

MicroTunnelling palen: Een nieuw ervarings-overschrijdend funderingssysteem onder het emplacement van Amsterdam CS

Ing. O.S. Langhorst en W. de Moor
VOF Stationseiland Amsterdam*¹,
Movares Nederland BV

*¹: Samenwerkingsverband tussen
Arcadis Infra BV en Movares Nederland BV

SAMENVATTING

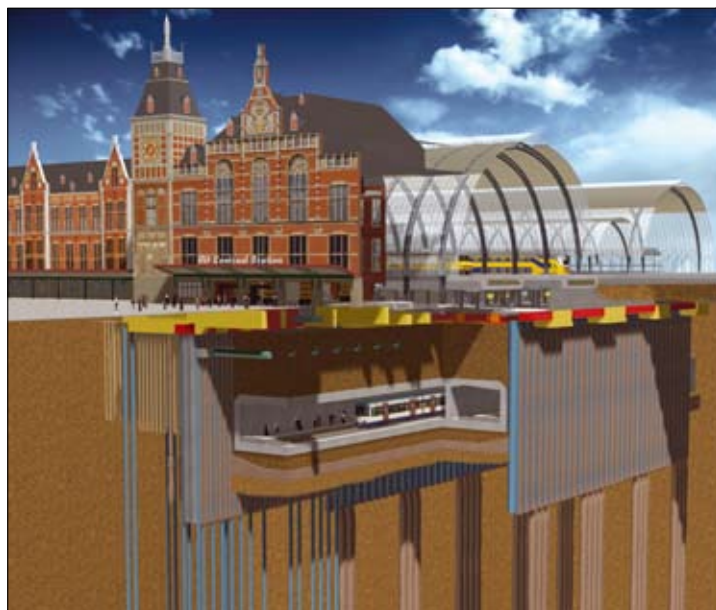
In het kader van de Noord/Zuidlijn wordt een nieuw metrostation onder Amsterdam CS aangelegd. De wand van de bouwkuip onder het NS-emplacement is uitgevoerd met behulp van stalen MicroTunnelling palen (MT palen). Deze zijn onderling verbonden met een slotconstructie en vormen een bouwkuipwand die een grondkerende, waterremmende en dragende functie heeft. Vanwege de beperkte werkruimte zijn de palen geheel opgebouwd uit segmenten van 1,8 m hoog. Het MT-palensysteem is gebaseerd op de techniek van horizontaal gestuurd boren, die volledig is aangepast naar een verticale werkwijze. Tijdens de uitvoering van het eerste deel van de bouwkuip, de 100 m lange westwand, is het boor- en uitvoeringsproces geoptimaliseerd door aanpassingen aan het graafwiel, aan de opvulling van de oversnijding en aan de slotconstructie.

INLEIDING

Voor de achtergrond van de nieuwe metroverbinding "Noord/Zuidlijn" ter plaatse van het Amsterdam Centraal Station wordt verwezen naar de eerder uitgebrachte artikelen van de sandwichwand [Geotechniek, jaargang 2006, nr. 2, blz. 24-30 en nr. 3, blz. 54-61]. De MicroTunnelling palen (MT palen) zijn afgeleid van de bestaande techniek van horizontaal gestuurd boren. Deze techniek is speciaal voor dit project volledig aangepast en geschikt gemaakt

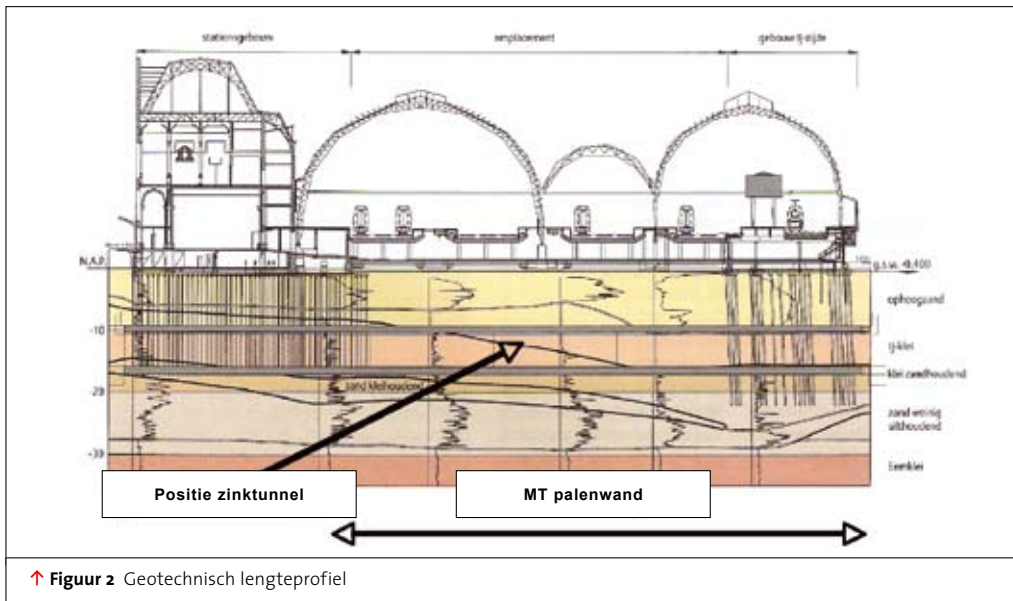
voor verticaal gestuurd boren. De bouwkuipwand onder het emplacement heeft een lengte van ca. 100 m. De wand bestaat aan iedere zijde uit 16 lange en 30 korte MT palen, zie *figuur 1*. De wand wordt gestaffeld uitgevoerd, dat wil zeggen na elke lange paal volgen er 2 korte palen. De lange MT palen hebben een paalpuntniveau van NAP -66 m en hebben een grondkerende, waterremmende en dragende functie. De korte MT palen hebben een paalpuntniveau van NAP -31 m en hebben een grondkerende en water-

