

Ontwerp van de sandwichwand onder Amsterdam Centraal Station

ir. J.C.W.M. de Wit, ir. P.J. Bogaards

Adviesbureau Noord/Zuidlijn Amsterdam ^{*1}

ing. O.S. Langhorst, ir. B.J. Schat

VOF Stationseiland Amsterdam ^{*2}

R.D. Essler MSc, prof. ir. J. Maertens

Adviseurs

ing. B.K.J. Obladen, ir. C.F. Bosma

Hoofdaannemer CSO, Combinatie
Strukton Betonbouw van Oord ACZ

J.J. Sleuwaegen, ing. H. Dekker

Onderaannemer Jetgrouten Smet Keller

^{*1}: Samenwerkingsverband tussen Royal

Haskoning, Witteveen en Bos en
Ingenieursbureau Amsterdam

^{*2}: Samenwerkingsverband tussen Holland

Railconsult en Arcadis Infra

SAMENVATTING

Onder het treinstation Amsterdam CS wordt een bouwkuip aangelegd, waarbinnen een tunnelement wordt afgezonken als onderdeel van het metrostation CS (perrondeel) van de Noord/Zuidlijn. Het gedeelte onder Amsterdam CS wordt gekenmerkt door de toepassing van bijzondere technieken in de vorm van o.a. de zogenaamde sandwichwand. Dit is een samengestelde wand bestaande uit twee rijen Tubex-palen met daartussen een lichaam van jetgroutkolommen. Deze wand fungeert als bouwkuipwand en heeft constructief zowel in horizontale als in verticale richting een functie. Het aanbrengen van de wand, zowel Tubex-palen als jetgroutkolommen, in deze specifieke omstandigheden (beperkte hoogte, kwetsbare historische bebouwing) binnen de gestelde ontwerpeisen qua uitvoeringstolerantie, water- en grondrichtigheid kan als grensverleggend worden beschouwd. Dit artikel gaat in op het ontwerp van de sandwichwand.

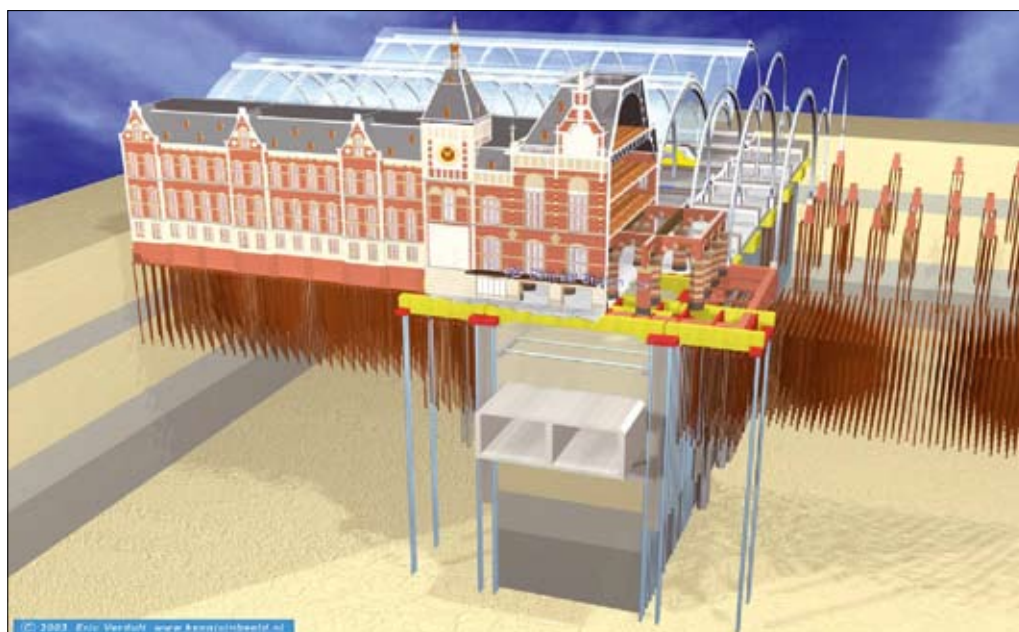
INLEIDING

De nieuwe metroverbinding 'Noord/Zuidlijn' verbindt Amsterdam-Noord en Amsterdam-Zuid/WTC met het stadscentrum. Op foto 1 is de ligging van de nieuwe metrolijn ter plaatse van het IJ en het stationseiland aangegeven. Onder het treinstation Amsterdam CS wordt een nieuw metrostation aangelegd, zie figuur 1.

