

---

# Ontwerp en Uitvoering

## Ondergronds Station

### Delft

*M. Smitt*

Begeleiders:

prof.ir.A. Glerum (TU Delft)

ir.K.G. Bezuyen (TU Delft)

ing H.J. Hagen (HBW)

ir.B. Polen (TU Delft)

*Overname van tekst, afbeeldingen en/of berekeningen uit dit rapport is volledig voor eigen verantwoordelijkheid en slechts toegestaan na voorafgaande toestemming van auteur en betrokken begeleiders.*

## Voorwoord.

Ondergronds bouwen, een verschijnsel dat meer en meer in de belangstelling komt te staan. Daar waar boven de grond de ruimte schaars is, wordt gezocht naar ondergrondse alternatieven. De belangstelling voor het ondergrondse is vooral erg groot daar waar dit infrastructurele projecten betreft. De laatste tijd is dit met name de spoorinfrastructuur. Zie bijvoorbeeld alle verhitte discussies omtrent de voorgenomen aanleg van de Betuwespoorlijn.

Het ondergronds bouwen is ook het onderwerp van mijn afstudeerwerk, waarvan dit rapport het verslag is. Beschreven is het ontwerp en de uitvoering van een ondergronds station te Delft, deel uitmakend van een door een samenwerkingsverband tussen NS en een combinatie van aannemers (NS-BTC) bestudeerd (boor-)tunneltracé.

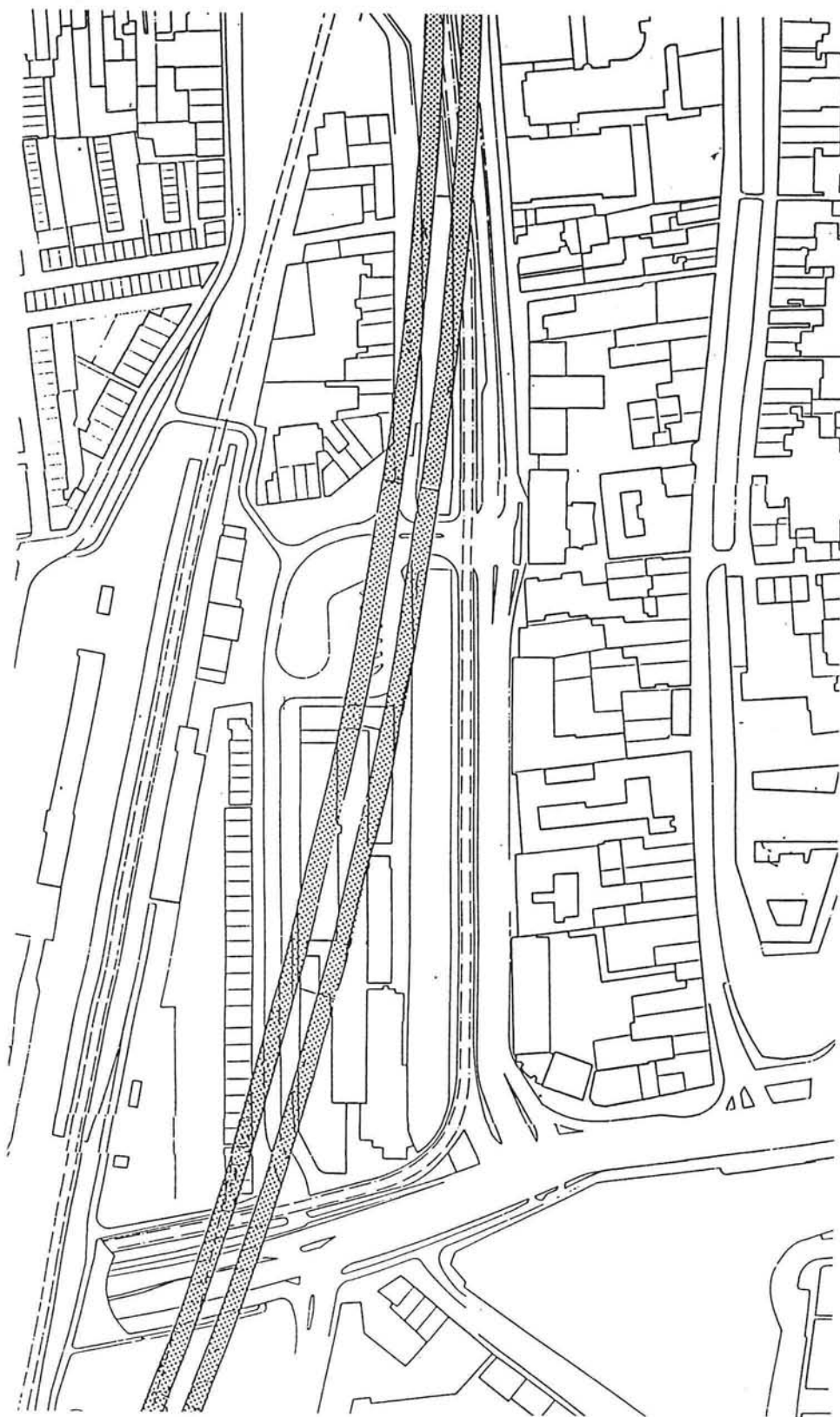
De vele benodigde gegevens, die onder andere als randvoorwaarden golden voor dit afstudeerproject zijn ter beschikking gesteld door de Hollandsche Beton- en Waterbouw (HBW) te Gouda. Mijn begeleider vanuit HBW, de heer H.J. Hagen en vele van zijn medewerkers wil ik bijzonder danken voor de door hen vrij gemaakte tijd en verleende ondersteuning. Deze ruggespraak met de praktijk is voor mij erg leerzaam geweest.

Ook wil ik mijn begeleiders vanuit de Universiteit, de heer K.G. Bezuyen en de heer B. Polen bedanken voor hun nuttige aanwijzingen. Last but not least dank ik mijn afstudeerhoogleraar professor A. Glerum, die met zijn jarenlange ervaring op het gebied van infrastructurele projecten, en met name de tunnelbouw, mijn plannen altijd grondig en nauwgezet bestudeerde en met zijn adviezen een waardevolle begeleiding heeft gegeven.

Tot slot dank ik verder een ieder die mij op welke manier dan ook heeft bijgestaan bij de totstandkoming van dit afstudeerproject.

Rotterdam, 16 augustus 1993

M. Smitt



Figuur SV.1 Plattegrond tunneltracé.

## Samenvatting.

Het plan Rail 21 van de NS voorziet in een viersporig spoorwegnet in de gehele Randstad. Op vele spoortrajecten moeten spoorverdubbelingen worden gerealiseerd. Dit betekent voor het baanvak door Delft een uitbreiding naar vier sporen. Voor Delft is door de studiegroep NS-BTC<sup>1</sup> hiervoor een twee-sporige tunnelvariant uitgewerkt, met hierin opgenomen een geboorde tunnel. In de toekomst zullen twee sporen (de huidige sporen) gebruikt worden als 'stoptrein'-sporen. De twee nieuwe (ondergrondse) sporen zullen gaan dienen voor sneltreinen en Intercity-treinen, de z.g.n. 'snelsporen'. Ter hoogte van het huidige NS-station zal een ondergronds station in dit tunneltracé worden aangelegd: het onderwerp van deze afstudeeropdracht. In het afstudeerproject is een ruimtelijk ontwerp gemaakt voor dit ondergrondse station. Daarnaast is een mogelijke uitvoeringsmethode voor dit station, het afzinken van tunnelelementen, nader uitgewerkt.

Het totale tunneltracé is opgedeeld in een aantal delen. Van Noord naar Zuid gerekend zijn dit respectievelijk:

- een ca. 1600 m lange geboorde tunnel, bestaande uit twee buizen
- het ondergrondse station met een lengte van 340 meter
- een zuidelijk tunneldeel van ca. 1500 meter, in een open bouwkuip gebouwd.

Het boortunneltracé volgt grotendeels het bestaande stratenplan, en loopt vanaf het station gerekend in noordelijke richting onder de Phoenixstraat. In zuidelijke richting kruist het tunneltracé de Irenetunnel. Bij dit zuidelijke tunneldeel komt de oostelijke tunnelbuis geleidelijk aan boven de grond, terwijl de westelijke tunnelbuis eerst de huidige sporen ondergronds zal kruisen, alvorens boven de grond te komen.

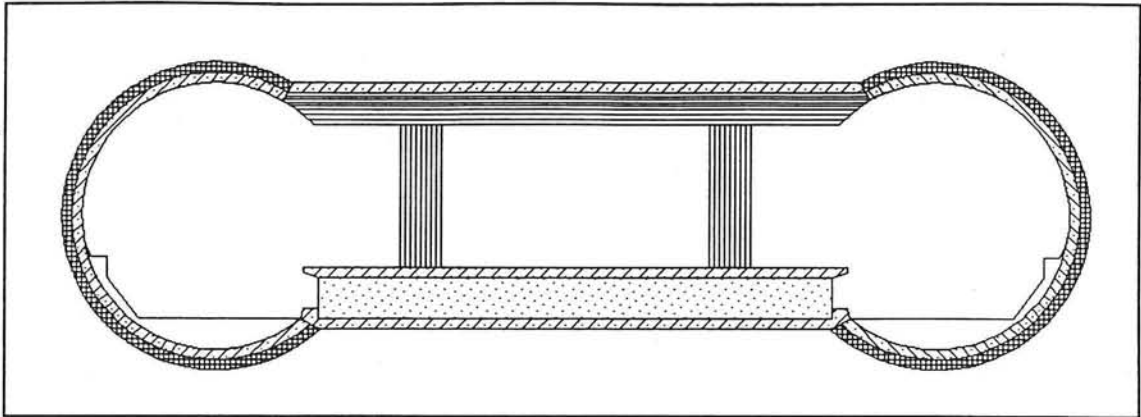
Het nieuwe station in Delft zal bestaan uit een bovengronds gedeelte met drie perronzijden en een ondergronds gedeelte met twee perronzijden. In de toekomstige situatie zal een verbinding van het ondergrondse station met het huidige stationsgebouw worden gerealiseerd.

Het voorstel van de studiegroep NS-BTC is om het ondergrondse station, evenals het zuidelijke tunneldeel, in een droge open bouwkuip te bouwen. Aangezien het stationsgedeelte zich midden in en tussen drukke verkeerswegen bevindt is de overlast, veroorzaakt door een open bouwkuip, langdurig en vrij groot. Binnen het afstudeerproject is onderzocht of een alternatieve uitvoeringsmethode beschikbaar is, zodat de door de aanleg van het ondergrondse station veroorzaakte overlast tot een minimum zou kunnen worden beperkt.

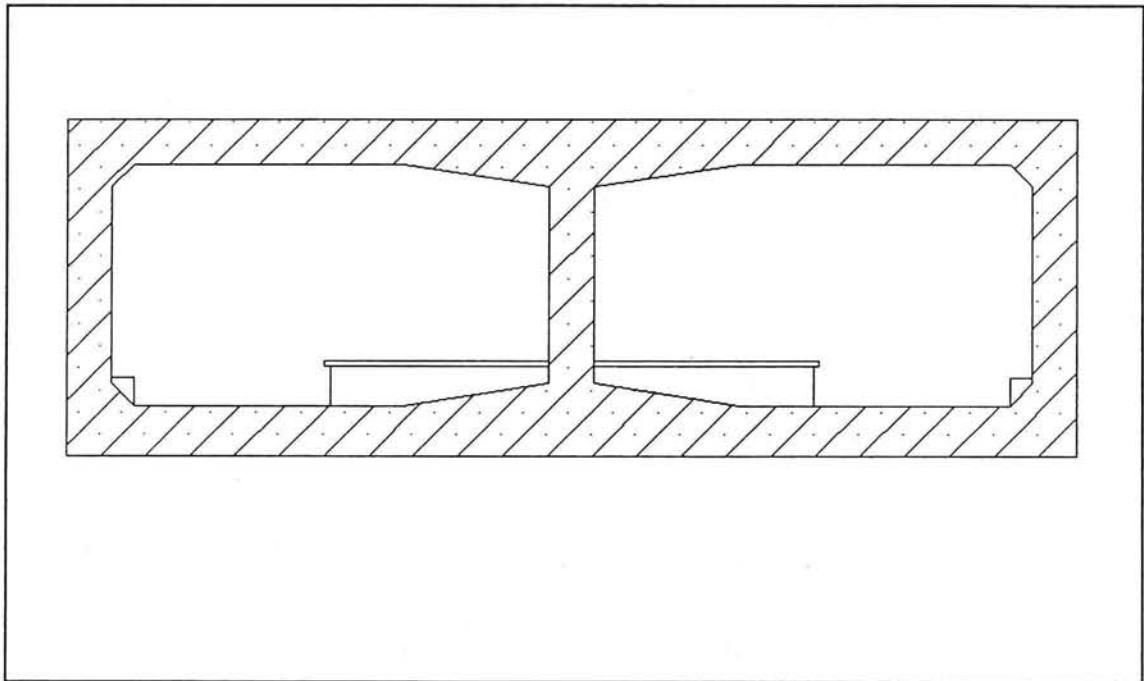
Bij het vaststellen van de randvoorwaarden en uitgangspunten voor het stations-ontwerp is

---

<sup>1</sup> NS-BTC is een samenwerkingsverband tussen het ingenieursbureau van de NS en de BoorTunnelCombinatie, bestaande uit: Ballast Nedam, HBW, Strukton en Wayss & Freytag.



Figuur SV.2 Ondergronds uitbouwen boorbuizen.



Figuur SV.3 Rechthoekige stationsdoorsnede.

gebleken, dat een aantal aspecten het Delftse tunnelproject onderscheiden van een 'standaard' ondergronds bouwwerk.

Ten eerste is er het feit dat het station aansluit op een boortunnel. Vanwege het benodigd vertikaal evenwicht tussen de vloeistofdruk in het boorfront en de gronddruk van de bovenliggende grond, is bovenop de boortunnel een minimale gronddekking noodzakelijk. Deze minimale gronddekking bedraagt circa 1.2 à 1.5 maal de tunneldiameter. Voor een buisdiameter van ca. 8 meter betekent dit dan een ligging van de onderzijde van de tunnelbuis op ca.  $2.5 \times 8 \text{ m} = 20 \text{ m}$  diepte. Het station, dat op de boortunnel aansluit, heeft deze diepe ligging dan automatisch ook. Dit heeft consequenties voor de keuze tussen de diverse beschikbare bouwmethoden.

Ten tweede is in Delft ten aanzien van de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket iets bijzonders aan de hand. Namelijk, de fabrieken van Gist Brocades in het noorden van Delft onttrekken hun industriewater uit het grondwater. In en om Delft heeft voornoemde stijghoogte dan ook een veel lagere waarde dan gebruikelijk. Dit kan een voordeel zijn, aangezien een grote stijghoogte bij het ondergronds bouwen in het algemeen als hinderlijk wordt beschouwd (grote opwaartse waterdruk).

Na het vaststellen van de randvoorwaarden en uitgangspunten en het programma van eisen, is een voorlopig ruimtelijk ontwerp voor het station gemaakt. De inwendige afmetingen en vorm van een spoorwegtunnel en haar station kunnen niet eenvoudigweg worden bepaald aan de hand van de door de diverse tunnelonderdelen benodigde ruimte. De geometrie en met name de hoofdvormen wordt namelijk mede bepaald door de te kiezen constructie- en uitvoeringsmethode. Omgekeerd kunnen de inwendige afmetingen weer invloed hebben op de te kiezen constructie- en uitvoeringsmethode. Eenvoudig is in te zien dat de geometrie en vormgeving van een station, gebouwd door middel van het ondergronds uitbouwen van twee boortunnelbuizen, ongetwijfeld meer rond van vormgeving zal zijn dan een in een open bouwkuip gebouwd station met een meer rechthoekige doorsnede (zie figuur SV.2 en SV.3). De definitieve (ruimtelijke) vormgeving is dus zeer afhankelijk van de te kiezen uitvoeringsmethode.

In een voorlopig ruimtelijk ontwerp is de huid, de voorlopige vorm en de globale afmetingen van het ontwerp van het ondergrondse station aangegeven, zonder diep op het inwendige in te gaan. Dat wil zeggen dat de minimaal benodigde inwendige ruimte aan de hand van een aantal randvoorwaarden is vastgesteld (benodigd profiel van vrije ruimte voor de trein, installaties, benodigde perronbreedte e.d.). Deze benodigde **inwendige** ruimte is weer van invloed op de uiteindelijke **uitwendige** afmetingen van de constructie. Het vaststellen van de definitieve vorm en afmetingen is in dat stadium van het ontwerp nog niet mogelijk, aangezien de bouwmethode dan nog niet bekend is.

In een volgende fase is middels een uitgebreide literatuurstudie een inventarisatie gemaakt van





een groot aantal thans beschikbare methoden voor het realiseren van een ondergrondse constructie in het algemeen en een ondergronds station in het bijzonder. Deze inventarisatie loopt van een traditionele open bouwputmethode en varianten daarop, tot de uitvoering van een ondergronds station met behulp van een three centered slurry type shield machine. Deze laatste methode betreft een geavanceerde tunnelboormachine die in staat is zowel de tunnel als het station te boren.

De diverse beschikbare uitvoeringsmethoden zijn vervolgens getoetst aan de Delftse situatie. Allereerst is een grove schifting gemaakt aan de hand van twee criteria, te weten: de *mogelijkheid* en de *noodzakelijkheid*. Dat wil zeggen dat het uiteraard mogelijk moet zijn om de desbetreffende methode in deze specifieke situatie toe te kunnen passen. Daarnaast is het gebleken dat de situatie niet dermate complex is, dat direct een methode moet worden toegepast, waarbij het maaiveld niet of nauwelijks wordt aangetast (noodzakelijkheid).

Na een eerste grove selectie zijn de overgebleven uitvoeringsmethoden, aan de hand van een aantal nauwkeuriger criteria, ten opzichte van elkaar getoetst. Op die manier is getracht een globaal beeld te verkrijgen van de aantrekkelijkheid van iedere individuele bouwmethode ten opzichte van de anderen. Qua overlast voor de stad Delft en de daarmee samenhangende economische en maatschappelijke schade is het ondergronds uitbouwen van twee boortunnelbuizen erg aantrekkelijk. De relatief hoge kosten en de risicogevoeligheid maken deze optie weer minder aantrekkelijk. De uitvoeringsmethode, waarbij het station wordt gerealiseerd met behulp van het afzinken van zinkelementen, is in deze situatie het meest aantrekkelijk gebleken. Met name de relatief korte overlast voor de stad is een groot voordeel van deze variant.

De gekozen uitvoeringsmethode kent ook een aantal punten die bijzondere aandacht vergen. Dit zijn onder andere de kruising van het tunneltracé met de Irenetunnel, een bouwdok voor de zinkelementen en een keermogelijkheid voor de TunnelBoorMachine. Deze aspecten zijn in het rapport nader uitgewerkt.

Na het vaststellen van de toe te passen uitvoeringsmethode is een terugkoppeling gemaakt naar het stationsontwerp. De vorm van de zinkelementen bepaald in belangrijke mate de vorm van het station.

Bij dit definitief ontwerp van het ondergrondse station is met name gelet op het veraangename van het ondergronds verblijf. Dit, omdat is gebleken dat steeds meer mensen zich minder graag onder de grond begeven. De hoofdcriteria die bij het ontwerp zijn gehanteerd zijn dan ook: *ruimte, licht en zicht*.

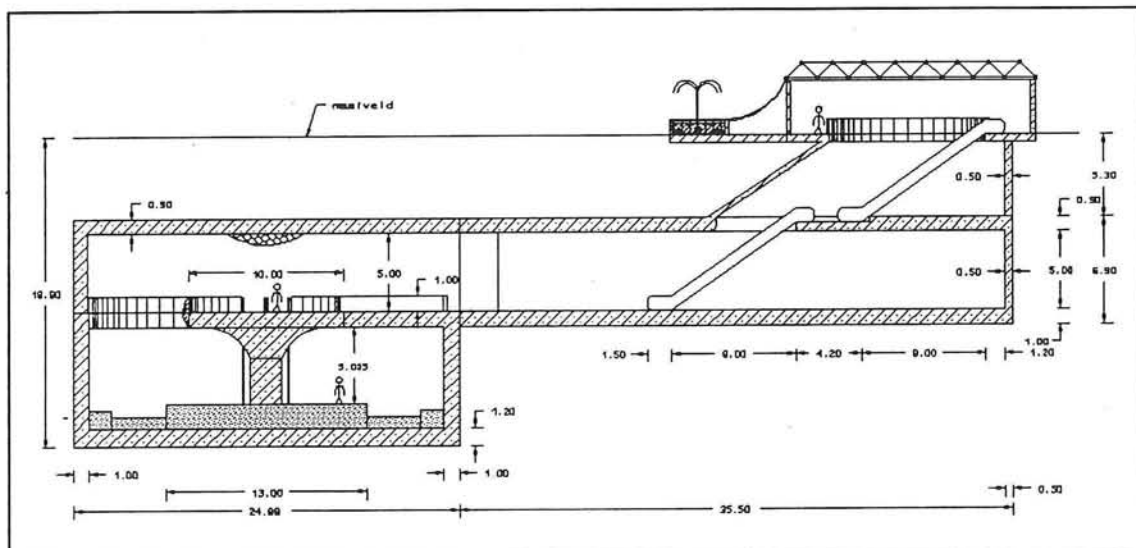
Het ontwerp van het station is ruim van opzet en zodanig dat men zich overal goed kan oriënteren. Gekozen is voor een ontwerp, waarbij de reizigers in twee stappen, via een stationshal, vanaf het maaiveld naar de perrons worden gevoerd. Deze stationshal staat haaks op het station zelf, in de richting van het huidige station van Delft. Omdat het nieuwe stationstracé op enige afstand ten oosten van het huidige station ligt, is het voordeel van deze



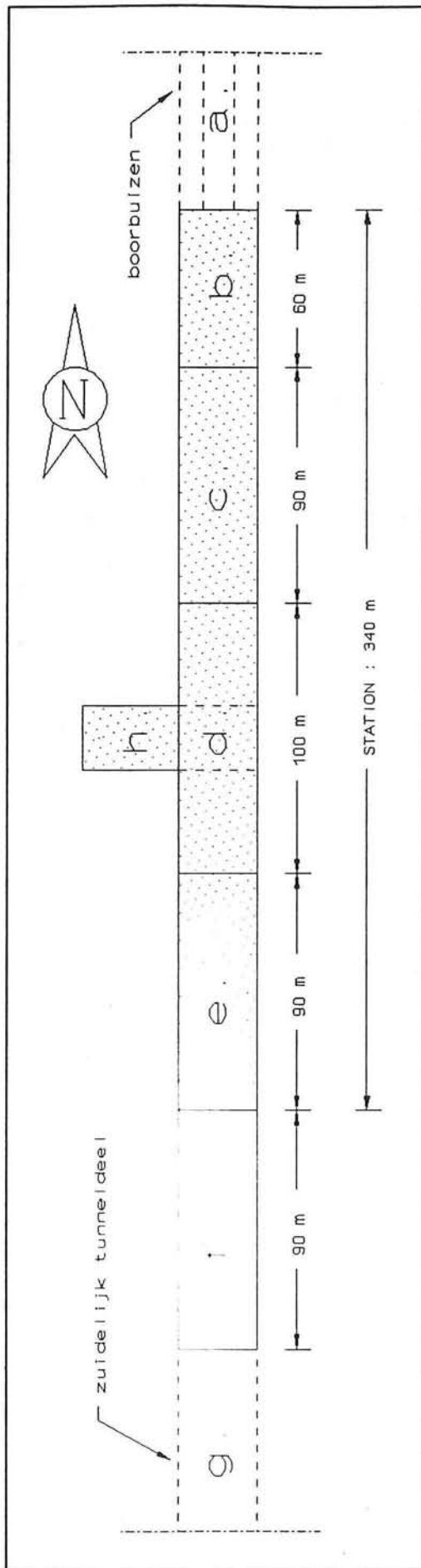
oplossing dat de lengte van het verbindingstunneltje van het ondergrondse station met het huidige station minimaal wordt gehouden.

In de vloer van de stationshal boven het eilandperron wordt een grote ovale opening uitgespaard. In het midden van deze opening wordt een plateau geplaatst, dat steunt op een kolom in het midden van het perron. Dit geheel vormt dan een soort paddestoel. De paddestoel is weer verbonden met de stationshal. Vanaf de paddestoel gaan roltrappen naar het perron. Rondom de opening in de halvloer wordt een balustrade geplaatst. Het is voor de reizigers dus mogelijk om vanuit de hal reeds een blik te werpen op het perron en de treinen. De reizigers weten zo dus al van tevoren wat hen beneden aan de roltrap te wachten staat. Op deze manier wordt getracht een gevoel van ruimte en veiligheid te creëren, en de interesse en nieuwsgierigheid van de reizigers te wekken.

Daglichttoetreding is in een ondergronds station zeer moeilijk te realiseren. Toch is getracht hieraan een invulling te geven met behulp van zogenaamde loertoeters. Hierbij wordt met behulp van een spiegelmechanisme daglicht naar de ondergrondse ruimte gebracht.



Figuur SV.4 Dwarsdoorsnede stationsontwerp.



Figuur SV.5 Overzicht stationstracé. (zie ook de tabel)

Na het definitief ontwerp van het ondergrondse station en alle exacte dimensies te hebben vastgesteld is de uitvoering van het station verder uitgewerkt. Gekozen is om het station als volgt in het tunneltracé in te passen (zie figuur SV.5):

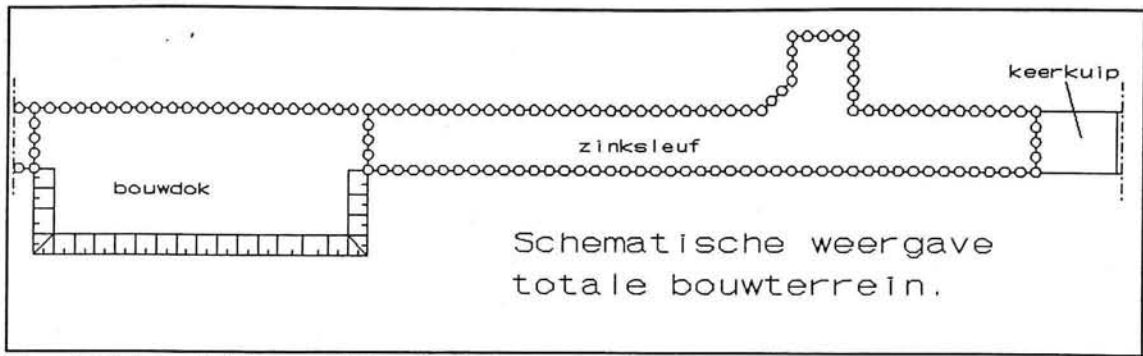
|    | Gedeelte                   | Lengte    | Methode            | Onderdeel |
|----|----------------------------|-----------|--------------------|-----------|
| a. | boortunneldeel             | ca.1600 m | boren              | TUNNEL    |
| b. | keerkuipdeel               | 60 m      | droge open bouwput | STATION   |
| c. | noordelijke deel           | 90 m      | zinkelement        |           |
| d. | middelste deel             | 100 m     | zinkelement        |           |
| e. | zuidelijke deel            | 90 m      | zinkelement        |           |
| f. | zinkdeel zuidelijke tunnel | 90 m      | zinkelement        | TUNNEL    |
| g. | zuidelijke tunnel          | ca.1500 m | droge open bouwput |           |
| h. | haldeel                    | 35.5 m    | zinkelement        |           |

Het tunnelgedeelte vanaf het station in zuidelijke richting wordt over een afstand van 90 meter eveneens uitgevoerd met een zinkelement. Het resterende gedeelte van het zuidelijke tunneldeel wordt uitgevoerd in een droge bouwkuip.