remmende functie. De lange MT palen zijn opgebouwd uit 36 segmenten, de korte MT palen uit 17 segmenten. De hoogte van de segmenten wordt bepaald door de (zeer) beperkte werkhogte in de middentunnel onder het emplacement. Het eerste segment van een MT paal is een speciaal segment. In dit segment (conus) wordt de boormotor ingebouwd en dit segment heeft afwijkende afmetingen en een afwijkende vorm. De afzonderlijke MT palen vormen uiteindelijk via een slotconstructie een palenwand.



← **Figuur 1** Impressie van de MT palenwand onder het emplacement (kapconstructie en de sporen)

Het boorproces ten behoeve van de eerste MT paal (87) is op 24 mei 2005 opgestart. Na het op diepte komen van deze paal is een calamiteit opgetreden, waardoor het niet mogelijk was de boormachine terug te winnen. Een aantal sterke verbeteringen aan het gehele MT proces heeft uiteindelijk erin geresulteerd dat medio december 2005 het boorproces weer opnieuw is opgestart. Alle doorgevoerde aanpassingen en verbeteringen waren succesvol. Tijdens het verdere verloop van de productie van de MT palen zijn er nog diverse verbeteringen doorgevoerd en is het proces verder geoptimaliseerd. Uiteindelijk is de westwand van de toekomstige zinksleuf op 5 februari 2007 gereed gekomen. In het najaar van 2007 zal gestart worden met het boren van de MT palen voor de oostwand van de zinksleuf. De betrokken partijen van dit project zijn: VOF Stationseiland Amsterdam (samenwerkings-



↑ **Figuur 2** Geotechnisch lengteprofiel

verband tussen Arcadis Infra BV en Movares Nederland BV), Adviesbureau Noord/Zuidlijn (samenwerkingsverband tussen Royal Haskoning, Witteveen & Bos en Ingenieursbureau Amsterdam), hoofdaannemer CSO (Combinatie Strukton Betonbouw en van Oord ACZ) en onderaannemer CMM (Combinatie Gebroeders Van Leeuwen, Strukton Betonbouw en van Oord ACZ). Opdrachtgevers zijn de gemeente Amsterdam en ProRail.

GLOBALE BODEMBESCHRIJVING

De bodemopbouw onder het emplacement bestaat uit een 6 m dikke laag ophoogzand (tot ca. NAP -6 m). Richting het IJ bereikt deze laag zelfs een dikte van 11 m (tot ca. NAP -10 m). Hieronder komt tot ca. NAP -20 m een relatief slap lagenpakket voor bestaande uit "IJ klei" en zandhoudende kleilagen. Ook deze laag verloopt richting het IJ tot een diepte van ca. NAP

-30 m. Vervolgens komt vanaf dit niveau tot ca. NAP -30 m de tweede zandlaag voor die richting het IJ geheel verdwijnt. Deze laag bestaat uit zand met klei. Hieronder komt tot ca. NAP -45 m een laag "Eemklei" voor. Direct hieronder komt een 1 m dikke laag van Harting voor, bestaande uit veen waarin methaangas kan voorkomen. Vanaf dit niveau tot ca. NAP -56 m komt een laag "Glaciale klei" voor. Vanaf NAP -56 m komt de derde zandlaag voor met hoge conusweerstand. In deze draagkrachtige zandlaag worden de lange MT palen gefundeerd. *Figuur 2* toont het geotechnisch profiel.

Het emplacement van het station bevindt zich op een niveau van ca. NAP +6,0 m en de hieronder gelegen vloer van de middentunnel bevindt zich op ca. NAP +1,5 m. De freatische grondwaterstand varieert van ca. NAP -0,25 m tot NAP -0,4 m, de stijghoogte in de tweede zandlaag bedraagt ca.

