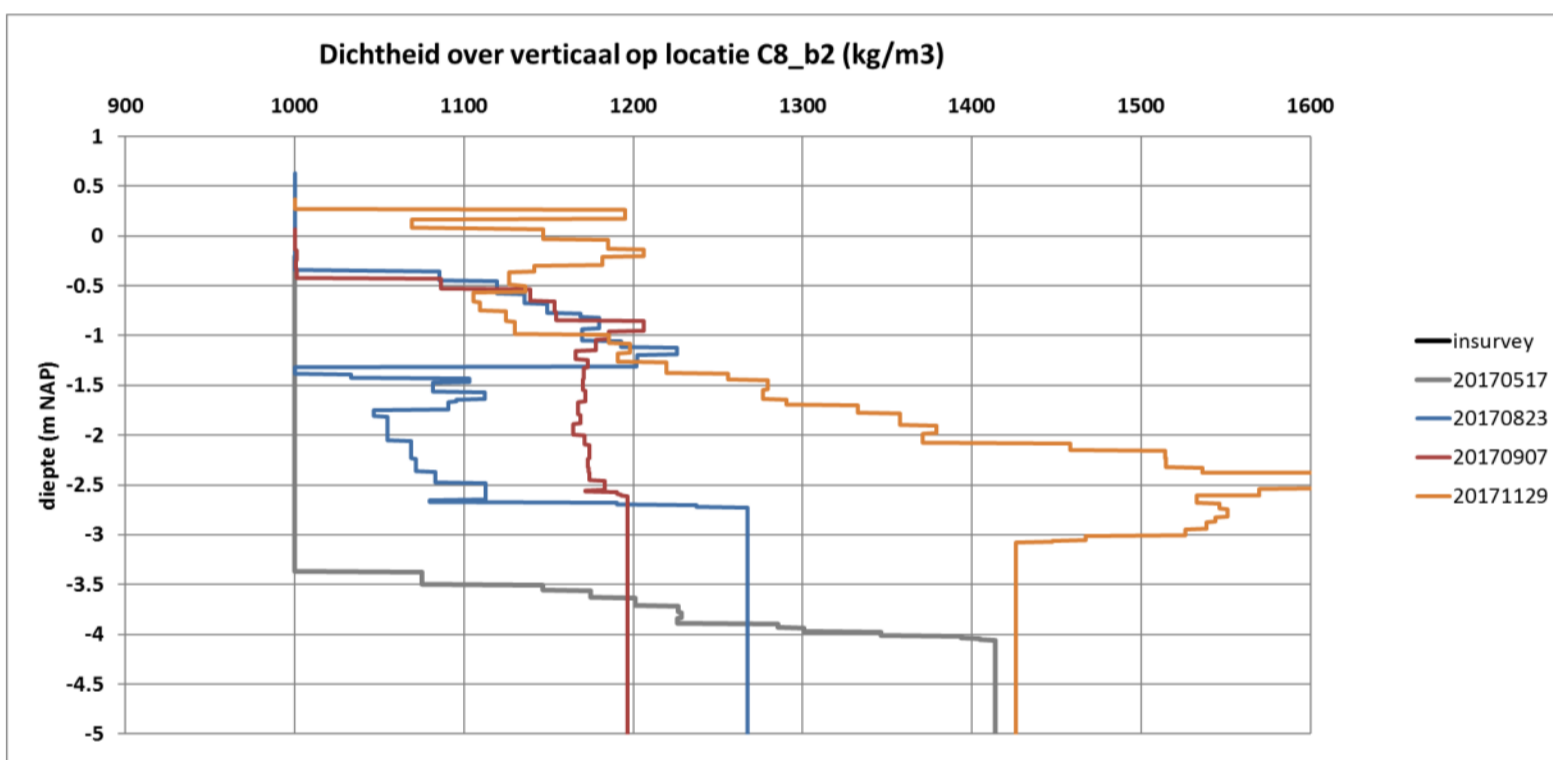
