

PNEUMATISCH AFZINKEN 2.0: EEN WERELDRECORD CAISSONPROJECT DOOR GROOTSCHALIGE INNOVATIES

EVOLUTIE IN THEORIE EN REVOLUTIE IN PRAKTIJK

Bartho J. Admiraal, Volker Staal en Funderingen, Dordrecht, The Netherlands, b.admiraal@vsf.nl

Antoine Feddema, Van Hattum en Blankevoort, Vianen, The Netherlands, afeddema@vhbinfra.nl

ABSTRACT

Pneumatisch afzinken van caissons is vanaf het midden van de 19e eeuw ontstaan. De techniek is sinds die tijd toegepast op vele projecten voor ondergrondse bouw tot dieptes van meer dan 20 meter onder het grondwatervniveau.

Volker Staal en Funderingen, een specialistische funderingsaannemer in Nederland, kreeg in 2015 twee contracten voor het afzinken van grote caissons. Twee caissons van 14 x 29 m in Hamburg (Duitsland) als fundering voor brugpijlers, af te zinken tot een waterdiepte van meer dan 30 m, en twee extreem grote caissons voor de nieuwe zeesluis IJmuiden. De caissons in IJmuiden betroffen de twee sluisdeurkassen, beiden tot een waterdiepte van ca. 25 m. Het buitenhoofd met een oppervlakte van 26x81 m en het binnenhoofd zelfs 55x81m, wat een wereldrecord voor pneumatisch afzinken betekent.

Met dieptes en afmetingen als deze is de inzet van personeel de belangrijkste beperkende factor voor de productie en daarmee ook planning en kosten, ondanks alle ontwikkelingen tot nu toe. Er is daarom besloten om een op afstand bestuurbaar proces te ontwikkelen, inclusief de benodigde apparatuur en monitoringsystemen. Niet alleen de controle van kinematica van de apparatuur in de werkkamer en de productie parameters van de ontgraving, maar ook van het gedrag van caissonconstructies was essentieel voor de goedkeuring van deze innovatieve uitvoeringsmethode. Door de indeling en de afmetingen was m.n. het grootste caisson uiterst gevoelig voor torsie- en buigmomenten. Een verplaatsing gecontroleerde uitvoering volgens de 'observational method' was daarom vereist. Geotechnisch was een nieuwe aanpak nodig voor het modelleren van de semi-continue faalmechanismen van de grond. Dit om de gevoeligheid van het graafproces te begrijpen en grenswaarden voor de uitvoering te definiëren.

In dit artikel worden deze constructieve en geotechnische vraagstukken toegelicht samen met de ervaringen tijdens de uitvoering.

Trefwoorden: pneumatisch caisson; op afstand bestuurbare uitvoering; sterkte en falen van fundering op staal; monitoring; observational method.

PNEUMATISCH AFZINKEN VAN CAISSONS

Het afzinken en specifiek pneumatisch afzinken van caissons is een relatief onbekende techniek in de wereld van diepe funderingen. Deze techniek wordt echter al meer dan 200 jaar toegepast. Het woord 'pneumatisch' verwijst naar het toepassen van verhoogde luchtdruk (hyperbaar) in de werkkamer onder een caisson. Zo wordt een droge werkruimte gecreëerd waar de werkzaamheden worden uitgevoerd om de grond onder het caisson te verwijderen. Tot halverwege de vorige eeuw vonden er regelmatig ernstige ongelukken plaats met de caissonarbeiders, die belast waren met het ontgraven. Dit is de reden waarom de term 'caissonziekte' (decompressieziekte) berucht werd zonder dat mensen wisten wat de oorzaak was, hoe het te voorkomen was of hoe je het moest behandelen.

In Nederland werden vanaf het begin van de 20e eeuw wettelijke voorzorgsmaatregelen genomen. Kennis en medisch inzicht veranderden pas echt na de Tweede Wereldoorlog met de ontwikkelingen

op het gebied van duiken en ook door de professionele inzet op grote maritieme bouwprojecten zoals de bekende Deltawerken in de jaren 1970 en '80 voor hoogwaterbescherming langs de Noordzeekust. Tegenwoordig is de betrokkenheid van gespecialiseerde en gecertificeerde duikartsen verplicht. Er zijn decompressie- en behandeltablets ontwikkeld met specifieke procedures voor caissonwerkers. Met tienduizenden succesvolle 'droogduik' acties bij tal van projecten is bewezen dat caissonwerk veilig kan worden uitgevoerd.

Het proces van pneumatisch afzinken van caissons wordt gekenmerkt door het uitgraven onder de vloerplaat van het caisson in wat bekend staat als "de werkkamer". De luchtdruk in de werkkamer wordt in evenwicht gehouden met de bestaande (grond)waterdruk aan de teen van de snijrand rondom de onderkant van het caisson waardoor een droge werkkamer ontstaat. Het evenwicht van het hele systeem wordt gevonden in de balans tussen het gewicht van het caisson, de luchtdruk in de werkkamer, wrijving langs de buitenkant van het caisson en de ondersteunende grondberm in de buurt van de snijranden.