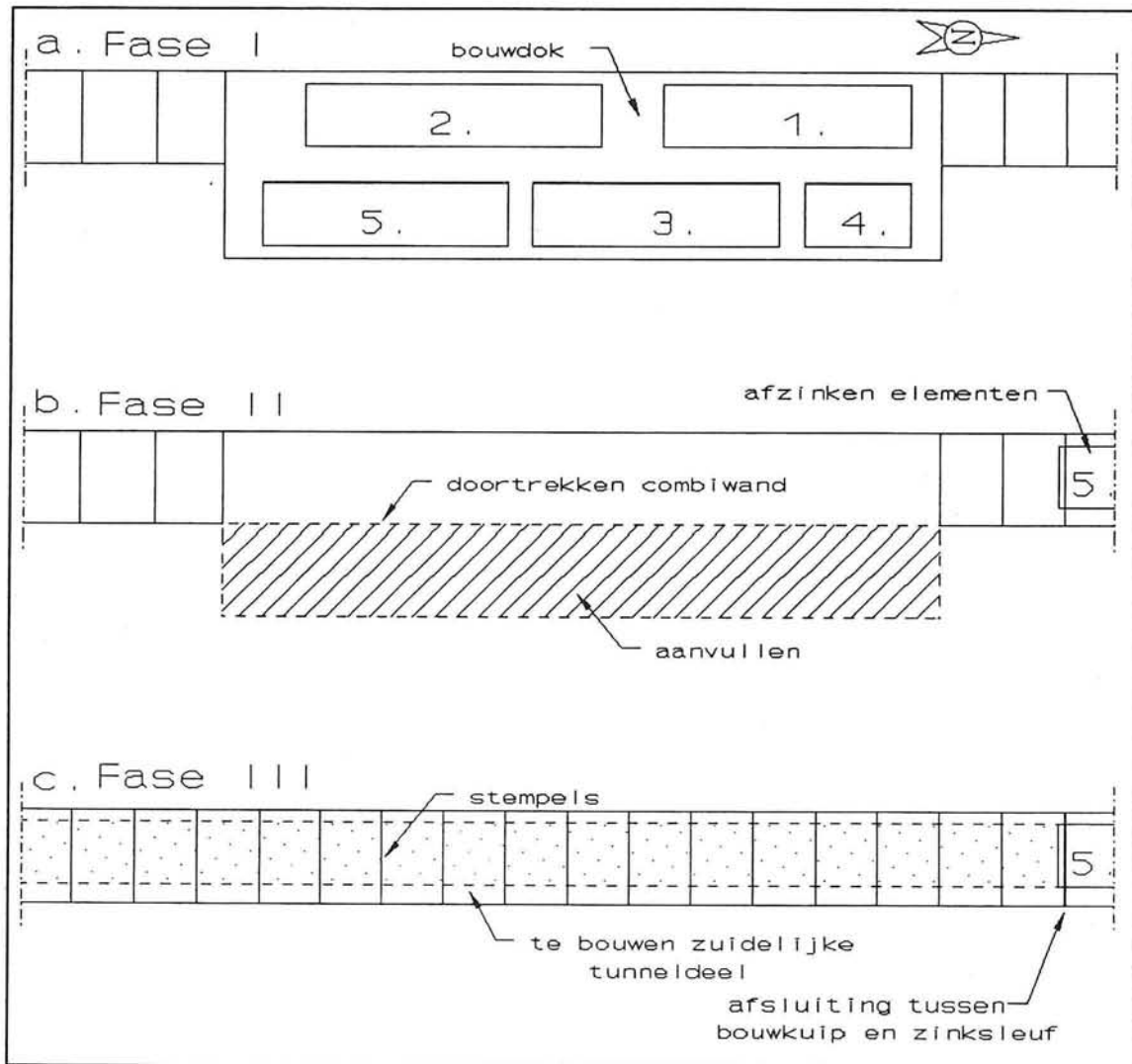
De TunnelBoorMachine (TBM) boort vanuit een noordelijke startkuip een eerste tunnelbuis. De keerkuip (b) dient om de TBM vervolgens te kunnen keren, waarna deze in noordelijke richting de tweede buis boort. Een tweede functie van deze keerkuip is het dienen als landhoofd voor de af te zinken tunnelementen. De keerkuip vormt op die manier een neutrale schakel tussen de boortunnel en het station, hetgeen qua planning en fasering een voordeel is. De keerkuip wordt na het keren van de TBM en het afzinken van de zinkelementen geïntegreerd met het station. Het gedeelte van de keerkuip boven het station (ca.10 m) kan in de eindfase in principe als verloren worden beschouwd. Aangezien dit jammer zou zijn is een suggestie gedaan voor hergebruik van deze ruimte in de vorm van een ondergrondse parkeergarage.

In uitvoeringstechnisch opzicht kan het totale stationsproject, zoals dat in de voorgaande hoofdstukken is beschreven, globaal worden ingedeeld in een aantal hoofd-onderdelen, te weten:

- Het maken van de zinksleuf.
- Het maken van het bouwdok.
- Het maken van de keerkuip.
- Het fabriceren van de zinkelementen in het bouwdok.
- Het transport en afzinken van de elementen.
- Afbouw van het station.



Figuur SV.6 Schematisch bovenaanzicht bouwterrein.



Figuur SV.7 Uitvoeringsfasen rondom bouwdok.

In de diverse hoofdstukken van dit rapport is getracht van de uitvoeringsprocedures van deze onderdelen een zo compleet mogelijk beeld te geven.

Het principe van de gekozen uitvoeringsmethodiek kent een aantal uitvoeringsfasen (zie figuur SV.7). In de eerste fase worden in een bouwdok de zinkelementen gemaakt. Dit bouwdok wordt geïntegreerd met het gedeelte waar in een later stadium in situ het resterende zuidelijke tunnelgedeelte wordt gemaakt. De ontgraven grond kan op de ruimte naast het bouwdok tijdelijk worden opgeslagen. Zodra het bouwdok gereed is en is drooggezet, kan het bouwdok worden ingericht en kunnen de zinkelementen worden gemaakt.

Ondertussen wordt over de lengte van het zinktunneltracé een zinksleuf gemaakt. Aan weerszijden van de te maken zinksleuf worden combiwanden aangebracht. Deze wanden worden aan de bovenzijde gestempeld, waarna de ruimte tussen de wanden tot de gewenste diepte wordt ontgraven. De zo ontstane natte 'bouwkuip' hoeft niet te worden drooggemaakt. Dit heeft als voordeel dat de kerende wanden van de sleuf relatief licht kunnen worden uitgevoerd.

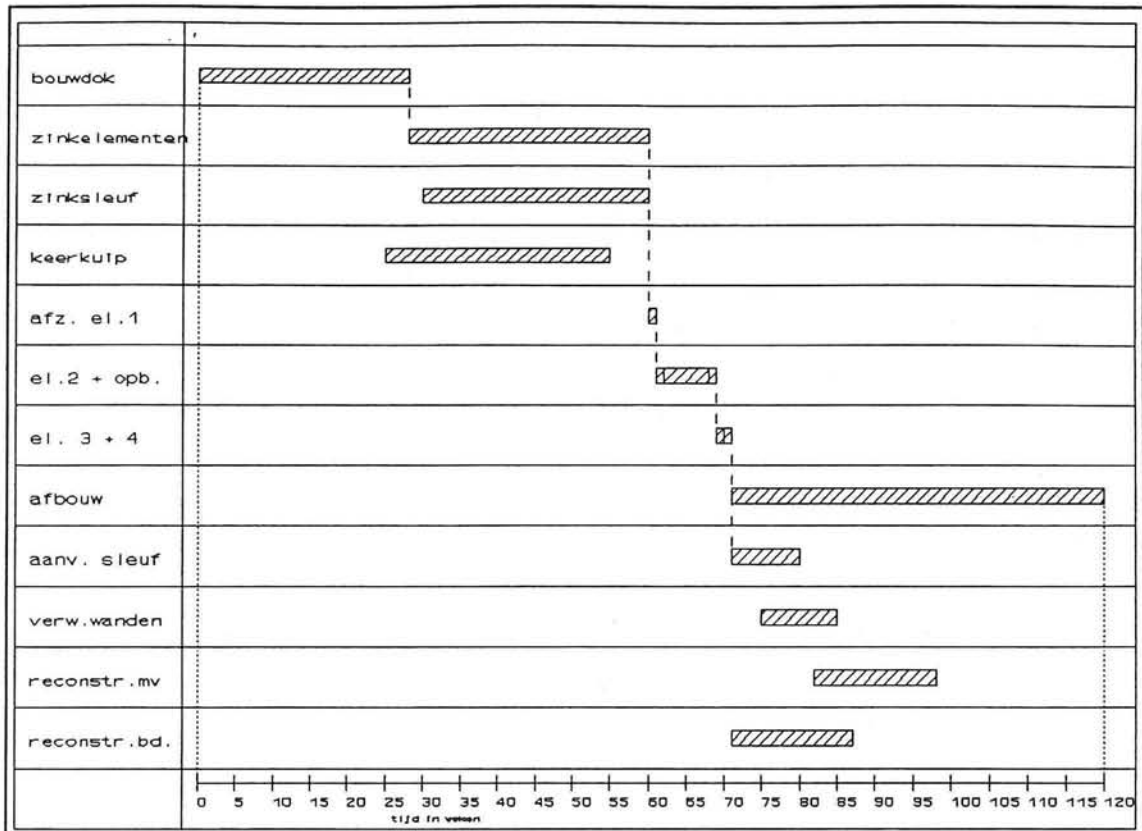
In de volgende fase wordt het bouwdok, zodra de zinkelementen gereed zijn, onder water gezet. De elementen kunnen nu worden uitgevaren en afgezonken in de zinksleuf. Het bouwdok wordt vervolgens deels aangevuld, waarna de grond wordt verdicht. Daarna worden de combiwanden ter weerszijden van het tijdelijke bouwdok met een laatste stuk combiwand verlengd, zodat een doorgaande tunnelsleuf ontstaat.

In de derde fase wordt tussen de combiwanden een stempeling aangebracht en wordt (nat) ontgraven, totdat het gewenste niveau is bereikt. De paalkoppen van de van tevoren ingeheidetrekpalen komen zo bloot te liggen. Na met behulp van duikers de bodem te hebben geëgaliseerd en de damwandkassen te hebben schoongemaakt, kan onderwaterbeton worden gestort. Nadat dit voldoende is verhard, kan de bouwkuip worden drooggemaakt. De onderwaterbetonvloer werkt als tweede stempellaag op de combiwanden. Het tunneldeel, gerekend zuidwaarts vanaf de zinkelementen, kan nu in den droge worden gemaakt. De tunnelbekisting, welke gebruikt is bij het maken van de zinkelementen, kan ook hier worden ingezet.

Na het afzinken van de elementen wordt het station verder afgebouwd en wordt het van de nodige installaties voorzien.

In de laatste fase van dit afstudeerproject is een globaal faseringsoverzicht van de uitvoering van het ondergrondse station gemaakt. Dit is weergegeven in figuur sv.8. De totale bouwtijd van het station is geschat op circa 120 weken ( $\approx$  3 jaar). Ter indicatie zal het station, uitgevoerd met behulp van de afzinkmethode, een kostprijs hebben die ligt tussen de 70 en 75 miljoen gulden.

Tot slot is een vergelijking gemaakt tussen de gekozen afzinkmethode en een (traditionele) droge open bouwkuip. In beide gevallen wordt een sleuf door de stad gemaakt. Het principeverschil tussen beide sleuven is, dat de sleuf bij de afzinkmethode niet droog hoeft te worden



Figuur SV.8 Globaal overzicht planning en fasering.



gemaakt, terwijl dit bij een droge open bouwkuip juist zeer essentieel is. Bij de laatste methode is voor dat doel bovendien een waterdichte bodemafsluiting van de bouwkuip noodzakelijk. Dit kan zijn een diepgelegen waterafsluitende laag, maar in de Delftse situatie is een onderwaterbetonvloer noodzakelijk. Het verschil in kosten tussen beide methoden uit zich in een aantal punten. Voor de gekozen methode (het afzinken) geldt dat:

1. géén kostbare onderwaterbetonvloer in combinatie met trekpalen benodigd is.
2. de wanden van de bouwkuip lichter kunnen worden uitgevoerd, aangezien de sleuf niet droog wordt gemaakt.
3. het tijdsbestek dat het maaiveld open ligt (overlast veroorzaakt) vele malen korter is.

Daarentegen is er wel:

4. een bouwdok voor de zinkelementen benodigd.
5. een extra kostenpost, specifiek voor de zinkelementen, zoals kopschotten, hydraulische vijzels, te maken voegen etc.

De eerste twee punten geven qua kosten een groot verschil tussen beide uitvoeringsmethoden, vanwege de relatief zeer diepe ligging van het station. Zoals hiervoor reeds werd genoemd wordt deze diepe ligging opgelegd door de randvoorwaarde, dat het op het ondergrondse station aansluitende noordelijke tunneldeel wordt uitgevoerd als boortunnel.

Wanneer het station in een droge open bouwkuip zou worden uitgevoerd, dan zijn de resulterende horizontale drukken tegen de kerende wanden van de kuip, door deze diepe ligging van het station, zeer hoog. De resulterende horizontale drukken tegen de kerende wanden bij de gekozen afzinkmethode zijn uiterst klein. Dit is te danken aan de gunstig werkende tegendruk van het water dat in de sleuf staat.

Ten aanzien van het derde punt is moeilijk een inschatting van kostenbesparing te geven, aangezien economische- en maatschappelijke schade (want daar gaat het hier grotendeels om) moeilijk in geld is uit te drukken. De gemeente Delft (die omwonenden en middenstanders vertegenwoordigt) zal voorstander zijn van een zo kort mogelijke duur van de veroorzaakte overlast. De NS daarentegen zal hiervoor moeten betalen.

Het vierde en vijfde punt zijn kosten, die de gekozen afzinkmethode wél heeft en de open bouwkuipmethode niet, gelijk aan de punten één en twee, waarbij het tegenovergestelde het geval is.

In grote lijnen vergeleken, blijkt dat de gekozen afzinkmethode goedkoper zal uitvallen dan bijvoorbeeld de (droge) open bouwkuip methode. De oorzaak hiervan is met name te zoeken in de diepe ligging van het station (aanlegdiepte ca. 20 m ÷ MV). Hierdoor zijn voor een droge bouwkuip zeer stijve kuipwanden en een meer dan gemiddeld sterke kuipvloer benodigd. Indien het ondergrondse station een minder diepe ligging zou hebben, dan zou dit een volstrekt ander



licht op het geheel werpen. Ook de bouwkosten van het ondergrondse station zouden dan aanmerkelijk lager uitvallen. In dit afstudeerproject, het ontwerp en de uitvoering van het ondergronds station te Delft, was de diepe ligging echter als randvoorwaarde opgelegd.



# Inhoudsopgave.

|   |    |
|---|----|
| <b>1. Inleiding.</b>  | 1  |
| 1.1 Algemeen.   | 1  |
| 1.2 Studie NS-BTC.  | 2  |
| 1.3 Omschrijving afstudeerproject.                                | 3  |
| 1.4 Aanpak.   | 3  |
| <b>2. Over wat heden is en wat nog komen gaat.</b>                | 5  |
| 2.1 Beschrijving bestaande situatie.                              | 5  |
| 2.1.1 Spoorinfrastructuur.  | 5  |
| 2.1.2 Station en stationsplein.                                   | 5  |
| 2.1.3 Hoofdwegen nabij station.                                   | 6  |
| 2.1.4 Overige bebouwing nabij het station.                        | 8  |
| 2.2 Beschrijving gewenste situatie n.a.v. rapport NS-BTC.         | 9  |
| 2.2.1 Spoorinfrastructuur.  | 9  |
| 2.2.2 Station en stationsplein.                                   | 9  |
| 2.2.3 Hoofdwegen nabij het station.                               | 9  |
| 2.2.4 Overige bebouwing nabij het station.                        | 9  |
| <b>3. Programma van eisen, randvoorwaarden en uitgangspunten.</b> | 11 |
| 3.1 Functioneel programma van eisen.                              | 11 |
| 3.1.1 Treinfrequentie.  | 11 |
| 3.1.2 Sporen.   | 13 |
| 3.1.3 Bestaande infrastructuur.                                   | 13 |
| 3.1.4 Reizigers.  | 13 |
| 3.1.5 Ondergrondse station.                                       | 13 |
| 3.1.6 Trillingen en geluid.                                       | 13 |
| 3.2 Technisch programma van eisen.                                | 13 |
| 3.2.1 Ondergrondse tunnelsporen.                                  | 13 |
| 3.2.2 Ondergronds station.  | 14 |
| 3.2.3 Westsingelgracht.   | 14 |
| 3.2.4 Uitvoeringsfase.  | 15 |
| 3.3 Wensen.   | 15 |
| 3.4 Uitgangspunten en randvoorwaarden.                            | 15 |
| 3.4.1 Ten aanzien van het ondergrondse station.                   | 15 |
| 3.4.2 Geologische gegevens.                                       | 15 |
| 3.4.3 Ten aanzien van de grondwaterstand.                         | 18 |
| <b>4. Ontwikkelde ontwerpgang.</b>                                | 19 |



|  |    |
|--|----|
| <b>5. Ruimtelijk ontwerp ondergronds station.</b>                      | 21 |
| 5.1 Inleiding.   | 21 |
| 5.2 Lengteprofiel en diepteligging station.                            | 21 |
| 5.3 Globale uitwendige vormgeving.                                     | 21 |
| 5.4 Lay-out en hoofdafmetingen.  | 22 |
| 5.4.1 Dwarsprofiel perrongedeelte.                                     | 22 |
| 5.4.2 Plattegrond perrongedeelte.                                      | 27 |
| 5.4.3 Stationshal, begane grond gedeelte, en toegangen.                | 28 |
| 5.4.4 Verbinding met het huidige station.                              | 28 |
| 5.4.5 Ventilatieschachten.   | 29 |
| 5.4.6 Bedrijfs- en installatieruimten.                                 | 29 |
| <b>6. Uitvoeringsmethoden; mogelijke en onmogelijke op een rijtje.</b> | 30 |
| Inleiding.   | 30 |
| 6.1 Open bouwputmethode.   | 30 |
| 6.1.1 Open bouwput met natuurlijke taluds.                             | 31 |
| 6.1.2 Open bouwput met verticale wanden (bouwkuip).                    | 32 |
| 6.1.3 Varianten construeren in open bouwkuip.                          | 40 |
| 6.2 Wanden-dak-methode.  | 41 |
| 6.3 Pneumatische caissons.   | 43 |
| 6.4 Afzinkmethode.   | 44 |
| 6.5 Combinatie bouwkuip/afzinken.                                      | 46 |
| 6.6 Vriesmethode.  | 47 |
| 6.7 Schuifmethode.   | 48 |
| 6.8 Ondergronds uitbouwen vanuit boortunnels.                          | 50 |
| 6.9 Neue Österreichische Tunnelbauweise (NÖT of NATM).                 | 51 |
| 6.10 Antwerpse Buizen Methode.   | 52 |
| 6.11 Cellular Arch Method: Venezia Station Milaan.                     | 54 |
| 6.12 Three Centered Slurry Type Shield Machine.                        | 55 |
| <b>7. Afweging en keuze uitvoeringsmethode.</b>                        | 57 |
| 7.1 Inleiding.   | 57 |
| 7.2 Samenvatting Delftse situatie.                                     | 57 |
| 7.3 Bespreking uitvoeringsmethoden en eerste schifting.                | 59 |
| 7.4 Gedetailleerd vergelijk overgebleven methoden.                     | 64 |
| 7.5 Nadere uitwerking methode combinatie bouwkuip/afzinken.            | 67 |
| 7.5.1 Inleiding.   | 67 |
| 7.5.2 Locatievariant.  | 67 |
| 7.5.3 Doklocatie.  | 68 |
| 7.5.4 Tunnelementen.   | 68 |
| 7.5.5 Keerkuip.  | 72 |





|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| 7.5.6     | Stationshal. . . . .                                      | 74        |
| 7.5.7     | Vervolg van het ontwerp. . . . .                          | 77        |
| <b>8.</b> | <b>Definitief ontwerp ondergronds station. . . . .</b>    | <b>78</b> |
| 8.1       | Inleiding. . . . .  | 78        |
| 8.2       | Ruimtelijk ontwerp. . . . .                               | 79        |
| 8.2.1     | Overall layout station. . . . .                           | 79        |
| 8.2.2     | Ontwerpvarianten. . . . .                                 | 80        |
| 8.3       | Toelichting op het gekozen ontwerp. . . . .               | 87        |
| 8.3.1     | Stationshal. . . . .                                      | 87        |
| 8.3.2     | Roltrappen en toegangen. . . . .                          | 87        |
| 8.3.3     | Toegang vanaf maaiveld: <i>de entree</i> . . . . .        | 88        |
| 8.3.4     | Perrongedeelte. . . . .                                   | 89        |
| 8.4       | Stationsfaciliteiten. . . . .                             | 91        |
| 8.4.1     | Daglichttoetreding. . . . .                               | 91        |
| 8.4.2     | Verlichting. . . . .                                      | 94        |
| 8.4.3     | Bekleding. . . . .  | 94        |
| 8.4.4     | Communicatie. . . . .                                     | 95        |
| 8.4.5     | Nooduitgangen. . . . .                                    | 95        |
| 8.4.6     | Reizigersinformatie. . . . .                              | 95        |
| 8.4.7     | Sanitaire voorzieningen. . . . .                          | 95        |
| 8.4.8     | Kaartverkoop. . . . .                                     | 95        |
| 8.5       | Installaties. . . . .                                     | 96        |
| 8.5.1     | Installatie- en serviceruimten. . . . .                   | 96        |
| 8.5.2     | Elektrische voeding. . . . .                              | 96        |
| 8.5.3     | Ventilatie en klimaatbeheersing. . . . .                  | 96        |
| 8.5.4     | Leidingen. . . . .  | 97        |
| 8.5.5     | Brandbeveiliging. . . . .                                 | 97        |
| 8.5.6     | Ontwatering. . . . .                                      | 97        |
| <b>9.</b> | <b>Berekening van de constructie. . . . .</b>             | <b>98</b> |
| 9.1       | Geometrie tunneldoorsnede. . . . .                        | 98        |
| 9.2       | Controles t.a.v. uitvoering. . . . .                      | 99        |
| 9.2.1     | Drijfvermogen elementen. . . . .                          | 99        |
| 9.2.2     | Zinkvermogen elementen. . . . .                           | 99        |
| 9.2.3     | Transport: Metastabiliteit. . . . .                       | 101       |
| 9.3       | Bepaling krachtswerking in doorsnede zinkelement. . . . . | 104       |
| 9.3.1     | Belasting op het element. . . . .                         | 105       |
| 9.3.2     | Veiligheidsfilosofie. . . . .                             | 109       |
| 9.3.3     | Berekeningsmethode. . . . .                               | 110       |
| 9.3.4     | Berekening met gronddruk als belasting. . . . .           | 112       |



|            |   |            |
|------------|---|------------|
| 9.3.5      | Numerieke berekening m.b.v. veren. . . . .                              | 122        |
| 9.3.6      | Keuze berekening. . . . .   | 122        |
| 9.4        | Bepaling dwarswapening in vloer, dak en wanden van zinkelement. . . . . | 124        |
| 9.4.1      | Inleiding. . . . .  | 124        |
| 9.4.2      | Berekeningswijze dwarswapening. . . . .                                 | 124        |
| 9.4.3      | Berekening dwarswapening tunneldoorsnede. . . . .                       | 126        |
| <b>10.</b> | <b>Uitvoering Ondergronds station Delft. . . . .</b>                    | <b>131</b> |
| 10.1       | Inleiding. . . . .  | 131        |
| 10.2       | Grondgegevens. . . . .  | 133        |
| 10.2.1     | Inleiding. . . . .  | 133        |
| 10.2.2     | Grondparameters. . . . .  | 133        |
| 10.2.3     | Bepaling verloop van de waterspanning. . . . .                          | 135        |
| 10.2.4     | Grond- en korrelspanningen. . . . .                                     | 137        |
| 10.3       | Het bouwdok. . . . .  | 138        |
| 10.3.1     | Inleiding. . . . .  | 138        |
| 10.3.2     | Randvoorwaarden en uitgangspunten. . . . .                              | 138        |
| 10.3.3     | De afmetingen van het bouwdok. . . . .                                  | 140        |
| 10.3.4     | De uitvoering van het bouwdok. . . . .                                  | 141        |
| 10.3.5     | De inrichting van het bouwdok. . . . .                                  | 148        |
| 10.3.6     | Verbinding met de zinksleuf. . . . .                                    | 149        |
| 10.4       | De zinksleuf. . . . .   | 150        |
| 10.4.1     | Inleiding. . . . .  | 150        |
| 10.4.2     | Afmetingen van de zinksleuf. . . . .                                    | 151        |
| 10.4.3     | Dimensionering sleufwanden. . . . .                                     | 154        |
| 10.4.4     | Gevuld houden zinksleuf. . . . .  | 161        |
| 10.4.5     | Uitvoering zinksleuf. . . . .   | 163        |
| 10.4.6     | Kruising zinksleuf met inrit Irenetunnel. . . . .                       | 167        |
| 10.5       | Hal-opbouw op middelste element. . . . .                                | 169        |
| 10.6       | Fabricage van de zinkelementen. . . . .                                 | 171        |
| 10.7       | Transport en afzinken van de elementen. . . . .                         | 173        |
| 10.7.1     | Drijvend transport. . . . .   | 173        |
| 10.7.2     | Fundering elementen. . . . .  | 174        |
| 10.8       | De keerkuip annex landhoofd. . . . .                                    | 175        |
| 10.8.1     | Inleiding. . . . .  | 175        |
| 10.8.2     | Afmetingen keerkuip. . . . .  | 176        |
| 10.8.3     | Uitvoering van de keerkuip. . . . .                                     | 177        |
| 10.9       | Overzicht planning en fasering. . . . .                                 | 179        |
| 10.9.1     | Inleiding. . . . .  | 179        |
| 10.9.2     | Globaal tijds- en faseringsoverzicht. . . . .                           | 180        |
| 10.9.3     | Vergelijk met open bouwkuip methode. . . . .                            | 184        |



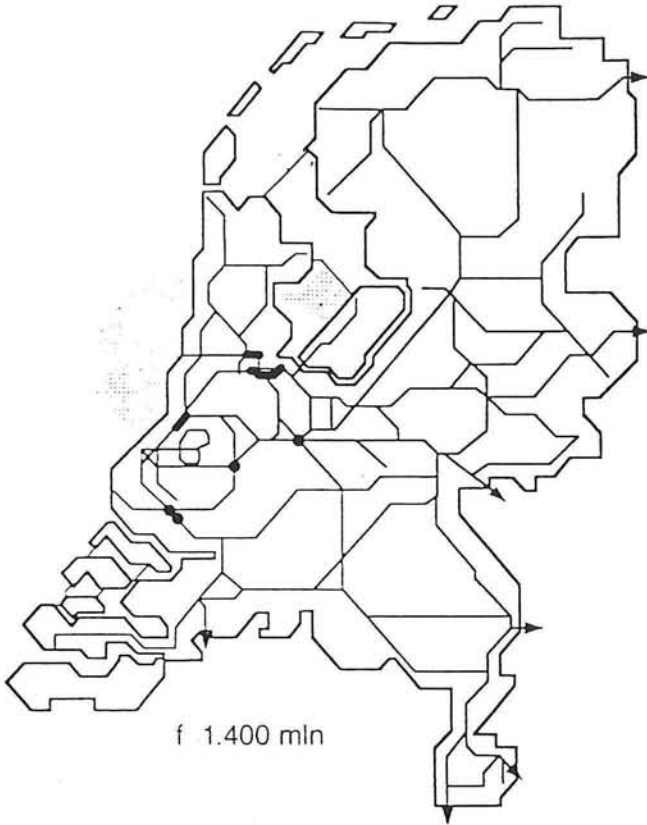
11. Conclusies en aanbevelingen. . . . . 186

**Literatuurlijst**

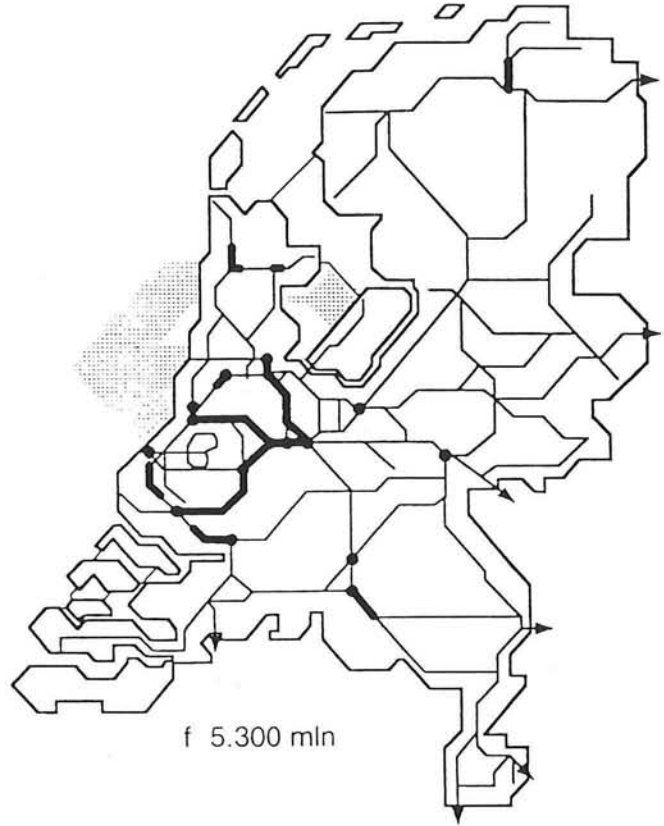
**Bijlagen:**

Bijlage A. Samenvatting en conclusies NS-BTC studie.  
Bijlage B. Profiel van vrije ruimte. VTG deel VI, bijlage I-IX  
Bijlage C. Uitgebreide grondgegevens.  
Bijlage D. Berekening afmetingen rode meetgebied.  
Bijlage F. Berekening statische stabiliteit zinkelement.  
Bijlage G. Berekening doorsnede zinkelement. Uitvoer PC-Frame. Met partiële veiligheidscoëfficiënten.  
Bijlage I. Berekening doorsnede zinkelement. Uitvoer PC-Frame. Gebruikstoestand.  
Bijlage J. Berekening met elastische ondersteuning.  
Bijlage K. Bepaling krommingsbreedte element.  
Bijlage M. Berekening snelheid waterspiegeldaling zinksleuf.  
Bijlage N. Berekening moment in stempel door eigen gewicht.  
Bijlage O. Hal-opbouw op middelste element.  
Bijlage P. Omrekeningstabel diverse eenheden.  
Bijlage Q. Tekeningen.  
Bijlage R. Lijst van afkortingen.

