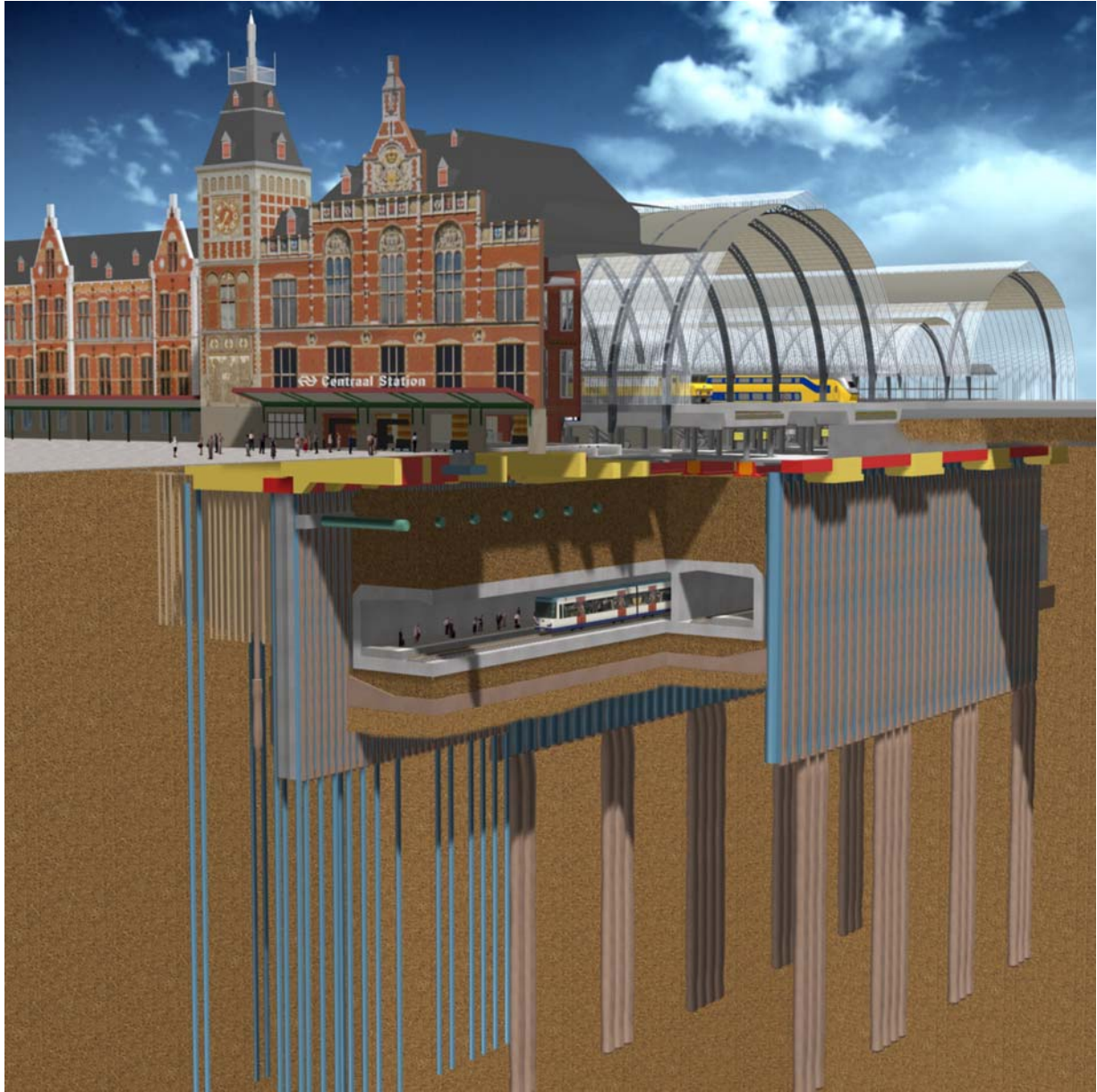


Uitvoeringsrisico's van de bouwkuipwanden onder Amsterdam CS

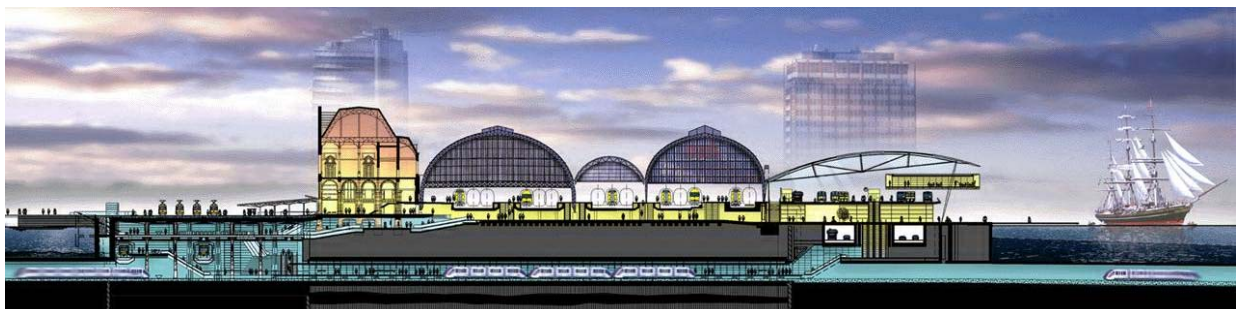


Combinatie Strukton Betonbouw
Van Oord ACZ
Metrostation CS

Eindrapportage
Afstudeeronderzoek

M. van der Sloot

TU Delft
Delft University of Technology



Uitvoeringsrisico's van de bouwkuipwanden onder Amsterdam CS

**Eindrapportage
afstudeeronderzoek**

M. van der Sloot

Afstudeercommissie

prof.dr.s.ir. J.K. Vrijling	(TU Delft)
ing. A.A.N. van den Berg	(Strukton Betonbouw BV)
ing. H.J. Everts	(TU Delft)
dr.ir. P.H.A.J.M. van Gelder	(TU Delft)
ir. T.D. ten Hove	(T&E Consult)
ir. G.B. de Vries	(TU Delft)



Technische Universiteit Delft
Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen
Afdeling Waterbouwkunde en Geotechniek



Combinatie Strukton Betonbouw / Van Oord ACZ
Metrostation CS
Amsterdam



Voorwoord

Tijdens mijn praktijkstage werd mij de mogelijkheid geboden om een afstudeeronderzoek te doen bij het project Metrostation CS, onderdeel van de Noord/Zuidlijn, waar de aannemerscombinatie Strukton Betonbouw BV/ Van Oord ACZ actief zou zijn. Even was het nog spannend of het project nog doorging, maar gelukkig stemde de gemeenteraad van Amsterdam voor het uitvoeren van de Noord/Zuidlijn in oktober 2002.

Tijdens oriënterende gesprekken bleek dat het realiseren van de bouwkuip onder het Amsterdam Centraal Station met veel risico's gepaard ging. Een onderzoek naar de bedreigingen van dit systeem was dan ook voor de hand liggend en een grote uitdaging in de complexe situatie onder het monumentale station. Na negen maanden is dit onderzoek afgerond en vormt een mooie afsluiting van mijn opleiding aan de faculteit Civiele Techniek aan de TU Delft. In dit rapport vindt u de resultaten van mijn afstudeeronderzoek.

Hierbij wil ik dan ook Martijn Smitt en Arthur van de Berg bedanken voor het bieden van dit zeer interessante en uitdagende afstudeeronderzoek. Mijn dank gaat uit naar alle medewerkers van het project, in het bijzonder Carlos Bosma en Roel Brouwer, en Ruud van de Meer van CMM. Tevens bedank ik mijn afstudeercommissie voor hun positieve feedback en kritiek op mijn afstudeerwerk.

Daarnaast wil ik speciaal Nathalie, mijn familie en vrienden danken die mij in deze roerige tijden tijdens het afstuderen gesteund hebben.

Amsterdam, juli 2003

Micha van der Sloot



Samenvatting

In de complexe situatie van een groot openbaar vervoersknooppunt en de aanwezigheid van een monumentaal stationsgebouw worden er zeer hoge eisen gesteld aan het ontwerp en de uitvoering van de bouwkuip ten behoeve van de Noord/Zuidlijn onder het Amsterdam Centraal Station. In deze bouwkuip zal er een tunnelelement invaren en afgezonken worden, die dienst zal doen als metrotunnel.

Door het uitvoeren van een risicoanalyse zijn de bedreigingen van het ontwerp en de uitvoering geïnterpreteerd en is er de onderlinge samenhang van de risico's binnen het systeem onderzocht. Hieruit bleek dat er zeer veel bedreigingen gerelateerd zijn aan de waterdichtheid van de bouwkuipwanden.

Het besteksontwerp van de buispalenwanden onder het emplacement is vanwege de risico's met betrekking tot de waterremmendheid vervangen is door een alternatieve, innovatieve uitvoeringsmethode. Deze nieuw ontwikkelde uitvoeringstechniek, de microtunnellingmethode, is nog niet eerder op deze wijze toegepast: met behulp van een verticaal opgestelde schildboormachine worden de buispalen op diepte gebracht. Deze alternatieve buispalenwand is daarom geanalyseerd met een Monte Carlo model, waarbij het aantal optredende lekkages bepaald wordt.

De kern van de waterkerendheid van de buispalenwand is de stalen slotverbinding die zich tussen de buispalen bevindt. In het Monte Carlo model worden de toleranties van het slot getoetst aan de hand van plaatsafwijkingen en scheefstand van de individuele buispalen. Het verwachte aantal lekkages in de gehele buispalenwand wordt geschat op drie.

Eén van de belangrijkste aannamen van het model is het onafhankelijke gedrag van de buispalen tijdens het aanbrengen. In werkelijkheid zullen deze elkaar wel beïnvloeden als gevolg van geleiding van de paal tijdens het inbrengen door de koppelsloten en de aanpassing van de paalplaats aan de reeds geplaatste aansluitende palen. De verwachtingswaarde voor het aantal gaten zal dan lager uitkomen.

Ondanks dat de microtunnellingmethode een nieuwe, innovatieve uitvoeringstechniek is die nog niet toegepast is op deze wijze, lijkt de buispalenwand aangebracht middels deze microtunnellingmethode volgens het Monte Carlo-model veelbelovend om op deze wijze toe te passen onder het Amsterdam Centraal Station, mits er nog een aantal zaken onderzocht worden, zoals de slottoleranties, de beheersbaarheid van de buisrotatie en de afhankelijke plaats van de mannelijke buispalen in het model.

Op basis van de gevoeligheidsanalyse van de getoetste variabelen in het model, wordt aanvullend onderzoek om de microtunnellingmethode te verbeteren aanbevolen voor de volgende twee parameters:

- de mogelijkheden voor controleerbaarheid en stuurbaarheid van de rotatie van de buispaal om zijn eigen as
- De slotsterkte en geleidingseigenschappen zijn niet in het model getoetst. In deze parameters zit nog reservecapaciteit, zoals (plastische) vervorming, totdat er daadwerkelijk functieverlies van de slotverbinding optreedt. Deze slottoleranties zouden nog verder onderzocht moeten worden.

Ook zal het model aangepast moeten worden met betrekking tot de plaatsing van de mannelijke buispalen die afhankelijk zijn van de aansluitende vrouwelijke buispalen om tot een betere kansbenadering van het aantal lekkages te komen.

Daarnaast dienen er een aantal noodscenario's opgesteld te worden om de gevolgen van een lekkage, die zich onverhoopt tijdens één van de verschillende fases kan voordoen, te beperken, waarbij vooral aandacht besteed moet worden aan de positie van de pontons tijdens het afzinken.

Inhoud

VOORWOORD.....	III
SAMENVATTING.....	V
HOOFDSTUK 1 INLEIDING.....	1
1.1 PROJECT PASSAGE AMSTERDAM CS	1
1.2 PROBLEEMSTELLING.....	2
1.3 DOELSTELLING	2
1.4 AFBAKENING	2
1.5 STRUCTUUR RAPPORT.....	3
HOOFDSTUK 2 RISICOANALYSE	5
2.1 RISMAN-METHODE	6
2.2 CUR190-METHODE	6
2.3 TECHNIEKEN.....	7
2.4 AANPAK.....	8
2.5 UITGANGSPUNTEN RISICOANALYSE	8
HOOFDSTUK 3 DE NOORD/ZUIDLIJN.....	9
3.1 EEN METRO IN AMSTERDAM.....	9
3.2 HET TRACÉ	9
3.3 AMSTERDAM CS	10
HOOFDSTUK 4 METROTUNNEL ONDER HET STATION	13
4.1 ONTWERPUITGANGSPUNTEN	14
4.2 AFZINKEN	15
4.3 EISEN AAN DE BOUWKUIP	16
4.4 BOUWKUIP ONDER AMSTERDAM CS	16
4.5 SANDWICHWAND.....	17
4.6 AANSLUITING BOUWKUIPWAND AAN DIEPWAND VOORPLEIN.....	24
4.7 BUISPALENWAND	25
4.8 MICROTUNNELLING.....	30
4.9 AANSLUITING SANDWICHWAND - MICROTUNNELLINGWAND.....	32
4.10 VERBINDING NAAR HET IJ	32
4.11 HORIZONTALE BEGRENZINGEN.....	32
4.12 ONTGRAVEN	33
4.13 GEMEENSCHAPPELIJK DOMEIN.....	33
4.14 TE BESCHOUWEN SYSTEEM.....	35
HOOFDSTUK 5 DE BOUWKUIP VERDER GEANALYSEERD	37
5.1 INLEIDING	37
5.2 SANDWICHCONSTRUCTIE.....	37
5.3 BUISPALENWAND ONDER HET EMPLACEMENT	43
5.4 AANSLUITINGEN	46
5.5 ONGEWENSTE GEBEURTENISSEN ONDER AMSTERDAM CS.....	50
5.6 RISICODOSSIER	51
HOOFDSTUK 6 RISICOMODEL	53
6.1 RISICO	53
6.2 MODELLERING RELATIES.....	53
6.3 FUNCTIE VAN HET BOOMMODEL.....	54

6.4 MODELLERING	54
6.5 VASTSTELLING KANSEN EN GEVOLGEN	57
6.6 CONCLUSIES UIT DE INVLOEDSBOOM	57
HOOFDSTUK 7 NIET AANSLUITENDE SLOTEN IN DE BUISPALENWAND.....	59
7.1 OPZET	59
7.2 AFWIJKINGEN	60
7.3 ONZEKERHEDEN	63
7.4 MODEL	65
7.5 TOETSING AAN DE EISEN.....	67
7.6 RESULTATEN SIMULATIES	69
7.7 GEVOELIGHEID MODEL	77
7.8 CONCLUSIES VAN HET SLOTMODEL	80
7.9 HET MODEL TEGENOVER DE WERKELIJKHEID.....	83
HOOFDSTUK 8 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN.....	85
8.1 CONCLUSIES	85
8.2 AANBEVELINGEN.....	86
LITERATUUR.....	87
BIJLAGEN	89



Hoofdstuk 1 Inleiding

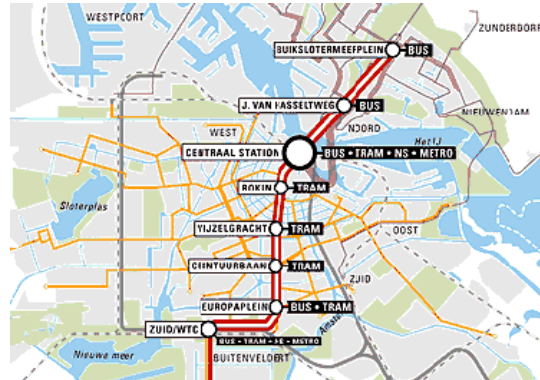
Dwars door het hart van Amsterdam wordt er een nieuwe metrolijn aangelegd in de komende jaren: de Noord/Zuidlijn. Deze metrolijn zal lopen van Amsterdam-Noord via het Centraal Station en Amsterdam-Centrum naar de Zuid-as / WTC.

Ter plaatse van Amsterdam CS komt de metrolijn onder het station te liggen: vanuit het IJ komt de metro, volgt het tracé onder het emplacement en het stationsgebouw en komt de monumentale voorgevel van het station onderdoor. Het tracé loopt vervolgens onder het Voorplein door en zal verder gaan in het geboorde gedeelte van de metrotunnel.

De metrotunnel onder het station zal bestaan uit een afgezonken tunnel, dat vanuit het IJ zal worden ingevaren. Dit tunnelelement zal onder het station een sleuf worden ingevaren, waarna het tunnelelement wordt afgezonken en op zijn definitieve plaats zal worden gelegd.

De sleuf bestaat uit een ontgraven bouwkuip. Het maken van een dergelijke constructie onder het bestaande station brengt veel gevaren met zich mee en dus worden er hoge eisen aan het ontwerp van de bouwkuip gesteld: het monumentale stationsgebouw mag geen schade ondervinden, het treinverkeer mag geen hinder ondervinden en de treinreizigers mogen geen gevaar lopen terwijl zij toch gebruik moeten kunnen maken van het station en de treinen.

Om tot een goed ontwerp én uitvoering van deze bouwkuip te komen, zullen alle bedreigingen in kaart moeten worden gebracht en zal er iets moeten worden gezegd over de grootte van deze bedreigingen. Het ontwerp kan op die manier worden beheerst door maatregelen te nemen voor de bedreigingen. Het risico van (extreme) calamiteiten, zoals het instorten van het monumentale stationsgebouw, kan op deze manier geminimaliseerd worden.



Figuur 1.1 Tracé Noord/Zuidlijn

1.1 Project Passage Amsterdam CS

De constructie van de bouwkuip, met name de bouwkuipwanden, onder het Amsterdam Centraal Station ten behoeve van de afzinktunnel van de Noord/Zuidlijn ter plaatse van het station is een zeer risicovolle onderneming. Het beheersen van de risico's behorend bij deze bouwkuipwanden zal een bijdrage leveren aan het opleveren van een kwalitatief goed product.

Voor de bouwkuipwanden worden als zeer risicovol gezien, aangezien een lekkage in de wand en grote doorbuiging van de wand zettingen kan veroorzaken, die zeer schadelijke gevolgen kunnen hebben.

Zeker bij het realiseren van de bouwkuipwanden met een nieuwe uitvoeringsmethode, de microtunnellingstechniek, zullen de onzekerheden groot zijn. Een gedegen analyse van dit systeem en de daarbij behorende risico's kan een belangrijke bijdrage leveren aan het (systematisch) blootleggen van de onzekerheden en de (on)mogelijkheden ervan weergeven.

1.2 Probleemstelling

Het te onderzoeken probleem kan als volgt worden geformuleerd:

Het realiseren van de bouwkuipwanden onder het Amsterdam Centraal Station ten behoeve van de bouwkuip voor de afzinktunnel voor de Noord/Zuidlijn is een zeer risicovol project.

Hieruit vloeien de volgende onderzoeksvragen voort:

- Wat zijn de mogelijke bedreigingen voor de realisatie van deze bouwkuip(wanden) onder Amsterdam CS ten behoeve van de afzinktunnel en hoe kunnen deze bedreigingen beheerst worden? Hoe kan voorkomen worden dat er een zodanig verlies van grond- en waterkerende functie van de bouwkuip ontstaat, dat de constructie en / of de omgeving schade oploopt tijdens de bouw en hoe kan de schade beperkt / hersteld worden?
- Wat is het risicoprofiel van de bouwkuipwanden gevormd door bovengenoemde bedreigingen?
- Is de nieuwe uitvoeringsmethode voor het op diepte brengen van de buispalenwand en het realiseren van de wandconstructie met behulp van de microtunnellingmethode toepasbaar en wat zijn de bedreigingen voor dit systeem?

1.3 Doelstelling

Het onderzoek zal dienen om de bovenstaande onderzoeksvragen te beantwoorden. De doelen die hieruit voortvloeien zijn:

- Het weergeven van het risicoprofiel van de bouwputwanden en de belangrijkste bedreigingen van het project;
- Een gedetailleerde risicoanalyse maken voor de microtunnellingmethode, zowel specifiek voor de locatie onder Amsterdam CS als in het algemeen. Deze risicoanalyse kan dan als hulpmiddel dienen bij het verder ontwikkelen van de microtunnellingmethode voor het op diepte krijgen van (funderings)palen.

1.4 Afbakening

De kern van dit afstudeeronderzoek zal liggen bij de analyse van de bouwputwanden, waarbij de buispalenwand die met behulp van de microtunnellingmethode op diepte wordt gebracht, grondig zal worden geanalyseerd. De risicoanalyse zal zich beperken tot deze bouwkuipwanden. De overige onderdelen van het contract van de passage van het Amsterdam Centraal Station voor de Noord/Zuidlijn zullen hier niet behandeld worden. Echter daar waar raakvlakken ontstaan met andere onderdelen zullen deze wel behandeld worden. De risicoanalyse zal zich voornamelijk richten op de uitvoeringsfase en niet op het ontwerp als zodanig.

De uitgebreide risicoanalyse wordt alleen uitgevoerd voor de met behulp van de microtunnellingmethode op diepte gebrachte buispalenwand, omdat op dit moment deze methode nog in ontwikkeling is. Het onderzoek kan dan een bijdrage leveren aan deze ontwikkeling.



1.5 Structuur rapport

Allereerst zal in het volgende hoofdstuk worden ingegaan op de achtergronden van een risicoanalyse en hoe een risicoanalyse is opgebouwd. Na vaststelling van de toe te passen technieken zullen de te volgen uitgangspunten ter sprake komen.

Volgend uit de structuur van de risicoanalyse zal in het vierde hoofdstuk een beschrijving van het systeem waar de risicoanalyse uitspraken over zal doen, worden weergegeven en zal het systeem van de bouwkuip afgebakend worden. Voorafgaand aan deze beschrijving zal kort het metroproject Noord/Zuidlijn worden besproken en waar het Amsterdam Centraal zich in dit project bevindt.

Vervolgens zal in hoofdstuk vijf de werking van het vastgestelde systeem meer in detail worden besproken, waarna er een inventarisatie van mogelijke gebeurtenissen volgt, die kunnen leiden tot hogere bouwkosten en een langere bouwtijd. Aan de hand van deze faalmechanismen zullen de relaties tussen de risico's worden bepaald in hoofdstuk zes.

Onzekerheid over de waterdichtheid van de wand onder het emplacement leidde tot het toepassen van een alternatieve uitvoeringsmethode: met behulp van de microtunnellingmethode worden de buispalen naar beneden gebracht. Met behulp van een Monte Carlo simulatie zal er in hoofdstuk 7 uitspraken worden gedaan over de betrouwbaarheid van de wand op het gebied van waterdichtheid.

Ten slotte zullen er in het laatste hoofdstuk conclusies worden getrokken

Hoofdstuk 2 Risicoanalyse

Elk (infrastructuur)project bezit een zekere mate van complexiteit. In het algemeen geldt: hoe groter en omvangrijker het project, hoe complexer en hoe meer onzekerheden: het aantal belanghebbenden en betrokkenen neemt toe, de inpassing in de omgeving wordt lastiger en de besluitvorming op politiek en bestuurlijk niveau wordt langer en door de vele procedures die doorlopen moeten worden. De ruimtelijke inpassing vergt vaak ook complexe technische oplossingen. Daarnaast kunnen technische tegenslagen en calamiteiten een grote rol spelen en een grote belasting zijn op de kosten en de tijd benodigd voor het project. Desondanks moeten de projecten wel binnen het gestelde budget en binnen de gestelde tijdslimiet gereedkomen en moet het project aan de kwaliteitseisen voldoen. Om het project beheersbaar te houden, moet op de onverwachte gebeurtenissen, die het budget en het tijdsbestek kunnen beïnvloeden gedurende het projectproces, worden geanticipeerd. Deze gebeurtenissen kunnen zowel op het technische als op het niet-technische vlak liggen. Risico's ontstaan als deze ongewenste gebeurtenissen directe of indirecte gevolgen hebben voor kosten en/of tijdsduur van het project.

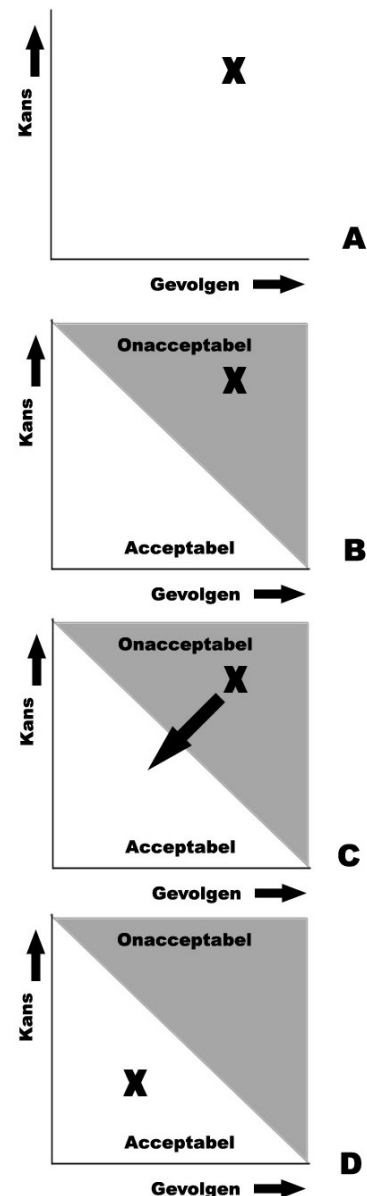
Bij het ondernemen van projecten spelen er een hoop onzekerheden een rol: voorbeelden zijn de weersomstandigheden, menselijk handelen en de grondgesteldheid is niet met 100% zekerheid te bepalen. Het project moet echter wel binnen de gestelde tijd en kosten met voldoende kwaliteit afgerond worden. Om het project tot een goed einde te brengen is het onder meer nodig om deze onzekerheden te beheersen, er op te anticiperen en te weten wat er dient te gebeuren op het moment dat een dergelijke onzekerheid negatieve gevolgen heeft voor het project en het eindresultaat bedreigt. Daarentegen kunnen onzekerheden ook positieve effecten hebben. Op het moment dat er geen enkele vorstdag in een winter is voorgekomen terwijl er in de planning wel rekening mee gehouden is, is een voorbeeld hiervan.

Uit het voorgaande blijkt dat de volgende zaken een rol spelen bij de onzekerheden die bedreigingen vormen voor het project: een mogelijk risico, de gevolgen bij het optreden ervan, de kans van optreden en maatregelen om de bedreigingen te beperken. De definitie van risico is hierbij niet eenduidig. Er bestaan verschillende definities, waaronder de volgende (CUR190, 1997):

- Risico is de kans op een ongewenste gebeurtenis bij een proces of object;
- Risico is het gevolg van een ongewenste gebeurtenis;
- Risico is kans x gevolg;
- Risico is de functie van de kans en het gevolg.

Deze laatste definitie is het meest algemeen; de eerste drie definities zijn er een speciaal geval van. Risico is dus een functie van kans maal gevolg.

De bedreigingen van het project zullen eerst onderkend moeten worden, alvorens men deze bedreigingen kan beperken. Nadat de mogelijke risico's en de gevolgen ervan bekend zijn, zullen de risicoreducerende maatregelen gerealiseerd worden om het project beheersbaar te houden.

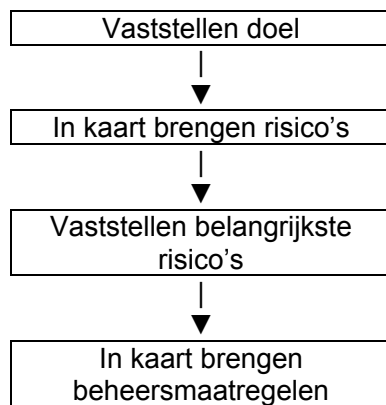


Figuur 2.1 Risico's beheersen

Een risico heeft zoals eerder al gezegd een kanselement en een gevolgelement. Uitgezet in een grafiek ziet dat er uit zoals in figuur 2.1 is afgebeeld voor een enkel risico. Er is een kans van optreden van dat risico met een bepaald gevolg (figuur 2.1a). Dit kan acceptabel zijn of juist niet (figuur 2.1b). Met maatregelen kunnen de kans en/of de gevolgen worden beperkt waardoor het risico afneemt (figuur 2.1c), uiteindelijk is het risico acceptabel (figuur 2.1d). Dit is de basis van risicomangement, waarbij de afweging niet voor één enkel risico gemaakt moet worden, maar voor het gehele project.

In binnen- en buitenland zijn reeds verschillende methoden ontwikkeld om de projecten en hun bedreigingen beheersbaar te houden: risicomangement. In Nederland is dit bijvoorbeeld de RISMAN-methode [Kenniscentrum RISMAN, 1998]. Voorbeelden uit het buitenland zijn bijvoorbeeld Risk Analysis and Management for Projects RAMP (www.ramprisk.com), CRAMM (CCTA Risk Analysis and Management Method) (www.sans.org/rr/audit/CRAMM.php), beiden uit Groot-Brittannië.

2.1 RISMAN-methode



Figuur 2.2 Algemene stappen RISMAN

Om het managen van risico's gestructureerd te laten verlopen, hebben NS Railinfrabeheer, de Bouwdienst van Rijkswaterstaat, Twynstra Gudde, Rijkswaterstaat Directie Zuid-Holland, Gemeentewerken Rotterdam en de TU Delft een concept voor risicomangement ontwikkeld: de methode RISMAN (risico management). [De RISMAN-methode, 1998]. In onderstaand figuur staan de stappen die genomen dienen te worden volgende de RISMAN-methode schematisch weergegeven.

De RISMAN-methode is opgezet om de risico's van de beheersaspecten tijd, geld en kwaliteit te kunnen analyseren en te beheersen. Er kan zowel een kwalitatieve als een kwantitatieve analyse gemaakt worden.

Risicomangement is niet alleen de RISMAN-methode toepassen. Nadat de beheersmaatregelen zijn geïnventariseerd moet er nog gekozen worden welke beheersmaatregelen toe te passen, deze ook daadwerkelijk

toe te passen en ze te evalueren. Deze evaluatie kan dan als input dienen voor een nieuwe risicoanalyse m.b.v. de RISMAN-methode voor bijvoorbeeld een nieuwe fase in het project.

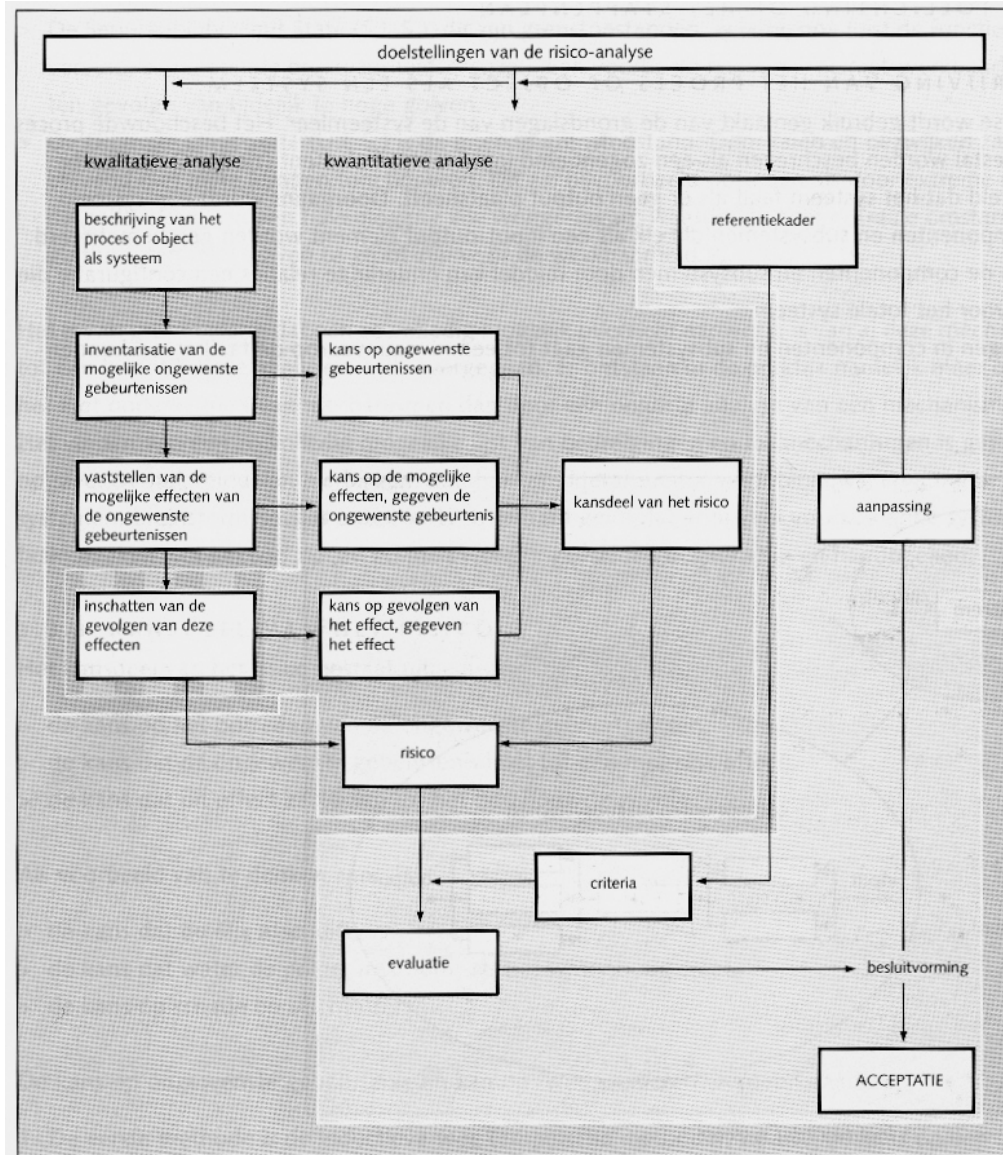
2.2 CUR190-methode

Echter, *CUR 190: Kansen in de civiele techniek, deel 1: Probabilistisch ontwerpen in theorie* [CUR, 1997] geeft een ander en uitgebreider stappenplan. Allereerst moeten de doelstellingen van een dergelijke risicoanalyse worden gesteld, gevolgd door een kwalitatieve analyse. Binnen deze kwalitatieve analyse wordt eerst het proces of product als systeem beschreven. Vervolgens worden de ongewenste gebeurtenissen geïnventariseerd en de mogelijke effecten ervan. De gevolgen van de effecten kunnen daarna ingeschat worden.

Volgend op de stappen in de kwalitatieve analyse, kunnen de stappen in de kwantitatieve analyse gevolgd worden: kansen bepalen van gebeurtenissen, de effecten en gevolgen. Hieruit volgt dan een bepaalde kans. Door dit te combineren met de gevolgen kan het risico bepaald worden, immers is het risico een functie van kans en gevolg.



Aan de hand van gestelde criteria, die volgen uit de doelstellingen van de risicoanalyse en een bepaald kader, kan deze analyse worden geëvalueerd en is de risicoanalyse een hulpmiddel bij het maken van keuzes en het vormen van besluiten. Als het risico acceptabel wordt geacht, kan het systeem als zodanig worden geaccepteerd. Mocht het risico te groot worden geacht, dan wordt het systeem aangepast en worden er dus maatregelen genomen om het risico te reduceren. Deze maatregelen zullen echter getoetst moeten worden of zij wel voordeel bieden: wegen de kosten tegen de baten op?



Figuur 2.3 Risicoanalyse volgens CUR190

2.3 Technieken

Voor het uitwerken van de risicoanalyse, zodat er iets gezegd kan worden over het risicoprofiel voor een beheersaspect, zoals tijd, kosten en kwaliteit, zijn verschillende technieken beschikbaar. Een tweetal wordt hier aangestipt [CUR190, 1997]:

- Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) : hierbij worden de risico's geïnterpreteerd, inclusief de beheersmaatregelen, de kans erop en de gevolgen. Deze lijst kan dan vervolgens worden gesimuleerd met een Monte Carlo-simulatie. Hierbij wordt het project honderden malen gesimuleerd met behulp van de computer. Als resultaat ontstaat er een

risicoprofiel van het project: een kansverdeling, waarmee uitspraken kunnen worden gedaan over de kans van overschrijding van bepaalde waarden van de beheersaspecten.

- Foutenboom: hierbij wordt er een topgebeurtenis gedefinieerd die leidt tot een bepaalde gebeurtenis. Deze topgebeurtenis wordt veroorzaakt door een aantal gebeurtenissen, die op hun beurt ook door een aantal gebeurtenissen worden veroorzaakt. Op deze manier ontstaat een boom van gebeurtenissen die leidt tot een bepaalde "fout".

Na het uitwerken van de risicoanalyse ontstaat er inzicht in de risico's van het systeem. Met dit inzicht kan het risico worden geaccepteerd of er zullen (meer) beheersmaatregelen worden toegepast, zodat het risico gereduceerd wordt. Hiermee kunnen de bedreigingen van het project dus beheerst worden tot een acceptabel niveau.

2.4 Aanpak

Om tot een goede risicoanalyse te komen moeten dus eerst de doelen van deze risicoanalyse worden gesteld. Vervolgens zal moeten worden vastgesteld welk systeem geanalyseerd zal moeten worden [CUR190], waarna pas de eigenlijke risicoanalyse van start kan gaan: welke ongewenste gebeurtenissen zijn er en wat zijn daar de effecten van en wat zijn de gevolgen van die effecten. Na deze kwalitatieve analyse zullen de kansen op de gebeurtenissen, effecten en gevolgen bepaald worden, waarna het risico vastgesteld kan worden: risico is een functie van kans en gevolg. Ten slotte zal moeten worden besloten of het risico van het systeem acceptabel is of niet. Als het risico dan te groot wordt geacht, zullen er maatregelen genomen moeten worden door wijzigingen in het systeem aan te brengen. Een nieuwe risicoanalyse zal dan uitsluitend moeten geven of het risico dan wel voldoende gereduceerd is tot een acceptabel niveau en of de maatregelen wel effectief zijn.

2.5 Uitgangspunten risicoanalyse

Voor de uitvoering van civieltechnische projecten zijn de twee belangrijkste partijen in het spel de opdrachtgever/ontwerper en de aannemer. Beide partijen hebben voor ogen dat er een product wordt gerealiseerd met voldoende veiligheid en kwaliteit tegen een over te komen prijs. Toch kijken de twee partijen met verschillende ogen naar het uitvoeringsproces.

De aspecten die de opdrachtgever goed wil beheren zijn: tijd, geld, kwaliteit van het product en veiligheid voor zowel eigen mensen als voor derden. Om deze redenen worden er kwaliteitseisen gesteld aan het product die worden gekeurd, en worden er in het contract afspraken met betrekking tot de planning en de prijs gemaakt met de aannemer.

De aannemer wil met het maken van het product het beoogde bedrijfsresultaat behalen. De aannemer zal daartoe vooral de beheersaspecten tijd en geld willen beheersen. Als immers de kwaliteit onvoldoende is, zal het product niet goed worden gekeurd door de opdrachtgever en zal het met goede kwaliteit opleveren van het product dus meer tijd en geld gaan kosten. Als de veiligheid in het geding komt, kan het werk niet worden voortgezet: de situatie zal eerst veilig moeten worden gemaakt om weer aan de slag te kunnen. Omdat onvoldoende veiligheid en kwaliteit niet toelaatbaar zijn, worden bij de aannemer de beheersaspecten kwaliteit en veiligheid vertaald naar tijd en geld.

De in dit rapport gepresenteerde resultaten van de risicoanalyse zullen in de dimensies van tijd en geld worden gepresenteerd. Ook de tijd zal in geld kunnen worden uitgedrukt, zodat uiteindelijk het risicoprofiel van de bouwkuipwanden in geld uitgedrukt kan worden.

Hoofdstuk 3 De Noord/Zuidlijn

3.1 Een metro in Amsterdam

De vervoersvraag in Nederland neemt toe, zo ook in Amsterdam. Het huidige aantal reizigers per openbaar vervoer ligt er rond de 1 miljoen reizigers per dag (*Gemeentelijk VervoersBedrijf*, 2001) en zal in de toekomst nog verder toenemen. Hiervoor is het huidige openbaarvervoersnet niet toereikend. Het bovengrondse openbaarvervoersnet (bus en tram) zit met 800.000 reizigers per dag (in 2005 worden dit er 1,1 miljoen) al dicht bij zijn maximum.

De gemeente heeft daarom besloten om een nieuwe metrolijn aan te leggen die dit openbaarvervoersnet kan ontlasten en waarmee de bereikbaarheid van de binnenstad vergroot kan worden. Het college van Burgemeesters en Wethouders van Amsterdam besloot op 25 juli 2002 definitief met de aanleg van de nieuwe metrolijn, waarna de gemeenteraad in haar vergadering van 9 oktober 2002 definitief ingestemd heeft met de aanleg van de Noord/Zuidlijn. Als alles volgens planning verloopt kan de nieuwe metro in 2011 gaan rijden.

Als opdrachtgever van de Noord/Zuidlijn heeft de gemeente Amsterdam al in 1996 het besluit genomen voor het aanleggen van deze metrolijn. Hiervoor is er speciaal een projectbureau opgezet: projectbureau Noord/Zuidlijn, welke verantwoording moet afleggen aan de projectwethouder voor de Noord/Zuidlijn van de gemeente Amsterdam, het ROA (Regionaal Orgaan Amsterdam) en Rijkswaterstaat. Het ontwerp van de stations en de boortunnel is gedelegeerd aan het Adviesbureau Noord/Zuidlijn, waarin drie ingenieursbureaus samenwerken: Witteveen + Bos, de Weger en IBA (Ingenieursbureau Amsterdam).