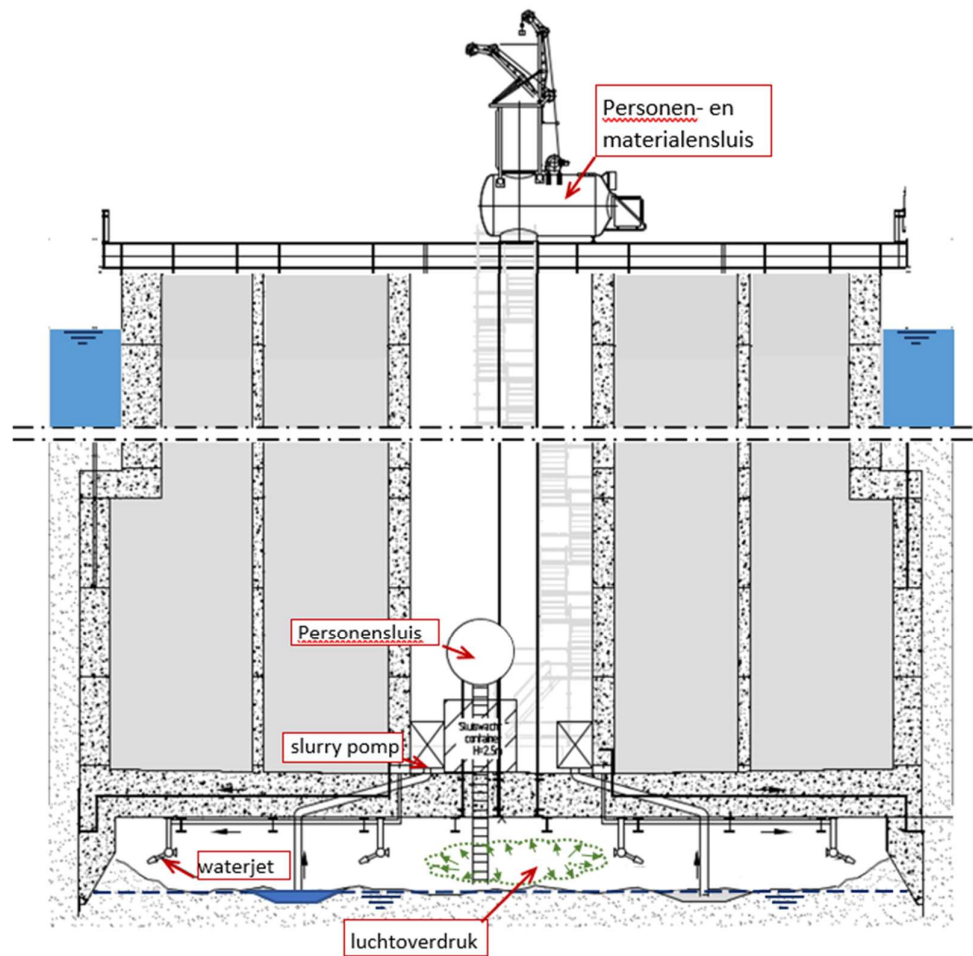


Fig. 1 Voorbeeld van traditionele lay-out pneumatisch afzinken van caissons

Werken onder overdruk is echter verre van ideaal, ook al zijn de risico's voor de gezondheid tegenwoordig minimaal, dankzij veilige decompressietabellen en duikmedische begeleiding. Het werk is arbeidsintensief, met name in samenhangende grond en op diepte. Een grotere diepte betekent immers een grotere (water)druk en dus is een hogere luchtoverdruk nodig om de werkkamer droog te houden.

PNEUMATISCH AFZINKEN 2.0

Tot nu toe vond het afzinken in Europa plaats door caissonwerkers te gebruiken voor graafwerkzaamheden. In het begin werden deze werkzaamheden onder het caisson handmatig gedaan, later met elektrische, hydraulische of pneumatische apparatuur.

Zandgrond wordt meestal losgemaakt met behulp van waterstralen en het mengsel van water en grond wordt vervolgens buiten het caisson naar het slibdepot gepompt voor sedimentatie. (Zie Fig. 1) In cohesieve grond of harde lagen worden vaker kleine graafmachines gebruikt en wordt de grond verwijderd met kubelemmers die telkens door een materiaalluchtsluis moeten worden gehesen.

De werknemers klimmen na elke dienst uit de werkkamer naar de personeelssluis waar decompressie in stappen op een gecontroleerde manier plaatsvindt totdat de atmosferische druk is bereikt. Sinds het einde van de 20^e eeuw wordt het ademen van medicinale zuurstof gebruikt om het verminderen van stikstof in het lichaam te versnellen. Zoals reeds vermeld is werken in hyperbare omstandigheden zeker niet ideaal. Het is arbeidsintensief en de communicatie met de caissonwerkers is -vanwege de geïsoleerde werkkamer- alleen mondeling mogelijk met speciale telefoons. En dit gaat ten koste van de efficiëntie. Maar de grootste beperking ligt in de gereduceerde werktijden die toenemen met grotere diepten. Bij dieptes vanaf 9 meter wordt de effectieve werktijd sterk verminderd en vanaf 15 meter neemt deze reductie exponentieel toe, mede afhankelijk van de verblijftijd onder overdruk (zie Fig. 2).

Met projecten zoals de Nieuwe Kattwykbrug in Hamburg (Duitsland) [1] en de deurkassen van de nieuwe Zeesluis IJmuiden in het portfolio van Volker Staal en Funderingen, werd de mogelijkheid geboden om belangrijke innovaties te realiseren in de afzinktechniek.

De doelstelling was duidelijk: een op afstand bestuurbaar afzinkproces, zodat caissonwerkers alleen onder overdruk hoeven te werken voor (de)montage en onderhoud. Het hele proces van het vrij graven van de grond, het transporteren hiervan in de werkkamer en het verwijderen van de grond uit de werkkamer is geanalyseerd en bestudeerd op mogelijkheden. Tijdens het engineeringsproces zijn meerdere methoden nader uitgewerkt, m.n. de aandrijving van de beweegbare componenten en de monitoringstechnieken. Een belangrijke valkuil in de praktijk is het proberen om een machine te bouwen die bijna alles kan en overal voor geschikt is. Hetgeen gewoonlijk wordt aangeduid als *'het schaap met 5 poten'*, wat in de praktijk vaak meer mankementen dan succes oplevert.

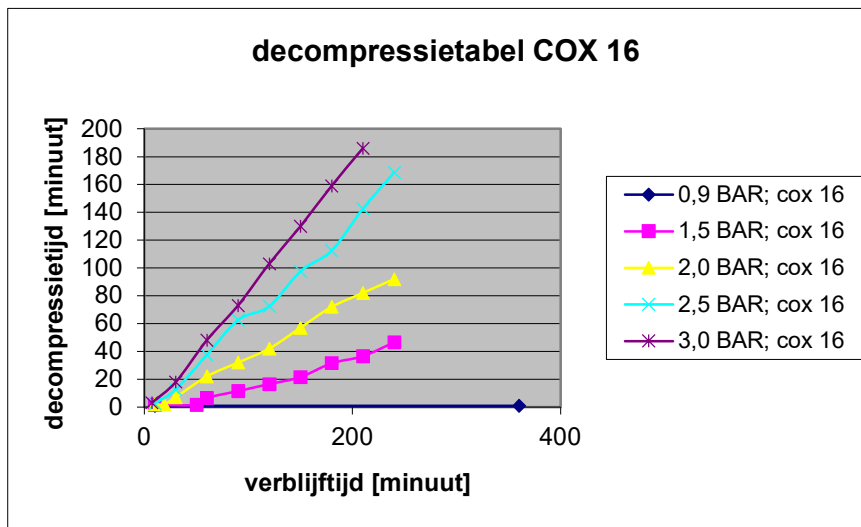


Fig. 2 Decompressietijd versus de verblijftijd bij diverse overdruksituaties en een intervaltijd van minimaal 16 uur.

Er is daarom gestuurd op het ontwerpen en bouwen van een machine die voor 100% voldoet aan de gestelde eisen en voor ongeveer 80% aan de wensen. De focus lag hierbij op robuustheid en betrouwbaarheid in combinatie met een adequate productiesnelheid. Het startpunt was het

onderzoeken van de bestaande technologieën voor grondverzet, mijnbouw en baggeren gerelateerd aan de grondgesteldheid in deltagebieden. Dit leidde uiteindelijk tot de keuze voor een snijkoppomp geïnstalleerd aan een uitschuifbare arm, 360° roterend. In verband met de grote caissons in IJmuiden moesten de armen tot maar liefst 14 m kunnen worden uitgeschoven (zie Fig. 3). Dit maakt het direct baggeren van grondmateriaal binnen een grote reikwijdte mogelijk. Hiervan waren 4 complete sets nodig.