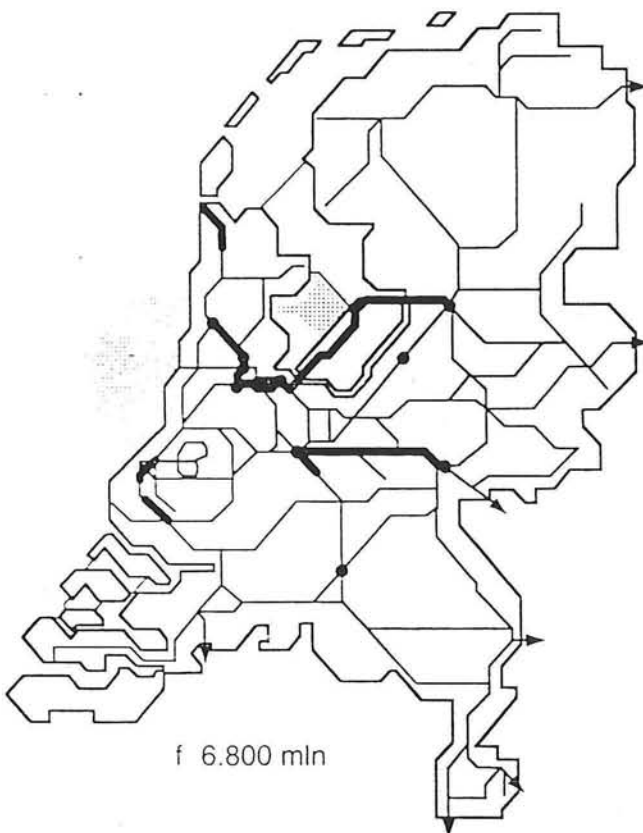
*Reeds goedgekeurde projecten*  
(knoelpunten)



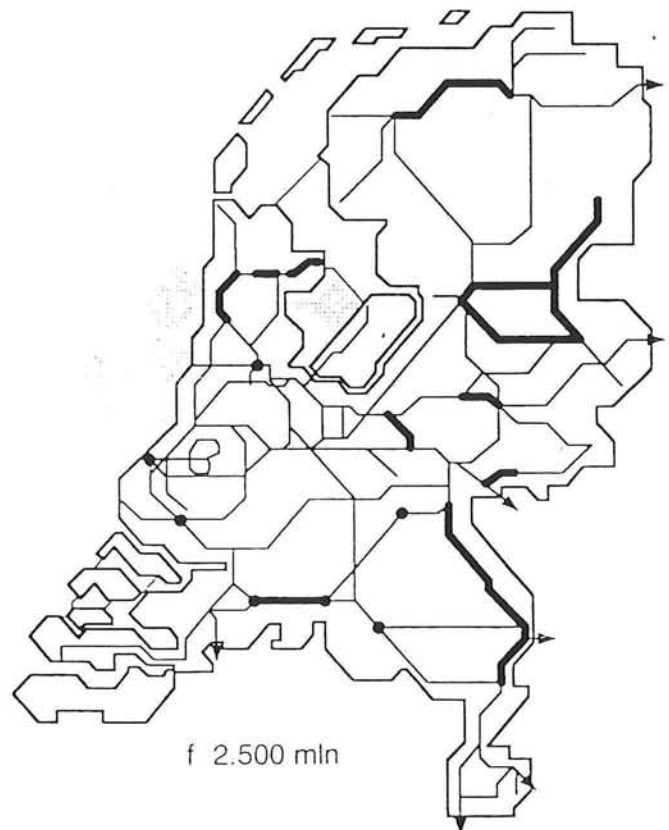
*Prorail '96*  
(deels goedgekeurd)



*Rail 21*



*Fase 2 Rail 21*



Figuur 1.1 Investerings in infrastructuur voor Rail 21 Reizigers tot 2010, hoofdzakelijk spoorverdubbelingen.

# 1. Inleiding.

## 1.1 Algemeen.

Nederland raakt voller en voller. Zó vol zelfs, dat een nieuw stuk infrastructuur, zoals bijvoorbeeld een nieuwe spoorweg of een uitbreiding van een bestaande, moeilijk is in te passen in de bestaande bebouwing.

Toch vereist de huidige mobiliteit een uitbreiding van de infrastructuur. Ten aanzien van het vervoer per rail heeft de Nederlandse Spoorwegen (NS) een beleidsplan voor de komende 20 jaar, Rail 21 genaamd, opgesteld. Met dit beleidsplan tracht de NS een invulling te geven aan de door de overheid gewenste rol van het openbaar vervoer in het terugdringen van de groei van de automobilititeit.

Rail 21, echter, behelst een groot aantal uitbreidingen van bestaande spoorlijnen, veelal verdubbelingen (☞ figuur 1.1). Spoorverdubbeling in stadskernen is veelal problematisch. Voor het benodigde ruimtebeslag is slopen van bebouwing en aanpassing van kruisende infrastructuur vaak onvermijdelijk. Echter, indien slopen van bebouwing niet gewenst of niet mogelijk is, is een ondergrondse variant van de spoorverdubbeling een zeer welkome oplossing. Ofwel, om in medische termen te spreken:

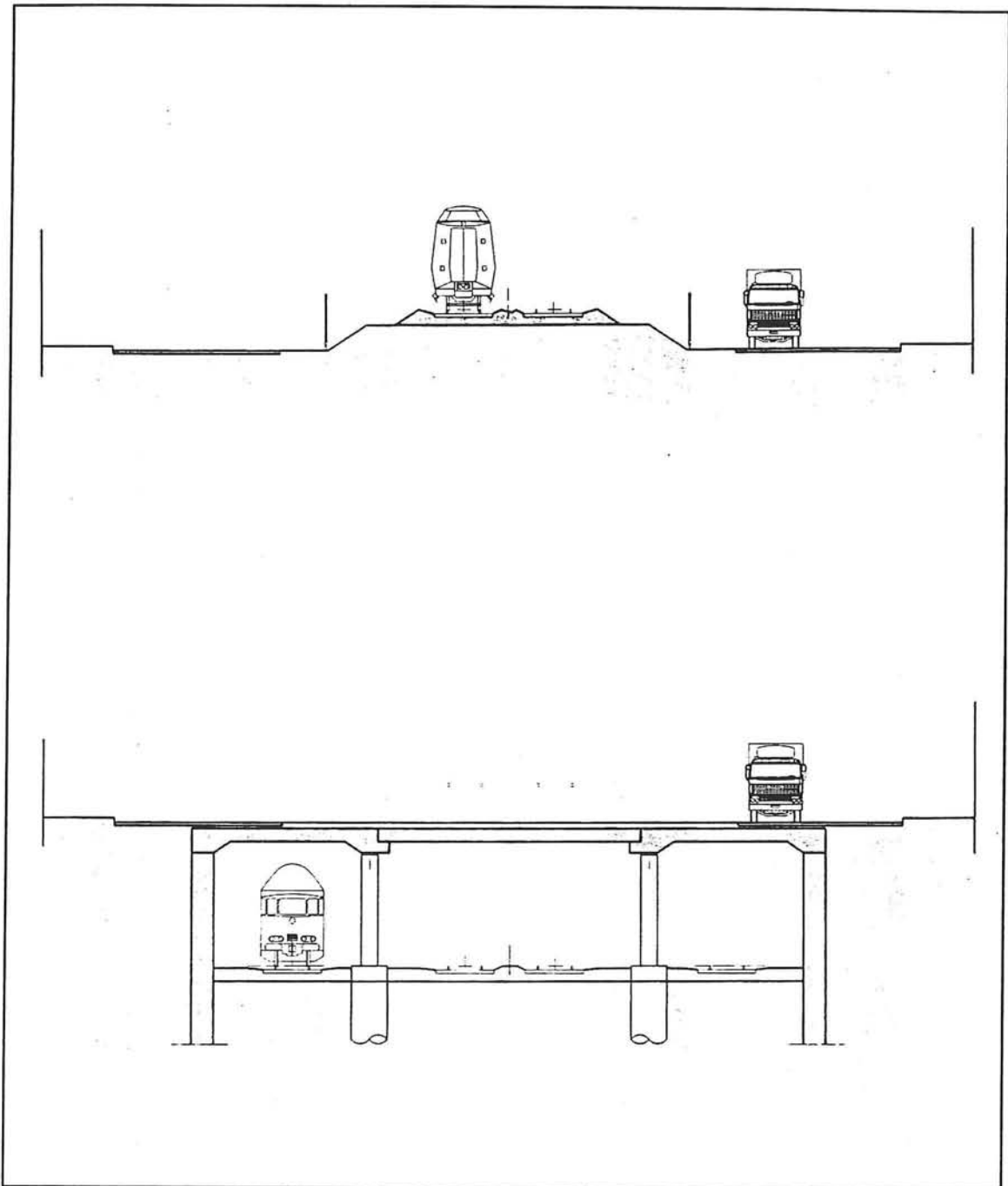
*'Als dotteren niet mogelijk is, moeten we de patiënt een bypass verschaffen.'*

Tunnels bieden het voordeel dat ze de schaarse bovengrondse ruimte sparen (☞ figuur 1.2). Reizigers echter, zijn nog altijd huiverig om lang onder de grond te verblijven. Sterker nog: het vermoeden bestaat dat deze 'dieptevrees' de laatste tijd zelfs is toegenomen.

Toch is een tunnel een voor de hand liggende oplossing als een nieuw stuk infrastructuur moet worden aangelegd of een bestaand stuk moet worden uitgebreid, door een dicht bevolkt gebied. Uiteraard gaat de aanleg van een tunnel niet zonder slag of stoot. Als een tunnel bijvoorbeeld middels een open-bouwput wordt aangelegd, wordt vaak een complete stad overhoop gehaald. Het maken van een tunnel door deze onder de stad door te boren biedt dan een uitkomst. Juist voor het dichtbevolkte Nederland biedt de boormethode perspectief. De tunnel kan worden aangelegd, zonder dat de grond hoeft te worden opengemaakt. Op die manier wordt een langdurige ontwrichting van een complete stad voorkomen.

Er is echter één groot probleem dat zich voordoet bij het voornemen in Nederland een tunnel te boren. In ons land is er namelijk geen enkele ervaring met het boren van tunnels van enige omvang, en zeker niet in de slappe grond die Nederland rijk is.

Wat is de invloed van het boren op de bebouwing? Kun je überhaupt boren in deze slappe grond? En ons Nederlanders is natuurlijk vooral geïnteresseerd in: Wat kost het?



Figuur 1.2 Spoor bovengronds/ondergronds.



Allemaal vragen waarvan de antwoorden inzicht kunnen geven in de technische en financiële haalbaarheid van het toepassen van een boortunnel in Nederland, als aantrekkelijk tunnel-alternatief.

Het zoeken naar deze antwoorden leidde tot het ontstaan van diverse studiegroepen.

## 1.2 Studie NS-BTC.

In januari 1991 is in opdracht van de NV Nederlandse Spoorwegen een haalbaarheidsonderzoek gestart naar de toepassingsmogelijkheden van een geboorde railtransport-tunnel in West-Nederland.

Dit onderzoek is gedaan door het Ingenieursbureau van de NS (NS-IB) in samenwerking met de Boortunnelcombinatie BTC, bestaande uit: Ballast Nedam Beton en Waterbouw, Hollandse Beton- en Waterbouw, Strukton Groep en Wayss & Freytag.

Als studie-onderwerp is de toekomstige spoorverdubbeling in de gemeente Delft aangewezen. Deze uitbreiding is noodzakelijk in verband met de voorgenomen verdubbeling van de spoorcapaciteit in de randstad, volgens het plan Rail 21. Het studie-onderwerp van NS-BTC betreft de technische haalbaarheid van de aanleg van een spoortunnel in de gemeente Delft, door middel van de zogenaamde schildboormethode. Deze tunnel zal uit twee enkelspoors buizen bestaan, ter completering van de huidige bovengrondse sporen tot een totaal van vier sporen. De huidige bovengrondse sporen blijven dus gehandhaafd.

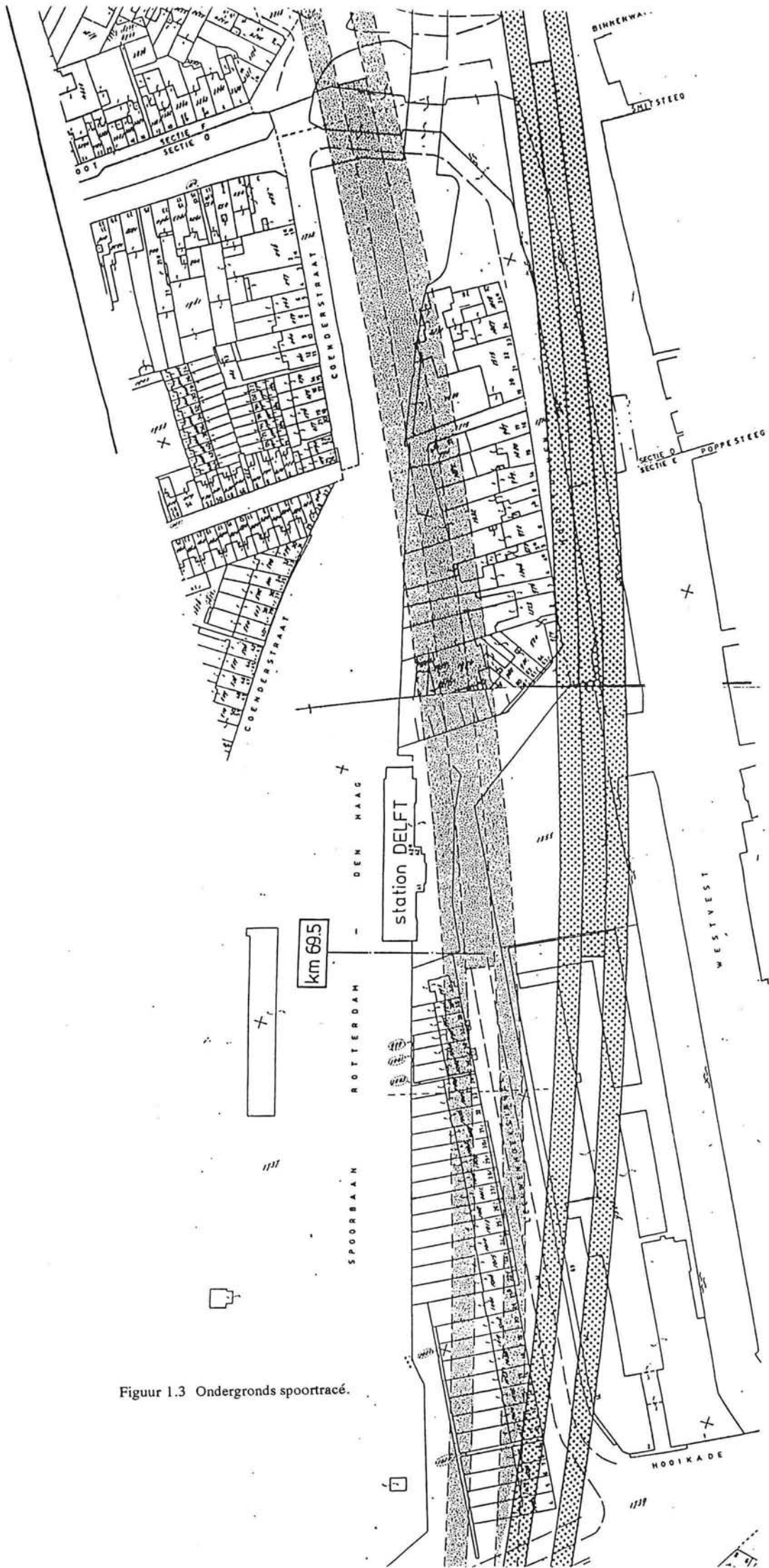
Aangezien in Delft sprake is van een echte West-Nederlandse grondopbouw, is deze locatie uitermate geschikt voor een studie naar het boren in slappe grond.

Voor het beoordelen van de technische haalbaarheid zijn twee vragen beantwoord, te weten:

- ☛ Is de schildboormethode technisch uitvoerbaar, gezien de eigenschappen van de ondergrond langs het voorgenomen tracé?
- ☛ Zijn de zettingen, die door de aanleg van de tunnel worden veroorzaakt, acceptabel?

Uit deze studie is naar voren gekomen, dat de schildboormethode in slappe grond technisch uitvoerbaar is. Bovendien blijken de veroorzaakte zettingen alleszins acceptabel te zijn.

Bij de tracébepaling van de ondergrondse sporen was er de keuze tussen een 'Westelijk' en een 'Oostelijk' tracé (☛ figuur 1.3). Voor het laatste tracé is gekozen.



Figuur 1.3 Ondergronds spoortracé.

Het totale tunneltraject zal worden opgedeeld in 4 delen, te weten:

1. **Zuidzijde:** 1600 meter tunnel, te bouwen vanaf maaiveld. (open bouwput)
2. **Ondergronds station:** 340 meter.
3. **Noordzijde:** 1600 meter boortunnel.
4. **Noordzijde:** 800 meter tunnel, te bouwen vanaf maaiveld. (open bouwput)

De drie tunnelgedeelten, met name het boortracé, zijn reeds grondig in voornoemde studie bestudeerd.

Het ondergronds station echter, is slechts globaal beschouwd. Wel is reeds vastgesteld dat een verbinding met het huidige stationsgebouw moet worden gerealiseerd. Men gaat er vooralsnog vanuit dat dit station in een **open bouwput** zal worden gebouwd.

### **1.3 Omschrijving afstudeerproject.**

In dit afstudeerproject zullen een groot aantal mogelijke bouwmethoden voor het ondergrondse station worden bestudeerd. Daar het bouwen in een open bouwput veel hinder voor de nabije omgeving oplevert, zal worden getracht eventueel een no-dig methode te ontwikkelen. Bouwmethoden, zoals het bevriezen van de grond of het bouwen vanuit de boortunnel, zijn niet uitgesloten. Naast de optie voor een no-dig methode zal tevens een variant op de locatiekeuze voor het station, met haar bijkomende voordelen t.a.v. de uitvoering, worden bestudeerd. Tevens zal een constructief-ruimtelijk ontwerp voor dit ondergrondse station worden gemaakt.

### **1.4 Aanpak.**

In de eerste fase zijn alle gegevens verzameld, benodigd voor het afbakenen van het onderwerp en voor het vaststellen van het programma van eisen, de randvoorwaarden, wensen en uitgangspunten.

Allereerst is de huidige en de toekomstige, gewenste, situatie in Delft bestudeerd. De tracékeuze van de nieuwe spoortunnel, de locatiekeuze van het ondergrondse station etc., voortvloeiend uit het rapport van de studiegroep NS-BTC, zijn aan een nader onderzoek onderworpen. Vervolgens is een inventarisatie gemaakt van de randvoorwaarden, eisen en wensen en uitgangspunten, waarin onderscheid is gemaakt tussen een technisch en een functioneel programma van eisen. Dit in samenhang met de conclusies van bovengenoemd rapport en verder ten aanzien van het ontwerp van het ondergrondse station zelf, de uitvoering, het treinverkeer, de treinreizigers, de veiligheid en verdere bouwtechnische aspecten.

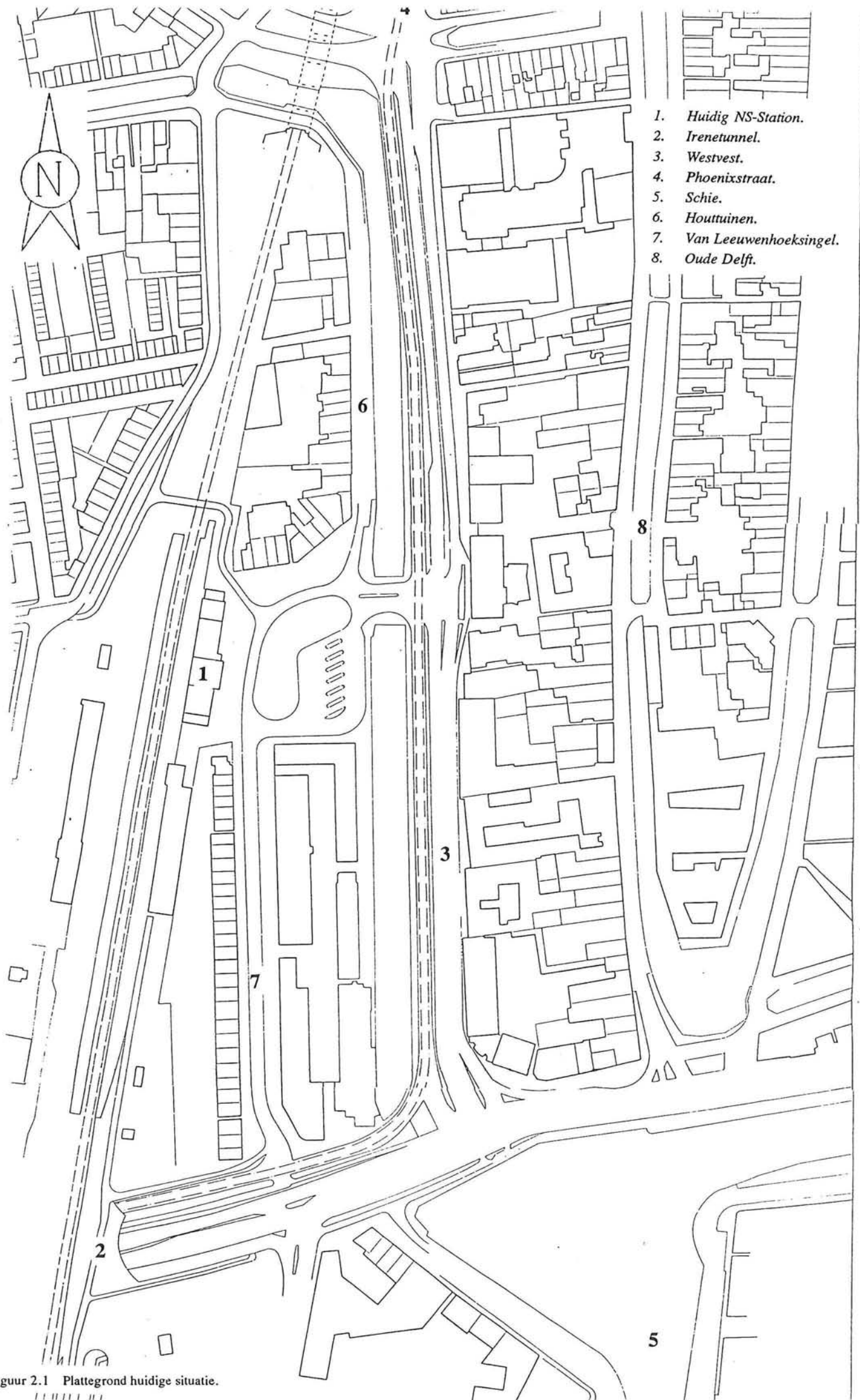


Aan de hand van de eisen en wensen ten aanzien van het ondergrondse station zelf is daarna een ruimtelijk ontwerp gemaakt van het ondergrondse station. Hierbij zijn de minimaal benodigde inwendige afmetingen van het station bepaald. Hieronder valt bijvoorbeeld het benodigd profiel van vrije ruimte voor de treinen. Ook zijn hier bijvoorbeeld globaal de plaatsen aangegeven waar (rol)trappen, liften en toegangen moeten komen. In de ontwerpfilosofie, beschreven in hoofdstuk 4, is dit de eerste stap.

In de fase hierna is een uitgebreide literatuurinventarisatie en literatuurstudie gedaan naar een groot aantal mogelijke bouwmethoden van een ondergrondse constructie in het algemeen en een ondergronds station in het bijzonder. Deze bouwmethoden zijn systematisch naast elkaar gezet. Na een toetsing van deze uitvoeringsmethoden is een afweging en een keuze gemaakt.

In de volgende stap is een definitief constructief-ruimtelijk ontwerp van het ondergrondse station gemaakt. Hierin is het globale ruimtelijk ontwerp van de tweede stap uitgewerkt en is een definitief ontwerp voor het station vastgesteld. Daarna zijn van diverse hoofdconstructie-elementen berekeningen gemaakt.

In de laatste fase is de uitvoering van het ondergrondse station verder uitgewerkt. Alle bij de uitvoering, en met name de voor de gekozen uitvoeringsmethode, van belang zijnde aspecten komen hier aan de orde. Hierbij is met name getracht de overlast voor de stad Delft tot een minimum te beperken.



Figuur 2.1 Plattegrond huidige situatie.

||||| III

## 2. Over wat heden is en wat nog komen gaat.

### 2.1 Beschrijving bestaande situatie. (☞ figuur 2.1)

#### 2.1.1 Spoorinfrastructuur.

Het station Delft is gelegen tussen de twee grote Intercity-stations Rotterdam CS en Den Haag HS. In het drukste uur passeren hier 10 personentreinen per richting. Daarnaast passeren hier ook regelmatig posttreinen e.d.

Het baanvak is dubbelspoors uitgevoerd, terwijl het station zelf over 3 perrons beschikt.

Ten zuiden van Delft ligt de spoorbaan op een zandlichaam. Vanaf het station vervolgen de sporen hun weg noordwaarts over een viaduct door de stad (☞ foto 2.1).



Foto 2.1 Spoorviaduct.

#### 2.1.2 Station en stationsplein.

Het stationsgebouw is een middelgroot station, daterend uit 1905 (☞ foto 2.2). Het gebouw is gefundeerd op palen. Het beschikt over een drietal loketten en een stationrestaurantie.





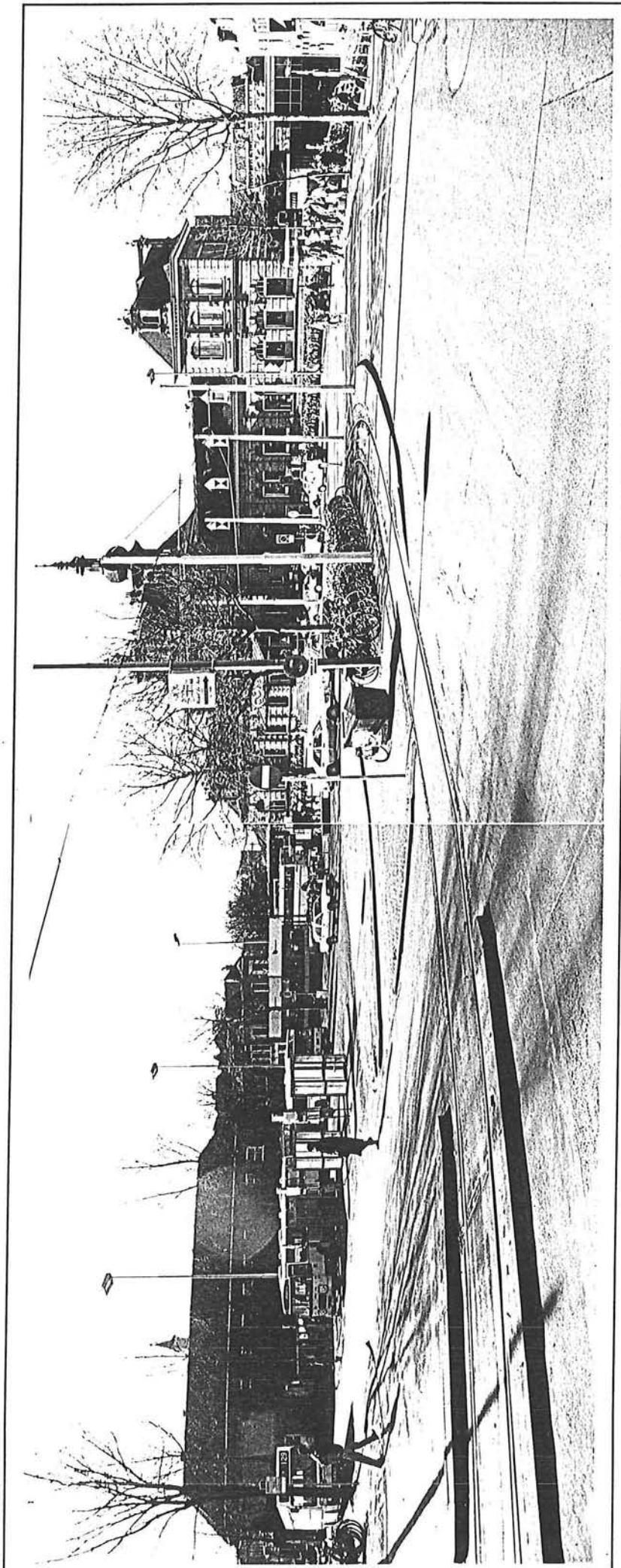


Foto 2.2 Stationsgebouw met stationsplein.



Het stationsplein, gelegen aan de oostzijde van het station, bestaat voor een groot gedeelte uit halteplaatsen van de regionale- en stadsbussen. Verder is een taxistandplaats aanwezig, alsmede de eindhalte voor tram 1 van de HTM. (☞ foto 2.2)

Het stationsplein is verbonden met de Westvest middels een betonnen brug over de Westsingelgracht (☞ foto 2.3). Deze brug is gefundeerd op betonnen palen van 17.25 meter lang.