De Noord/Zuidlijn is een 9,5 km lange metrolijn die Amsterdam-Noord gaat verbinden met Amsterdam Zuid/WTC. De lijn krijgt acht stations: Buikslotermeerplein, Johan van Hasseltweg, Centraal Station, Rokin, Vijzelgracht, Ceintuurbaan, Europaplein en Zuid/WTC. De Noord/Zuidlijn zorgt voor een aanzienlijke ontlasting van het bovengrondse openbaarvervoersnetwerk. Volgens berekeningen zullen dagelijks zo'n 200.000 passagiers van de metrolijn gebruik maken. Vanwege het verzet tegen de grootschalige sloop waarmee de bouw van de huidige metrolijn in het verleden gepaard is gegaan, is uitbreiding van het metronet jarenlang niet bespreekbaar geweest in Amsterdam. Met nieuwe technieken is deze sloop echter niet meer noodzakelijk: met de boortunneltechniek kan onder de Amsterdamse binnenstad door worden geboord om de ondergrondse tunnelbuizen voor de metro te realiseren. Ook het verleggen van kabels en leidingen kan dan vermeden worden.

3.2 Het tracé



Figuur 3.1 De Noord/Zuidlijn

Het tracé van de Noord/Zuidlijn begint in Amsterdam-Noord bij station Buikslotermeerplein, vanwaar het bovengronds gaat naar station Johan van Hasseltweg. Vervolgens gaat de metro ondergronds in een in-situ tunnel en het IJ onderdoor in een afgezonken tunnel naar Amsterdam Centraal Station. De metro rijdt vanaf het Voorplein bij Amsterdam CS verder in een geboorde tunnel onder de Amsterdamse binnenstad door langs de stations Rokin, Vijzelgracht en Ceintuurbaan. De geboorde tunnel eindigt bij station Europaplein en komt daarna, via een in-situ tunnel, weer op maaiveld en rijdt dan naar het eindstation Zuid/WTC. (<http://www.ivv.amsterdam.nl/nzlijn/>)

3.3 Amsterdam CS

Amsterdam CS is een knooppunt van openbaar vervoer: je kunt hier overstappen op tram, bus, metro en trein. Per dag maken zo'n 250.000 reizigers gebruik van het Centraal Station en dit aantal zal in de toekomst verder toenemen, o.a. door de komst van de nieuwe metrolijn, de Noord/Zuidlijn. Een ingrijpende verbouwing is dan ook noodzakelijk om de toenemende reizigersstroom aan te kunnen.



Figuur 3.2 Stationsplein - Voorplein



Omdat er bij deze “verbouwing” veel actoren belang hebben, zoals de NS, het GVB (Gemeentelijk VervoersBedrijf), de gemeente Amsterdam en de reizigers, en veel aanpassingen worden gedaan op en rond het Centraal Station in een complexe situatie, is er door de gemeente Amsterdam en de Nederlandse Spoorwegen een speciaal bureau opgezet: Coördinatie Stationseiland, waarbij het geheel is gedelegeerd aan VOF Stationseiland, een samenwerkingsverband van Arcadis Bouw/Infra en Holland Railconsult.

Een aantal van de te realiseren projecten voor het nieuwe Stationseiland zijn (<http://www.stationseiland.amsterdam.nl/>):

- Aanleg van de Noord/Zuidlijn ter plaatse van Amsterdam CS, inclusief een metrostation;
- Een nieuwe busterminal aan de IJ-zijde van het station;
- Een nieuwe routing voor het autoverkeer aan de IJ-zijde van het station, de De Ruijterkade;
- Aanpassingen aan het huidige metrostation van de Oostlijn op het Voorplein;
- Aanleg van de nieuwe tramverbinding naar IJburg;
- Verlenging van de perrons van het NS station.

Zowel het terrein vóór het station (Voorplein) als aan de IJ-zijde (De Ruijterkade) zal ingrijpend worden gewijzigd, terwijl onder het station het tracé van de Noord/Zuidlijn komt te lopen.

Deze aanpassing van het station is een zeer ingrijpende en complexe aangelegenheid door o.a.:

- Het stationsgebouw is een Rijksmonument, gefundeerd op houten palen die in de eerste zandlaag (ca. NAP -15 m) staan. Een belangrijke voorwaarde is derhalve dat het station geen ernstige schade mag oplopen;
- Het treinverkeer van de Nederlandse Spoorwegen mag geen ernstige hinder ondervinden van de bouwactiviteiten;
- De reizigers moeten ten alle tijden gebruik kunnen maken van het openbaar vervoer en er dient zo min mogelijk hinder veroorzaakt te worden;



- De Noord/Zuidlijn komt vanuit het IJ op een diepte van ca. –18 m NAP en zal onder het station door gaan richting het Damrak.

Binnen de Noord/Zuidlijn wordt de passage van het Amsterdam Centraal Station gedragen door de contracten 3.1/3.2. Deze contracten zijn gegund aan een combinatie van twee aannemers: Strukton Betonbouw BV en Van Oord ACZ, die samen de Combinatie Strukton BV / Van Oord ACZ vormen.

Gezien vanuit het tracé van de Noord/Zuidlijn sluit het contract aan op de zinktunnel in het IJ en aan de zuidzijde op de bouwkuip op het Damrak, waarin wordt gestart met de boortunnel.

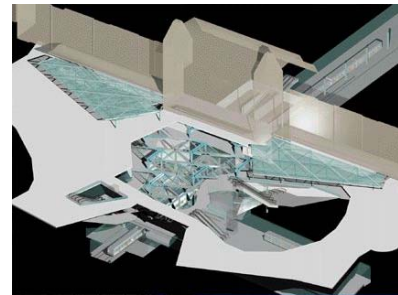
Het contract bestaat globaal uit drie onderdelen:

1. Voorzijde/ Stationsplein:

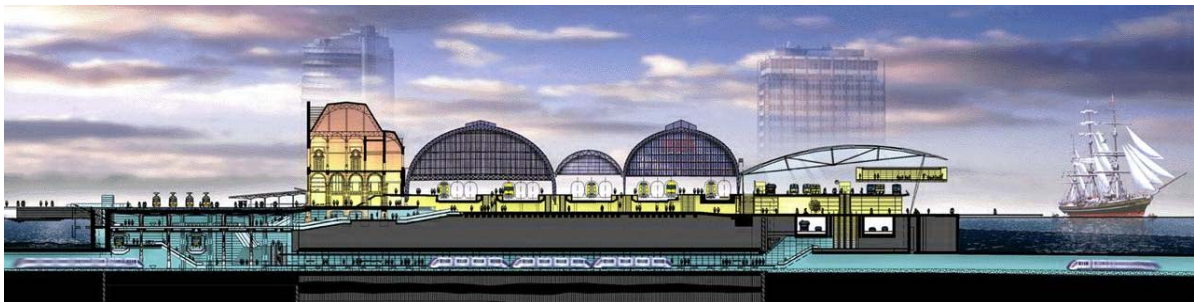
Op het voorplein wordt onder maaiveld een stations- en verdeelhal gecreëerd voor de nieuwe metro van de Noord/Zuidlijn, als ook voor de reeds bestaande Oostlijn met behulp van de wanden-dak-methode.

2. Passage Centraal Station

Voor de passage van het Centraal Station zal het tunneldeel worden afgezonken in een sleuf, die gemaakt zal worden onder het in bedrijf zijnde NS-station. De begrenzing van deze sleuf bestaat uit een grondkerende wand.



Figuur 3.4 Voorplein



Figuur 3.5 Doorsnede passage CS

3. De Ruijterkade

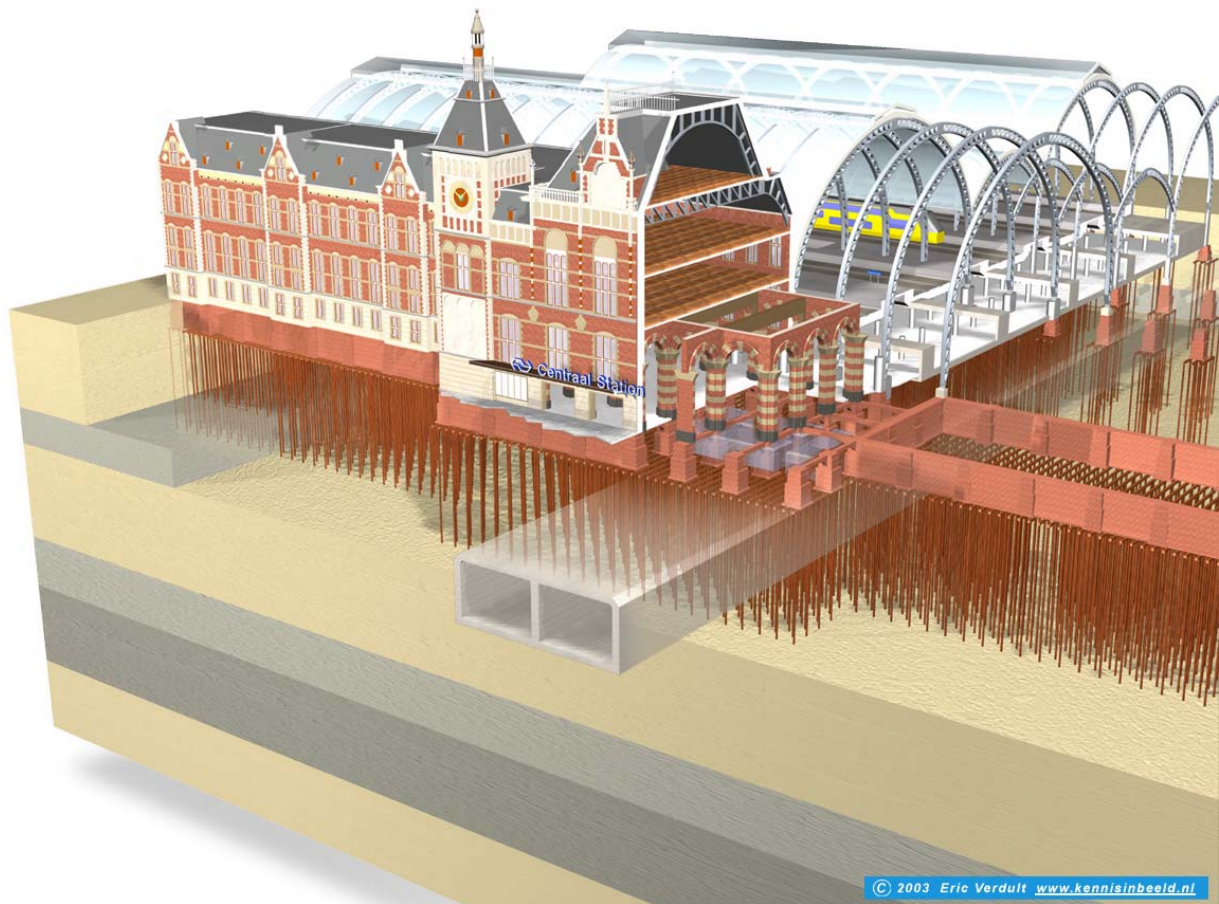
Aan de IJ-zijde van het station zal er een toegang worden gemaakt tot de metro. Dit gebeurt in een geïntegreerd plan voor een nieuw busstation en nieuwe ontsluiting voor het autoverkeer. Binnen het contract 3.1/3.2 valt globaal gezien alleen de onder het maaiveld liggende delen van de kruising met de Noord/Zuidlijn.



Figuur 3.6 De Ruijterkade



Hoofdstuk 4 Metrotunnel onder het station



Figuur 4.1 De metrotunnel in de huidige stationssituatie (copyright Eric Verdult, www.kennisinbeeld.nl)

De passage van de metro zal plaats vinden onder het Amsterdam Centraal Station. Eén van de belangrijkste ontwerpeisen is dat de bouw van deze passage zo min mogelijk hinder moet veroorzaken, zowel voor de treinreizigers als voor het spoorverkeer.

Als basis voor het ontwerp van de passage van Amsterdam CS is er een combinatie gebruikt van twee bekende bouwmethoden [Duijvestijn, 2001]: de wanden-dakmethode en de afzinkmethode. Met behulp van de wanden-dakmethode wordt er de mogelijkheid geschapen om een sleuf onder het station te creëren. Deze sleuf staat in verbinding met IJ, ten noorden van het station, waar vanuit het tunnelement wordt ingevaren en afgezonken in deze sleuf.

Eén van de grote voordelen van deze uitvoeringsmethode is dat er geen droge bouwkuip onder het station gerealiseerd hoeft te worden om de tunnel in-situ te bouwen, waardoor slechts de horizontale korreldruk door de wanden gekeerd hoeft te worden in plaats van de korrel- en waterdruk.

De constructie van de bouwkuip dient echter wel vanuit het station gebouwd te worden onder het station, waarbij de hinder zoveel mogelijk beperkt dient te worden. Daar komt nog bij dat de belastingen uit het station en het emplacement overgenomen dienen te worden van de oorspronkelijke fundering op de wanden van de bouwkuip, zodat in de tussenliggende ruimte de oorspronkelijke fundering verwijderd kan worden en de grond ontgraven kan worden, waarna de tunnel afgezonken kan worden.

Het Centraal Station bestaat constructief gezien uit twee gebieden: aan de voorzijde van het station staat het monumentale stationsgebouw, erachter ligt het overkapte spoorwegemplacement. Het stationsgebouw is een rijksmonument en gefundeerd op houten palen. Onder het emplacement bevinden zich ter plaatse van het tunneltracé een betonnen reizigerstunnel uit de jaren tachtig (de Middentunnel), gefundeerd op staal, en aan de IJ-zijde een gebouw met een staalconstructie uit 1920, ook gefundeerd op houten palen.

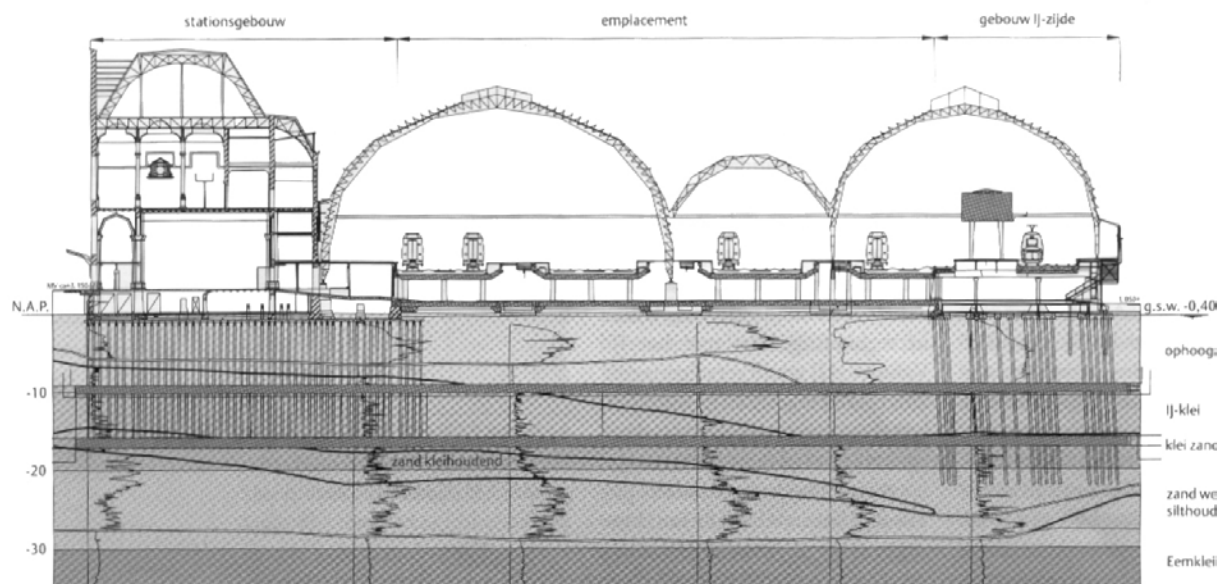
4.1 Ontwerputgangspunten

Gezien de locatie moet de bouwkuip onder het station voldoen aan een aantal specifieke randvoorwaarden:

- De bouw mag geen onherstelbare schade veroorzaken aan het monumentale stationsgebouw, dat opgebouwd is uit metselwerk, en het emplacement;
- De hinder voor de reizigers moet zoveel mogelijk worden beperkt: de stationshal en de middentunnel moeten ten alle tijden (gedeeltelijk) bruikbaar zijn;
- Alle vijftien sporen van het emplacement moeten tijdens de bouw in gebruik kunnen blijven;

De grondopbouw onder het station speelt hiernaast ook een grote rol als uitgangspunt.

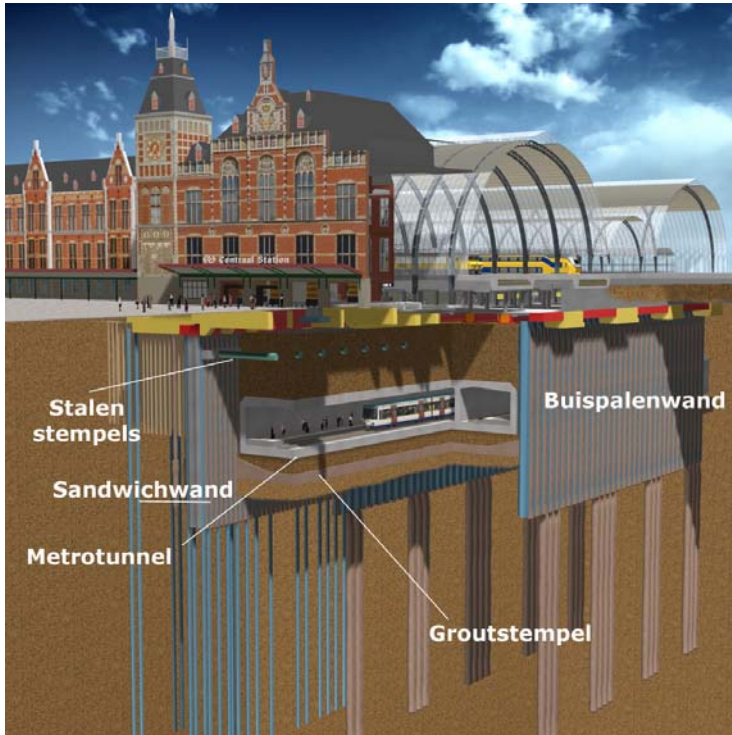
Globaal is de grondopbouw als volgt: Vanaf het maaiveld (ca. + 1 m NAP) tot -10 m NAP bevindt zich ophoogzand, afkomstig uit het Noordzeekanaal en gebruikt bij de aanleg van het stationseiland. Een pakket van relatief slappe lagen, IJ-klei en zandhoudende kleilagen, bevindt zich hieronder tot -15 m NAP. Tot -28 m NAP wordt er kleihoudend en weinig silthoudend zand aangetroffen en tot NAP -45 m ligt er een dikke kleilaag: de Eemklei. Daaronder ligt de derde zandlaag, een draagkrachtige laag met hoge conusweerstand, die voorkomt vanaf -56 m NAP. Tussen de Eemklei en de draagkrachtige zandlaag ligt een dikke laag Glaciale klei.



Figuur 4.2 Grondopbouw onder Amsterdam CS

Dakconstructie

De belastingen uit het stationsgebouw en het emplacement moeten via de wanden van de bouwkuip worden afgedragen naar de ondergrond. Via het wanden-dakprincipe worden de



Figuur 4.3 Bouwkuip en tunnel

krachten uit de bovenbouw via een dakconstructie overgedragen naar de bouwkuipwanden en vervolgens naar de ondergrond. Het principe voor de opbouw van dit dak is voor beide delen van het station hetzelfde: het systeem bestaat uit secundaire balken en primaire balken, waarbij deze primaire balken worden opgelegd op de bouwkuipwanden.

Het ontwerp van de bouwkuip en de afzinkprocedure van het tunnelement zijn sterk aan elkaar gerelateerd: waterstanden benodigd voor het transporteren en afzinken van de tunnel hebben invloed op het ontwerp van de bouwkuip, en het ontwerp van de bouwkuip legt beperkingen op bij de mogelijke verplaatsingen van het tunnelement. Een voorbeeld van deze beperkingen is de aanwezigheid van stempels in de bouwkuip, waardoor de

bewegingsvrijheid van het tunnelement wordt beperkt en het waterniveau in de bouwkuip tijdens het transport en afzinken van het tunnelement aangepast dient te worden.

Er zal hier eerst de globale afzinkprocedure worden weergegeven, waarna het ontwerp van de bouwkuip wordt besproken.

4.2 Afzinken

Het tunnelement zal vanaf het IJ de sleuf ingevaren worden en met behulp van lieren op zijn positie worden getrokken, klaar om af te zinken. Dit proces bestaat uit zeven fases (zie ook bijlage 2):

- Fase 1. Het tunnelement wordt vanaf het IJ een sluiskuij ingevaren. Deze sluiskuij ligt in het IJ in het verlengde van de sleuf waarin het tunnelement wordt afgezonken. De waterstand hierbij is ca. $-0,4$ m;
- Fase 2. De sluiskuij wordt afgesloten van het IJ door middel van een kopscherm, waarna de waterstand in de bouwkuip en de sluiskuij wordt verlaagd tot NAP $-1,5$ m;
- Fase 3. Het element wordt ingelieerd tot aan het stempelraam van de sandwichwand (zie beschrijving sandwichwand, § 4.5) onder het stationsgebouw;
- Fase 4. Vervolgens wordt er een compartimenteringscherm geplaatst in de sluiskuij, waarna de waterstand in de bouwkuip wordt verlaagd tot NAP $-3,0$ m. Ook worden er pontons aan de bovenzijde van het tunnelement aangebracht;
- Fase 5. In de vijfde fase wordt het tunnelement ondergedompeld door water in te laten in de ballasttanks, die in het tunnelement aanwezig zijn;

- Fase 6. Het tunnelement wordt nu verder doorgeschoven, onder het stempelraam;
Fase 7. In de laatste fase zal het tunnelement worden afgezonken op de definitieve locatie, zal het tijdelijk worden opgelegd op de taats en vijzelpennen. Vervolgens kan het kopscherm van de bouwkuip worden ingebracht en het tunnelement onderspoeld worden.

4.3 Eisen aan de bouwkuip

Uit de bovenstaande afzinkprocedure blijkt dat de waterstand in de bouwkuip een aantal maal verlaagd zal worden ten behoeve van het afzinken. Hierdoor kunnen er bepaalde eisen aan de bouwkuip gesteld worden, zoals waterdichtheid. De bouwkuip zal dus aan een aantal eisen moeten voldoen en een aantal functies moeten vervullen om tot een juist ontwerp te komen.

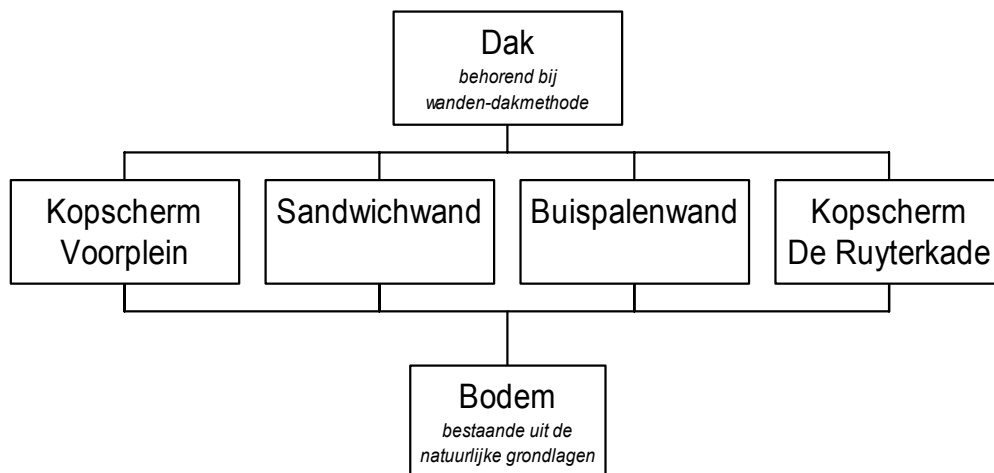
De bouwkuip zal aan de volgende eisen moeten voldoen:

- Voldoende waterdicht
- Grond dicht
- Er moet voldoende ruimte in de bouwkuip aanwezig zijn om het tunnelement te kunnen invaren en te kunnen afzinken op de gewenste locatie;
- In verband met zettingen achter de wand zal de wand een minimale doorbuiging mogen ondergaan.

4.4 Bouwkuip onder Amsterdam CS

De bouwkuip onder het station bestaat uit de volgende onderdelen:

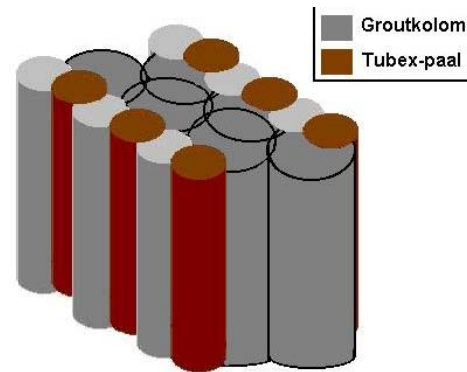
De bouwkuip onder het station



De verticale begrenzingen van de bouwkuip zijn, gezien vanaf het Voorplein richting het IJ, achtereenvolgens het kopscherm van de bouwkuipwand bij het Voorplein, grenzend aan de diepe bouwput, onder het stationsgebouw bevindt zich aan weerszijden van de bouwkuip de sandwichwand, onder het emplacement bevindt zich de buispalenwand, ook aan beide zijden van de kuip, en ten slotte is er het kopscherm bij De Ruijterkade. Dit laatste kopscherm wordt pas geplaatst als het tunnelement definitief afgezonken is in de bouwkuip, zie ook de afzinkprocedure.



Er zijn twee horizontale begrenzingen, te weten één aan de onderzijde en één aan de bovenzijde. Aan de bovenzijde wordt deze begrenzing gevormd door het systeem van de primaire en secundaire balken, het dak van de wanden-dakmethode. Aan de onderzijde wordt de bodem gevormd door het aanwezige grondprofiel, met als belangrijkste laag een van nature aanwezige kleilaag: de Eemklei, die voor een grond- en waterdichte horizontale afsluiting moet zorgen.



Figuur 4.4 Sandwichwand impressie

Het stationsgebouw is een monumentale metselconstructie gefundeerd op houten palen. Om deze constructie geen schade te berokkenen, is het noodzakelijk om een zeer stijve wand te realiseren onder dit stationsgebouw. Zakkingen rondom het stationsgebouw, als gevolg van het ontgraven van de bouwkuip, kunnen leiden tot scheuren in het metselwerk. Doordat de wand in de beperkte ruimte van de stationshal moet worden gemaakt en door de aanwezigheid van de aanwezige houten paalfundering onder het stationsgebouw is het niet mogelijk om iedere willekeurige techniek toe te passen voor het aanbrengen van deze wand. Verder is er een groot draagvermogen nodig om de verticale belastingen uit het gebouw te kunnen dragen. Dit is noodzakelijk omdat de bestaande houten paalfundering tussen de wanden verwijderd zal worden, zodat er een ruimte ontstaat om het tunnelelement in af te zinken. In bijlage 1 wordt een plattegrond van de sandwichwand-constructie gegeven.

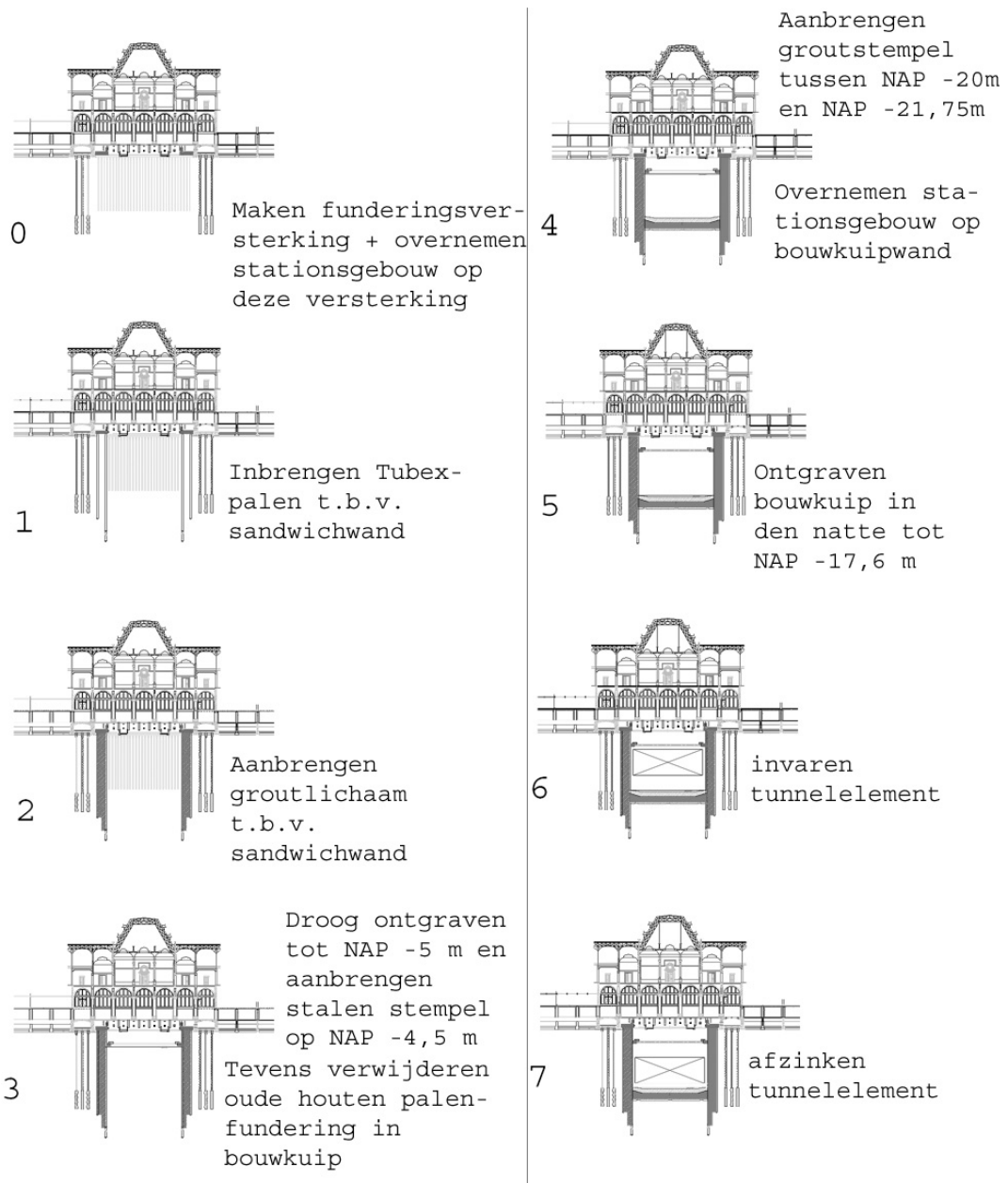
Na afweging van vele alternatieven is er uiteindelijk gekozen voor de sandwichwand. Deze constructie bestaat uit twee rijen stalen palen met tussen deze rijen een lichaam van grout. Het doel van de sandwichwand is tweeledig: de verticale belastingen uit de tafelconstructie (m.a.w. de wanden-dakconstructie) afdragen en de grond horizontaal steunen tijdens het ontgraven van de bouwkuip en het afzinken van het tunnelelement. Tevens moet tijdens het ontgraven van de bouwkuip en het afzinken van de tunnel de wand waterkerend en grond dicht zijn.

4.5.1 Werking Stationsgebouw

De sandwichwand vormt, als onderdeel van de aanpassing van (de constructie van) het stationsgebouw, de wand van de bouwkuip ter plaatse van het stationsgebouw.

De bouwkuip ter plaatse van het stationsgebouw wordt gerealiseerd met behulp van de wanden-dak-methode, die bestaat uit twee bouwkuipwanden en daartussen een dragende constructie die de bouwkuip overspant en op de bouwkuipwanden is opgelegd. Hierdoor ontstaat er een tafelconstructie die wordt gedragen door tafelpoten gevormd door de wanden van de bouwkuip. Deze bouwkuipwand wordt gevormd door de sandwichwand, een constructie van twee rijen Tubex-palen met daartussen een lichaam van grout. Het dragende "tafelblad" bestaat uit primaire, voorgespannen, balken en secundaire balken. De primaire balken zijn opgelegd op de wanden en zijn gesitueerd tussen de kolommen van het stationsgebouw. De secundaire balken zijn gesitueerd ter plaatse van de kolommen en zij dragen de belasting uit de bestaande constructie af naar de primaire balken.

Om eventuele schade aan het stationsgebouw en de omliggende omgeving als gevolg van vervormingen van de bestaande constructie zoveel mogelijk te beperken, wordt er direct achter de bouwkuipwanden onder het stationsgebouw een funderingsversterking aangebracht. Deze versterking wordt aangebracht voordat er aangevangen wordt met de aanleg van de bouwkuipwanden, zodat eventuele vervormingen, ontstaan door het aanbrengen van de bouwkuipwanden, zo veel mogelijk worden voorkomen.

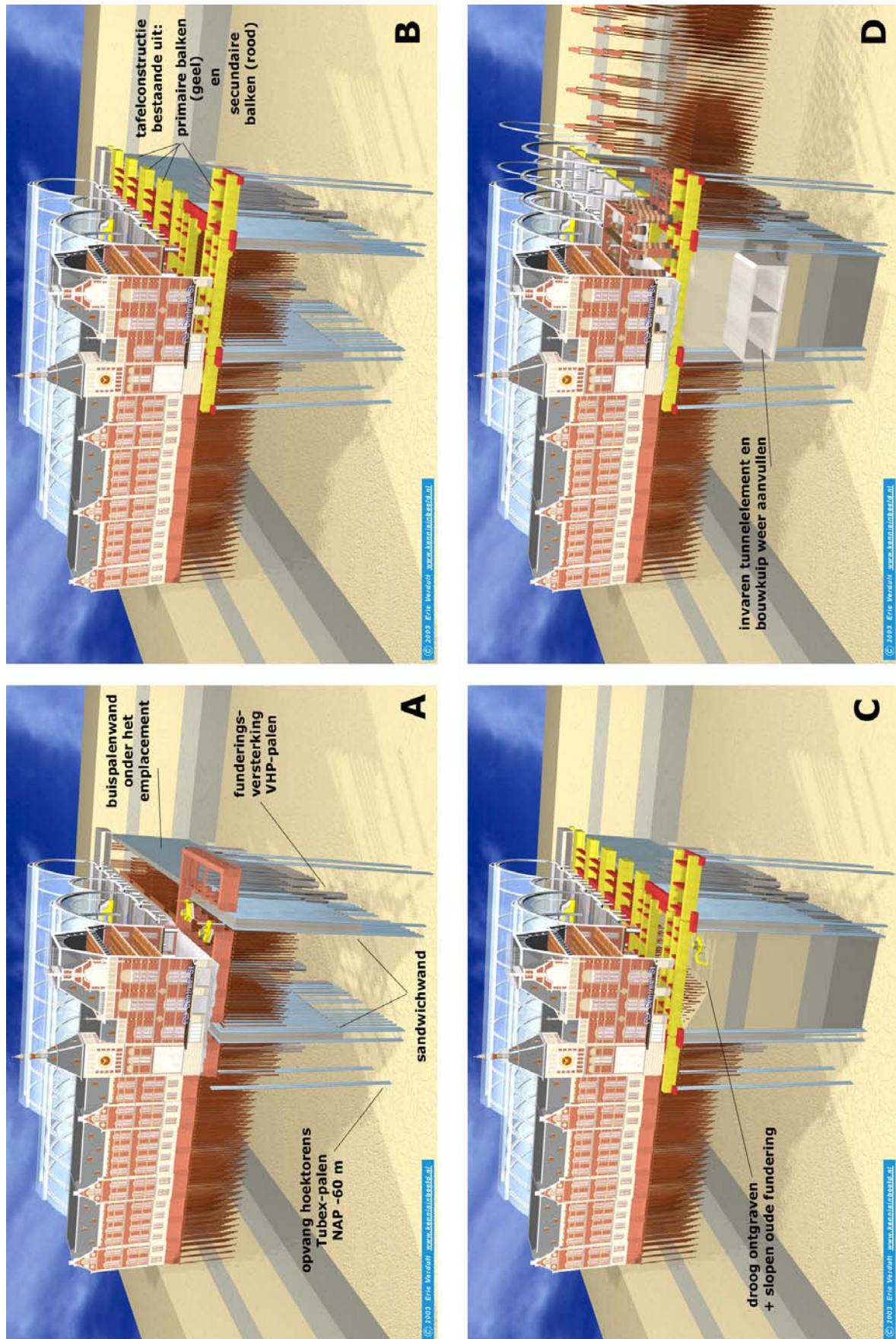


Figuur 4.5 Globale fasering stationsgebouw

De werkzaamheden ter plaatse van het stationsgebouw voor de realisatie van de bouwkuip zijn onder te verdelen in de volgende faseringen, zie figuur 4.5:

- Maken funderingsversterking (0 en figuur 4.6A);
- Opvangen hoektorens van het stationsgebouw (0 en figuur 4.6A);
- Maken sandwichwand (1+2 en figuur 4.6A);
- Maken tafelconstructie (2 en figuur 4.6B);
- Droog ontgraven bouwkuip tot NAP -5 m (3 en figuur 4.6C);
- Aanbrengen stalen stempels op NAP -4,5 m (3)
- Aanbrengen groutstempel (4) en overnemen constructie op bouwkuipwanden (4);
- Nat ontgraven bouwput (5);
- Invaren en afzinken tunnel (6 +7 en figuur 4.6D)

In figuur 4.6 zijn enkele fases gevisualiseerd in een 3D-schets.



Figuur 4.6 3D-visualisaties van enkele fases, copyright Eric Verdult, www.kennisinbeeld.nl

De bestaande constructie werd zo goed mogelijk in kaart gebracht, wat als basis diende voor het definitieve ontwerp. Het onderzoek richtte zich daarbij o.a. op de volgende zaken: ontwerp- en bestekstekeningen van de aanleg van het stationsgebouw rond 1880 en van verschillende verbouwingen, het bestek van het stationsgebouw, publicaties met betrekking tot afwijkingen ten opzichte van het ontwerp van het station en de verbouwingen, veldonderzoek, hoogtemetingen van het station, paaltrekproef voor houten palen, beproevingen metselwerk en een Eindige Elementen Methode-berekening van het huidige stationsgebouw door TNO-bouw, waardoor inzicht is verkregen in de huidige spanningssituatie in het metselwerk.

Invloed bouw op bestaande gebouw

Het overnemen van het gebouw op de nieuwe constructie en de bouw van deze constructie leidt tot zettingen en vervormingen van het gebouw. Zettingen kunnen door verschillende oorzaken ontstaan:

- Doorbuiging tafelconstructie door belastingen uit het stationsgebouw;
- Zakking van de bouwkuipwand door de grote oplegreacties op de wand uit de tafelconstructie;
- Zettingen achter de wand als gevolg van het inbrengen van de wand;
- Doorbuiging wand door het ontgraven van de bouwkuip waardoor er een maaiveldzetting optreedt direct achter de bouwkuipwand;
- Het ontstaan van een zandvoerend lek in de wand, waardoor er zand van achter de wand de bouwkuip inloopt en het maaiveld zet;
- Autonome maaiveldzetting;
- Aanbrengen van de funderingsversterking;
- Overnemen op de nieuwe fundering.

In het ontwerp is rekening gehouden met deze mogelijke oorzaken van zettingen en vervormingen. Om deze vervormingen en zettingen zoveel mogelijk te beperken of te compenseren zijn de volgende maatregelen genomen:

- Funderingsversterking;
- Opvang hoektorens;
- Voorspanning primaire balken;
- Vijzelmogelijkheden tafelconstructie, zowel bij de primaire als de secundaire balken.

4.5.2 Faseringsonderdelen

Funderingsversterking

Alvorens aan de bouw van de bouwkuip gestart zal worden, wordt er in het gebied achter de geplande wanden een funderingsversterking aangebracht, zodat de te verwachten zettingen worden beperkt. Deze versterking zal worden aangebracht tussen stramien 34 en 35 en de stramien 40 en 41 en bestaat uit voorgespannen betonnen balken, die worden ingekast in het funderingsmetselwerk van het stationsgebouw en die worden opgelegd op nog te maken grout-injectiepalen. Hierbij worden er Tubex-palen aangebracht tot op NAP – 60 m die tijdens het inbrengen worden geïnjecteerd met grout, zodat er een groutomhulling ontstaat.

De funderingsversterking heeft twee doelen:

1. Genereren van aanvullende draagkracht en stijfheid van de fundering tijdens het inbrengen van de bouwkuipwand. Het inbrengen van de bouwkuipwanden heeft nadelige invloed op de draagkracht van de bestaande fundering en met de funderingsversterking wordt het verlies van draagkracht gecompenseerd.



2. Tijdens het ontgraven van de bouwkuip kan de wand enigszins doorbuigen, waardoor er achter de bouwkuipwand een zettingtrog ontstaat. Als gevolg hiervan zal het stationsgebouw ook vervormingen ondergaan en kunnen er scheuren in het metselwerk ontstaan. Om dit te voorkomen of te beperken wordt de funderingsversterking aangebracht.

Uit zettingbeschouwingen is gebleken dat de zettingen en zettingverschillen buiten het genoemde gebied zo klein zijn, dat dit door de constructie van het huidige stationsgebouw opgenomen kan worden. Daarom zal de funderingsversterking zich beperken tot één stramien uit de bouwputwand.

Opvang hoektorens

De hoektorens vormen de stabiliteitelementen van het stationsgebouw. Uit metingen en historisch onderzoek (zoals de originele bestekstekeningen) blijkt dat de hoektorens meer gezakt zijn dan de rest van het stationsgebouw. Hierdoor is in de loop van de tijd de belasting herverdeeld naar de omliggende fundering van het stationsgebouw. Kleine wijzigingen van de krachtsverdeling in het stationsgebouw kunnen leiden tot grote zettingen en vervormingen van het gebouw. Om dit te voorkomen wordt er onder de hoektorens een funderingsversterking aangebracht, maar deze zal anders zijn dan de funderingsversterking achter de bouwkuipwanden. Deze opvangconstructie bestaat uit twee delen, die gefaseerd zullen worden aangebracht.



