



**Johan van den Berg**  
VolkerInfra, een Koninklijke  
VolkerWesselsonderneming



**Robbin Sluijsmans**  
Boskalis



**Jeroen Dijkstra**  
Cofra B.V.

# DE BOUW VAN EEN SLUISCOMPLEX: GEOTECHNISCHE UITDAGINGEN EN OPLOSSINGEN BIJ HET WERKEN MET EEN WERKEILAND

In 2014 heeft combinatie 'Isala Delta', bestaande uit Boskalis en Van Hattum en Blankevoort, van Rijkswaterstaat en de provincie Overijssel de opdracht gekregen voor het uitvoeren van het project Ruimte voor de Rivier IJsseldelta (www.ruimtevoordevierijsseldelta).

Dit project valt onder een D&C contract. Onderdeel van het ruimte voor de rivier project is het ontwerpen en realiseren van een schut- en spuisluis in het Drontermeer ten zuiden van de huidige Roggebotsluis, zie figuur 1. Deze schut- en spuisluis heet het Reevesluiscomplex. De sluis wordt grotendeels "in den droge" gebouwd met behulp van een werkeiland. Dit artikel geeft inzicht in de geotechnische uitdagingen (verweking, inbrengbaarheid funderingselementen) en oplossingen om de realisatie van het werkeiland en de installatie

van de funderingselementen van de sluis tot een succes te maken.

## Verandering van ontwerp

In het oorspronkelijke ontwerp (Fase 1) was het voorzien om op de locatie van het Reevesluiscomplex twee keersluizen te realiseren, die ook wel "Reevedam" werden genoemd. Deze keersluizen zouden in 2025 omgebouwd worden naar het Reevesluiscomplex, bestaande uit een schut- en spuisluis.

In een later stadium van de bouw is besloten om toch direct de schut- en spuisluis (Fase 2) te realiseren en de keersluizen (Fase 1) daarmee te laten vervallen. Ten tijde van deze ontwerpwijziging waren al funderingselementen aangebracht (zie figuur 3), zoals prefab betonpalen (onder water) en damwanden.

In figuur 2 worden de 3D modellen uit het DO van de twee fases weergegeven.

Bij de bouw van het Reevesluiscomplex is gebruik gemaakt van een tijdelijk- en een permanent deel van een werkeiland opgebouwd uit zand, ook wel een landuitbreiding genoemd. Voordat dit werkeiland aangebracht is, zijn de slappe toplagen onder het toekomstige eiland verwijderd. Dit om te kunnen voldoen aan een stabiel en betrouwbaar systeem. Het doel van het verwijderen van de slappe lagen was ook om de (rest)zettingen van het werkeiland te beperken en een fundering op staal van de gebouwen mogelijk te maken. figuur 3 geeft een aanzicht tijdens de bouwfase weer.

## Uitdagingen

Het project kende de volgende specifieke uitdagingen, hieronder afzonderlijk toegelicht:

- Faseringsverandering in relatie tot de al aangebrachte palen
- Realiseren en behouden van het werkeiland op een veilige en stabiele manier
- Optimalisatie fundering gebouwen ten behoeve van circulaire economie
- Inbrengbaarheid van funderingselementen na verdicht werkeiland.

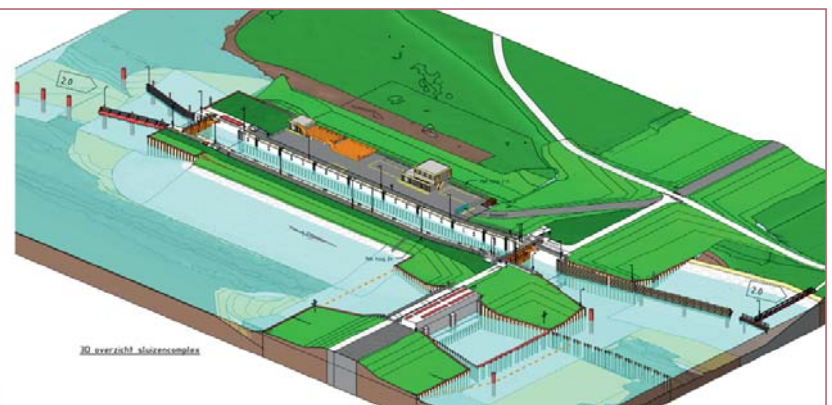
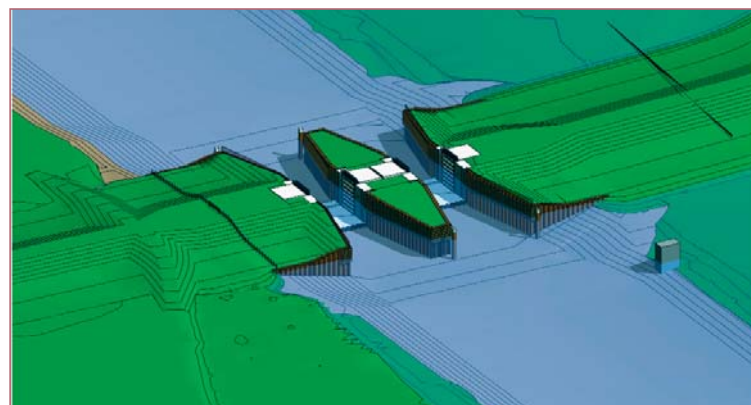
## Geotechnische condities