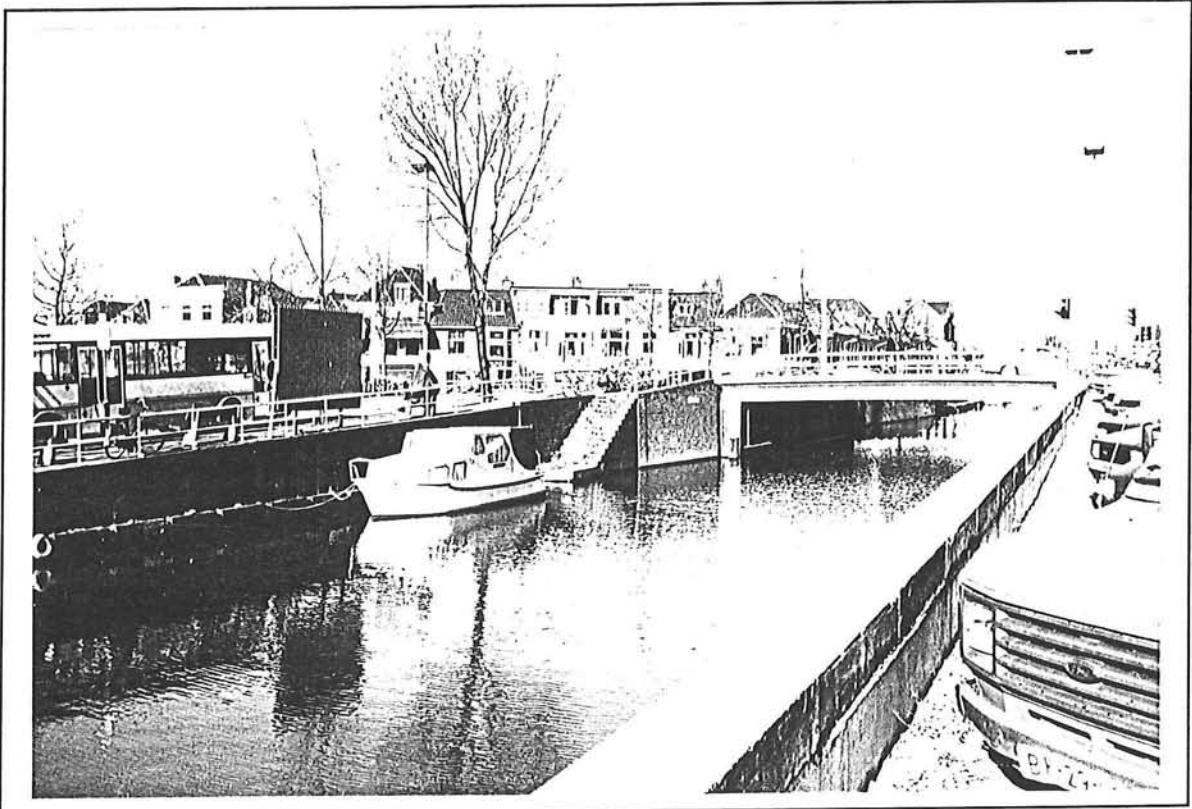


Foto 2.3 Brug over de Westsingelgracht.

### 2.1.3 Hoofdwegen nabij station. (☞ figuur 2.2)

Het station van Delft wordt als het ware ingesloten door een aantal grote en belangrijke verkeersaders. Ten zuiden van het station ligt de Zuidwal, die in westelijke richting door de Irenetunnel de spoorlijn kruist en overgaat in de Westlandseweg (☞ foto 2.4). Deze weg is één van de grote verbindingswegen van het westelijk deel met het oostelijk deel van Delft, dat door de spoorlijn gescheiden is.

Ten oosten van het station ligt de Westvest, overlopend in de Phoenixstraat (☞ foto 2.5). Deze weg is één van de grote verbindingswegen in noordelijke richting. In de middenberm van deze weg liggen de tramrails van tramlijn 1.

De stads- en streekbussen maken van deze wegen intensief gebruik. Zo ook is de Van Leeuwenhoeksingel een intensief gebruikte busroute. De Van Leeuwenhoeksingel ligt ten





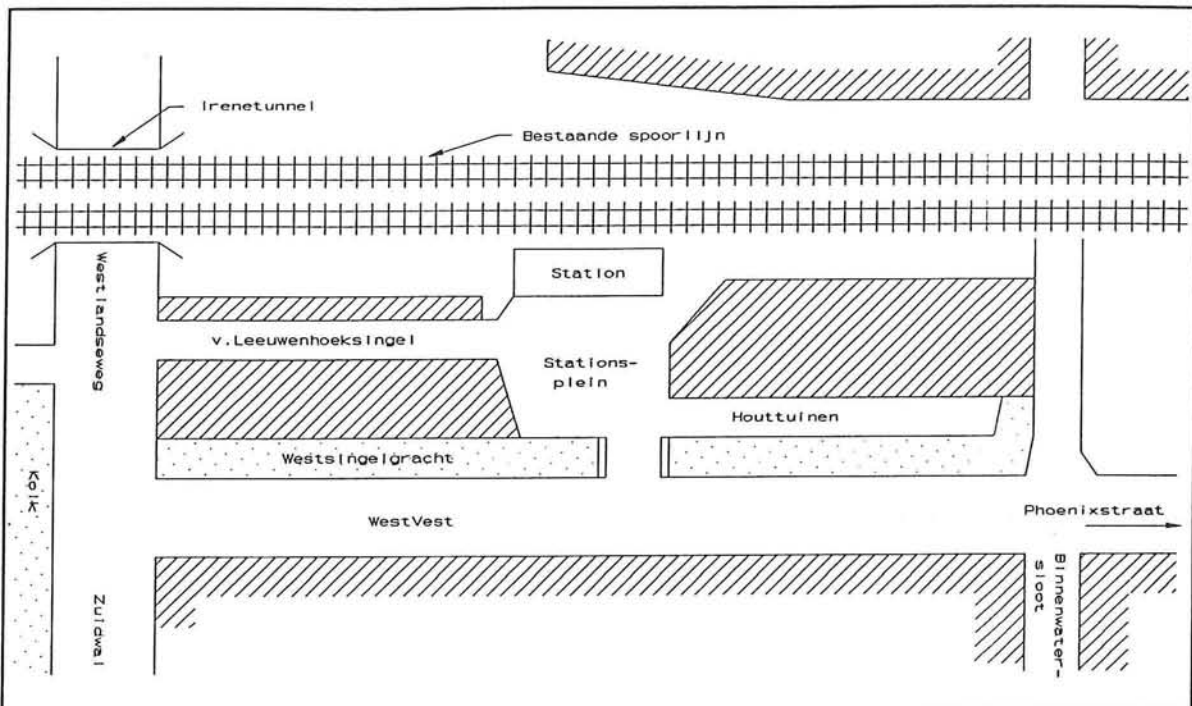
Foto 2.4 Irenetunnel.



Foto 2.5 Westvest.



zuiden van het station en loopt parallel aan de Westvest (zie foto 2.6).



Figuur 2.2 Overzicht verkeerswegen rond station Delft.

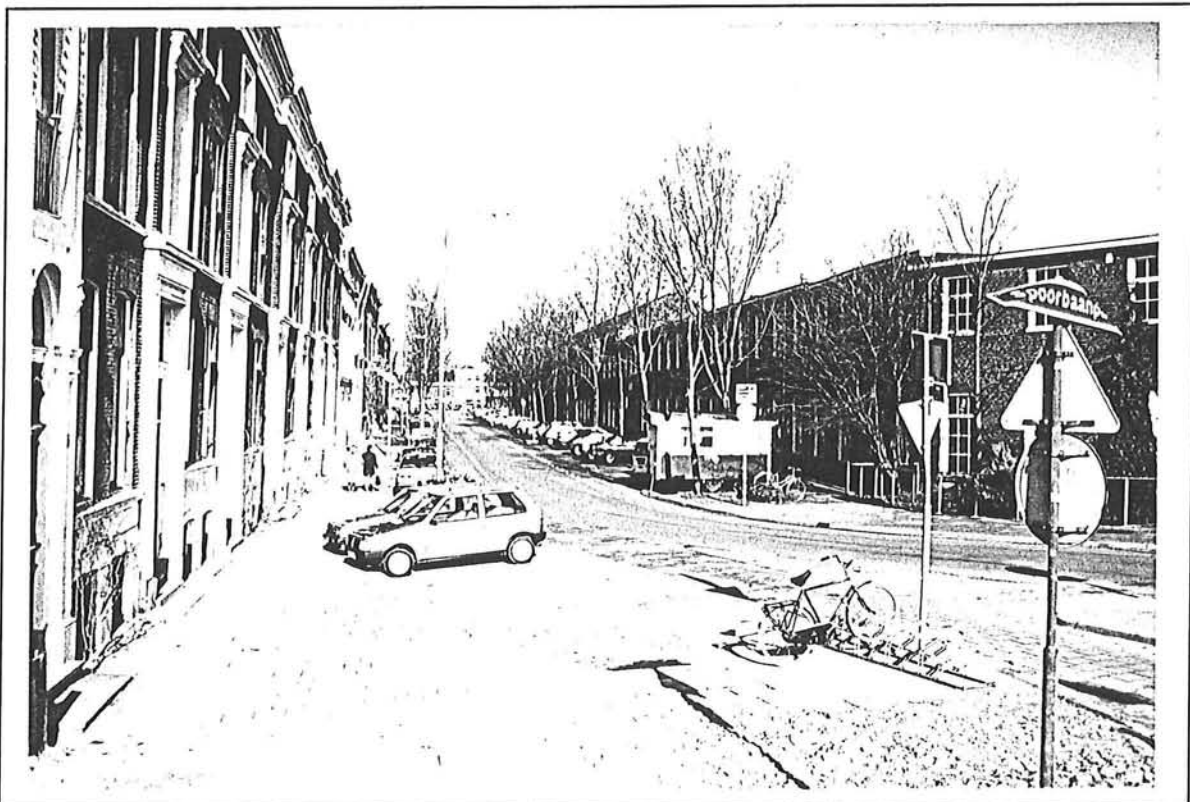


Foto 2.6 Van Leeuwenhoeksingel.







Foto 2.7 Constructiewerkplaatsen.



Foto 2.8 Houttuinen en Westsingelgracht.



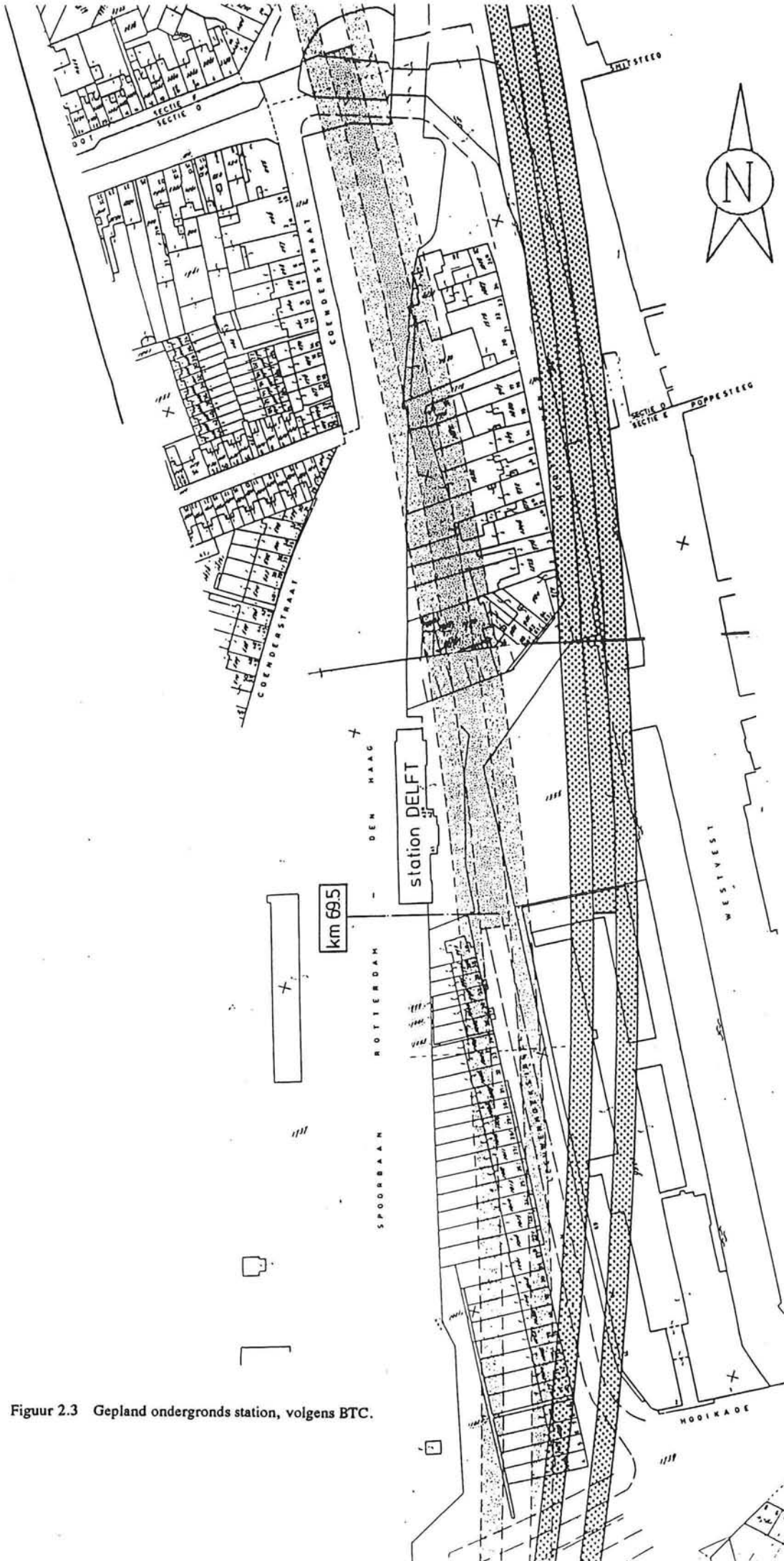
#### **2.1.4 Overige bebouwing nabij het station.**

Ten zuiden van het stationsplein liggen de zogenaamde constructiewerkplaatsen waarin voorheen de technische dienst van de Rijkspolitie was gevestigd (☞ foto 2.7 en foto 2.6, rechts). Thans is dit gebouwencomplex eigendom van de gemeente en wordt het ongeveer voor 1/3 deel verhuurd (huurcontracten tot 1996). De rest van de gebouwen is niet in gebruik. Deze gebouwen zijn op staal gefundeerd.

Ten zuiden van het station, aan de Van Leeuwenhoeksingel, staat een dertigtal huizen. Deze huizen zijn op palen gefundeerd, op een niveau van 4 m ÷ NAP (☞ foto 2.6, links).

De panden aan de Houytuinen, ten noorden van het stationsplein, liggen pal aan de Westsingelgracht (☞ foto 2.8). Deze panden zijn op staal gefundeerd.

Langs de gehele Westsingelgracht is aan de straatzijde een kademuur aanwezig. Deze kademuur is gefundeerd op betonnen palen op een niveau van 21 m ÷ NAP.



Figuur 2.3 Gepland ondergronds station, volgens BTC.

## **2.2 Beschrijving gewenste situatie n.a.v. rapport NS-BTC.**

### **2.2.1 Spoorinfrastructuur.**

Ten aanzien van de spoorinfrastructuur is het conform het plan Rail-21 gewenst dat er in de gehele randstad spoorverdubbeling plaatsvindt. Dit betekent voor het baanvak door Delft een uitbreiding naar vier sporen. Twee sporen, de huidige sporen, zullen in de toekomst gebruikt worden als 'stoptrein'-sporen. De twee nieuwe sporen zullen gaan dienen voor sneltreinen en Intercity-treinen, de z.g.n. 'snelsporen'.

De twee nieuwe sporen zullen ondergronds de stad passeren. Ter hoogte van het huidige station zal een ondergronds station worden aangelegd, het onderwerp van deze afstudeeropdracht.

### **2.2.2 Station en stationsplein.**

HET nieuwe station in Delft wordt in de toekomstige situatie vijfsporig. Het station bestaat dan dus uit een bovengronds gedeelte met drie perronzijden en een ondergronds gedeelte met twee perrons. De twee snelsporen lopen daarbij ondergronds, met ter hoogte van het bestaande station een ondergronds stationsgedeelte.

Het geplande tracé van de spoortunnel loopt onder de oostelijk helft van het stationsplein, waar zich de bushaltes bevinden, en voor een deel onder de brug over de Westsingelgracht. Het ondergrondse station loopt globaal van het zuidelijke puntje van het stationsplein tot ter hoogte van de Binnenwatersloot (☞ figuur 2.3). Ter indicatie: Wordt nu bijvoorbeeld een open bouwputmethode toegepast voor dit ondergrondse station, dan betekent dit dat het stationsplein voor ongeveer de helft zal moeten worden open gegraven.

In de toekomstige situatie zal een verbinding van het ondergrondse station met het huidige stationsgebouw worden gerealiseerd. Verder zal het ondergrondse station ook vanaf het stationsplein toegankelijk zijn. Bovendien zal ter hoogte van de Binnenwatersloot een toegang worden gecreëerd. Dit laatste is een wens van de gemeente Delft om een goede aansluiting met het centrum van Delft te verkrijgen. Logischerwijs dient het stationsplein zijn functie als bushalteterrein te behouden.

### **2.2.3 Hoofdwegen nabij het station.**

Het boortunneltracé volgt grotendeels het bestaande stratenplan, en loopt in noordelijke richting onder de Phoenixstraat (☞ figuur 1.3). Daar deze weg tot de hoofdwegen voor het stadsverkeer behoort, zal het boren van dit traject extra aantrekkelijk zijn. In zuidelijke richting kruist het tunneltracé de Irenetunnel. Het plan is om deze kruising met een open bouwput gefaseerd uit te voeren.

### **2.2.4 Overige bebouwing nabij het station.**

De bebouwing rond het station zit de constructie van het ondergrondse station niet ernstig in de weg. Slechts drie panden aan de Houttuinen en de constructiewerkplaatsen ten zuiden van het



stationsplein vormen een belemmering. Verder loopt het stationstracé onder achtereenvolgens: het stationsplein (met bushaltes), de Westsingelgracht en een deel van de Westvest (zie plattegrond figuur 2.1).

Wat betreft de constructiewerkplaatsen zijn er bij de gemeente reeds ideeën om dit complex in de toekomst te vervangen door nieuwbouw. Dit gegeven vormt dan ook een uitgangspunt bij de bouw van het ondergrondse station en de keuze van de uitvoeringsmethode.

Mocht de sloop van deze constructiewerkplaatsen toch niet doorgaan, dan is het wellicht goedkoper dit gebouwencomplex toch af te breken en te vervangen, in plaats van er met kostbare constructies onderdoor te gaan.





### 3. Programma van eisen, randvoorwaarden en uitgangspunten.

#### 3.1 Functioneel programma van eisen.

##### 3.1.1 Treinfrequentie.

Uit de studie 'Open Eind Lay-Out Oude Lijn Noord' van de Nederlandse Spoorwegen is gebleken dat de toekomstige vervoersomvang tussen Den Haag en Rotterdam zal leiden tot een aanzienlijke verhoging van de treinfrequentie. Maatgevend is hierbij de drukste richting in het drukste spitsuur. Hieronder wordt de verdeling van de treinen over de verschillende treinsoorten ('deelnetten') aangegeven, met ter vergelijking de situatie in 1990.

|  | 1990      | 2005/2010           |
|--|-----------|---------------------|
| Vervoersomvang NS-net<br>(in miljard reizigerskm.)             | 10        | 21                  |
| Eurocity/Intercity/Hogesnelheidstrein<br>(geen halte te Delft) | 2         | 4 à 6 <sup>*)</sup> |
| Interregio/sneltreinen<br>(halte te Delft)                     | 2         | 8                   |
| Agglo-Regio/stoptreinen<br>(halte te Delft)                    | 6         | 6                   |
| <b>Totaal</b>  | <b>10</b> | <b>18 à 20</b>      |

<sup>\*)</sup> aantal IC treinen ondermeer afhankelijk van het nog vast te stellen aantal zitplaatsen per trein.

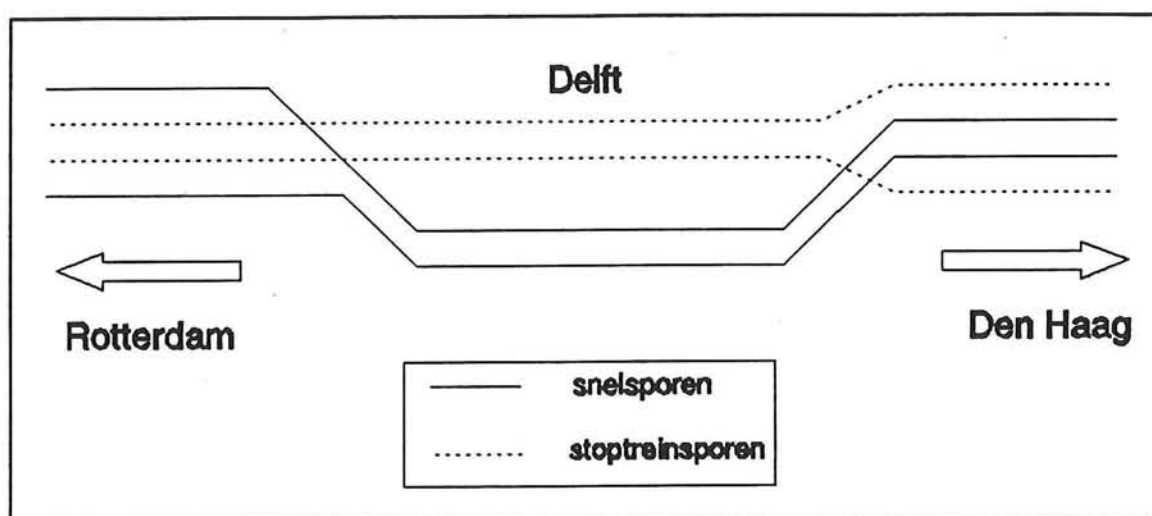
Daarnaast moeten ook in het drukste spitsuur buiten-patroon-treinen kunnen worden ingepast, zoals leeg-materieel-treinen, posttreinen, reisbureau-treinen. Voor Delft betekent dit, dat van de treinen op snelsporen 8 treinen moeten halteren, terwijl dit aantal voor de stopsporen 6 bedraagt.



### 3.1.2 Sporen.

Het uiteindelijk viersporig traject tussen Rotterdam en Leiden kent een wisselend spoorgebruik. Vanuit Rotterdam zijn de buitensporen snelsporen en de binnensporen zijn stopsporen. In Leiden rijden de snelsporen aan de binnenzijde, hetgeen betekent dat tussen Rotterdam en Leiden een switch in het spoorgebruik zal moeten plaatsvinden, ofwel: het snelspoor kruist het stopspoor.

Het ondergrondse traject te Delft zal worden benut om een dergelijke switch, uitgaande van twee ondergrondse snelsporen aan de oostzijde van het bestaande spoorwegstelsel, te realiseren. De sporen lay-out bij de in/uitrit van de tunnel aan de Rotterdamzijde verschilt daarbij van die aan de zijde van Den Haag. (zie figuur 3.1)



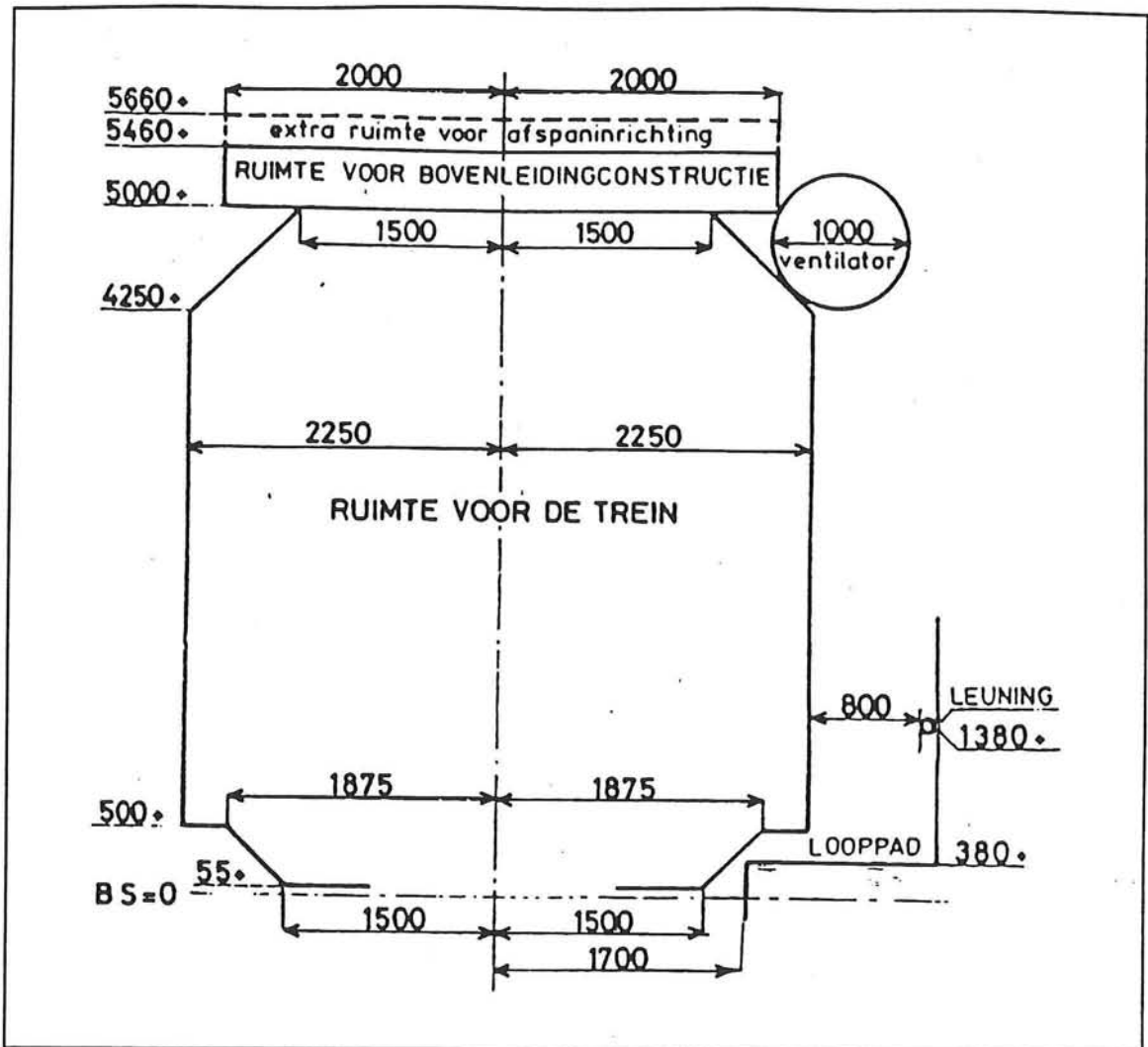
Figuur 3.1 Sporenwissel tussen Rotterdam en Den Haag HS.

### 3.1.3 Bestaande infrastructuur.

Tijdens de bouw dienen er indien nodig vervangende voorzieningen te worden getroffen voor de bestaande infrastructuur, zoals wegen, maar ook kabels, leidingen en watergangen. De afwikkeling van het stads- en streekvervoer (bus, tram en taxi) dient zoveel mogelijk van een 'ongestoorde' voortgang verzekerd te zijn. Dit betekent onder andere de aanleg van hulpbruggen en dergelijke.

### 3.1.4 Reizigers.

Vanzelfsprekend dienen ook de reizigers (niet alleen treinreizigers, maar ook tram-, bus-, en taxireizigers) zo min mogelijk hinder van de bouwactiviteiten te ondervinden.



Figuur 3.2 P.V.R. Rechthoekige tunneldoorsnede, rode meetgebied van toepassing.

### **3.1.5 Ondergrondse station.**

Bij de dimensionering van het ondergrondse station wordt uitgegaan van een perron dat plaats kan bieden aan 4 gekoppelde IC-3 stellen of een Loc met 12 rijtuigen. De maatgevende perronlengte is hierbij 340 meter. Het ondergrondse station dient bij voorkeur te beschikken over een eilandperron.

De perronbreedte is, rekening houdend met de hoge snelheid van voorbijrijdende treinen (baanvaknsnelheid), gesteld op minimaal 13 meter. Hiervan is aan beide zijden van het perron een vrije breedte van 3.5 meter vanaf de rand van het perron beschikbaar. De overgebleven tussenstrook van 6 meter dient voor de voorzieningen op het perron.

Het perron moet bereikbaar zijn met roltrappen en een lift voor minder valide personen.

Toegangen tot het ondergrondse station dienen zich te bevinden in het bestaande stationsgebouw en op het stationsplein. De gemeente Delft heeft als wens een extra toegang ter hoogte van de Binnenwatersloot.

De toegang vanuit het bestaande stationsgebouw zal worden gerealiseerd middels een verbinding tussen het bestaande en het ondergrondse station.

Ten aanzien van de (sociale) veiligheid van het ondergrondse station dienen de toegangen en het station zelf ruim van opzet te zijn. Onoverzichtelijke nisjes en dergelijke moeten zoveel mogelijk worden vermeden. Ook dient er aandacht te worden geschonken aan goede verlichting en daglichttoetreding waar mogelijk.

### **3.1.6 Trillingen en geluid.**

Door het contact tussen wielen en spoorstaaf worden trillingen veroorzaakt. Deze trillingen veroorzaken geluid waarvoor de tunnel zelf als klankkast dient. Daar dit contactgeluid door omwonenden als zeer hinderlijk kan worden ervaren is het zaak deze trillingen zoveel mogelijk te minimaliseren.

## **3.2 Technisch programma van eisen.**

### **3.2.1 Ondergrondse tunnelsporen.**

Uitgangspunt voor het ontwerp van de ondergrondse tunnelsporen is de V.T.G. (Verzameling Technische Gegevens) deel I, II en IV.

#### **■ Profiel van vrije ruimte.**

Het standaard Profiel van Vrije Ruimte voor een rechthoekige tunneldoorsnede met rode meetgebied is weergegeven in figuur 3.2.