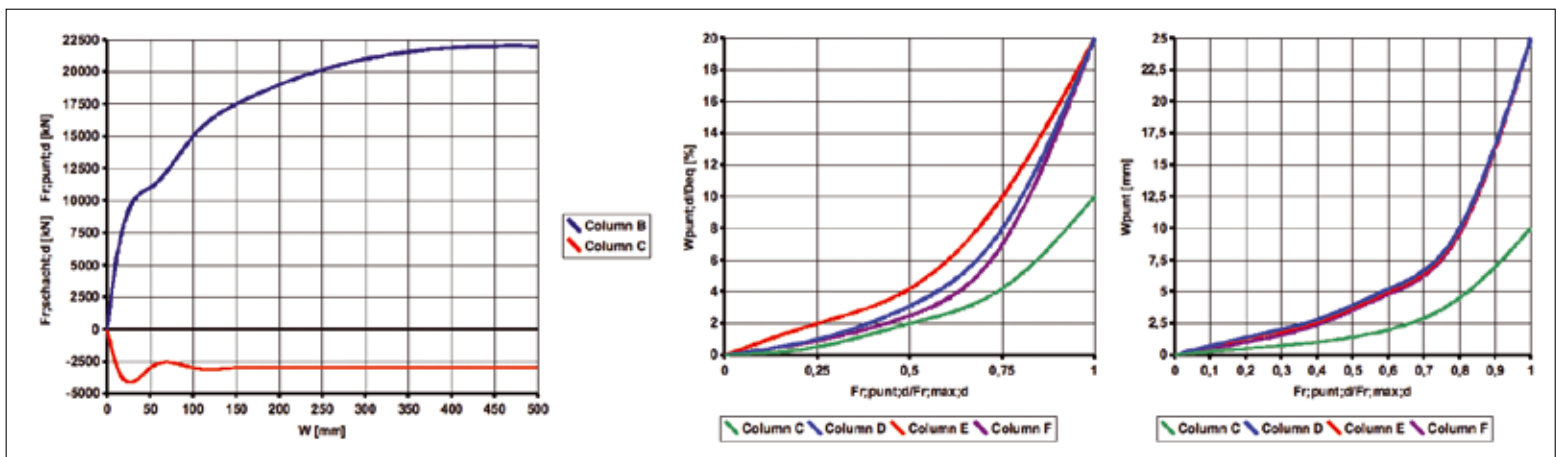
NAP -1,5 m en de stijghoogte in de derde zandlaag bedraagt ca. NAP -3,0 m.

GEOTECHNISCH ONTWERP VAN DE MT PALEN

Dragende functie

De draagkracht van de lange MT palen is berekend conform NEN 6743. De MT palen worden gekwalificeerd als een nieuw paalsysteem welke grote overeenkomst vertoont met horizontale microtunnelling. De draagkracht is bepaald door het paalsysteem te vergelijken met de in NEN 6743 gedefinieerde paalsystemen en de daarbij behorende paalklassefactoren. Op basis van engineering judgement is verondersteld dat de MT palen een hogere paal draagkracht en een stijver lastzakkingsgedrag hebben dan een boorpaal en meer gelijkwaardig zijn aan een avegearpaal. Door het ontbreken van proefbelastingen is aangenomen dat de MT palen minimaal gelijkwaardig zijn aan een boorpaal.

Het paalpuntniveau is zodanig gekozen dat de berekende paalpuntzetting kleiner is dan de geëiste 45 mm en dat het zettingsverschil maximaal 10 mm is. In de praktijk is de realisering van een dusdanige paalpuntzetting zeer complex en is deze mede afhankelijk van het al dan niet slagen van een paalpuntinjectie. Na een risicoanalyse te hebben uitgevoerd en op basis van de resultaten van de eerste inregelpaal, is gebleken dat de beoogde schacht(na)injectie ter plaatse van de 3e zandlaag niet mogelijk was. Hierop was vooraf al geanticipeerd door het oorspronkelijke paalpuntniveau van NAP -62 m met twee segmenten te verlengen tot NAP -66 m. Bij uitsluitend een puntinjectie voldoet de MT paal aan het criterium van



↑ **Figuur 3** Verondersteld last zakkingsdiagram van de MT palen



↑ **Figuur 4** De palen worden opgebouwd uit stalen segmenten \varnothing 1.820 mm en 1.850 mm hoog

maximaal toelaatbare zakking en zettingsverschil. De paalpuntinjectie zal het last-zakingsgedrag van de MT paal verbeteren tot “grondverdringend” bij een druk tot 45 bar, hetgeen overeenkomt met de zwaarst belaste MT palen van ca. 12 MN, zie *figuur 3*. Bij een hogere belasting zal het last-zakingsgedrag terugvallen naar “boorpaal”. Het grout van de paalpuntinjectie dient een karakteristieke druksterkte te hebben van minimaal 5 N/mm^2 .

Kerende functie

Bij de berekening van de kerende functie van de bouwputwand zijn alleen de korte MT palen in rekening gebracht. De lengte van de korte MT palen is zodanig gekozen dat deze onder het ontgravniveau van de put voldoende inklemningslengte hebben. Daarbij is de uitbuiging van de wand een belangrijk criterium, waarbij maaiveldzakking achter de wand beperkt dient te worden. Het ontwerp ten aanzien van de horizontale vervormingen is gebaseerd op een volledige vulling van de oversnijdingsruimte van de MT palen over een hoogte van 30 m (mv tot mv -30 m) met grout. De oversnijdingsruimte dient gevuld te worden met grout met een karakteristieke druksterkte van $2,5 \text{ N/mm}^2$. De vervorming van de bouwputwand wordt sterk verminderd door toepas-



↑ **Figuur 5** Voorbereidende werkzaamheden voor het koppelen van de stalen segmenten door middel van boutverbindingen

sen van een jetgroutstempel op een niveau van NAP -20 m tot NAP -22 m. Ten behoeve van een optimale krachtoverdracht dient deze star tegen de MT palenwand aan te sluiten.