Voor het gebied buiten de reikwijdte van de armen werd gekozen voor een combinatie van krachtige op afstand bestuurbare waterjets, gemonteerd aan het plafond van de werkkamer. Deze worden gebruikt om de grond buiten het bereik van de uitschuifbare armen los te snijden en de grondwater slurry te laten stromen naar de snijkoppomp aan de baggerarm. De keuze voor baggerpompen werd bepaald door de criteria: beperkte grootte en gewicht voor installatie en demontage tegenover gewenste pompcapaciteit en vermogen voor voldoende druk en stroomsnelheid in de lange afvoerleidingen.



Fig. 3 Impressie van één van de twee werkkamers in het caisson van de binnendeurkas na installatie (pomp (zonder snijkop) aan de baggerarm, camera (rechts), waterjets en ondersteunende grondbermen (foto: VSF)

Naast de ontwikkeling van sensoren in de hydraulische aandrijving van de verschillende motoren en bewegende onderdelen, werd ook onderzoek gedaan naar de ontwikkeling van camera's die geschikt zijn voor de zware omstandigheden in de werkkamer. Niet alleen de verhoogde luchtdruk is een factor waarmee rekening moet worden gehouden, maar ook met nevel die ontstaat wanneer er kleine drukverhogingen/drukvariaties optreden. Bovendien spatten er tijdens het jetten voortdurend gronddeeltjes op die de lens vervuilen en zorgen tegenlicht en weerspiegelingen in het water voor verstoring van het zicht.

Voor op afstand bestuurbaar opereren dienen alle bewegingen van de afzonderlijke componenten te worden gemeten, evenals de procesparameters van de aandrijving van motoren en pompen, maar ook de efficiëntie van het besturingssysteem. De voornaamste functie is de productiviteit van verwijdering en afvoer van grond. Voor een systeem gebaseerd op het verpompen van een slurry wordt dit bepaald door het debiet en het volumegewicht van het vloeibare mengsel. Hier moet continu op worden gestuurd voor een optimale productie, maar ook om verstoppingen tegen te gaan. Omdat de condities in de leidingen snel kunnen variëren, is monitoring hiervan essentieel. Programmeren, testen, nieuwe wiskundige benaderingen, extra sensoren, etc. is de lus die men in het ontwikkelingsproces moet doorlopen voordat dergelijke complexe systemen naar tevredenheid zullen functioneren.

Uitgebreid testen en uitgebreide beoordelingen door verschillende experts waren een integraal

onderdeel van deze ontwikkeling. Daarnaast zijn prototypes van de verschillende technologieën getest in praktijkopstellingen. Er werd een testlocatie gebouwd met een luchtsluis om alle activiteiten in de werkkamer te simuleren. Op deze manier werden de medewerkers niet alleen getraind in het bedienen van het systeem, maar ook in het installeren en demonteren van de apparatuur in een geïsoleerde werkkamer. Het ontwikkelingstraject kende dus meerdere parallel lopende onderzoeken en testprogramma's om tot een goed functionerend systeem te komen.

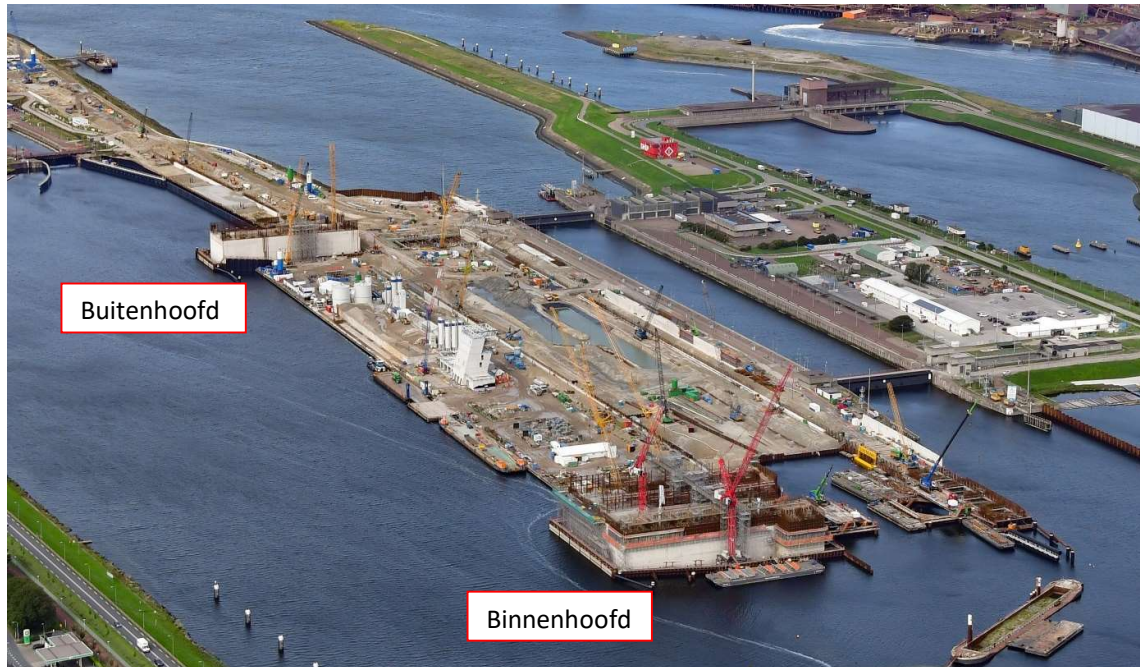


Fig. 4 Overzicht bouw van de nieuwe Zeesluis IJmuiden (foto: Topview Luchtfotografie)

NIEUWE ZEESLUIS VOOR DE HAVEN VAN AMSTERDAM

Om de haven van Amsterdam bereikbaar te houden voor steeds groter en breder wordende zeeschepen is een nieuwe zeesluis in het sluisencomplex van IJmuiden gebouwd. Met de ingebruikname op 26 januari 2022 is dit de grootste zeesluis ter wereld met afmetingen van 500 x 70 x 18 meter van de kolk. De nieuwe zeesluis vervangt de Noordersluis die inmiddels bijna 100 jaar oud is.

Om trillingen in de omgeving van de oude sluisen en extreem diepe bouwputten in open water tijdens de bouw te voorkomen, is besloten de deurkamers voor de sluishoofden als pneumatische caissons te bouwen (zie Fig. 4).

Zoals hierboven geschreven behoren deze caissons tot de grootste ter wereld. De kas van het binnenhoofd biedt ook ruimte voor een reservedeur. Daarnaast is daar een zgn. Appendix constructie aan verbonden die als 'open caisson' gelijktijdig moet worden afgezonken (zie Fig. 4 en 5). Dit caisson weegt 150.000 ton en moest worden afgezonken van NAP -7,50 m tot NAP -25,55 m. Het afgezonken caisson is daarna in situ verder opgebouwd met een extra bouwlaag tot NAP +5 m.