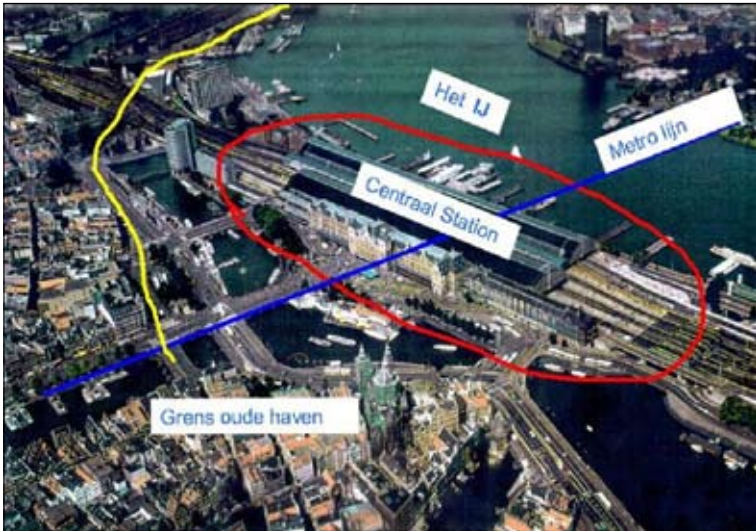
Als omgevingsvoorwaarde geldt dat de treinen dienen te blijven rijden, de overlast voor de reizigers tot een minimum beperkt dient te blijven en het monumentale station geen schade oploopt. De verbouwing vindt plaats op een relatief klein oppervlak van het grootste overstapstation van Nederland en maakt het project zeer complex. Het stationsgebouw is omstreeks 1880 gebouwd op een, kort daarvoor, aangelegd eiland in het IJ. Het gebouw is gefundeerd op ca. 9.000 houten palen; gedurende 100 jaar is ca. 18 cm bouwzetting opgetreden.

Vanwege de complexiteit aan voorwaarden voor de uitvoering staat deze onder begeleiding van een stuurgroep van experts voor de bewaking en bijsturing van het uitvoeringsproces. Ter beheersing van het proces zijn vooraf jetgroutproeven voorzien om uitvoeringsrisico's beter in beeld te brengen en beheersbaar te maken. Daarnaast zijn de ontwerpvoorwaarden op uitvoerbaarheid getoetst.

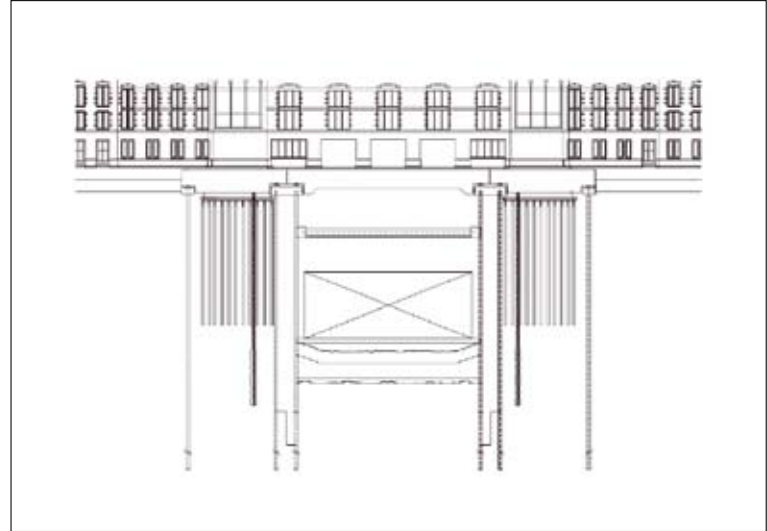
In 2003 is een aanvang gemaakt met de sandwichwand door het trekken van de houten palen ter plaatse van de te maken sandwichwand; in 2004 zijn de stalen Tubex-palen voor de zuidelijke wanddelen geïnstalleerd. Vanaf mei 2005 is gestart met de uitvoering van de sandwichwand waarbij naast de omschreven



↑ Figuur 1 Impressie van het nieuwe Amsterdam Centraal Station



↑ Foto 1 De ligging van de nieuwe metrolijn ter plaatse van het IJ en het stationseiland



↑ Figuur 2 Bouwfasering

procesbegeleiding een uitgebreid meetprogramma opgesteld is om tijdens de uitvoering te kunnen bijsturen en de kwaliteit van het gerealisierde product vast te kunnen stellen. Dit geldt voor zowel de afzonderlijke kolommen als voor het eindproduct, de sandwichwand. De meetresultaten worden per kolom verwerkt en geïnterpreteerd, waarbij per kolom wordt beoordeeld wat de invloed is op het nog te maken werk. Indien nodig worden preventieve dan wel correctieve maatregelen genomen om de gemeten invloed te beheersen of op te heffen. Naast de procesmatige en kwalitatieve metingen fungeren verschillende onafhankelijke meetsystemen op het stationsgebouw als controlemiddel om schade aan het gebouw te voorkomen.

Onder het stationsgebouw wordt in verschillende bouwfaseringen de tunnel aangelegd zoals in *figuur 2* is weergegeven.