(zie ook bijlage B)



■ **Baanvaksneldheid.**

De baanvaksneldheid is 200 km/u (conform Rail 21).

Echter, in de NS-BTC-studie is de baanvaksneldheid op dit tunneltracé door NS gewijzigd van 200 km/u in 160 km/u. Zo konden kleinere boogstralen worden toegepast en kon zodoende industriële bebouwing aan de zuidzijde van het tracé gespaard blijven.

■ **Boogstraal.**

- Streefwaarde:  $R \geq 2500$  m. (ideale verkanting  $h=190$ mm; aan te brengen verkanting  $h=190$ mm, minus toelaatbare reductie van 90-120mm.)
  - Minimumwaarde:  $R_{\min} = 2000$  m. (ideale verkanting  $h=240$ mm; aan te brengen verkanting  $h=240$ mm, minus toelaatbare reductie van 90-120mm.)
- N.B. Maximaal aan te brengen verkanting  $h=150$ mm.

■ **Verkanting.**

Maximale verkanting langs het perron:  $h=80$ mm.

■ **Verticaal lengteprofiel.**

Maximale helling: 2,5% (1:40). De afrondingsbogen hebben een streefwaarde:  $R = 16000$  m en een minimumwaarde:  $R_{\min} = 10000$  m.

Langs het perron een maximale helling van 0,5% (1:200).

**3.2.2 Ondergronds station.**

Het spoortracé in het ondergrondse station dient een goede aansluiting te krijgen op de overige spoorgedeelten, te weten: het boorgedeelte aan de noordzijde en het open bouwputgedeelte aan de zuidzijde.

Voor profiel van vrije ruimte en hellingen etc. zie 3.2.1.

De lengte van de perrons bedraagt 340 m (4 gekoppelde IC-3 stellen of loc met 12 rijtuigen).

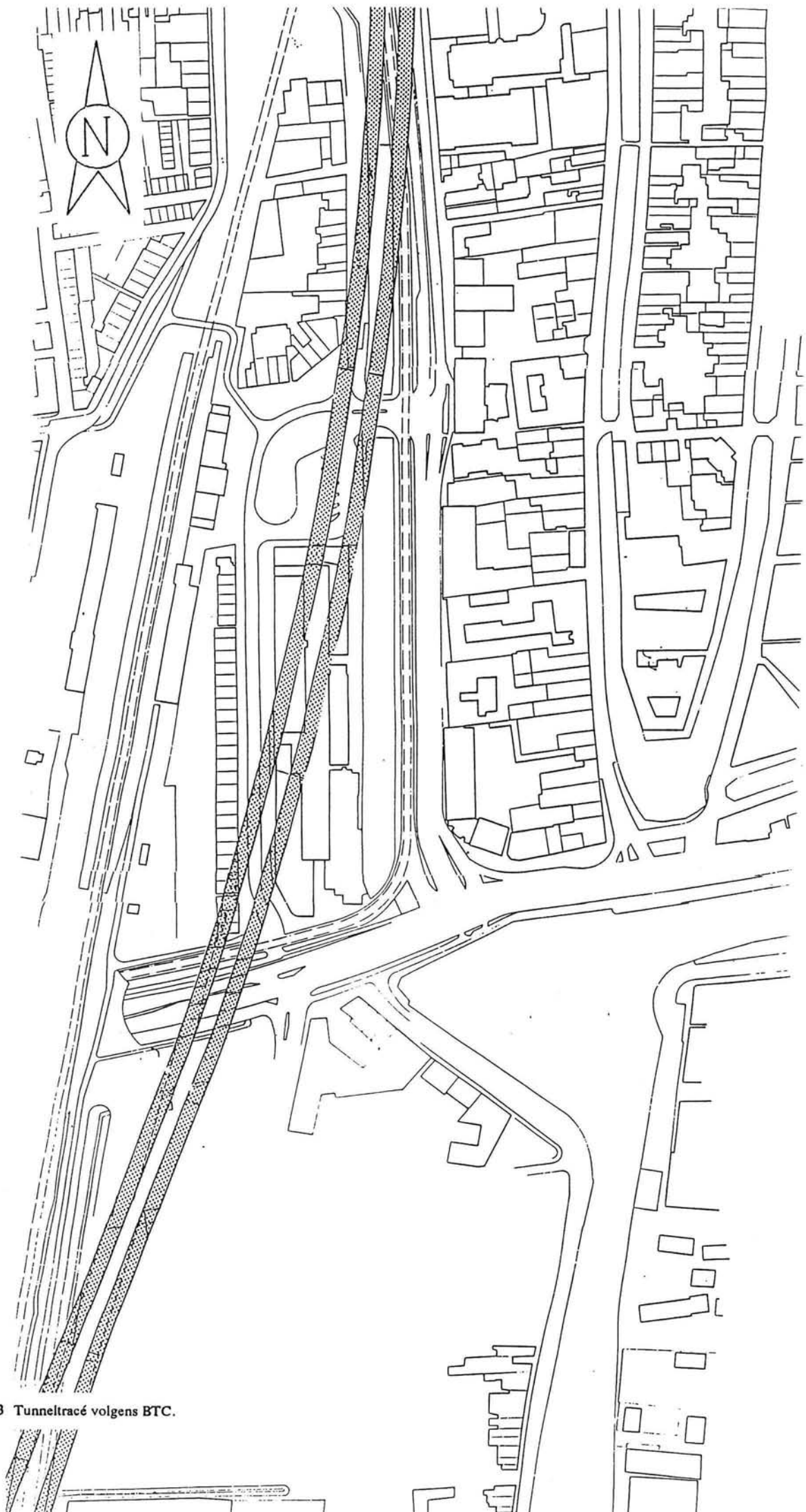
De vrije hoogte boven het perron (afstand perronvloer-plafond) moet tenminste 3.00 meter bedragen, i.v.m. het plaatsen van informatie-units en bewakingscamera's.

Voor het afvoeren van (schoonmaak-)water dient een afwatering van het perron te worden aangebracht.

Bovendien dient rekening te worden gehouden met het aanbrengen van installaties, zoals leidingen, ventilatiebuizen en dergelijke.

**3.2.3 Westsingelgracht.**

Gedurende de bouw van het ondergrondse station en de daarbij horende voorzieningen, dient met behulp van tijdelijke maatregelen de watervoerende functie van de Westsingelgracht gehandhaafd te blijven. Na voltooiing van het ondergrondse station wordt de situatie weer in de



Figuur 3.3 Tunneltracé volgens BTC.



oorspronkelijke staat hersteld.

Dit geldt tevens voor de brug over de Westsingelgracht, alsmede de kademuren aan weerszijden van de waterloop.

#### **3.2.4 Uitvoeringsfase.**

Teneinde grote schades aan de belendingen te voorkomen mag de grondwaterstand (GWS) niet worden verlaagd.

#### **3.3 Wensen.**

Het is een wens van de gemeente om het station ter hoogte van de Binnenwatersloot toegankelijk te maken, teneinde een verbinding van het station met het stadscentrum te creëren.

#### **3.4 Uitgangspunten en randvoorwaarden.**

##### **3.4.1 Ten aanzien van het ondergrondse station.**

Voor het tunneltracé, waarin het station wordt ingepast, wordt uitgegaan van het tracé zoals beschreven in het NS-BTC-rapport (zie figuur 3.3) (zie ook figuur 1.3).

Het spoor ter plaatse van het ondergrondse station heeft een helling van 1:200 (0,5%) in langsricting.

Het niveau van Bovenkant Spoor (BS) loopt van 16.5 m ÷ NAP ( $\approx$  17 m ÷ MV) in het hoogste punt tot 18.2 m ÷ NAP ( $\approx$  18.7 m ÷ MV) in het diepste punt, en ligt dus gemiddeld op ca. 17.5 m ÷ NAP ( $\approx$  18 m ÷ MV).

Van het boorgedeelte hebben de beide boorbuizen een inwendige diameter van 7.20 m en een uitwendige diameter van 7.90 m. De h.o.h. afstand van de buizen bedraagt 16.0 meter.

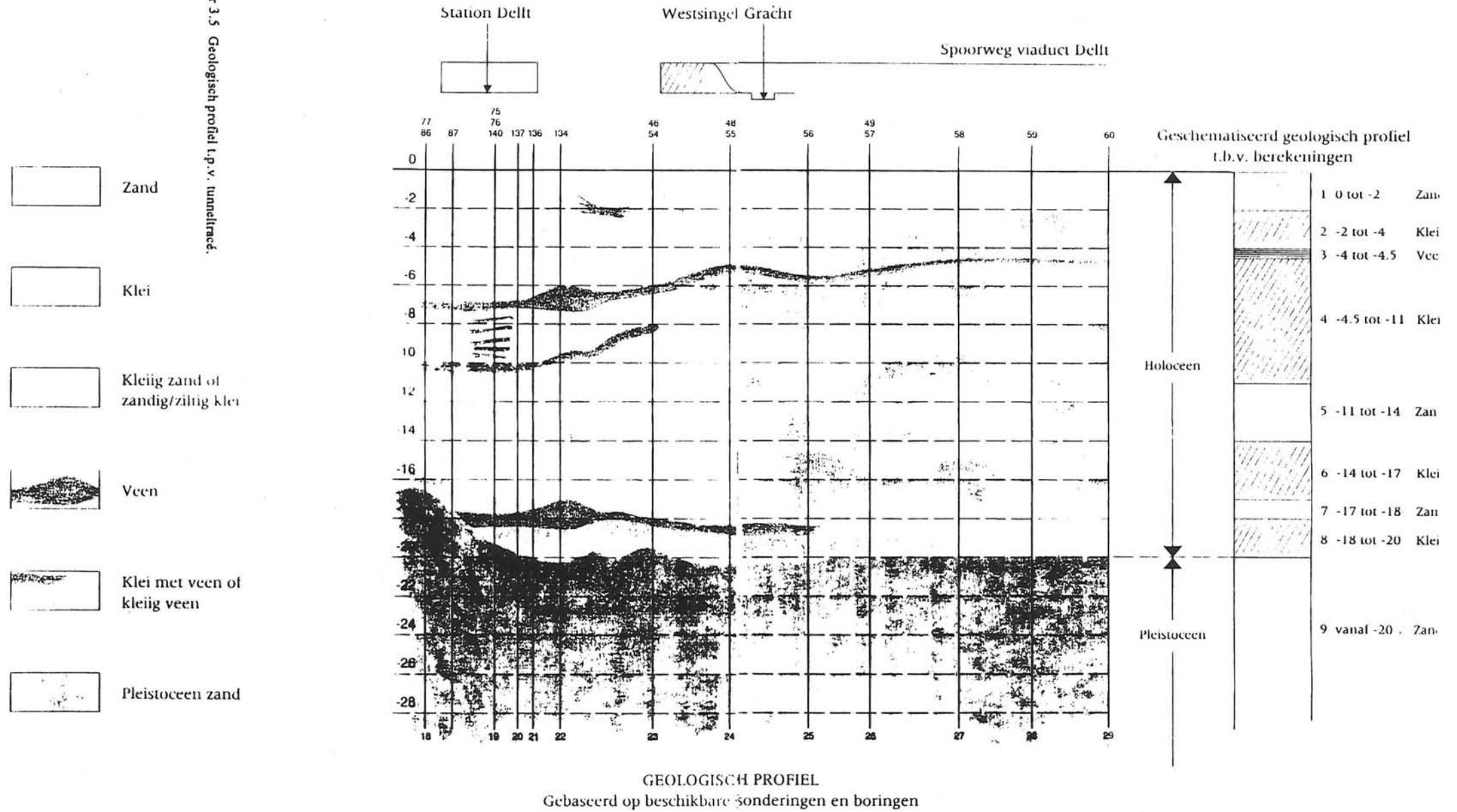
##### **3.4.2 Geologische gegevens.**

Figuur 3.4 geeft een schematisatie weer van de bodemopbouw in West-Nederland tot op zeer grote diepte. Dit project speelt zich af op een diepte van ongeveer 20 m ÷ NAP, derhalve zijn hier slechts de deklaag en het eerste watervoerend pakket van belang. De deklaag (holocene) behoort tot de Westland Formatie en de watervoerende laag (pleistocene zand) wordt tot de Formatie van Kreftenheye gerekend.

Gek genoeg verschilt de ondergrond van het Delftse tunneltracé van de ondergrond in het gebied rondom Delft. De oorzaak hiervan is een oude zee-arm die gedeelten van het bestaande holocene pakket erodeerde en die aanzienlijke hoeveelheden klei en zand afzette.

Deze zee-arm veranderde in de eeuwen van plaats, waardoor er een grote variëteit aan zandlagen, kleilagen en mengelingen van beide ontstond. Kijken we meer ten noorden en ten zuiden van het centrum van Delft dan vinden we een meer regelmatig patroon van zand en kleilagen.

Figuur 3.5 Geologisch profiel t.p.v. tunneltraject.



### **6.1.3 Varianten construeren in open bouwkuip.**

Is er eenmaal een bouwkuip gecreëerd, dan zijn er nog diverse methoden om de constructie hierin te bouwen.

#### **a. Vloer, wanden, dak. (☞ figuur 6.25)**

Binnen de bouwkuip wordt op de werkvloer de vloer van de constructie gestort. Vervolgens worden daarop de wanden aangebracht. Als laatste wordt hier het dak op gemaakt.

#### **b. Diepwand-wanden, vloer, dak. (☞ figuur 6.26)**

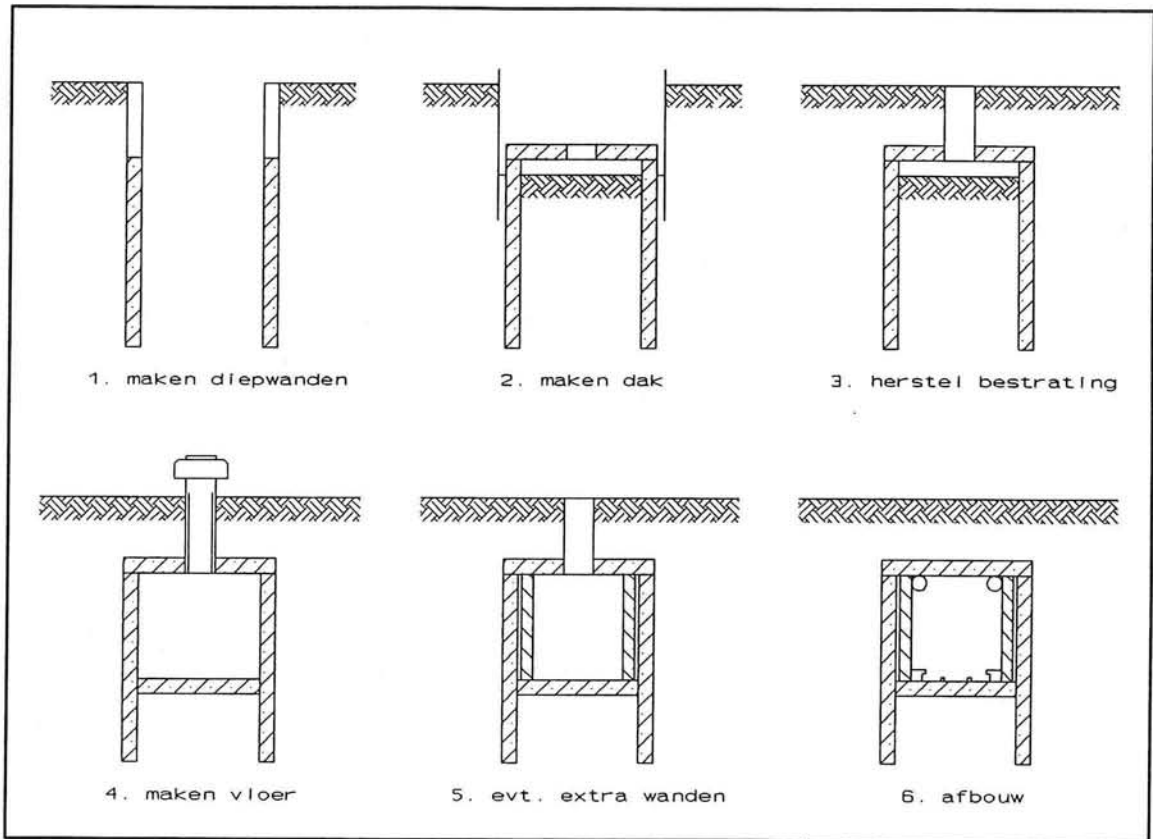
Door in de wapeningskorf van de diepwand reeds wapeningsstekeinden aan te brengen ter hoogte van de vloer en het dak van de constructie, is het mogelijk de diepwand als permanente wand van de constructie te gebruiken.

Na het ontgraven van de bouwput worden de stek-einden, die uit de diepwand steken, recht gebogen en kan de vloer worden gestort. Hetzelfde principe geldt voor het dak.

Uiteraard kan ook bijvoorbeeld alleen de vloer of alleen het dak op deze wijze worden geconstrueerd.

#### **c. Vloer, geprefabriceerde schalen. (☞ figuur 6.27)**

Bij deze methode wordt allereerst in de bouwkuip een vloer gestort, met aan de zijden een uitgespaarde sleuf. Vervolgens worden op deze vloer geprefabriceerde schalen aangebracht, die wanden en dak tegelijk bevatten. Deze moten worden naast elkaar in de uitgespaarde sleuf geplaatst en met de vloer verbonden middels een krimpvrije mortel.



Figuur 6.28 Uitvoeringsfasen wanden-dak-methode met diepwanden.

## 6.2 Wanden-dak-methode.

De wanden-dak-methode is in feite te omschrijven als een semi-open bouwkuip methode. Wanneer de ruimte op het maaiveld, waaronder de constructie moet worden aangelegd, slechts gedurende een bepaalde tijd mag worden verstoord, biedt deze methode uitkomst.

De essentie van deze methode is dat allereerst (bouwkuip)wanden in de grond worden aangebracht. Dit kunnen zowel diepwanden als stalen damwanden zijn. Vervolgens wordt ontgraven tot het niveau van het dak van de constructie, en wordt het dak aangebracht.

Daarna kan de 'bouwkuip' weer worden aangevuld met grond en kan het maaiveld weer worden hersteld.

Vervolgens kan via een schacht in het (tunnel)dak de ruimte onder het dak verder worden ontgraven. Bij aanwezigheid van grondwater <sup>1</sup> moet onder verhoogde luchtdruk worden gewerkt. Een alternatief is het bemalen van het grondwater, maar dit is echter veelal niet toegestaan. Een ander alternatief is het doorzetten van de wanden tot in een water-ondoorlatende laag.

Nadat de ontgraving is voltooid, kan de resterende constructie worden gebouwd, zonder dat men daar op het maaiveld hinder van ondervindt.

Een groot voordeel van deze methode is dus dat de verstoring van het maaiveld op deze manier aanzienlijk wordt verkort.

### a. Wanden-dak-methode met diepwanden. (zie figuur 6.28)

Voor de wanden van de bouwkuip wordt vaak gebruik gemaakt van diepwanden. Deze diepwanden kunnen dan veelal als permanente wanden worden opgenomen in de constructie, mits de kwaliteit van de wand voldoende is.

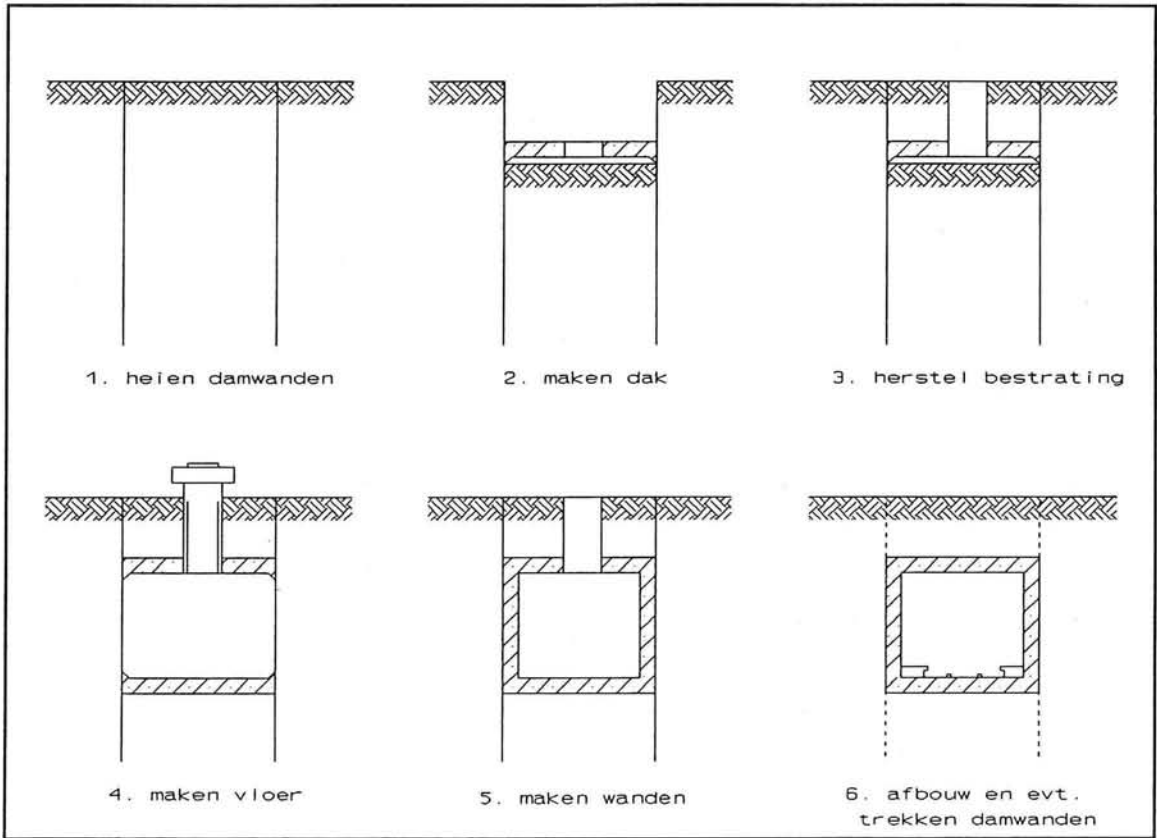
Na het aanbrengen van de diepwanden wordt een stukje ontgraven. Hier wordt het dak van de constructie aangebracht, waarbij het dak op diverse plaatsen wordt voorzien van uitsparingen t.b.v. de toegangsschachten. Na het voltooiën van het dak wordt het maaiveld weer hersteld.

Via de schachten wordt, veelal onder verhoogde luchtdruk, de ruimte onder het dak verder ontgraven. Het dak fungeert hierbij als stempel voor de wanden. De vloer kan nu worden gemaakt. Na het verharden van de vloer kan de verhoogde luchtdruk weer worden afgelaten.

De diepwanden kunnen als permanente wanden dienen. Indien hiervan geen gebruik wordt gemaakt, worden extra wanden tussen vloer en dak aangebracht. De constructie kan nu

---

<sup>1</sup> In Nederland is dit meestal wel het geval.



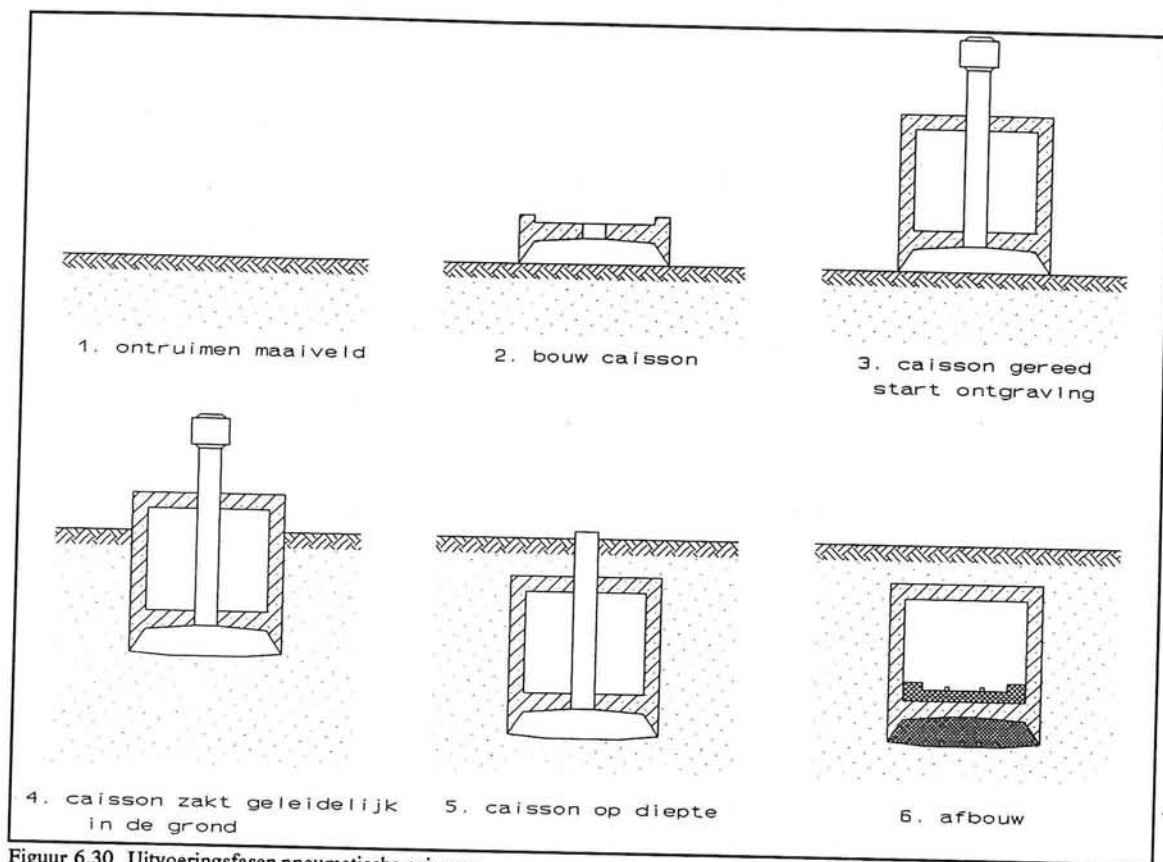
Figuur 6.29 Uitvoeringsfasen wanden-dak-methode met stalen damwanden.

verder worden afgebouwd.

De diepwanden worden, ongeacht of zij wel of niet in de constructie zijn opgenomen, niet meer uit de grond verwijderd. Dit kan voor grondwaterstromingen soms problemen opleveren (zie §6.1.2 2.c en figuur 6.20).

**b. Wanden-dak-methode met stalen damwanden.** (zie figuur 6.29)

De volgorde bij de wanden-dak methode met stalen damwanden is in beginsel dezelfde als de volgorde onder a, met dit verschil, dat voor de wanden van de 'bouwkuip' stalen damwanden worden gebruikt en dat sowieso tussen vloer en dak permanente betonnen wanden moeten worden aangebracht. Het is eventueel mogelijk na voltooiing van de constructie de damwanden weer te verwijderen, alhoewel dit weer de nodige overlast op het maaiveld oplevert, hetgeen weer in tegenstrijd is met de doelstelling van deze methode.



Figuur 6.30 Uitvoeringsfasen pneumatische caissons.



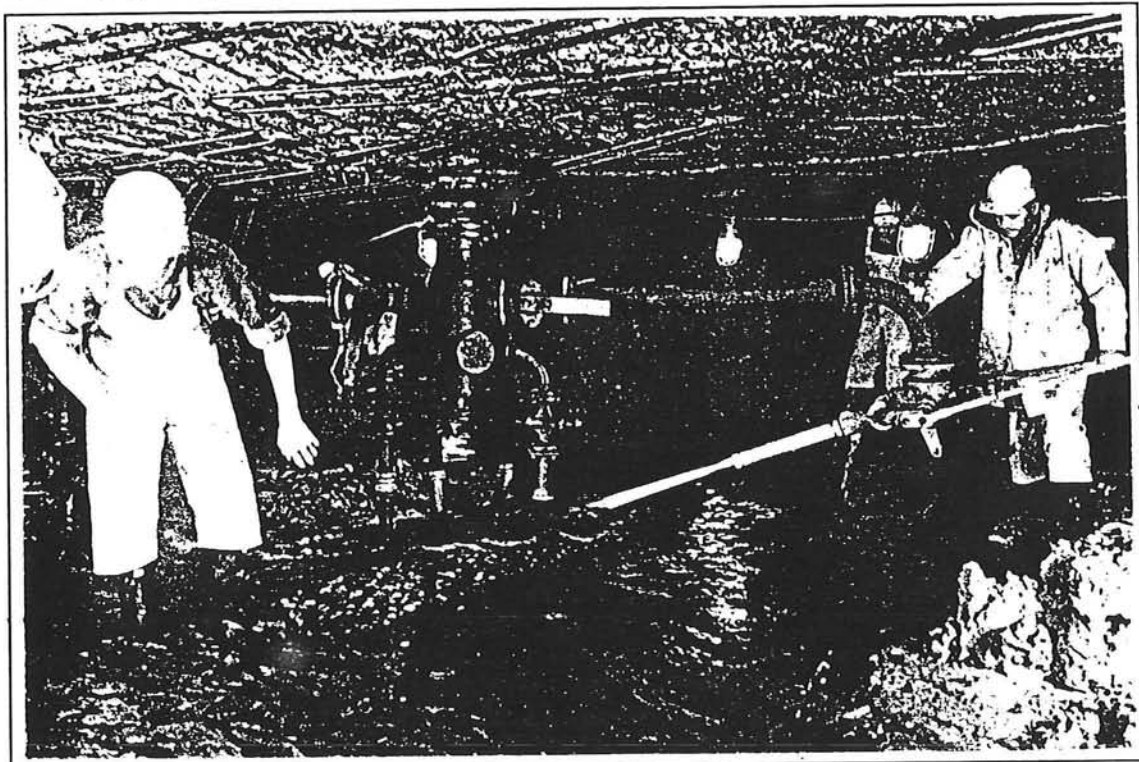
### 6.3 Pneumatische caissons.