Figuur 4.7 Hoektoeren

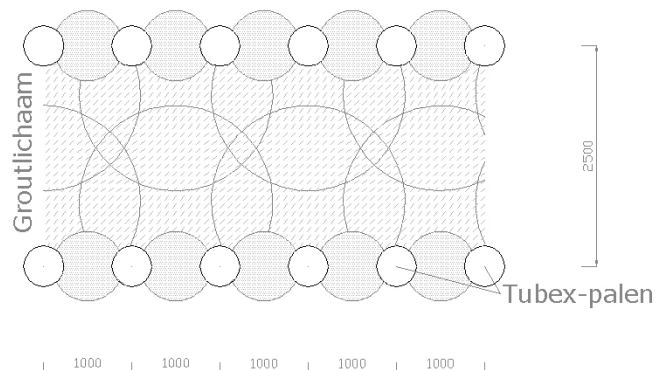
Als eerste wordt er een betonnen vloer met grout-injectiepalen gerealiseerd. Deze constructie moet aanvullende draagkracht gaan leveren. Deze aanvullende draagkracht is nodig ter compensatie van de invloed van de inbreng van de bouwkuipwand. Deze constructie wordt als één van de eerste onderdelen gebouwd, waardoor de zettingen voor de opvolgende bouwactiviteiten beperkt worden.

De volgende fase van de hoektorenopvang is de realisatie van een gewapend betonnen balkenrooster. Dit rooster omsluit de hoektoren en het wordt opgelegd op de bouwkuipwand en op een aantal lange (NAP –60 m) Tubex-palen, die voor dit onderdeel worden aangebracht. Dit onderdeel kan pas worden aangebracht als de bouwkuipwand gerealiseerd is, aangezien het rooster op de wand wordt opgelegd. Deze funderingsversterking wordt aangebracht om te voorkomen dat de doorbuiging van de wand tijdens het ontgraven schade kan veroorzaken aan deze hoektorens.

Sandwichwand

Nadat de eerste fase van de opvangconstructie gereed is, kan de bouw van de bouwkuipwanden onder het stationsgebouw aanvangen.

De bouwkuipwand onder het stationsgebouw is de sandwichwand en bestaat uit twee rijen Tubex-palen ($\varnothing$ 457 mm, wanddikte 25 mm) h.o.h. 1 m, waarbij de rijen 2,5 m uit elkaar staan. In de ruimte tussen de Tubex-palen wordt met behulp van de jetgrouttechniek een groutmassief gevormd.



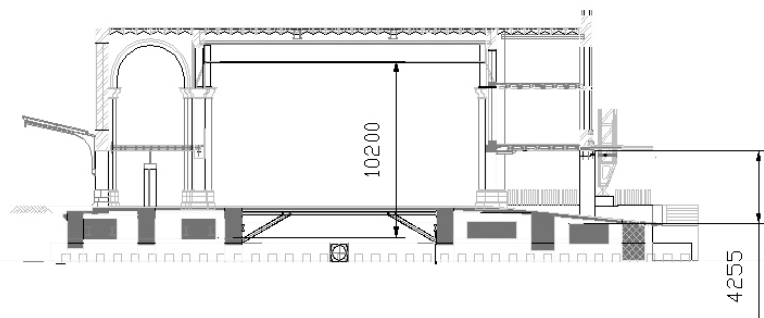
Figuur 4.8 Boven aanzicht sandwichwand

Als eerste zullen de Tubex-palen worden aangebracht. Er is gekozen voor dit paalttype, omdat deze tot op grote diepte kunnen worden aangebracht in beperkte werkruimte en trillingsarm. Ook kan de paal zonder veel geluidsoverlast worden aangebracht waardoor er minder hinder voor de treinreizigers veroorzaakt wordt.

Een Tubex-paal bestaat uit een stalen casing met een punt die, omdat de paal waterdicht moet zijn, er aan vastgelast is. De stalen casing wordt door een draaimoment de grond in gedrukt. De punt zorgt ervoor dat de grond zijdelings wordt weggedrukt en hierdoor zal de omringende grond verdicht worden. De Tubex-paal is dus een grondverdringende paal.

De Tubex-palen zijn 30m tot 60 m lang. De "korte" palen van 30 m reiken tot in Eemklei (NAP –30 m, ca. 1 m in de Eemklei) en de lange palen zijn gefundeerd in de 3^e zandlaag die vanaf NAP – 56 m aanwezig is. De lange palen dienen, naast de horizontale grondkerende functie, om de verticale belastingen vanuit het stationsgebouw af te dragen naar deze 3^e zandlaag.

De Tubex-palen kunnen niet in één keer worden aangebracht vanwege de beperkte werkhooft in het monumentale stationsgebouw. Hierdoor zal de Tubex-paal in segmenten van ca. 6 m worden aangevoerd en de grond in worden



Figuur 4.9 Beperkte werkhooft stationsgebouw

gebracht. Nadat het eerste segment met de punt voldoende op diepte is, wordt het volgende element op het eerste geplaatst en vastgelast, waarna de paal verder op diepte kan worden gebracht. Het afwisselend boren en lassen wordt herhaald totdat de paal op diepte is. Hierna kan er een wapeningskorf in de lege Tubex-paal worden gelaten en vervolgens worden volgestort met beton.

Het tussen de Tubex-palen gelegen groutmassief wordt gevormd door middel van jet grouting. Het principe van jet grouten, ook wel bekend als Very High Pressure (VHP) grouting en als Hohe Druck Injection (HDI), is na het op diepte brengen van een lans het met hoge druk inbrengen van een water-cement mengsel: het grout. (Van der Stoep, 2001) Hierdoor wordt de structuur van de grond verbroken. Het water-cement mengsel en de grond vermengen zich of de grond wordt helemaal versneden en vervangen.

Tegelijkertijd met het inbrengen van het grout wordt de lans gedraaid en omhoog getrokken, waardoor er een kolom van het water-cement-grond mengsel ontstaat. Deze kolom wordt dus gevormd op het moment dat de lans getrokken wordt.

Er zijn een aantal systemen voor de uitvoering van het jet grouten (zie ook bijlage 3):

- Mono-jet methode (ook wel single fluid system of éénfasensysteem)
- Bi-jet methode water-cement / lucht (ook wel double fluid (air) system of tweefasensysteem)
- Bi-jet methode water-cement / water (ook wel double fluid (water) system of tweefasensysteem)
- Tri-jet methode (ook wel triple fluid system of driefasensysteem)

Het bij dit werk, de passage van Amsterdam CS, voorgeschreven systeem is een 2- of 3-fasensysteem.

Om een goede samenwerking tussen groutlichaam en Tubex-palen te bewerkstelligen, worden er op de Tubex-palen stalen ringen gelast. Deze ringen dienen om de opneembare schuifspanning



tussen het groutlichaam en de Tubex-paal te verhogen. Een nadeel van deze ringen is dat de weerstand bij het inbrengen van de Tubex-paal ook verhoogd zal worden.

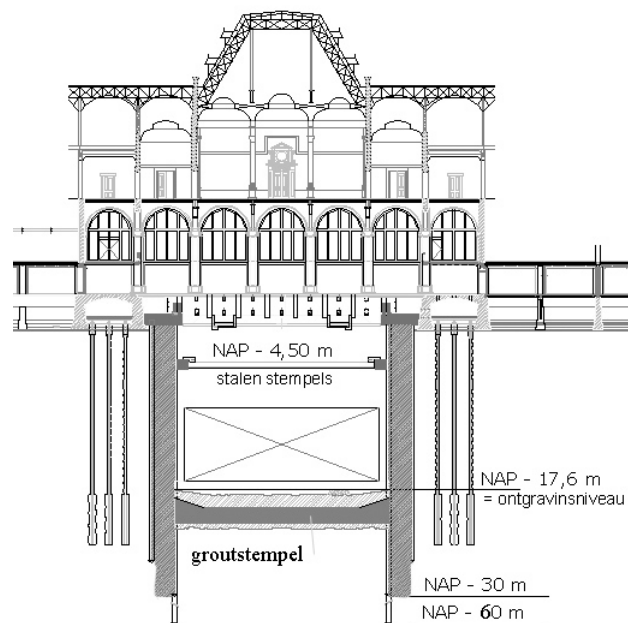
Recente ervaringen met de uitvoering van jet grouten, zoals bij de Calandtunnel en de tramtunnel in Den Haag, geven aan dat dit een nogal risicovolle aangelegenheid is.

Bij het maken van een jetgroutlaag of -wand zijn meerdere kolommen betrokken. Deze kolommen worden dan in een patroon aangebracht, waarbij de cirkelvormige kolommen elkaar overlappen. Tijdens de uitvoering kunnen er een aantal afwijkingen optreden, waardoor de uiteindelijke locaties en dimensies van de kolommen kunnen afwijken van het ontwerp. In het volgende hoofdstuk zal er dieper worden ingegaan op deze afwijkingen.

Als eerste zal er een kolom van 800 mm tussen de Tubex-palen worden geplaatst, waarna in de ruimte tussen de twee rijen Tubex-palen en de kleinere kolommen het groutmassief gevormd zal worden met groutkolommen met een diameter van ca. 2200 mm.

Op de sandwichwand wordt een betonnen deksloof gestort. Deze deksloof zal als eindkap van de sandwichwand fungeren, waarin de krachten uit de Tubex-palen en jetgrout worden opgenomen. Deze deksloof zal ook de oplegbalk zijn voor de primaire balken, waarin de oplegreacties zoveel mogelijk verticaal worden afgedragen naar de lange Tubex-palen en het groutmassief. De deksloof verdeelt ook de horizontale stempelkracht uit de tafelconstructie naar de bouwkuipwand.

Onder de toekomstige tunnel wordt er ook een horizontaal stempel gemaakt: tussen NAP – 20 m en NAP – 21,75 m wordt een groutstempel met een horizontaal stempelende functie gemaakt.



Figuur 4.10 Doorsnede station en bouwkuip

Berekeningen gaven aan dat de geringe waarden van de horizontale vervormingen van de sandwichwand in de uiterste grenstoestand niet aangetoond konden worden. Met name de scheurvorming van het grout kan dan een belangrijke rol gaan spelen met als gevolg het verminderen van de stijfheid van de sandwichwand (vergelijk met beton) én het ontstaan van watervoerende gaten die eventueel zelfs zandvoerend kunnen worden. Om deze geringe waarden van horizontale vervormingen wel te halen, zullen er stalen stempels tussen de sandwichwanden onder het stationsgebouw aangebracht worden op NAP –4,5 m.

Tafelconstructie

De primaire en secundaire balken, de opvangconstructies onder de kolommen van het stationsgebouw, vloeren tussen primaire balken en de vloeren boven de bouwputwanden vormen tezamen de tafelconstructie

De primaire balken zijn voorgespannen betonnen liggers en zijn de hoofddraagconstructie van de "tafel", welke zullen worden opgelegd op de bouwkuipwanden. Het is niet mogelijk de primaire balken direct onder de kolommen te maken. De primaire balken worden daardoor aangebracht tussen het dragende metselwerk in de kelder van het stationsgebouw, waarvoor een gedeelte van het metselwerk gesloopt moet worden. Er zullen drie primaire balken voor in het

stationsgebouw worden gemaakt en drie achterin, waardoor er in totaal zes primaire balken worden gemaakt in het stationsgebouw.

Deze balken dienen om de verticale belasting vanuit het stationsgebouw af te dragen naar de bouwputwand. Verder zullen de primaire balken als stempel van de bouwkuip fungeren tijdens de ontgravingen. De derde functie van de primaire balken is de afdracht van horizontale belastingen uit het gebouw naar de bouwkuipwanden.

Bij het ontwerp van de constructie is als uitgangspunt genomen dat de tafelconstructie het vervormingsgedrag van de bestaande constructie zo veel mogelijk moet kunnen volgen. Om deze reden zijn de opleggingen van de primaire balken op de wanden vrijwelbaar ontworpen, zodat de tafelconstructie in zijn geheel kan worden opgevijseld of worden afgelaten.

Twee secundaire balken of koppelbalken worden gebruikt per kolom of gevelpenant; één per zijde. Deze secundaire balken moeten de afdracht van de opvangconstructies van het bestaande metselwerk naar de primaire balken afdragen en zij dienen als constructieve koppeling tussen de primaire balken, zodat er één samenwerkende tafelconstructie ontstaat.

Deze secundaire balken kunnen niet onder de kolommen worden aangebracht, omdat de belasting zeer groot is en de kolommen, bestaande uit metselwerk, slechts een beperkte druksterkte hebben, waardoor het niet mogelijk is om grote sparingen onder de kolommen te maken. Om deze reden worden de secundaire balken aan weerszijden van de kolommen geplaatst.

Overnemen stationsgebouw

Nadat de tafelconstructie gereed is, kunnen de opvangconstructies van de hoektorens voltooid worden. Vervolgens dient de bestaande constructie van het stationsgebouw overgenomen te worden op de constructie van de sandwichwand en de tafel. Het overnemen geschiedt door het voorspannen van de primaire balken en het aanvullend vrijzelen van de opvangconstructies. Door de primaire balken voor te spannen, zullen deze de neiging hebben op te buigen. Hierdoor zal een gedeelte van de belasting uit de kolommen van het stationsgebouw overgenomen worden op de primaire balken. Echter, niet alle belasting zal worden overgenomen op de nieuwe constructie door de voorspanning van de primaire balken.

Om de volledige belasting vanuit het stationsgebouw over te nemen, zal de opvangconstructie worden gevijseld. Het vrijzelen gebeurt onder de opleggingen van de hulpwerkliggers op de primaire balken.

Ontgraven bouwkuip

Het ontgraven van de bouwkuip kan pas aanvangen als de bouwkuip compleet gerealiseerd is, d.w.z. als de volgende onderdelen ook gereed zijn:

- Aansluiting sandwichwand op het kopscherm aan de Voorpleinzijde (§4.6)
- Aansluiting sandwichwand – buispalenwand (§4.9)
- De buispalenwand onder het emplacement (§4.7 en §4.8)
- Verbinding bouwkuip onder het station met het IJ (§4.10)

4.6 Aansluiting bouwkuipwand aan diepwand Voorplein

Op het Voorplein zal met behulp van de wanden-dak-methode een bouwkuip worden gerealiseerd, waarbij de wanden van deze kuip bestaan uit diepwanden. Door het toepassen van de wanden-dak-methode kan het gebied boven de bouwkuip snel weer in gebruik worden genomen. De verblijfs- en verkeersruimte voor de reizigers van het stationseiland en de tramlijnen kunnen weer in gebruik worden genomen.



Ter plaatse van het metrotracé, waar de zinksleuf en de bouwkuip van het Voorplein op elkaar aansluiten zal er het volgende worden gedaan:

- Allereerst worden er onder het stationsgebouw Tubex-palen ingebracht voor de sandwichwand;
- Op het grensvlak tussen sandwichwand en Voorplein wordt er een damwand trillingsarm geplaatst, waarna het groutlichaam van de sandwichwand gegroot kan worden;
- Vervolgens wordt de diepwand van de bouwkuip van het Voorplein (de diepe put) gemaakt en wordt er een oplegbalk voor de gevel van het stationsgebouw (een primaire balk) gemaakt;
- De bouwkuip onder het stationsgebouw wordt droog ontgraven tot NAP – 5 m, waarvoor eerst de grondwaterstand verlaagd is tot NAP –5,5 m en worden de stalen stempels aangebracht op NAP –4,5 m.
- Een waterkerend groutstempel tussen de diepwand en de damwand wordt geplaatst met een dikte van 3000 mm met de bovenzijde op NAP –18,5 m;
- In de volgende fasen worden achtereenvolgens het dak van de bouwkuip van het Voorplein gemaakt, de diepe put ontgraven, een stempel aangebracht en ten slotte wordt de vloer van de diepe put gemaakt. Onder het station wordt de grondwaterstand omhoog gebracht tot NAP –3 m, waarna achtereenvolgens het groutstempel aangebracht kan worden en de bouwkuip nat ontgraven kan worden tot NAP –17,6 m;
- Hierna kan gefaseerd de ruimte tussen de (tijdelijke) diepwand en de damwand worden ontgraven, de grondwaterstand worden verlaagd en stempels aangebracht worden;
- Als de bouwkuip onder het station ontgraven is, kan de ruimte tussen de tijdelijke damwand en de diepwand van het Voorplein worden droog gezet en wordt de diepwand ter plaatse van de damwand gesloopt. Hier kan dan de zinkvoeg, de aansluiting tussen het tunnelelement en de bouwkuip van het Voorplein, dan gerealiseerd worden;
- Tenslotte kan de tijdelijke damwand worden afgebrand op het ontgravingsniveau (NAP –17,6 m), het tunnelelement worden ingevaren en afgezonken en worden aangesloten op de bouwput van het Voorplein.

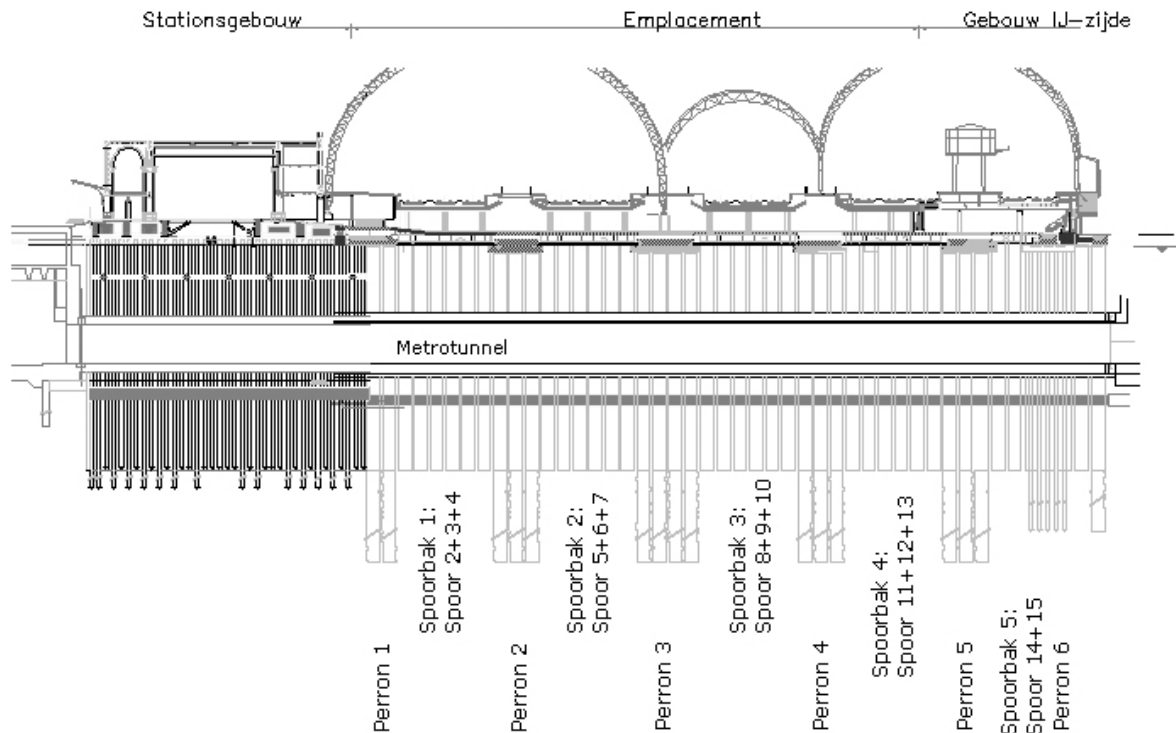
4.7 Buispalenwand

Onder het emplacement, boven het tracé van de Noord/Zuid metrolijn ligt de Middentunnel. Deze Middentunnel biedt ruimte aan de reizigersstromen in het station onder de sporen. Tevens zijn er voor deze reizigersstromen nog twee andere tunnels onder het emplacement: de Westtunnel en de Oosttunnel.

Deze Middentunnel is gemaakt in de periode 1980-1983 en is gefundeerd op staal. Dit was mogelijk, omdat de het grondpakket dat ontgraven werd ten behoeve van deze tunnel meer gewicht had dan de Middentunnel.

Het emplacement bestaat uit vier spoorbakken, met elk drie treinsporen, met tussen de spoorbakken de perrons. De spoorbakken bestaan uit een dek dat samen met de buitenwanden en de vloer een doosconstructie vormt. De volgende spoorbakken worden onderscheiden:

- Spoorbak 1: spoor 2, 3 en 4
- Spoorbak 2: spoor 5, 6 en 7
- Spoorbak 3: spoor 8, 9 en 10
- Spoorbak 4: spoor 11, 12 en 13



Figuur 4.11 Doorsnede station en emplacement

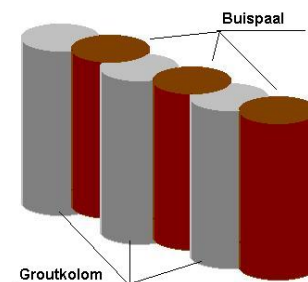
Vanwege de onmogelijkheid om binnen de planning de sporen per spoorbak voor een langere periode buiten dienst te nemen, zal het ontwerp een oplossing moeten hebben waarbij de sporen in dienst kunnen blijven. Het aanbrengen van de wanden dient dus vanuit de beperkte werkhoogte van de Middentunnel te geschieden.

Bij het maken van de wanden onder het emplacement moeten vervormingen van de spoorbakken of de aardebaan onder de sporen en van de poten van de kapspanten zoveel mogelijk worden beperkt. Kleine afwijkingen kunnen nog worden gecorrigeerd door middel van het spoor te onderstoppen of de spanten te vijzelen. De situatie is hier iets minder kritisch dan in het stationsgebouw, waar de scheurvorming in het metselwerk maatgevend is.

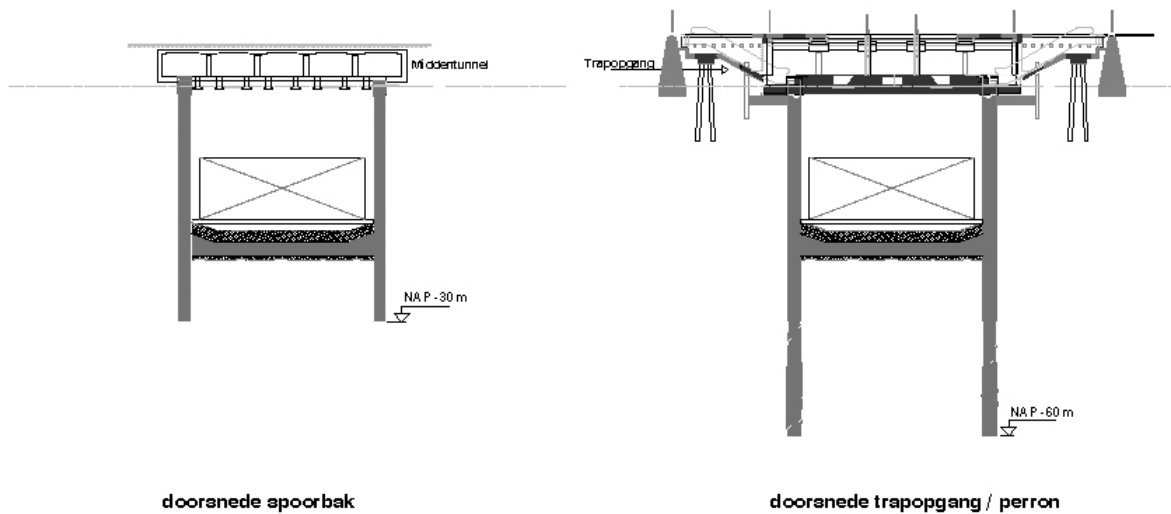
4.7.1 Wanden-dak

Net als bij het stationsgebouw, wordt er onder het emplacement de wanden-dak-methode toegepast om de zinksleuf onder het station te realiseren. Na het inbrengen van de wanden, wordt op het huidige niveau van de Middentunnelvloer een dak gevormd. Hierna kan het ontgraven van de bouwkuip aanvangen.

Het toepassen van de sandwichwand onder het emplacement bleek niet mogelijk gezien de belastingen vanuit de spoorbakken [Duijvenstein, 2001]. De oplossing zoals die uiteindelijk in het bestek terechtgekomen is, is een buispalenwand bestaande uit buispalen ($\varnothing$ 1720 mm met een wanddikte van 25 mm) met tussen de buispalen een groutkolom. Onder de perrons worden vervolgens boorpalen gemaakt om de belastingen geconcentreerd af te voeren naar NAP -60 m, terwijl de buispalen tot NAP -30 m worden ingebracht.



Figuur 4.12 Buispalenwand



Figuur 4.13 Doorsnede bouwkuip emplacement

4.7.2 Tafelconstructie onder het emplacement

Net als bij het stationsgebouw wordt ter plaatse van het emplacement ook gebruik gemaakt van de wanden-dakmethode om een sleuf te creëren waarin het tunnelelement afgezonken kan worden.

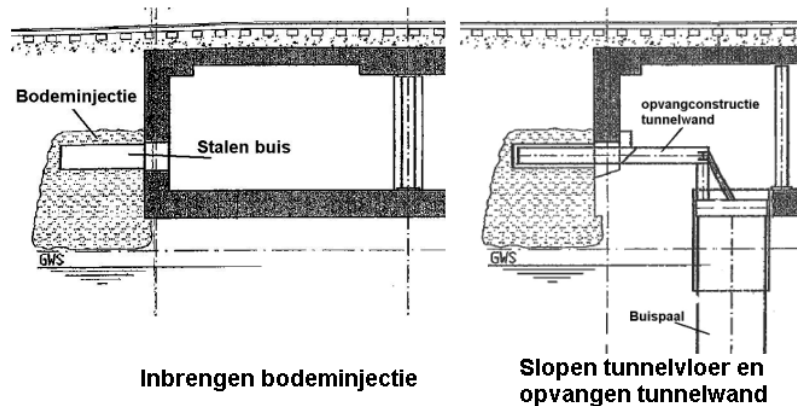
Ook hier zal de belasting van de bovenliggende constructie via een tafelconstructie van voorgespannen primaire en secundaire balken worden overgenomen op de bouwkuipwanden. De primaire balken zijn dwars op de bouwkuip geplaatst en dragen op de groepen van boorpalen, die onder de perrons zijn gemaakt.

Ook het maken van de bouwkuip onder het emplacement zal erg gefaseerd zijn, zodat altijd de belasting van de treinen opgevangen kan worden. Ook de aanpassingen aan de Middentunnel ten behoeve van het aanbrengen van de wand spelen hierbij een rol. Een gedeelte van de wanden van de Middentunnel zal gesloopt worden en de vloer zal onder de perrons worden vervangen door de primaire balken. Ook zal de vloer ter plaatse van de bouwkuipwand worden verwijderd, zodat de buispalen aangebracht kunnen worden.

Om een goed inzicht te verkrijgen in de buispalenwand en de uitvoering ervan, zal hieronder globaal de constructie stapsgewijs worden besproken, waarbij de bouwvolgorde zo veel mogelijk wordt aangehouden.

Achter tunnelwand zal een injectielichaam op basis van waterglas worden ingebracht, zodat er een waterafsluitende en draagkrachtige laag zal worden gerealiseerd. Tijdens slopen van het onderste gedeelte van de Middentunnelwand en tijdens het maken van de steunbalk onder de wand is dat nodig. Om de tunnelvloer te kunnen slopen, zal de dragende functie van deze op staal gefundeerde vloer opgeheven moeten worden. Deze tunnelvloer vangt in de huidige situatie de spoorbakken op. Ter plaatse van de kolomrijen onder de spoorbakken worden Tubex-palen geplaatst die in het ophoogzand zullen staan. Hierdoor zal de dragende functie van de tunnelvloer overgenomen worden door de Tubex-palen, waardoor deze tunnelvloer gesloopt kan worden waar nodig. Vijzels op de Tubex-palen kunnen eventuele vervormingen corrigeren.

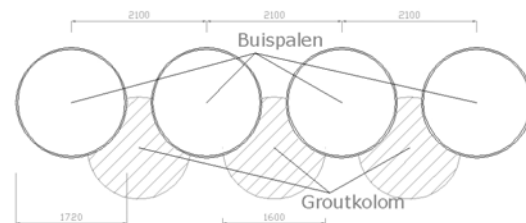
De vloer van de Middentunnel heeft ook een horizontaal dragende functie om de horizontale belasting van de grond van achter de tunnelwand te keren. Echter door het slopen van de vloer verliest deze zijn horizontale krachtswerking. Daarbij is de wand dusdanig gedimensioneerd, dat het niet mogelijk is om het ontstane moment in de wand, door het wegvallen van de vloer, op te nemen. Door een opvangconstructie te maken die in de waterglas-bodeminjectie staat, kan de belasting van achter de wand zonder kwalijke gevolgen worden opgenomen.



Figuur 4.14 Opvangen tunnelwand Middentunnel

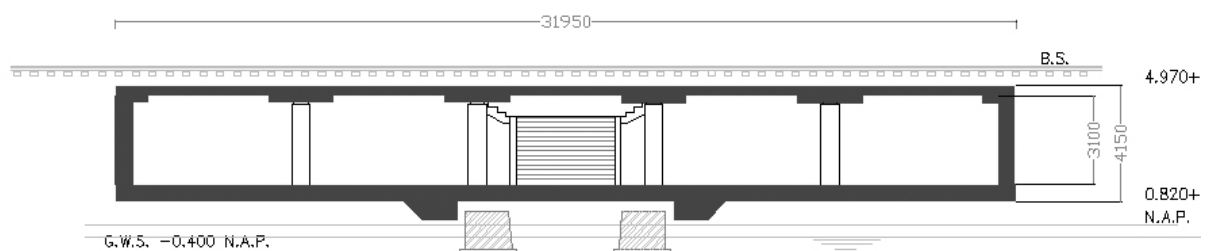
4.7.3 Buispalen en grout

Nadat de tunnelvloer geen dragende functie meer heeft en er gaten in gemaakt zijn, kan er worden begonnen met het aanbrengen van de bouwkuipwand van het emplacement. Hiervoor worden eerst de stalen buispalen ($\varnothing 1720$ mm, wanddikte 25 mm, hart op hart 2,1 m) geplaatst, gevolgd door het realiseren van de groutkolommen.



Figuur 4.15 Boven aanzicht buispalenwand

De buispalen, met een lengte van ca. 30 m, worden de grond in gedraaid: met een draaiend moment worden de holle palen de grond ingedrukt. Aangezien de buispalenwand onder de Middentunnel geplaatst wordt en het bovenliggende emplacement niet buiten gebruik kan worden genomen, zal de buispalenwand vanuit de Middentunnel de grond ingebracht moeten worden. Hierbij is er een beperkte werkhoogte beschikbaar van 3,1 m.



Figuur 4.16 Doorsnede huidige Middentunnel

De buispalen zullen ook hier, net als in het stationsgebouw het geval is met de Tubex-palen, in segmenten worden aangebracht en aan elkaar worden gelast. Om de wrijving tussen de grond en de paal tijdens het aanbrengen te reduceren en het boorgat stabiel te houden, zal er een steunvloeistof toegepast worden.

Om de mogelijke verplaatsingen van de op staal gefundeerde Middentunnel als gevolg van het slopen van de vloer om de buispalen aan te kunnen brengen, wordt na het inbrengen van een buispaal de tunnelwand opgevangen met een stalen ligger.



Nadat de buispalen op diepte zijn, kunnen de groutkolommen vervaardigd worden. Met behulp van de jetgrouttechniek worden vanaf NAP –30 m tot maaiveld de kolommen met een diameter van 1600 mm vervaardigd. De functie van de groutkolommen beperkt zich tot een grond- en waterkerende functie en het afdragen van de horizontale belasting op deze kolommen naar de stalen buispalen.

Gezien de hoge verticale belastingen uit het emplacement, is het niet mogelijk om de buispalenwand te funderen op een voetniveau van NAP –30 m. In het ontwerp is daarom gekozen om de belastingen geconcentreerd af te voeren onder de perrons, omdat hier meer werkhoogte beschikbaar is. De perrons kunnen immers tijdelijk plaatselijk worden afgesloten om de werkzaamheden mogelijk te maken. Om de primaire balken en de (verticale) belastingen uit de spoorbakken te funderen, worden er ter plaatse van de perrons boorpalen gemaakt. Hiertoe worden eerst de buispalen leeggemaakt met behulp van een emmer, waarbij de verwijderde grond tegelijkertijd vervangen zal worden door een bentonietspoeling. Deze ontgraving wordt doorgezet tot NAP – 66 m. Vervolgens zal er een wapeningskorf in de bentonietkolom worden gelaten. Tenslotte zal er in de kolom beton worden gestort die, omdat het eigengewicht van het beton groter is dan van bentoniet, de bentoniet zal verdringen. Zo ontstaat er een betonnen paal van ongeveer 66 m met een stalen omhulling van maaiveld tot NAP – 30 m, die de belastingen vanuit de spoorbakken en de primaire balken zal afdragen naar de derde zandlaag.

4.7.4 Primaire balken

Aangezien de hoogteligging van de primaire balken (onderkant ca. NAP – 1,00 m) zodanig is, dat deze in het grondwater (gemiddeld NAP – 0,40 m) liggen, zal de waterstand ter plaatse van de primaire balken verlaagd moeten worden. Daarom worden er in de bouwkuip drie compartimenteringschermen geplaatst: één onder spoorbak 1, één onder spoorbak 3 en één ter plaatse van de gevel van Gebouw IJ-zijde. In samenwerking met de bouwkuipwanden moet hierdoor een voldoende waterremmende constructie ontstaan zijn en kan de waterstand verlaagd worden.

De primaire balken hebben een overstek achter de bouwkuipwanden. Om de primaire balken te kunnen maken, worden er aparte bouwkuipjes gerealiseerd met behulp van damwanden en onderwaterbeton. Met behulp van injecties wordt de aansluiting tussen de buispalenwand en de damwand waterdicht gemaakt.

De primaire balken worden in het werk gestort en vervolgens gefaseerd voorgespannen. De balken zorgen voor de afdracht van de verticale belastingen naar de boorpalen en als bovenstempel tussen de bouwkuipwanden.

Nadat de primaire balken gereed zijn, worden de tunnelwanden gesloopt tot boven vloerniveau, waarna de steunbalken onder de wand worden gestort. Deze steunbalken worden opgelegd op de primaire balken en in samenwerking met de tunnelwanden dragen zij de spoorbakken. Onder spoorbak 4 is er een dienstgang, waardoor de wand niet over de gehele overspanning (de breedte van de spoorbak) aanwezig is. De steunbalk is hier verzekerd van zijn sterkte door middel van een voorspanning.

Nadat de primaire balken, inclusief de voorspanning, gereed zijn, kunnen de kaspanten worden overgenomen op de definitieve constructie. De opleggingen op de kolommen zijn scharnierend, terwijl deze kolommen momentvast zijn verbonden met de primaire balken. Bij perron 4 zijn de kaspanten echter opgelegd op een pendel, vanwege de hoge ligging van het oplegscharnier. Een trek/drukverbinding neemt de horizontale krachten op en leidt deze naar spoorbak 3.



Figuur 4.17 3^e Kapconstructie

De kapspanten die buiten de bouwkuip staan, blijven op de bestaande fundering rusten. Voordat de bouwkuip ontgraven wordt, worden bij deze opleggingen vijzels geplaatst om eventuele maaiveldzakkingen als gevolg van het doorbuigen van de bouwkuipwanden tijdens het ontgraven, te compenseren.

Door de bouwkuip onder het station te ontgraven zullen de wanden iets willen doorbuigen, waardoor er maaiveldzettingen verwacht worden. Omdat de perrons en trapopgangen door vijzels op hoogte worden gehouden, kunnen er zettingverschillen ontstaan. Na het ontgraven worden de perrons daarom opgehoogd.

4.8 Microtunnelling

De aannemer (Combinatie Strukton Betonbouw / Van Oord ACZ) vond aan het kwalitatief voldoen aan de gestelde eisen van de uitvoering van de bouwkuipwand te veel risico's kleven vanwege de vereiste nauwkeurigheden van de jetgrout-onderdelen. De risico's voor zowel het ontwerp als de uitvoering worden hierbij te hoog geacht.

Recente ervaringen met grout, waarbij deze grond- en/of waterdichtheid moesten waarborgen, leverden calamiteiten op. Voorbeelden hiervan zijn de tramtunnel in Den Haag en de Callandtunnel.

Er werd een voorstel tot wijziging gedaan, waarbij de buispalen met behulp van microtunnelling op diepte worden gebracht. Hierbij zal een schildboormachine de grond onder de buispaal verwijderen, waarna de buispaal naar beneden kan worden gedrukt. De onderlinge verbinding tussen de buispalen voor een grond- en waterdichte wand, wordt tot stand gebracht door middel van een slotconstructie. Bij de besteksoplossing was dit niet mogelijk, omdat de buispalen de grond in werden gedraaid. Voor het verder ontwikkelen van deze methode en het feit dat er veel ervaringsoverstijgende onderdelen in het ontwerp van de bouwkuipwanden van zowel de sandwichwand als de buispalenwand zaten, is er een speciaal samenwerkingsverband tot stand gekomen tussen opdrachtgever en opdrachtnemer voor dit gedeelte: het Gemeenschappelijk Domein, zie §4.13.

Aanvankelijk werd deze microtunnellingmethode voor de gehele wand voorgesteld, maar dit bleek niet haalbaar: er was niet voldoende tijd beschikbaar om dit alternatief technisch voldoende uit te werken voor het stationsgebouw, omdat de uitvoering van de bouwkuipwand onder het stationsgebouw er dicht op zat. Deze activiteit ligt op het kritieke pad van dit contractonderdeel en aangezien dit contract onderdeel van de gehele Noord/Zuidlijn is, was een overschrijding van de gestelde tijdsduur zeer onwenselijk.

Het microtunnelling-alternatief voor de bouwkuipwand onder het emplacement en gebouw IJ-zijde kreeg echter wel de voorkeur boven de besteksoplossing, een buispalenwand met groutkolommen. Qua sterkte en invloed op de omgeving ten gevolge van vervormingen wordt er geen verschil tussen de besteksoplossing en de microtunnellingvariant verwacht. De waterdichtheid van de microtunnellingvariant lijkt beter dan die van de besteksoplossing, omdat een vast slot de voorkeur verdient ten opzichte van een oplossing met een afdichting middels groutkolommen. [*Eindrapportage C&E team, 2002*]. Er stonden nog wel wat vragen open, maar aanvullend onderzoek was nog wel mogelijk binnen de planning voor deze bouwkuipwand. Met name het slot heeft nog aandacht nodig. Overigens kunnen als back-up nog altijd de groutkolommen achter het slot, tussen de buispalen, worden toegepast.

De buispalen worden ook in segmenten aangebracht in de beperkte werkhoogte van de Middentunnel van ca. 3,1 m. De buispaal zal bestaan uit segmenten van 2 m. Met behulp van de schildboormethode wordt de buispaal op diepte gebracht. In het eerste segment bevindt zich de boorkop. Tijdens het boren wordt de buispaal per sectie in de bodem gedrukt door een hydraulische persinstallatie vanuit de Middentunnel. De buis wordt dus de grond in



geboord/gedrukt en niet gedraaid, zoals bij de besteksoplossing. Hierdoor zal de verstoring van de omgeving zo klein mogelijk worden gehouden.

Om de wrijving tussen de buispaal en de grond te reduceren wordt er een bentonietomhulling rond de paal gecreëerd. Tevens zorgt deze bentonietomhulling voor stabiliteit van het boorgat. Om de ruimte voor deze omhulling mogelijk te maken, heeft de boorkop een oversnijding van 50 mm. Dit brengt nog een risico met zich mee: de buispaal kan zich nog horizontaal verplaatsen in dit boorgat.

Nadat de boorkop op diepte is gekomen, worden de tanden van het graafwiel ingeklapt en wordt de afdichting tussen de boorkop en de buispaal losgemaakt, waarna de boorkop teruggehaald kan worden. Tijdens het boorproces staat er water op de schildboor, waardoor de drukkracht van het persframe op de boorkop minder groot hoeft te zijn. Ook zal er na het verwijderen van de boorkop voldoende druk aanwezig zijn om te voorkomen dat er water zal toestromen in de buispaal als de boorkop wordt losgemaakt van de buispaal en ontgronding tot gevolg zal hebben. De onderlinge verbinding tussen de buispalen komt tot stand door een koppelslot, zie bijlage 4, die aan de buitenzijde van de buispalen is bevestigd. Deze koppelsloten zorgen voor een grond- en waterdichte verbinding tussen de buispalen. Het toepassen van een slot is nu mogelijk, omdat de buispaal niet gedraaid zal worden zoals bij de besteksoplossing het geval is. In dit geval zal de buispaal naar beneden gedrukt worden. De dimensies van de sloten ten opzichte van de buispalen zijn zodanig dat het slot geen geleidende functie zal hebben tijdens het op diepte brengen van de buispalen. De boorkop zal driedimensionaal te sturen zijn, waardoor kleine correcties mogelijk zijn.

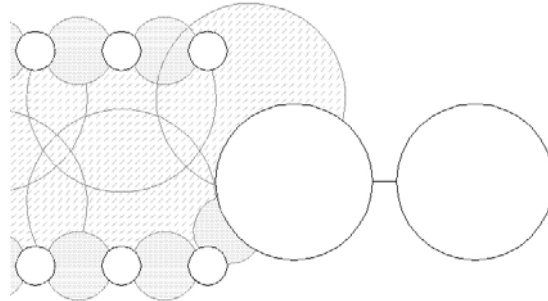
Tijdens het boren zal de vrijkomende grond in suspensie met water worden gebracht net achter de boorkop in de spoelkamer. Met een persleiding zal de suspensie naar het maaiveld worden getransporteerd, waarna de grond naar het depot in het IJ zal gaan.

Ten opzichte van het besteksontwerp zal alleen de buispalenwand zelf veranderen, terwijl de rest van het ontwerp gehandhaafd blijft, aanpassingen aan de dimensies van de buispalen $\varnothing 1820$ mm in plaats van $\varnothing 1720$ mm daargelaten. De tafelconstructie zal worden toegepast zoals in het bestek is beschreven, net als de deksloof, het groutstempel, het hulpwerk en de faseringen (zie §4.7). De in het bestek voorgeschreven boorpalen worden nu ook middels de microtunnellingmethode aangebracht tot NAP -66 m. In plaats van een betonnen boorpaal is er nu in het ontwerp een stalen buispaal, bestaande uit aan elkaar gelaste segmenten aanwezig voor de fundering van het emplacement ter plaatse van de Middentunnel.