De tunnel wordt onder het stationsgebouw aangelegd, waarbij de volgende fasering is te onderscheiden:

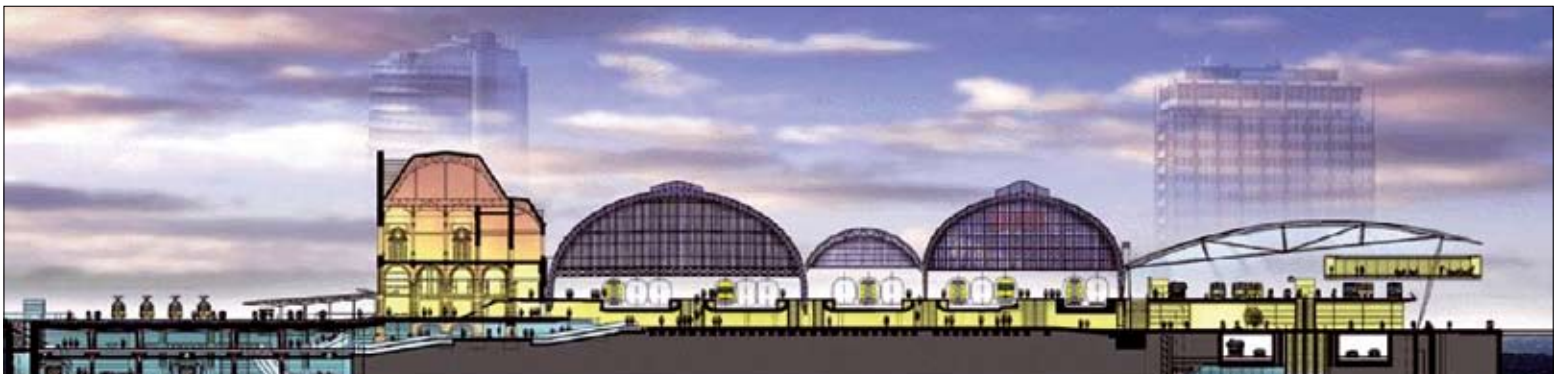
- 1 Trekken houten palen en installeren Tubexpalen

- 2 Aanbrengen sandwichwand
- 3 Maken opvangconstructie stationsgebouw
- 4 Verlagen grondwaterstand
- 5 Droog ontgraven
- 6 Aanbrengen diep groutstempel
- 7 Aanbrengen hoog stalen stempelraam
- 8 Waterpeil verhogen
- 9 Nat ontgraven
- 10 Invaren en afzinken tunnel
- 11 Aanvullen met grond

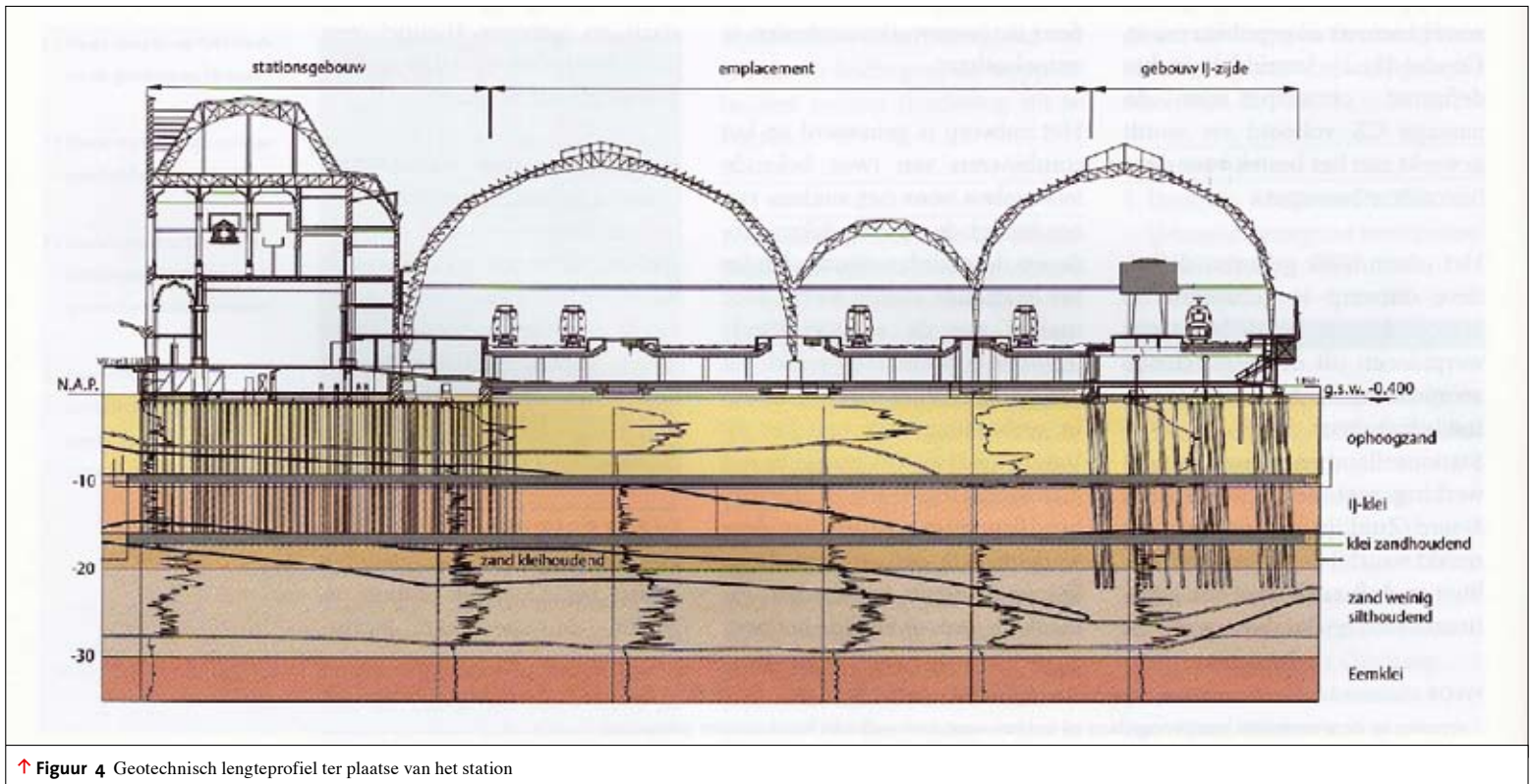
Naast de aanleg van het metrostation zijn tegelijkertijd ook andere projecten op het stationseiland in uitvoering, zoals verlengde perrons aan de westzijde, een onderdoorgang ten behoeve van het autoverkeer en een nieuw busstation met overkapping over de gehele Ruiterkade en een aangepaste openbare ruimte en bruggen aan de IJ-zijde. Naar verwachting is de totale verbouwing van het station eind 2010 gereed. In *figuur 3* is een impressie weergegeven.