Als de grondwaterstand buiten de bouwput niet mag worden verlaagd, dan kunnen de kosten voor een waterkerende constructie rondom de bouwput zeer hoog worden. Bovendien zijn hierbij, bij het ontbreken van een waterremmende laag onderin de bouwput, aanvullende maatregelen nodig, zoals het chemisch injecteren van de grond of het aanbrengen van een laag onderwaterbeton. Hierbij dient het vertikaal evenwicht gewaarborgd te zijn. Logischerwijs worden deze voorzieningen meer dan evenredig duurder naarmate het aanlegniveau van de constructie lager ligt.

Een ondergrondse constructie, uitgevoerd met pneumatische caisson-elementen kan dan bij grote diepten een concurrerende oplossing zijn.

Het principe van het pneumatische caisson is om een, vantevoren op het maaiveld gebouwde, constructie door middel van het ontgraven van de grond onder die constructie langzaam in de bodem naar beneden te laten zakken (☞ figuur 6.30).

Een pneumatisch caisson wordt gebouwd op het maaiveld of in een ondiepe bouwput. Onder de vloer van de eigenlijke constructie bevindt zich een werkkamer. In deze werkkamer wordt een overdruk aangebracht om het grondwater buiten de werkkamer te houden. Met behulp van spuitlansen wordt in deze werkkamer de grond onder de constructie (met water onder hoge druk) losgespoten (☞ figuur 6.31). Het grond-watmengsel wordt vervolgens weggepompt.



Figuur 6.31 Losspuiten grond onder caisson.



Bij ontgraving in hardere grond (grind e.d.) wordt ontgraven m.b.v. bijvoorbeeld zogenaamde *bobcats*. Dit heeft dan uiteraard consequenties voor de benodigde werkhogte.

Door een kleine hoeveelheid lucht uit de werkkamer, waar een overdruk heerst, te laten ontsnappen, vermindert de tegendruk en zal de caisson gaan zakken. Geleidelijk zal de constructie met een snelheid van 60 cm tot 1 m per dag in de grond zakken tot het gewenste niveau is bereikt. Zodra het gewenste niveau bereikt is wordt de werkkamer aangevuld met zand of beton, zodat een staal-fundering ontstaat. Eventueel wordt het vulbeton met behulp van ankers aan het werkkamerdak (tunnelvloer) verbonden, zodat het eigen gewicht van de constructie wordt vergroot. Dit kan nodig zijn indien de opwaartse waterdrukken onder de constructie relatief hoog zijn.

Zodra alle caisson-elementen op rij zijn 'afgezonken' volgt de koppeling. Hierbij kan geen gebruik worden gemaakt van de hydrostatische waterdruk, zoals dat bij een normale afzinktunnel gebruikelijk is. Bij de pneumatische caissons staan hiervoor twee methoden ter beschikking:

1. Bevriezen van het water rondom de te maken voeg.
2. Aanbrengen van een diepwand of damwand ter weerszijden van de te maken voeg, en het afsluiten aan de onderzijde met een hulpconstructie.

Eén van de voordelen van deze bouwmethode is dat de grondwaterstand niet wordt beïnvloed. Verder wordt de constructie op het maaiveld geprefabriceerd, hetgeen de kwaliteit van de constructie aanzienlijk verhoogd.

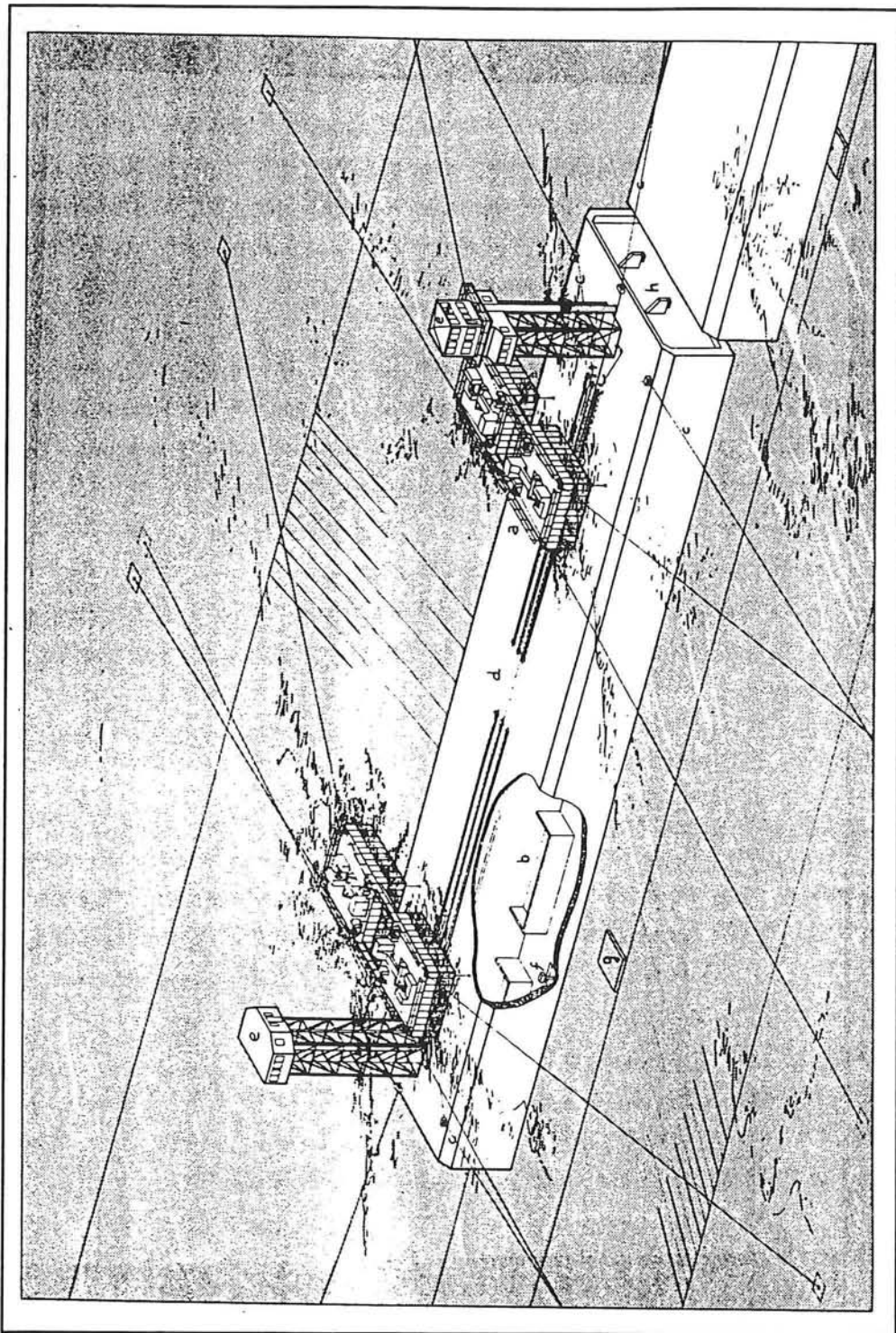
Een nadeel is echter het grote ruimtebeslag dat het bouwen op het maaiveld met zich meebrengt.

Waar bovendien bij stil moet worden gestaan is de luchtdrukverhoging in de werkkamer. De maximaal toegestane drukverhoging levert een restrictie aan de afzinkdiepte. Naarmate de constructie verder beneden de grondwaterspiegel komt, moet de druk in de werkkamer worden opgevoerd. Omdat het wettelijk niet is toegestaan om bij een hogere overdruk dan 3,5 atmosfeer te werken, is de maximale werkdiepte onder de grondwaterspiegel beperkt tot 35 meter. Bovendien neemt de maximaal toegestane werktijd onder verhoogde druk vanaf 1,8 atmosfeer snel af, zodat de economische ondergrens ligt tussen de 18 en de 35 meter beneden de grondwaterspiegel.

Een bekende toepassing van de methode met pneumatische caissons in Nederland is de metrobouw te Amsterdam. Ruim anderhalve kilometer van het ondergrondse traject in de Oostlijn is uitgevoerd met 43 caissons (lengte gemiddeld 40 meter), waaronder de stations Weesperplein, Waterlooplein en Nieuwmarkt.

#### **6.4 Afzinkmethode.**

Bij het kruisen van grote waterwegen wordt de afzinkmethode vaak toegepast. Maar ook kan de afzinkmethode worden toegepast op een landlokatie, waarbij het tunneltracé tijdelijk in een

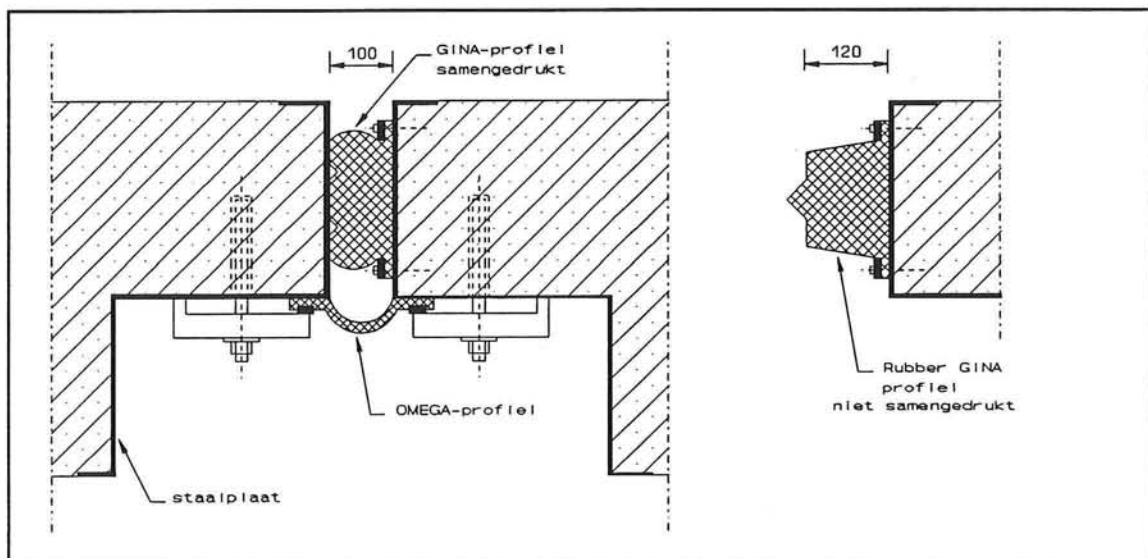


Figuur 6.32 Afzinken tunnelement.

kanaal wordt veranderd. Over deze laatste toepassing meer in §6.5.

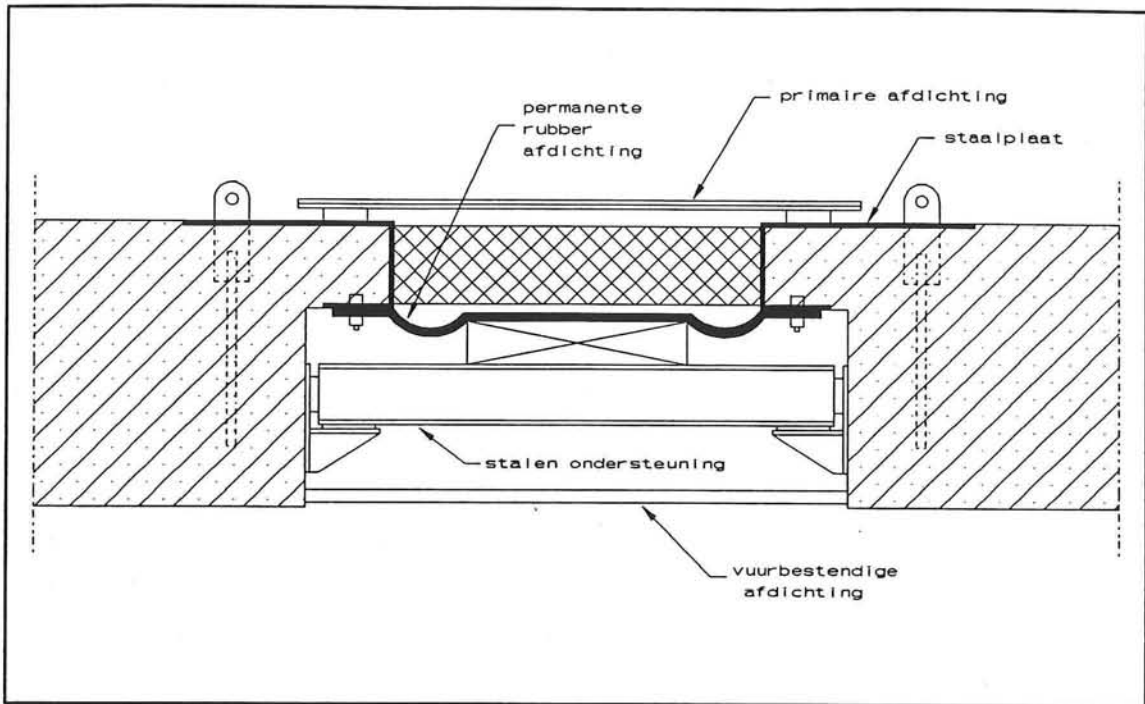
Bij de afzinkmethode worden van tevoren tunnelementen gebouwd in een daartoe speciaal gemaakt bouwdok. Dit bouwdok kan vlakbij de tunnellocatie, maar kan ook, indien een transportroute aanwezig is, op een geheel afzonderlijke lokatie worden gerealiseerd. De elementen worden allen voorzien van waterdichte kopschotten aan de uiteinden, waardoor het mogelijk is de elementen drijvend te vervoeren. Vanuit het bouwdok worden de elementen drijvend getransporteerd en vervolgens afgezonken in een te baggeren sleuf in de bodem van de waterweg (☞ figuur 6.32).

Bij de koppeling van de elementen wordt dankbaar gebruik gemaakt van de hydrostatische waterdruk op het element. Het element wordt met behulp van een verhaalkabel tegen het rubberen GINA-profiel van zijn voorganger getrokken. In eerste instantie wordt de neus van de GINA ingedrukt. Tussen de elementen ontstaat dan een met water gevulde, afgesloten ruimte. Door nu het water uit deze ruimte weg te pompen, wordt het element, door de hydrostatische waterdruk op het kopschot aan de andere zijde, tegen het GINA-profiel aangedrukt. Het GINA-profiel wordt daardoor verder ingedrukt en zo wordt dan een waterdichte afsluiting verkregen (☞ figuur 6.33). Op dezelfde wijze worden alle elementen gekoppeld.

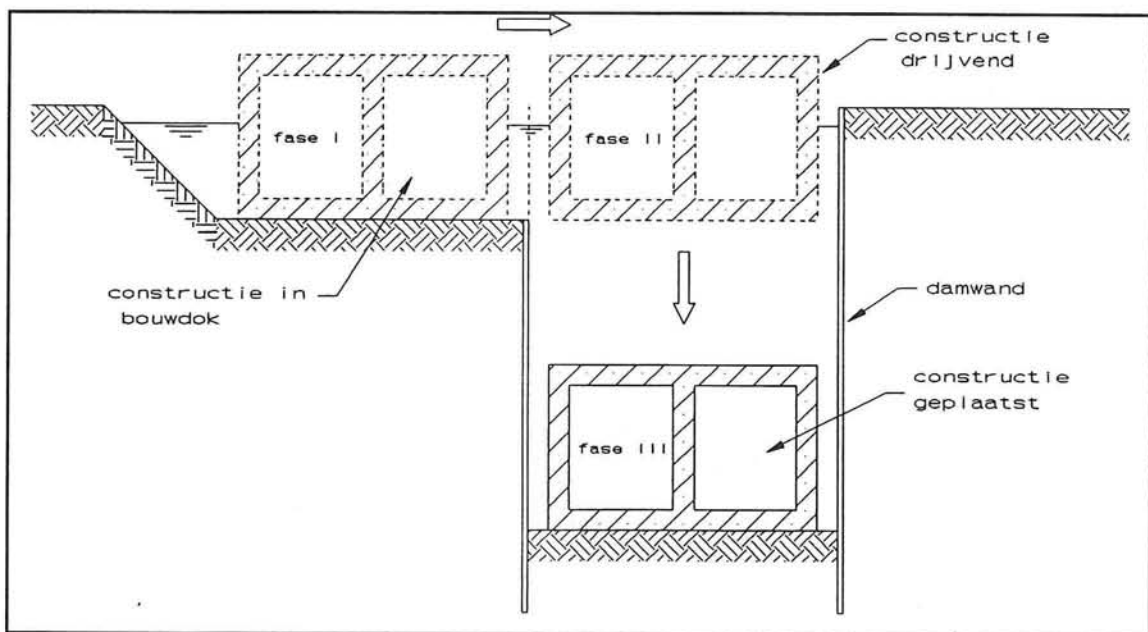


Figuur 6.33 Detail voeg tussen zinkelementen.

De laatste te maken voeg, tussen het element en het 'landhoofd', is wat bewerkelijker. Hierbij kan geen gebruik worden gemaakt van de hydrostatische waterdruk. Door duikers wordt rondom de voeg een waterdichte tijdelijke afsluiting gemaakt. Tussen de wanden worden betonnen wiggen geplaatst, teneinde de GINA's in de verderop gelegen voegen onder spanning te houden. Vervolgens wordt de ruimte binnen de schotten leeggepompt en kan van binnenuit de sluitvoeg worden gemaakt (☞ figuur 6.34).



Figuur 6.34 Detail sluitvoeg.



Figuur 6.35 Bouwfases combinatie bouwdok/afzinken.

Groot voordeel van deze methode is de minimale overlast ter plaatse van de uiteindelijke tunnellocatie (i.v.m. eventuele aanwezige scheepvaart). Een ander voordeel is de hoge en goed controleerbare kwaliteit van de constructie, die door prefabricage kan worden verkregen. Wel dient men de beschikking te hebben over een bouwdok waarin de tunnelementen kunnen worden geprefabriceerd.

### **6.5 Combinatie bouwkuip/afzinken.**

Indien het niveau van de onderzijde van de constructie op grote diepte ligt (15-20 m of meer), is voor het ter plaatse (in den droge) bouwen een zeer diepe bouwkuip noodzakelijk. De bouwkuipwanden moeten hierbij tot grote diepte worden aangebracht. Wanneer beneden het niveau van de bouwkuipbodem een waterafsluitende laag aanwezig is, kan men hiervan dankbaar gebruik maken, mits er voldoende gronddekking overblijft voor het trotseren van de opwaartse grondwaterdruk.

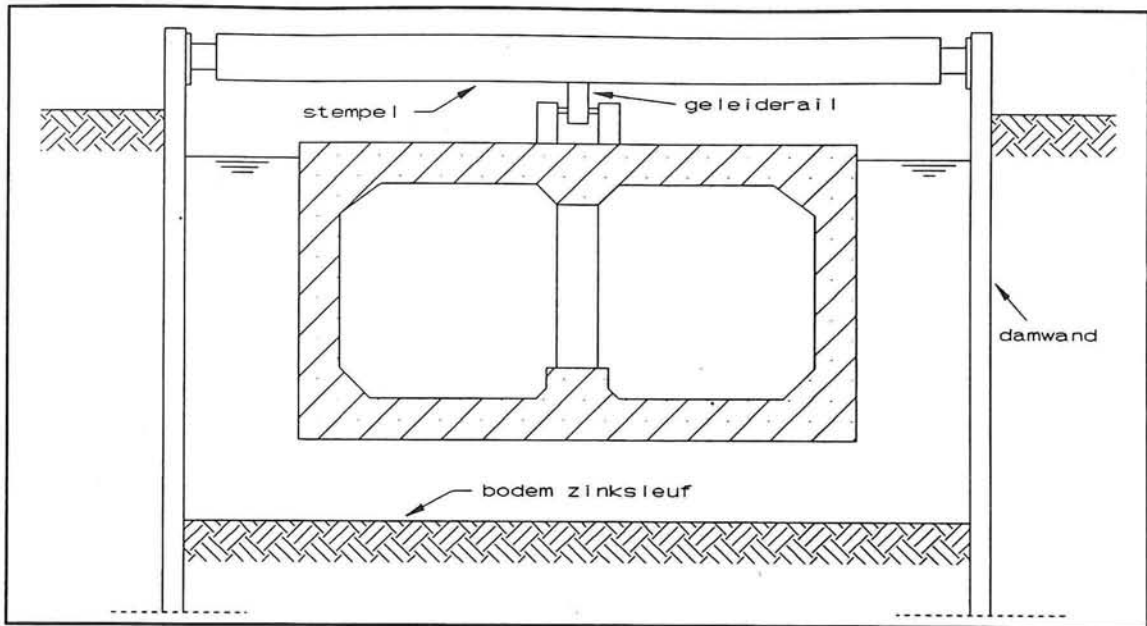
Veelal echter, is men bij het construeren op deze grote diepten de waterafsluitende lagen reeds gepasseerd en moeten aanvullende maatregelen worden getroffen, zoals injectie of een onderwaterbetonvloer al of niet in combinatie met trekpalen. Door de veelal zeer grote opwaartse waterdruk zijn deze maatregelen echter zeer kostbaar. Een mogelijkheid is nog om de waterdruk te verminderen door de grondwaterstand te verlagen, maar dit is in de meeste gevallen niet toegestaan.

Bij deze methode wordt over de lengte van het tunneltracé een bouwkuip gemaakt. Deze bouwkuip wordt echter niet drooggemaakt, zodat er in feite een soort kanaal ontstaat. De tunnelementen, die elders zijn geprefabriceerd, worden dan dit kanaal ingevaren en vervolgens afgezonken (zie figuur 6.35 en 6.36). Daarna wordt het 'kanaal' aangevuld met grond, en wordt de bovengrondse situatie hersteld.

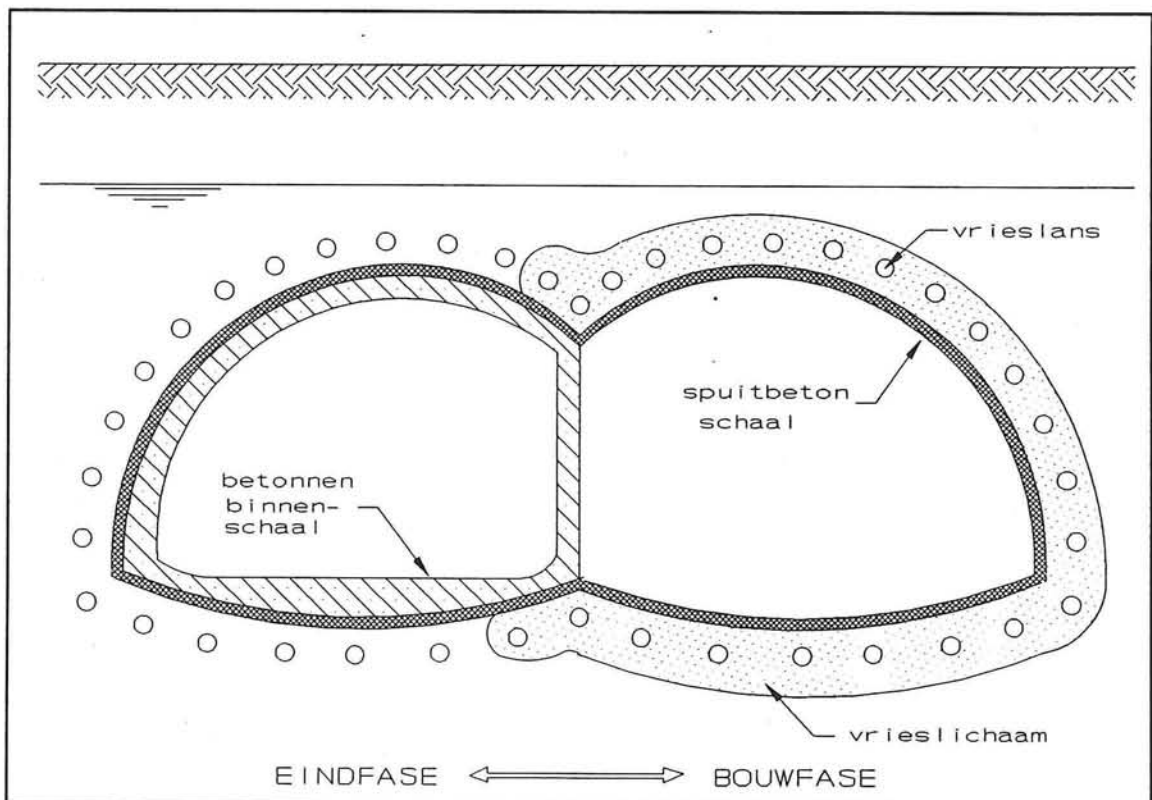
Doordat de bouwkuip niet droog gemaakt hoeft te worden, zijn de zijdelingse drukken op de bouwkuipwanden aanzienlijk kleiner dan bij een droge bouwkuip. Daardoor behoeven deze wanden minder zwaar te worden uitgevoerd. Ook is het aanbrengen van een bodemafluiting niet noodzakelijk, hetgeen aanzienlijk scheelt in de kosten en in de bouwtijd.

Vergeleken met een traditionele open bouwkuipmethode is deze methode uitvoeringstechnisch gunstiger en qua kosten waarschijnlijk ook voordeliger.

Een voorwaarde voor deze methode is echter wel de beschikbaarheid van een bouwlocatie voor het maken van de zinkelementen, en dat deze naar de zinklocatie getransporteerd kunnen worden. Vanzelfsprekend kan dit in dicht bebouwde gebieden, waar weinig ruimte is voor het maken van een bouwdok, wel eens problemen opleveren.



Figuur 6.36 Afzinken in 'kanaal'.



Figuur 6.37 Doorsnede tunnel; bouwfasen vriesmethode.



## 6.6 Vriesmethode.

Voor het construeren van ondergrondse constructies in moeilijke grondsoorten, of op lokaties waar de bovengrond moeilijk kan worden opengegraven vanwege bebouwing, drukke straten, ed., is de vriesmethode goed toepasbaar.

Ondanks dat men vaak denkt dat vriezen peperduur is, en vaak alleen wordt gekozen als er geen andere uitweg is, kan de vriesmethode in diverse gevallen qua kosten toch concurrerend zijn. Voordelen van de vriesmethode is dat deze reversibel, flexibel en relatief milieuvriendelijk is.

Het bevriezen van de grond wordt verkregen door het laten circuleren van een koelvloeistof door vriespijpen, die in de grond zijn aangebracht (zie figuur 6.37).

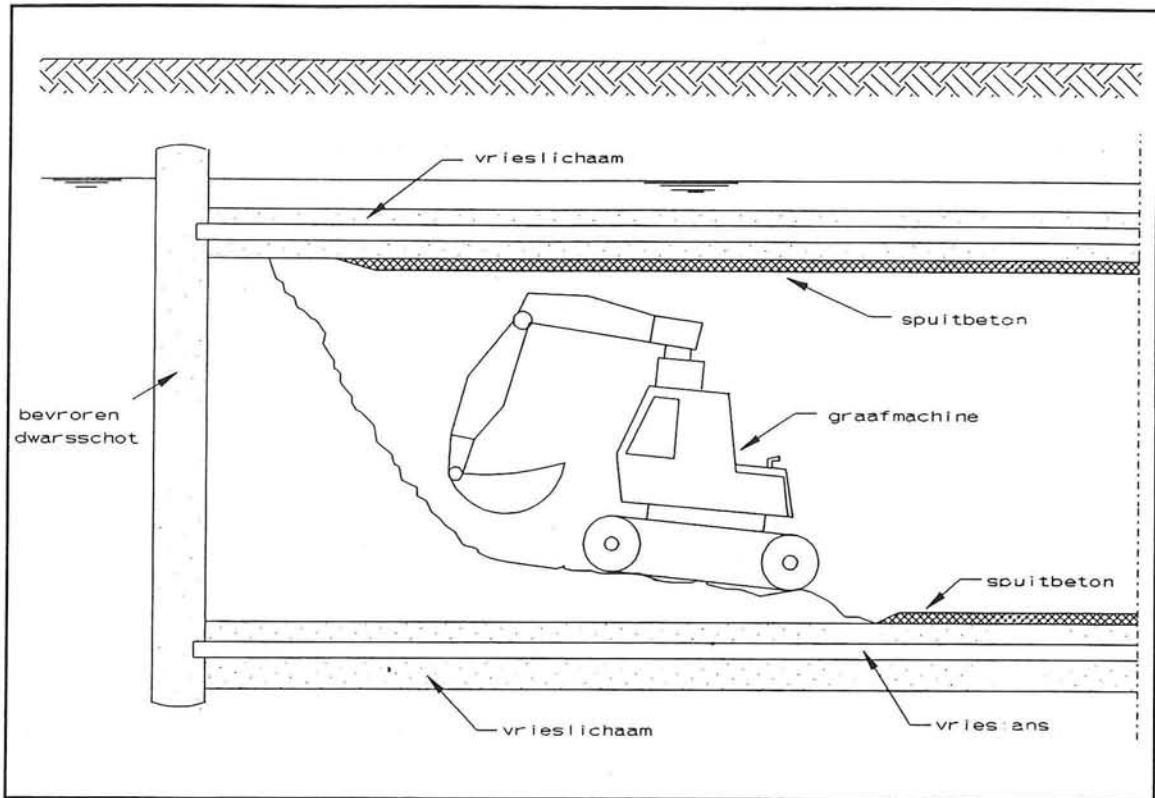
We kunnen globaal drie verschillende vriesmethoden onderscheiden:

- **Directe methode;** Bij deze methode wordt vloeibare stikstof (liquid nitrogen) met een zeer lage temperatuur als koelvloeistof gebruikt. De vloeibare stikstof verdampt in de vriespijpen. De lage temperatuur wordt vervolgens op de omgeving overgedragen. Ook wordt wel vloeistof rechtstreeks in de bodem gespoten.
- **Indirecte methode;** Hier stroomt een zoutoplossing als gebruikte koelvloeistof rond in een gesloten circuit van vriespijpen. Een warmtewisselaar houdt de temperatuur constant. Dit is in wezen te vergelijken met een air-conditioning.
- **Gemengde methode;** Bij deze methode worden de twee voornoemde methoden in verschillende fasen gebruikt, danwel tegelijk als aanvulling op elkaar. Vaak wordt met de eerste methode de grond bevroren en met de indirecte methode de grond op de juiste temperatuur gehouden.