Waterremmende functie

De waterremmende functie van de wand is afhankelijk van de plaatsingsdiepte van de korte MT palen in de Eemkleilaag en het functioneren van de sloten. De bovenkant van



↑ **Figuur 6** Het eerste segment van een paal (conus) en het graafwiel is onder de conus zichtbaar

de Eemkleilaag is aan de hand van het uitgevoerde grondonderzoek bepaald en bevindt zich afhankelijk van de locatie op NAP -27,8 m tot NAP -29,0 m. De korte MT palen reiken tot een diepte van NAP -31 m in de Eemklei. Vanuit het besteksontwerp dienen de sloten gevuld te worden met bentoniet. Deze bentoniet moet na uitvoering van de paal worden verdrongen door grout middels een na-injectie. Na het gereedkomen van de MT palenwand zal de waterremmende functie getoetst worden met behulp van Texplormetingen, waarbij op basis van elektrische geleidbaarheid de eventuele lekkages worden opgespoord.

PRINCIPE EN BOORPROCES VAN MT PALEN

Zowel de lange als de korte MT palen worden opgebouwd uit ronde stalen segmenten. De segmenten hebben een buitendiameter van 1.820 mm en zijn 1.850 mm hoog, zie *figuur 4*. De hoogte van de segmenten wordt bepaald door de (zeer) beperkte werkhoogte van maximaal 4 m in de middentunnel onder het emplacement. De wanddikte van de segmenten varieert: 12,5 mm, 16 mm, tot maximaal 20 mm. Een en ander is afhankelijk van de optredende buigende momenten in de MT palen. De segmenten worden gekoppeld door middel van

boutverbindingen. Om boutverbindingen toe te kunnen passen, worden aan de boven- en onderzijde van de segmenten flenzen gelast. De lichtst belaste segmenten worden gekoppeld met 10 stuks M22 bouten (kwaliteit 8.8) en de zwaarst belaste verbindingen met 56 stuks bouten (kwaliteit 12.9), zie *figuur 5*. De reden dat er voor boutverbindingen is gekozen in plaats van een lasverbinding, is tijdwinst. De waterdichte afdichting tussen de elementen onderling wordt door een rubberen ring gerealiseerd. Deze ring ligt in een sponning welke in de flenzen is gefreesd. De lange MT palen zijn opgebouwd uit 36 segmenten, de korte MT palen uit 17 segmenten. Het eerste segment van een MT paal is een speciaal segment. Dit segment (de conus) heeft afwijkende afmetingen en is afwijkend van vorm. In dit element wordt de boormotor ingebouwd. Onder de conus steekt het graafwiel uit, dat vrij rond kan draaien en voorzien is van drie graaftanden, zie *figuur 6*. De ruimte tussen de boormotor en de binnenkant van de conus bedraagt 15 mm en wordt door opblaasbare rubberbanden (balgen) afgedicht. De balgen verzorgen de afdichting onderin de paal en leveren de benodigde reactiekracht, waardoor het graafwiel kan draaien, terwijl de boormotor gefixeerd blijft. Het graafwiel draait met een snelheid van 3 tot ca. 8 omwentelingen per minuut en graaft met een diameter van 1.920 mm. De conus heeft over een hoogte van 800 mm een diameter van 1.940 mm. Dit is 20 mm breder dan de boor graaft en het doel hiervan is dat er over deze hoogte van 800 mm een goede afdichting wordt gecreëerd tussen het graafwiel en de oversnijding. De “afpluggende” werking van de conus moet er voor zorgen dat zogenaamde blow-ins of blow-outs niet op kunnen treden. Dit is belangrijk, omdat zowel bij een blow-in als een blow-out de stabiliteit van de oversnijdingsruimte niet meer gewaarborgd is. Hierdoor kunnen grondverplaatsingen ontstaan, waardoor er schade aan de bestaande fundering van



↑ **Figuur 7** De besturings- en controle-unit ten behoeve van het boorproces



↑ **Figuur 8** Slotconstructie (links het “vrouwelijk” slot en rechts het “mannelijk” slot)

de middentunnel of aan de kapconstructie van het emplacement kunnen optreden.

