



Pneumatische caissonmethode

Het pneumatisch afzinken van caissons is een relatief onbekende techniek als variant op bouwen in een bouwkuip. Traditioneel gebeurt het pneumatisch afzinken door mensen onder verhoogde luchtdruk in een werkkamer onder het caisson grond te laten verwijderen. Dit is arbeidsintensief en vanwege beperkte toegestane werktijd onder hogere luchtdruk minder efficiënt. Bij de Nieuwe Zeesluis in IJmuiden is daarom een gemechaniseerd en op afstand bestuurbaar afzinkproces toegepast.



auteurs



**IR. BARTHO
ADMIRAAL**

Adviseur
Pneumatisch Afzinken
OpenIJ / Volker Staal
en Funderingen



**IR. MARTIJN VAN
WIJNGAARDEN**

Werkvoorbereider
OpenIJ / Volker Staal
en Funderingen

Voor de deurkassen van zowel het buitenhoofd als het binnenhoofd van de Nieuwe Zeesluis in IJmuiden, is gekozen deze te bouwen in ondiepe bouwkuipen (foto 1) en de constructies vervolgens met de pneumatische caissonmethode af te zinken naar de ontwerpdiepte. Deze methode bood meerdere belangrijke voordelen ten opzichte van de aanleg in een diepe bouwkuip aan de rand van een druk bevaaren hoofdvaarweg. Vanwege de grote afmetingen van de deurkassen (foto 2 en 3) hield deze keuze wel een flinke schaalvergroting in van de uitvoeringsopgave, in vergelijking tot eerder uitgevoerde afzinkprojecten in Nederland. In tabel 1 worden een aantal eerder uitgevoerde projecten met pneumatische caissons vergeleken.

Deze methode bood meerdere belangrijke voordelen ten opzichte van de aanleg in een diepe bouwkuip aan de rand van een druk bevaaren hoofdvaarweg. Vanwege de grote afmetingen van de deurkassen (foto 2 en 3) hield deze keuze wel een flinke schaalvergroting in van de uitvoeringsopgave, in vergelijking tot eerder uitgevoerde afzinkprojecten in Nederland. In tabel 1 worden een aantal eerder uitgevoerde projecten met pneumatische caissons vergeleken.

Processen bij het pneumatisch afzinken

Het pneumatisch afzinken van caissons kan worden gezien als het verticaal transporteren van een constructie door de grond. Civiel-technisch is het vooral bedoeld voor het realiseren van een ondergrondse constructie. Een aantal specifieke processen is daarbij te onderscheiden.

Kenmerkend is allereerst de toepassing van

luchtoverdruk om onder het caisson een droge werkruiimte te creëren. Hiervoor worden onder de vloer van het caisson snijranden geconstrueerd. Door het ontgraven van grond onder het caisson neemt de gewichtsdruk op de resterende grond, de zogenoemde steunbermen, toe. Iedere keer als het bezwijkdraagvermogen wordt bereikt, zullen glijcirkels ontstaan waardoor het caisson enkele centimeters zal zakken.

Bovenop de vloer worden afsluitbare schachten en sluisen gemonteerd om door het luchtdrukverschil personen en materialen op een veilige manier in of uit de werkkamer te krijgen. In de werkkamer kan zo de grond worden ontgraven.

Het conventionele pneumatisch afzinken gebeurt door personeel dat onder de vloer van het caisson onder verhoogde luchtdruk werkt. Tot zeker de jaren 30 gebeurde dit met schep en emmers. Deze emmers werden via speciale schachten naar boven gehesen en geleegd in stortkokers.

In Nederland wordt voor het ontgraven sinds de jaren 70 gebruikgemaakt van waterkanonnen. Deze zijn bevestigd aan het plafond van de werkkamer waarmee handmatig de grond wordt los gespoten. Met pompen wordt het baggermengsel afgevoerd uit de werkkamer.



Vanwege de grote afmetingen van de deuren kassen hield de keuze voor pneumatische caissons een flinke schaalvergroting van de uitvoeringsopgave in



Naarmate het caisson dieper komt, wordt de luchtdruk verhoogd, overeenkomend met de stijghoogte van het water heersend direct onder het caisson. Dit om zo het grondwater buiten de werkkamer te houden. Bij hogere drukken in de werkkamer nemen de partiële gasdrukken toe en daarmee neemt ook de opname van gassen in het lichaam toe. Behoudens verontreinigingen, is het vooral het afbouwen van het verhoogde gehalte aan in het lichaam opgenomen stikstof gedurende de ecompressietijd, wat leidt tot reductie in werktijd (zie ook kader Caissonziekte). Bij hogere overdruk, met name boven de 1 bar, gaat dat progressief. Hoewel de veiligheid op verschillende wijzen wordt geborgd, is dit een situatie die het beste kan worden vermeden. Bovendien geldt dat op grotere dieptes de efficiëntie van het proces vermindert.