In figuur 4 wordt representatieve sondering ter plaatse van het Reevesluiscomplex gepresenteerd. De ondergrond bestaat uit een slappe toplaag (welke later deels is weggebaggerd) vanaf bodemniveau tot ca. NAP -4 m / NAP -9 m. Vanaf onder-



**Figuur 1 -**  
Locatie Reevesluis-  
complex.

Bron: Google Maps (14-05-2018).



**Figuur 2 -**  
Links Fase 1:  
keersluizen.  
Rechts Fase 2:  
schut- en spuisluis.

## Samenvatting

In het Drontermeer wordt een schut- en spuisluis gebouwd met behulp van een werkeiland dat is opgebouwd uit aangebracht zand. Het werkeiland is, na het aanbrengen ervan, verdicht met een dynamische compactie methode om een

verwekingsvloeiing te voorkomen en een fundering op staal oplossing mogelijk te maken. Funderingselementen kunnen veilig en snel aangebracht worden vanaf een stabiel werkeiland



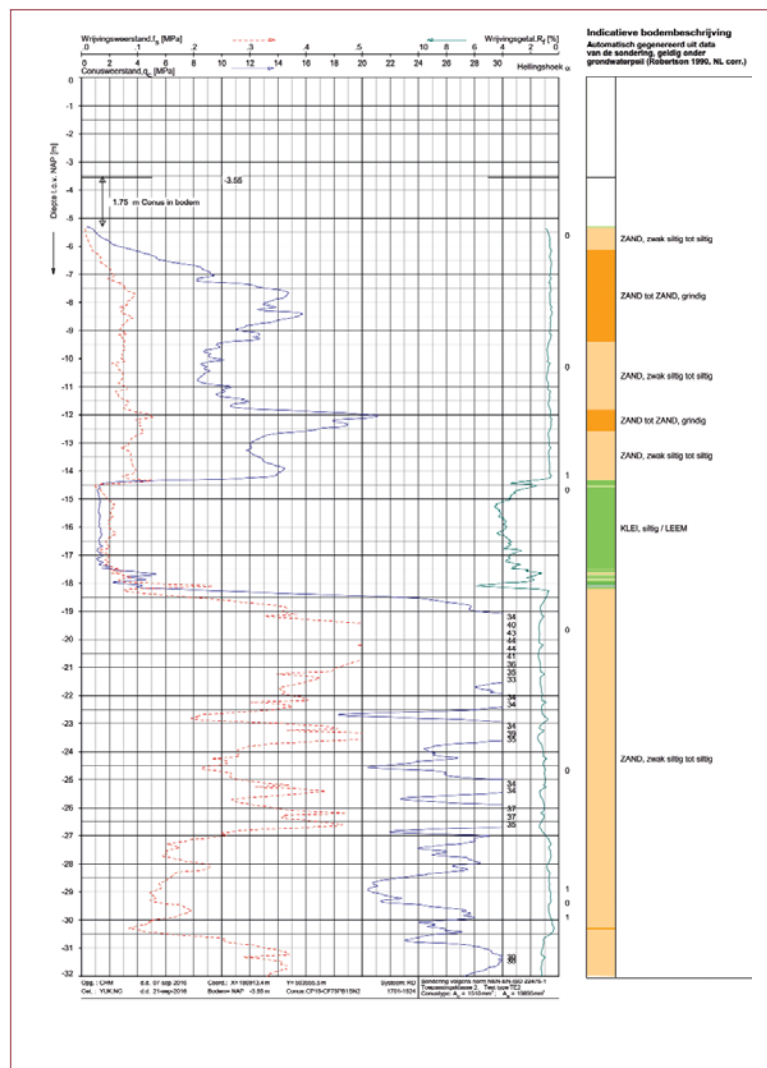
**Figuur 3 –**  
Overzicht stand  
(29-11-2016) einde  
Fase 1 van zuid  
naar noord.

kant slappe toplaag tot ca. NAP -14,5 m is er een matig tot vast gepakte zandlaag aanwezig. Vanaf ca. NAP -14,5 m tot ca. NAP -18,0 m is er een overgeconsolideerde klei siltige laag aanwezig. Onder deze laag bevindt zich een zeer harde zandlaag waarbij conusweerstanden aanwezig zijn tot wel 40 MPa.

## Fasering van werkzaamheden

Bij de transitie van de keersluizen (Fase 1) naar een schut- en spuisluis (Fase 2) waren de al gerealiseerde funderingselementen uit Fase 1, zoals prefab betonpalen vierkant 450 mm van het bovenhoofd en een aantal kistdamconstructies bij het bovenhoofd een gegeven, zie figuur 3.