In de praktijk is het boorproces complex. De samenstelling van de verschillende grondlagen, de verschillende (grond)waterdrukken, sturing van de paal, het aan- en afvoersysteem van het proceswater, de hydrauliek- en pompsystemen, obstakels in de ondergrond, etc. hebben invloed op het boorproces. Inzage in het gehele proces is een must om vervolgens zo optimaal mogelijk de voortgang bij te sturen en de geotechnische technische veiligheid te bewaken, zie *figuur 7*. Het boorproces start met het oppompen van proceswater uit het IJ. Dit water wordt in een hoeveelheid van ca. 2.000 tot 3.000 liter per minuut via leidingsecties richting het graafwiel geleid. De grond die door het graafwiel naar de spoelkamer wordt getransporteerd, wordt in de spoelkamer met het proceswater vermengd. Het mengsel van water en grond wordt als slurry via een leidingstelsel afgevoerd. De door het graafwiel geboorde diameter is groter dan de diameter van de segmenten (behoudens bij het 1^e segment – de conus). Rondom is tussen de zijkant van de paal en de zijkant van de grond een vrije oversnijdingsruimte van ca. 50 mm aanwezig.



↑ **Figuur 10** Weergave van het productieproces van de MT palen

Deze ruimte is benodigd om “kleef” tijdens het boorproces te voorkomen en om sturing van de paal tijdens het boorproces mogelijk te maken. De oversnijdingsruimte wordt gedurende het boorproces in stand gehouden door het inpompen van steunvloeistof (bentoniet). Als de MT paal op diepte is, wordt het bentoniet vervangen door dämmer. Een groutinjection onder de paalpunt bij de lange MT palen zorgt voor een gunstig last-zakingsgedrag.

PRINCIPE MT PALENWAND

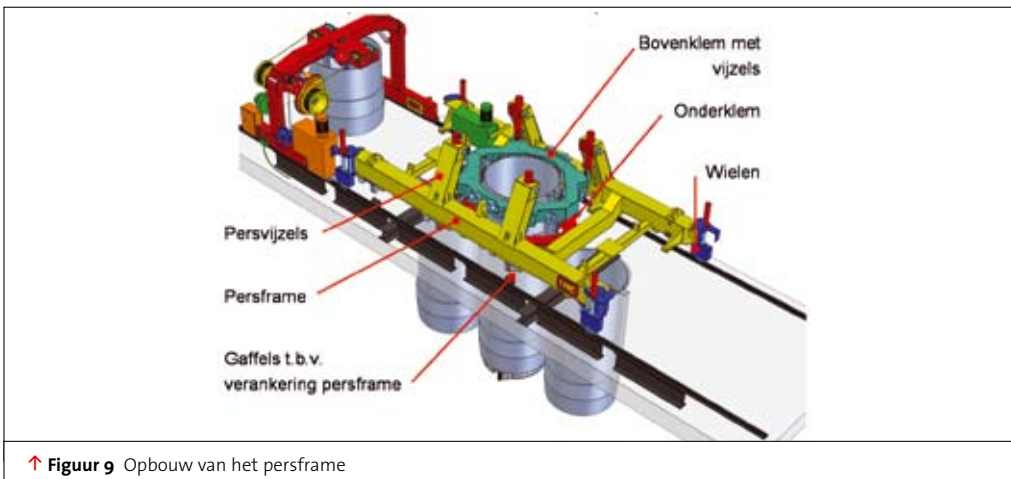
De afzonderlijke MT palen vormen uiteindelijk via een slotconstructie een MT palenwand. De slotconstructie wordt door middel van boutverbindingen aan de segmenten gekoppeld. De slotconstructie bestaat uit een “mannelijk” en een “vrouwelijk” slotdeel, waarbij het “mannelijk” slotdeel binnen het “vrouwelijk” slotdeel valt, zie *figuur 8*. Binnen de slotconstructie is een plaatsingstolerantie toelaatbaar van plus of min 45 mm. De sloten worden tijdens het boorproces

voorzien van bentoniet en na uitvoering verdrongen door grout middels na-injectie.

UITVOERINGSPROCES MT PALEN

Op het persframe zijn twee hydraulische klemmen gemonteerd: een boven- en een onderklem, zie *figuur 9*. Aan de bovenklem zijn vier vijzels gekoppeld, de onderklem is een statische klem. De MT paal wordt in de onderklem vastgehouden op het moment dat er niet wordt geboord en er geen voortgang is. Tijdens het boren is de onderklem open en is de bovenklem gesloten, waarbij de MT paal door de vier aan de bovenklem gekoppelde vijzels naar beneden wordt gedrukt. De uitslag van deze vijzels is 630 mm. Dit houdt in dat een segment met een hoogte van 1.850 mm in drie slagen wordt geboord. De kracht die voor het wegdrücken benodigd is, wordt via het persframe ontleend aan vooraf ingebrachte Leeuwankerpalen. Het persframe wordt middels gaffels (schroefverbinding) aan de Leeuwankerpalen gekoppeld. Het persframe kan zo een maximale perscapaciteit genereren van in totaal 250 ton. Wanneer een segment is weggeboord, wordt door de portaalkraan een nieuw segment aangevoerd en op het weggeboorde segment gepositioneerd. Door boutverbindingen wordt de koppeling tot stand gebracht. Hierna wordt het boor- en het wegdrukproces weer opgestart. Gelijktijdig met het wegboren en het wegdrücken van het segment wordt steunvloeistof (bentoniet) in de oversnijdingsruimte gepompt. De steunvloeistof wordt vanaf het eerste segment (de conus) middels vier leidingen in de oversnijdingsruimte gepompt. Het koppelen en weer wegboren van de segmenten gaat door, totdat de paal op de gewenste diepte is gekomen, zie *figuur 10*.