Afzinken 2.0: Op afstand bediend en gemechaniseerd proces

Voor het afzinken van de caissons van de Nieuwe Zeesluis in IJmuiden is het systeem verder geïnnoveerd en geoptimaliseerd, door het ontwikkelen van op afstand bestuurbare graafarmen en waterkanonnen. Ook zijn er speciale camera-systemen ontwikkeld om de actuele situatie in de werkkamer te monitoren (foto 4). Deze innovatie heeft ertoe geleid dat de inzet van personeel onder luchtdruk sterk is gereduceerd en met relatief weinig personeel 24 uur per dag kon worden gewerkt. Enkel bij het uitvoeren van reparaties, inspecties, metingen, het ontruimen van obstakels in de ondergrond en bij het demonteren van het materieel als de einddiepte is bereikt, is inzet van personeel onder luchtoverdruk nodig.

Uitvoering pneumatisch afzinken

De pneumatische caissonmethode begint met de bouw van het caisson. In IJmuiden zijn de caissons gebouwd op kunstmatige eilanden in een bouwkuip met een maaiveld niveau van NAP -5,0 m. Na het gereedkomen van de caissons, kan worden gestart met de voorbereidingen op het pneumatisch afzinken. De ontgraving onder het caisson begint met het maken van een 'startgat' onder de vloer. Indien de omstandigheden dit toelaten, wordt dit atmosferisch uitgevoerd. →

Tabel 1 Overzicht grote caissonprojecten in Nederland

project	jaar	l x b x h [m]
Kalvermarkt, Den Haag	1986	62 x 30 x 11
Gasunie, Groningen	1990	48 x 43 x 10
Westerscheldetunnel	2000	35 x 25 x 21
N/Z-lijn, Amsterdam	2005	57 x 20 x 23
Buitenhoofd OpenIJ	2018	81 x 26 x 24,5
Binnenhoofd OpenIJ	2019	81 x 55 x 28,1 (incl. snijrand van 2,5 m)

4 Opname van één van de twee werkkamers van het caisson binnenhoofd

5 Personensluis

Het afbouwen van het verhoogde gehalte aan in het lichaam opgenomen stikstof leidt tot reductie in werktijd

Indien noodzakelijk zal dit al onder verhoogde luchtdruk moeten plaatsvinden, bijvoorbeeld bij het afzinken van brugpijlers. Bij de caissons in IJmuiden kon dit atmosferisch plaatsvinden, omdat de caissons in een bouwkuip zijn gebouwd waarin bemalen werd tot niveau van onderkant snijrand.

De realisatie van het startgat begint met het openmaken van de ingestorte doorvoeringen in de vloer van het caisson. De doorvoeringen zijn nodig voor het bevestigen van de graafarmen en voor de toegang via meerdere schachten van personeel en materialen in de werkkamer. Daarnaast zijn er nog diverse doorvoeringen ten behoeve van kabels en leidingen.

Vervolgens wordt een eerste aanzet voor een werkruimte onder de vloer gemaakt. Het eerste zand wordt met een baggerpomp vanuit een grote doorvoering onder het caisson verwijderd. Voor dit project met extreme gewichten van de caissons in combinatie met de constructieve gevoeligheid, zijn er strenge eisen gesteld aan de vorm en maximale grootte van het startgat (zie ook deel 4 'Observational method' in deze serie). Dit gaf beperkingen in de te monteren lengte van de graafarmen.