Er dient rekening gehouden te worden met de oude hulpfundering van de Middentunnel. Tijdens de aanleg van de Middentunnel werd het bovenliggende emplacement tijdelijk gedragen door korte Tubex-palen, voordat het bovenliggende emplacement werd overgenomen op de op staal gefundeerde tunnel. Deze Tubex-palen zijn echter nooit verwijderd en kunnen nu mogelijk in het profiel van de buispalen aanwezig zijn.

4.9 Aansluiting sandwichwand - microtunnellingwand

Om een grond- en waterdichte aansluiting tussen de twee verschillende bouwkuipwandsystemen, de sandwichwand onder het stationsgebouw en de buispalenwand onder het emplacement, te bewerkstelligen is de buispalenwand zodanig gesitueerd dat deze bij de aansluiting met de sandwichwand in het groutlichaam staat, zie figuur.



Figuur 4.18 Aansluiting sandwichwand-buispalenwand

4.10 Verbinding naar het IJ

Tussen het IJ en het station bevindt zich de De Ruijterkade. Over deze kade loopt een 2-baans weg met een fietspad. Ook zijn er enkele aanmeerplaatsen voor diverse schepen, waaronder een veerdienst voor fietsers. Uiteindelijk voorziet het ontwerp van de De Ruijterkade erin dat de 2-baans weg onder maaiveld zal lopen (autotunnel) en dat er op het niveau van de perrons een busstation aanwezig zal zijn. Binnen het contract van Metrostation CS, dat door de Combinatie Strukton Betonbouw / Van Oord ACZ wordt uitgevoerd, vallen slechts de onder het maaiveld liggende onderdelen.

De verbinding tussen de bouwkuip onder het station en het IJ komt tot stand door middel van een gegraven geul. Deze geul komt onder de De Ruijterkade te lopen en zal een gedeelte van het IJ inlopen. De verticale begrenzingen van deze geul worden voor een gedeelte gevormd door combiwanden en het gedeelte dat het IJ inloopt door damwanden. Een tijdelijke afsluiting tussen dit gedeelte en de bouwkuip onder het station is een stalen damwand.

Het gedeelte tussen de combiwanden wordt na het plaatsen van het tunnelement droog gezet. In deze bouwkuip met onderwaterbetonvloer wordt de autotunnel aan de IJ-zijde gemaakt, net als een gedeelte van de metrotunnel, dat zal aansluiten op het tunnelement onder het station en op het tunnelement in het IJ van contract 2.2, en verdeelhallen voor metropassagiers. Het gedeelte dat begrensd wordt door de damwanden wordt de sluiskuij genoemd. Hier wordt het tunnelement ingevaren en zal de waterstand in de bouwkuip en sluiskuij worden verlaagd tot NAP – 1,5 m (fase 2 van het afzinken, zie ook §4.2), waarna het tunnelement de bouwkuip verder ingevaren zal worden. In deze fase is de tijdelijke damwand tussen bouwkuip station en De Ruijterkade al verwijderd en kan het tunnelement dus onder het station worden “geschoven”. Omdat de sluiskuij ca. 80 m het IJ in steekt en dus in de vaargeul staat, zal gedurende de aanwezigheid van de sluiskuij de vaargeul in het IJ worden verlegd.

4.11 Horizontale begrenzingen

4.11.1 Kleilaag

De waterdichte horizontale afsluiting aan de onderzijde van de bouwkuip wordt gevormd door een van nature aanwezige kleilaag. Vanaf NAP – 28 m bevindt zich de Eemklei, een laag van ongeveer 17 m dik, want vanaf NAP – 45 m gaat deze Eemklei over in Glaciale klei, dat aanwezig is tot NAP – 56 m, waar de derde zandlaag begint. Zie figuur 4.2.

4.11.2 Groutstempel

Over de gehele bouwkuip is er een groutstempel aanwezig. Dit groutstempel heeft enkel een stempelfunctie. Deze laag is niet grond- en waterdicht: er mag niet eens een waterspanningsopbouw onder het groutstempel ontstaan. Hiertoe zijn er in het groutstempel enkele grote openingen gelaten.

Dit groutstempel wordt ook middels het twee- of drie-fasensysteem gemaakt en bevindt zich tussen NAP – 20 m en NAP – 21,75 m, met een nominale dikte van de groutstempel van 1,75 m.

4.12 Ontgraven

Nadat de bouwkuipconstructie gereed is, kan er worden begonnen met de ontgravingwerkzaamheden, die in twee fasen uitgevoerd zullen worden.

In de eerste fase wordt er droog ontgraven. Hiertoe wordt eerst de waterstand in de bouwkuip verlaagd tot NAP – 5,5 m, waarna de bouwkuip droog ontgraven wordt. Ter plaatse van het stationsgebouw wordt deze afgegraven tot het niveau van NAP – 5,0 m om het tussenstempel te kunnen aanbrengen. Onder het emplacement en gebouw IJ-zijde is het ontgravingsniveau NAP – 4,0 m.

Tijdens het droog ontgraven worden de bestaande en overbodige funderingsresten verwijderd. Deze worden met het ontgravingsniveau mee gesloopt en/of afgezaagd. Hierdoor hoeven de palen niet getrokken te worden.

Waar het ontgravingsniveau bereikt is, kan worden begonnen met het maken van het groutstempel.

Nadat het groutstempel gereed is, kan worden begonnen met de tweede ontgraaffase: het nat ontgraven. Hiertoe wordt de waterstand in de bouwkuip verhoogd tot NAP –3 m. Het ontgraven gebeurt met behulp van drijvend materieel en zal dan via leidingtransport worden afgevoerd naar het IJ, vanwaar het naar een depot wordt vervoerd.

4.13 Gemeenschappelijk Domein

De besteksvorm is geschreven volgens de RAW-systematiek conform de U.A.V. (Uniforme Administratieve Voorwaarden) 1989. De uitgangspunten voor deze systematiek zijn [CROW]: het huidige aanbestedingsstelsel, zoals dat is vastgelegd in het Uniform Aanbestedingsreglement (U.A.R.) en in het U.A.R.-EG 1991;

- de Uniforme Administratieve Voorwaarden voor de uitvoering van werken (U.A.V.);
- de gelijkwaardigheid van contractpartners – opdrachtgever en aannemer – met ieder een eigen verantwoordelijkheid;
- een duidelijke afbakening van die verantwoordelijkheden in het bestek, waarbij de opdrachtgever in beginsel de verantwoording heeft voor het ontwerp en de aannemer voor de uitvoering;
- duidelijke besteksinformatie die aansluit op ontwerp, calculatie, uitvoering en bedrijfshuishouding, met een eenduidige omschrijving van de rechten en plichten van de contractpartners;
- een beschrijving van het werk in de vorm van kostenhomogene en uitvoeringsgerichte besteksposten. Kostenhomogeen wil zeggen dat de prijs per eenheid voor de daarbij behorende bestekshoeveelheid (nagenoeg) gelijk is.

Echter, binnen het contract 3.2 voor de passage van de Noord/Zuid-lijn onder het Amsterdam Centraal Station zijn er een aantal ervaringsoverstijgende onderdelen aan te merken: de

sandwichwand en de buispalenwand met groutkolommen zijn nog niet op een dergelijke wijze en op een dergelijke locatie toegepast. Hierdoor waren de betreffende besteksposten binnen het RAW-contract niet goed af te prijzen; de risico's en de ontwikkeling van nieuwe machines voor de uitvoering waren onder andere niet goed af te schatten.

De eerste aanbieding van de Combinatie Strukton Betonbouw / Van Oord ACZ (CSO) werd mede om deze reden niet passend verklaard en werden de onderhandelingen tussen de opdrachtgever en CSO geopend.

Binnen deze onderhandelingen werden de ervaringsoverstijgende onderdelen uit het RAW-bestek getild en ondergebracht in een gezamenlijke uitwerking tussen opdrachtgever en CSO: het Gemeenschappelijk Domein. Binnen dit Gemeenschappelijk Domein (GD) zullen de ervaringsoverstijgende onderdelen gezamenlijk worden uitgewerkt en zal er een duidelijke verdeling van risico's worden afgesproken en zullen de gevolgen van een aantal ongewenste gebeurtenissen (de risico's) worden gedragen door een risicofonds. Naast dit technische GD werd er ook een GD met betrekking tot inkoopzaken opgericht.

4.13.1 GD Techniek

Binnen het technisch GD wordt de (verdere) technische ontwikkeling van de in het GD genoemde onderdelen, waaronder:

- De bouwkuipwand onder het stationsgebouw
- De bouwkuipwand onder het emplacement
- De bouwkuipwand onder gebouw IJ-zijde

Binnen deze gezamenlijke technische uitwerking nemen de onderlinge partijen elk hun normale verantwoordelijkheden op zich (de opdrachtgever blijft bijvoorbeeld ontwerpverantwoordelijk en de aannemer draagt zorg voor de uitvoering), maar de onderlinge communicatie en afstemming zal hierdoor beter verlopen. Ook kan er bij de uitwerking gebruik gemaakt worden van de expertise van de partners. Zo kan de aannemer bijvoorbeeld voorstellen voor het ontwerp doen om het geheel beter te kunnen uitvoeren en kan de opdrachtgever een beter uitvoerbaar ontwerp maken.

Naast deze gezamenlijke technische ontwikkeling wordt er bij het technisch GD een risico item lijst opgesteld, waarin onderling de risico allocatie (degene die het risico draagt) wordt afgesproken. Hierin worden de ervaringsoverstijgende risico's en de risico's volgend uit de werking van de gekozen uitvoeringstechnieken gealloceerd op het GD, terwijl overige zaken worden gealloceerd volgens de UAV1989:

- Ontwerpverantwoordelijkheden, interne communicatie tussen de verschillende opdrachtgevende partners en obstakels liggen gealloceerd bij de opdrachtgever.
- Normale bedrijfsrisico's, zoals uitvoeringsrisico's als gevolg van fouten en hoeveelheden- en prijsonzekerheden aan posten die niet direct gerelateerd zijn aan de ervaringsoverstijgende onderdelen zijn gealloceerd op de aannemer.

Om de gezamenlijke GD-risico's te kunnen dragen, is er een speciaal "potje" opgericht: het risicofonds. Hierin hebben de opdrachtgever en –nemer beiden een bedrag aan bijgedragen en hieruit zullen de gevolgen van de gezamenlijke risico's worden betaald, of worden juist de maatregelen om de gezamenlijke risico's te beperken van betaald.

De inzetverdeling werd als volgt vastgesteld: f 15 miljoen (EUR 6,8 miljoen) door de opdrachtgever en f 5 miljoen (EUR 2,3 miljoen) door de aannemer. Het geld dat na oplevering van de GD-onderdelen in het risicofonds overblijft, zal weer worden verdeeld onder de opdrachtgever en aannemer met een verhouding van respectievelijk 60-40.

De organisatie van de opdrachtgevende partij bestaat uit een aantal actoren:

- Projectbureau Noord/Zuidlijn (PBNZL) is de opdrachtgevende partij;

- Adviesbureau Noord/Zuidlijn (ABNZL) is, namens PBNZL, de directie UAV;
- V.O.F. Stationseiland (VOF), een samenwerkingsverband tussen Holland Railconsult en Arcadis Infra, is de technisch adviseur van ABNZL.

De VOF behandelt de technisch-inhoudelijke zaken en brengt hierover advies uit aan de directie UAV, ABNZL, die een mandaat heeft voor zowel de financiële als de technische zaken. Een bijkomstigheid is dat de opdrachtgever van de VOF niet ABNZL is, maar ProRail. Hierdoor kunnen dus nog enige spanningen ontstaan met betrekking tot de besluitvorming van de opdrachtgevende partij. Ook omdat de technische goedkeuring voor voorstellen van de aannemer eerst technisch goedgekeurd moet worden voordat de directie UAV (ABNZL) hier een beslissing over kan nemen, zal dit (administratieve) vertraging kunnen opleveren.

Als gevolg van de oprichting van het Gemeenschappelijk Domein is er, op voorspraak van CSO, gekozen voor toepassing van het microtunnellingsysteem voor de uitvoering van de bouwkuipwanden onder het emplacement in plaats van buispalen met daartussen een groutkolom en boorpalen onder de perrons. De reden voor dit voorstel was dat de aannemer een waterdichte wand middels buispalen met groutkolommen niet kon garanderen. Een voorstel voor de microtunnellingvariant werd betrouwbaarder qua waterdichtheid geacht gezien het toepassen van een stalen slotverbinding in plaats van groutkolommen. De stijfheid en mogelijke vervormingen worden als gelijkwaardig beschouwd.

Toch werd de stijfheid van de wand nog niet als voldoende beschouwd. De diameter van de buispalen van $\varnothing 1720$ mm is daarom gewijzigd in $\varnothing 1820$ mm.

4.13.2 GD Inkoop

Hoeveelheids- en prijsonzekerheden hebben er tot geleid dat er voor de inkoop van de diepwand op het Voorplein en de boorpalen op het Voorplein en onder het emplacement onder een gezamenlijk inkoopbeleid van zowel opdrachtgever als –nemer vallen.

De prijsvorming van de boorpalen, jet-grouting en boorpalen uit het bestek voor die eerste inschrijving werden gedaan in de tijd van een hoog-conjunctuur: het aantal aan te bieden werken was groter dan de hoeveelheid beschikbare aannemers. De opdrachtgever, Adviesbureau Noord/Zuid-lijn (ABNZL), zag een mogelijke kostenreductie door ook het inkoopbeleid voor de hier genoemde onderdelen in het Gemeenschappelijk Domein te zetten. Door de marktwerking zou de prijs mogelijk lager uit kunnen komen dan in eerste instantie rekening mee gehouden is.

4.14 Te beschouwen systeem

Ten behoeve van het goed uitvoeren van een risicoanalyse, zal er vastgesteld moeten worden welk systeem precies geanalyseerd zal worden en wat als basis dient voor deze analyse.

Om een goede risicoanalyse te kunnen uitvoeren, zal er vanuit één beginpunt, zowel in de tijd gezien als fysiek, gekeken moeten worden. Immers, maatregelen om risico's te reduceren, kunnen andere risico's beïnvloeden of zelfs vergroten. Een maatregel verandert het systeem dus. Hieruit blijkt, dat het systeem duidelijk beschreven moet worden en eenduidig moet worden vastgesteld.

In de bovenstaande paragrafen is beschreven hoe de bouwkuip onder Amsterdam Centraal Station wordt gemaakt, is globaal de werking aangegeven en zijn de omliggende constructies en werkzaamheden beschreven. Het systeem dat in deze risicoanalyse bekeken zal worden is de bouwkuip onder het station en zal zich concentreren rond de twee uit te voeren wandsystemen, de sandwichwand en de buispalenwand uitgevoerd volgens de microtunnellingmethode.

Er is gekozen om de met behulp van microtunnelling aangebrachte buispalenwand met koppelsloten onder het emplacement mee te nemen en niet het vervallen alternatief (de besteksoplossing: een buispalenrij met groutkolommen tussen de buizen). Het systeem met de microtunnelling is een nieuwe uitvoeringstechniek. Horizontaal is dit systeem al jaren met succes toegepast, maar verticaal is dit nog niet toegepast onder deze omstandigheden. Toch geeft het meer zekerheid met betrekking tot de waterdichtheid dan de besteksoplossing.

In Zweden is er wel een proef gedaan met het toepassen van een verticale tunnelboormachine voor het maken van een opslagruimte voor nucleair afval. [Willenfors, 2000] De dimensies van het boorgat komen redelijk overeen: 1,75 m in Zweden tegenover 1,82 m in het project onder Amsterdam CS. De omstandigheden verschillen echter: in plaats van een grondslag van zand en klei werd er in Zweden geboord in graniet, was er geen casing aanwezig en waren de geboorde palen slechts 9 m lang, in tegenstelling tot onder het Centraal Station, waar de palen tot een lengte van 66 m worden toegepast.

In het volgende hoofdstuk zal het hierboven beschreven systeem verder worden geanalyseerd en zullen de ongewenste gebeurtenissen, die mogelijk kunnen optreden, en onzekerheden worden beschreven van de verschillende onderdelen van de bouwkuip. In hoofdstuk 6 zullen de relaties tussen de verschillende onzekerheden en ongewenste gebeurtenissen van dit systeem worden gelegd.

Hoofdstuk 5 De bouwkuip verder geanalyseerd

5.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de verschillende onderdelen van het systeem, zoals dat afgebakend is in §4.14, besproken: met name de (krachts)werking, de onzekerheden en ongewenste gebeurtenissen komen aan bod. De hier besproken onzekerheden en ongewenste gebeurtenissen worden hier slechts in beknopte mate besproken. Hiernaast wordt er in bijlage 5 een overzicht gegeven van de bijzondere gebeurtenissen die mogelijk zouden kunnen optreden. Deze “Risico Item Lijst” komt voor een gedeelte voort uit het Risico Dossier van de Combinatie Strukton Betonbouw / Van Oord ACZ (CSO), welke tot stand is gekomen door onder meer de raadpleging van de verschillende deelnemende partijen: de opdrachtgever (OG), de opdrachtnemer (ON) en verschillende onderaannemers. Deze onderaannemers zijn specialisten op hun gebied: Smet Keller voor het jetgrouten, Tubex BV voor het aanbrengen van de Tubex-palen en Combinatie Microtunnelling Metrostation CS (CMM) voor de realisatie van de buispalen middels microtunnelling.

Eén van de belangrijkste bedreigingen van de bouwkuip die niet mag optreden is dat door de realisatie van de bouwkuip het stationsgebouw en/of het emplacement dermate schade oplopen dat dit niet meer te herstellen is of dat er menselijke slachtoffers vallen. Vervormingen van het stationsgebouw of emplacement kunnen veroorzaakt worden door te veel zetting van het maaiveld buiten de bouwkuip of doordat de fundatie van het stationsgebouw of het emplacement niet toereikend is.

Allereerst zullen de verschillende onderdelen binnen het ontwerp afzonderlijk bekeken worden, waarna tenslotte het systeem van de bouwkuip als geheel bekeken zal worden. Deze analyse zal worden vastgelegd in het risicodossier. In het risicodossier zijn de risico's echter opsamenhangend opgesomd. In het volgende hoofdstuk zal dit risicodossier dan worden gebruikt om de relaties tussen de verschillende risico's vast te leggen en op deze wijze meer inzicht te verkrijgen in het systeem van de bouwkuip.

5.2 Sandwichconstructie

De sandwichwand onder het stationsgebouw bestaat uit stalen palen met daartussen een groutlichaam. Deze stalen palen worden uitgevoerd als Tubex-palen, zie ook §4.5.

5.2.1 Werking

De Tubex-palen en het groutlichaam vormen samen de sandwichwand. Deze bouwkuipwand fungeert als verticaal- en horizontaal dragend element onder de nieuwe tafelconstructie onder het stationsgebouw en moet voldoende grond- en waterkerend zijn om het afzinkproces van de zinktunnel te kunnen waarborgen en de maaiveldzettingen tot een minimum te beperken. Als gevolg van de locatie onder het stationsgebouw heeft de wand zeer strenge eisen ten aanzien van doorbuiging, zie ook §4.5.

De grond- en waterkerende functie van de wand wordt ontleend aan de 4 rijen groutkolommen. In de buitenste twee rijen zijn echter de stalen Tubex-palen opgenomen, die de dichting voor ongeveer 50% in de rij voor hun rekening nemen. Zie ook figuur 4.8.

5.2.2 Verticaal gedrag

In langsrichting wordt de wand verondersteld zodanig samen te werken dat deze te beschouwen is als een schijf. Aan de onderzijde van de wand zal, als gevolg van spreiding, weinig merkbaar zijn van de lokaal verschillende belastingen en de ongelijkmatige verdeling daarvan aan de bovenzijde van de wand. Voor de draagkracht is de wand dan ook als geheel bekeken.

De verticale draagkracht van de wand wordt in eerste instantie gemobiliseerd aan de voet van het groutmassief, welke ca. 1 m in de Eemklei op NAP –30 m staat. Hiermee wordt tevens de waterkerende functie van de bouwkuipbodem verzorgd. De Eemklei is wel stijf, maar er worden wel verticale verplaatsingen verwacht door de spanningsverhoging aan de onderzijde van de wand. In eerste instantie wordt de zetting als gering beschouwd, maar naar verloop van tijd kunnen deze fors oplopen, tot 75 à 100 mm [Schat, 2003]. Deze vervormingen kunnen vergaande gevolgen voor het bovenliggende stationsgebouw hebben en dus zullen er maatregelen genomen moeten worden om dit te voorkomen.

Een deel van de Tubex-palen zal worden doorgezet tot de derde zandlaag, met het paalpuntniveau op NAP –60 m. Er ontstaat zo een gecombineerde fundering dat gedeeltelijk draagt op de Eemklei en voor een gedeelte op de derde zandlaag.

5.2.3 Horizontaal gedrag

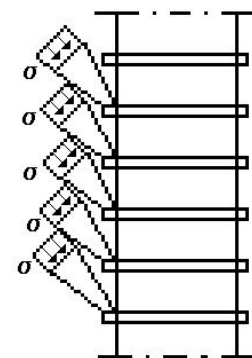
Het horizontale gedrag van de wand is niet te modelleren met behulp van de liggertheorie, aangezien scheuren in de wand, in het grout, de wand lokaal minder stijf zullen maken. Vergelijk met beton, waar door het ontstaan van scheuren de stijfheid ook afneemt. Ook speelt dwarskrachtvervorming een rol bij sandwichconstructies voor de totale vervorming.

Verenmodellen, zoals bijvoorbeeld MSHEET zijn dus niet toe te passen. Met behulp van Plaxis, een eindige elementen methode, is bepaald hoe de interactie met de grond is en wat de belastingen op de wand zijn en zijn de optredende vervormingen getoetst. Daarnaast zijn met behulp van een vakwerkmodel de krachtwerving en de optredende spanningen in de sandwichwand gemodelleerd en berekend. [Duijvestein, 2001]

De samenwerking tussen de Tubex-palen en het grout is van grote invloed op het vervormingsgedrag van de sandwichwand. De aanhechting tussen de ruwe palen en het grout is echter moeilijk te garanderen. Om de samenwerking tussen de Tubex-palen en het grout te verbeteren, worden er deuvels in de vorm van ringen aangebracht, die de schuifweerstand in de vorm van een drukkracht tussen de twee onderdelen moet overbrengen. Deze ringen, bestaande uit wapeningsstaal rond 32 mm, zullen h.o.h. 250 mm worden aangebracht.

Uit bovengenoemde berekeningen blijkt dat de stijfheid van de wand groot is; de horizontale vervorming achter de wand als gevolg van de doorbuiging van deze wand bedraagt volgens de berekeningen slechts 25 mm. Als gevolg van deze doorbuiging is de zakkingsstroeg achter de wand maximaal 10 mm diep. Naast deze maaiveldzakking als gevolg van de doorbuiging van de wand spelen er nog een aantal zaken een rol bij de vervormingen van het stationsgebouw:

- Doorbuiging tafelconstructie door belastingen uit het stationsgebouw;
- Zakking van de bouwkuipwand door de grote oplegreacties op de wand uit de tafelconstructie;
- Zettingen achter de wand als gevolg van de inbreng van de wand;
- Het ontstaan van een zandvoerende lek in de wand, waardoor er zand van achter de wand de bouwkuip inloopt en het maaiveld zet;
- Autonome maaiveldzetting;



Figuur 5.1 Overdracht drukkracht grout naar Tubex-paal

- Inbrengen van de funderingsversterking, waardoor de draagkracht van de bestaande fundering (een gecombineerde paal-staal fundering met houten palen) vermindert.

De ontwerper (VOF Stationseiland) heeft nog enkele invloeden onderkend, maar vond deze slechts van geringe invloed:

- De interactie tussen het gebouw en fundering
- Interactie tussen bovengenoemde invloeden. De bovengenoemde invloeden zijn allen afzonderlijk bepaald en vervolgens gesommeerd.
- De rijzing als gevolg van zwel
- Eventuele daling als gevolg van tijdelijke bemaling
- Invloeden als gevolg van het maken van de bouwkuip op het Voorplein

Met behulp van het eindige elementen computerprogramma DIANA zijn de optredende rekken vergeleken met kritieke rekken in het metselwerk; de verwachte vervormingen lijken vanuit de berekening dermate klein te zijn, dat het effect ervan gering is.

5.2.4 Tubex

Algemeen

Tubex-palen zijn stalen funderingspalen met een boorpunt. Vanaf een boortafel worden deze palen trillingsvrij de grond in gedraaid, waarbij de grond verdrongen wordt en zo verdicht wordt rond de buispaal. In de sandwichwand wordt een Tubex-paal met een uitwendige diameter van 457 mm en een boorpunt van 650 mm toegepast. Vanwege de beperkte werkruimte in het stationsgebouw (zie ook figuur 4.9) worden de buispalen ingebracht in segmenten van elk ca. 6 m lengte. Deze segmenten worden door middel van lassen aan elkaar gekoppeld tot één buispaal.

De Tubex-palen worden in twee rijen aangebracht die h.o.h. 2,5 m worden geplaatst; in de rij staan de palen h.o.h. 1 m, zie ook figuur 4.8.

Uitvoering

De Tubex-buispalen zullen met een aangepaste boortafel, speciaal voor dit werk ontwikkeld, de grond in worden gedraaid. Het eerste segment dat aangebracht zal worden, bevat de boorpunt, die aan het buissegment gelast is. Als het eerste segment bijna volledig de grond ingedraaid is, wordt het volgende segment er op geplaatst en er aan worden gelast. Deze las wordt volledig doorgelast. Dit proces wordt herhaald totdat de Tubex-paal op diepte is.

Er worden twee verschillende lengten gehanteerd voor de Tubex-palen: korte palen van ca. 30 m (worden tot NAP –30 m aangebracht aan de kuipzijde en NAP –26 m aan de buitenzijde van de wand) en lange palen, die tot op NAP – 60 m worden doorgezet. De korte palen zullen een wanddikte krijgen van 25 mm. De wanddikte van de lange palen is tot NAP –26 m / - 30 m ook 25 mm, terwijl die daaronder 12 mm bedraagt.

Over de hoogte waarover de Tubex-paal in contact staat met het groutlichaam, worden er stalen ringen h.o.h. 250 mm, Ø 32 mm toegepast om de schuifweerstand tussen Tubex-paal en grout op te nemen.

Fasering

Om de reizigers niet te veel te hinderen tijdens het aanbrengen van de Tubex-palen en het groutlichaam, wordt de uitvoering van de sandwichwand in vier fasen uitgevoerd: de fases noordoost (NO), noordwest (NW), zuidoost (ZO) en zuidwest (ZW). Er wordt één van de vier kwadranten in het stationsgebouw afgezet waar de werkzaamheden in plaats vinden. Als de

werkzaamheden afgerond zijn, wordt het kwadrant weer vrijgegeven en kan worden begonnen met de volgende fase.

Onzekerheden en ongewenste gebeurtenissen

Omdat de Tubex-palen onderdeel van de sandwichwand zijn, samen met het groutlichaam, zullen de Tubex-palen binnen bepaalde toleranties op diepte moeten komen. Zaken die deze toleranties kunnen bedreigen zijn:

- Plaatsingsafwijkingen;
- Scheefstand van de paal, zowel door verkeerde inbreng, als tijdens het inbrengen door de grondgesteldheid, de ringen (meer weerstand), obstakels en door het opspannen van de grond door de aanbreng van andere Tubex-palen;
- Scheef oplassen van de segmenten, waardoor de paal niet recht meer is;
- Ook kunnen de Tubex-palen niet op diepte komen. Mogelijke oorzaken hiervoor zijn te veel weerstand door de toepassing van de ringen en te lange stilstand waardoor de grond weer gaat ontspannen, grondgesteldheid is anders dan verwacht, obstakels in de bodem en groutverblijfselen van overige funderingsconstructies, zoals de VHP-palen. Een bijkomstigheid is dan dat de vereiste lasdikte dan niet aanwezig is op de kritieke hoogten, tussen NAP – 9 m en NAP –17 m.

Bij het lassen van de verschillende paalsegmenten moet er goed op de kwaliteit worden gelet, ook moet er worden voorkomen dat er koude-scheuren optreden.

Gezien de beperkte ruimte wordt er een aangepaste machine ontwikkeld, die wel in deze ruimte (in het stationsgebouw) kan werken. Verder kan het nog voorkomen, dat er voor logistieke zaken, zoals de aanvoer van buissegmenten en de ringen, te weinig ruimte is of dat het niet mogelijk is overdag vanwege de hinder die het transport veroorzaakt voor de reizigers. Dit kan vooral gebeuren als er met meerdere machines gewerkt gaat worden in één fasering.

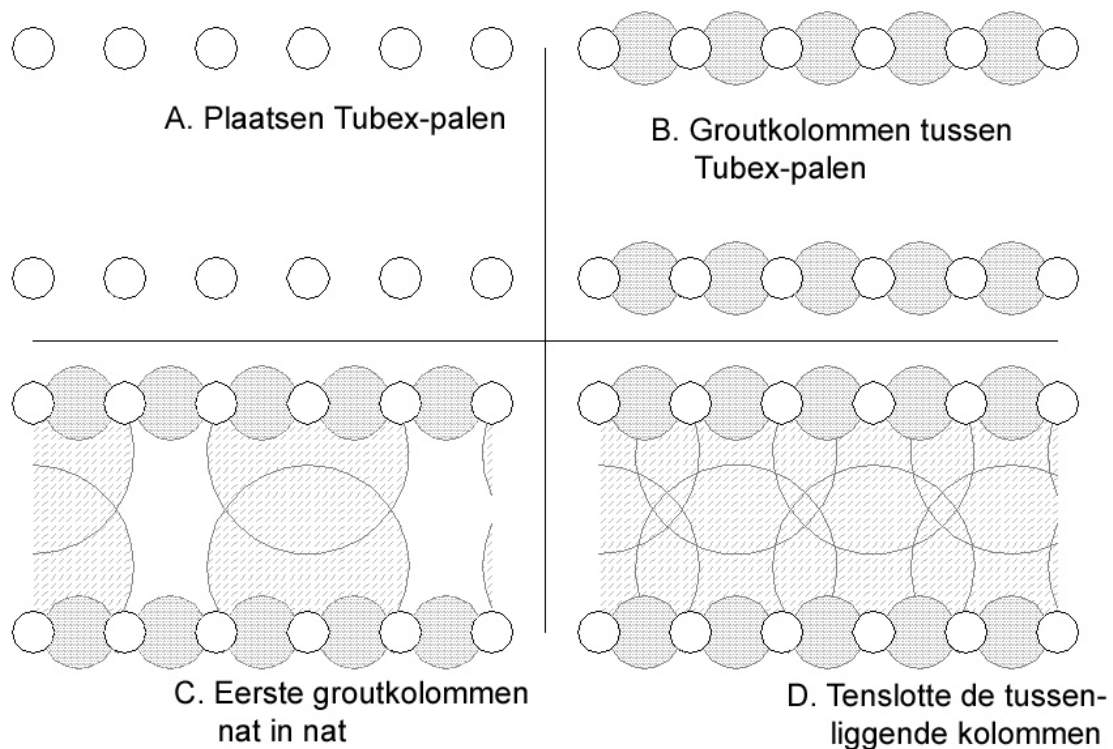
Daarnaast is bij de laatste twee stramienen aan de emplacement-zijde in het stationsgebouw de werkhoogte nog meer beperkt. Hier zullen de Tubex-palen in segmenten van 2 m aangebracht moeten worden. De kans op scheefstand is hierdoor groter, omdat er meer lasverbindingen nodig zijn om alle segmenten aan elkaar te koppelen.

5.2.5 Een groutlichaam in de sandwichwand

Algemeen

Nadat de Tubex-palen gerealiseerd zijn, wordt het groutlichaam tussen de twee rijen Tubex-palen geformeerd. Met behulp van een twee- of driefasensysteem (zie bijlage 3) worden deze kolommen gerealiseerd.

Als eerste worden er tussen de Tubex-palen in een rij, waar de palen h.o.h. 1 m staan, groutkolommen gemaakt van NAP –30 m tot maaiveld met een diameter van 800 mm in de rij aan de bouwkuipzijde. Aan de buitenzijde van de wand, dus niet aan de kuipzijde, worden deze kolommen tot NAP –26 m gemaakt. Vervolgens worden er tussen de rijen twee rijen groutkolommen, met een diameter van 2200 mm, “nat in nat” gemaakt tot een niveau van NAP – 30 m, zie ook figuur 5.2.



Figuur 5.2 Volgorde aanbrengen sandwichwand

Onzekerheden en ongewenste gebeurtenissen jetgrouten

Zoals eerder aangegeven in §4.5.2 bestaat er een aantal afwijkingen dat er voor kan zorgen dat de verschillende groutkolommen niet op elkaar aansluiten. (Van Riel, 2000) Deze afwijkingen zijn:

- Plaatsafwijkingen: Onnauwkeurige plaatsing van de lans bij het in de grond brengen van die lans;
- Scheefstand: Als de lans niet volledig verticaal, maar een klein beetje scheef, wordt ingebracht, zal de uiteindelijke locatie van de kolom afwijken van het ontwerp;
- Diameterafwijking: Bij kleine afwijkingen van de jetgroutparameters, zoals de treksnelheid, de druk en/of het debiet van het grout of grondeigenschappen, kunnen afwijkingen van de diameters van de verschillende kolommen optreden;
- Obstakels die de lans blokkeren en dus verhinderen dat deze op diepte komt, waardoor de groutkolom niet tot de gewenste diepte kan worden doorgezet of waardoor de lans verloopt. Obstakels kunnen zich ook in het groutlichaam bevinden, waardoor de jetstraal geblokkeerd wordt.

Door deze afwijkingen kunnen in een aantal situaties onvolkomenheden in de groutconstructie ontstaan:

- De kolommen sluiten niet op elkaar aan, bijvoorbeeld door te kleine diameters of de middelpunten van de kolommen zijn te ver van elkaar verwijderd;
- Schaduwwerking, d.w.z. dat er door te dicht grouten bij een al verharde kolom een gedeelte van de snijstraal geblokkeerd wordt. Bij de volgende kolom zal dit gebied ook niet behandeld worden en ontstaat er dus een verticaal gat. Dit geldt ook bij obstakels.
- Boring in een uitgeharde kolom. Door een te grote scheefstand of een te grote diameter van de uitgeharde kolom kan de boring in de uitgeharde kolom plaatsvinden.

Verder kan door menselijk falen een kolom "vergeten" worden om uit te voeren.

In het bovengenoemde artikel van Van Riel wordt er uitgegaan van een horizontale waterremmende laag van grout met beperkte hoogte. Het groutmassief in de sandwichwand heeft echter een hoogte van ca. 30 m en in deze hoogte bevinden zich verschillende grondlagen, zoals klei- en zandlagen. Hierdoor kan over de hoogte de grootte van de diameter van een enkele kolom ook variëren. Dit wordt veroorzaakt door variaties in treksnelheid en draaisnelheid van de groutlans en de druk van het groutmengsel in combinatie met een variërende grondsamenstelling, waardoor de weerstand voor de indringing van de snijstraal anders is. Diameterafwijkingen ontstaan wanneer de combinatie van de groutparameters (treksnelheid en rotatiesnelheid van de boorlans, de druk en het debiet van het grout) niet constant gehouden wordt. Tevens spelen de grondeigenschappen een grote rol bij de grootte van de diameter. Als in deze grondeigenschappen te veel onzekerheden zitten, worden de groutparameters niet goed vastgesteld en zal de grootte van de kolomdiameter niet goed zijn: te groot of te klein. Hierdoor kan als gevolg van variatie van grondeigenschappen de kolomdiameter over de hoogte variëren.

De grondparameters kunnen binnen een bepaald interval goed benaderd worden en kan het groutpatroon volgens specificaties binnen bepaalde toleranties gemaakt worden. Echter, bij de overgang tussen twee lagen zullen de grondparameters verlopen van de ene laag naar de andere. De hoogteligging van deze laagovergang is dus ook van belang om de juiste diametergrootte van de kolom te realiseren.

Volgens Van Riel [2000] gelden de volgende onzekerheden tijdens de realisatie van groutkolommen (kolom in homogene grond):

Afwijking	Verdeling	Gemiddelde	Standaard-deviatie
Plaatsingsafwijking [m]	Normaal	0,038	0,02
Hoek van plaatsingsafwijking in horizontaal vlak [rad]	Uniform	$0 - 2\pi$	
Scheefstand [rad]	Normaal	0,005	0,025
Hoek van de scheefstand in horizontaal vlak [rad]	Uniform	$0 - 2\pi$	
Diameter [m]	Normaal	Te kiezen	0,10

5.2.6 Onzekerheden en ongewenste gebeurtenissen sandwichwand

Voordat de sandwichwand zijn grond- en waterdichtheidsfuncties verliest door een lek in de sandwichwand zal er een legweg moeten ontstaan van de buitenzijde van de bouwkuip door de sandwichconstructie tot in de bouwkuip. De sandwichconstructie bestaat uit vier rijen grout, waarbij in de twee buitenste rijen ook Tubex-palen zijn opgenomen. Voordat er dus een lekweg ontstaat door de sandwichwand zal er in alle vier de rijen een gat aanwezig moeten zijn die op elkaar aansluiten. Als één enkele rij een gat bevat, betekent dit niet dat er direct een lekweg aanwezig is, zolang één van de overige groutrijen goed waterdicht afsluit. Er moet dus een lekweg door de vier rijen ontstaan voordat er kans is op grond- en/of waterstroming door de wand. Hierbij speelt de 3-dimensionale constructie een grote rol: verticale kanalen van niet aansluitende groutkolommen verbinden gaten in de sandwichwand op verschillende niveaus met elkaar.

Om een goede samenwerking tussen het grout en de Tubex-palen te verkrijgen, moeten, volgens het ontwerp, er hart op hart 250 mm stalen ringen op de buispalen gelast worden. Door onoplettendheid of verkeerde planning kan het gebeuren dat de ringen niet worden aangebracht.

Het is wenselijk dat een groutkolom in één keer gemaakt wordt, waardoor er onvolkomenheden in de kolommen worden voorkomen. Aan het onderbreken van het uitvoeringsproces kunnen een



aantal oorzaken ten grondslag liggen: mechanische storing van de groutmachine, metingen kunnen het noodzakelijk maken het werk kort stil te leggen en de aanvoer van water, grout en/of elektriciteit kan de uitvoering niet volgen.

Voordat het grout volledig verhard is, mag het niet wegspoelen. Dit kan gebeuren als er een potentiaalverschil van het grondwater langs de Tubex-paal ontstaat en het grondwater daadwerkelijk langs de paal gaat stromen. Als gevolg kunnen hierdoor lekwegen in de groutconstructie ontstaan.

Een belangrijk aandachtspunt in de voorbereiding is het verwijderen van de oude houten palenfundering van het stationsgebouw ter plaatse van de sandwichwand. Deze oude houten palen vormen een obstakel als zij nog aanwezig zijn, waardoor de groutkolommen niet goed aangebracht kunnen worden. Hierbij valt te denken aan schaduwwerking of de boorlans boort in de houten paal. Een Tubex-paal kan door de aanwezigheid van deze houten palen verlopen. Alle paallocaties zijn niet exact bekend, net als de stand van de paal. Hierdoor kan het gebeuren dat er een paal niet verwijderd wordt of dat een paal die op het eerste gezicht niet in het profiel van de sandwichwand staat door zijn scheefstand er juist wel in staat.

Daarnaast is het verwijderproces van deze houten palen een onzekere: de palen kunnen kapot zijn en gedeeltelijk achterblijven tijdens het trekken. Ook kan door de hoge kleefweerstand de paal niet te trekken zijn zonder een nadelige invloed op de omgeving te hebben.

Het navullen van het gat dat overblijft na het trekken van de houten palen moet zorgvuldig gebeuren: door een slechte navulling zijn de grondeigenschappen in het gat anders dan die van de omringende grond. Hierdoor kunnen de gestelde groutparameters niet toereikend zijn in de grondaanvulling zodanig dat de vereiste maattoleranties van de groutkolom niet gehaald worden en er dus een gat in het groutlichaam aanwezig is. Een slechte navulling brengt overigens ook grote onzekerheden voor de omgeving met zich mee: als het gat dat na het trekken van de houten paal (gedeeltelijk) instort, heeft dit zettingen tot gevolg. Aangezien de oude fundering van het station bestaat uit een gecombineerde houten paal-staal fundering beïnvloedt deze instorting de bestaande fundering negatief (ontspanning van de grond en deformaties) en kan het station vervormen.

5.3 Buispalenwand onder het emplacement

Onder de spoorbakken en de perrons ter plaatse van de Middentunnel bestaan de bouwkuipwanden uit stalen palen die onderling verbonden zijn met sloten. Dit in tegenstelling tot het besteksontwerp van deze bouwkuipwanden voor het emplacement waar de verbinding tussen de buispalen bestond uit een groutkolom. (§ 4.7 en §4.8)

5.3.1 Werking

Deze buispalenwand draagt dus de bovenbelasting vanuit het emplacement en gebouw IJ-zijde geconcentreerd af onder de perrons naar de draagkrachtige 3^e zandlaag met buispalen met de paalpunt op NAP – 66 m. Er is voor deze geconcentreerde afdracht gekozen, omdat een lijnvormige fundering, met de voet van de wand op NAP –30 m, onvoldoende bleek voor de grote verticale belastingen vanuit het emplacement. De wand kon dus niet zonder meer als de fundering voor onder andere het emplacement en de Middentunnel gebruikt worden.

Onder de spoorbakken worden er “korte” buispalen geplaatst, welke hun paalpunt op NAP – 30 m hebben. Deze lange en korte palen zullen worden gekoppeld door middel van een slotconstructie en op deze wijze een grond- en waterkerende constructie vormen en dus een horizontale kracht moeten weerstaan.