Voorafgaand aan de start van Fase 2 is begonnen met het ombouwen van de kistdammen (scope Fase 1) om goed aan te kunnen sluiten op deze fase. Er zijn damwanden getrokken en later in Fase 2 herplaatst. Daarbij zijn de tijdelijke- en definitieve verankeringsconstructies aangebracht en de kistdammen met hulp van een kraanschip aangevuld met zand vanaf NAP -6 m tot NAP +1 m. Voorafgaand aan het vullen van de kistdammen is onderzocht welk type zand hiervoor het meest geschikt was. In het laboratorium zijn bij vastgestelde (relatieve) dichtheden de sterkte- en stijfheidparameters bepaald en getoetst aan de ontwerpuitgangspunten. Na het vullen van de kistdammen is de verdichting getoetst door middel van nasonderen. In figuur 5 is de fase weergegeven waarbij de kistdammen gevuld worden. Bij bouwkuip bovenhoofd zijn ook tijdelijke stempels aangebracht om de krachten uit het aan te brengen



**Figuur 4 –**  
Representatieve  
sondering Reeve-  
sluiscomplex.

**Figuur 5 –**  
Overzicht  
ombouwfase  
(5-7-2017) t.b.v.  
aansluiting  
Fase 2.







**Figuur 6** – Overzicht (8-2-2018) ligging werkeiland RSC van zuid naar noord.

werkeiland op te kunnen nemen. Daarmee worden ook de additionele horizontale vervormingen en snedekrachten op de aanwezige prefab betonpalen beheerst.

Voor de constructie van het werkeiland is, zoals aangegeven, de slappe bovenlaag verwijderd tot maximaal NAP -9m en vervolgens zand aangebracht met een kraanschip tot NAP +1,5m. Omdat de dichtheid van het zand bij deze aanbrengmethode relatief laag is, waren additionele maatregelen nodig om een veilig en stabiel eiland te krijgen tijdens alle bouwfasen. Hier wordt in een volgende paragraaf verder op ingegaan. Op basis van sonderingen in de aanvulling en het uitvoeren van een compactieproef met de Cofra Dynamic Compaction (CDC) techniek is een geschikt plan van aanpak opgesteld om tot de gestelde verdichtingseisen te komen. Hiertoe zijn een minimale (voor de stabiliteit) en maximale verdichting (voor de installeerbaarheid van de damwanden en palen) vastgesteld. De verdichtingswerkzaamheden zijn vervolgens succesvol binnen de gestelde specificaties uitgevoerd. Voor funderingen op staal van de gebouwen is een extra verdichtingslag uitgevoerd.

Na afloop van de compactiewerkzaamheden zijn vanaf het verdichte eiland betonpalen en damwanden aangebracht inclusief de kistdammen. In figuur 6 wordt de ligging van het werkeiland weergegeven van zuid naar noord. Daarnaast is hier te zien hoe de eerste funderingspalen aangebracht werd.

De gereedgekomen bouwkuipen zijn vervolgens

ontgraven, waarna onderwaterbeton en betonwerk is aangebracht. Na het plaatsen van de sluisdeuren en het tot stand komen van het sluis terrein wordt de schutsluis naar verwachting in november 2019 opengesteld voor scheepvaart, zodat doorgedaan kan worden met de bouw van de spuisluis.

### Stabiliteit van het werkeiland

In het ontwerp van het werkeiland is in detail gekeken naar de taludstabiliteit. Er waren beperkingen en uitgangspunten vanwege het openhouden van de vaargeul. Daarnaast was er de wens om een zo groot mogelijk oppervlak van de werkvloer te krijgen in verband met de uitvoerbaarheid. Op basis daarvan is een ontwerp gemaakt met een relatief steil onderwatertalud. Dit ontwerp gaf aan dat tijdens en na het aanbrengen van het zand in het werkeiland de taludstabiliteit kritisch kon zijn in relatie tot de werkzaamheden die zouden gaan plaatsvinden.

Taludinstabiliteit kan optreden door één of meerdere oorzaken, zoals het verlies van macro-evenwicht, het uitspoelen van zand, bresvloeiing en verwekingsvloeiing. In Nederland wordt voor de laatste twee termen vaak de term zettingsvloeiing gebruikt. Het schadeprofiel na optreden is voor beide mechanismen vergelijkbaar, met zeer flauwe taluds tot gevolg. Hierbij een beknopte toelichting op deze mechanismen:

- Een statische verwekingsvloeiing is een zeer snel optredend mechanisme in losgepakt zand dat ontstaat als het zand verweekt en een permanente, aandrijvende schuifbelasting aanwezig is, als bij

een talud. Het wordt vaak aangeduid als ongedraineerd gedrag. In internationale literatuur wordt een verwekingsvloeiing waarbij zeer grote verplaatsingen kunnen optreden onderverdeeld in een "flow liquefaction" of "static liquefaction" en "cyclic liquefaction", zie bijvoorbeeld Jefferies & Been (2015). Het verschil is de manier waarop de plastische volumerekken worden gegenereerd.