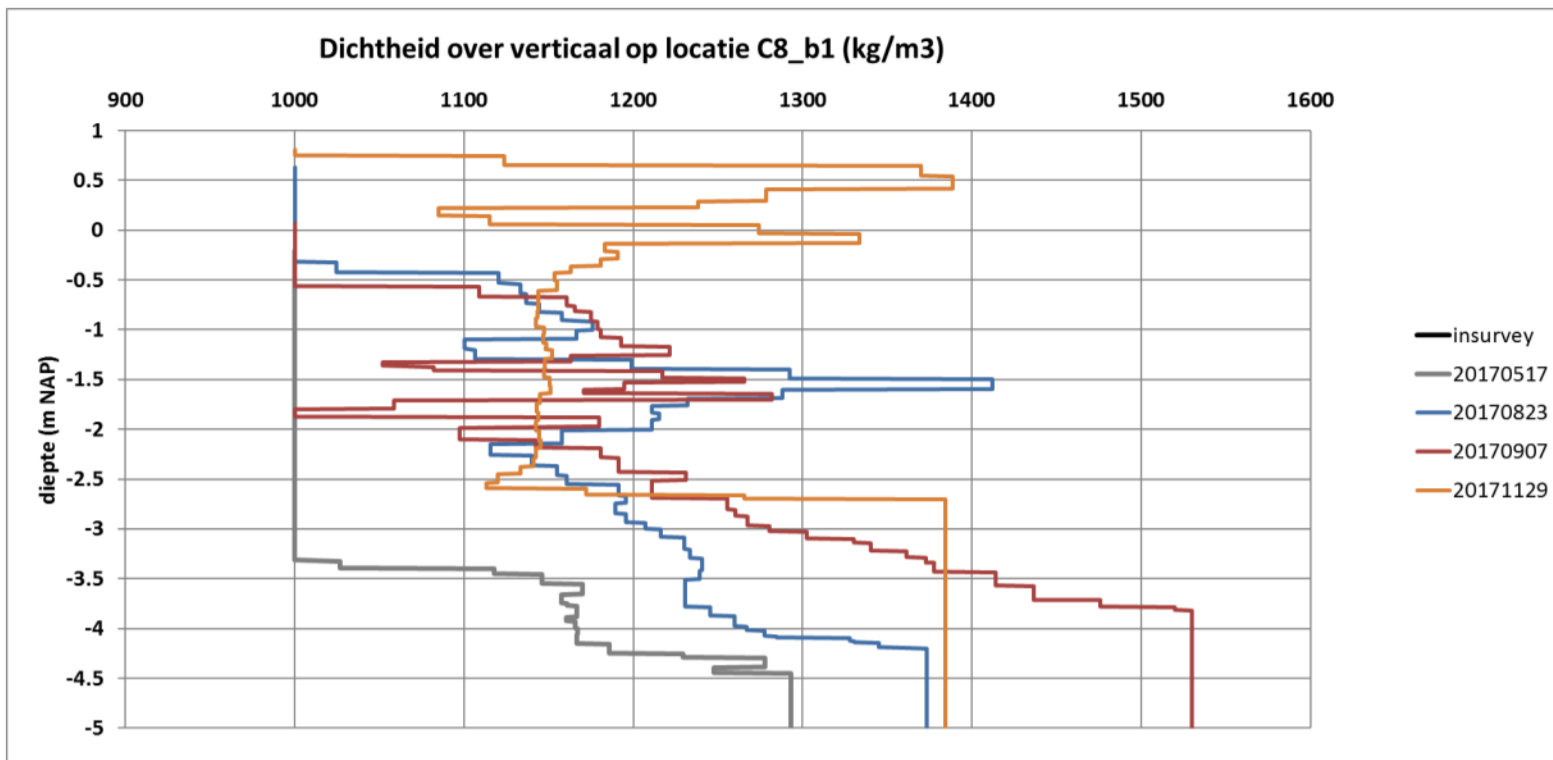