Via een systeem van primaire en secundaire balken worden de belastingen vanuit de bovenbouw afgedragen naar de lange buispalen. De primaire balken worden op de lange buispalen opgelegd en zullen hier tevens een horizontaal stempelende functie krijgen.

Ook de horizontale groutstempel op NAP – 20 m zal worden toegepast om de vervormingen van de wand en het achterliggende grondmassief te beperken.

De krachtswerking van deze buispalenwand is vergelijkbaar met die van combiwanden: Stijve buispalen met een relatief slappe verbinding tussen de buispalen moeten het grondwater en de grond keren.

5.3.2 Uitvoering

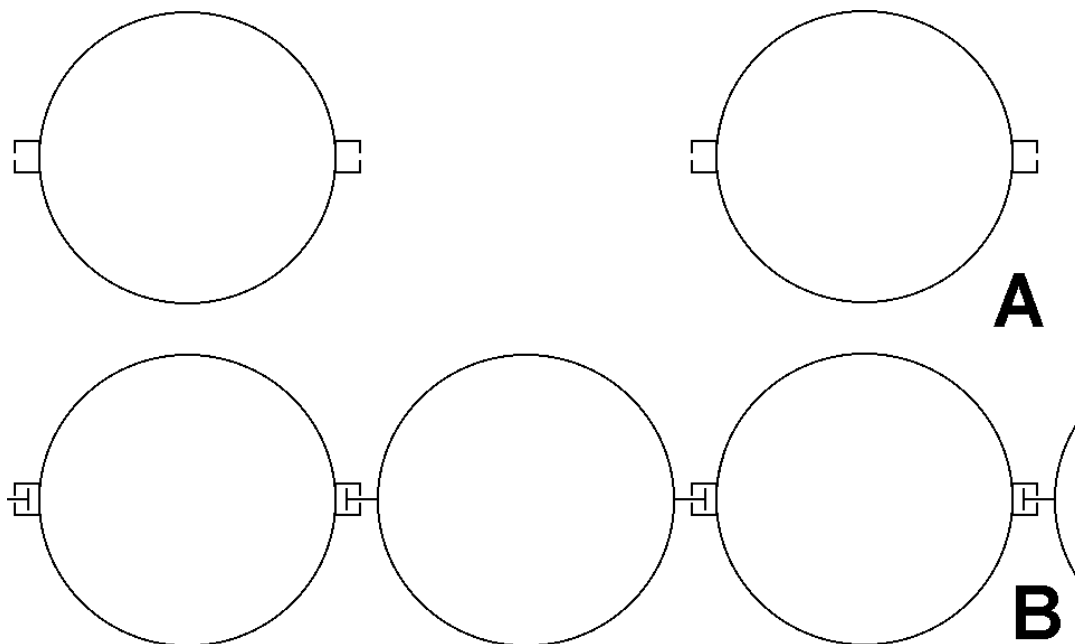
Zoals al eerder genoemd, zal er voor het op diepte brengen van de buispalenwand gebruik worden gemaakt van een schildboormachine. Deze schildboormachine zal verticaal worden geplaatst en onder de boorkop de grond verwijderen. Net boven de boorkop wordt de verwijderde grond in de spoelkamer in suspensie gebracht en vervolgens via leidingtransport naar het maaiveld gebracht. Tegelijk met het verwijderen van de grond wordt de buispaal naar beneden geduwd, totdat deze op diepte is. Vanwege de beperkte werkhoopte, zie ook §4.7.3 en §4.8, bestaat de buispaal uit segmenten van ca. 2 m lengte.

Slotconstructie

Voor een waterdichte afsluiting tussen de buispalen is er gezocht naar een slotconstructie, zoals dit principe ook wordt toegepast bij dam- en combiwanden. Gezien de dimensies van de twee te verbinden buispalen en het patroon waarin de buispalen geplaatst worden (h.o.h. 2,1 m), zijn de slotconstructies zoals die worden toegepast bij dam- en combiwanden, niet toepasbaar. Ook speelden de toleranties van het slot een grote rol bij de ontwikkeling ervan.

Uiteindelijk is er een slotconstructie dat in de uiteindelijke wandconstructie een afwijking van 60 mm in langsrichting kan opnemen en 30 mm in dwarsrichting. In bijlage 4 is de slotconstructie weergegeven zoals deze waarschijnlijk toegepast zal worden.

Bij het aanbrengen van de buispalen zullen eerst de vrouwelijke sloten worden geplaatst, waarna daartussen de buispalen met de mannelijke sloten worden geplaatst, zie figuur 5.3. De vrouwelijke sloten zijn aan de onderzijde afgedicht en aan de voorzijde afgedicht met een dunne strip, die er door het mannelijke slot weer afgedrukt wordt tijdens het inbrengen.



Figuur 5.3 Aanbreng volgorde buispalen

A: Eerst buispalen plaatsen met "vrouwelijke" sloten

B: Vervolgens daartussen mannelijke sloten



5.3.3 Onzekerheden en onverwachte gebeurtenissen

De risico's die uit dit ontwerp voortvloeien berusten voor een groot gedeelte op de slotconstructie; dit is immers het element dat de grond- en waterdichte verbinding tussen de buispalen verzorgt. De slotconstructie moet dus de grond- en waterdichte verbinding tussen de buispalen vormen. Dit kan alleen als de slotconstructie niet van de buispaal loslaat of de twee aansluitende delen niet "uit elkaar gaan lopen" en dus geen onderlinge verbinding hebben. Om te voorkomen dat er te veel spanningen gaan optreden in de slotconstructie zullen de twee aanliggende buispalen voldoende dicht bij elkaar op diepte moeten komen en niet te veel onderlinge afwijkende plaatsing mogen hebben.

Een buispaal kan op een aantal manieren niet op de theoretische plaats terechtkomen:

- Plaatsafwijking: de plaats waar de buispaal ingebracht wordt, heeft een plaatsafwijking. Deze inbrenglocatie is dus niet voldoende nauwkeurig of slecht ingemeten.
- Scheefstand. De theoretische verticaliteit tijdens het inbrengen wijkt af: de buispaal wordt niet volledig verticaal ingebracht, maar heeft een hoekafwijking. Deze hoekafwijking kan overigens in alle richtingen in het horizontale vlak plaatsvinden. Deze hoekafwijkingen kan een aantal oorzaken hebben, zoals:
 - de scheefstand tijdens het inbrengen;
 - afwijkingen in de grondgesteldheid, waardoor de wrijving aan de ene zijde van de buispaal groter is dan de andere, waardoor de buispaal de neiging heeft de zijde met minste weerstand te zoeken en op deze manier een scheefstand oploopt;
 - een obstakel in de grond zorgt voor afketsing of afbuiging van de buispaal;
 - de verschillende segmenten zijn niet voldoende verticaal gelast, waardoor er dus een "knik" in de buispaal komt;
 - het niet kunnen wegboren van de grond, waardoor de buispaal zal
- Als de buispaal niet op diepte komt, is er natuurlijk ook geen wandelement aanwezig op theoretische paalpuntniveau, en is daar dus geen grond- en waterdichte constructie aanwezig. Dit kan veroorzaakt worden door o.a. te veel weerstand langs de paalschacht en door een obstakel in de ondergrond. Ook het slot dat zich buiten de oversnijding bevindt, geeft een extra weerstand.
Door de vervormingen kunnen de mannelijke en vrouwelijke slotdelen tegen elkaar gaan lopen, waardoor er slotwrijving wordt opgewekt. Het vrouwelijke slot is echter geïnjecteerd met een smering, waardoor deze wrijvingsweerstand lager wordt.
Als de grond niet weg geboord kan worden, zal de buispaal ook niet verder op diepte kunnen komen. Dit kan veroorzaakt worden door een grotere slijtage van de boortanden of door de samenstelling van de ondergrond, als die geheel anders is dan verwacht.

Een kleine plaatsafwijking heeft overigens pas gevolgen als de maattoleranties van de slotconstructie overschreden worden in combinatie met de aanliggende buispaal: als beide buispalen op een bepaalde diepte elk x mm in dwarsrichting van de wand een afwijking hebben, is de werkelijke onderlinge plaats gelijk aan de theoretische onderlinge plaats en blijft het slot functioneren.

De slotconstructie kan zijn functie dus verliezen als de buispalen een onderlinge plaatsafwijking hebben groter dan die toegestaan is dan volgens de toleranties van de constructie van het slot.

Slotconstructie

De slotconstructie is zo ontworpen, dat in langsrichting er een afwijking van zo'n 60 mm opgenomen kan worden in beide richtingen. In dwarsrichting is het ontwerp van het slot echter minder tolerant, hier kan slechts 30 mm opgenomen worden, zonder dat dit consequenties heeft voor de functies van het slot. (Zie bijlage 4) Is deze afwijking groter, dan bestaat de kans dat de slotconstructie open buigt en dus ruimte biedt voor een lekweg van water en grond.

Door het verschil in dimensies en stijfheden van de buispalen en de slotconstructie zal het slot altijd de beweging van de buispaal willen volgen: het slot heeft dus geen geleidende functie. Een onderlinge afwijking tussen de twee buispalen zal het tussenliggende slot dus een vervorming willen opleggen.

Als de plaatsafwijking ten opzichte van de twee buispalen onderling in dwarsrichting groter is dan de toegestane toleranties in het slot zal of één van de zijden van het “moeder”-stuk weg buigen, of er ontstaat een rotatie of zelfs een plastisch scharnier in het “mannelijke” gedeelte van het slot, met een mogelijke lekkage van water en/of grond tot gevolg.

Tijdens de inbreng bestaat de mogelijkheid, dat de buispaal een klein beetje roteert. Hierdoor zal de bevestiging van het slot ook roteren om de buispaal-as en dus verplaatsen ten opzichte van de theoretische plaats.

5.4 Aansluitingen

5.4.1 Damwand bij diepwand voorplein

Aan de zijde van het voorplein sluit de bouwkuip onder het station aan op de “diepe bouwput”. Dit is de bouwkuip gemaakt met diepwanden op het voorplein waarin het metrostation en de verdeelhallen worden gemaakt, zie ook §4.6.

De risico's die voortvloeien uit dit ontwerp en de uitvoering van de aansluiting tussen het zinkelement en de diepwandconstructie worden in deze risicoanalyse buiten beschouwing gelaten, zie ook §4.14.

De aansluiting tussen deze constructie en de sandwichwand zal echter wel worden meegenomen in deze risicoanalyse: het groutlichaam dat moet aansluiten op de tijdelijke damwand. Aan de kop van de sandwichwand aan voorpleinzijde wordt er met behulp van damwanden een kopscherm gemaakt, die onderdeel zal zijn van de damwandconstructie tussen het voorplein enerzijds en de zinksleuf anderzijds onder het stationsgebouw. Dit kopscherm zal haaks staan op de sandwichwand.

Als eerste zullen ter plaatse de aansluiting de Tubex-palen van de sandwichwand gemaakt worden, waarna het kopscherm geplaatst kan worden. De gehele tijdelijke damwand zal worden aangebracht in van tevoren aangebrachte bentoniet-kolommen. Hiermee wordt voorkomen dat de damwanden in de grond getrild hoeven te worden. Op deze wijze wordt de trillingshinder geminimaliseerd. Als de damwand en de Tubex-palen onder het stationsgebouw gereed zijn, kan worden aangevangen met het jet-grouten van het groutlichaam.

Onzekerheden en ongewenste gebeurtenissen

Plaatsonzekerheden van de kopschermen, Tubex-palen en jetgroutkolommen kunnen de water- en grond dichtheidseisen in gevaar brengen, naast de onzekerheden in dimensies van de groutkolommen, zie ook de vorige paragrafen.

Daarnaast spelen er hier nog een aantal specifieke onzekerheden mee:

Door aanwezigheid van de bentonietkolommen is de grond die geïnjecteerd wordt met het jet-groutsysteem niet homogeen. De aanwezigheid van de bentoniet-kolommen zorgt echter voor verschillende eigenschappen voor het jet-grouten in het horizontale vlak, waardoor de kans bestaat dat het kopscherm niet aangestraald wordt. Dit kan tot gevolg hebben dat er een lekweg ontstaat tussen damwand en het groutlichaam.

De geometrie van de damwand en het groutpatroon kunnen aanleiding geven tot schaduwwerking. Hierdoor zullen er discontinuïteiten ontstaan in de groutconstructie en kan het

dus gebeuren dat er een lek ontstaat in de aansluiting tussen sandwichwand en de tijdelijke damwand.

5.4.2 Aansluiting buispalenwand – sandwichwand

De verbinding tussen de sandwichwand, die zich onder het monumentale stationsgebouw bevindt, en de buispalenwand, onder het emplacement, komt als volgt tot stand:

Eerst worden de Tubex-palen van de sandwichwand geplaatst, waarna de eerste buispaal wordt geplaatst. Als deze stalen elementen zijn geplaatst, kan de productie van het aansluitende groutlichaam plaatsvinden.

Onzekerheden en ongewenste gebeurtenissen

Naast de onzekerheden van de Tubex-palen, het groutlichaam en de buispalen die met de microtunnellingstechniek op diepte worden gebracht zal de aansluiting van het groutlichaam aan de grote buispalen een bron van onzekerheid zijn, aangezien er om de buispalen een smeermiddel in de oversnijding aanwezig is. Dit smeermiddel wordt wel vervangen door grout, maar hier speelt de aanhechting tussen het grout en de kale buispaal dus een belangrijke rol, met name gelet op waterremmendheid.

Daarnaast speelt de doorbuiging tussen de twee wandsystemen nog een rol. Door verschillende stijfheden van de twee wandsystemen en het feit dat er bij de sandwichwand op NAP –4,5 m een extra stempeling wordt toegepast en dit niet bij de buispalenwand aanwezig is, zal het vervormingsgedrag van de twee wanden verschillen. Door deze verschillende stijfheden en vervormingen kan er in het groutlichaam een trekspanning ontstaan, wat de groutconstructie niet kan opnemen en dus scheurvorming kan veroorzaken. Juist deze scheuren kunnen een kanaal gaan vormen, waardoor er een lekgeweg in de wand ontstaat en zo dus de grond- en waterdichtheid van de wand bedreigt.

5.4.3 Aansluiting Buispalenwand – Combiwand

Ter plaatse van de achtergevel van het station, aan de De Ruijterkade, eindigt de buispalenwand. De zinksleuf ter plaatse van de De Ruijterkade wordt verticaal begrensd door een combiwand, zie ook §4.10.

Om onder het emplacement te kunnen ontgraven, wordt er ter plaatse van de achtergevel van het station, aan de De Ruijterkade, een tijdelijke damwand geplaatst. Deze damwand heeft een inbrengdiepte van ca. 15 m en heeft daarmee zijn voet in de IJ-klei. Deze wand moet zorgen voor een waterdichte afdichting tussen enerzijds de zinksleuf onder het stationsgebouw en emplacement, en anderzijds de zinksleuf bij de De Ruijterkade tussen de combiwanden tijdens het droog ontgraven onder het station.

Als combiwanden van de zinksleuf ter plaatse van de De Ruijterkade gereed zijn, wordt deze zinksleuf gedeeltelijk ontgraven (tot NAP –14 m) en tegelijkertijd wordt de hierboven genoemde tijdelijke damwand verwijderd en wordt de zinksleuf onder het station nat ontgraven tot NAP –14 m.

Vervolgens zal de volledige zinksleuf, zowel onder het stationsgebouw als onder het emplacement en ter plaatse van de De Ruijterkade, worden ontgraven tot de gewenste diepte voor het afzinken. Ter plaatse van de De Ruijterkade zal er een onderwaterbetonvloer aangebracht worden voor het maken van een droge bouwkuip voor het maken van de verdeelhallen, het metrostation en de autotunnel.

De combiwand zal in deze risicoanalyse niet behandeld worden, aangezien deze geen onderdeel uitmaakt van de bouwkuip onder het station (wel van de zinksleuf). De overgang van buispalenwand naar combiwand en de bijbehorende overgang van bouwkuipen zal wel belicht worden.

Onzekerheden en ongewenste gebeurtenissen

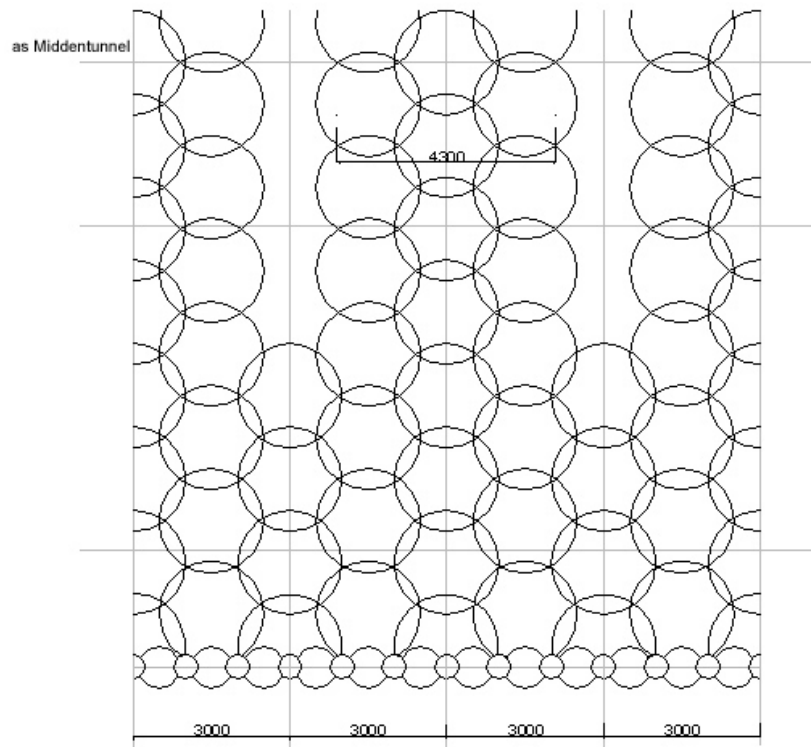
Mocht de damwand uit het slot lopen, dan zal de waterdichtheid tussen de twee bouwkuipen niet voldoende zijn om de waterstand in de bouwkuip onder het station tot NAP – 5,5 m te verlagen om droog te kunnen ontgraven. Verder zal de aansluiting tussen damwand en de buispalenwand, zowel de damwand benodigd om de bouwkuip onder het station droog te ontgraven, als de damwand met de voet op NAP –30 m, die tijdens het transport- en afzinkproces gebruikt wordt als waterkerend element, aandacht vragen, aangezien hier twee verschillende kerende wanden met verschillende eigenschappen moeten aansluiten onder verschillende belastingcombinaties tijdens verschillende faseringen.

Naast deze onzekerheden kan de damwand natuurlijk niet op diepte komen door onverwacht verhoogde wrijving van de grond of een obstakel.

5.4.4 Een stempel van grout

Het benodigde ontgravingsniveau dat nodig is om het tunnelelement te kunnen plaatsen op de juiste locatie ligt op NAP – 17,6 m. Tijdens de ontgraving heeft de wand en de achterliggende grond echter onvoldoende stijfheid en sterkte om de horizontale vervormingen van de wand op te kunnen vangen. Deze horizontale vervormingen dienen beperkt te worden om de grondverplaatsingen achter de wand (buiten de bouwkuip), die kunnen leiden tot zakking van het maaiveld en dus vervormingen en zettingen van het stationsgebouw en emplacement, te minimaliseren.

Om de horizontale stijfheid en sterkte te verhogen, zullen er horizontale stempels worden toegepast. Boven aan de bouwkuipwanden worden deze wanden horizontaal gesteund door de tafelconstructie met behulp van voorgespannen betonnen balken. Met deze horizontale stempeling is de wand echter nog niet voldoende gesteund. De toepassing van horizontale stempels in de bouwkuip is echter niet mogelijk op alle niveaus: het tunnelelement moet immers ingevaren worden en worden afgezonden in de bouwkuip. Daarom wordt er gekozen om onder het benodigde ontgravingsniveau een horizontaal stempel te maken. Dit horizontaal stempel moet echter al worden aangebracht alvorens er nat ontgraven wordt om de vervormingen van de



Figuur 5.4 Patroon groutstempel onder stationsgebouw



bouwkuipwanden te beperken. Er is daarom gekozen om dit horizontaal stempel aan te brengen door middel van de jetgrout-techniek tussen NAP –20 m en NAP –21,75 m, waarbij het twee- of driefasensysteem (zie bijlage 3) gehanteerd dient te worden. Dit groutstempel wordt na het droog ontgraven van de bouwkuip aangebracht vanaf de ontgravingsniveaus van het droog ontgraven: NAP –5 m onder het stationsgebouw en NAP –4 m onder het emplacement.

De functie van deze jetgrout-laag is enkel een horizontaal steunende functie en dient niet om opbarsten van de bouwkuipvloer te voorkomen: de horizontale afdichting wordt verzorgd door de Eemklei, die zich tussen NAP –28 m en NAP –45 m bevindt, en waar de bouwkuipwand insteekt tot NAP –30 m. Om deze reden is er voor gekozen om het groutstempel geen verticaal dragende functie te geven en mag er dus geen opbouw van waterspanningen onder het groutstempel ontstaan. De geometrie van het groutstempel is ook zodanig dat dit niet zou mogen gebeuren: er zijn openingen in gelaten, zie figuur 5.4.

Risico's voor het stempel

Hier spelen ook de risico's die zijn genoemd bij het groutlichaam in de sandwichwand:

- Plaatsafwijking
- Scheefstand
- Diametrafwijking

Als gevolg hiervan kunnen aan aantal onvolkomenheden in de groutconstructie, dus tussen de verschillende kolommen, voorkomen:

- Kolommen sluiten niet op elkaar aan
- Schaduwwerking
- Boring in uitgeharde kolom

Daarnaast speelt menselijk falen, m.a.w. er wordt een kolom vergeten, nog een rol, zeker omdat er geen visuele controle op de aanwezigheid van de kolommen, die zich tussen NAP –20 m en NAP –21,75 m bevinden die worden aangebracht vanaf het droge ontgravingsniveau op NAP –5 m. De belemmering van de uitvoering door obstakels en oude funderingsresten, zowel voor de boorlans als voor de groutkolom zelf, moet ook niet uit het oog worden verloren.

Voor de stempelfunctie is het van belang dat de kolommen aansluiten en dat er geen onverwachte spanningsverhogingen in het materiaal kunnen optreden. Als er tussen de groutkolommen geen aansluiting is, betekent dit een verlaging van het oppervlak (A) en van het weerstandsmoment (W) van de groutstempel in die doorsnede. Aangezien de normaalkracht (N) en het moment (M) die op de stempel werken, door externe invloeden bepaald worden en dus niet veranderen door een gewijzigde geometrie, zal de spanning in de doorsnede toenemen:

$$\sigma = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{W}$$

Als deze spanning hoger wordt dan de maximaal toegestane spanning in het materiaal, kan de stempel bezwijken.

Tijdens de uitvoering kan een kolom te hoog worden doorgezet, of door een lekweg kan er een uitloper van het grout ontstaan, welke hinder kan opleveren tijdens het ontgraven en het afzinkproces.

Door een (plaatselijk) veranderde geometrie, ook in hoogteligging, kunnen ook excentriciteiten in de constructie ontstaan, waardoor er dus een extra momentbelasting in de groutstempel wordt geïnitieerd en er dus een veranderde spanningsverdeling, waaronder spanningsconcentratie, in de constructie ontstaat dan dat van tevoren verondersteld was.

Zwelbelasting van het onderliggende grondmassief, waaronder de Eemklei, kan een onverwacht grote verticale belasting op het groutstempel uitoefenen en kan de groutstempel omhoog willen duwen. Omdat de aansluiting met de buispalenwand niet veel schuifweerstand over kan brengen, kan het groutstempel zijn functie verliezen en zal de bouwkuipwand gaan vervormen.

5.4.5 Horizontale afsluiting onderzijde bouwkuip

De bouwkuip wordt aan de onderzijde afgesloten door een kleilaag: de Eemklei. Hiertoe wordt, zoals al eerder genoemd, de voet van de bouwkuipwanden op NAP – 30 m gezet. De bovenzijde van de Eemklei-laag varieert tussen NAP – 28 m en NAP – 29 m ter plaatse van de bouwkuipwanden. Hierdoor staan de bouwkuipwanden minimaal 1 m in de klei.

Mocht er echter door een uitvoeringsfout of een lokale verlaging van de kleilaag geen waterdichte afsluiting aanwezig zijn, kan dit een groot lek betekenen.

In de fase tijdens het droog ontgraven is er een groot verschil in stijghoogte tussen binnen en buiten de bouwkuip; in de bouwkuip wordt de waterstand wordt verlaagd tot NAP –5,5 m en er heerst een stijghoogte van NAP –1,5 m in het zandpakket tussen de IJ-klei en de Eemklei.

Hierdoor zou het stijghoogteverschil 4 m zijn. Het ontgravingsniveau is echter op dat moment NAP –5 m onder het stationsgebouw en NAP –4 m onder het emplacement. Aangezien er tussen NAP – 5 m en NAP – 15 m ter plaatse van het stationsgebouw en tussen NAP – 10 m en NAP – 20 m onder het emplacement slecht doorlatende lagen (IJ-klei en zandige klei) aanwezig zijn, zal de stijghoogte in het onderliggende zandpakket (NAP –1,5 m) in de bouwkuip niet veranderen in deze fase. Er is dus tijdens het droog ontgraven geen stijghoogteverschil tussen binnen en buiten de kuip bij de voet van de wand zijn. Het grondwater zal dan niet willen gaan stromen. Immers, volgens Darcy wordt een (grond)waterstroming veroorzaakt door een verhang van de grondwaterstand:

$$Q = k_v \cdot A \cdot i = k_v \cdot A \cdot \frac{\Delta H}{L}$$

$$\Delta H = 0 \text{ m} \Rightarrow Q = 0 \text{ m}^3 / \text{s}$$

Hierbij is	Q	debiet van de waterstroom in m^3/s
	k_v	de doorlatendheidscoëfficiënt van het grondpakket, in m/s
	A	het oppervlak waar het water door stroomt
	i	verhang, dimensieloos, gelijk aan $\Delta H/L$
	ΔH	het stijghoogteverschil, m
	L	de afstand waarover het stijghoogteverschil werkt, in m

In een volgende fase, het nat ontgraven, wordt de waterstand in de bouwkuip weer iets verhoogd tot NAP – 3,0 m en wordt er ontgraven tot NAP –17,6 m. De slecht doorlatende lagen in de bouwkuip, behalve de Eemklei vanaf NAP –28 m aanwezig is, zijn nu verwijderd en heerst er dus in de gehele bouwkuip een stijghoogte van NAP –3,0 m. Aangezien de voet van de wand minimaal 1 m in de Eemklei staat, is er een voldoende waterafdichting aan de onderzijde van de bouwkuip.

5.5 Ongewenste gebeurtenissen onder Amsterdam CS

Een aantal gebeurtenissen kunnen zeer kwalijke gevolgen hebben voor het Amsterdam Centraal Station hebben:

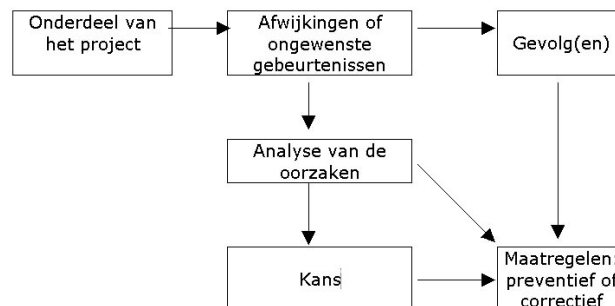
- De bouwkuip is niet stabiel. Dit geldt zowel voor de wanden als voor de horizontale afsluiting;
- Het waterbezwaar tijdens de verschillende waterstandsverlagingen (NAP – 5,5 m voor het droog ontgraven, NAP –3 m tijdens nat ontgraven en NAP –1,5 m tijdens het invaren van het element) is te groot. Dit kan nog een aantal gevolgen met zich meedragen:
 - Door het op niveau houden van de waterstand in de bouwkuip, wordt er veel water uit de omgeving onttrokken, waardoor er een grondwaterstandverlaging in de nabije omgeving ontstaat. Aangezien het stationsgebouw een gecombineerde staal-paal fundering is, kan het stationsgebouw gaan zinken en vervormen. Dit geldt ook voor het emplacement met zijn sporen, perrons en kapschermen;

- Als er water met voldoende snelheid door de wand gaat, bijvoorbeeld omdat er een opening of een gat in de wand aanwezig is, kan deze waterstroom zandvoerend worden en verplaatst zand van achter de bouwkuipwanden zich naar de bouwkuip en zal het maaiveld achter de bouwkuipwand gaan zetten. Dit heeft wederom nadelige gevolgen voor het station;
- Door het ontgraven van de bouwkuip worden de onderliggende grondpakketten ontlast, waardoor deze in volume willen toenemen. De bouwkuipconstructie zal dan omhoog gericht worden belast: zwelbelasting. Door verschillende effecten kunnen een aantal gebeurtenissen optreden:
 - De vloer van de bouwkuip wil omhoog komen;
 - Op de groutstempel grijpt een verticaal, omhoog gerichte belasting aan. Deze kan groter zijn dan verwacht;
 - De bouwkuipwanden willen omhoog doordat de wandvoet omhoog wordt geduwd, of door kleeft van de rijzende bodem op de paalschacht. Dit kan veroorzaakt worden door rijzing van het achterliggende grondmassief of van de grond in de bouwkuip;
 - Bij rijzing van het achterliggende grondmassief zal tevens het buiten de bouwkuip gelegen maaiveld omhoog willen komen. Hierdoor bestaat er een bedreiging voor het stationsgebouw en het emplacement. Bij ongelijkmatige zettingen kunnen deze nog worden gecompenseerd door die gezette gedeelten te vizelen, maar bij een rijzing is dit ingewikkelder, waarbij gedeelten van het station in één keer gevizeld zouden moeten worden.

5.6 Risicodossier

De hierboven beschreven risico's zijn allen vastgelegd in het risicodossier, zie bijlage 5.

Het risicodossier is ontstaan na analyse van het systeem, door interviews met deskundigen en betrokkenen en door brainstormsessies op de basis van *Failure Modes and Effects Analyse*-technieken (FMEA). Middels deze kwalitatieve analyse worden de bedreigingen voor de verschillende onderdelen van het project Metrostation CS geïdentificeerd. Via het hieronder afgebeelde schema worden afwijkingen en ongewenste gebeurtenissen vastgesteld via een oorzaak → afwijking → gevolg vastgesteld. Vervolgens kan op basis van de oorzaken de kans op optreden van deze afwijking worden vastgesteld.



Figuur 5.5 Schema FMEA

Nadat de vaststelling van de gevolgen plaats heeft gevonden, wordt er geïnventariseerd wat dit betekent voor de beheersaspecten tijd (T) en kosten (K). Tijdens de inschatting van de kans en gevolgen worden de volgende klassenindelingen gehanteerd om een kwalitatieve waarde aan dit risico te kunnen geven:

P	Kans van optreden	K	Gevolgen voor kosten in euro	T	Gevolgen voor tijd
0	Geen	0	Geen	0	Geen
1	0.1% (zeer klein)	1	< 25.000 (zeer klein)	1	Dagen (zeer klein)
2	1.0% (klein)	2	25.000 – 50.000 (vrij klein)	2	Weken (klein)
3	10% (gemiddeld)	3	50.000 – 100.000 (klein)	3	< 1 maand (gemiddeld)
4	25% (groot)	4	100.000 – 500.000 (gemiddeld)	4	1-3 maanden (redelijk groot)
5	50% (zeer groot)	5	500.000 – 1.500.000 (redelijk groot)	5	4-6 maanden (groot)
		6	1.500.000 - 5.000.000 (groot)	6	> 6 maanden (zeer groot)
		7	> 5.000.000 (zeer groot)		

Tabel 6.1 Klassenindelingen kans, kosten en tijd (pKT)

Tenslotte kan er aangegeven worden welke maatregelen genomen zouden kunnen worden om het risico vooraf (preventief) te beperken of vooral de gevolgen na het optreden van de ongewenste gebeurtenis te minimaliseren (correctief).

In het risicodossier staan de risico's opgesomd, zonder dat er direct enige samenhang te ontdekken is. Om inzicht te krijgen in de verschillende mechanismen die het project kunnen bedriegen, zal er in het volgende hoofdstuk een boomstructuur weergegeven worden, waarin duidelijk wordt hoe de verschillende risico's bijdragen aan het risicoprofiel. Het vaststellen van de kansen is, ondanks dat deze op ervaring en kennis van het systeem, subjectief vastgesteld aan de hand van bovenstaande in bovenstaande klassen. Het vaststellen van de kans van optreden zou beter kunnen gebeuren op basis van fysische achtergronden, zodat er meer inzicht is in de daadwerkelijke oorzaken, zoals bijvoorbeeld de bodemgesteldheid. Daarom zal er in hoofdstuk 7 een model voor het niet aansluiten van de sloten van de buispalenwand worden opgesteld, zodat de kans op lekkages als gevolg van niet aansluitende sloten bepaald kan worden.

Hoofdstuk 6 Risicomodel

In het vorige hoofdstuk zijn een groot aantal bedreigingen genoemd voor het overschrijden van het gestelde budget en de gestelde tijdslimiet waarin de bouwkuip onder het Amsterdam Centraal Station ten behoeve van het project “Metrostation CS” gereed dient komen. Deze bedreigingen zijn vastgelegd in het risicodossier van het project (zie bijlage 5). Deze bedreigingen zijn nog niet gestructureerd en is er dus geen inzicht waar het grootste risico vandaan kan komen. In dit hoofdstuk worden de relaties tussen deze verschillende bedreigingen en onzekerheden getracht inzichtelijk te maken.

6.1 *Risico*

Zoals als eerder gesteld in hoofdstuk twee is risico een functie van kans en gevolg. Tijdens de uitvoering worden de volgende aspecten zo goed mogelijk beheerst om tot een goed eindresultaat te komen:

- Kosten;
- Tijd;
- Veiligheid voor zowel eigen mensen als voor derden;
- Kwaliteit van het geleverde product.

Om tot een eenduidig risicoprofiel te komen, zal dit risico uitgedrukt moeten worden in één eenheid. Dit voorkomt dat er met meerdere “maten gemeten” wordt. Aangezien een langere tijdsduur benodigd voor de uitvoering meer kosten met zich mee brengt, zoals een langere huur van de keet en personeel dient gedurende een langere tijd ingezet te worden, kan de factor tijd worden uitgedrukt in een hoeveelheid geld.

Tijdens de uitvoering worden onvoldoende veiligheid en onvoldoende kwaliteit niet geaccepteerd. Mochten deze aspecten niet voldoende zijn, dan zullen er maatregelen genomen moeten worden om wel voldoende veiligheid en voldoende kwaliteit te leveren. Deze maatregelen vergen tijd en geld. Onvoldoende veiligheid en onvoldoende kwaliteit worden op deze wijze vertaald naar tijd en geld.

Het risico zal dus via tijd en kosten worden uitgedrukt in de overschrijding van het gestelde budget.

6.2 *Modelleren relaties*

Om de relaties te modelleren zal er gebruik worden gemaakt van een boomstructuur: hierin worden alle bijdragen tot de mogelijke overschrijding van de kosten door ongewenste gebeurtenissen en onzekerheden weergegeven met daarin hun onderlinge relaties en hoe zij hieraan bijdragen.

Bekende voorbeelden van een dergelijke structuur zijn de foutenboom en de gebeurtenissenboom. De gebeurtenissenboom is een hulpmiddel bij het analyseren van de reactie van een systeem op één gebeurtenis. Een foutenboom geeft de logische opeenvolging van alle gebeurtenissen die leiden tot één ongewenste gebeurtenis, de topgebeurtenis [CUR190, 1997].

De gebeurtenissenboom lijkt in dit geval niet toepasbaar: de relatie tussen de verschillende ongewenste gebeurtenissen die leiden tot meer (uitvoerings)kosten dient onderzocht te worden, niet de reacties van het systeem op één gebeurtenis.

De foutenboom lijkt in eerste instantie meer geschikt. De foutenboom geeft een logische opeenvolging van alle gebeurtenissen die leiden tot de ongewenste topgebeurtenis. Deze topgebeurtenis staat boven in de boom. De gebeurtenissen die falen kunnen inleiden zijn de basisgebeurtenissen. Een aantal basisgebeurtenissen kan onder een bepaalde conditie leiden tot een samengestelde gebeurtenis, die op zijn beurt ook weer kan leiden tot een samengestelde gebeurtenis op een hoger niveau, totdat dit leidt tot de topgebeurtenis.

In een foutenboom wordt in het algemeen gewerkt met de faalkans van elementen en subsystemen. Dit is in dit geval niet van toepassing omdat aan de verschillende ongewenste gebeurtenissen een kans (P), kosten (K) en tijd (T) gekoppeld zijn. Niet altijd zijn de onderliggende gebeurtenissen van een samengestelde gebeurtenis te vertalen naar deze samengestelde gebeurtenis.

Daarnaast geeft de foutenboom een toestand aan van wel of niet falen. Gevolgen van het falen van een subsysteem kan niet als een continue stochastische variabele worden meegenomen in de beschouwing [CUR190, 1997]. De cause consequence combineert de fouten- en gebeurtenissenboom, maar heeft toch nog beperkingen betreffende de continu verdeelde gevolgen. Ook geeft deze structuur de reacties van het systeem weer op één gebeurtenis.

Het gestructureerde model zal een variant zijn op de foutenboom. Deze boomstructuur dient alleen om de onderlinge relaties tussen de risico's weer te geven. Tevens kan de invloed van verschillende basisgebeurtenissen op verschillende subsystemen en gebeurtenisketens aangegeven worden. De conditie voor de samengestelde gebeurtenis kan weergegeven worden waar dat mogelijk is, maar dit zal niet altijd het geval zijn.

Met behulp van een niveau III methode-berekening (CUR190), kunnen de gevolgen als een continue stochastische verdeling worden weergegeven. In dit geval zal er gebruik worden gemaakt van een Monte Carlo simulatie.

De Monte Carlo simulatie maakt gebruik van de mogelijkheid om een random getal te trekken uit een uniforme verdeling. [CUR190, 1997]. Met behulp van dit random getal kan er uit de gedefinieerde kansverdelingen van de gemodelleerde gebeurtenissen binnen het model een getal worden getrokken. Door voor alle gemodelleerde gebeurtenissen op deze manier een getal te trekken en alle uitkomsten van deze gemodelleerde gebeurtenissen te sommeren, wordt er een uitkomst verkregen voor één simulatie van het totale model. Door vele malen het model te simuleren wordt er een dataset ontwikkeld van de mogelijke uitkomsten van het model en met behulp van deze dataset kan er een kansverdeling en een risicoprofiel voor het model bepaald worden.

6.3 Functie van het boommodel

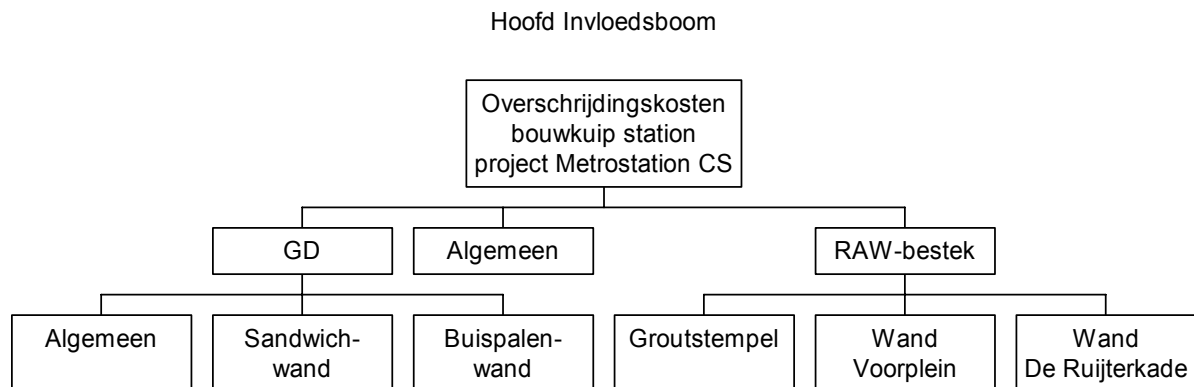
Het model zal de relaties tussen de verschillende bedreigingen voor de kosten en de tijd van het project weergeven. Aangezien de tijd te vertalen is in geld, zal, in analogie met de foutenboom, de topgebeurtenis “de overschrijdingskosten van het realiseren van de bouwkuipwanden onder het Amsterdam Centraal Station” moeten weergeven.

De boomstructuur heeft dus als doel de invloed weer te geven van een ongewenste of onzekere gebeurtenis op de overschrijdingskosten. Deze boomstructuur zal daarom in het vervolg de invloedsboom genoemd worden.

6.4 Modellerings

Het systeem “bouwkuip onder Amsterdam Centraal” bestaat uit verschillende subsystemen, die elk gerealiseerd dienen te worden binnen de gestelde begroting en planning. . De gebeurtenissen die kunnen bijdragen aan de topgebeurtenis zullen dan ook per subsysteem uitgewerkt worden. Overigens bestaat er een tweedeling in deze subsystemen: een aantal subsystemen worden volgens het RAW-bestek uitgevoerd en een ander deel vanuit het Gemeenschappelijk Domein.

Deze indeling heeft invloed op de risicoverdeling tussen opdrachtgever en –nemer. De hoofdinvoedsboom ziet er als volgt uit:



Figuur 6.1 Hoofdinvoedsboom

Ontwerprisico's zijn in de ontwerpfase uitvoerig behandeld. Het overgrote gedeelte van het ontwerp is gemaakt volgens geldende normen en richtlijnen, en is er dus voldoende veiligheid aanwezig bij deze onderdelen. De uitvoeringsrisico's zijn niet voldoende in belicht in de ontwerpanalyses.

De bedreigingen voor elementen binnen het systeem die volgens de geldende normen en richtlijnen voldoende betrouwbaar ontworpen zijn, zullen niet uitgewerkt worden, met uitzonderingen van projectspecifieke onvoorziene omstandigheden. Ook op punten waar twijfel over bestaat of er onzekerheden in het ontwerp aanwezig zijn, zal er in de invloedsboom melding van gemaakt worden.