Vervolgens worden de schachten en sluizen voor de toegang naar de werkkamer geplaatst, waarna de bemaling wordt beëindigd en een overdruksituatie onder het caisson wordt ingesteld. Vanaf dat moment wordt personeel via de personensluizen naar de actuele druk in de werkkamer gebracht (foto 5). Het personeel daalt via de ladder in de schacht af tot men op de grond



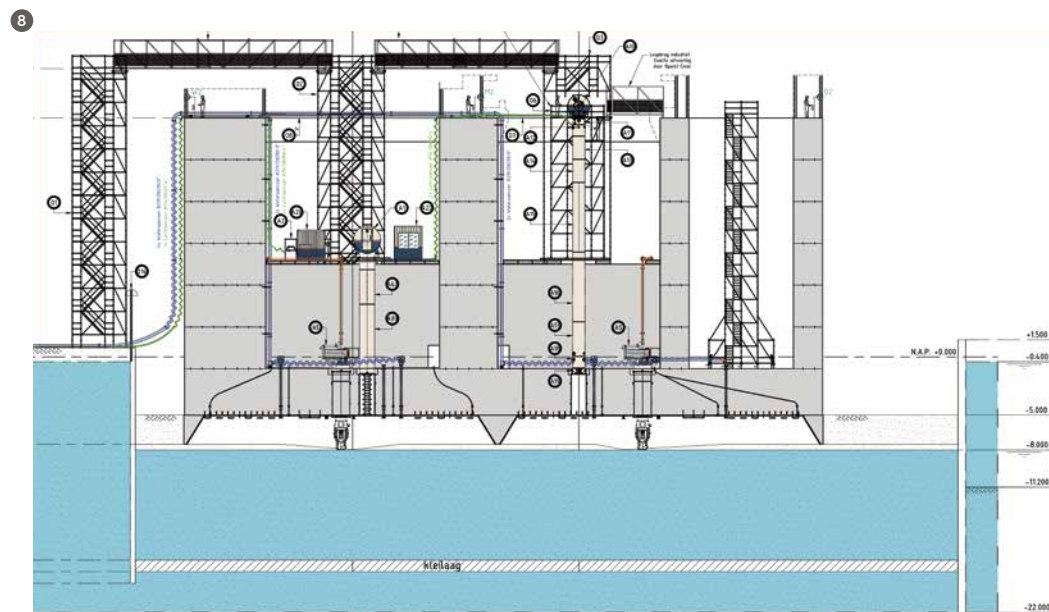
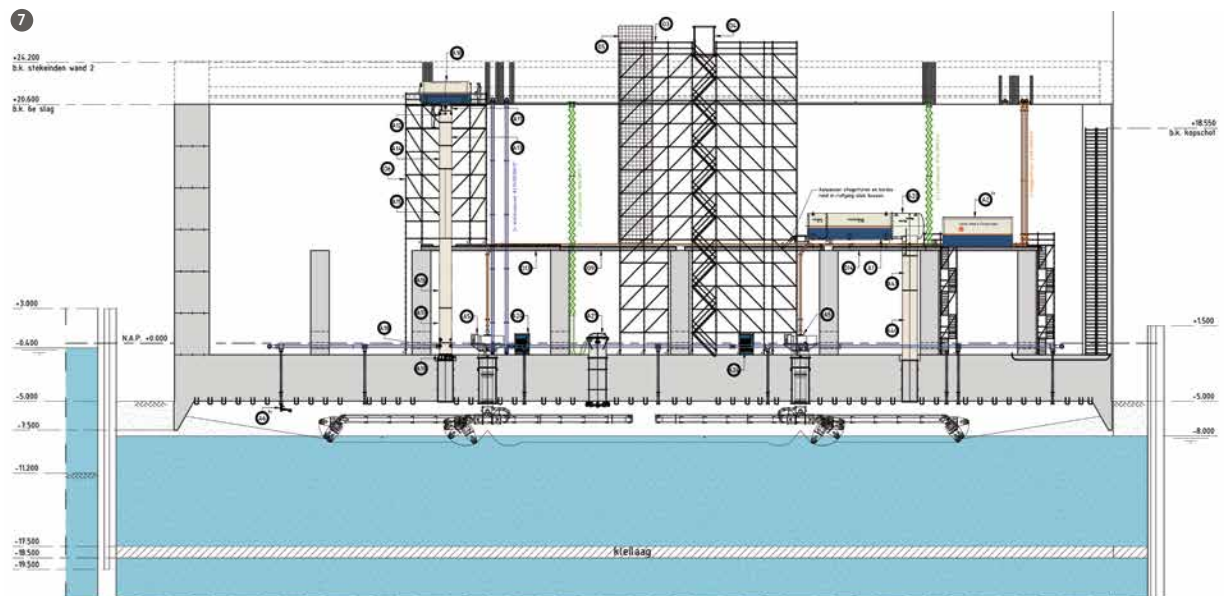
CAISSONZIEKTE

In een overdruksituatie worden gassen via de longen versneld opgenomen in het bloed en verspreid in het lichaam. Bij het decomprimeren naar atmosferische druk moeten de overconcentraties weer uit het lichaam verdwijnen om belvorming te voorkomen. Met name overconcentraties van stikstofgas kunnen tot acute en langetermijnschade in het lichaam leiden. Dit staat bekend onder de naam caissonziekte.