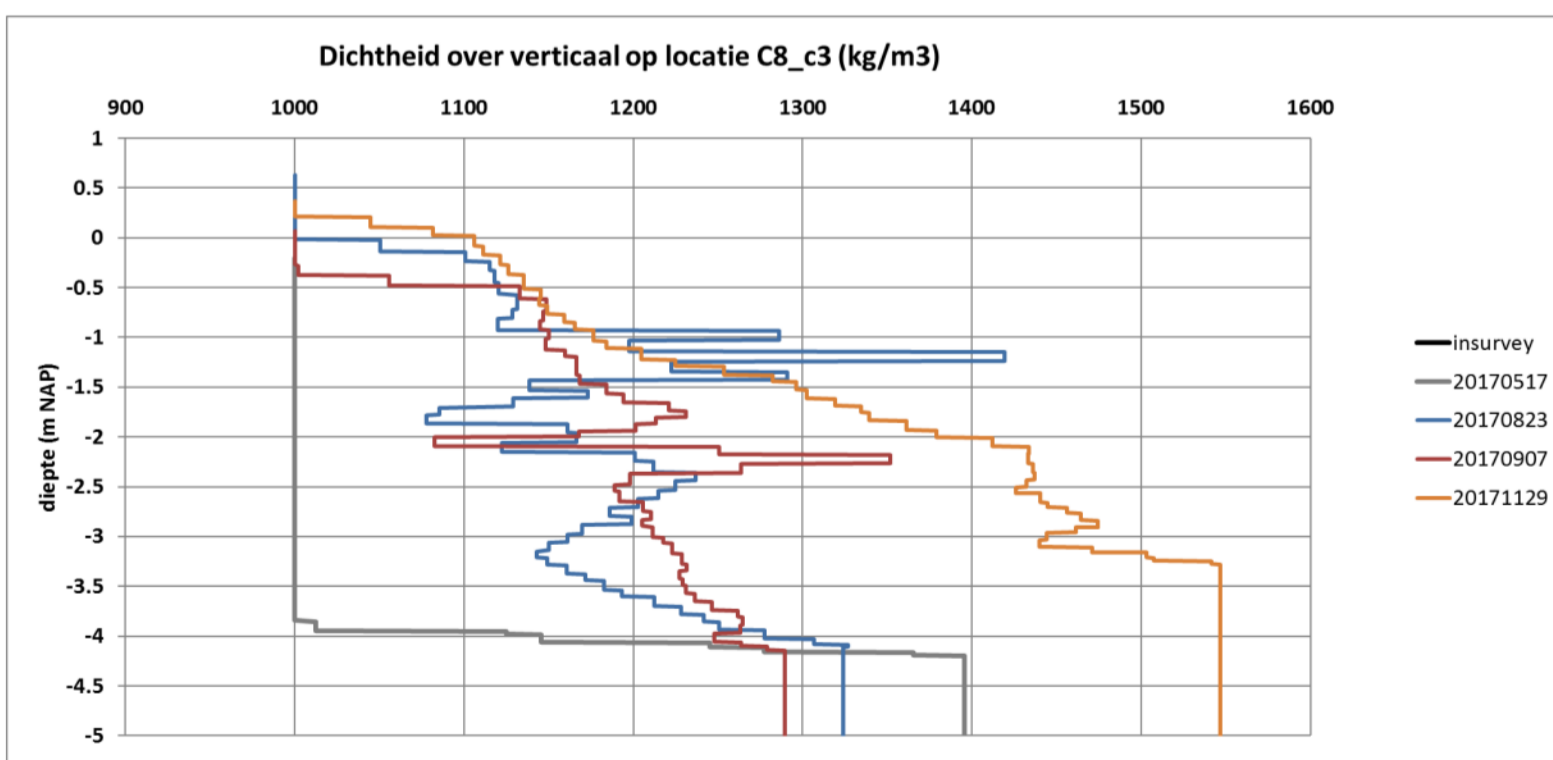
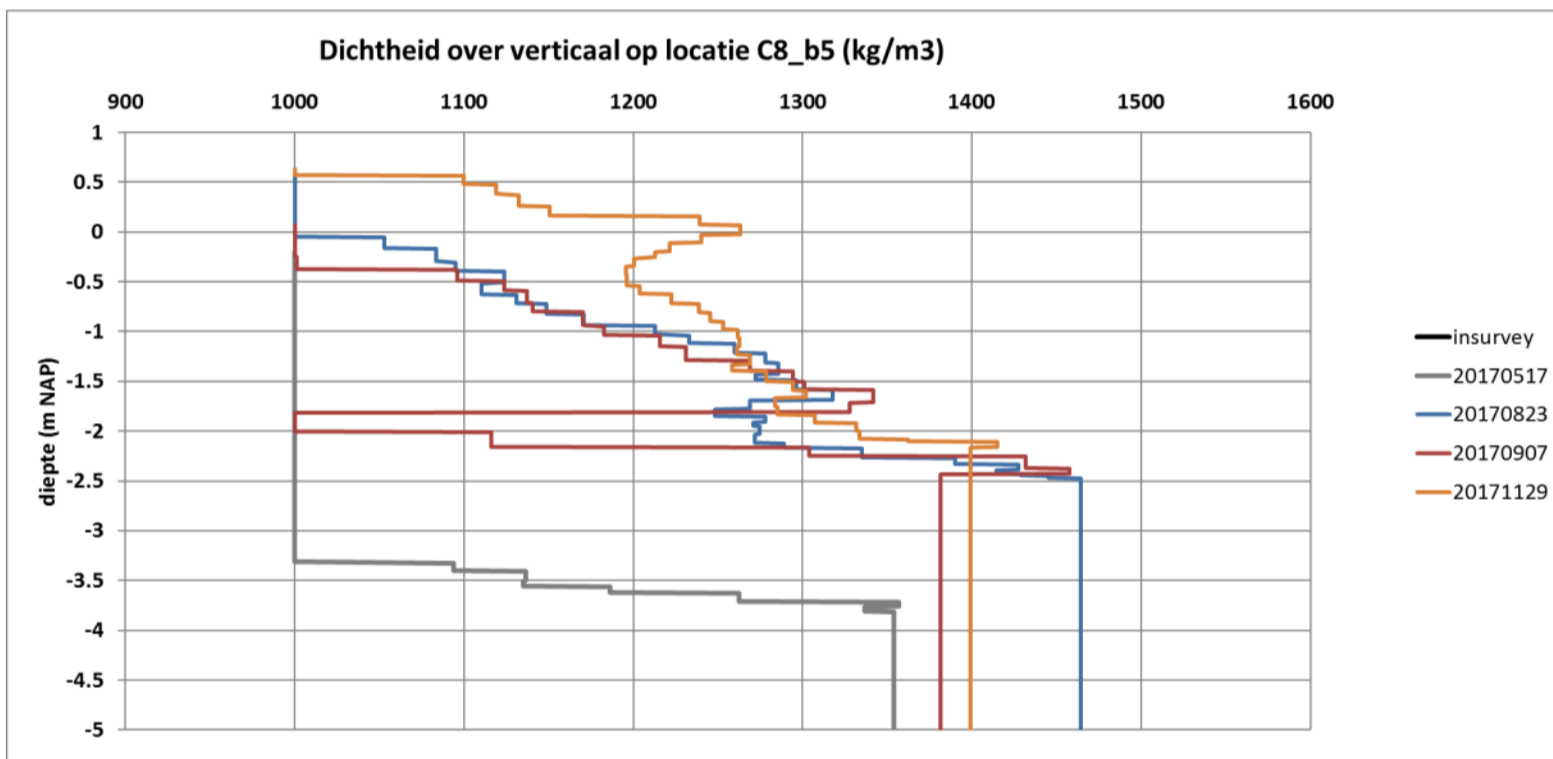