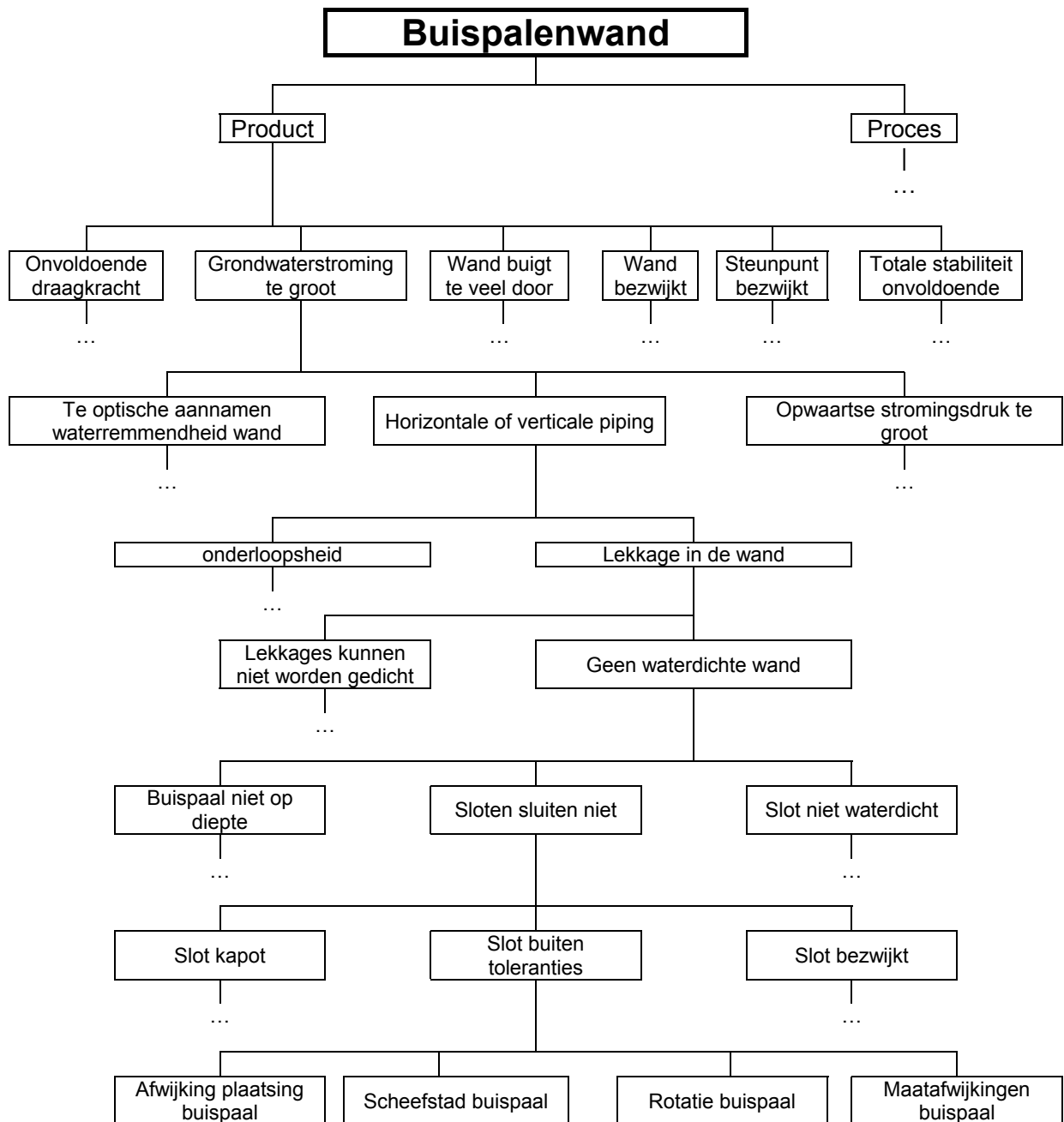
Een onderverdeling van de bedreigingen van de subsystemen kan gemaakt worden voor het product en het proces. Bij bedreigingen van het product worden die bedreigingen genoemd die het functioneren van het (sub)systeem kunnen bedreigen. De functie van de bouwkuip is het keren van het grondwater en de omringende grond om het tunnelement te kunnen invaren en het funderen van het bovenliggende stationsgebouw en emplacement.

Bij bedreigingen van het proces worden die bedreigingen genoemd die niet directe gevolgen voor het product hebben, maar wel die:

- De bedreigingen vanuit de omgeving aangeven die invloed hebben op kosten en tijd;
- Alleen betrekking hebben op de planning en de tijd;
- Vanuit de voorbereiding voortvloeien;
- Die alleen kostengevolgen hebben;
- Die voortvloeien uit de gekozen uitvoeringstechniek
- En organisatie gerelateerde risico's.

De sandwichwand bestaat, zeker uitvoeringstechnisch gezien, uit twee onderdelen: de stalen Tubex-palen en het groutlichaam. De sandwichwand zal dan ook worden opgesplitst in Tubex, grout en een algemeen gedeelte waar de sandwichwand als geheel beschouwd zal worden. Met name voor het proces is deze opsplitsing naar Tubex en grout van belang.

Als voorbeeld zal hier een gedeelte van de invloedsboom van de buispalenwand worden getoond. In bijlage 6 is de gehele invloedboom te vinden.



Figuur 6.2 Voorbeeld invloedsboom

De met ... aangegeven worden hier niet verder uitgewerkt, er wordt verwezen naar de invloedsboom in bijlage 6.

6.5 Vaststelling kansen en gevolgen

Het vaststellen van kansen van optreden van een gebeurtenis en de gevolgen ervan dient in principe gebaseerd te zijn op de fysische eigenschappen van die gebeurtenis om inzicht te verkrijgen in de verschillende oorzaken van de faalmechanismen en om duidelijk de relaties tussen de verschillende faalmechanismen te onderkennen.

Dit is echter niet altijd mogelijk. Soms zijn er voor verschillende verschijnselen geen fysische relaties vast te stellen, zoals het voorkomen van een grote storm met veel schade als gevolg. Ook is niet altijd de fysische achtergrond van een faalmechanisme voldoende bekend om iets te kunnen zeggen over de kans van optreden van een dergelijk mechanisme.

Aan de hand van meningen van experts zal dan de vaststelling van de kans van optreden van de gebeurtenis en de gevolgen ervan geschieden. Ook kan deze vaststelling voor de gebeurtenissen die wel fysisch te beschrijven zijn, gedaan worden om tijd te besparen in het risicoanalysetraject. Het op deze wijze vaststellen van de kansen en gevolgen zal minder inzicht geven in de mechanismen en de afhankelijkheden ertussen.

In het risicodossier (zie bijlage 5) zijn de kansen en gevolgen vastgesteld op basis van de meningen van experts, deskundigen en betrokkenen, zie ook §5.6.

6.6 Conclusies uit de invloedsboom

Uit de invloedsboom blijkt dat zeer veel (uitvoerings)parameters de waterdichtheid van de wanden, zowel van de buispalenwand als van de sandwichwand, en de kwaliteit van het producten kunnen bedreigen.

De kwaliteit beïnvloedt ook weer indirect de waterdichtheid van de wanden, met name de monitoring is van groot belang: bij de buispalenwand zijn bijvoorbeeld de gegevens van de boorkop van belang bij het sturen en de nauwkeurigheid van het lassen bij de scheefstand van de paal. Bij de sandwichwand is de monitoring van belang voor de plaatsing van de boorlans en daarmee van belang voor de plaats van de groutkolom. Door deze plaatsafwijkingen kunnen er kolommen niet aan elkaar aansluiten. Tevens kan de scheefstand van de boorlans tot gevolg hebben dat deze boort in een reeds bestaande kolom.

Er wordt in deze invloedsboom overigens geen uitspraak gedaan over de grootte van het risico: het geeft alleen inzicht in de mogelijke oorzaken van bepaalde faalmechanismen en welke parameters invloed hebben via die verschillende mechanismen op de verhoging van de te maken bouwkosten en –tijd. Een kwantitatieve analyse zou hier uitkomst kunnen bieden en de grootste risicobijdragen aan de totale kostenoverschrijding bepalen.

In de invloedsboom ligt er dus veel nadruk op de bedreigingen voor de waterdichtheid. Dieper gaande analyses naar de bedreigingen voor deze waterdichtheid van de bouwkuipwanden zou meer inzicht brengen in het mogelijk optreden van deze bedreigingen en de kans daar op.

Om deze reden zal er in het volgende hoofdstuk worden ingegaan op het bepalen van de kans van optreden van een lekkage in de buispalenwand las gevolg van het niet aansluiten van de sloten, zie figuur 6.2.

Hoofdstuk 7 Niet aansluitende sloten in de buispalenwand

7.1 Opzet

Gaten in de buispalenwand ontstaan als gevolg van de afwezigheid van een waterdichte afsluiting tussen de buispalen, zoals wanneer de sloten niet aansluiten, zie ook de invloedsboom (hoofdstuk 6 en bijlage 6). Tevens wordt de slotverbinding als het goede gezien van de buispalenwand, zeker gezien ten opzichte van de oplossing met groutkolommen, zie §4.8. Tegelijkertijd wordt de slotverbinding als achilleshiel gezien van de buispalenwand, met name door de tolerantie-eisen waaraan de slotverbinding moet voldoen.

Aangezien het oorspronkelijke ontwerp van de buispalenwand, die met een afdichting van groutkolommen tot stand moest worden gebracht, verworpen is op basis van de grote onzekerheid in de waterdichtheid, lijkt het zinvol om inderdaad het niet aansluiten van de sloten uitgebreid te analyseren.

Niet aansluiten van de sloten bestaat uit een combinatie van plaatsafwijking van de buispalen en afwijkingen in het slot. De enige correctie tijdens het boorproces die de buispaal kan ondervinden, zal worden gedaan door het bijsturen van de boorkop.

De sloten worden aangebracht tot een diepte van NAP –30 m om een water- en grondsdichte wand te realiseren onder het emplacement en gebouw IJ-zijde. De slotconstructie op diepere niveaus is niet nodig: daar is immers het toepassen van het slot nutteloos, omdat een groot deel van de wand zijn voet heeft op NAP –30 m. Alleen ter plaatse van de perrons worden ten behoeve van de fundering de buispalen met hun voet in de derde zandlaag geplaatst.

Het ontwerp van het slot is zodanig, dat het slot enige verplaatsingen kan ondergaan: maximaal 60 mm in de richting van de wand en 30 mm loodrecht op de wand, zie bijlage 4.

7.1.1 Uitgangspunten en aannamen

Voor het ontstaan van gaten in de buispalenwand worden de volgende uitgangspunten en aannamen gehanteerd:

- Alle buispalen worden onafhankelijk van elkaar geplaatst en geboord. In werkelijkheid zal de inbrengpositie en stand van de paal iets worden aangepast aan de omringende, reeds geplaatste palen;
- De sloten volgen de buispaal;
- De buispaal zelf zal niet vervormen tijdens het inbrengen. De buispaal zal rond 1820 mm blijven en niet vervormen of indeuken tijdens het op diepte brengen;
- Vervormingen van het slot zelf worden niet meegenomen, de toleranties van het slot worden als vaste waarden beschouwd;
- De sloten zullen de buispaal niet geleiden. In werkelijkheid zal dit wel gebeuren totdat het slot plastisch gaat vervormen. Dit mechanisme is hier buiten beschouwing gelaten en hangt samen met de aannamen dat de buispaal niet zal vervormen, de sloten de buispaal volgen en er geen verdere vervormingen worden meegenomen;
- Daarnaast zal ook de slotwrijving in dit model buiten beschouwing gelaten worden;
- Er wordt geen uitspraak gedaan over de grootte van het ontstane gat (de slotvervormingen worden immers niet meegenomen in de onzekerheidsmodellering en bepaald in het model) en het debiet wat dan door deze lekkage kan stromen. Het model geeft alleen aan in welke mate de kritische toleranties van het ontwerp van de

buispalenwand overschreden worden en daar waar die kritische tolerantie overschreden wordt, er een gat ontstaat.

7.1.2 Beperkingen

Dit model zal de volgende gevallen en mechanismen niet meenemen:

- Het niet op diepte komen van de buispaal
- Het instorten van het boorgat
- De onzekerheden in de geometrie en sterkte van het slot
- Het vervormen van de buispaal tijdens het inbrengen
- De vorm van de buizen wordt als rond beschouwd, de ovaliteit wordt dus buiten beschouwing gelaten.

Hieruit volgt, dat de buispaal zich onafhankelijk van de slotpositie zal gedragen. Plaatsafwijking van de buispaal ten opzichte van de theoretische positie bestaat uit twee componenten: plaatsingsafwijking op maaiveld en een scheefstand, die op verschillende diepten tot een bepaalde afwijking in het horizontale vlak zal leiden.

De scheefstand kan op zijn beurt weer door verschillende oorzaken tot stand komen. Te denken valt aan scheefstand tijdens de plaatsing van het eerste element, het verkeerd aan elkaar lassen van de segmenten, invloed van de grond en de aanwezigheid van obstakels, waar de buispaal schampt. De boorkop is zodanig ontwikkeld, dat het een correctie kan aanbrengen in de scheefstand door middel van sturen van de boorkop.

7.2 Afwijkingen

In het model is de plaats van het slot vertaald naar de plaats van het hart van de buispaal. Aangezien het slot zich verplaatst met de buispaal, zal het slot dezelfde plaatsafwijkingen vertonen als de buispaal. Daarnaast kan de diameter van de buis enigszins variëren en kan de buispaal om zijn as roteren (als gevolg van het optredende moment van het graafwiel op de buispaal): de as van de ronde buispaal blijft wel op zijn plaats. Het slot zal echter met de buispaal mee roteren om de buispaal-as. Hieruit volgt dan ook een verplaatsing van het slot:

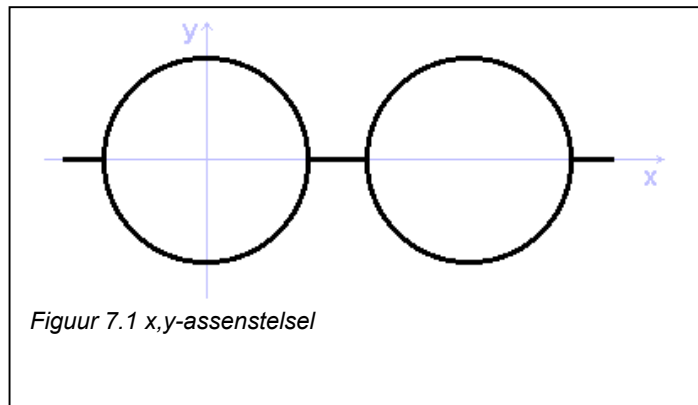
$$\Delta x_{\text{slot}} = \Delta x_{\text{buispaal}} + \Delta x_{\text{rotatie}} + \Delta x_{\text{diameter}}$$

$$\Delta y_{\text{slot}} = \Delta y_{\text{buispaal}} + \Delta y_{\text{rotatie}} + \Delta y_{\text{diameter}}$$

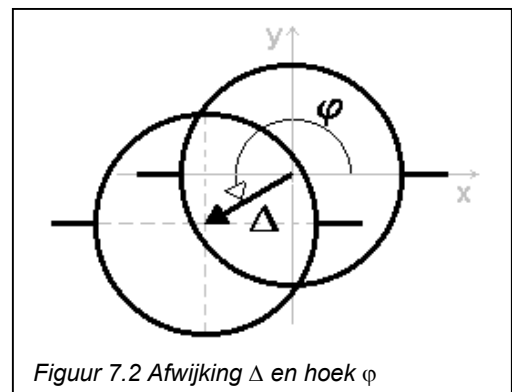
Hierbij is de x-richting in de lengterichting van de wand, dus in de wand; de y-richting staat loodrecht op de wand, zie figuur 7.1.

De afwijking van de coördinaten van de buispaal-as wordt veroorzaakt door een aantal mogelijke afwijkingen:

- Plaatsingsafwijking;
- Scheefstand van de buispaal;
- Wel of niet sturen van de boorkop.



Figuur 7.1 x,y-assenstelsel



Figuur 7.2 Afwijking Δ en hoek φ

7.2.1 Plaatsingsafwijking

Tijdens de plaatsbepaling van de inbrenglocatie kan er als gevolg van de beperkingen van het meetsysteem om de buispalen te plaatsen een afwijking van de theoretische plaats gemaakt worden (Δ). Deze afwijking in het horizontale vlak kan echter in alle richtingen in het horizontale vlak gemaakt worden (φ). Zie ook figuur 7.2.

$$\Delta x_{plaats} = \Delta_{plaats} \cdot \cos \varphi$$

$$\Delta y_{plaats} = \Delta_{plaats} \cdot \sin \varphi$$

7.2.2 Scheefstand

De scheefstand kan door verschillende oorzaken ontstaan. Door deze scheefstand zal er op een bepaalde diepte een plaatsafwijking in het horizontale vlak ontstaan. Zie figuur 7.3. Zoals uit de figuur blijkt, hangt de plaatsafwijking af van de ontwikkelde lengte van de scheefstand:

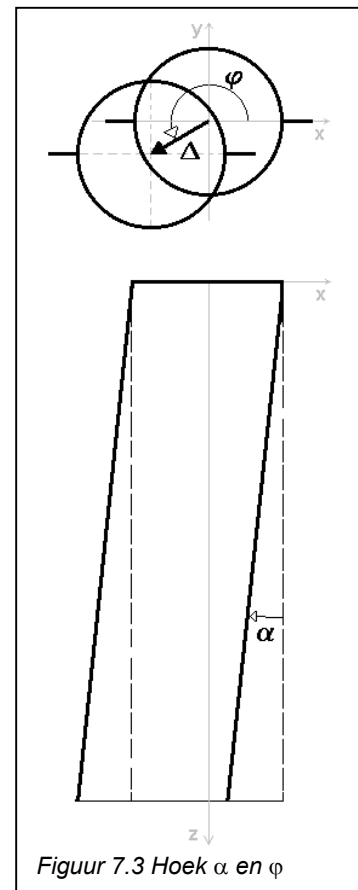
$$\Delta_{scheef}(z) = L(z) \cdot \tan \alpha$$

$$\Delta x_{scheef}(z) = \Delta_{scheef}(z) \cdot \cos \varphi$$

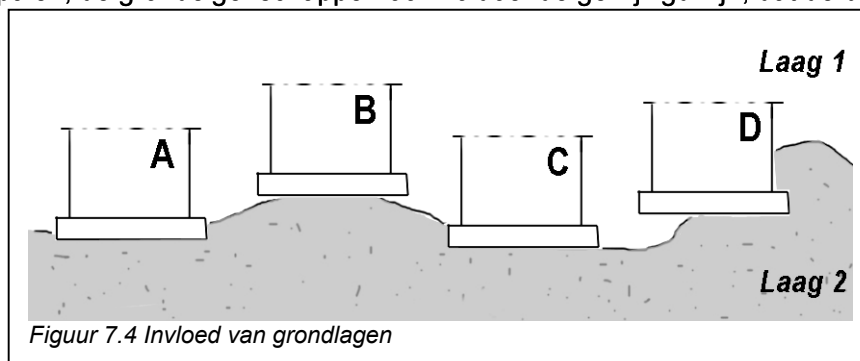
$$\Delta y_{scheef}(z) = \Delta_{scheef}(z) \cdot \sin \varphi$$

Er zijn verschillende oorzaken voor de scheefstand aan te wijzen:

- Scheve plaatsing. Hierdoor zal de gehele buis onder een hoek worden ingebracht. Deze scheefstand is dus afhankelijk van de stel mogelijkheden.
- Lassen van de segmenten. Hierbij geldt hetzelfde als bij de scheve plaatsing: voordat de segmenten gelast worden, wordt het segment gesteld op dezelfde wijze als bij de plaatsing. De ontwikkelde scheefstand geldt dan pas vanaf het betreffende segment, en niet over de gehele buislengte.
- Grondgesteldheid. Tijdens het boren kan de boorkop overgaan van de ene grondlaag in een andere. Hierdoor zal de weerstand voor het snijden van de grond en het drukken van de buispaal in het algemeen niet gelijk zijn. Mocht de laagovergang niet horizontaal zijn, dan zal deze weerstand variëren over het snijvlak, zie figuur 7.4, waardoor de boorkop kan verlopen. Vergelijk boorkop A (horizontaal snijvlak) met boorkop D. B en C ondervinden bijna geen invloed. Door deze geïnitieerde scheefstand zal de buispaal vanaf deze laagovergang onder een hoek staan. Daarnaast kan door het opspannen van de grond door het aanbrengen van de sandwichwand, m.n. de Tubex-palen, de grondeigenschappen ook voldoende gewijzigd zijn, dat de boorkop hierdoor



Figuur 7.3 Hoek α en φ



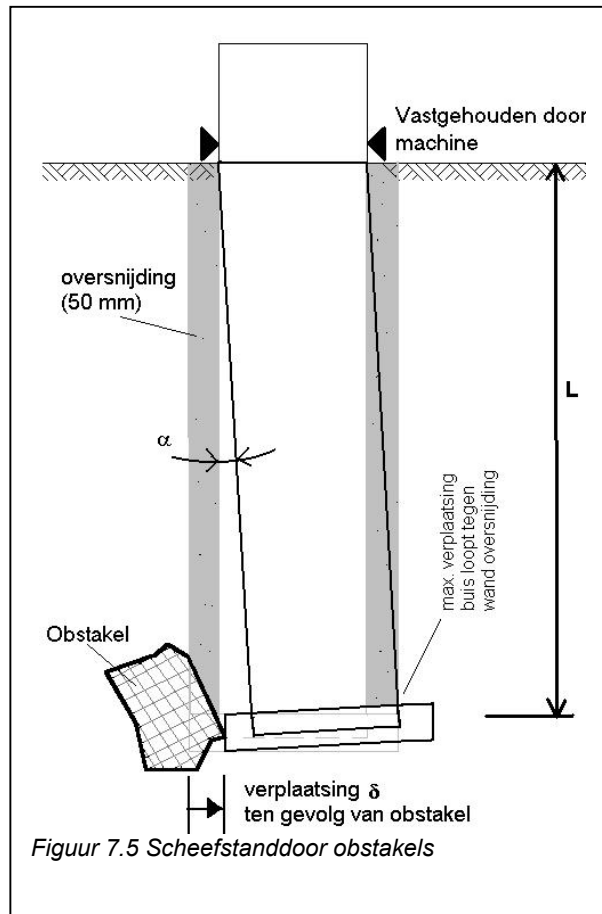
Figuur 7.4 Invloed van grondlagen

ook verloopt.

- Obstakels. Als er een obstakel in de ondergrond aanwezig is, kan de buispaal er op vastlopen, of kan de boorkop er op afketsen en zal onder een hoek verder boren. De buispaal wordt op twee punten vastgehouden: op maaiveld en door de boorkop. Als de boorkop dus afketst volgt de buispaal aan de onderzijde de boorkop totdat de buis tegen de wand van het boorgat loopt: $\alpha = \tan(\delta/L)$

7.2.3 Sturen

De boorkop is uitgerust met een mogelijkheid om de scheefstand te corrigeren. Op het moment dat de gemeten scheefstand van de buispaal een bepaalde waarde overschrijdt, zal de boorkop iets bijgestuurd worden. Tijdens de pré-proef die werd uitgevoerd ter voorbereiding van de uitvoering onder het Amsterdam Centraal Station en om met name de uitvoeringsmethode te testen, werden er correcties van 1 mm per meter gerealiseerd. De dimensies, met name de stijfheid van de buispaal verschillen nogal ten opzicht van de te realiseren buispaalwand (de buispaal heeft tijdens de proefneming een diameter van $\varnothing 700$ mm en $\varnothing 1820$ mm in het werk). De verwachting is dat de te behalen maximale correctie 0,5 mm per meter bedraagt. Naast het corrigeren van de scheefstand, kan er door een verkeerde stuurmanoeuvre de hoekaanpassing geheel in de verkeerde richting geschieden en dus de scheefstand versterken. Door verkeerde metingen of door een menselijke fout kan deze foute manoeuvre ontstaan. Dit is opgelost door toepassing van een alarm installatie in de stuurinstallatie welke alarm slaat zodra er in de verkeerde richting gestuurd wordt.



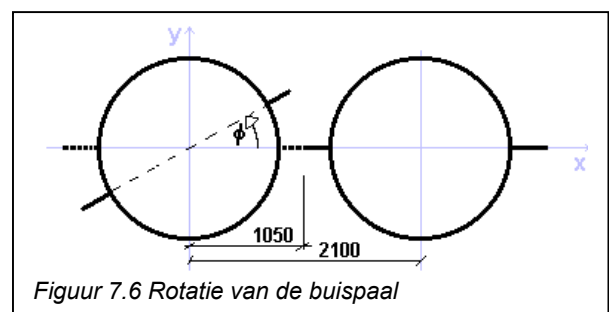
Figuur 7.5 Scheefstand door obstakels

7.2.4 Rotatie van de buis

Tijdens het inbrengen kan de buis enigszins roteren (als gevolg van het moment dat het graafwiel uitoefent op de buispaal). Hierdoor zal het slot (en niet de buis) verplaatsen:

$$\Delta x_{rotatie} = (1 - \cos \phi) \cdot l_{arm}$$

$$\Delta y_{rotatie} = (\cos \phi \cdot l_{arm}) \cdot \tan \phi$$



Figuur 7.6 Rotatie van de buispaal

Hierbij is l_{arm} de afstand van het hart van de buis tot de aansluiting van de twee sloten: de halve h.o.h. afstand van de twee buispaalen, welke 2100 mm is.

Hierdoor zullen de plaatsafwijkingen voor het slot te schematiseren zijn tot:

$$\Delta x_{\text{rotatie}} = (1 - \cos \phi) \cdot l_{\text{arm}}$$

$$\Delta y_{\text{rotatie}} = (\cos \phi \cdot l_{\text{arm}}) \cdot \tan \phi = l_{\text{arm}} \cdot \sin \phi$$

7.2.5 Diameterafwijking

De buis zal geleverd worden met bepaalde maattoleranties. De diameter is gesteld aan de leverancier is dat de diameter $\varnothing 1820 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ moet zijn. Dit betekent dat de diameter tussen 1819 mm en 1821 mm zou moeten liggen. Deze diameter kan overigens ook nog over de hoogte variëren binnen deze toleranties.

De plaats van (de as van) de buispaal zal niet afhangen van deze variatie van de diameter. De plaats van het slot echter wel, zeker ten opzichte van het slot van de aanliggende buispaal.

De diameterafwijking zal voornamelijk invloed hebben op de x-coördinaat van het slot. Deze ligt immers in het verlengde van de lijn van de buisas naar het slot. Het verschil in de y-coördinaat bedraagt bij een diameterafwijking van 1 mm en een rotatie van de buis om zijn as, waarbij het slot 10 mm verplaatst langs de buiswand:

$$D_{\text{buis}} = 1820 \text{ mm}$$

$$\tan(\phi_{\text{rotatie}}) = \frac{\Delta_{\text{rotatie}}}{\frac{1}{2} \cdot D_{\text{buis}}} = \frac{10 \text{ mm}}{910 \text{ mm}} \Rightarrow \phi_{\text{rotatie}} \approx 0,6^\circ$$

$$\Delta y = \Delta_{\text{Diameter}} \cdot \sin(\phi_{\text{rotatie}}) = 1 \cdot 0,01 = 0,01 \text{ mm}$$

De verandering van de y-coördinaat kan verwaarloosd worden.

De totale plaatsafwijking van het slot zal dus zijn:

$$\Delta x_{\text{slot}} = \Delta x_{\text{slot}} + \sum \Delta x_{\text{scheef},i}(z) + \Delta x_{\text{Diameter}} + \Delta x_{\text{rotatie}}$$

$$\Delta y_{\text{slot}} = \Delta y_{\text{slot}} + \sum \Delta y_{\text{scheef},i}(z) + \Delta y_{\text{rotatie}}$$

7.3 Onzekerheden

Om de plaats van het slot te weten, en de onderlinge plaats van de twee sloten in een verbinding, zal er een vertaalslag gemaakt worden van de plaats van de buispaal-as naar de plaats van het slot.

Allereerst zal de plaatsingsafwijking bepaald worden. De plaatsing van de buispaal kan binnen 20 mm nauwkeurig gedaan worden. Om de plaatsing te benaderen in het model, en om de onzekerheid in de plaatsing mee te nemen, zal gebruik worden gemaakt van een normale verdeling, waarbij het gemiddelde $\mu_{\Delta} = 10 \text{ mm}$ is en de standaard afwijking $\sigma_{\Delta} = 6,1 \text{ mm}$. Hierdoor zal de plaatsingsafwijking met 95% zekerheid kleiner dan 20 mm zijn. De hoek ϕ , in welke richting de plaatsingsafwijking staat, ligt willekeurig in het horizontale vlak en zal dus willekeurig liggen tussen 0° en 360° .

Vervolgens zal de plaatsingsscheefstand bepaald worden: met 95% zekerheid kan dan worden gezegd dat de scheefstand kleiner is dan 1 mm/m. Deze scheefstand is ook normaal verdeeld, waarbij de parameters zijn: $\mu_a = 0,5 \text{ mm/m}$ en $\sigma_a = 0,3 \text{ mm/m}$. Met het stellen van de segmenten tijdens het lasproces gelden dezelfde parameters. Hier wordt namelijk dezelfde meetmethode gebruikt om het segment te stellen.

Door obstakels wordt de boorkop afgeketst. Dit kan maximaal totdat de buispaal tegen de wand van het boorgat loopt. De maximale verplaatsing is dan dus 50 mm (dit is de grootte van de oversnijding). De scheefstand door een dergelijk obstakel wordt dan:

$$\alpha = \Delta/z$$

Hierbij is α de scheefstand in mm/m
 Δ de verplaatsing van de boorkop op diepte z in mm
 z de diepte waarop de boorkop tegen het obstakel ketst.

De kans op een obstakel wordt geschat op 0,001 per buispaal. Het kan echter ook voorkomen dat er meerdere obstakels in de grond aanwezig zijn. In het geval er twee obstakels aanwezig zijn in de ondergrond wordt de kans op het tweede obstakel:

$$\begin{aligned} &\text{de kans op één obstakel maal de kans op één obstakel} = \\ &= 0,001 * 0,001 = 0,00001 \end{aligned}$$

Door de laagovergangen kan de buispaal ook verlopen. Als de overgang niet voldoende horizontaal verloopt, zal de weerstand over het snijvlak verlopen. Door het verschil in weerstand zal de boorkop een bepaalde richting op willen en zal er een scheefstand ontwikkeld worden. De grondlagen onder het emplacement variëren wel over de hoogte, maar op microschaal, d.w.z. op die schaal dat het de richting van de boorkop kan beïnvloeden, worden er geen problemen verwacht. Om die reden is de kans ingeschat dat het wel een keer zou kunnen optreden door een lokale onregelmatigheid van de ligging van de grondlaagovergang. Deze kans wordt geschat op 0,001 per laagovergang. De optredende scheefstand kan dan liggen tussen 0 mm/m en 2 mm/m.

Het correctief sturen is tegen de richting van de dan geldende scheefstand in, waarbij de maximale correctie op de scheefstand 0,5 mm/m bedraagt. Het meetsysteem zal pas bij een bepaalde waarde de scheefstand kunnen aangeven. Hierbij is aangenomen dat het meetsysteem de gemiddelde waarde tijdens het plaatsen kan meten: 0,5 mm/m. Dit betekent dat vanaf een scheefstand van 0,5 mm/m wordt bijgestuurd. Door meeton nauwkeurigheden kan de richting (de hoek in het horizontale vlak) nog enigszins afwijken van de dan geldende richting van de scheefstand in het horizontale vlak. Deze hoek is normaal verdeeld met $\mu = 180^\circ$ t.o.v. de dan geldende hoek in het horizontale vlak van de scheefstand, en $\sigma = 5^\circ$. Door een menselijke fout kan het echter gebeuren dat de verkeerde kant op gestuurd wordt. Hierbij bedraagt de maximale stuurmanoeuvre ook 0,5 mm/m, het is immers hetzelfde stuursysteem. Verder zal de richting willekeurig zijn: φ ligt tussen 0° en 360° . De kans op menselijk falen bedraagt 0,01 [Van Riel, 2000]. Hierbij valt te denken aan concentratieverlies en handelen op routine. Omdat middels een alarmsysteem wordt gewaarschuwd als de stuurmanoeuvre de verkeerde kant op gaat of dat de scheefstand te groot wordt, wordt de kans op verkeerd sturen geschat op 0,005 per handeling.

Samenvattend gelden de volgende onzekerheden voor de parameters:

Parameter	Symbol	Eenheid	Verdeling	Parameters van de verdelingen			Hoek hor. vlak	Verdeling	Min	Max.
Plaatsing	Δ	m	Normaal	$\mu_\Delta = 10$	$\sigma_\Delta = 6,1$		φ	Uniform	0°	360°
Scheefstand										
Plaatsing	α_1	mm/m	Normaal	$\mu_{\alpha 1} = 0,5$	$\sigma_{\alpha 1} = 0,305$		φ	Uniform	0°	360°
Obstakel	α_2	mm/m	Discreet	$P_{\alpha 2} = 0,001$	$\alpha_{2,\min} = 0$	$\alpha_{2,\max} = 50$	φ	Uniform	0°	360°
Grond	α_3	mm	Discreet	$P_{\alpha 3} = 0,001$	$\alpha_{3,\min} = 0$	$\alpha_{3,\max} = 2$	φ	Uniform	0°	360°
Lassen	α_4	mm/m	Normaal	$\mu_{\alpha 4} = 0,5$	$\sigma_{\alpha 4} = 0,305$		φ	Uniform	0°	360°
Verkeerd sturen	α_5	mm/m	Discreet	$P_{\alpha 5} = 0,005$	$\alpha_{5,\min} = 0$	$\alpha_{5,\max} = 2$	φ	Uniform	0°	360°
Correctief sturen	α_6	mm/m	-	α te kiezen a.d.h.v. scheefstand buispaal		$\alpha_{6,\max} = 0,5$	φ	Normaal		$\sigma_\varphi = 5^\circ$
Diameter	Δ	mm	Normaal	$\mu_D = 1820$	$\sigma_D = 0,6$		-	-		
Verplaatsing slot door rotatie buis	ϕ	mm	Normaal	$\mu_\phi = 0$	$\sigma_\phi = 6$		-	-		

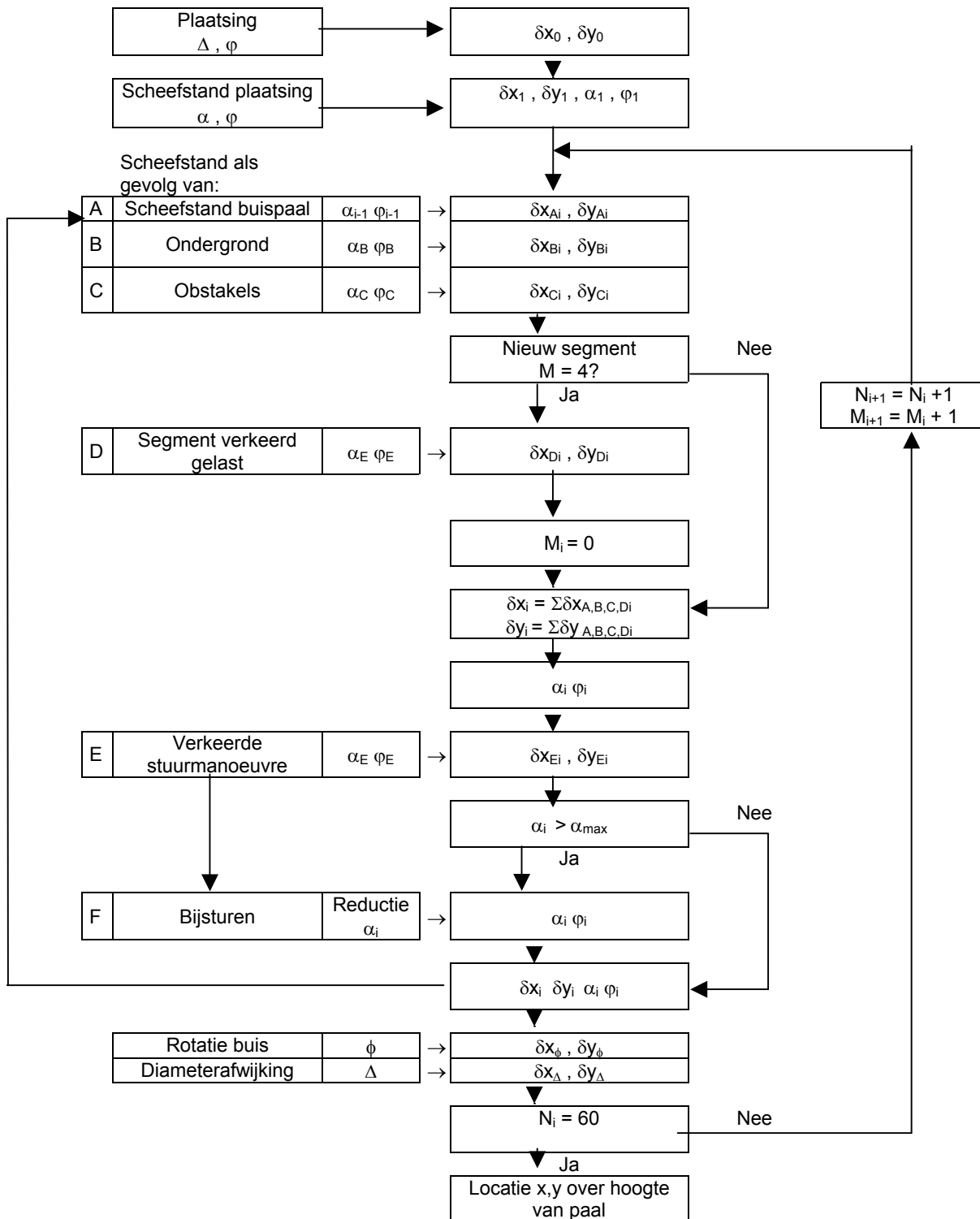
Tabel 7.1 Onzekerheidsparameters

7.4 Model

In het Monte Carlo-model worden locaties van de buis-as vertaald naar de locatie van het slot. De invloed op het slot van de rotatie van het slot en de afwijkingen in de diameter worden opgeteld. Allereerst zal dus de locatie van de buispaal-as bepaald worden. Dit begint bij het bepalen van de plaatsingsafwijking, gevolgd door het bepalen van de scheefstand. Tijdens het op diepte brengen worden de overige invloeden op de scheefstanden (α) bepaald inclusief de richting in het horizontale vlak (φ), waarna vanuit deze scheefstand de paallocatie vastgesteld kan worden, uitgedrukt in de x- en y-coördinaat.

Met het model zal getracht worden de werkelijkheid na te bootsen. Een continu model over de hoogte (d.w.z. elke positie over de buispaallengte) vergt een zeer grote rekencapaciteit. De keuze voor stappen in het hoogteniveau moet de paallocatie voldoende nauwkeurig kunnen weergeven. Logisch lijkt het om de paallocatie voor iedere mm te bepalen, maar dit levert per paal van 30 m 30.000 te bepalen punten op. Het kiezen voor een stapgrootte van 1 m lijkt op het eerste gezicht te groot, zeker in het licht dat de ontgravingsdiepte van de bouwkuip tijdens het nat ontgraven op –17,6 m NAP ligt. De keuze viel uiteindelijk op een stapgrootte van 0,5 m: elke 500 mm zal de locatie en de scheefstand van de buispaal bepaald worden en levert per paal 60 punten op.

Zie ook het stroomschema op de volgende pagina.



Figuur 7.7 Stroomschema model afwijkingen buispalenwand

7.5 Toetsing aan de eisen

Het slot zelf kan binnen een bepaalde tolerantie deze plaatsafwijkingen volgen. Hiervoor zal eerst de onderlinge plaatsafwijking tussen de twee palen en de rotatie van de aansluitende sloten bepaald worden, en wordt er vervolgens gekeken of de slottoleranties worden overschreden. Deze functie Z wordt 1 als de toleranties van het slot worden overschreden en 0 als de toleranties niet overschreden zijn:

$$Z_i = \begin{cases} 0, & \left(|\Delta x_{buis,i} - \Delta x_{buis,i+1}| \leq x_{tolerantie} \right) \text{ en } \left(|\Delta y_{buis,i} - \Delta y_{buis,i+1}| \leq y_{tolerantie} \right) \\ 1, & \left(|\Delta x_{buis,i} - \Delta x_{buis,i+1}| > x_{tolerantie} \right) \text{ of } \left(|\Delta y_{buis,i} - \Delta y_{buis,i+1}| > y_{tolerantie} \right) \end{cases}$$

Het aantal overschrijdingen van de tolerantie van de buispaal wordt dan per simulatie van de gehele wand van 92 buispalen per niveau opgeteld:

$$\Sigma Z = \sum_{i=1}^{92} Z_i$$

Het aantal slotverbindingen is 90: twee wanden met 46 buispalen. Per wand zijn er dus 45 slotverbindingen. Hier geldt dus:

$$\Sigma Z = \sum_{i=1}^{90} Z_i$$

De volgende toleranties zullen getoetst worden:

- Toleranties van het slot zonder plastische vervormingen
- Toleranties van het slot met plastische vervormingen met als gevolg het niet aansluiten van de sloten;
- De plaatsingseisen van de buispaal

Deze toleranties bedragen:

Tolerantie	X _{tolerantie} [mm]	Y _{tolerantie} [mm]	Betrekking op
Slot zonder ernstige plastische vervorming (slotspeling)	60	30	Het slot
Slot met ernstige plastische vervorming waarbij mogelijk een gat in de wand kan ontstaan	80	50	Het slot
Plaatsingseisen buis	25	25	Buispaal as

Tabel 7.2 Toleranties buispaal en het slot

Deze toleranties gelden zowel voor de positieve als negatieve x- en y-richting. De controle is daarom ook de absolute waarde van het verschil van de x- en y-positie van de buis en het slot:

$$|\Delta x_i - \Delta x_{i+1}| < x_{tolerantie} \quad , \quad |\Delta y_i - \Delta y_{i+1}| < y_{tolerantie}$$

In het model wordt er van uitgegaan dat als de toleranties voor ernstige plastische vervorming overschreden zijn, het slot in feite uit het slot is gelopen: voor alle onderliggende controles voor deze tolerantie zijn dan in feite ook deze toleranties overschreden en is de Z-waarde daar dus 1.