Het heeft tot ver in de vorige eeuw geduurd, voordat betrouwbare decompressietabellen werden ontwikkeld om de overconcentratie aan gassen in voldoende mate uit het lichaam te krijgen. Hierbij wordt het personeel in een personensluis in stappen naar atmosferische druk teruggebracht. Tegenwoordig gebeurt de decompressie in een personensluis onder inademing van zuivere zuurstof. De stappen en de duur van decompressie zijn

afhankelijk van de verblijftijd, de ondergane luchtoverdruk en de intervaltijd met eerdere overdruksituaties.

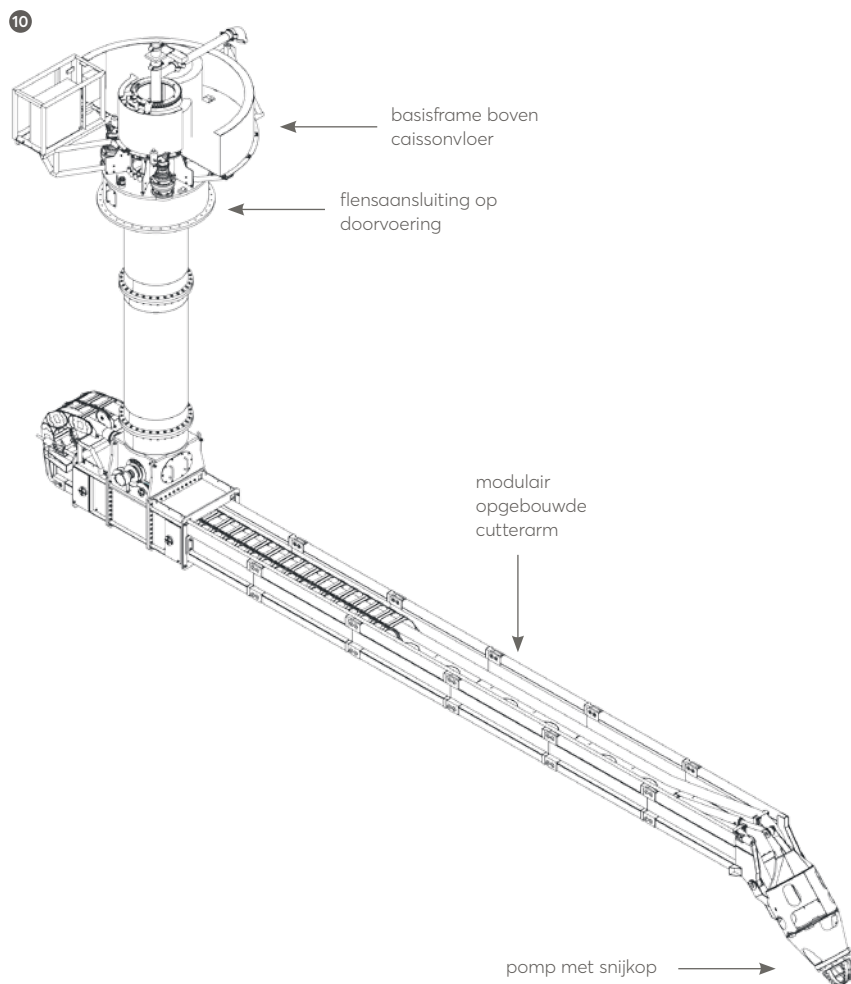
Veilig werken is tegenwoordig de standaard in de hele bouw. Bij het werken onder overdruk is dit al lange tijd het belangrijkste aspect bij het ontwerp van de constructie, het ontwerp van het materieel en bij de voorbereiding van alle werkprocedures, voortgekomen uit het caissonbesluit als onderdeel van de mijnbouwwet.



onder het caisson stapt. Bij het verlaten van de werkkamer worden de caissonwerkers in de personensluis in stappen teruggebracht naar atmosferische druk. Dit gebeurt conform specifiek voor dit type werk extern opgestelde decompressietabellen, waarbij beademing met zuiver zuurstof plaatsvindt om afgifte van in het lichaam opgenomen stikstof te versterken en te versnellen. Als tweede vluchtweg in eventuele noodsituaties wordt extra een lange schacht met sluis op

de vloer geplaatst die bij einddiepte van het caisson tot boven de grondwaterstand reikt (foto 6). Bovenop de schacht wordt de vluchtsluis gemonteerd. Voor het in- en uitschutten van materieelstukken, zoals baggerpompen en waterkanonnen, worden aparte materieelsluizen geplaatst.