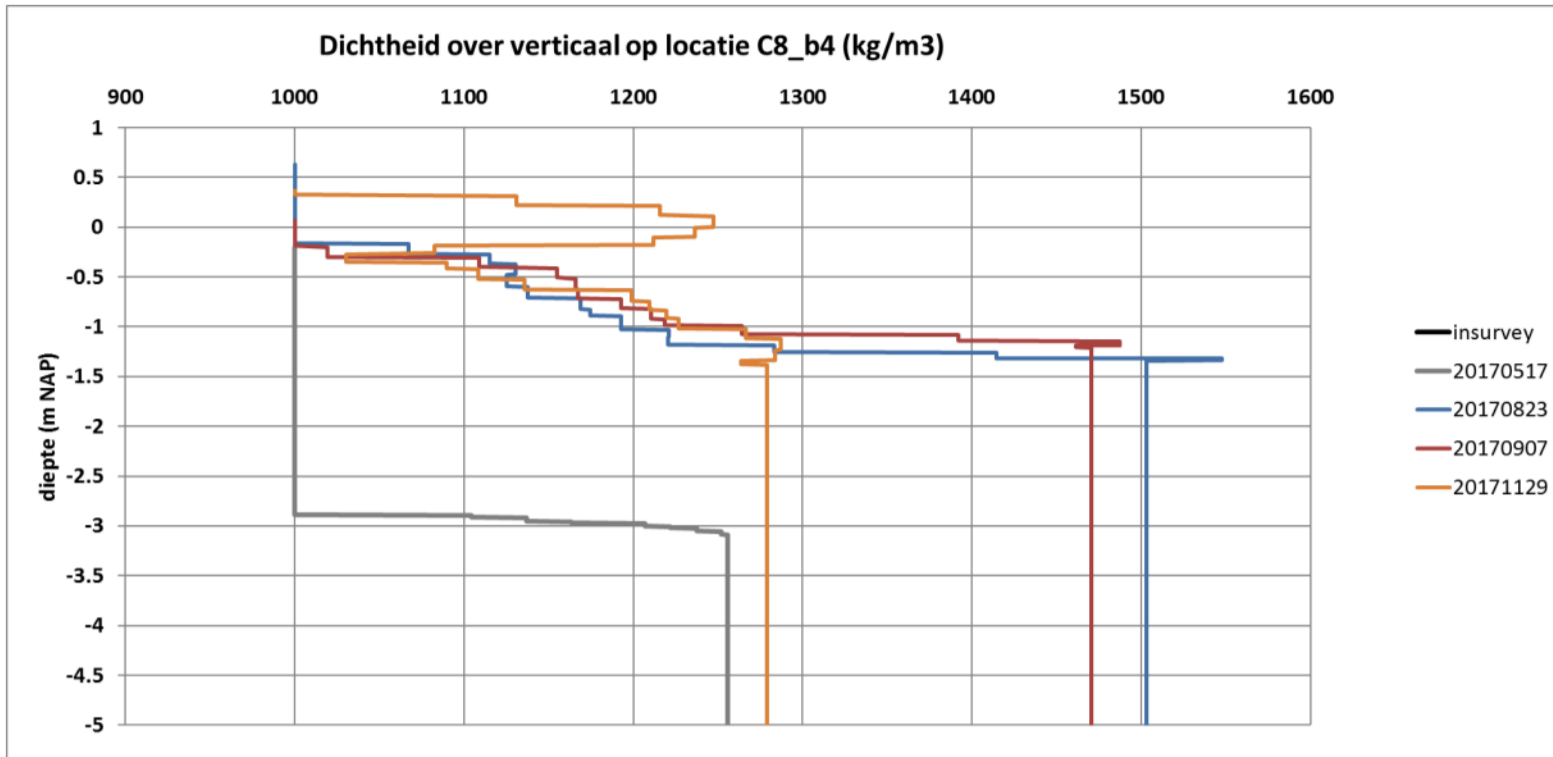




VULSLAGEN C







VULSLAGEN D1