In het model worden dan per simulatie het aantal overschrijdingen per hoogte bekeken. Uiteindelijk wordt de kans van optreden van het overschrijden van een bepaald aantal overschrijdingen (m) geschat door dit aantal malen overschrijding te delen door het aantal simulaties N :

$$P(\sum Z = m) \approx \frac{\sum_{j=1}^N (\sum Z = m)}{N}$$

Het aantal simulaties N is van belang: als er slechts één simulatie wordt gedaan, betekent dat dit de kans op een bepaalde tolerantieoverschrijding direct vast legt, terwijl bij een volgende simulatie deze kans op tolerantieoverschrijding wezenlijk anders kan zijn door het trekken van randomgetallen in de kansverdelingfuncties.

In de literatuur [CUR190, 1997] wordt het aantal benodigde simulaties vastgesteld volgens onderstaande formule:

$$n > \frac{k^2}{E^2} \left(\frac{1}{P} - 1 \right)$$

Hierbij is E de relatieve fout die wordt gemaakt door de schatting van de faalkans P , en k is de mate van betrouwbaarheid. Hieruit blijkt overigens dat het aantal simulaties afhankelijk is van de faalkans.

De keuze van het aantal simulaties wordt op voorhand vastgesteld op 10.000 simulaties en zal achteraf gecontroleerd worden of dit een voldoende groot aantal simulaties was om een betrouwbare uitkomst te genereren van het model.

Een vuistregel zegt overigens dat het aantal simulaties N minimaal gelijk moet zijn aan 10 maal het omgekeerde van de kleinste kans:

$$n > 10 \cdot \frac{1}{P}$$

Dit is met name gebaseerd op discrete verdelingen. Deze vuistregel wordt toegelicht met een voorbeeld:

Stel: $P(Z < 0) = 0,01$

Als nu het aantal simulaties gelijk zou zijn aan één gedeeld door de kleinste kans (hier: $N = 100$), dan valt op basis van de kansverdeling te verwachten dat Z één maal kleiner zou zijn dan nul. Echter, mocht bij 100 simulaties het twee keer voorkomen dat $Z < 0$, dan wordt op basis van de simulaties de kans $P(Z < 0)$ geschat op:

$$P(\int Z < 0) = \frac{100 \cdot P + 1}{100} = \frac{100 \cdot 0,01 + 1}{100} = \frac{2}{100} = 0,02$$

Hier wordt dus een fout van 100% geïntroduceerd. Door het aantal simulaties toe te laten nemen tot $10 \cdot (1/P) = 10 \cdot 0,01 = 1000$, zal de relatieve fout afnemen:

$$P(\int Z < 0) = \frac{1000 \cdot P + 1}{1000} = \frac{1000 \cdot 0,01 + 1}{1000} = \frac{11}{1000} = 0,011$$

Door deze vuistregel toe te passen zal de relatieve fout voor deze ene parameter afnemen naar 10%.

Omdat in het algemeen niet één parameter wordt meegenomen in een dergelijke simulatie, zal deze fout uitgemiddeld worden.

Bij dit model wordt de kleinste discrete kans geschat op 0,001. Dit betekent het volgende voor deze vuistregel:

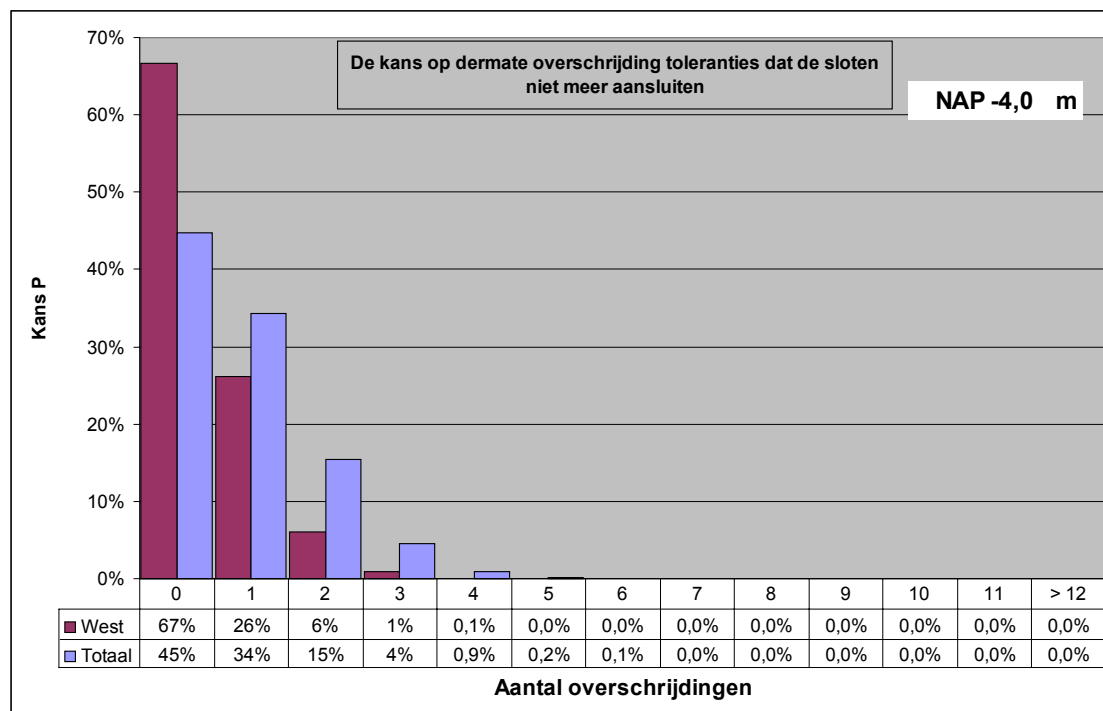
$$P = 0,001$$

$$n > 10 \cdot \frac{1}{P} = 10 \cdot \frac{1}{0,001} = 10 \cdot 1.000 = 10.000$$

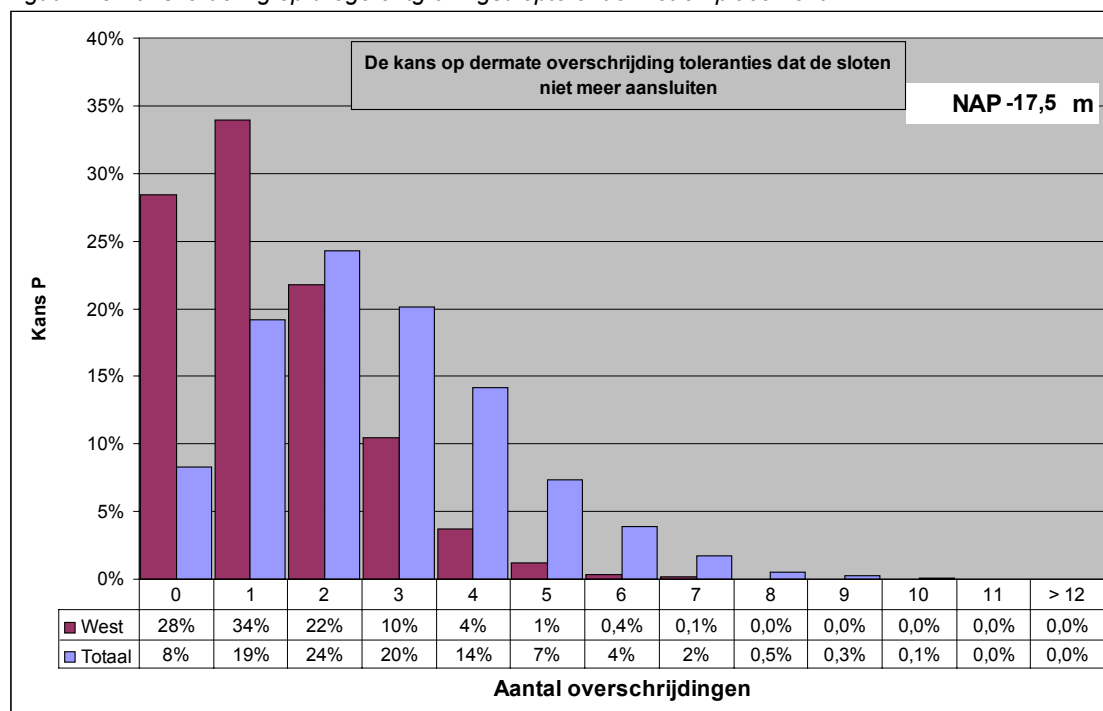
Bij een keuze van 10.000 simulaties voldoet deze vuistregel dus. De controle achteraf dient nog altijd te geschieden om de juistheid van het aantal simulaties te verifiëren.

7.6 Resultaten simulaties

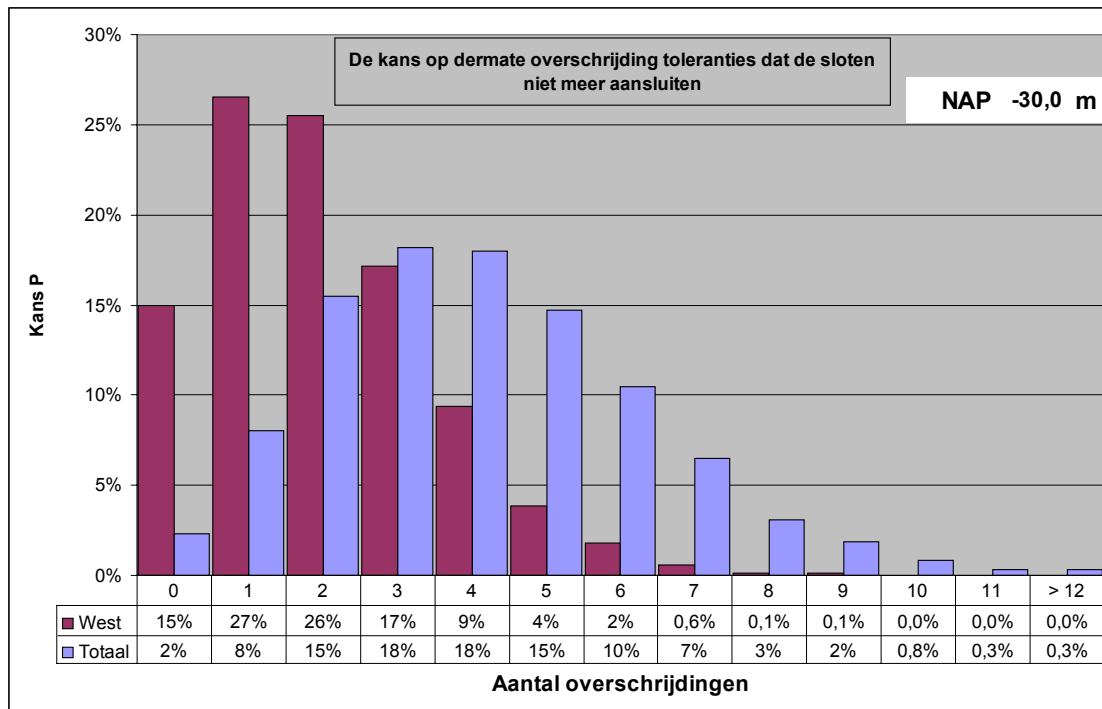
De onderstaande grafieken geven enkele resultaten weer van het Monte Carlo model van de buispalenwand met betrekking tot het niet aansluiten van de sloten onder de gestelde onzekerheden, zie §7.3. De onderstaande grafieken zijn op basis van 10.000 simulaties. Het model is overigens niet dermate nauwkeurig, dat de kansen in drie significante cijfers gegeven kunnen worden: de kansen zullen daarom ook afgerond worden op hele procenten.



Figuur 7.8 Kansverdeling op droge ontgravingsdiepte onder het emplacement



Figuur 7.9 Kansverdeling op natte ontgravingsdiepte



Figuur 7.10 Kansverdeling op voet buispalenwand

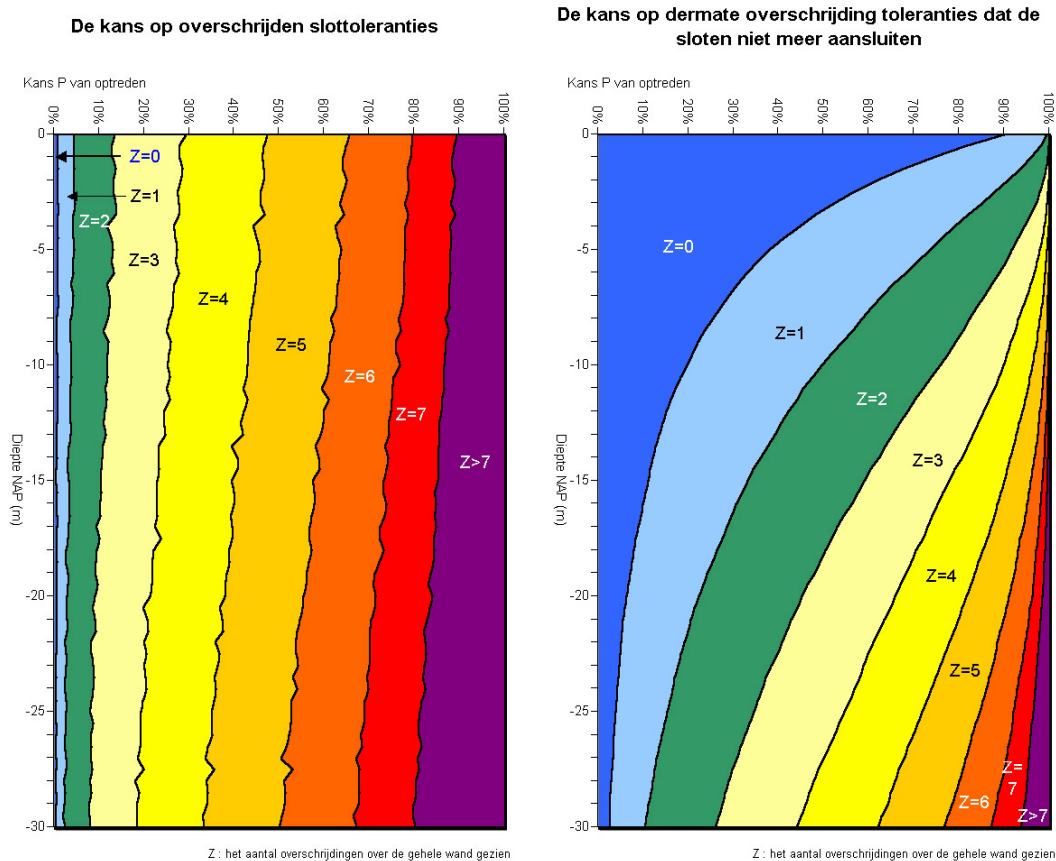
De volgende diagrammen zijn hierboven weergegeven:

Figuur 7.8: Overschrijding van toleranties zodat er ernstige plastische vervormingen kunnen optreden die leiden tot lekkage op ontgravingsdiepte voor het droog ontgraven (NAP -4 m) voor één wand (de westwand) en voor de totale buispalenwand (west- en oostzijde)

Figuur 7.9: Idem voor de natte ontgravingsdiepte (NAP -17,5 m)

Figuur 7.10: Idem voor de voet van de buispalenwand op NAP -30 m

Overige resultaten zijn te vinden in bijlage 7.



Figuur 7.11 Kansverdelingen voor de slottoleranties over de diepte

7.6.1 Modelresultaten

Binnen de gestelde beperkingen en aannames geeft de Monte Carlo simulatie, in de hierboven afgebeelde figuren (figuur 7.11 en 7.12), het volgende beeld:

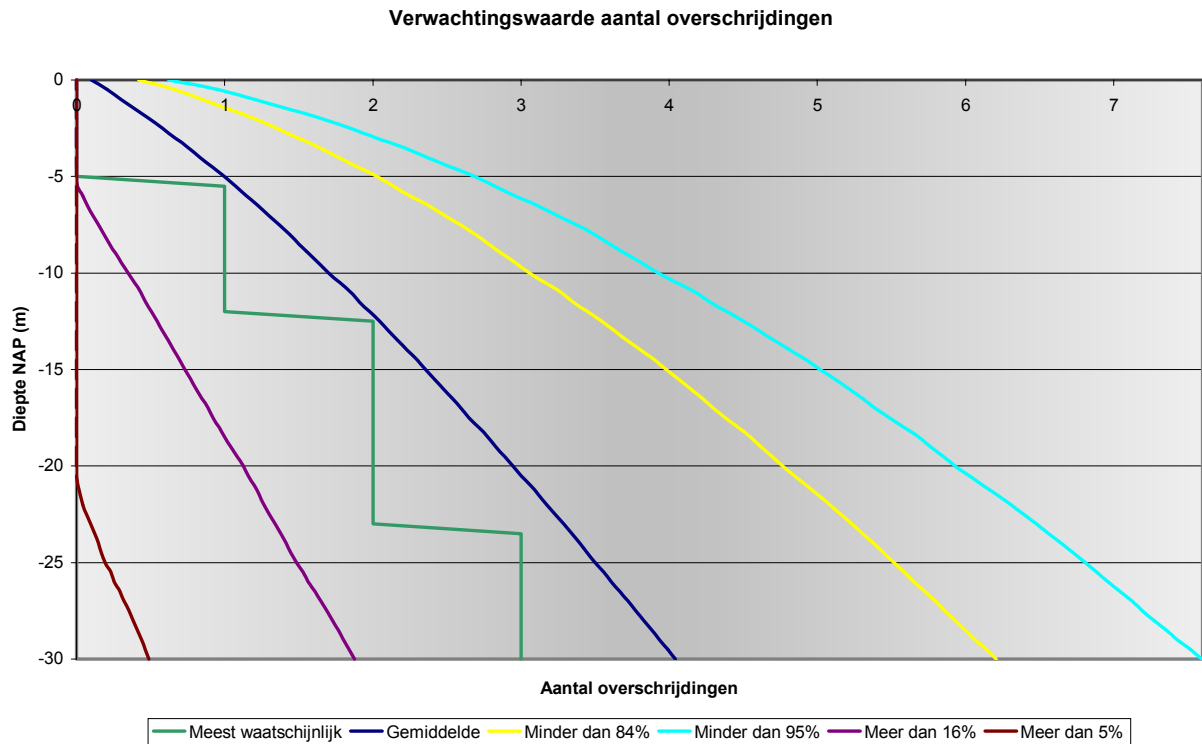
- De ontworpen slottoleranties (in x-richting 60 mm en in y-richting 30 mm) zullen met een kans van 95% minimaal één maal overschreden worden en is er meer dan 50% kans dat het vijf of meer malen gebeurd over de 90 slotverbindingen. Dit valt te verklaren: immers zijn de plaatsingstoleranties al zodanig dat, als deze binnen de gestelde eisen worden geplaatst, er een grote kans is op het behalen van de slottoleranties. Een voorbeeld: stel de ene paal wordt 20 mm te veel in positieve y-richting (dwars op de wand) geplaatst en de aanliggende buispaal wordt juist 15 mm te veel in negatieve y-richting geplaatst, dan zijn deze beide buispalen binnen de gestelde eisen geplaatst ($\Delta < 25$ mm) en binnen de 95% waarde van de kansverdelingwaarde voor de plaatsing (20 mm). Echter, het verschil tussen de buispalen is nu opgelopen tot:

$$\Delta y_{\text{slot}} = |\Delta y_1 - \Delta y_2| = |20 \text{ mm} - (-15 \text{ mm})| = 35 \text{ mm} > \Delta y_{\text{tolerantie}} = 30 \text{ mm}.$$

Het is dus heel erg waarschijnlijk dat de sloten plastisch zullen gaan vervormen en de speling in het slot, die in het ontwerp van het slot toelaatbaar is, opgebruikt zal worden.

- Over de diepte zal de kans op het overschrijden van de toleranties toenemen, wat ook te verwachten valt. De scheefstand zal de buispaal over de diepte iets laten verlopen, waardoor de plaatsafwijking van de buis-as in x- en/of y-richting over de diepte zal toenemen. Twee aanliggende buispalen zullen door deze scheefstand een grotere onderlinge plaatsafwijking hebben en de slottoleranties zullen over de diepte met een grotere kans gehaald worden.

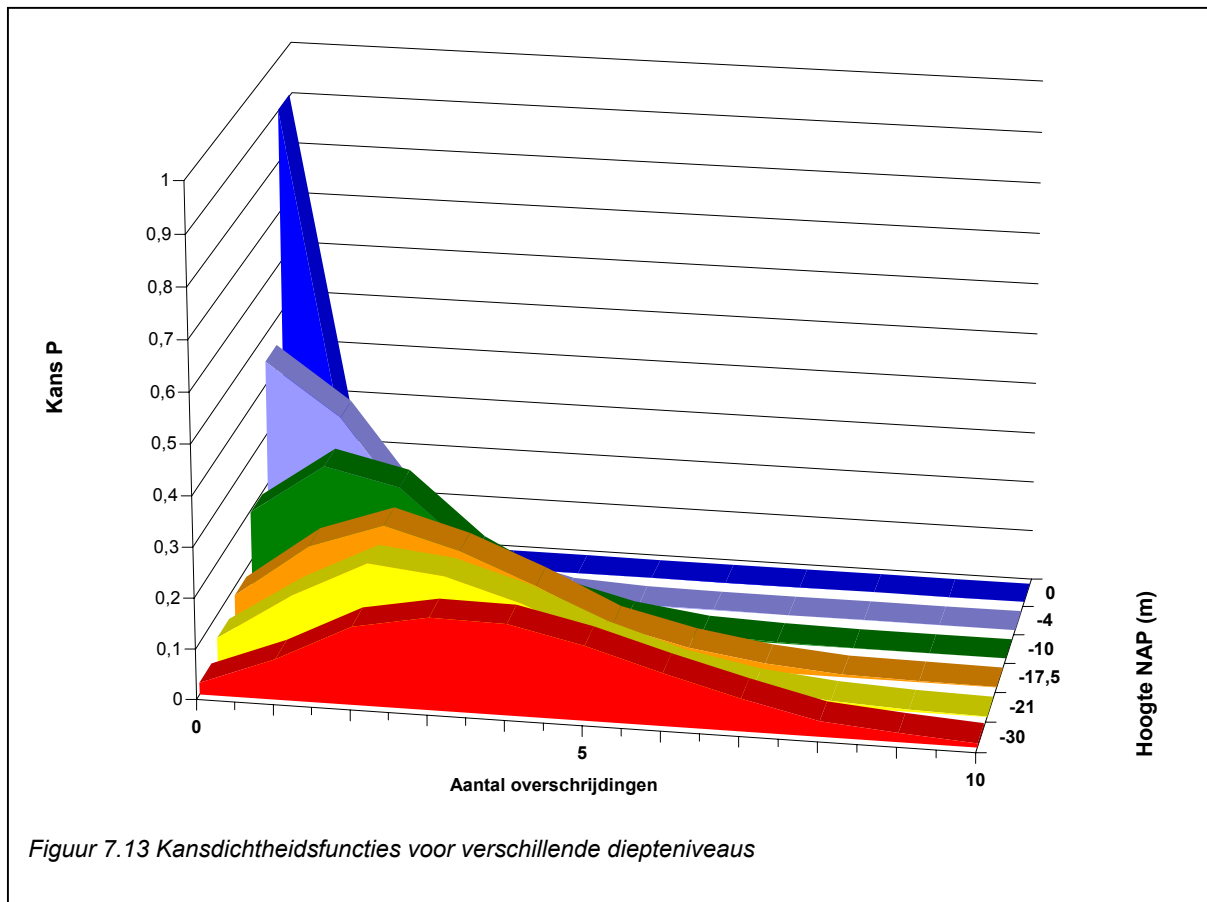
- Over de hoogte gezien verloopt de verwachtingswaarde van het aantal overschrijdingen (gemiddelde) en de meest waarschijnlijke waarde van het aantal overschrijdingen als volgt:



Figuur 7.12 Verwachtingswaarden voor het overschrijden van de slottoleranties

Uit bovenstaand figuur blijkt dat de verwachte waarde van het aantal overschrijdingen verloopt van 0 op maaiveld tot ca. 4 op NAP – 30 m. De meest waarschijnlijke waarde, de waarde met de grootste kans, ligt op 3 overschrijdingen op een diepte van -30 m NAP. Met 90% zekerheid kan uit de bovenstaande figuur geconcludeerd worden dat het aantal verwachte overschrijdingen ligt tussen 0,5 en 7,5.

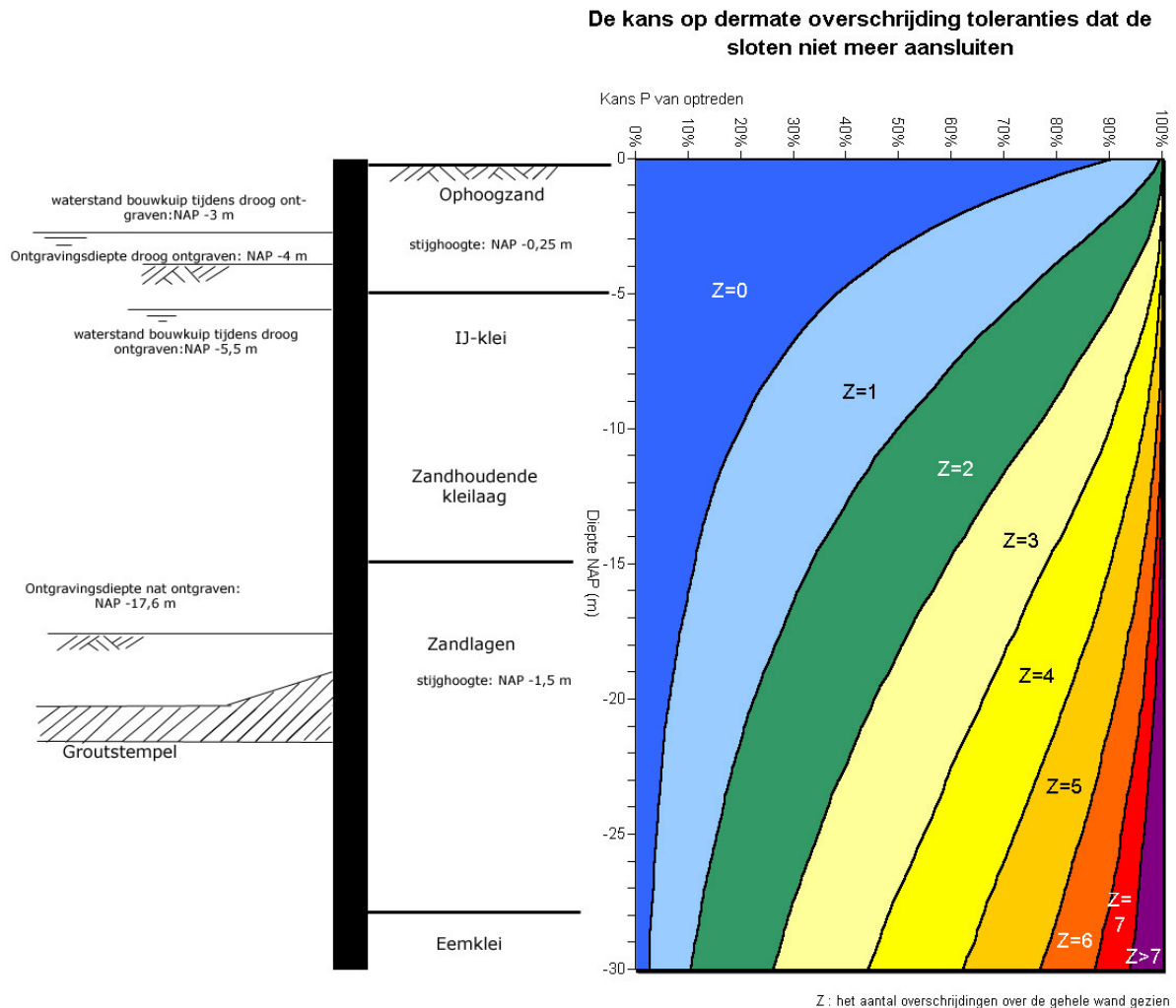
In het onderstaande figuur is voor verschillende hoogteniveaus de kansdichtheidsfuncties van het aantal overschrijdingen weergegeven. Wat opvalt, en ook uit voorgaande grafieken te concluderen was, is dat zowel de verwachtingswaarde als de spreiding van het aantal overschrijdingen rond deze verwachtingswaarde toeneemt over de diepte.



7.6.2 Interpretatie modelresultaten

Het verwachte aantal overschrijdingen van de toleranties van het slot, waarbij dit leidt tot een gat in de wand, is volgens dit model op de voet van de buispalenwand (NAP –30 m) vier. Naarmate de diepte afneemt, zal ook het aantal overschrijdingen afnemen totdat er op maaiveld geen overschrijdingen meer zijn.

Nu is alleen de vraag of het een grote bedreiging is, als er op grote diepte bijvoorbeeld één lek ontstaat. In figuur 7.14 is het kansverdelingsvlak van het optreden van overschrijdingen van de ernstige plastische vervorming (in x-richting 80 mm en in y-richting 50 mm) naast de te beschouwen constructie en het globale grondprofiel neergezet.



Figuur 7.14 Bouwkuipconstructie en kansverdelingsvlak over de diepte

Er blijkt tijdens het droog ontgraven, de eerste fase van het ontgraven van de bouwkuip (§4.12), een maximaal stijghoogteverschil te zijn van ca. 5 m over de wand gezien. Dit geldt echter alleen over het ontgraven gedeelte: de IJ-klei en de zandhoudende kleilaag zorgen voor een waterafsluitende laag. Alleen lekkages in de wand in een bovenste gedeelte van de kleilaag kunnen dan nog voor problemen zorgen.

Tijdens het droog ontgraven is het meest waarschijnlijk dat er één maal de slottoleranties dermate overschreden worden dat de sloten zo plastisch vervormd zijn, dat er lekkage kan optreden. Met 84% zekerheid kan gezegd worden dat het aantal overschrijdingen kleiner is dan 2 en met 95% kleiner dan 2,5. De kans dat er minimaal één lekkage is tot NAP -6 m, is bijna 70%. Vanwege het grote waterstandsverschil tussen de waterstand in de bouwkuip en de grondwaterstand van 5,25 m kunnen er zandvoerende lekken ontstaan. Dit heeft tot gevolg dat het achterliggende maaiveld kan gaan zakken, waardoor de stabiliteit van het stationsemplacement en gebouw IJ-zijde bedreigd worden. Het is overigens niet reëel dat er op maaiveld al een kans bestaat van 10% dat de toleranties overschreden worden. De plaatsing van de buispaal zal worden aangepast aan de omringende, reeds geplaatste palen. De werkelijke kans zal dus lager liggen, zo ook het aantal verwachte overschrijdingen. Deze fout in het model is het gevolg van de aanname dat de buispalen onafhankelijk geplaatst zullen worden. Dit heeft met name invloed op de betrouwbaarheid van het model op het bovenste gedeelte van de buispalenwand, waar met name de invloed van de plaatsing relatief groot is ten opzicht van de invloed van de scheefstand. De aanwezige scheefstand heeft nog niet veel ontwikkelde lengte en daardoor nog niet veel plaatsafwijking tot gevolg.

Tijdens de volgende fase, het nat ontgraven, zal de waterstand in de bouwkuip verhoogd worden tot NAP –3 m. Sloten die geen afsluitende verbinding maken tussen de buispalen over het bovenste gedeelte, tot NAP –6 m, hebben tijdens de fase van het droog ontgraven reeds een lekkage tot gevolg, waar bovendien het waterstandsverschil groter was. Deze lekkages moeten ook hersteld zijn voordat er begonnen kan worden met het nat ontgraven.

De situatie die hier bekeken zal worden om een indruk te krijgen van het aantal mogelijk optredende lekkages, zal zijn op het moment dat het diepste ontgravingsniveau is bereikt: de bovenzijde van het grondpakket in de bouwkuip is dan zo laag mogelijk gelegen. Water dat door een lekkage stroomt boven dit ontgravingsniveau zal zonder enige verdere weerstand in de bouwkuip stromen. Onder het ontgravingsniveau heeft de waterstroom nog weerstand van het grondpakket. Als echter de stroming dermate groot wordt dat deze stroming zand kan gaan meevoeren, zal dit tot gevolg hebben dat er een kanaal voor deze waterstroming ontstaat vanaf het gat in de wand tot aan het bodemvlak van de ontgraving. Op deze wijze ontstaat dan ook een directe verbinding tussen het gat in de wand en de vrij waterspiegel in de bouwkuip.

Zand zal pas gaan uitspoelen als de opwaartse waterdruk groter wordt dan de verticale korrelspanning in het grondpakket. De kritische situatie ontstaat wanneer deze juist evenwicht maken:

$$\Delta h_{krit} \cdot \gamma_w = \Delta z (\gamma_{sat} - \gamma_w)$$

$$i_{krit} = \frac{\Delta h_{krit}}{\Delta z} = \frac{\gamma_{sat} - \gamma_w}{\gamma_w}$$

Hierbij is:

- Δh_{krit} : het kritische stijghoogteverschil in m waterkolom
- Δz : de dikte van het grondpakket vanaf het bodemvlak, in m
- i : het verhang, dimensieloos
- γ_w : het soortelijk gewicht van water: $\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$
- γ_{sat} : het soortelijk gewicht van het grondpakket, in kN/m^3
- $\gamma_{sat} - \gamma_w$ het soortelijk gewicht van het grondpakket onder water, in kN/m^3

Voor het zandpakket ter hoogte van de ontgravingsdiepte, kleihoudend zand, geldt dat $\gamma_{sat} = 19,5 \text{ kN/m}^3$. Het maximale stijghoogteverschil $\Delta h = 1,5 \text{ m}$. Hieruit volgt dus dat de kritische laagdikte Δz , bij de aanname dat er één stroomkanaal aanwezig is, dat gelijk is aan:

$$i_{krit} = \frac{\gamma_{sat} - \gamma_w}{\gamma_w} = \frac{19,5 - 10}{10} = 0,95 \quad \left\{ \begin{array}{l} \Delta z_{krit} = \frac{\Delta h}{i} = \frac{1,5 \text{ m}}{0,95} = 1,6 \text{ m} \\ \Delta h = 1,5 \text{ m} \end{array} \right.$$

Een zandvoerend kanaal zal dus ontstaan als het zandpakket boven de lekkage in de wand dunner is dan 1,6 m. Het minimale ontgravingsniveau gelijk is aan NAP –17,6 m en het maximale NAP –18,1 m. Gaten in de wand onder (NAP –18,1 m – 1,6 m =) NAP – 19,7 m hebben geen zandvoerend lek tot gevolg.

Een extra veiligheid op deze waarde wordt veroorzaakt door de aanwezigheid van het groutstempel. Deze moet ter plaatse van de aansluiting met de wand aanwezig zijn tussen NAP – 19 m en NAP –21,75 m. Dus zelfs als er een grotere variatie in het niveau van de bouwkuipbodembodem is, zal dit nog niet tot gevolg hebben dat er een zandvoerend lek zal ontstaan onder NAP –19 m.

Het maximale verhang dat kan ontstaan door een lekkage die zich onder de groutstempel bevindt, heeft het volgende verhang tot gevolg:

$$i_{max} = \frac{\Delta h_{max}}{\Delta z} = \frac{1,5 \text{ m}}{(NAP - 18,1 \text{ m}) - (NAP - 21,75 \text{ m})} = \frac{1,5 \text{ m}}{3,65 \text{ m}} = 0,4$$

Deze waarde voor het verhang is een orde twee kleiner dan het kritische verhang van de kleihoudende zandlaag.

Zandvoerende lekkages zullen dus niet ontstaan onder het groutstempel. De individuele gaten lager dan NAP –19 m vormen dus geen bedreiging.

Een gat in de buispalenwand onder NAP –19 m zal echter wel een bepaalde hoeveelheid water doorlaten. Een enkel gat zal een beperkt debiet doorlaten en zal geen gevolgen hebben voor de waterstand in de bouwkuip, mits er een pompinstallatie aanwezig is dat het overtollige water kan wegpompen. Er zal hier niet verder op de grootte van het debiet worden ingegaan, aangezien de gatgrootte niet bekend is bij het niet meer aansluiten van de slotdelen. De grootte zal relatief klein zijn, waardoor er geen groot debiet kan ontstaan.

Volgens Darcy geldt immers:

$$Q = A \cdot q = A \cdot k_v \cdot i$$

Hierbij is:

Q het debiet in m³/s

A het oppervlak van het doorstroomvlak, in dit geval het gatoppervlak, in m²

k_v de doorlatendheidscoëfficiënt van de grondlaag in m/s

i Het verhang

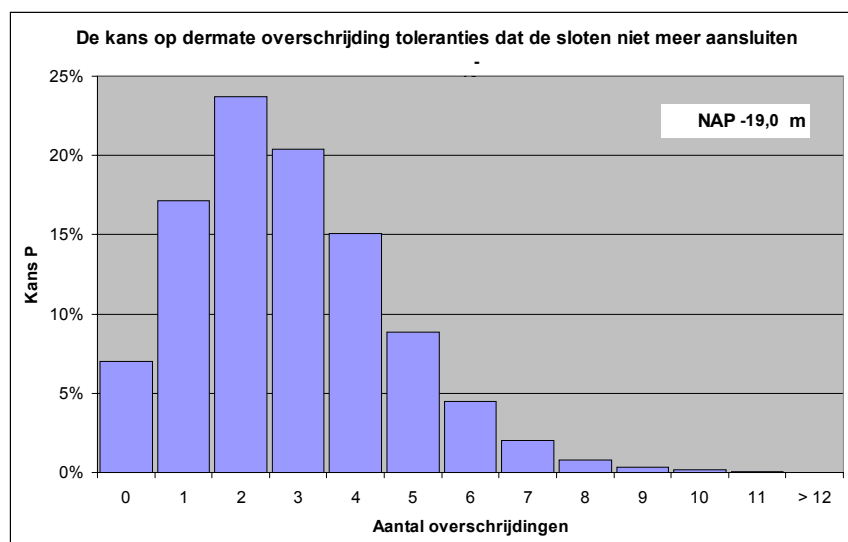
Een enkel gat onder het niveau van NAP –19 m heeft dus nauwelijks gevolgen voor de omgeving: de hoeveelheid wateronttrekking is dermate klein dat er geen stijghoogteverlaging in het omringende zandpakket ontstaat.

Gaten boven dit niveau van NAP –19 m hebben wel degelijk invloed: gaten in de wand tot het ontgravingsniveau (NAP –17,6 m) hebben direct instroming van grond tot gevolg, terwijl vanaf het ontgravingsniveau tot NAP –19 m (het groutstempel) er zandvoerende lekkages kunnen ontstaan.

Als er echter veel gaten in de wand zijn onder het groutstempel, zal het effect echter wel te merken zijn. Door elk gat gaat immers een klein debiet, en de som van deze debieten geeft een bepaald waterbezwaar voor de bouwkuip en een wateronttrekking als gevolg van het gelijk houden van de waterstand in de bouwkuip. Het waterbezwaar kan dermate groot worden, dat de pompinstallatie dit niet meer aan kan. Bijplaatsen van pompen lost dit probleem wel op. De wateronttrekking uit de omgeving kan echter veel negatievere effecten te weeg brengen. Door de verlaging van de stijghoogte in het zandpakket kan de bovenliggende kleilaag gaan zetten en zal de bovenliggende constructie van het station gaan beïnvloeden. Dit dient natuurlijk voorkomen te worden.

Ter hoogte van de kleilagen tussen NAP –5 m en NAP –15 m zal het niet aansluiten van de sloten geen grote gevolgen hebben: de kleilagen zijn dermate niet-doorlatend ($k_v < 5 \times 10^{-8}$) dat hier geen kritische stroomsnelheid van het grondwater verwacht hoeft te worden.

Wel kunnen grote gaten in de wand voor instroming van grond zorgen.



Figuur 7.15 Kansverdeling overschrijding slottolerantie

7.6.3 Conclusies modelresultaten

In figuur 7.15 is de kansverdeling op NAP –19 m weergegeven. Op basis van deze verdeling kan er worden geconcludeerd dat de verwachtingswaarde voor het aantal gaten op 3 neerkomt, terwijl met 24% kans de meest waarschijnlijke waarde gelijk aan 2 is.

Het verwachte aantal gaten onder NAP –21,75 m, maar boven de niet doorlatende Eemklei (NAP –29 m) is vier, waarbij de drie gaten het meest waarschijnlijk is met 18% kans.

7.7 Gevoeligheid model

Verschillende mechanismen zorgen ervoor dat de slottoleranties overschreden worden: de plaatsing, scheefstand, de rotatie van de buis en de diameterafwijkingen van de buispaal. Om te kunnen aangeven in hoeverre het model juiste resultaten geeft, zal de gevoeligheid van het model voor de verschillende invoerparameters nagegaan worden door deze parameters te variëren, met al dan niet fictieve waarden. Op deze wijze kan aangegeven worden wat de invloed is van de verschillende parameters.

De volgende parameters worden gevarieerd:

- Het aantal simulaties
- Wel of niet sturen van de boorkop;
- De nauwkeurigheid van het plaatsen van de boorkop en het eerste segment;
- De menselijke fout voor het sturen;
- De grootte van de rotatie;
- De signaleringswaarde om te gaan sturen;
- En ten slotte de toleranties.

Voor de resultaten wordt verwezen naar bijlage 7, hier worden slechts de conclusies uit de resultaten getrokken met betrekking tot de invloed van een parameter op de uitkomsten.

7.7.1 Het aantal simulaties

Het aantal simulaties is gevarieerd om na te gaan of minder simulaties hetzelfde beeld geven als met 10.000 simulaties. Het aantal simulaties wordt bij deze variatie gehalveerd: 5.000 in plaats van 10.000 simulaties.