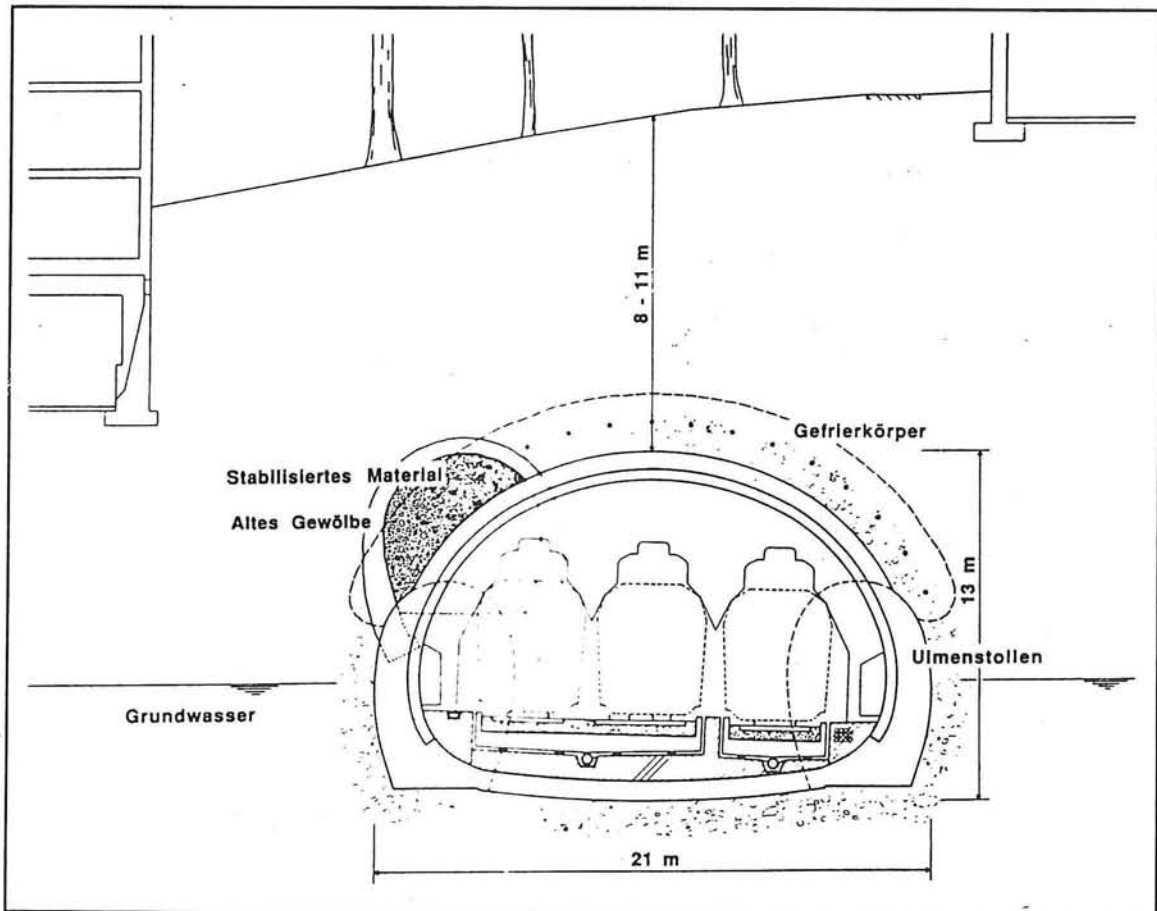
T.a.v. het benodigd equipment, de installatie daarvan en de benodigde mankracht zijn een aantal verschillen tussen de directe en de indirecte methode aan te geven. De methode met vloeibare stikstof wordt gekarakteriseerd door haar opmerkelijke eenvoud en flexibiliteit. De indirecte methode is veel complexer en is relatief omslachtig. Voor deze methode zijn ook enorme (en luidruchtige) koelinstallaties benodigd. Verder is de cryogene kracht van de stikstofmethode groter, hetgeen het risico verkleint.

Door het bevriezen van het grondwater treedt een expansie van de grond op. Deze expansie van de grond is omgekeerd evenredig met de snelheid van bevriezen. Bij de indirecte methode kan deze expansie aanzienlijk zijn. Bij de methode met vloeibare stikstof wordt dit effect aanzienlijk verminderd.

Anderzijds is de methode met vloeibare stikstof aanmerkelijk kostbaarder dan de indirecte methode door de hoge prijs van de vloeibare stikstof. Deze methode is dan ook voornamelijk



Figuur 6.38 Vriezen in combinatie met NATM; langsdoorsnede.



Figuur 6.39 Creëren stijve boog m.b.v. vriezen.

geschikt voor kleine werken, waarbij binnen enkele dagen resultaat moet worden geboekt. De verhouding van de snelheden van de vorming van vrieslichamen ligt in de orde van 20-40 dagen bij de indirecte methode en 3-5 dagen bij toepassing van vloeibare stikstof.

Globaal kan men stellen dat de indirecte methode het meest geschikt is voor grote en langdurige projecten, terwijl de methode met vloeibare stikstof zeer geschikt is voor kortstondige operaties en noodsituaties.

De keuze tussen de verschillende methoden moet worden gebaseerd op technische, economische en logistieke overwegingen.

In vergelijking met andere methoden, zoals grouten en chemische injecties, geeft de vriesmethode een hogere garantie voor veiligheid en dus minder risico. De grond wordt zeer homogeen en gecontroleerd behandeld, hetgeen bijvoorbeeld van chemische injecties niet altijd gezegd kan worden.

Bij het toepassen van de vriesmethode kan men nog onderscheid maken in een aantal situaties:

- Het compleet bevriezen van de grond, teneinde al het grondwater uit te sluiten.  
(☞ figuur 6.37)  
Dit wordt ook wel toegepast in combinatie met de NATM (☞ §6.9) (☞ figuur 6.38).
- Het plaatselijk in de doorsnede bevriezen van de grond om een stijve boog te creëren (☞ figuur 6.39). Dit kan worden toegepast in situaties waarbij er geen sprake is van hinder door intredend grondwater.

## **6.7 Schuifmethode.**

De schuifmethode is in zekere mate verwant met de afzinkmethode. Ook hier worden geprefabriceerde tunneldelen in het water op hun plaats gebracht. De plaatsing gebeurt hierbij echter niet vertikaal, zoals bij het afzinken, maar horizontaal door middel van het schuiven van de constructie.

De methode is in hoofdzaak geschikt voor het kruisen van een waterweg, zoals een rivier of kanaal, maar kan ook op een landlokatie, bij gebruikmaking van een natte sleuf, worden toegepast.

Bij een rivierkruising worden op beide oevers van de rivier droge bouwdokken gemaakt. In deze bouwdokken worden tunneldelen met een lengte van ca. 25 meter geprefabriceerd. Iedere vier weken worden twee van deze delen (50 meter) met behulp van persvijzels (jacks) in de rivier geschoven. Twee weken later gebeurt hetzelfde op de andere oever van de rivier. Deze schuifsessies gaan om en om door, totdat de beide tunneldelen elkaar in het midden van de



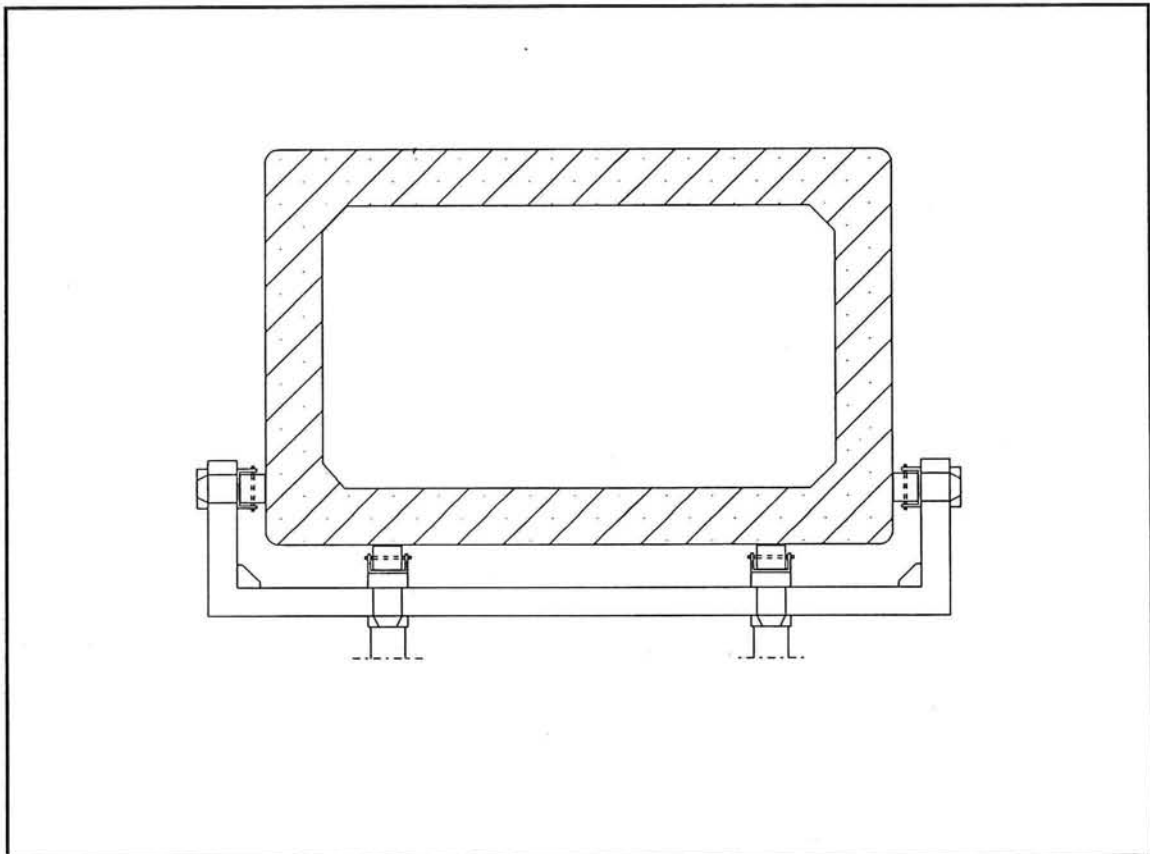
rivier ontmoeten.

Tussen het bouwdok en de rivier bevinden zich twee damwandschermen. In deze wanden zijn openingen uitgespaard, die dezelfde vorm hebben als de uitwendige vorm van de dwarsdoorsnede van de tunnel. Rubber profielen, die op de randen van deze openingen zijn bevestigd, maken het geheel waterdicht.

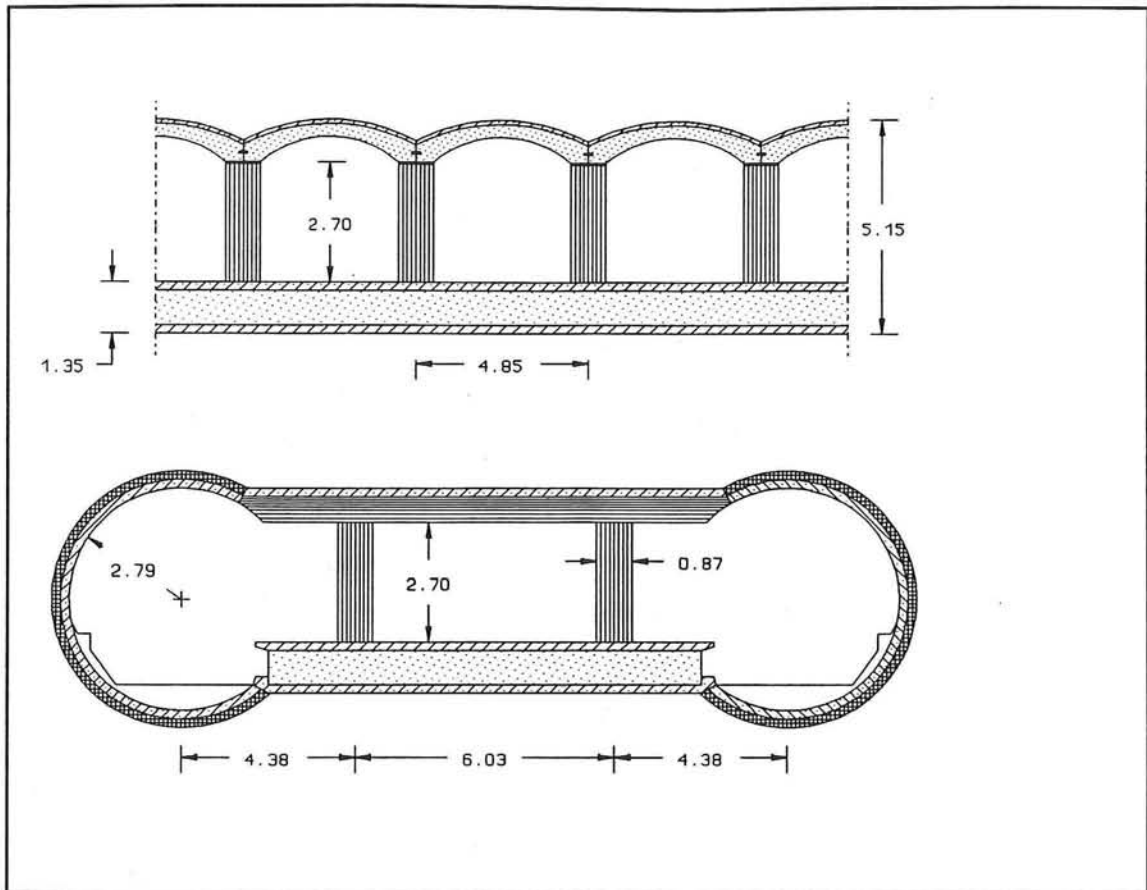
Op onderlinge afstanden van ca.50 meter zijn in de rivier ondersteuning geplaatst, om de tunnel vertikaal en horizontaal te kunnen corrigeren na een schuifbeweging (zie figuur 6.40). In de tunnel zijn middelen aangebracht om de tunnelconstructie na een schuifsessie tijdelijk te kunnen ballasten.

Zodra de tunneldelen vanaf beide oevers elkaar in het midden van de rivier ontmoeten, worden deze twee delen gekoppeld met een sluitvoeg. Vervolgens wordt de tunnel onderspoeld met zand en worden de ondersteuning verwijderd. De beide bouwdokken op de rivier-oevers kunnen worden omgebouwd tot open tunnel-inritten.

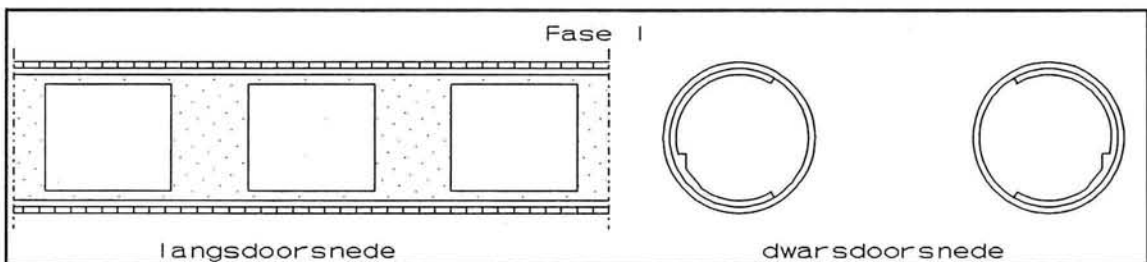
Zoals reeds werd genoemd is deze methode ook op een landlokatie in een natte sleuf toe te passen. In dat geval kan, als er onvoldoende ruimte beschikbaar is voor twee bouwdokken, natuurlijk ook worden gewerkt vanuit slechts één bouwdok.



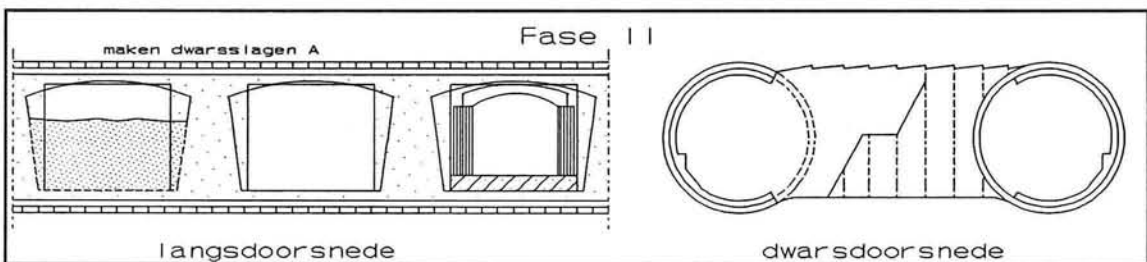
Figuur 6.40 Dwarsdoorsnede schuiftunnel (met ondersteuning in de rivier).



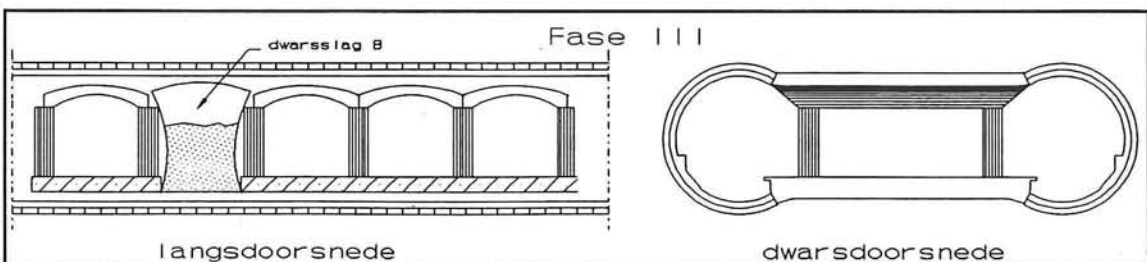
Figuur 6.41 Langs- en dwarsdoorsnede station Poccistraße.



Figuur 6.42 Langs- en dwarsdoorsnede fase I met uitsparingen in wand.



Figuur 6.43 Langs- en dwarsdoorsnede fase II: maken dwarslagen A met NATM.



Figuur 6.44 Langs- en dwarsdoorsnede fase III: maken dwarslagen B.

## 6.8 Ondergronds uitbouwen vanuit boortunnels.

Voor het maken van een station door middel van het ondergronds uitbouwen vanuit boortunnelbuizen bestaan tal van mogelijkheden, die in principe hetzelfde eindresultaat hebben. Ter toelichting van deze methode van stationsbouw zullen in deze paragraaf twee voorbeelden worden behandeld:

**a. Metrostation in de Poccistraße in München.**

**b. Hatchobori metrostation in Tokyo.**

### a. Metrostation in de Poccistraße in München.

Bij de bouw van dit metrostation is de ruimte tussen de twee geboorde tunnelbuizen met behulp van een bergmännische-methode, de NATM <sup>1</sup> ontgraven.

Het station is in langsrichting opgedeeld in een 26-tal gewelven. De spanwijdte van deze gewelven bedraagt ca. 4.85 meter. De hart-op-hart afstand van de tunnelbuizen bedraagt 14.50 meter (zie figuur 6.41).

De verschillende bouwfasen van het station waren als volgt:

Als eerste zijn de twee tunnelbuizen geboord. Binnen de twee tunnelbuizen is daarna een extra betonnen binnenschaal gebouwd met een opening aan de 'binnenzijde' ter plaatse van ieder tweede te maken gewelf (fase I zie figuur 6.42).

Vervolgens zijn de tunnelbuizen bij deze openingen met behulp van de NATM in dwarsrichting met elkaar verbonden (dwarsslagen A) (zie figuur 6.43). Deze dwarsgangen zijn tijdelijk ondersteund met behulp van stalen platen en zijn vervolgens verstevigd met spuitbeton.

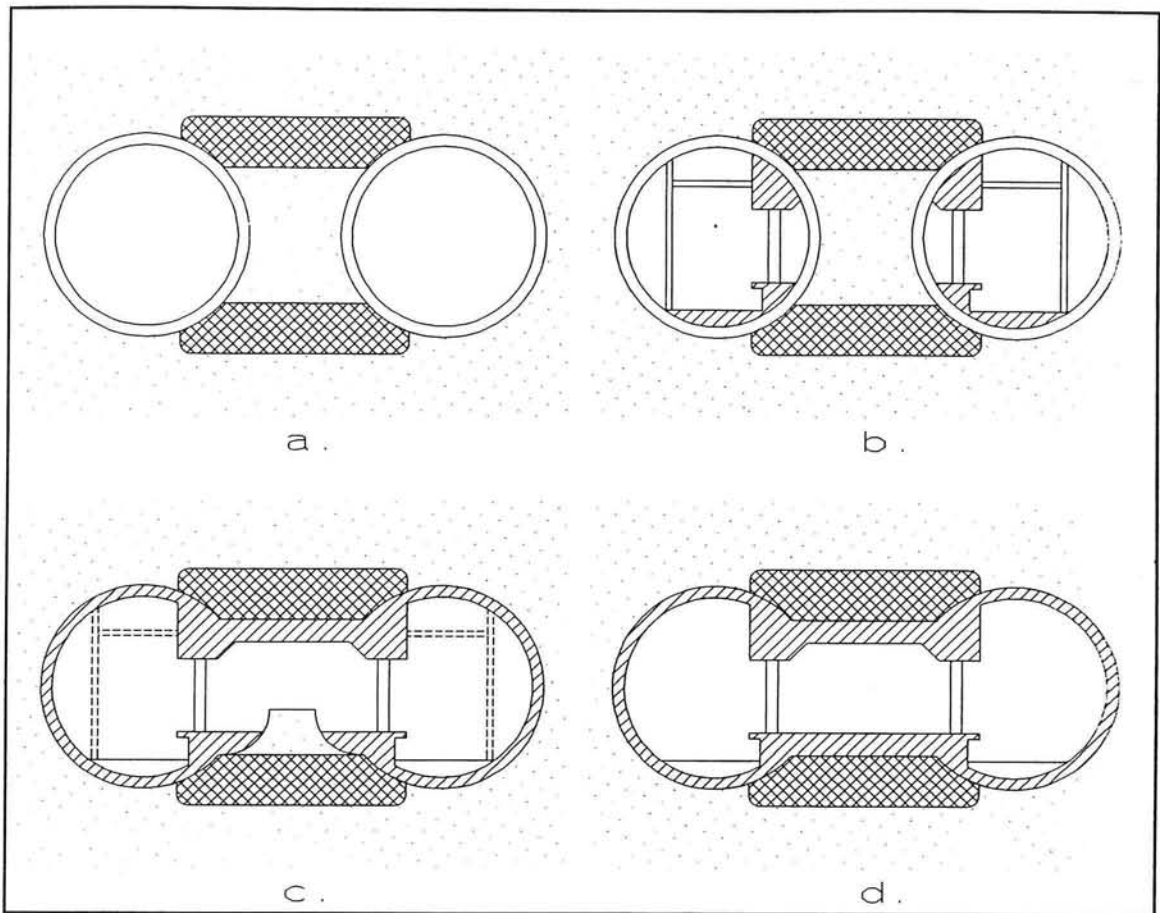
Daarna zijn in de ontstane dwarsgangen vloeren met hierop kolommen en gewelven in gewapend beton aangebracht (fase II zie figuur 6.43). Nadat alle dwarsslagen A gereed waren, is hiertussen op dezelfde wijze ontgraven en zijn de dwarsslagen B gemaakt (fase III zie figuur 6.44). Op die manier werd de gewelfketen gesloten. De afzonderlijke gewelven zijn boven iedere kolom gekoppeld met 3 voorspankabels.

Vervolgens kon het station worden afgebouwd, zoals te zien is in figuur 6.41.

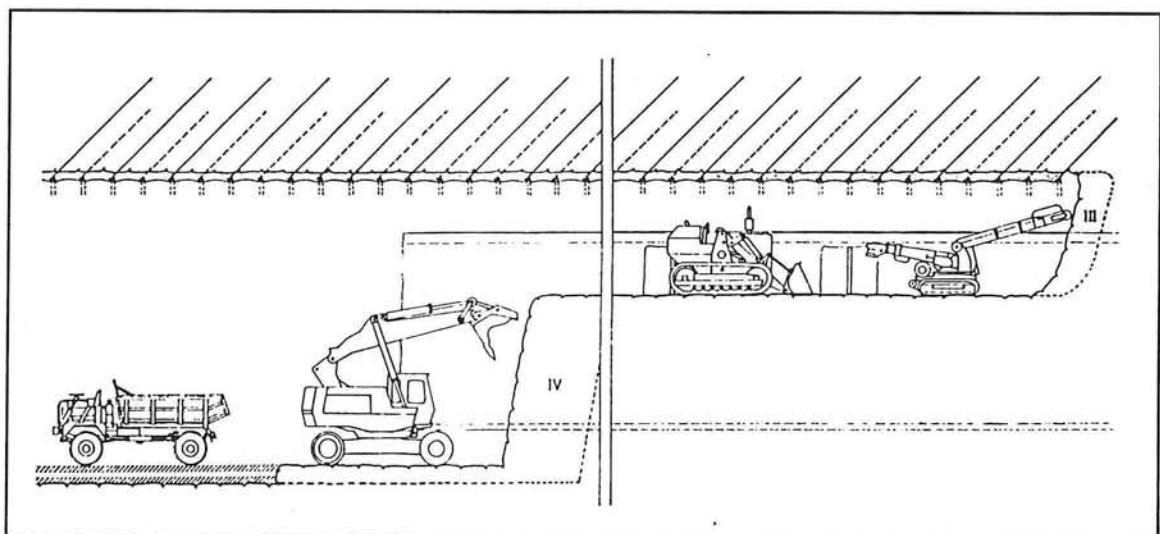
De hier toegepaste methode is zeer geschikt voor situaties waar de grond een zekere samenhang vertoont. Indien dit niet het geval is, kan de grond eventueel worden verstevigd met behulp van vriezen, grouten of chemische injecties. Een voorbeeld van zo'n grondversteviging wordt gegeven in het volgende praktijkgeval: Hatchobori-station.

---

<sup>1</sup> NATM, zie §6.9.



Figuur 6.45 Bouwfasen uitbouwen vanuit boortunnels met grondversteving.



Figuur 6.47 Langsdoorsnede uitvoering NATM.



### b. Hatchobori-metrostation, Tokyo.

Bij de bouw van dit ondergrondse station is gebruik gemaakt van een grondversteving tussen de beide geboorde tunnelbuizen. Aan de onder- en bovenzijde, tussen de tunnelbuizen, is de grond met behulp van een chemische injectie verstevigd (☞ figuur 6.45a). Op die manier is het grondwater buitengesloten en wordt tegelijkertijd aan de bovenzijde tussen de tunnelbuizen een stijve boog gecreëerd.

Vervolgens zijn de beide tunnelbuizen aan de binnenzijde in langsrichting voorzien van een gewapend betonnen balk, ondersteund door betonnen kolommen. Ook het zijdeel van het eilandperron is reeds geconstrueerd. Verder zijn de tunnelbuizen voorzien van een extra - tijdelijke- ondersteuning om ongewenste deformaties, door het verbreken van de tunnelring, te voorkomen (☞ figuur 6.45b).

Nu wordt de ruimte onder de stijve boog deels ontgraven en worden de twee langsbalken met elkaar verbonden door middel van een boog in gewapend beton. Zo ontstaat het dak van de constructie (☞ figuur 6.45c).

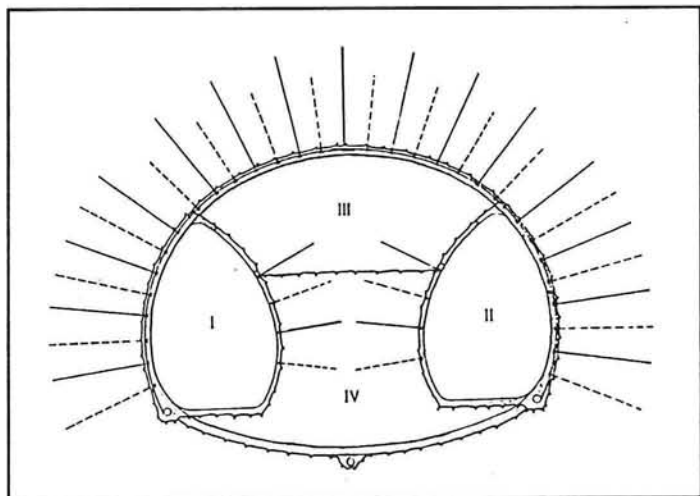
Na het verder ontgraven van de ruimte onder het dak, kan de vloer van het station worden gemaakt (☞ figuur 6.45d). Het station kan nu verder worden afgebouwd. Bij het Hatchobori-station is plaatselijk met een cut-and-cover-methode een verbinding tussen het ondergrondse station en het maaiveld gerealiseerd.