- Een bresvloeiing ontstaat door een lokale versteiling (bres) die door progressief bezwijken en erosie langzaam groeit. Hij kan ontstaan in los- en in vastgepakt zand.

De ophoging van het werkeiland op de zandige ondergrond, na het verwijderen van de samendrukbare lagen, is uitgevoerd met een 1:4 talud, grotendeels onder water gelegen. Maatgevend voor de analyse van de taludstabiliteit was in dit geval naast een statische, een cyclische verwekingsvloeiing. Dit kan optreden tijdens en na het aanbrengen van het werkeiland (statisch) of op het moment dat het werkeiland / de ophoging wordt verdicht, de palen worden geheid of damwanden ingetrild (cyclisch).

De analyse van de stabiliteit voor dit werk is initieel gemaakt voor een statische verwekingsvloeiing. Een trigger hiervoor kan een plotselinge spanningsverandering zijn (tijdens ophogen, talud baggeren etc.). Naast de geometrie zijn de specifieke eigenschappen van het zand en de dichtheid van het zandpakket hierbij belangrijk. Op het moment dat deze analyses werden gemaakt, waren er geen proefresultaten op het zand beschikbaar. Daarom is gebruik gemaakt van de ervaring in andere projecten en literatuur, waarin de benodigde resultaten van veel verschillende ongedraineerde proeven zijn gerapporteerd.

De dichtheid van het gerealiseerde zandpakket is sterk afhankelijk van de aanbrengmethode. In de literatuur zijn hiervoor verschillende richtwaarden gegeven, maar zoals aangegeven in Sladen et al. (1989) kent deze relatieve dichtheid een variatie van 10% tot 70%. In de Hydraulic Fill Manual (van't Hoff & van der Kolff, 2012) zijn richtwaarden aangegeven variërend van 20% tot 60%, waarbij wordt opgemerkt dat dit zeer algemene waarden zijn en in de praktijk grote variaties kunnen optreden. Voor het aangebrachte zand is veiligheids-halve uitgegaan van een lage relatieve dichtheid waarbij het als verwekingsgevoelig wordt gemodelleerd.

Het gedrag is naast de relatieve dichtheid ook sterk afhankelijk van het spanningsniveau in het betreffende pakket. Hiervoor is de term "state parameter"  $\psi$  gehanteerd, zie Been & Jefferies (2015). Voor de talud stabiliteitsanalyses waarbij rekening wordt gehouden met het optreden van verweking, is een statisch vervloeiingsmodel ontwikkeld. Het principe van dit model berust

op het bepalen van de marge tot initiatie van een verwekingsvloeiing, zie Mathijssen et al. (2015) voor meer informatie hierover.

De conclusie uit deze analyse was dat de kans op een verwekingsvloeiing tijdens het inbrengen van de palen en damwanden te groot was, met als gevolg dat de veiligheid van de mensen en het equipment niet gewaarborgd kon worden en er kans op stremming van de vaargeul zou zijn. Ontoelaatbaar, en reden waarom, na een kostenbatenanalyse van andere mogelijkheden als een steenbestorting en/of een flauwer talud, er besloten is om voor het aanbrengen van de funderingselementen het werkeiland op de kritieke delen te verdichten met CDC. Daarbij is specifieke aandacht besteed aan het werkplan en de veiligheid van de machine en personeel tijdens de uitvoering. Omdat de machine lokaal laag frequente trillingen met hoge intensiteit genereert, was er tijdens de werkzaamheden nog steeds een kans aanwezig op een lokale verwekingsvloeiing.

Voor en na het verdichten zijn er sonderingen uitgevoerd, zie figuur 7 voor een typisch resultaat van de sonderingen. De relatieve dichtheid is bepaald met de Baldi correlatie (Baldi, 1986) aangezien deze methode het meest geschikt is bevonden voor het toegepaste zand. De relatieve dichtheid na het aanbrengen, door het er droog in

te rijden, was circa 10% en een state parameter van circa 0,05. Met de CDC is een verdichting bereikt van de losgepakte zandlagen tot een maximale diepte van circa 8 à 9m. De relatieve dichtheid na het verdichten is circa 100% dicht onder het maaiveld en neemt af tot circa 50% op de maximaal bereikte diepte.