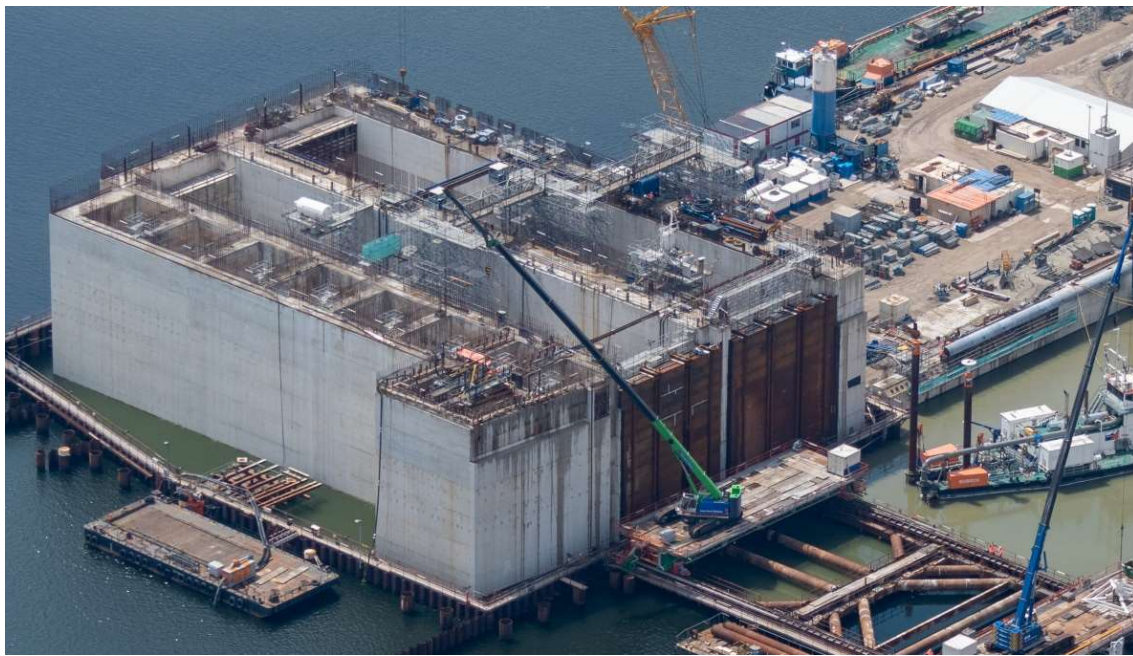


Fig. 5 Caisson binnenhoofd voorafgaand aan het afzinken (foto: Topview Luchtfotografie)

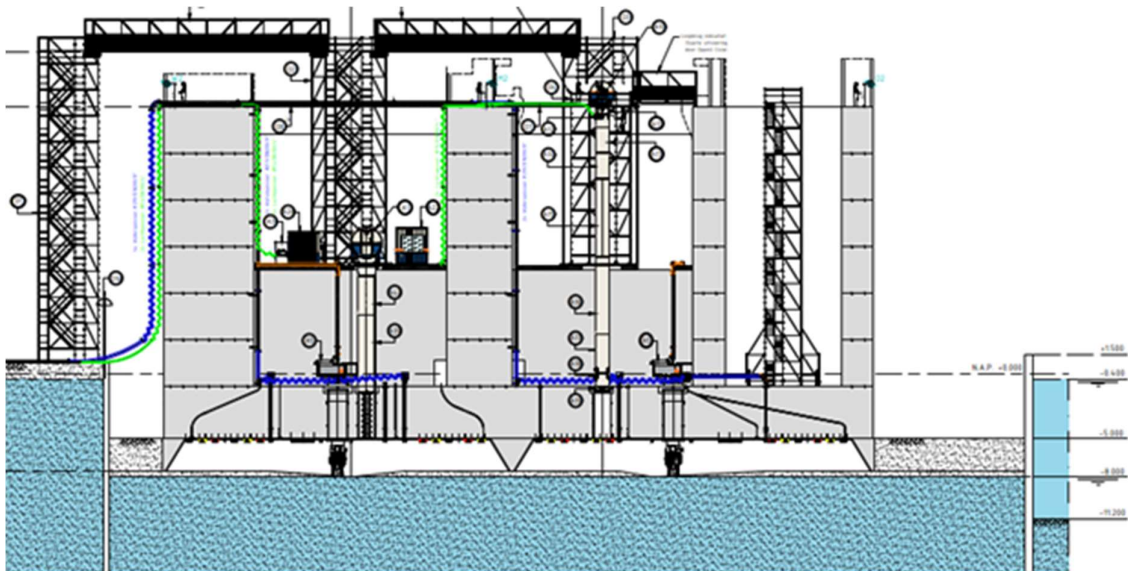


Fig. 6 Doorsnede van caisson binnenhoofd (Appendix niet ingetekend)

In de meeste gevallen worden pneumatische caissons gekenmerkt als vrij kleine stijve, gesloten dozen, die bestand zijn tegen de extreme belastingen tijdens het afzinken. De constructieve kenmerken van een gesloten doosvormige structuur zorgen voor een enorme robuustheid en stijfheid van een caisson. De caissons in IJmuiden zijn, naast hun extreme afmetingen en gewichten, van beperkte sterkte en stijfheid met betrekking tot dwarsbuiging en torsie, in tegenstelling tot gesloten doosvormige structuren.

Caissons moeten ontworpen worden op de uiterst mogelijke oplegdrukken onder de snijranden als gevolg van potentieel maximale variatie in verschillen in verticale bewegingen en daarmee overeenkomende funderingsdrukken. In eerste instantie zijn de standaard belastingschema's in het ontwerp toegepast, zoals o.a. bekend uit de ROK volgens de schema's in Fig. 7.

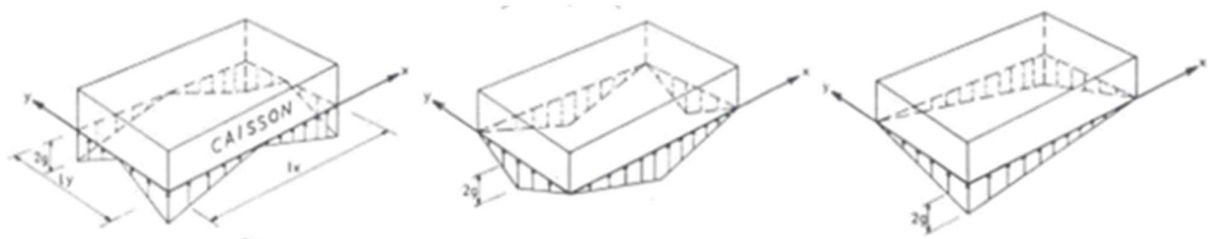


Fig. 7 Belastingeschema's funderingsdrukken caisson tijdens het afzinken

Toepassing van deze belastingschema's zou echter leiden tot overschrijding van de constructiesterkte van de caissons, zelfs bij de aanwezige vloerdikte van 4 m en wanden tot een dikte van 7 m. Een open U-vormig caisson is immers aanzienlijk kwetsbaarder voor belastingen of vervormingen die kunnen optreden tijdens het afzinkproces, met name torsie. De sluisdeurkas binnenhoofd vormde zelfs een nog grotere uitdaging. Dit caisson moet twee deuren in afzonderlijke compartimenten mogelijk maken: een functionele- en een reserve deur, waarvan de laatste -indien nodig- in droge omstandigheden moet worden onderhouden. Het heeft om die reden een dubbele U-vorm met een zware longitudinale binnenwand (dikte 6 m, hoogte 18 m), zie Fig. 5 en 6.