Hierna kan het proces van pneumatisch afzinken starten. Bij de pneumatische caissons voor de zeesluis in IJmuiden (figuur 7 en 8) is na het aanbrengen van →



de overdruk het startgat verder vergroot, primair in de langsrichting van het caisson. Vervolgens kon worden begonnen met het stapsgewijs wegbaggeren van de steunberm in langsrichting van het caisson. Door het weghalen van de grond, ontstaat een verstoring van het verticale evenwicht waarna het caisson door zijn eigen gewicht de bodem in zakt. De wrijving aan de buitenzijde van het caisson is daarbij verminderd door vlak boven de snijrand bentoniet te injecteren.

Ontgraven onder het caisson

Zoals al beschreven, is het afzinkproces bij de twee caissons in IJmuiden gemechaniseerd. Hiertoe zijn op afstand bestuurbare graafarmen en waterkanonnen ontwikkeld. Met behulp van camera's in de werkkamer kunnen de werkzaamheden op afstand worden uitgevoerd.

Graafarmen Bij het afzinken van de caissons in IJmuiden zijn twee graafarmen per werkkamer gemonteerd. Voor het extreem grote caisson van het binnenhoofd, bestaande uit twee werkkamers, waren in totaal vier graafarmen nodig. De armen bestaan uit een basisframe met draaikrans,

gemonteerd op de doorvoering in de betonvloer van het caisson. De graafarm kan 360° roteren en is modulair op te bouwen tot een maximaal 14 m lange, uitschuifbare arm (foto 9 en figuur 10). Op de kop van de arm is de baggerpomp gemonteerd. Via een leiding in het basisframe wordt jetwater aangevoerd naar de nozzles op de kop van de baggerpomp. Middels de pomp en een afvoerleiding wordt het gecreëerde baggermengsel door het basisframe afgevoerd tot boven de betonvloer. Buiten het caisson wordt het verder verpompt naar een spoelveld.

Vanuit de bedieningsunits boven de vloer worden de graafarmen en waterkanonnen bestuurd (foto 12). Iedere graafarm wordt op basis van camerabeelden vanuit de werkkamer en actuele meetdata bestuurd. Dit laatste betreft onder andere informatie van de hydraulische aandrijving van de arm en pomp, een diepteprofiel van het gebaggerde gebied en eigenschappen van de baggerspecie in de afvoerleiding, zoals debiet en dichtheid. De moderne caissonwerkers lopen dus nauwelijks meer in waad- of droogpakken, maar werken in makkelijke kleding als operator.

Waterkanonnen De toepassing van waterkanonnen om de grond onder het caisson los te spuiten, was de basistechniek bij de conventionele afzinkmethodiek. Om het gecontroleerd creëren van glijcirkels te ondersteunen en om ook buiten het bereik van de graafarmen te kunnen werken, zijn de kanonnen op afstand bestuurbaar gemaakt (foto 11a en 11b).

De kanonnen worden verspreid over de oppervlakte van het caisson gemonteerd,

maar met name ter plaatse van de steunbermen en daar waar de graafarmen onvolgende bereik hebben. De kanonnen jetten hebben een zeer krachtige waterstraal tot 100 m³/uur. Per graafarm zijn meerdere waterkanonnen beschikbaar om de productie ook op grotere afstand van de draaipunten zo optimaal mogelijk te laten verlopen.

Camerasysteem De camera's in de werkkamer zijn voorzien van een slingerruit en schoonmaaksysteem, waardoor het zicht goed blijft, ook bij opspattend water en grond. De toepassing van een slingerruit is een bewezen techniek uit de scheepvaart, maar moest voor het functioneren onder deze omstandigheden van grond en lucht-overdruk worden doorontwikkeld (foto 13).

Het aantal camera's en de configuratie hiervan, inclusief de verlichting, is van belang om de volledige werkkamer in beeld te brengen. Naarmate de steunbermen in langsrichting van het caisson kleiner werden, zijn de camera's verplaatst en de verlichting mede aangepast om de gehele werkkamer goed in beeld te kunnen houden.