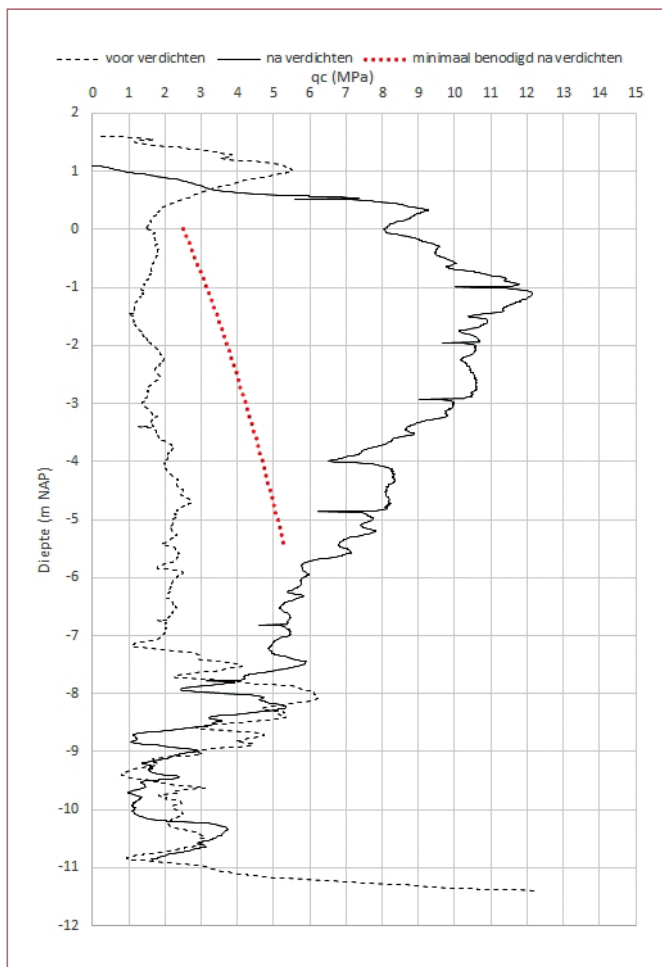
Na het verdichten bleek de kans op een taludinstabiliteit aanzienlijk verkleind (voorkomen verwekingsvloeiing), waarmee het risicoprofiel acceptabel werd bevonden om de vervolgwerkzaamheden op het werkeiland uit te kunnen gaan voeren.

### CDC compactie

De CDC techniek is een verdichtingstechniek waarbij, door middel van het herhaaldelijk laten vallen van een 16 tons valgewicht op een met de grond in contact blijvende voet, de ondergrond wordt verdicht tot een diepte van 7 à 8 meter (zie figuur 8 en 9). Het gebruik van GPS positionering en het inladen en visueel weergeven van tekeningen aan de machinist geven deze de mogelijkheid de compactie gecontroleerd op vooraf bepaalde locaties te laten plaatsvinden. Naast positie wordt ook de compactiedata direct visueel gemaakt aan de machinist, waardoor er gewerkt kan worden op diverse stopcriteria als bijvoorbeeld de zinking van de voet (vergelijkbaar met het kalenderen tijdens het heien van funderingspalen).

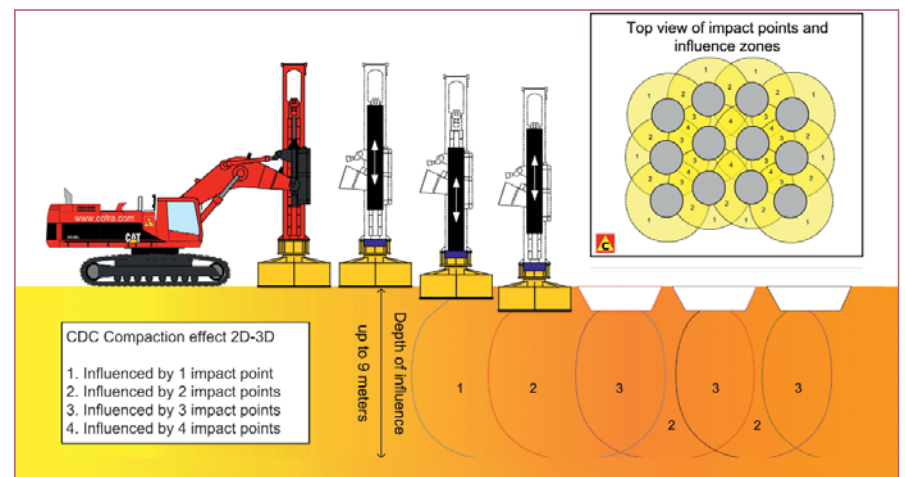
Voor aanvang van de verdichtingswerkzaamheden werd eerst gestart met een compactieproef. Dit is noodzakelijk omdat de benodigde verdichtingsparameters van meerdere factoren afhangen. Bijvoorbeeld de eisen in relatie tot de initiële pakking, de waterstand, de hoeveelheid fines, de doorlatendheid en hoekigheid van het zand. Het primaire doel van deze proef was om de hoeveelheid energie (het aantal slagen onder volle valhoogte) en de gridafstand van de compactiepunten te bepalen om in dit geval binnen de vooraf bepaalde bandbreedte te blijven. Deze was enerzijds ingegeven door de minimaal te behalen relatieve dichtheid vanuit stabiliteitsoogpunt en anderzijds door de wens om, bij het voorziene equipment, geen vertraging te gaan ondervinden met installeerbaarheid van de funderingspalen en damwanden. De minimaal benodigde conusweerstand is weergegeven in figuur 7. De maximaal benodigde conusweerstand was vastgesteld op 10 MPa waarbij kleine overschrijdingen zijn toegestaan.