Het gewicht van deze wand op een vloer met een spanwijdte van ongeveer 40 m creëerde de noodzaak voor een extra snijrand die de werkkamer onder het caisson in tweeën scheidde, zie Fig. 6. De opwaartse reactiekrachten van de grond kunnen sterk afwijken, afhankelijk van de variaties in de weerstand van deze grondlagen en de variatie in breedte van de grondberm langs de snijranden. De constructie is dus statisch onbepaald. De hieruit volgende potentiële variaties in buigmoment in de vloerplaat waren veel te hoog, zelfs voor een vloer met een vloerdikte van 4 meter.

Het specifieke van afzinken en wat het geotechnisch ontwerp buitengewoon maakt, is het feit dat grondspanningen normaal gesproken worden ontworpen op een veilige weerstand tegen overbelastingen of grote vervormingen. Voor het afzinken van caissons is echter het gecontroleerd laten falen van de grond vereist om zakking te verkrijgen. Dit betekent dat een continu evenwicht tussen een gecontroleerd faalmechanisme en het in evenwicht houden van het caisson ervan vereist is. Normaal gesproken wordt dit beoordeeld aan de hand van vuistregels, getoetst met de ervaring van vele caissonprojecten, dat falen plaatsvindt met kleine stappen/zakken van 10 à 20 mm. Maar voor deze caissons met buitensporige afmetingen en dito gewichten was een nieuwe afzinkstrategie nodig om de vervormingen en daarmee de spanningen in de constructie te beheersen. Daarom zijn verdiepende studies gestart om inzicht te krijgen in de sterkte en het gedrag van de grond langs de snijranden tijdens en ná bezwijken.

GEOTECHNISCHE ANALYSES EN NUMERIEKE SIMULATIES

Het was noodzakelijk om, naast de sterkte en toelaatbare vervormingen van het caisson, cruciale kennis te verkrijgen van het gedrag en de sterktes, voorafgaand aan en tijdens de afzinkoperatie. Tijdens het afzinken wordt namelijk de berm breedte semi-continu in stappen verkleind. Dat gebeurt nooit gelijktijdig en in dezelfde mate langs alle snijranden of over de volle lengte hiervan. De funderingsdrukken kunnen daarmee variëren over een snijrand en dat met het gegeven dat een constructie op 3 steunpunten impliciet statisch onbepaald is. Kennis moest worden verkregen wat de mogelijke variaties kunnen zijn en welke eisen gesteld moesten worden aan de uitvoering om optredende spanningen in de constructie als gevolg van scheefstand, buiging en torsie tijdens het afzinken te beheersen. Geavanceerde Eindige Elementen berekeningen werden uitgevoerd voor een beter begrip van het gedrag van de grond onder een caisson tijdens het bezwijken van de ondersteunende grondbermen. Over het algemeen worden de minimale en maximale berm breedtes

bepaald op basis van de theorie voor een ondiepe fundering volgens Brinch-Hansen. Deze methode beschrijft echter de staat op moment van bezwijken van de grond (ultieme draagkracht), terwijl bij afzinken dit mechanisme zich volledig ontwikkelt. Daarnaast maakt ook de vervorming van de helling langs het kritische schuifvlak van de steunberm deel uit van het mechanisme. Bezwijken van het talud zal eerder optreden dan de bezwijken langs de diepere glijvlakken. Wanneer de uiteindelijke draagkracht is bereikt, zullen grote vervormingen optreden. Om het optreden van grote vervormingen te voorkomen, is het gebruikelijk om de toegestane korreldruk te beperken tot ongeveer 500 kPa, afhankelijk van de grondsterkte. Dit zal ervoor zorgen dat hooguit alleen lokale afschuiving zal optreden, met kleinere zettingen als gevolg. Voor dit project werd de maximale korreldruk aanvankelijk conservatief vastgesteld op 400 kPa om een beheerst afzinkproces te garanderen en scheurvorming van de betonnen caissons te voorkomen. Het beperken van de korreldruk tot 400 kPa zou echter leiden tot zeer grote bermbreedtes aan het begin van het afzinkproces als er nog geen luchtoverdruk in de werkkamer aanwezig is. De ruimte in de graafkamer zou te klein zijn om de essentiële onderdelen van de benodigde apparatuur te installeren. Het was dus belangrijk om de ontwikkeling van de bodemreacties en caissonvervormingen tijdens het afzinkproces beter te begrijpen om schade aan de caissons te voorkomen.

Om een betrouwbaarder inzicht te krijgen in de bodem in bezwijkomstandigheden is een onderzoeksprogramma gestart in de mechanismen van de aanwezige bodem [2]. Het doel van het onderzoek was het verkrijgen van een betrouwbare toepassing van het relatief eenvoudige Brinch Hansen draagkrachtmodel om in relatief korte tijd een groot aantal scenario's en variaties te kunnen analyseren. Dit werd bereikt met een 3-stappenbenadering:

1. Eindige Elementen Analyses met Abaqus Explicit (grote rekken) om de grondverplaatsingen en spanningen voorbij falen voor twee penetratiedieptes te bestuderen;
2. Eindige Elementen Analyses met Plaxis. Op basis van de resultaten van stap 1 is een EEM-model ontwikkeld om meerdere bermbreedtes en penetratiedieptes te bestuderen;
3. Draagkrachtanalyses volgens Brinch-Hansen met begrensde gronddruk op basis van de resultaten van stap 1 en 2.

In Tabel 1 wordt de bodemopbouw weergegeven die is gebruikt in alle drie de verschillende grondmodellen en de sterkteparameters voor de Brinch-Hansen-analyses. Deze laatste zijn gebaseerd op laboratoriumtests.

bovenkant grondlaag [mNAP]	grondsoort	γ_{sat} [kN/m ³]	c' [kPa]	ϕ' [°]	s_u [kPa]
-5,0	aanvulzand ($R_e=50\%-60\%$)	21	0	36	-
-11,5	silt	19	1	26	20
-13,5	Vastgepakt zand ($R_e=60\%-85\%$)	21	0	40	-
-15,5	zand, kleiig, siltig	20	1	30	-
-17,0	klei	18	10	24	110
-17,7	Vastgepakt zand (Boxtelformatie)	21	0	40	-

Tabel 1 Bodemopbouw en grondparameters voor D-Foundations

FE-ANALYSES MET ABAQUS

Berekening van vervormingen met de grond in een spanningstoestand vergelijkbaar met de afzinksituatie is meestal niet mogelijk met reguliere eindige elementenmodellen, omdat de vervormingen van de grond te groot zijn en het berekeningsproces eenvoudigweg stopt. Voor de Zeeluis IJmuiden heeft de Technische Universiteit Hamburg (TUHH) een Abaqus / Explicit model gemaakt om het gedrag van de grond tijdens het falen onder een caisson te kunnen begrijpen.