Bereiken van de einddiepte

Bij het bereiken van de einddiepte, wordt door middel van het gedeeltelijk aflaten van de overdruk de laatste zakking tot de gewenste einddiepte bereikt. Door de steeds groter wordende opwaartse waterdruk op het caisson – en dus ook de steeds grotere benodigde luchtdruk in de werkkamer om het grondwater laag te houden – wordt de benodigde opwaartse gronddruk van de steunbermen steeds kleiner. In deze fase wordt het enorme gewicht van het →

Het systeem is verder geïnnoveerd door het ontwikkelen van op afstand bestuurbare graafarmen en waterkanonnen

HISTORIE

Het pneumatisch afzinken van constructies is een oude techniek om onder (grond-) waterniveau een constructie te realiseren. Met de uitvinding van stoommachines voor de aandrijving van pompen in de 18e eeuw, werd het in de mijnbouw mogelijk om mijngangen droog te houden, maar ook om met luchtdruk water te verdringen om zo dieper en met

grotere veiligheid te kunnen delven. Deze toepassing van luchtoverdruk is in het midden van de 19e eeuw geadopteerd in de civiele techniek om constructies af te zinken. Door een luchtbel te creëren onder een gemetselde of stalen constructie en hier handmatig grond te ontgraven, konden nu brugpijlers in rivieren en zware funderingen tot grotere diepte

worden gemaakt. In 1867 werd de techniek voor het eerst in Nederland toegepast bij de bouw van de Moerdijkspoorbrug. Daarna volgden vele projecten, zoals tunnelschachten, sluishoofden en grote kelderconstructies. Aanlegdieptes variëren daarbij van 8 tot 26 m onder de stijghoogte van het aanwezige omgevingswater.



caisson dus bijna volledig gedragen door het 'luchtkussen' in de werkruimte onder het caisson. Dit resulteert bij toenemende diepte in steeds kleinere bermbreedten. Op einddiepte is het echter gewenst om de snijranden goed ingepakt in een steunberm achter te laten. Dit om een blow-in van water en grond tegen te gaan en te voorkomen dat het caisson nog nazakt.

Om deze reden wordt minimaal de laatste meter van afzinken uitgevoerd door

middel van het 'aflaten' van luchtdruk. Dit is het snel laten ontsnappen van lucht uit de werkruimte om in korte tijd de overdruk met enkele tienden bar te verlagen. Door de gereduceerde opwaartse druk neemt de afdracht van het eigen gewicht via de snijranden toe. Dit leidt tot bezwijken van de grondbermen, waardoor het caisson zakt en de bermbreedte toeneemt. Dit wordt uitgevoerd in een aantal sessies van meerdere stappen met vooraf gedefinieerde maximale

zakking, torsie en scheefstand. Op deze wijze wordt het caisson op binnen de toleranties op einddiepte gepositioneerd (fig. 14).

Na het bereiken van de vereiste diepte, zijn de graafarmen, waterkanonnen en camera's uitgebouwd. Na het afblinden van de doorvoeringen is de werkkamer gevuld met beton. Het beton wordt via doorvoeringen in de vloer, gestort tegen de luchtdruk in de werkkamer in. In totaal is ongeveer 7000 m³ beton in ruim 48 uur gestort. Na het enig uitharden van het beton wordt gecontroleerd of deze volledig aansluit op de onderzijde van de vloer. Dat was bij beide caissons het geval, maar zo nodig kon er een injectie van grout worden uitgevoerd. Het materieel boven de werkkamer kon op dat moment worden gedemonteerd en hiermee was het pneumatisch afzinken succesvol voltooid.

Innovatieve techniek

Bij het gemechaniseerd pneumatisch afzinken van de deuren voor de Nieuwe Zeesluis IJmuiden is aangetoond, dat met deze innovatieve techniek caissons van wereldformaat veilig en binnen kleine toleranties kunnen worden afgezonken. Met het ontwikkelde afzinkmaterieel zoals de graafarmen, waterkanonnen en camera's kan op

afstand worden ontgraven, waardoor de hoeveelheid werkzaamheden onder overdruk tot een minimum kunnen worden gereduceerd ten opzichte van de conventionele afzinktechniek. Dit biedt een verbeterd toekomstperspectief voor het pneumatisch afzinken als alternatief voor een traditionele bouwkuip. Het bouwen van constructies op maaiveldniveau biedt immers vele voordelen en het installeren van diepe kerende constructie kent meerdere risico's. Dit geldt zeker in bebouwde omgeving of bij toenemende diepte. ●

De werkzaamheden onder overdruk kunnen tot een minimum worden gereduceerd