De locatie van de proef werd gekozen in de sluis-kolk, buiten de kritische zone van de stabiliteit en het toekomstige werk. Bij aanvang van de proef werden de eerste sonderingen van de aanvulling gemaakt, waarna direct de uitvoering van de proef werd gestart. Bij de eerste slagen met de hamer bleek dat door de zeer losse pakking van het zand een snelle en grote volumeverandering optrad met hoge wateroverspanningen vervloeiing tot gevolg. In samenspraak met de geotechnische ingenieurs van Cofra en Isala Delta is de werkvolgorde van de compactie aangepast om op een veiliger manier de eisen te behalen. Door eerst een 'voorbehandeling' aan het zand te geven met een minimale energie door aanpassing van de valhoogte werd vervloeiing voorkomen en is de grond in een hogere dichtheid gebracht, waarop het mogelijk was om met volle valhoogte te gaan slaan. Deze volle valhoogte was noodzakelijk om de benodigde diepte-invloed te halen.



**Figuur 7 – Sondering voor en na verdichten op dezelfde locatie.** De bodem bestaat met name uit zand met enkele dieper gelegen dunne siltlaagjes vanaf een diepte van circa NAP-7m à NAP-8m.

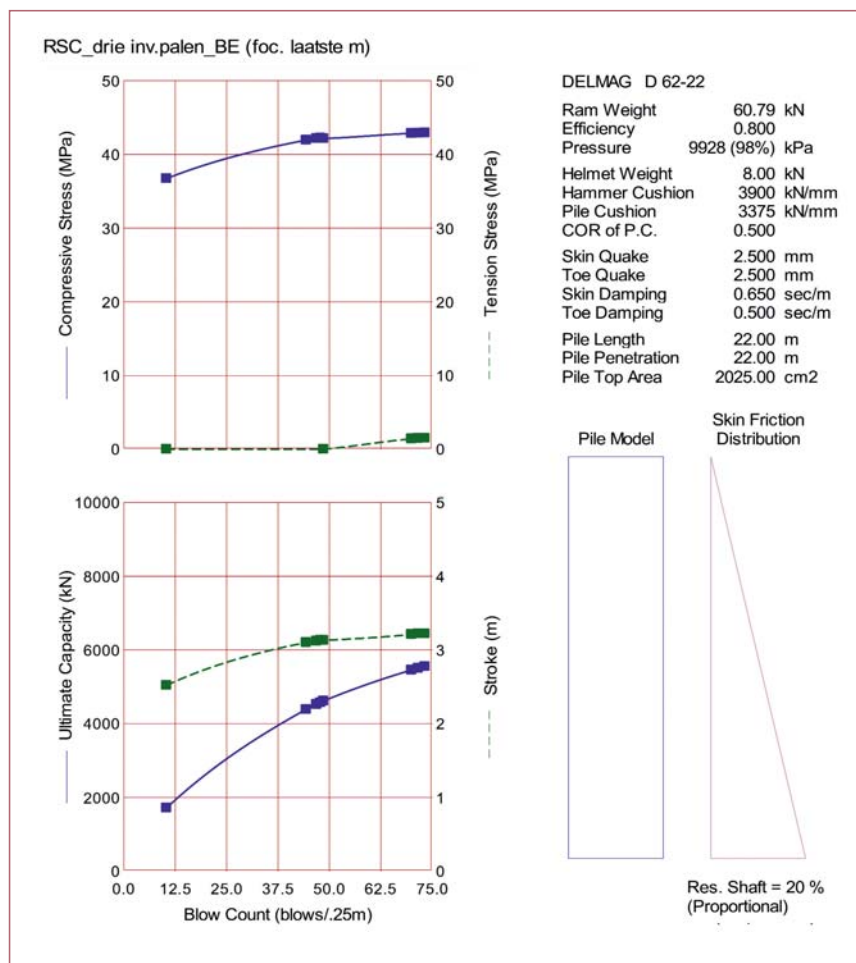
**Figuur 8 – Schematische weergave CDC techniek.**







**Figuur 9** - CDC uitvoering op het werkeiland (9-1-2018).



**Figuur 10** - Inbrengbaarheidsanalyse prefab betonpaal vierkant 450 mm bij drie invloedspalen.

In totaal zijn vier proefvakken geslagen met verschillende energieniveaus, op basis waarvan een werkmethode voor de compactie is bepaald. Op basis van de voor- en na- CPT's is vervolgens besloten om in het werk voor de tweede passage een 3,25m stramen en 25 slagen op volle valhoogte toe te passen. De resultaten in het werk bleken goed overeen te komen met de proefresultaten.

In eerste instantie is gekozen om de CDC techniek enkel toe te passen in het gebied waar de stabiliteit van het onderwatertalud gevaar zou kunnen

lopen tijdens het inbrengen van de prefab betonpalen en damwanden. Dit is gedurende het werk, mede door het verkregen inzicht in de pakking van het zand, aangepast met twee extra gebieden:

- De ondergrond van de gebouwen. Hier is gekozen om een maximale verdichting toe te passen om een paalfundatie uit te sparen. Daarmee is een meer circulaire oplossing van de fundatie gerealiseerd;
- De overige omliggende gebieden rond de gebouwen, om daarmee een veilig en begaanbaar werkeiland te creëren voor de bouwfase, maar ook

voor de toekomstige activiteiten van de opdrachtgever.