Uit de analyses blijkt dat door het zakken van het caisson de ondergrond onder de snijranden wordt verdicht, samengeperst en vervormd. De zone van verhoogde verticale spanningen bevindt zich rond de punt van de snijrand en breidt zich uit naar het gebied onder de hellende binnenzijde van de snijrand. Fig. 8a laat zien dat tijdens het afzinken de grond onder de snijrand en grondberm wordt verdicht. Het bezwijken van de grond begint met het afschuiven van het talud van de grondberm, waarbij de grond in de richting van de werkkamer wordt geduwd (zie fig. 8b). Op dit punt stoppen de analyses en worden grote vervormingen op een dieper glijvlak waargenomen. Dit bezwijkmechanisme werd waargenomen bij elke analyse waar bezwijken optrad.

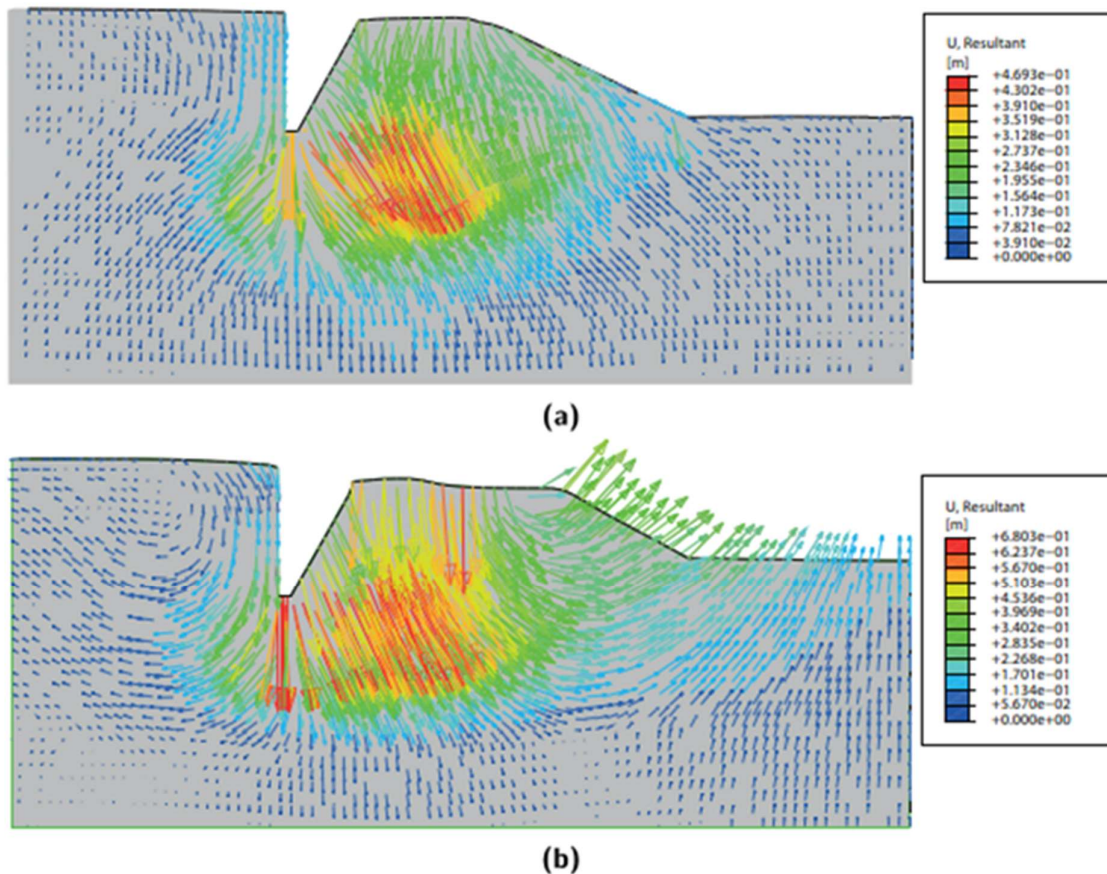


Fig. 8 Grondverplaatsingen voor fase I van analyse nr. 1 bij $u_z = -0,35$ m (a) en na uitval van de grondberm (b)

Hoewel er aannames moesten worden gedaan met betrekking tot de geometrie van de grondberm en de snelheid van verticale verplaatsing en de resultaten van de Abaqus-analyses geen exact antwoord gaven met betrekking tot de draagkracht van een grondberm tijdens het afzinken van een caisson, stelde het de ingenieurs van de Zeesluis IJmuiden in staat om te begrijpen dat:

- het last-verplaatsingsgedrag van de grond een voortdurende verzwakking van het spannings-rekgedrag laat zien zonder een plotseling bezwijken totdat zeer hoge korrelspanningen worden bereikt;
- het last-verplaatsingsgedrag verandert wanneer het talud van de grondberm bezwijkt;
- verticale korreldrukken onder de grondberm waarden hoger dan 400 kPa kunnen bereiken.

De analyses tonen ook de interactie tussen het falen van het talud van de grondberm (I in Fig. 9) en een diep glijvlak (II in Fig. 9). In Fig. 8b vervormt de grondberm aanzienlijk bij een spanningstoestand die overeenkomt met het begin van het bezwijken van de grond. Dit leidt echter niet tot de grote verplaatsingen die zouden optreden bij doorgaand bezwijken.

Een nadere blik op de last-verplaatsingscurven voor de verplaatsingsgestuurde, gedraineerde analyses laat ook een zigzag gedrag zien. De belasting neemt af wanneer de helling van de berm begint te vervormen en neemt weer toe na een zekere verplaatsing van het caisson.

Uit deze waarnemingen wordt geconcludeerd dat het afzinkproces als volgt verloopt:

1. Het talud van de grondberm wordt steiler gemaakt door grond aan de teen van de helling af te graven;
2. Het talud van de grondberm vertoont aanzienlijke vervormingen langs het glijvlak (I) waardoor een deel van de ondersteuning van het caisson tijdelijk verloren gaat;
3. De combinatie van snijrand / resterende grondberm activeert de diepere glijvlakken (II), waardoor het caisson wegzakt;
4. Na een kleine zetting (afzinken van het caisson) zal de vloer van het caisson rusten op het vervormde deel van de grondberm/helling. Hierdoor neemt de druk op het diepere glijvlak weer af en stopt het zakken;
5. Het talud van de grondberm, dat door de vervorming langs het glijvlak flauwer is geworden, wordt door uitgraven aan de teen van de helling weer steiler gemaakt, totdat de helling weer begint te vervormen. Als de diepte in de werkkamer enige decimeters minder is geworden, wordt het centrale deel van verdiept. Vervolgens kan weer op basis van de metingen de bermteen gericht worden ontgraven langs bepaalde delen van de wanden.