Dan volgt een kritische fase: het lossen van de balgen. De balgen zijn rubberen afdichtingsbanden welke aan de buitenkant van de boormotor zijn bevestigd. Op het moment dat de luchtdruk van de balgen wordt afgelaten, ontstaat er een rechtstreekse verbinding op het paalpuntniveau tussen de buiten- en binnenzijde van de MT paal. In deze situatie wordt naar een evenwichtssituatie gestreefd tussen de binnen- en buitenzijde van de MT paal. Om deze zoveel mogelijk te benaderen, worden voor het lossen van de balgen, de korte MT palen gevuld met water en de lange MT palen met bentoniet, zie *figuur 11*. Deze evenwichtssituatie is bij de korte MT palen minder kritisch dan bij de lange MT

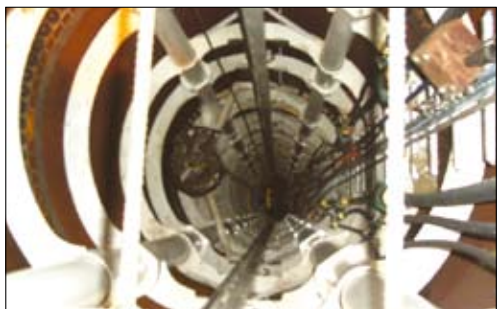


↑ **Figuur 9** Opbouw van het persframe



↑ **Figuur 11** De korte MT paal is gevuld met water om voor het lossen van de balgen zoveel mogelijk een evenwichtssituatie te krijgen tussen de druk in en buiten de paal

palen. De korte MT palen reiken tot in de Eemklei. Hierdoor is het gevaar op het ontstaan van een “blow in/out” nagenoeg uitgesloten. De lange MT palen reiken tot in de derde zandlaag, waarin het ontstaan van een “blow in/out” een aanmerkelijk groter risico is. Als de situatie aan het paalpuntniveau stabiel is, wordt gestart met het omhoogtrekken van de leidingsecties in de paal, zie *figuur 12*. Door het trekken aan de leidingsecties wordt ook gelijktijdig de boormotor getrokken. In eerste instantie wordt de boormotor ca. 500 mm gelicht, zie *figuur 13*. Door deze handeling komen de graaftanden van het graafwiel onder de conus vandaan. Doordat de graaftanden niet meer onder de conus zitten, is het mogelijk geworden de paal na te drukken. Het doel hiervan is om de onderzijde van de MT paal voorbij de graafhoogte van de graaftanden te drukken. Hierdoor wordt de afgegraven grond geheel door de stalen paal gesteund. In de praktijk blijkt dat het nadrukken van de korte MT palen in de Eemklei geen enkel probleem is. Bij het nadrukken van de lange MT palen in de derde zandlaag is dit niet geheel mogelijk. Gemiddeld worden de palen over ruim 60% van de hoogte van de graaftanden weggedrukt. Na het op diepte komen van de MT paal en na het uitbouwen van de leidingsecties en de boormotor worden nog de navol-



↑ **Figuur 12** De lange MT palen zijn 66 m lang, de korte palen 31 m. In de paal zijn de leidingsecties zichtbaar voor het proceswater, de lucht- en hydrauliek leidingen

gende werkzaamheden verricht, zie *figuur 14*:

- De oversnijding rondom de palen wordt gevuld met dämmer. Het vullen van de oversnijding wordt middels leidingen vanaf de onderzijde van de MT paal uitgevoerd, waarbij de steunvloeistof omhoog wordt gedrukt. De steunvloeistof wordt aan de bovenzijde van de paal afgepompt.
- De lange MT palen worden gevuld met beton in sterkteklasse C28/35. Na verharding van het beton vindt aan de punt van de paal een injectie met grout plaats. Doel hiervan is het opspannen van het draagkrachtige zandpakket onder de paal om zettingen te beperken.
- De korte MT palen worden gevuld met zand.
- Om een optimale slotafdichting te krijgen, worden de sloten geïnjecteerd met een groutmengsel.

AANPASSINGEN EN OPTIMALISATIE GEDURENDE HET BOORPROCES

Het inbrengen van de MT palen middels verticaal gestuurd boren is een geheel nieuw funderingssysteem, waarbij gedurende het gehele proces aanpassingen en verbeteringen zijn doorgevoerd, zoals:

Aanpassing graafwiel

Op 24 mei 2005 is het boorproces van de eerste MT paal opgestart. Tijdens het beëindigen van het boorproces is op ca. NAP -60 m een blow-in opgetreden. Tijdens het terugwinproces van de boormachine in de nacht van 15 op 16 juni 2005 is het boorfront plotseling instabiel geworden met als gevolg dat er grondverplaatsingen zijn opgetreden. Uiteindelijk bleek de boormachine vast te zitten en moest deze als verloren worden beschouwd. De feiten en conclusies zijn door een review-commissie samengevat en dit heeft uiteindelijk geleid tot een aantal verbetervoorstellen.