Er is voor beide gebieden een specifieke werkmethode gekozen.

Om tijdens de compactie naast het talud de kans op bezwijken te minimaliseren is een werkvolgorde gebruikt waarbij het overspannen water de ruimte en de tijd kreeg om af te stromen. Goede werk-instructies, een specifieke positionering en werkvolgorde van de kraan en intensieve monitoring van de compactie zorgden voor een veilige en werkbare uitvoeringsmethode. De combinatie van de maatregelen heeft een uitstekende werking gehad.

Uitvoering van CDC compactie met behulp van GPS positionering maakte het mogelijk om zonder uitzetten de verschillende stramenmaten te slaan. Zo werd het compactiegrid rond de damwanden vergroot om de installeerbaarheid daarvan niet nadelig te beïnvloeden. Verder zorgt het systeem voor de registratie van het uitgevoerde werk conform het plan.

### Installatie palen en damwanden

De inbrengbaarheid van de funderingselementen (damwanden AZ18-700 / AZ26-700 / AZ28-700 en prefab betonpalen vierkant 450mm) zijn in de voorbereiding uitvoerig beschouwd. Daarbij is ook de opgedane ervaring uit andere projecten en Fase 1 (Reevedam) gebruikt bij de inbrengbaarheidsanalyses voor Fase 2. Bij deze analyses is ook gebruik gemaakt van het computerprogramma "GRLWEAP". Dit is een eendimensionaal golf vergelijkinganalyseprogramma om bewegingen en krachten in de funderingspaal te simuleren, als deze wordt aangedreven door een impact- of vibratiehamer.

De heiveerstand voor de funderingspalen is vooraf bepaald aan de hand van het grondmodel voor het voorspellen van de paal-inbrengbaarheid op basis van CPT interpretaties zoals beschreven door T. Alm en L. Hamre (2001). Hierbij is ook onderscheid gemaakt in de hoeveelheid invloedspalen die aanwezig zijn tijdens installatie. Dit resulteert in een additionele verdichting (f1 factor uit NEN 9997-1) van het niet cohesief grondpakket, wat resulteert in een hogere heiveerstand. In figuur 10 worden de resultaten van de inbrengbaarheidsanalyse gepresenteerd waarbij maximaal drie invloedspalen aanwezig zijn. Links in figuur 10 worden de resultaten van de druk- en trekspanningen in de paal en de Blow Count gecombineerd met de heiveerstand en valhoogte over de Drive weergegeven. Rechts in figuur 10 zijn de invoer gegevens van de analyse weergegeven.

In figuur 11 is te zien hoe de betonpalen van het benedenhoofd vanaf het werkeiland met een 100 tons kraan verdiept worden weggeslagen. Het werknivo is tijdens installatie ca. NAP +1 m en paalpuntniveau bedraagt NAP -21 m. De gemiddelde waterstand op het Drontermeer bedraagt ca. NAP

0 m. Tijdens de uitvoering van de funderingspalen en damwanden vonden visuele inspecties plaats om stabiliteit van het werkeiland extra te waarborgen. Daarbij is vastgesteld dat er zich tijdens de uitvoering van de funderingselementen geen scheuren of stabiliteitsproblemen waren.

In figuur 12 wordt een samenvatting gegeven van de in- en output van de inbrengbaarheidsanalyses Fase 1 en 2 en de daarbij opgedane praktijkervaringen.

Geconcludeerd wordt dat de resultaten uit de inbrengbaarheidsanalyses zowel in Fase 1 als Fase 2 goed overeenkwamen met de praktijk. Het loont om een uitgebreide inbrengbaarheidsanalyse uit te voeren in het VO. Hiermee worden de risico's met betrekking tot paalinstallatie goed in kaart gebracht. Faalkosten worden daarmee voorkomen.