Door dit vervormingsproces, waarbij beide glijvlakken afwisselend worden gemobiliseerd, verloopt het afzinken in kleine stapjes in een spanningstoestand dicht tegen bezwijken aan. Dit is in overeenstemming met de ervaringen bij eerdere pneumatische caissons waarbij lokale verticale verplaatsingen in de orde van grootte van maximaal 20 mm zijn gemeten. In combinatie met het aanbrengen van voldoende brede grondbermen zal het (volledig) bezwijken van diepe glijvlakken niet plaatsvinden.

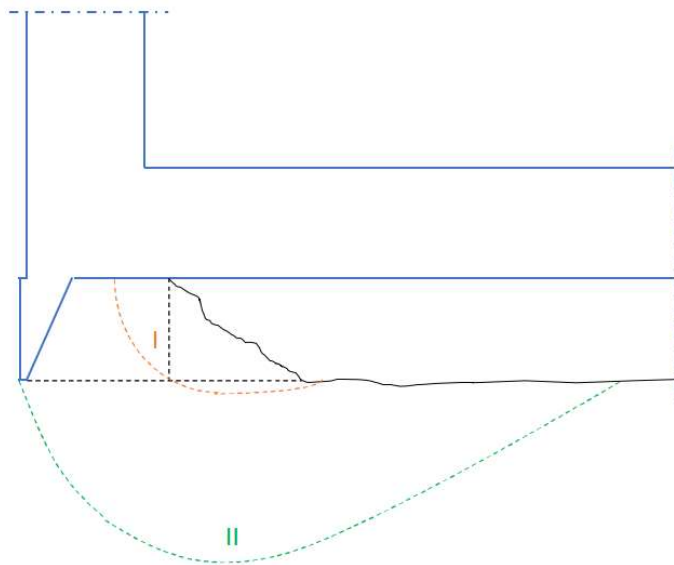


Fig. 9 Faalmechanismen van de grondbermen

FE-ANALYSES MET PLAXIS

Met het EEM-programma PLAXIS is verder onderzoek gedaan naar het faalgedrag van de grondbermen voor verschillende snijrandniveaus. Hiervoor is een model gemaakt waarbij het afzinken van het caisson in stappen van 0,5 m kan worden gemodelleerd in combinatie met een reductie van de berm breedte in stappen van 0,5 m.

De PLAXIS-resultaten toonden het volgende:

- er was een continue afname van de minimale bermbreedte versus diepte, zelfs wanneer de snijrand dicht bij de kleilaag ligt;
- er was een relatief snelle afname van de bermbreedte wanneer de snijrand de kleilaag is gepasseerd.

BEZWIJKMECHANISME FUNDERING OP STAAL (BRINCH-HANSEN)

In dit model is de breedte van de berm B gedefinieerd als contactoppervlak grond-vloer plus breedte van de snijrand (zie Fig. 11). Voor het geotechnisch ontwerp volgens de theorie van Brinch-Hansen is de Eurocode 7/NEN9997-1 gebruikt. Op basis van de resultaten van stap 1 en 2 is geconcludeerd dat een grenswaarde van 700-750 kPa geschikt is voor draagkrachtanalyses van grondbermen van de caissons in IJmuiden met deze methode. De minimaal vereiste bermbreedtes voor een oneindige strookbelasting op verschillende diepten zijn berekend voor het caisson van de deurkas van het binnenhoofd vanaf een penetratieniveau van de snijrand van NAP -12,5 m. Naast het gedraineerde en ongedraineerde draagvermogen zijn ook squeezinganalyses voor de kleilaag uitgevoerd op basis van de formule voor strookfunderingen.

Uit de constructieve analyse is duidelijk dat bij het caisson van het binnenhoofd nabij de noordoostelijke hoek (waar de appendix met het caisson is verbonden) de hoogste belasting van de grondbermen zal optreden. Voor het globale bezwijkgedrag (Brinch-Hansen) is de ongedraineerde draagkracht van de kleilaag maatgevend, totdat de snijrand deze laag is gepasseerd. Onder de kleilaag is het gedraineerde draagvermogen bepalend. De resultaten van de squeezinganalyses laten ook zien dat de benodigde bermbreedte afneemt wanneer de snijrand de kleilaag nadert. Blijkbaar neemt het effectieve gewicht van het caisson sneller af dan dat de weerstand tegen squeezing van de kleilaag afneemt.

RESULTATEN EN OBSERVATIES

In de tussentijd was het project Kattwyk Brücke in Hamburg met succes afgerond [1] en dat had ons geleerd dat de nieuw ontwikkelde apparatuur en het monitoringsysteem goed werkten. Het monteren en demonteren in en uit de werkkamer evenals het afstand gestuurde ontgravingsproces verliep volgens plan. Voor dit project golden echter geen beperkingen voor buigen of torsie, omdat de caissons relatief kleine gesloten dozen waren. De grootste uitdagingen in Hamburg waren een start niet boven water maar een bodemdiepte van 12 m in de Elbe, de werkomstandigheden tot een waterdiepte van 32 m en de afwijkende grondprofielen.

Voor het project Zeesluis IJmuiden waren de beperkingen en eisen voor de uitvoering veel zwaarder en omvangrijker. De resultaten van de engineering leidden tot de volgende vereisten voor de uitvoeringsfase van het pneumatische afzinkproces om spanningen in de caissons te beperken:

- Continu verzorgen van een minimale berm langs de kopwanden. Daarmee alleen sturen op bermbreedte van de snijranden onder de langswanden, waardoor een constructief systeem ontstaat dat voorspelbaarder is en waarbij vervormingen nauwkeuriger kunnen worden geïnterpreteerd;
- Strikte limieten van de vervormingsverschillen van het caisson, gedifferentieerd in scheefstand en torsie;
- Real-time monitoring van de vervorming van het caisson en de bouwput wanden tijdens het afzinken (zie Fig. 10 en 11);

- Reguliere inspecties in de werkkamer om de observatiemethode voor het controleren van bermbreedtes / de ondersteunende grond- en spanningstoestanden van de betonconstructie effectief uit te voeren.



Fig. 10 Bediening op afstand door camera en bewakingssystemen

Het ontwikkelde, op afstand bedienbare, bedienings- en bewakingssysteem bleek dus ook nodig om aan de aanvullende eisen van de engineering te voldoen. Een real-time monitoringsysteem was al geïntegreerd. Alleen digitale registratie en direct online uploaden was een extra vereiste. Belangrijk pluspunt van afstand gestuurd afzinken is dat er direct contact mogelijk is met de operators van de ontgraving. Bij traditioneel afzinken met ploegen in de werkkamer is communicatie immers maar zeer beperkt mogelijk en zien de caissonwerkers niet het effect van hun werkzaamheden. Met het huidige systeem beschikt elke operator in de besturings-unit over een dashboard om de prestaties van de roterende arm, het pompsysteem en de waterjets te regelen en te sturen (zie Fig. 10). Er was een nauwkeurige, real-time weergave van de positie- en hellingsensoren om de vervormingen binnen de nauwe vooraf ingestelde toleranties te houden en zo de spanningsniveaus in de structuren te beperken (zie Fig. 10). Dit was ook beschikbaar voor de site-engineers, wat heel nuttig was in de bespreking voorafgaand aan elke ploegwisseling, waar de strategie voor de ontgraving op basis van de ingemeten bermbreedtes en geregistreerde vervormingen werd doorgenomen.