Eén van de belangrijkste aanpassingen welke doorgevoerd zijn, heeft betrekking op het graafwiel. Wanneer een MT paal op diepte is, moet de diameter van het graafwiel verkleind worden om de boormotor met graafwiel via de binnenzijde van de paal te kunnen lichten en uit te bouwen. Bij de eerste versie van het graafwiel werden de graaftanden horizontaal hydraulisch ingetrokken. De verbetering voorzag in het laten scharnieren van de graaftanden in plaats van hydraulisch intrekken, waardoor tijdens het lichten van de boormotor onder invloed van de zwaartekracht de graaftanden gaan “hangen”. Hierdoor wordt de diameter van het graafwiel verkleind



↑ **Figuur 13** De boormotor met graafwiel hangt in de portaalkraan

en kan de boormotor worden uitgebouwd. Een “simpele”, maar uiterst doeltreffende verbetering. Bij het boren van de diverse MT palen is men tijdens het boorproces op oude houten funderingspalen gestuit. Ook (stalen) restanten uit de bouw van de middentunnel en later uitgevoerde aanpassingen aan de middentunnel zorgden voor problemen tijdens het boorproces. Uiteindelijk is gebleken dat de boormotor met het aangepaste graafwiel de houten palen kon “vermalen” en voldoende bestand was tegen de achtergebleven stalen voorwerpen in de ondergrond.

Aanpassing vullen van de oversnijding nadat de MT paal op diepte is gekomen

Een ander onderdeel in het proces wat geheel gewijzigd is, is het vullen van de oversnijding, nadat een MT paal op diepte is gekomen. De oversnijdingsruimte heeft een breedte van 50 mm. Om de steunvloeistof (bentoniet) bij de lange MT palen over de gehele hoogte te vervangen, is er 20 m³ injectiemengsel benodigd. Bij de korte palen is dit 10 m³. Om een optimale vulling te krijgen, wordt het injectiemengsel naar de onderzijde van de paal gepompt en wordt de oversnijding van beneden naar boven gevuld en wordt de steunvloeistof aan de bovenzijde van de paal afgepompt.

Bij de eerst geboorde MT palen is een injectiemengsel toegepast van CEM I (Portlandcement) met een krimpcompenserende hulpstof en water. Dit mengsel werd via 27 dunne kunststofslangetjes naar de onderzijde van de MT paal verpompt. Het injectiemengsel in combinatie met de dunne slangetjes zorgde voor verstoppingen, zodat de oversnijding niet volledig kon worden gevuld. De reden voor de keuze van cement CEM I (Portlandcement) was het te bereiken gewicht van het injectiemengsel. Dit moest zwaar genoeg zijn om het bentoniet te verdrrijven. Als het verschil in gewicht tussen het injectiemengsel en het bentoniet te klein wordt, dan laat het bentoniet zich niet volledig



↑ **Figuur 14** Een MT wand in wording: deels vrijgegraven MT palen

verdrijven en zullen er “doorbraken” van het injectiemengsel ontstaan, waardoor de oversnijding ook niet volledig wordt gevuld.

Er zijn met diverse alternatieve mengsels beproevingen uitgevoerd. Prestatie-eisen waren hierbij: de 28 daagse karakteristieke druksterkte van $2,5 \text{ N/mm}^2$, het goed kunnen verdrijven van het bentoniet, ook als deze enigszins is ingedikt en het mengsel moet een voldoende lange vloeibaarheid behouden om de oversnijding over de gehele paallengte te kunnen realiseren. Uiteindelijk is het mengsel op basis van Portlandcement vervangen door een Dämmer-mengsel. Het toegepaste Dämmer-mengsel heeft een volumieke massa van 1.540 kg/m^3 . Het bentoniet dat verdrongen moet worden, heeft een volumieke massa van 1.040 kg/m^3 (vers aangemaakt).

Het systeem om het injectiemengsel naar de onderzijde van de paal te voeren, is gewijzigd van 27 dunne slangetjes in 4 tot 8 stalen afvoerleidingen met een inwendige diameter van 25 mm. Na het doorvoeren van deze wijzigingen heeft het vullen van de oversnijding niet meer voor problemen gezorgd. In het uitvoeringsproces van het vullen van de oversnijding is nog een efficiëntieslag doorgevoerd. Bij de lange MT palen wordt vanaf een diepte van ca. NAP -32 m tot aan het paalpuntniveau op NAP -66 m Drillmix toegepast. Drillmix is een langzaam uithardende boorspoeling. Het is als het ware een mix van steunvloeistof en “injectiemengsel”. Voordeel van het toepassen van Drillmix is dat als de paal op diepte is gekomen, deze vloeistof niet door dämmer behoeft te worden vervangen. De Drillmix hardt langzaam uit. Het type Drillmix dat bij de MT palen is toegepast, ontwikkelt een sterkte van 1 N/mm^2 na 90 dagen. Het toepassen van Drillmix is mogelijk geworden daar de sterkte-eis van $2,5 \text{ N/mm}^2$ over deze hoogte van de MT paal niet benodigd

was. Over dit deel van de MT paal kan worden volstaan met een sterkte van 1 N/mm^2 .