Globale Grondbeschrijving

De bodemopbouw direct onder het maaiveld (NAP +3 m) bestaat uit een ca. 8 m dikke laag ophoogzand (tot NAP -5 m). Hieronder komt tot ca. NAP -15 m een relatief slap lagenpakket voor, bestaande uit 'IJ-klei' en zandhoudende kleilagen. Vanaf dit niveau tot ca. NAP -28 m à NAP -29 m komt de 2e zandlaag voor, bestaande uit zand met weinig silt en zand met klei. Deze heeft lokaal een redelijk goede sterkte. Onder het niveau van ca. NAP -28 m à NAP -29 m komt tot ca. NAP -45 m een laag 'Eemklei' voor. Op een niveau van NAP -45 m komt de ca. 1 m dikke laag van Harting voor, dat is een relatief dunne veenlaag waarin methaangas kan voorkomen. Vanaf dit niveau tot ca. NAP -56 m komt een laag 'Glaciale klei' voor. De 3e zandlaag, met hoge conusweerstand, komt voor vanaf NAP -56 m, deze is sterk draagkrachtig tot minimaal de onderzochte diepte van NAP -70 m. De hoogst gemeten grondwaterstand bedraagt NAP -0,25 m, de stijghoogte in de 2e zandlaag bedraagt ca. NAP -1,5 m en in de 3e zandlaag NAP -3 m. Het geotechnisch lengteprofiel is in *figuur 4* weergegeven.



↑ Figuur 3 Impressie van het verbouwde station



↑ **Figuur 4** Geotechnisch lengteprofiel ter plaatse van het station

HET ONTWERP VAN DE SANDWICHWAND

De sandwichwand is voor dit projectonderdeel ontwikkeld, afgestemd op de specifieke omstandigheden onder Amsterdam CS. Bij die ontwikkeling heeft met name de bescherming van het stationsgebouw als nationaal monument voorop gestaan. Het concept van de sandwichwand berust op een zware stijve wand die wordt opgebouwd uit kleinere componenten. Het benodigde



↑ **Foto 2** Inbrengen van Tubex-palen met de Topdrill

equipment is daarbij relatief licht en is inzetbaar binnen het stationsgebouw zonder al te grote ingrepen in het gebouw.

Geometrische aspecten

De sandwichwand bestaat uit twee rijen Tubex-palen met een diameter van 457 mm, een wanddikte van 25/16 mm en een lengte van 26 m (niveau onderkant jetgroutmassief) tot 60 m (niveau draagkrachtige zandlaag). De palen staan ca. 1,0 m hart op hart en de paalrijen staan ca. 2,5 m hart op hart. Ten behoeve van de samenwerking met het groutlichaam worden de stalen Tubex-palen voorzien van ringen (32 mm). De palen worden geïnstalleerd in korte delen (2 – 5 m) met behulp van een speciaal voor dit werk aangepaste Tubex-machine met verlengde makelaar (Topdrill). Ten behoeve van de voortgang van het werk is een speciale schroefkoppeling voor de verbinding van de paalsecties ontwikkeld. Op foto 2 is het inbrengen van Tubex-palen met de Topdrill weergegeven.