De resultaten van deze simulatie geven hetzelfde beeld als die bij 10.000 simulaties. De verandering van de kansen zijn dermate klein (de verandering is kleiner dan 1% van de oorspronkelijke kanswaarde) dat aangenomen kan worden, dat de halvering van het aantal simulaties tot 5.000 geen negatief effect heeft op het kansbeeld.

De overige Monte Carlo simulaties worden om deze reden dan ook met 5.000 simulaties uitgevoerd. Deze simulaties worden gedaan om een indicatie te krijgen van de gevoeligheid van het model voor verandering van de parameters, niet om de juiste waarde te verkrijgen.

7.7.2 Sturen van de boorkop

Na bestudering van het systeem bleek de kop van de boormachine stuurbaar te zijn. Gevoelsmatig zal het sturen een positief effect hebben. Uit deze analyse moet blijken of dit inderdaad effect heeft. Door in het model de mogelijkheid van het correctief sturen uit te zetten, zal de scheefstand van de buispaal vrij spel krijgen.

Uit de resultaten van de simulaties blijkt dat het sturen wel degelijk veel invloed heeft: vanaf NAP –12 m zijn er met een kans van meer dan 80% meer dan 7 overschrijdingen van de toleranties van het slotontwerp.

7.7.3 Foutief sturen

Na het model aangepast te hebben door de kans op het foutief sturen te reduceren tot nul bleek dat dit zo goed als geen invloed had: de verwachtingswaarde op NAP –30 m was hetzelfde als met het model dat wel een kans gaf aan het foutief sturen. De waarde behorende bij de kans op overschrijding van 95% op NAP –30 m was zonder sturen 7,4 maal overschrijding van de toleranties. In het model met foutief sturen was deze waarde 7,6 maal, slechts 0,2 hoger, een afwijking van 2%.

Foutief sturen heeft dus nauwelijks een effect op het overschrijden van de toleranties.

7.7.4 Signaleringswaarde sturen

De nauwkeurigheid van het meten van de scheefstand beïnvloedt het moment van sturen: hoe nauwkeuriger de meting, hoe eerder een te grote scheefstand gecorrigeerd kan worden. De signaleringswaarde is in de oorspronkelijke situatie vastgesteld op 0,5 mm/m. Om aan te geven of een nauwkeurigere meting, en dus eerder een signalering dat er een scheefstand is, positieve invloed heeft, zal de signaleringswaarde worden gevarieerd: er wordt een simulatie gedraaid met een signaleringswaarde die de helft zo groot is als in het oorspronkelijke model: 0,25 mm/m.

De resultaten laten een verlaging van het aantal gaten zien op de diepere niveaus. Tot NAP –15 m zijn de verschillen minimaal. Op NAP –19 m daalt de verwachtingswaarde naar 2,6 gaten en met 95% kans is het aantal gaten kleiner dan 5,5. In de oorspronkelijke simulatie was dit respectievelijk 2,8 en 5,8. Op NAP –30 m zijn deze waarden voor de nauwkeurige signalering 3,8 en 6,9, bij de oorspronkelijke simulatie 7,6.

Op de kritische diepte (NAP –19 m) is het aantal gaten dus nauwelijks veranderd en op de voet van de wand daalt de verwachtingswaarde ook nauwelijks. Alleen de 95% waarde daalt met meer dan 0,5.

De gevoeligheid voor de signaleringsparameter is dus niet groot; het effect tot NAP –19 m is nauwelijks merkbaar en tot NAP –30 m alleen tot voor de kleine kanswaarden voor het grote aantal gaten is er een kleine invloed.

7.7.5 Nauwkeurigheid van het plaatsen

Bij deze variatie wordt de buispaal op maaiveld nauwkeuriger geplaatst: de gemiddelde plaatsingsafwijking wordt nu 5 mm. Echter blijft afwijking van de paalplaats met 95% zekerheid kleiner dan 20 mm: $\sigma = 9,15$ mm.

De resultaten laten een verkleining van de kans op gaten op NAP –19 m zien: de verwachtingswaarde daalt van drie naar twee en de meest waarschijnlijke waarde daalt tevens met één tot één maal overschrijding (25% kans op één maal overschrijding van de slottoleranties op NAP –19 m). De 95% onderschrijdingswaarde van het aantal gaten is nu kleiner dan vijf op NAP –19 m en zes op NAP –30 m. Bij het oorspronkelijke model waren dat respectievelijk zes en acht.

Het aantal maal overschrijding van de slotspeling ligt bij deze plaatsingsnauwkeurigheden met een verwachtingwaarde van vier op NAP –19 m iets lager dan de oorspronkelijk toegepaste plaatsingsnauwkeurigheden, waar deze vijf was.

De nauwkeurigere plaatsing blijkt voor de fase van het droog ontgraven wel veel invloed te hebben: de verwachtingswaarde op NAP –6 m is gedaald van 1,1 naar 0,7. Hierdoor is de

betrouwbaarheid van een waterdichte constructie tijdens het droog ontgraven vergroot. De kans er wel één of meerdere lekkages ontstaan is 50%, en twee of meer 15%. In het oorspronkelijke model zijn deze kansen respectievelijk 60% en 25%.

Het nauwkeuriger plaatsen blijkt het aantal optredende gaten in de buispalenwand met één te reduceren. Het model is dus een beetje gevoelig voor de plaatsingsnauwkeurigheid van de buispalenwand. Met name de kans op een gat in de wand tijdens het droog ontgraven neemt af.

7.7.6 Rotatie van de buispaal

Het roteren van de buispaal heeft meer invloed op de toleranties loodrecht op de wand dan in de richting van de wand.

Door de mate van rotatie te variëren, kan er iets gezegd worden over de gevoeligheid van het systeem voor de rotatie van de buispaal.

Na de rotatie tot nul te reduceren, bleek uit de resultaten van de Monte Carlo simulatie het volgende het geval te zijn: de kans dat er nog een overschrijding van de slottoleranties was, bleek tot nul te reduceren. De verwachtingswaarde op NAP – 30 m is hierbij ook bijna gelijk aan nul. De 95% onderschrijdingswaarde ligt rond de 0,2 tolerantieoverschrijdingen. De invloed van de rotatie lijkt hierdoor zeer groot.

Om te controleren of de uitvoering van de buispalenwand daadwerkelijk erg gevoelig is voor de rotatie van de buispaal om zijn as, zal de rotatie rondom de waarde die gebruikt is bij het oorspronkelijke model, worden gevarieerd. De gekozen waarden zullen de volgende zijn:

- Een halvering van de rotatieparameter: $\mu_\phi = 0$ mm, $\sigma_\phi = 3,1$ mm (90% kleiner dan 5 mm)
- Een vergroting van de rotatieparameter met 50%: $\mu_\phi = 0$ mm, $\sigma_\phi = 9,15$ mm (90% kleiner dan 15 mm)

De resultaten geven het volgende te zien:

- De halvering van de rotatieparameter geeft een gelijkwaardig beeld met het geheel uitbannen van de rotatie: er ontstaat geen lekkage.
- De vergroting van deze parameter daarentegen zorgt voor een enorme toename van het aantal overschrijdingen van de toleranties: de verwachtingswaarde op NAP –19 m is ongeveer 20. Dit is dus niet toelaatbaar.
- Overigens geeft het model geen aantallen overschrijdingen groter dan 20. Deze worden allen bij elkaar geteld en vormen de categorie >20. Vandaar dat de verwachtingswaarde uitkomt op 20. Deze waarde is in ieder geval niet toelaatbaar binnen het systeem. Het aantal > 20 geeft dus een indicatie voor een niet toelaatbare situatie.

Het blijkt dus, dat het systeemmodel zeer gevoelig is voor de rotatie. De verklaring hiervoor zou kunnen zijn, dat de plaatsafwijkingen van de buispaal-as zodanig zijn, dat een kleine verplaatsing van het slot door rotatie net over de slottoleranties gaat. Overigens is het gebied waar in de oorspronkelijke simulatie mee gesimuleerd is, waarbinnen de rotatie met 90% zekerheid valt, al 1/3 van de waarde van de slottoleranties loodrecht op de wand (10 mm als gevolg van rotatie bij 90% zekerheid en de ontwerp-slotspeling is 30 mm) en hij is 1/5 van de tolerantie voor ernstige plastische vervorming.

7.7.7 Toleranties

Er zijn twee variatie mogelijk: de controle van de overschrijding van toleranties en de grootte van de tolerantiewaarden.

De controlemethode voor de tolerantie voor de plastische vervorming die kan leiden tot lekkage zal deze op dezelfde wijze worden getoetst als de slotspeling: als de toleranties overschreden zijn, dan kan de slotconstructie weer in de juiste stand terugkeren: hij zal als het ware niet meer

uit het slot lopen. De slotconstructie kan wel uitbuigen, maar hij zal ook weer kunnen terugkeren naar de oorspronkelijke staat van het slot. Deze variatie geeft een duidelijke verlaging van het optreden van de tolerantieoverschrijding. De gevoeligheid voor het wel of niet uit het slot kunnen lopen is dus groot.

Bij vergroting van de tolerantiewaarden wordt alleen de tolerantie in de y-richting vergroot tot 80 mm. Het blijkt dat hierdoor de kans op een overschrijding van de toleranties naar nul gereduceerd wordt. Het slot zal dus niet meer dan 80 mm onderlinge plaatsafwijking tussen de slotdelen hoeven te dragen.

7.7.8 Conclusies gevoeligheid

Uit de variatie van de invoer blijkt dat voornamelijk de invloed loodrecht op de wand van belang is. Dit is voornamelijk gestoeld op het feit dat dit de richting is waarin de kleinste plaatsafwijkingen voor het slot toegestaan zijn. De verschillende parameters (de plaatsing en de rotatie) zijn met waarden binnen het 90%-zekerheidsgebied al snel meer dan 20% van de tolerantie loodrecht op de wand, terwijl dit dan 10% is van de waarde in de langsrichting van de wand:

Parameter	90% waarde	Slotspeling		Ernstige vervormingen (slottoleranties)	
		Verhouding tot x-waarde (60 mm)	Verhouding tot y-waarde (30 mm)	Verhouding tot x-waarde (80 mm)	Verhouding tot y-waarde (50 mm)
Plaatsing	20 mm	33%	66%	25%	40%
Rotatie	10 mm	16%	33%	12,5%	20%

Tabel 7.3 Vergelijking 90% waarden invoerparameters t.o.v. toleranties van het slot

Door deze gevoeligheid voor de y-richting is het model gevoelig voor de rotatie en de plaatsing van de buispalen in combinatie met de waarde van de toleranties.

Daarnaast moet de boormachine met zorg ontworpen worden, dat deze ten alle tijden de correctieve stuurmanoeuvre uit kan voeren. Als dit stuursysteem uitvalt, zal de waterdichtheid van de wand veel minder worden: het aantal optredende lekkages neemt dan zorgwekkende vormen aan.

7.8 Conclusies van het slotmodel

Dit model geeft onder de gestelde onzekerheden aan dat het verwachte aantal gaten in de buispalenwand, die zich tot een zandvoerend lek kunnen ontwikkelen, drie is, waarbij met 80% zekerheid gezegd kan worden dat dit aantal kleiner is dan vier. Tijdens het droog ontgraven zal er naar alle waarschijnlijkheid één lekkage ontstaan.

De kans op veel wateronttrekking uit de omgeving wordt zeer klein geacht, omdat het aantal verwachte gaten boven de Eemklei-laag met meer dan 95% zekerheid kleiner zal zijn dan 8. Het aantal gemodelleerde gaten is echter zeer gevoelig voor de invoerparameters voor de plaatsing en de rotatie.

Op basis van deze modeluitkomsten, met name de gevoeligheidsanalyse, wordt aanbevolen om verder onderzoek te doen naar de mogelijke vervormingen van het slot zonder dat het tot een lekkage leidt en hoe dit slot vervolgens reageert op een overschrijding in relatie tot het dieper inbrengen van de buispaal: als er inderdaad een lekkage optreedt, is de de verbinding uit het slot gelopen, of zullen de slotdelen op diepere niveaus weer kunnen aansluiten tot een waterdichte verbinding? Met name geldt dit voor het gedrag van het slot bij overschrijding van de toleranties loodrecht op de wand, aangezien hierdoor het slot zal uitbuigen.

Nauwkeurigheid bij plaatsing en de mate van controleerbaarheid en correctie van de rotatie van de buispaal zou enige verbetering moeten ondergaan om de betrouwbaarheid van het maken van een grond- en waterkerende constructie te verhogen.

Gezien het kleine aantal gaten op NAP – 19 (80% kans op vier of minder gaten, 95% kans op vijf gaten of minder) lijkt het puur financieel gezien niet aantrekkelijk om extra voorzieningen te treffen om de betrouwbaarheid van de grond- en waterkerende functie van de buispalenwand te verhogen, zoals het toepassen van een groutkolom achter ieder slot. Veel beter lijkt het om de hierboven aanbevolen verbeteringen toe te passen, waardoor de kans op gaten aanzienlijk zal afnemen.

De afweging die gemaakt zou moeten worden om de waterdichtheid van de wand voldoende betrouwbaar te achten, zal gebaseerd moeten zijn op een kostenvergelijking tussen lekdetectiemethoden inclusief de mogelijkheden ervan en de kosten voor correctieve maatregelen tegenover het toepassen van een extra afdichtende verbinding tussen de buispalen, zoals het al eerder genoemde toepassen van een groutkolom achter het slot.

Bij lekdetectiemethoden valt te denken aan een pompproef. Hierbij wordt de waterspiegel in de kuip verlaagd en wordt dit peil constant gehouden. Enige tijd nadat het peil zich heeft ingesteld, geeft het pompdebiet aan wat het waterbezwaar is van de bouwkuip, waaruit afgeleid kan worden of er lekkages aanwezig zijn en hoe groot het totale gatoppervlak mogelijk is. Een pompproef geeft dus alleen een indicatie van de grootte van de lekkage, de gaten zijn niet te lokaliseren. Een variant hierop is het meten van het volume van het af te pompen water uit de bouwkuip en dat te vergelijken met de theoretische waarde. Als deze theoretische waarde wordt overschreden, kan dit duiden op een lekkage in de wand.

Lekdetectiemethoden die wel gaten kunnen lokaliseren zijn onder meer [Admiraal, 2000]:

- Het toepassen van geavanceerde sondes;
- De ECR (Electro Chemical Response) door de firma Texplor;
- Thermische lekdetectie door de firma GTC Kappelmeyer GmbH.

De eerst genoemde staat nog in de kinderschoenen, terwijl de laatste twee nog niet veel zijn toegepast in Nederlandse situaties. Een voorwaarde bij de thermische lekdetectie is dat er door het bouwproces van de wand een temperatuursverhoging in de bodem moet zijn aangebracht, zoals bij jet-grouten, diepwanden en injectielagen. Hierdoor is deze methode alleen toepasbaar bij de sandwichwand en niet bij de buispalenwand. De voorkeur van lekdetectiemethode zou in dit geval liggen bij de door de firma Texplor toegepaste ECR.

Het nadeel van deze detectiemethoden is dat de controle achteraf gebeurt nadat de gehele bouwkuip al gereed is en dat er voor de controle een waterstandsverschil nodig is. Als er inderdaad een lek is, zal er water uit de omgeving onttrokken worden.

Maatregelen om de gaten te dichten kunnen bestaan uit:

- Het injecteren van de ruimte tussen de buispalen waar het lek zich manifesteert. Deze injectie kan met bijvoorbeeld grout, bentoniet of een chemische injectie vanaf de achterzijde van de sloten. Voorwaarde is wel dat er niet een te groot potentiaalverschil heerst over deze lekkage. Om dit schil te verkleinen moet de waterstand in de bouwkuip gelijk worden gemaakt aan de potentiaal aan de andere zijde van de lekkage;
- Het dichten van de lekken kan ook vanuit de bouwkuip geschieden: met behulp van het dichtlassen of –kitten kunnen de lekkages worden gedicht. Als de lekkage zich onder de waterspiegel bevindt, kan er een duiker worden ingezet om deze lekkage te dichten. Hierbij verdient de veiligheid van de duikers wel veel aandacht.

Een methode om iets te zeggen over de aanwezigheid van het slot op een bepaalde diepte is het toepassen van slotverklikkers. Deze methode kan gezien de slotgeometrie echter alleen een indicatie geven of het slot wel op die diepte is gepasseerd. Door uitbuigen van de slotdelen, kan er echter wel een lekkage ontstaan, terwijl de slotverklikker aangeeft dat het slot aanwezig is. Toch zal het toepassen van slotverklikkers enige zekerheid geven over de aanwezigheid van het

slot op een bepaalde diepte. Aanbevolen wordt dan ook om slotverklikkers toe te passen op NAP – 19 m en NAP – 29 m.

De meest kritische situaties ontstaan als er een potentiaalverschil over de lekkende slotverbinding staat. Tijdens het ontgraven staat er over de verschillende grondlagen een maximaal stijghoogteverschil van 5,25 m tussen de bovenste grondlaag (ophoogzand) en de waterstand in de bouwkuip. Tussen de zandlagen tussen NAP –15 m en NAP –29 m en de waterstand in de bouwkuip. (§4.12) is er een potentiaalverschil van maximaal 1,5 m tijdens het nat ontgraven (§4.12) en tijdens het invaren en afzinken (§4.2 en bijlage 2).

De kritische situaties zijn dus aanwezig tijdens het droog ontgraven, nat ontgraven en het afzinkproces. Tijdens deze situaties moeten er bij het optreden van een lekkage noodscenario's klaarliggen om het potentiaalverschil op te heffen en de lekkages te dichten door bijvoorbeeld groutinjecties en/of dichtlassen van de gaten.

Het potentiaalverschil opheffen kan door de waterstand in de bouwkuip te verhogen tot de stijghoogte achter de wand. Deze stijghoogte achter de wand verlagen tot de waterstand in de bouwkuip is geen optie: een verlaging betekent immers dat er zettingen in en om het station kunnen gaan optreden.

Problemen kunnen ontstaan als het materieel dat in de bouwkuip aanwezig is, geen ruimte voldoende beschikbaar heeft als de waterstand omhoog komt, zoals het graafmaterieel tijdens het ontgraven en de pontons waar het tunnelelement aan hangt als het element afgezonken zal worden.

Het verhogen van het waterpeil in de bouwkuip tot NAP –1,5 m wanneer de pontons in de bouwkuip liggen en het tunnelelement hier aan hangt is mogelijk, maar tijdens het nat ontgraven kan het problemen veroorzaken voor het graafmaterieel. Voorzieningen om voldoende ruimte te bieden aan dit graafmaterieel moeten genomen worden, of het materieel moet dusdanig snel uit de bouwkuip gevaren kunnen worden dat deze voorzieningen niet nodig zijn.

Ook dient er tijdens het omhoog brengen van de waterstand in de bouwkuip tijdens de afzinkproces de positie van het tunnelelement goed gemonitord worden, omdat het tunnelelement zich bevindt onder de stalen stempels (NAP –4,5 m), die zich ter plaatse van de sandwichwand bevinden. Als de positie van het element de stalen stempels dreigt te raken, zal het tunnelelement voldoende snel afgelieerd moeten kunnen worden om de stijging van het waterpeil te kunnen volgen.

Als het waterpeil verhoogd dient te worden totdat het gelijk is aan de grondwaterstand (NAP – 0,40 m) zal het graafmaterieel uit de bouwkuip verwijderd moeten worden. De pontons kunnen nog wel aanwezig blijven, mits de primaire balken niet aanwezig zijn op de plaats waar de pontons omhoog komen. Ook dienen de pontons een zeer kleine vrijboord te hebben, omdat anders de tafelconstructie van het emplacement geraakt kan worden.

Lekkages tijdens het afzinkproces verdienen dus veel aandacht en zullen de posities van de beide pontons en hun vrijboord tijdens het afzinkproces goed overwogen moeten worden om eventuele noodscenario's ten gevolge van de lekkages in de bouwkuipwanden met zo min mogelijk negatieve effecten te doorlopen.

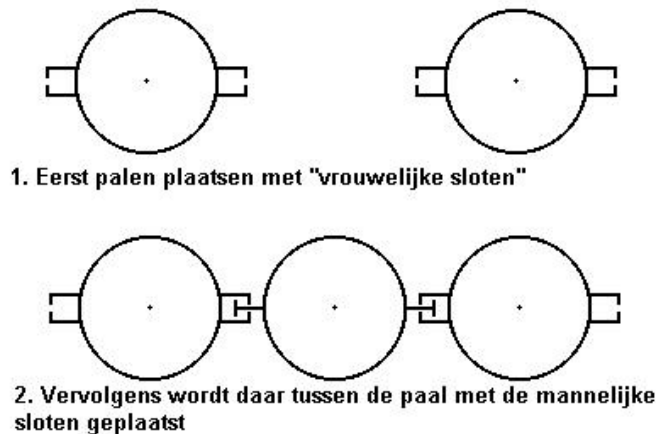
7.9 Het model tegenover de werkelijkheid

Een opmerking bij de resultaten van de modelsimulaties: er is in dit model geen rekening gehouden op het vastlopen van een paal. De kans op een obstakel of iets dergelijks, waardoor de boormachine vastloopt, wordt geschat op 0,001. Hieruit volgt dat er bij 92 palen de verwachtingswaarde voor het aantal maal dat er een obstakel is, waar de boormachine op vastloopt, gelijk is aan:

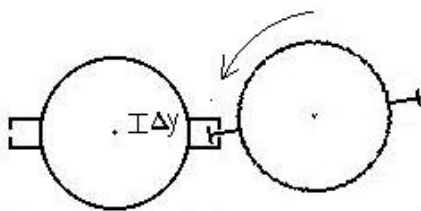
$$E(x) = n \times P = 92 \times 0,001 = 0,092$$

Het is dus niet erg waarschijnlijk dat dit gebeurt, maar als het optreedt heeft dit wel direct een groot gat tot gevolg: de buispaal met een diameter van 1820 mm en ontbreekt dan en er is dan dus een gat met een breedte van ongeveer 1900 mm (inclusief het ontbreken van het slot van die buispaal) ontstaan. In het ontwerp van de boormachine wordt om deze reden dan ook een verspaner of vergruizer toegepast, waardoor de kans op vastlopen van de boormachine door een obstakel verkleind wordt tot 0,001.

Daarnaast zullen in werkelijkheid de buispalen zich niet onafhankelijk van elkaar gedragen. In het model is deze aanname echter wel gedaan. Ten eerste zal de plaatsbepaling op maaiveld worden aangepast aan de reeds bestaande buispalen. De palen met de vrouwelijke sloten worden wel onafhankelijk geplaatst, waarna daartussen de buispaal met de mannelijke sloten (die in de vrouwelijke sloten worden aangebracht) worden geplaatst. De buispalen met de vrouwelijke sloten worden dus wel onafhankelijk geplaatst, terwijl de positie van de buispalen met de mannelijke sloten aangepast worden aan die van de reeds geplaatste palen.



Figuur 7.16 Plaatsingsvolgorde buispalen



Figuur 7.17 Rotatie door plaatsafwijking

Ook de rotatie van de tussenliggende buispaal zal de vervormingen en verplaatsingen van de reeds aangebrachte buispalen, tot een maximum, willen volgen. Ook als de buispalen enigszins uit elkaar gaan lopen, zal de tussenliggende buispaal enigszins willen roteren met de verplaatsingen zodanig dat de slotdelen nog in elkaar grijpen. Dat kan tot een maximum door de slottoleranties in de richting van de wand en de invloed van het slot van de buispaal aan de andere zijde van de buispaal met de mannelijke sloten.

Hieruit volgt dat de buispalen zich niet onafhankelijk gedragen in de werkelijkheid, maar zij zullen op elkaar reageren. Door deze reactie zal de plaatsafwijking van de buispaal ten opzichte van de aanliggende palen minder groot zijn dan kan geconcludeerd worden uit het model. Met name de rotatie zal hierdoor minder groot zijn. Aangezien het model gevoelig is voor deze parameter zal de werkelijke verwachtingswaarde voor het aantal gaten lager uitkomen dan die uit het model.

Tijdens de preproef van het microtunnellingsysteem bleek na het inmeten van een buispaal met vrouwelijke sloten, dat deze paal op een aantal meters diepte een knik vertoonde. De aansluitende buispaal met mannelijke sloten werd daarom tijdens het inbrengen zodanig bijgestuurd, dat deze de reeds geplaatste buispaal zou moeten volgen. Na inmeten van deze “mannelijke” buispaal bleek dat dit goed was gelukt.

De plaats van de mannelijke buispalen is dus wel degelijk afhankelijk van de positie van de reeds geplaatste buispalen. Door deze afhankelijkheid zal de onderlinge plaatsafwijking minder groot zijn dan in het model met onafhankelijke plaatsing. Er zullen dus minder lekkages optreden. Daarnaast is het ook mogelijk om de lengte van de slotdelen aan te passen, zodat de mannelijke buispalen beter zullen passen tussen de buispalen met vrouwelijke sloten.

Om ook daadwerkelijk van een lagere kans op gaten uit te gaan, zal het model aangepast moeten worden. Hierbij zal de positie, scheefstand en rotatie van buispalen met “mannelijke” sloten afhankelijk gemaakt moeten worden van de reeds geplaatste buispalen met de “vrouwelijke” sloten.

Tijdens de toepassing van het microtunnellingsysteem onder het emplacement van het Amsterdamse Centraal Station zullen de verschillende parameters gemonitord moeten worden om de van te voren ingeschatte parameters te verifiëren. Als de gemeten parameters veel afwijken van de ingeschatte waarden, kan eventueel het model bijgesteld worden met de gemeten waarden om reëlere resultaten uit de simulaties te verkrijgen.

Hoofdstuk 8 Conclusies en aanbevelingen

8.1 Conclusies

Het ontwerp van de bouwkuip onder het Amsterdam Centraal Station heeft met zeer veel verschillende bedreigingen te maken en worden er zeer hoge eisen gesteld aan de te bouwen constructies ten behoeve van de Noord/Zuidlijn en aan de uitvoering ervan vanwege de complexe situatie: het station is een belangrijk openbaar vervoersknooppunt en het stationsgebouw is een monument. Hinder voor de omgeving is niet wenselijk en vervormingen van de bouwkuip en lekkages in de wanden, die leiden tot zettingen van het stationsgebouw en emplacement zijn niet toelaatbaar.

Na de bedreigingen voor deze bouwkuip geïnventariseerd te hebben en de onderlinge relaties zichtbaar te hebben gemaakt in een invloedsboom, bleek dat de waterdichtheid van de bouwkuip nog zeer veel bedreigingen kende met vele oorzaken.

De voet van de bouwkuipwanden komt op NAP –30 m, en staat daarmee minimaal 1 m in de Eemklei. Hiermee wordt een voldoende waterdichte horizontale afsluiting van de bouwkuip gerealiseerd.

Om aan te tonen dat de oplossing voor de buispalenwand onder het emplacement voldoende betrouwbaar is om een waterdichte wand te creëren, is er een Monte Carlo simulatie gedaan op basis van de onzekerheden voor plaatsing, scheefstand, maattoleranties van de buis en rotatie van de buis.

Uit het model volgt dat de kansverdeling voor het aantal gaten op NAP –19 m, het hoogteniveau tot waar een enkel gat kan leiden tot een zandvoerend lek, laat zien dat er drie gaten verwacht worden en kan er met 84% zekerheid gezegd worden dat het aantal gaten kleiner zal zijn dan vijf. Bij de voet van de buispalenwand wordt verwacht dat het aantal gaten, die kunnen leiden tot een wateronttrekking uit de omgeving, uitkomt op vier, met 84% zekerheid dat deze waarde kleiner zal zijn dan 6.

Het werkelijk optredende aantal gaten zal in de praktijk lager uitkomen dan op basis van het model geconcludeerd kan worden. In het model is er uitgegaan van onafhankelijke plaatsing en onafhankelijk gedrag tijdens het boorproces van de buispalen; in werkelijkheid zullen de buispalen wel degelijk invloed hebben op elkaar. Het model bleek zeer gevoelig te zijn voor de rotatie van de buispaal, en juist deze zal beïnvloed worden door de omringende palen. Daarnaast zullen de mannelijke buispalen worden geplaatst waarbij de paal zodanig gestuurd zal worden dat deze de aansluitende vrouwelijke buispalen zo goed mogelijk zal volgen. Een aangepast Monte Carlo model inclusief deze afhankelijkheid zou dan ook uitgewerkt moeten worden om de kans op gaten beter te benaderen.

Ondanks dat de microtunnellingmethode een nieuwe, innovatieve uitvoeringstechniek is die nog niet toegepast is op deze wijze, lijkt de buispalenwand aangebracht middels deze microtunnellingmethode volgens het Monte Carlo-model dan ook veel belovend om op deze wijze gerealiseerd te worden onder het Amsterdam Centraal Station, mits er nog een aantal zaken onderzocht worden, zoals de slottoleranties, de beheersbaarheid van de buisrotatie en de afhankelijke plaats van de mannelijke buispalen in het model.

De waterdichtheid van de buispalenwand is echter niet alleen afhankelijk van de waterdichtheid van de buispalenwand. De waterdichtheid van de overige waterkerende constructies zal een even grote rol spelen, waarbij veel aandacht naar de sandwichwand zou moeten gaan vanwege de vele onzekerheden die met name in de plaatsingstoleranties van de groutkolommen gezocht zou moeten worden en de gevolgen van een lekkage op het monumentale Stationsgebouw.

8.2 Aanbevelingen

Om de betrouwbaarheid voor de waterdichtheid van de buispalenwand te verhogen, en dus ook om de uitvoeringsmethode te verbeteren, zal er een onderzoek gedaan moeten worden naar de maximaal mogelijke slottoleranties die mogen optreden voordat er een lekkage ontstaat.

Daarnaast zou de rotatie van de buispaal gecontroleerd moeten kunnen worden en tijdens het boorproces corrigeerbaar moeten zijn. Het toepassen van slotverklikkers op NAP –19 m en NAP –29 m zouden ook toegepast moeten worden om er zeker van te zijn dat het slot op die diepteniveaus aanwezig is, ondanks dat dit nog geen nog garantie geeft dat het slot dan ook daadwerkelijk waterdicht is.

De afhankelijkheid van de plaatsing van de mannelijke buispalen van de omringende vrouwelijke buispaalplaats zal nog verder onderzocht dienen te worden door in het model de plaatsing van de mannelijke buispaal afhankelijk te maken van de reeds geplaatste omringende vrouwelijke buispalen. Tevens kunnen de resultaten van de bovenstaande onderzoeken naar de maximale slottoleranties en beheersbaarheid van de buisrotatie in het model worden geïmplementeerd om een betere benadering van de kans op lekkages te verkrijgen.

Om het overgebleven risico door de kans op gaten in de wand te reduceren, zal er een afweging gemaakt moeten worden tussen:

- preventief het aantal gaten beperkter houden, door bijvoorbeeld extra groutkolommen achter het slot te plaatsen, met daarbij de dan nog resterende kans op lekkages in de wand niet uit het oog te verliezen;
- en een lekdetectiemethode, zoals de ECR-methode van de firma Texplor, in combinatie met herstelmogelijkheden, zoals de lekkages te injecteren met bijvoorbeeld grout of de lekkages dicht te lassen.

Daarnaast moeten noodscenario's opgesteld worden om de gevolgen van eventuele lekkages die optreden tijdens de verschillende fases, te beperken. Dit kan door onder meer de waterstand in de bouwkuip gelijk te maken aan de stijghoogte in het grondpakket buiten de bouwkuip en de lekkages te dichten. Als er een lekkage tijdens het nat ontgraven ontstaat, moet het graafmaterieel voldoende snel verwijderd kunnen worden uit de bouwkuip. Tijdens het afzinken moeten de positie en het vrijboord van de pontons, waar het tunnelelement aan hangt, met zorg gekozen worden, zodat de stijging van het waterpeil in de kuip mogelijk blijft zonder de constructie te raken.

Een kwantitatieve analyse van het risicodossier in combinatie met de invloedsboom en de uitkomsten van het Monte Carlo model voor gaten in de buispalenwand zal meer inzicht geven in de daadwerkelijk optredende risico's, uitgedrukt in geld en tijd en de grootte van de verschillende risicobijdragen op de totale kosten. Om het project te beheersen kan een dergelijke analyse een hulpmiddel zijn bij het zo efficiënt mogelijk aanwenden van de beschikbare middelen.

Literatuur

- Admiraal, B.J., Lekdetectiesystemen, 'voor bouwputten en andere ondergrondse waterkerende constructies, uit: *Geotechniek*, april 2000, jaargang 4 (2000), p. 28-35
- Bos, R.M. en J. Herbschleb, 'Zwel van bouwputbodems', uit: *Geotechniek*, januari 2002, jaargang 6 (2002), p. 50-55
- Bosma, C.F., *Werkplan pré-proef microtunnelling*, intern rapport Combinatie Strukton Betonbouw / Van Oord ACZ, 2002
- Centrum Ondergronds Bouwen, *Handboek ondergronds bouwen, deel 2: Bouwen vanaf het maaiveld*, 2000: Balkema BV, Rotterdam
- Centrum voor Regelgeving en Onderzoek in de Grond-, Water- en Wegenbouw en de Verkeerstechniek (CROW), RAW, <http://www.crow.nl/>
- Construeren met grond*, CUR-publicatie 162, 1992: CUR, Gouda
- Coördinatie Stationseiland Amsterdam, *Naar een nieuw reizigerseiland*, Amsterdam: Coördinatie Stationseiland Amsterdam Centraal, 2001
- Duijvestein, A.M.W. en B.J. Schat, 'Een kanaal onder het Centraal, Bouwput Noord/Zuidlijn, passage Amsterdam CS', uit: *Cement, Bouwputten en Funderingen*, nummer 3 2001: Stichting ENCI Media, 's Hertogenbosch, p. 41-47
- Gemeente Amsterdam, *De Noord/Zuidlijn*, <http://www.ivvamsterdam.nl/nzlijn/index2.html>
- Gemeente Amsterdam, *Het Stationseiland*, <http://www.stationseiland.amsterdam.nl>
- Heijnen, W.J., *Damwandconstructies*, CUR-publicatie 166, 1997: CUR, Gouda
- Institution of Civil Engineers and the Faculty and Institute of Actuaries, *RAMP, Risk Analysis and Management for Projects*, Londen: Thomas Telford Publishing, 1998
- Kenniscentrum RISMAN, *Het RISMAN-proces, Een instrument voor het risicomanagement van grote infrastructuurprojecten*, Gouda, 1998
- Kenniscentrum RISMAN, *Het RISMAN-proces, Risicomanagement voor infrastructuurprojecten, Naar een betere beheersing van Tijd, Geld en Kwaliteit*, Gouda, 1998
- Kennisnetwerk Risicomanagement, *RISMAN-website*, <http://www.risicomanagement.nu>
- Koster, S., 'Imperfecties in jetgroutlagen', *Geotechniek*, oktober 2000, jaargang 4 (2000), p. 52-56
- Maertens, J., P de Vleeschauwer, J.P.G. Ramler et al, 'Toepassing jetgroutwand bij bouwkuip IJ-tram Amsterdam', *Geotechniek*, oktober 2002, jaargang 6 (2002), p. 14-19
- Obladen, B.K.J., 'Het maken van funderingen in beperkte ruimten', *Geotechniek, special Geotechniek 2001*, jaargang 5 (2001), p. 70-73
- Riel, A.J.E., A.F. van Tol en J.K. Vrijling, 'Op weg naar een verantwoord ontwerp van jetgroutlagen', *Geotechniek*, oktober 2000, jaargang 4 (2000), p. 58-65
- Risk Analysis and Management for Projects (RAMP), <http://www.ramprisk.com>
- Rijkswaterstaat Bouwdienst, *Risicomanagement, Praktijkervaringen aan de hand van grote infrastructuurprojecten*, Bouwdienst Rijkswaterstaat, Projectbureau RISMAN, 2002
- Rijkswaterstaat Bouwdienst, *RISMAN Quick Scan voor planningen*, Utrecht, 2000
- Stichting CUR, *CUR-publicatie 190: Kansen in de civiele techniek. Dl. 1. Probabilistisch ontwerpen in theorie*, Gouda: CUR, 1997
- Stichting PAO, *Risicomanagement bij bouw en infrastructuur (RISMAN)*, Delft: Stichting Post Academisch Onderwijs, 2002
- Stichting PAO, *Voorzien, onvoorzien of onzeker?*, Delft: Stichting Post Academisch Onderwijs, 1999

- Stoel, A.E.C. van der, *Grouting for Pile Foundation Improvement*, Delft: DUP Science, 2001
- Strukton Betonbouw BV, *Tubex BV*, <http://www.strukton.com>
- Thomson, James C, *Pipejacking and microtunnelling*, London: Blackie Academic & Professional, 1993
- Vleeschauwer, P. de, J. Maertens en L. Smits, *VHP-grouting, aanwinst voor funderingstechniek*, in: 'Funderingen'.
- VOF Stationseiland, *Eindrapportage C&E team t.b.v. keuze uitvoeringsmethode verticale begrenzing bouwput onder Centraal Station*, intern rapport VOF Stationseiland, 2002
- Weele, A.F. van, *Moderne funderingstechnieken*, 2^e druk, Leiden: SMD, 1999
- Willenfors, Pär, *Shaft boring for the storage of used nuclear fuel*, "A new drilling method is tested and evaluated under realistic conditions", Drillcon AB: <http://www.drillcon.se/news%20nuclear.html>, 2000

Bijlagen

Bijlage 1 Bovenaanzicht sandwichwand en buispalenwand

Bijlage 2: Afzinkfasering

Bijlage 3: Jetgrouten

Bijlage 4: Koppelslot buispalen volgens microtunnellingmethode

Bijlage 5: Risicodossier

Bijlage 6: Invloedsboom

Bijlage 7: Resultaten Monte Carlo simulaties model buispalenwand

Bijlage 1

Bovenaanzicht sandwichwand en buispalenwand

Bijlage 2:

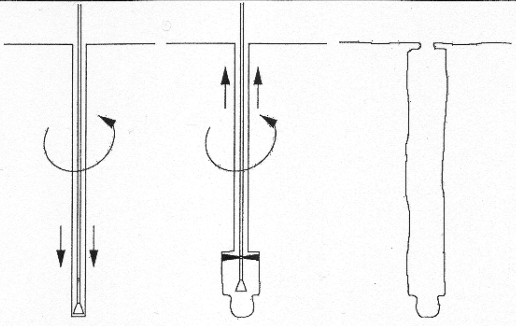
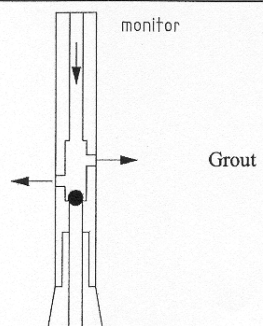
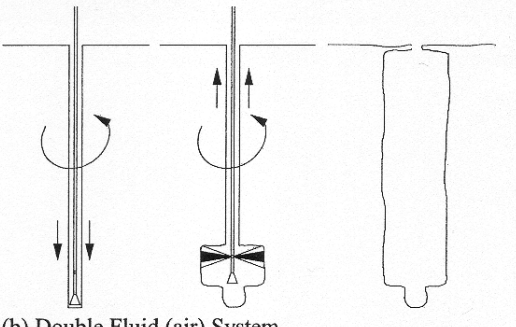
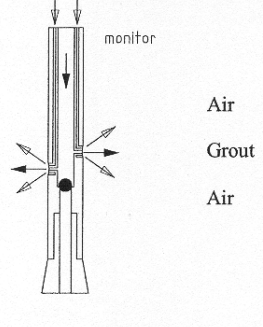
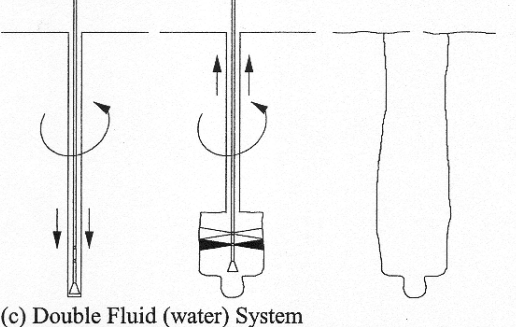
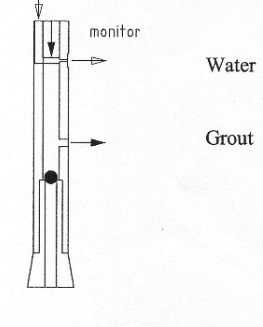
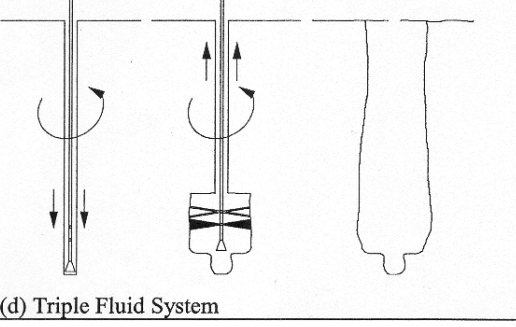
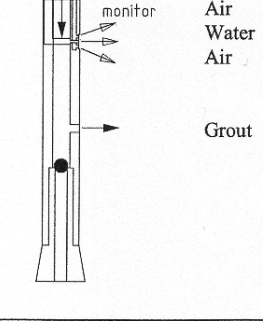
Afzinkfasering

Bijlage 3:

Jetgrouten

Hieronder staan de gangbare methoden weergegeven voor jetgrouten (uit: *Van der Stoel, 2001*)

JET GROUTING

Jet Grouting System	Monitor Detail
 (a) Single fluid system	 monitor Grout
 (b) Double Fluid (air) System	 monitor Air Grout Air
 (c) Double Fluid (water) System	 monitor Water Grout
 (d) Triple Fluid System	 monitor Air Water Air Grout

Bijlage 4:

Koppelslot buispalen volgens microtunnellingmethode

Bijlage 5:

Risicodossier

Selectie voor de bouwkuip

Bijlage 6:

Invloedsboom