## Conclusie

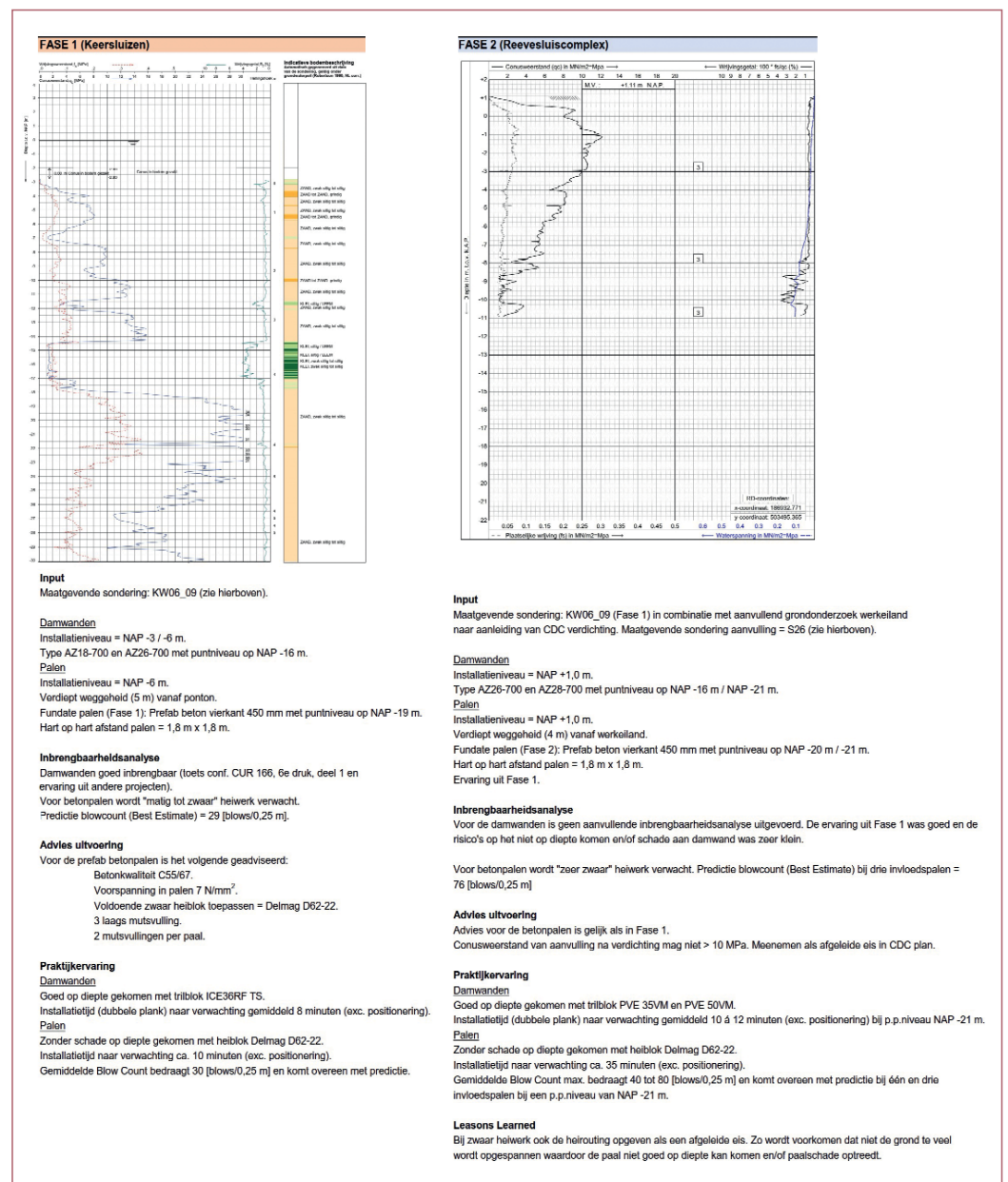
In de ontwerpfase is onderzoek gedaan naar de verwekingsgevoeligheid van het aan te brengen losgepakte zand in het werkeiland. De conclusie uit dit onderzoek was dat de kans op verwekingsvloeiing tijdens inbrengen van de palen en damwanden te groot was en de stabiliteit tijdens uitvoering niet gewaarborgd kon zijn. Om deze reden is er aanvullende verdichting van het losgepakt zandpakket uitgevoerd met compactiemethode CDC. Ook zijn de locaties waar gebouwen moesten komen extra verdicht en is daarmee een paalfundatie uitgespaard gebleven. Hiermee is een meer circulaire oplossing van de fundatie gerealiseerd. De funderingspalen en damwanden van de schutsluis zijn vanaf een stabiele ondergrond aangebracht. De inbrengbaarheid van de funderingspalen en damwanden is goed verlopen. De praktijkervaring kwam goed overeen met de inbrengbaarheidsanalyses.

## Referenties

- Baldi, G. (1986). Interpretation of CPT's and CPTU's. 2nd Part: Drained penetration of sands. Proc. IV Int. Geotech. Sem., Singapore.
- van't Hoff, J., & van der Kolff, A. N. (2012). Hydraulic Fill Manual: For Dredging and Reclamation Works. CRC press.
- Jefferies, M., & Been, K. (2015). Soil liquefaction: a critical state approach. CRC press.
- Mathijssen, F.A.J.M., de Jager, R.R., & Hooiveld, B.J. (2015). Reliability Based Design of Dredge Sludge Depot for Mechanism Static Liquefaction. IOS Press.
- Sladen, J. A., & Hewitt, K. J. (1989). Influence of placement method on the in situ density of hydraulic sand fills. Canadian Geotechnical Journal, 26(3), 453-466.
- Alm, T., & Hamre, L. (2002). Soil model for pile driveability predictions based on CPT interpretations. In Proceedings of The International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (Vol. 2, pp. 1297-1302). AA BALKEMA PUBLISHERS. ●



Figuur 11 – Installatie prefab betonpalen vierkant 450 vanaf werkeiland bij het benedenhoofd (15-2-2018).



Figuur 12 – Overzicht inbrengbaarheidsanalyses en ervaringen uit Fase 1 en 2.