Tussen de palen wordt de ruimte opgevuld door jetgroutkolommen met een diameter van 800 tot 1.200 mm en een lengte van 28,5 m. Tussen de paalrijen wordt de ruimte opgevuld door twee rijen van groutkolommen met een diameter van 1.400 tot 2.200 mm en een lengte van 26,0 tot 28,5 m (de rij aan de buitenzijde van de bouwkuip heeft een lengte van 26 m).

De ter plaatse aanwezige houten palen dienen te worden getrokken onder gelijktijdig vullen van het paalgat met zand. In *figuur 5* is de situatie van het station met de sandwichwand en het jetgroutmassief weergegeven.

Constructieve aspecten

De kerende hoogte van de wand is ca. 18 m, hierbij bedraagt het waterstandverschil over de wand 3 m. Het grootste waterstandverschil over de wand bedraagt ca. 5 m in de fase dat het groutstempel wordt aangebracht vanaf een niveau van ca. NAP -4,5 m. De horizontale stabiliteit van de wand wordt verzorgd door een constructieve samenwerking tussen de stalen Tubex-palen en het groutlichaam aangevuld met stempels op drie niveau's. Dit resulteert in een zeer stijve wand, waarbij de optredende vervormingen in orde van grootte 20 tot 30 mm zijn. De zakkingstrog achter de wand is ca. 10 mm diep en strekt zich uit over een lengte van ca. 20 m. Deze vervormingen dienen te worden gecombineerd met de vervormingen als gevolg van het inbrengen van de wand (uitvoering), effecten van het overnemen van het gebouw op een nieuwe fundering (ter plaatse van de bouwput en direct naast de bouwput) en het autonome zettinggedrag van de Eemkleilaag. Met behulp van EEM-berekeningen waarin het gedrag van het metselwerkgebouw is geanalyseerd, is uiteindelijk het ontwerp gecompleteerd met

vijzelinrichtingen waarmee optredende vervormingen kunnen worden gecompenseerd. De sandwichwand draagt de verticale belastingen als gevolg van opgevangen gebouwdelen ter plaatse van de bouwput, via de "brede" voet van het groutlichaam in combinatie met een aantal Tubex-palen in de sandwichwand welke tot de 3^e zandlaag reiken, naar de ondergrond af.

Het gekozen wandsysteem is zeer stijf en gaat uit van de samenwerking tussen de Tubex-palen en het groutmassief, maar heeft als nadeel een relatief bros bezwijkgedrag. De gehanteerde veiligheidsfactoren zijn derhalve sterk verhoogd, waarbij als vangnet is ingebouwd dat de veiligheid tegen bezwijken wordt gegarandeerd door de sterkte van de twee rijen Tubex-palen (de horizontale vervormingen nemen dan wel sterk toe).

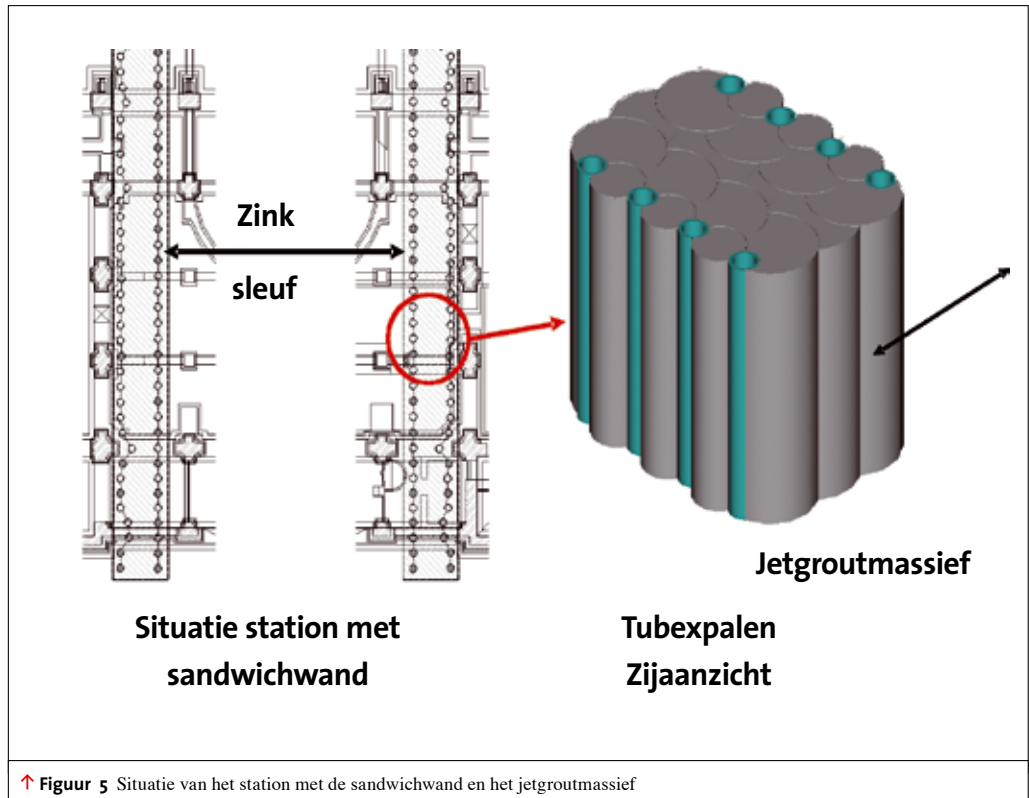
Ter bescherming van het stationsgebouw zijn hulpconstructies uitgevoerd direct naast de bouwkuipwanden. Deze hulpconstructies dienen compensatie te bieden aan de verminderde draagkracht van de huidige fundering van het stationsgebouw als gevolg van de uitvoering van de bouwkuipwanden.