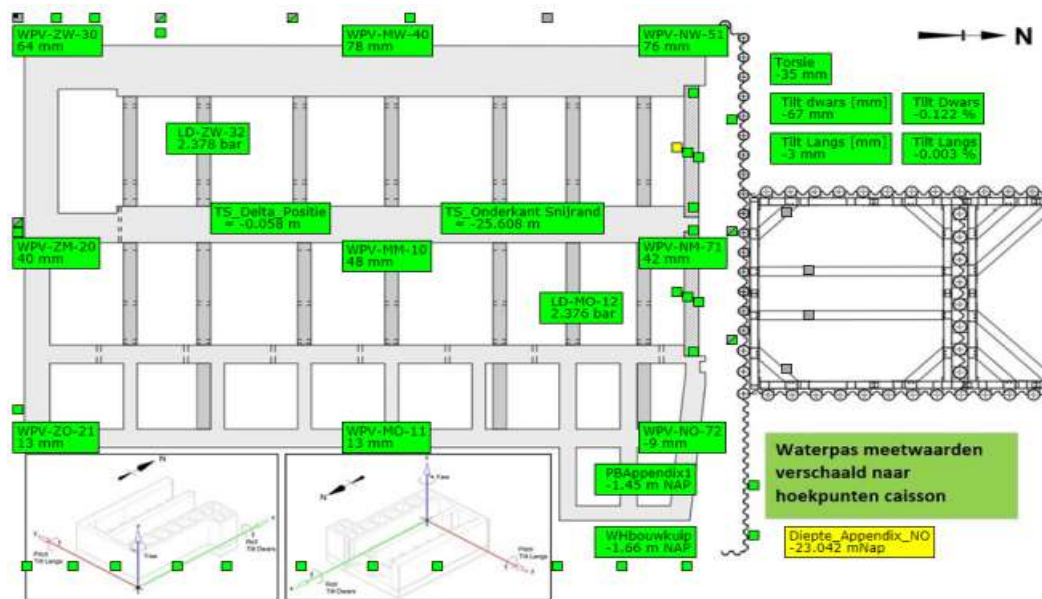


Fig. 11 Screenshot real-time bewakingssysteem van het caisson op einddiepte binnenhoofd

Uit de monitoringsresultaten bleek dat de grond zich gedroeg zoals voorspeld en beide caissons succesvol naar hun eindpositie werden afgezonken. De afwijkingen in toleranties werden vastgesteld op -100/+50 mm voor de gemiddelde verticale positie, -50/+50 mm voor torsie en -0,1/+0,1 % voor helling op einddiepte.

Tijdens de operatie zorgde de bewaking ervoor dat alle differentiële verplaatsingen binnen de vooraf ingestelde toleranties konden worden gehouden. De uiteindelijke positie van het grootste caisson werd uitgevoerd op een afwijking op diepte +60 mm, torsie -35 mm, helling in de lengterichting 0,0 % (3 mm) en 0,12 % (67 mm) in dwarsrichting. Het caisson buitenhoofd werd op nog betere toleranties geplaatst, zie Fig 11.

Waarden van 400 kPa (ondergrens) en 1000 kPa (bovengrens - begin afzinken) en 700 kPa (verwachtingswaarde) zijn gebruikt voor het ontwerp van het caisson in verschillende afzinkomstandigheden en voor het afzinkproces. Uit analyses van de bewaakte bermbreedtes bij het afzinken van het buitenhoofd is geconcludeerd dat de ondergrenswaarde kon worden verhoogd naar 600 kPa voor het binnenhoofd bij aanvang afzinken als de ondergrens.

CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

Een op afstand bestuurbaar pneumatisch afzinkstelsel is significant economisch voordeliger in vergelijking met de traditionele arbeidsintensieve processen onder hyperbare omstandigheden. Een effectievere operationele tijd (bijv. ploegendiensten) en besparingen in personeel leiden tot een beter rendement in tijd en kosten.

Het gebruik van een bewakingssysteem op basis van de directe metingen van verschillende verplaatsingen maakt het afzinkproces binnen nauwe toleranties mogelijk.

Pneumatisch afzinken is daarmee kosten- en tijdsefficiënt voor de realisatie van diepe constructies.

De sterkte en het gedrag van de grond tijdens het afzinken zijn goed te voorspellen met de drie methoden die voor dit project zijn toegepast. Elke methode heeft haar eigen beperkingen:

1. Brinch-Hansen is een handige methode om een eerste indruk te geven van de minimale bermbreedte (bij 400 kPa), maar geeft geen informatie over het vervormingsgedrag;
2. Een Plaxis-model kan situaties niet analyseren die verder gaan dan geotechnisch bezwijken: de berekening stopt bij bezwijken. Echter worden hiermee meer realistische korrelspanningen (750 kPa) bij bezwijken gevonden;

3. Het Abaqus-model analyseert situaties die net buiten geotechnisch bezwijken liggen. Met dit model wordt meer kennis opgedaan over grondgedrag. Wanneer echter geen correcties van de door kracht gestuurde vervormingen worden uitgevoerd, overschat het Abaqus-model de sterkte van de grond.

De voor dit project vastgestelde ondergrenswaarde van de bezwijkspanning van de grond was van belang voor de start van het afzinkproces op een gecontroleerde manier en binnen de grenzen van het constructief ontwerp van de caissons. Vanwege mogelijk zeer kritische spanningssituaties bij met name het opstarten van het afzinken zijn de sterkteparameters conservatief aangehouden. In het vervolgproces kon middels de 'observational method' de vervormingen goed worden beheerst. Daarmee kon de constructieve integriteit van de constructie gedurende het afzinkproces worden geborgd. Het is daarmee een geschikte keuze gebleken die wordt aanbevolen voor toekomstige soortgelijke situaties.

Op basis van de geotechnische studies die in dit artikel worden gerapporteerd, samen met de succesvolle toepassing van de observatiemethode, werd het afzinken van de caissons met succes voltooid.

DANKWOORD

Dank aan de opdrachtgever Rijkswaterstaat, de teams van aannemersconsortium OpenIJ en in het bijzonder John Regtop, ontwerpleider voor de caissons.

VERWIJZINGEN

- [1] Admiraal B., Pneumatisch zinken 2.0, of 'hoe diep kun je zinken', Educom, Geotechniek special ECSMGE issue, 2019
- [2] Regtop J., Feddema A., Investigations on the sinking process of large pneumatic caissons, Geotechniek, Ernst und Sohn, 2021
- [3] Sies R., Lous L., Regtop J., Admiraal B., van Wijngaarden M., artikelenreeks in Cement m.b.t. caissons sluishoofden nieuwe zeesluis IJmuiden, Aeneas Media, 2020