Aanpassingen en optimalisatie slotconstructie

Bij de eerste lange MT palen zijn slotverklikkers toegepast. Deze slotverklikkers bleken echter onpraktisch in de uitvoering en bovendien stond de functionaliteit en effectiviteit ter discussie. In plaats hiervan zijn van elke MT paal hellingmetingen uitgevoerd in een vooraf aangebrachte hellingmeetbuis aan de MT paal. Vanuit het besteksontwerp dienen de sloten gevuld te worden met bentoniet. Het bentoniet dient na uitvoering van de MT paal via een injectieleiding door grout te worden verdrongen. Tijdens de uitvoering van de eerste MT palen bleek dat de sloten tijdens het vullen van de oversnijding vol stroomden met Dämmer afkomstig uit de oversnijding. Gevolg was dat de “vrouwelijke” sloten uitgeboord moesten worden, voordat een naastliggende MT paal met “mannelijke” sloten geboord kon worden. Daarop is besloten om de sloten met kleikorrels (Mikoliet) te vullen. Vooraf is een proef uitgevoerd om de indringing van Dämmer en Drillmix in deze kleikorrels te bepalen. De indringing in de kleikorrels met toegevoegd water bleek voldoende klein te zijn.

Verdere aanpassingen en verbeteringen zijn gedurende het gehele uitvoeringstraject doorgevoerd. Deels hadden deze betrekking op al het speciaal voor dit werk ontwikkelde materieel, maar ook zijn diverse verbeteringen doorgevoerd om tot een efficiënter uitvoeringsproces te komen.

BEHEERSING, CONTROLE EN TOETSING UITVOERING

Om het uitvoeringsproces beheersbaar te houden en effectief te kunnen volgen, zijn werk- en uitvoeringsplannen opgesteld:

- Werkplan boren inregelpaal (eerste MT paal 87);
- Werk- en keuringsplanvolgende inregelpalen;
- Werkplan lange MT palen;
- Werkplan korte MT palen.

Alle MT palen zijn getoetst aan het bestek en aan het vigerende werkplan. Voor elke paal is door de VOF Stationseiland Amsterdam vooraf een checklist opgesteld. Hierin staan de belangrijkste eisen en aandachtspunten. Toezichthouders kunnen hierdoor de uitvoering volgen en waar nodig direct ingrijpen. Per geïnstalleerde MT paal zijn alle resultaten verwerkt in zogenaamde “as built” formulieren. In deze formulieren zijn alle eisen uit het bestek en de vigerende werkplannen getoetst. Bovendien is gedurende het gehele uitvoeringsproces

de uitvoering door drie partijen getoetst:

- CMM heeft haar eigen kwaliteitscontrole en kwaliteitsregistratie;
- CSO keurt deze kwaliteitsregistratie, in het kader van externe kwaliteitsborging (EKB), alvorens deze officieel bij de opdrachtgever wordt aangeleverd;
- VOF Stationseiland Amsterdam keurt de ontvangen documenten, toetst de uitvoeringen en beoordeelt de kwaliteit van de MT palen en MT palenwand.

CONCLUSIE

Het verticale MicroTunnelling systeem (MT systeem) is gebaseerd op de techniek van horizontaal gestuurd boren, welke volledig is aangepast om verticaal gestuurd te kunnen boren. Deze innovatieve techniek is voor het eerst toegepast onder het emplacement van het Amsterdam Centraal Station. Tijdens de uitvoering van het eerste deel van de bouwkuip, de 100 m lange westwand, zijn diverse aanpassingen aan het boor- en uitvoeringsproces doorgevoerd, waardoor het gehele (boor)proces verbeterd en geoptimaliseerd is. In september 2007 gaat het laatste deel van de bouwkuip, de eveneens 100 m lange oostelijke MT wand, in uitvoering. Het is in dit stadium nog te vroeg om een eindoordeel over het nieuwe MT funderingssysteem te geven. De tot nu toe beschikbare kwaliteit- en controle registraties zijn getoetst aan het bestek en de vigerende werkplannen. Op basis hiervan is de verwachting dat de MT palenwand onder het Amsterdam Centraal Station naar behoren zal functioneren.

REFERENTIES

- [1] J.C.W.M. de Wit, P.J. Bogaards, O.S. Langhorst, B.J. Schat, R.D. Essler, J. Maertens, B.K.J. Obladen, C.F. Bosma, J.J. Sleuwaegen en H. Dekker: Ontwerp van de sandwichwand onder Amsterdam Centraal Station, *Geotechniek* 2006, nr. 2, blz. 24-30.
- [2] J.C.W.M. de Wit, P.J. Bogaards, O.S. Langhorst, R.D. Essler, J. Maertens, B.K.J. Obladen, C.F. Bosma, J.J. Sleuwaegen en H. Dekker: Uitvoering van de sandwichwand onder Amsterdam Centraal Station, *Geotechniek* 2006, nr. 3, blz. 54-61.

Reacties op dit artikel kunnen tot 1 oktober 2007 naar de uitgever worden gestuurd