Waterremmendheid en grond dichtheid van het wandsysteem

De ontwerprandvoorwaarden kunnen worden samengevat tot waterremmend, grondkerend en een uitvoeringsproces waarbij de treinen blijven rijden en de overlast tot een minimum wordt beperkt. Uitwerking van deze voorwaarden in het ontwerp hebben tot de sandwichwand geleid.

De bouwpraktijk leert dat de waterdichtheid van een jetgroutlichaam opgebouwd uit kolommen, bijzonder gevoelig is voor variaties in het uitvoeringsproces. Hierdoor speelt de afstemming tussen de ontwerprandvoorwaarden en het uitvoeringsproces een zeer belangrijke rol. In *figuur 6* zijn de elementen van de sandwichwand weergegeven.

In het ontwerp van de sandwichwand is zo veel als mogelijk met bovengenoemde aspecten rekening gehouden, hetgeen zou moeten resulteren in een waterremmende en grond-dichte wandconstructie met beperking van het waterstandsverschil over de wand tot maximaal 5 m in de fase dat het groutstempel wordt gemaakt en ca. 3 m in de fase dat de bouwput op diepte wordt gegraven. Er worden vier rijen groutkolommen toegepast, waarbij de buitenste rijen tussen de Tubex-palen worden gemaakt.

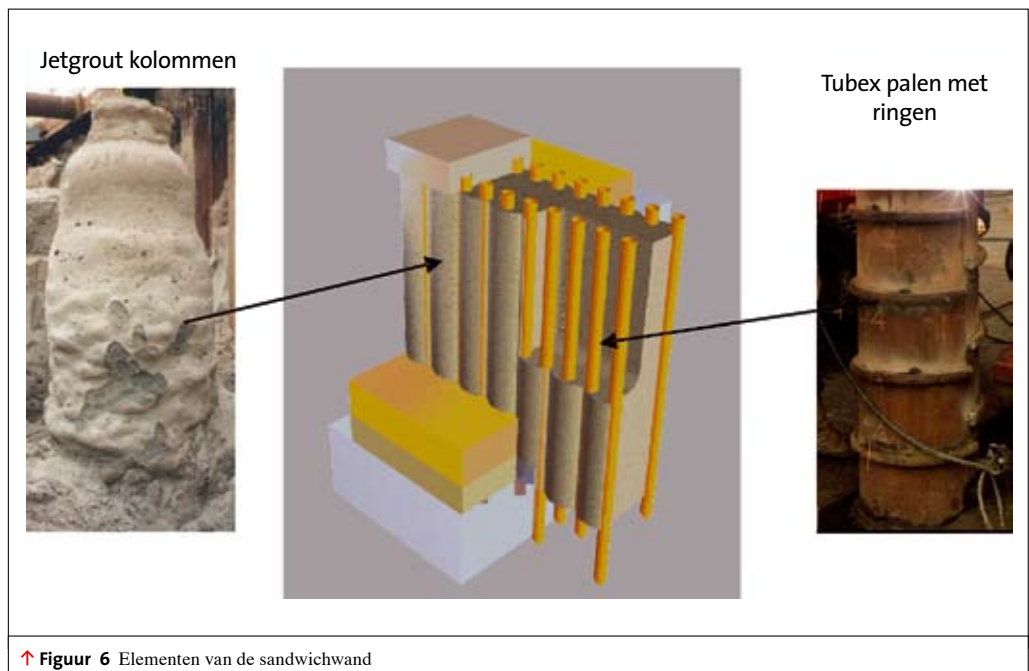


↑ **Figuur 5** Situatie van het station met de sandwichwand en het jetgroutmassief

Risicoprofiel

Tijdens de ontwerpfasen zijn uitgebreide risicoanalyses uitgevoerd voor deze bijzondere wand. In hoofdlijnen, zonder een volledig beeld te geven, kunnen de risico's worden teruggebracht tot drie hoofdgroepen die verband houden met de constructieve functie, de waterremmende functie en de grond dichtheid. In *tabel 1* is het risicoprofiel van het ontwerp van de sandwichwand samengevat.

Een indirect gevolg van het falen van het wandsysteem kan schade aan het stationsgebouw van Amsterdam CS zijn. Het is daarom van groot belang om de risico's zoveel als mogelijk te beperken en te beheersen. Als onderdeel van een groot onderzoek naar grondverbeteringstechnieken in het kader van de voorbereiding van de Noord/Zuidlijn is de techniek van jetgrouten nader onderzocht door middel van een jetgroutproef in Amsterdam-Noord. Er zijn



↑ **Figuur 6** Elementen van de sandwichwand

Risico / falen	Direct gevolg	Oorzaak
Constructief	Grote vervormingen wand (Bezwijken wand niet aan de orde: tubexpalen alleen hebben voldoende sterkte)	Jetgroutsterkte te laag Onvoldoende aanhechting met Tubexpalen Ontbreken van grote groutvolumes (schaduwwerking / misboringen)
Waterdichtheid	Waterstandsverlaging buiten de bouwput Waterstand binnen de put niet beheersbaar	Onvoldoende overlap tussen Tubex en jetgrout a.g.v.: - te kleine diameters van jetgroutkolommen - te grote afwijking in verticaliteit jetgroutkolommen - te grote afwijking in verticaliteit Tubexpalen - obstakels in ondergrond Onvoldoende overlap groutkolommen onderling: - te kleine diameters van jetgroutkolommen - te grote diameters van jetgroutkolommen (misboringen) - schaduwwerking door achtergebleven houten palen - te grote afwijking in vertikaliteit jetgroutkolommen - obstakels in ondergrond
Grondichtheid	Waterstandsverlaging buiten de bouwput Waterstand binnen de put niet beheersbaar Grondtransport	Zie oorzaken bij waterdichtheid

↑ Tabel 1 Globaal risicoprofiel van het ontwerp van de sandwichwand

daarbij een aantal kolommen gemaakt ten behoeve van het ontwerp van de sandwichwand, waarbij met name gekeken is naar de bereiken eindsterktes en de minimaal te realiseren diameters in de Amsterdamse grondslag. Op basis van deze proef is voldoende bevestiging voor het ontwerp verkregen. Naar aanleiding daarvan zijn de ontwerpeisen vastgesteld.

In het ontwerp was uitgegaan van een afwijking ten opzichte van de verticaal, gemeten over de volledige lengte van de Tubex-paal, van niet meer dan 0,5% van de beschouwde diepte ten opzichte van de paalkop. Voor het jetgrouten geldt dat de afwijking ten opzichte van de theoretische verticaal van de groutlans kleiner of gelijk dient te zijn aan 200 mm over de bovenste 20 m (1%) en 300 mm over de totale lengte. De afwijking van de gerealiseerde diameter ten opzichte van de theoretische diameter moet kleiner zijn dan 15% van de diameter voor diameters tot 1.000 mm en kleiner dan 10% van de diameter voor diameters groter dan 1.500 mm. Voor tussenliggende diameters gelden lineair geïnterpoleerde percentages. De rekenwaarde voor de druksterkte is bepaald op 1,75 N/mm² na 28 dagen.

VAN JETGROUTPROEF NAAR DEFINITIEF WERK

Na de gunning van het werk is een 2^e jetgroutproef op locatie (Voorplein) uitgevoerd. Het

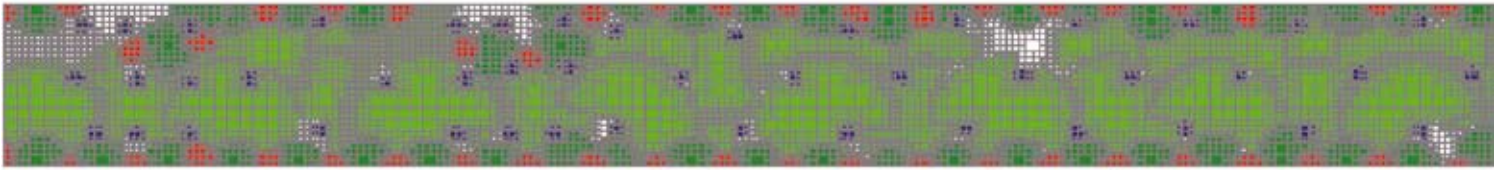
doel van de 2^e jetgroutproef op het Voorplein was om de onderaannemer in staat te stellen om het proces op locatie in te regelen alvorens te starten met de sandwichwand, zijn expertise op het gebied van jetgrouten te bevestigen en om te komen tot een nog betere inkadering van de risico's. Tijdens de proef zijn de diameter en variaties in diameter door middel van spinmetingen en hydrofoonmetingen, de verticaliteit van de boring van de kolom en de sterkte van de groutkolom onderzocht.

De resultaten van de proef op locatie bleken tegen te vallen. De beheersing van de diameter en de variatie daarop bleek onvoldoende, de sterkte maar juist toereikend. De grondgesteldheid op locatie bleek minder voorspelbaar dan die bij de proeflocatie in Amsterdam-Noord en werd beschouwd als de belangrijkste oorzaak. Wel was het mogelijk om op basis van de verkregen informatie keuzes te maken voor de uitvoering van het definitieve werk. Ten behoeve van de werkzaamheden voor het definitieve werk heeft de jetgroutproef geleid tot technisch-inhoudelijke (ontwerp en uitvoering) en procesmatige aandachtspunten. De technisch-inhoudelijke aandachtspunten zijn:

- Scheiding van de uitvoeringsdoelen diameter en sterkte. Hierbij wordt de voorsnijdfase gebruikt om de diameter te maken en de nasnijdfase voor het toevoegen van voldoende bindmiddel ten behoeve van de sterkte. Bij het voorsnijden wordt met een lage

volumieke massa van de groutspecie de volledige diameter gesneden terwijl bij het nasnijden de kolom gehomogeniseerd wordt, waarbij het voorziene cementgehalte van de kolom wordt gerealiseerd.

- Kolommen in secties (van 5 tot 10 m) maken ter beperking van de tijdseffecten, m.a.w. fasering van de kolom in de diepte in verband met de grote uitvoeringsdiepte/kolomlengte van maaiveld tot NAP -28,5 m.
- Beheersing van de sterktes door een betere kwaliteitsbewaking van de mengsels en dichtheden op het werk.
- Samenstelling van het bindmiddel beter afstemmen op de zeer heterogene bodemopbouw op locatie.
- Sterkte-eisen afstemmen op de werkelijke situatie d.w.z. het tijdstip van belasten en een genuanceerde benadering van ontbrekende groutvolumes. De rekenwaarde van de druksterkte van groutspecie na 120 dagen dient 1,5 N/mm² te zijn en de rekenwaarde van de splijttreksterkte van groutspecie na 120 dagen 0,15 N/mm².
- Meer marge in het ontwerp, waardoor een grotere afwijking van de diameter toelaatbaar is. Het ontwerp is aangepast voor een variatie van +/- 20%, een marge die volgens alle betrokken experts haalbaar is. Bij het ontwerp van het kolommenpatroon dient rekening te worden gehouden met de werkelijke positie van de reeds aangebrachte Tubex-palen en achtergebleven (delen van) houten palen.



↑ **Figuur 7** Probabilistische analyse van de wand

De procesmatige wijzigingen zijn:

- Opzetten van een uitgebreid meetprogramma ten behoeve van de uitvoering van het jetgrouten (registratie van het proces, diameter metingen met spin en hydrofoon metingen, sterktemetingen);
- Bij het patroon anticiperen op as built informatie (3D inmeting Tubex-palen, aanwezige houten paal(delen), successievelijke productie van jetgroutkolommen). Dit vergt een strak geregisseerde aanpak en begeleiding (→ Observational method), waarbij ontwerp en/of uitvoeringsparameters desgewenst bijgesteld moeten worden.
- Uitbreiding van de organisatie tijdens het jetgrouten door middel van:
 - o het instellen van een stuurgroep/ uitvoeringsbegeleidingsteam;
 - o een controleur op de bouwplaats, die real time controle uitvoert om menselijke fouten zoveel mogelijk uit te sluiten en

zodoende een dubbele controle hebbend op de invoer op de machine;

- o de verwerking van as built gegevens op de locatie.

Daarnaast is door GeoDelft een model ontwikkeld, waarmee op basis van probabilistische analyses een indruk kan worden verkregen over de waterremmendheid en de sterkte van de wand. Voor alle elementen binnen de wand, zie *figuur 7*, zijn afwijkingen cq. uitvoeringstoleranties gedefinieerd (Tubex-palen, groutkolommen en achtergebleven houten palen of paaldelen). Op basis van een Monte Carlo analyse worden een groot aantal modellen doorgekend en beoordeeld op het bestaan van lekwegen (de zogenaamde preferente paden) dan wel op het ontbreken van groutvolumes. Daarbij wordt rekening gehouden met schaduwwerking, misboringen (boringen in reeds gemaakte kolommen), etc. Op basis van bereke-

ningen met dit model en de stand van de Tubex-palen (reeds geplaatst) is het ontwerp voor het jetgroutlichaam op een enkele plaats nog aangepast. Gedurende de uitvoering kan het model op basis van de uitgevoerde metingen worden omgebouwd tot een pseudo-deterministisch model op basis waarvan de betrouwbaarheid voor wat betreft de voorspellingen voor de aanwezigheid van lekwegen kan worden vergroot.

LITERATUUR

- [1] A.M.W. Duijvestijn en B.J. Schat: Een kanaal onder het Centraal, Cement 2001, nr. 3, blz. 41-47;
- [2] J. van Esch, A.F. van Tol, H. Havinga, A.M.W. Duijvestijn, B.J. Schat en J. de Wit: Functional analyses of jetgrout bodies based on Monte Carlo simulations