## 6.9 Neue Österreichische Tunnelbauweise (NÖT of NATM).

De Neue Österreichische Tunnelbauweise of de New Austrian Tunnelling Method is een van oorsprong door Oostenrijkers ontwikkelde tunnelbouwmethode. De Amerikanen zijn het hier niet helemaal mee eens, en noemen de NATM ook wel gekscherend de North American Tunnelling Method.

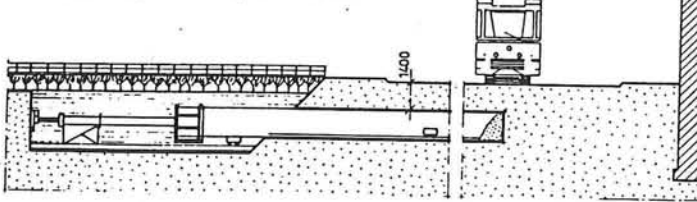
Het principe van de NATM bestaat hierin, dat volgens een bepaalde **volg-orde** delen van de tunneldoorsnede worden ontgraven, waarbij steeds van een soort boogwerking van de grond gebruik wordt gemaakt. Door de redelijke samenhang van de grond blijft deze enige tijd 'staan'.

Na iedere paar meter te hebben ontgraven, wordt de 'wand' van de tunnel verstevigd met spuitbeton. Dit kan pure

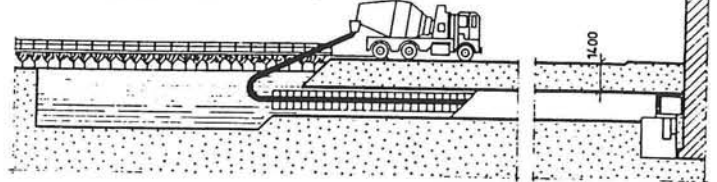


Figuur 6.46 Dwarsdoorsnede station met ontgravingsvolgorde NATM.

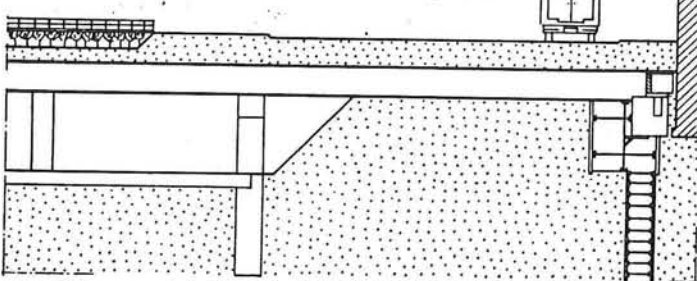
FASE 1 Asbestcement-buizen worden horizontaal in de grond geperst; gronddekking 0,5 tot 2,00 m



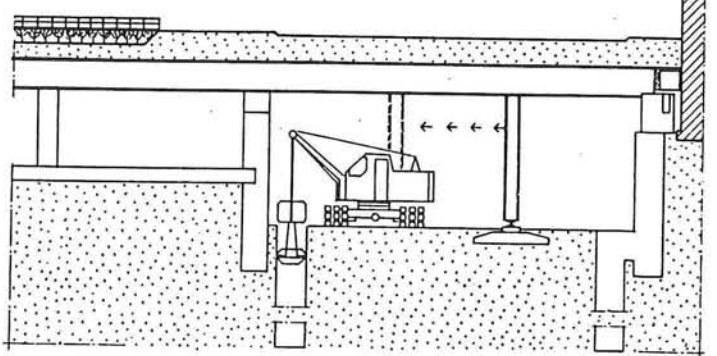
FASE 2 Na het inbrengen van de wapening worden de buizen gebetonneerd; dit gebeurt vanuit een aanliggende buis, via op regelmatige afstanden geboorde gaten



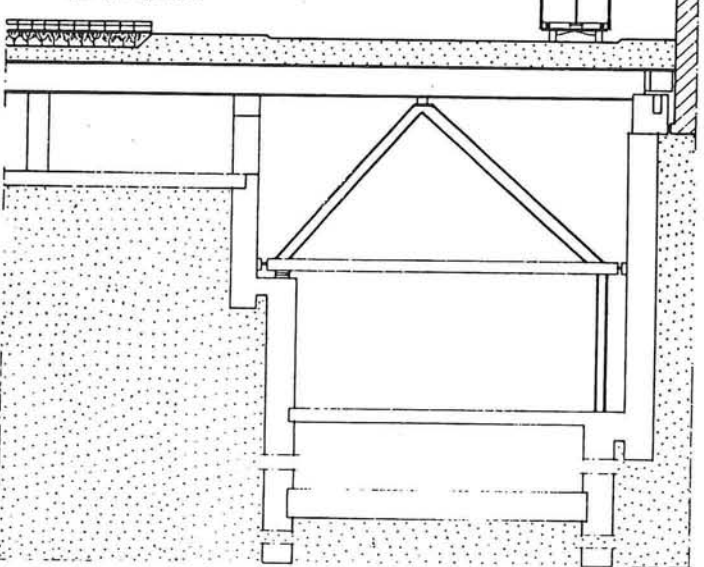
FASE 3 Voor het ondervangen van de buizen worden langsgalerijen gegraven (doorsnede 2 x 3 m) van waaruit de zijwanden van de stations in beschoeide sleuf worden uitgevoerd



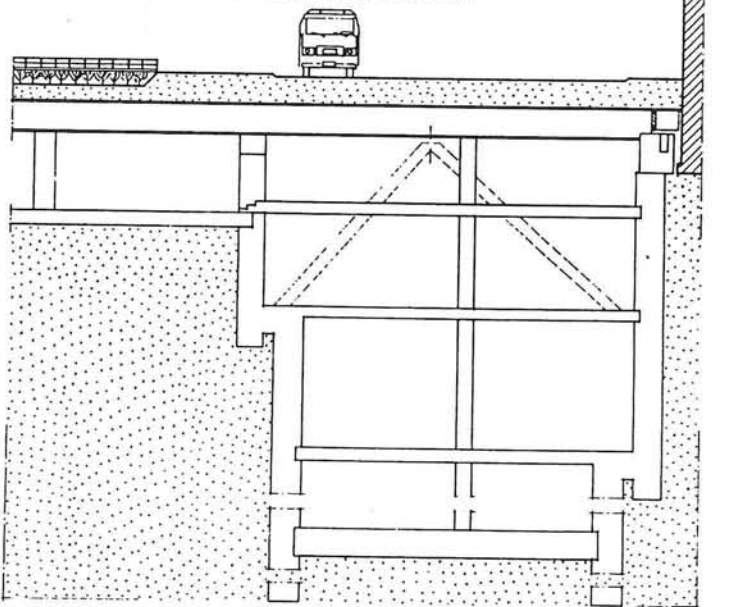
FASE 4 De dieper gelegen delen van het station worden verwezenlijkt met behulp van sliwbanden die tot in een dikke kleilaag reiken



FASE 5 Uitgraving van de stationsruimte tussen de uitgevoerde sliwbanden; het buisendak wordt ondersteund door tijdelijke spanten

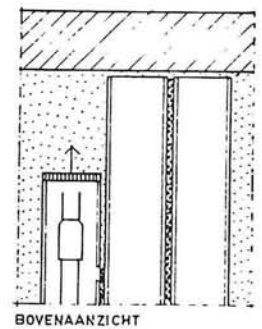
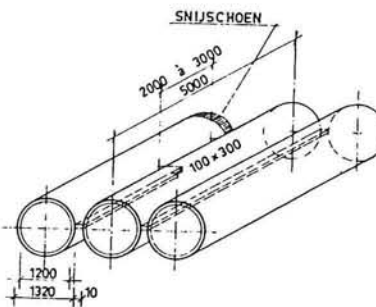
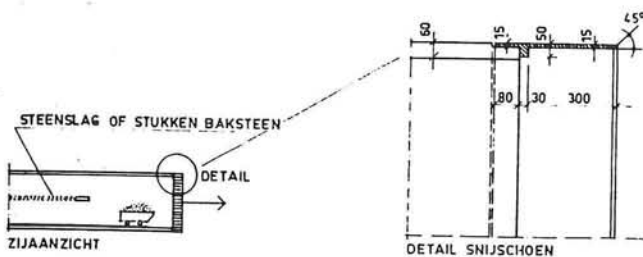


FASE 6 Uitvoeren van de tussenvloeren en tussenkolommen



7  
Opeenvolgende uitvoeringsfasen van de ondergrondse bouwmethode met ingeperste buizen, voor het kruisstation Koningin Astrid

8  
Details van de buizenmethode



Figuur 6.48 Opeenvolgende uitvoeringsfasen van de ondergrondse bouwmethode met ingeperste buizen voor het kruisstation Koningin Astrid.

sputbeton zijn, spuitbeton met staalvezels of er kan van tevoren een wapeningsnet tegen de grondwand worden geplaatst. Op die manier wordt de tunnelboog als het ware ondersteund. Indien dit noodzakelijk wordt geacht, kan men deze betonnen schil nog met groutankers, spiezen of deuvels aan de grond verankeren.

Door eerst de zijstollen te graven, de wanden hiervan van spuitbeton te voorzien en daarna het deel tussen de zijstollen, blijft de spuitbeton-schil goed staan.

Zodra de gehele dwarsdoorsnede ontgraven is, kan binnen de schil de definitieve stationsconstructie worden gemaakt. In figuur 6.46 en 6.47 worden respectievelijk een dwars- en een langsdoorsnede van deze methode weergegeven, alsmede de volgorde van ontgraven.

De NATM is een tunnelbouwmethode die in eerste instantie geschikt is voor situaties waar geen grondwater aanwezig is en waar de grond een zekere samenhang vertoont. In situaties waar toch sprake is van de aanwezigheid van grondwater, is een combinatie van de NATM met de vriesmethode mogelijk.

### **6.10 Antwerpse Buizen Methode.**

De Antwerpse Buizen Methode, ook wel de 'jacked-pipe-methode' genoemd, is eind jaren '70 ontwikkeld voor de metrobouw te Antwerpen.

Het principe van deze methode is als volgt:

Vanuit een bouwput of een werk galerij worden asbest-cement buizen met grote diameter (1.2 à 2.00 meter) naast elkaar in de grond geperst. Zij worden vervolgens voorzien van een wapeningskorf en volgebetonneerd. Tussen de buizen wordt een cementmortel geïnjecteerd om het geheel waterdicht te maken.

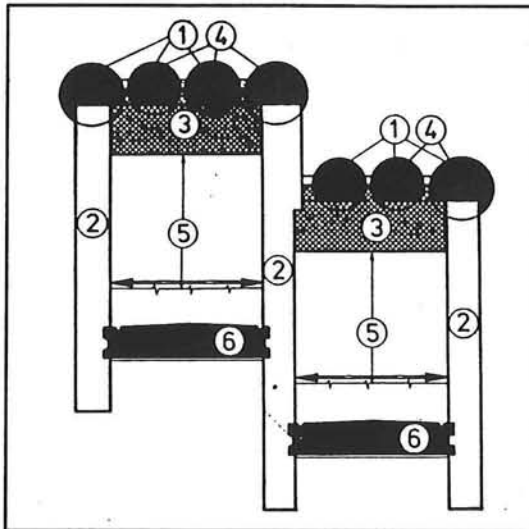
Zo verkrijgt men een plaat, die kan fungeren als dakplaat. Deze dakplaat kan worden ondervangen door middel van diepwanden, die na een gedeeltelijke ontgraving onder de dakplaat worden aangebracht. Door verdere ontgraving ontstaat onder deze plaat een ruimte, waarin het ondergrondse station verder kan worden afgebouwd.

Bij deze methode kunnen de asbest-cement buizen zowel in dwars- als in langsrichting worden aangebracht.

Als voorbeeld wordt hierna de volgorde van uitvoering van het kruisstation Astrid te Antwerpen beschreven. Dit station is gelegen onder het Koningin Astridplein, een vrij druk plein in de Antwerpse binnenstad.

De uitvoeringsfasen van het station Koningin Astrid zijn hieronder beschreven en weergegeven in figuur 6.48.

Vanuit een bouwput worden asbestcementbuizen met een lengte van 5.00 meter en een diameter



Figuur 6.49 Dwarsdoorsnede koker Astrid-Carnot.

1. *Persen langse buizen*
2. *Wanden in beschoeide sleuf vanuit buizen*
3. *Dwarsbalken vanuit buizen*
4. *Betonneren buizen*
5. *Uitgraving stross onder buizen - stutten*
6. *Betonneren bodemplaat*

van 1.20 meter opeenvolgend op een draagstoel geplaatst, die aan de achterzijde is voorzien van een drukverdeelring. De buizen worden nu, haaks op de rijrichting, door middel van hydraulische vijzels met uitschuifbare zuigers in de grond geperst. De voorzijde van het eerste buisdeel wordt voorzien van een stalen snijschoen, ten behoeve van het doorsnijden van de grond en het geleiden van de persrichting.

Het tweede buisdeel wordt ter hoogte van het eerste gebracht en ertegen bevestigd door middel van een stalen steuning. Tussen de beide buizen plaatst men een schuimrubberen dichtingsstrip, alsmede een houten ring die de krachten eenparig over de volledige omtrek verdeelt. Naargelang de benodigde overspanning, worden nu meerdere buisdelen toegevoegd.

Naarmate het inpersen vordert, wordt de grond met de hand uit de buis verwijderd en met een trolley afgevoerd. Voortdurend worden met behulp van laserapparatuur metingen verricht om mogelijke afwijkingen in horizontale en verticale richting te kunnen vaststellen.

Na het inpersen van een volledige buis wordt de ruimte tussen deze buis en de naastliggende buis (ca.10 cm) met cementmortel geïnjecteerd.

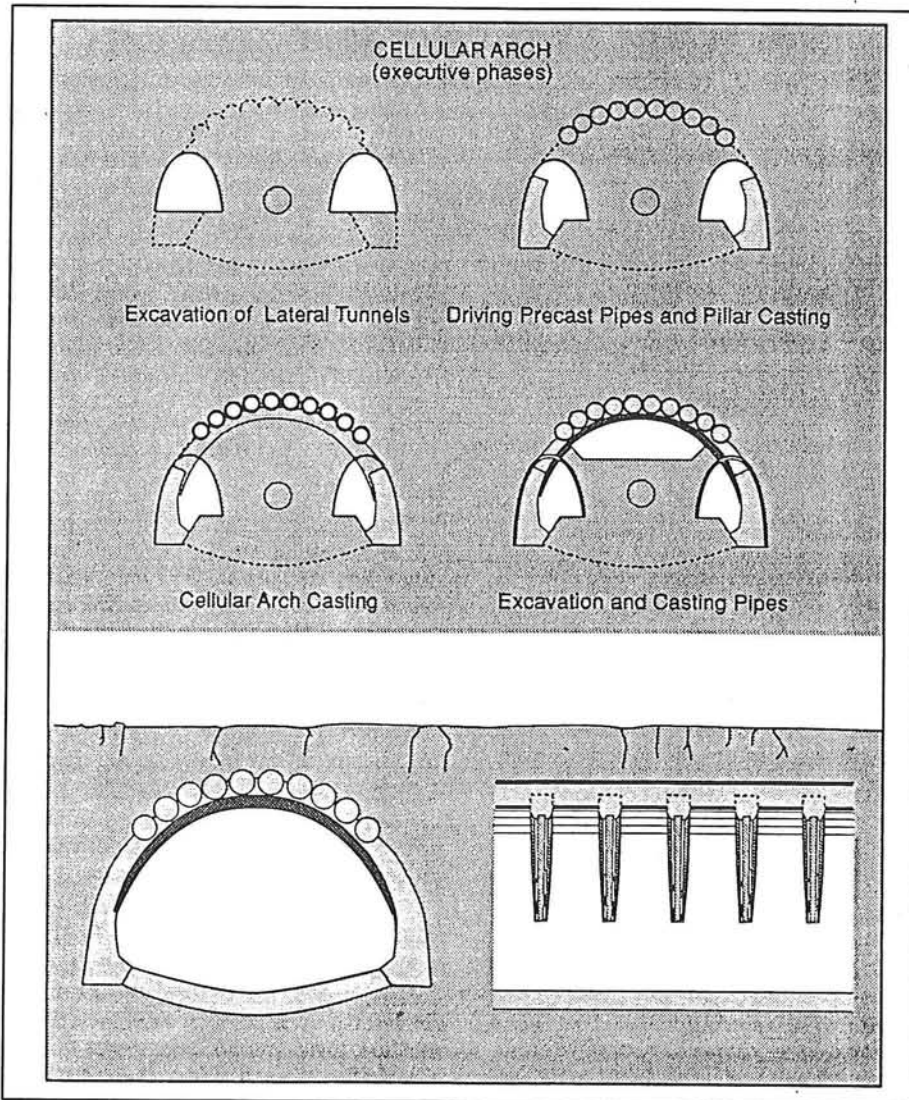
De benodigde persdruk voor de vijzels bedraagt ongeveer  $50 \text{ kN/m}^2$  per strekkende meter ingeperste buis. Gemiddeld wordt per dag  $5 \text{ m}^3$  geperst.

Na de persfase worden wapeningskorven of voorspanstrengen in de buizen aangebracht. Daarna worden de buizen gebetonneerd, hetzij vanaf het uiteinde van de buis, hetzij via geboorde gaten vanuit de naastliggende buis.

Na de uitvoering van het buizendak geschiedt de verdere bouw van het station volledig ondergronds. Onder het buizendak worden diepwanden gemaakt. Het dak wordt daarna op deze wanden afgesteund. Na verdere ontgraving kan het station in de ontstane ruimte worden afgebouwd.

Bij de bouw van dit station zijn de buizen haaks op de rijrichting ingeperst. Bij de bouw van de 372 meter lange tunnel tussen dit station en het Carnot-station (de koker Astrid-Carnot) zijn de buizen in langsrichting geperst. De persbuizen hebben een totale lengte van 124 meter elk. Voor dit traject zijn twee tussenstations ingebouwd om de persdrukken voor de hoofdvijzels in de bouwput te beperken. Een dwarsdoorsnede van dit traject is te zien in figuur 6.49.

Deze techniek van buizenpersen voor de ondergrondse bouw van dakplaten voor de metrowerken te Antwerpen, is in de meeste gevallen een veilige methode met beperkte zettingen gebleken. Deze bouwtechniek is in de loop van het project dermate verfijnd en verbeterd, dat het goede mogelijkheden biedt voor complexe situaties waarbij cut-and-cover-methoden onacceptabel zijn.



Figuur 6.50 Uitvoeringsfasen Cellular Arch Method.

### 6.11 Cellular Arch Method: Venezia Station Milaan.

Het Venezia Station is één van de stations in de nieuwe ondergrondse spoorlijn van Milaan, dat in de periode '88 - '92 werd gerealiseerd. De tunnels van de gehele spoorlijn zijn met behulp van ondergrondse methoden gebouwd.

Een combinatie van factoren -de grote dimensies van de stationsdoorsnede (ca.30 m breed), de deklaag op het station van slechts 5 meter, de slechte ondergrond, de aanwezigheid van grondwater en de beperking dat het bovengrondse verkeer niet gehinderd mocht worden- resulteerde in de toepassing van relatief nieuwe technieken voor de bouw van het Venezia Station: de *Cellular Arch Method*. Letterlijk vertaald: de Celvormige Boog-methode.

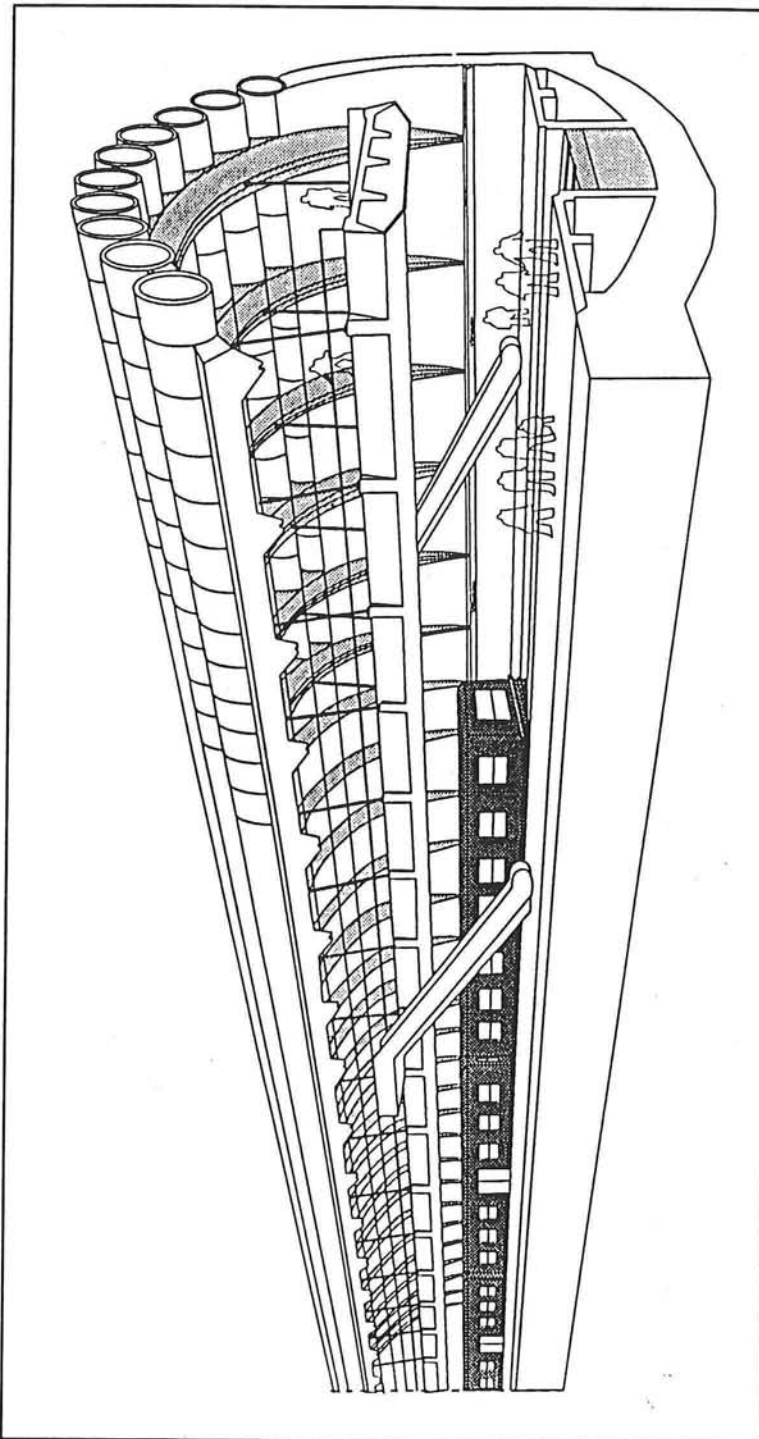
Het grote voordeel van deze methode is dat de ondersteuningsconstructie van de grond reeds is gemaakt, voordat de grond wordt ontgraven. De ontgravingsoperatie wordt hiermee een stuk veiliger. Ook is het gedrag van de bovenliggende grond en eventuele deformaties beter controleerbaar.

De 'Cellular Arch Method' bestaat uit series mannetje-aan-mannetje liggende microtunnels, die met behulp van gewapend betonnen bogen aan elkaar verbonden zijn. Dit geheel vormt een booggewelf. De microtunnels, die worden gevormd door betonnen pijp-segmenten met een diameter van 2.10 meter, worden gemaakt door middel van 'pipe jacking'. Het maken van de betonnen boog bestaat uit de volgende fasen (☞ figuur 6.50):

1. Grouten van de grond rondom de omtrek van de zij-gangen, vanuit een centrale service-gang.
2. Ontgraving van de zijgangen. Van hieruit grouten rondom de omtrek van het te maken station. Vervolgens het maken van de randposten.
3. Met behulp van 'pipe jacking' worden nu 10 betonnen buizen met een diameter van 2.10 m elk en bestaande uit delen van 2.00 m lengte, vanuit een put de grond ingeperst.
4. Op regelmatige afstanden wordt de grond dwars op de buizen ontgraven, zodat onder de buizen boogvormige gangen ontstaan van 1x1 meter in doorsnede. In deze gangen wordt de bekisting voor de dwarsspanen aangebracht.
5. Plaatsen van de wapening en storten van het beton voor de dwarsspanen.

Nadat het boogvormige dak gereed gekomen is, wordt hieronder verder ontgraven. Hierna kan de stationsomtrek verder worden afgebouwd en kan de vloer worden gemaakt. Nu de basisconstructie gereed is kan het station verder worden afgebouwd.

Bij de bouw van de nieuwe ondergrondse spoorlijn in Milaan is het Venezia station het enige station dat met behulp van deze methode is uitgevoerd. De overige stations konden eenvoudig met een cut-and-cover methode worden gerealiseerd. Met name het vermijden van een ruwe verstoring van de (intensieve) bovengrondse activiteiten, noopte de bouwers tot het toepassen van de 'Cellular Arch Methode' bij de bouw van het Venezia station. De tijdelijke schil van



Figuur 6.51 Opengewerkte 'view' Venezia Station te Milaan.



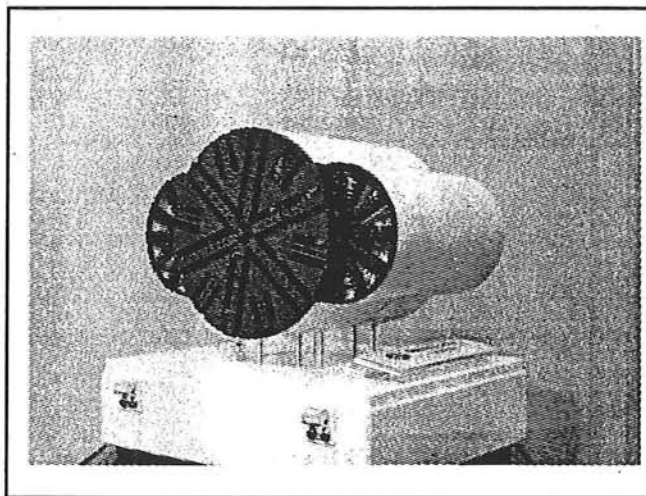
grout, benodigd om het werkgebied veilig en waterdicht te maken, wordt in de eindsituatie als verloren gegaan beschouwd. Juist deze tijdelijke voorziening maakte de bouw van het Venezia station tot een tamelijk kostbare aangelegenheid.

Alhoewel de Italianen pretenderen deze methode te hebben uitgevonden, vertoont deze natuurlijk sterke gelijkenissen met de Antwerpse methode, welke eind jaren '70, begin jaren '80 in Antwerpen bij de metrobouw op grote schaal is toegepast (zie §6.10). Het enige verschil is, dat de buizen in Antwerpen in een horizontaal vlak zijn ingebracht en niet in een boogvorm, zoals in Milaan.

Een opengewerkte 'view' van het Venezia Station is weergegeven in figuur 6.51.

### 6.12 Three Centered Slurry Type Shield Machine.

Een zeer innovatieve methode voor het bouwen van een ondergronds station in een boortunnel-traject is onlangs geïntroduceerd op het ITA-congres 1993, welke in Amsterdam werd gehouden. Het betreft hier de bouw van het Shiroganedai Station te Tokyo Japan met behulp van een zogenaamd *Three Centered Slurry Type Shield Machine* (zie figuur 6.52).

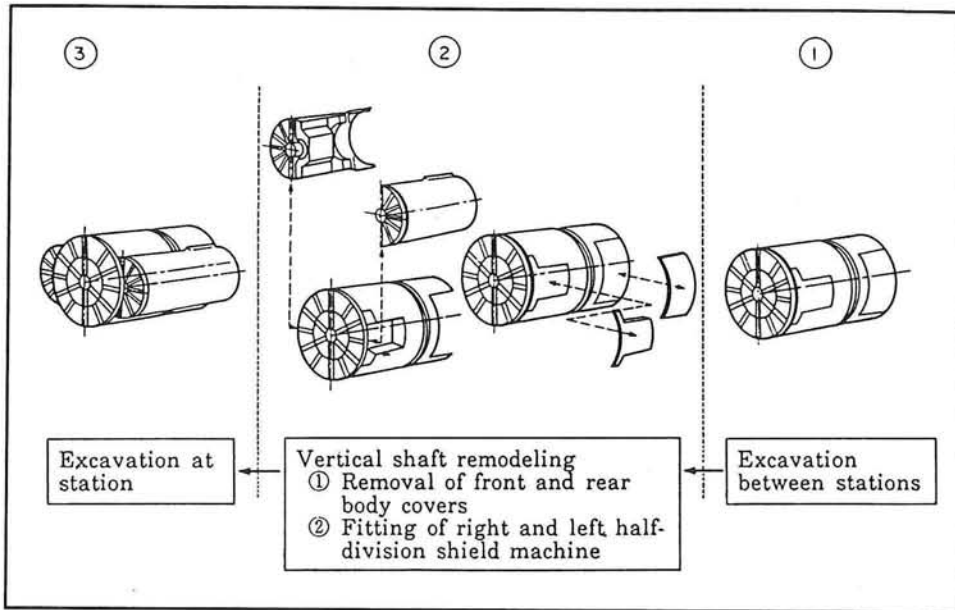


Figuur 6.52 Model van de machine.

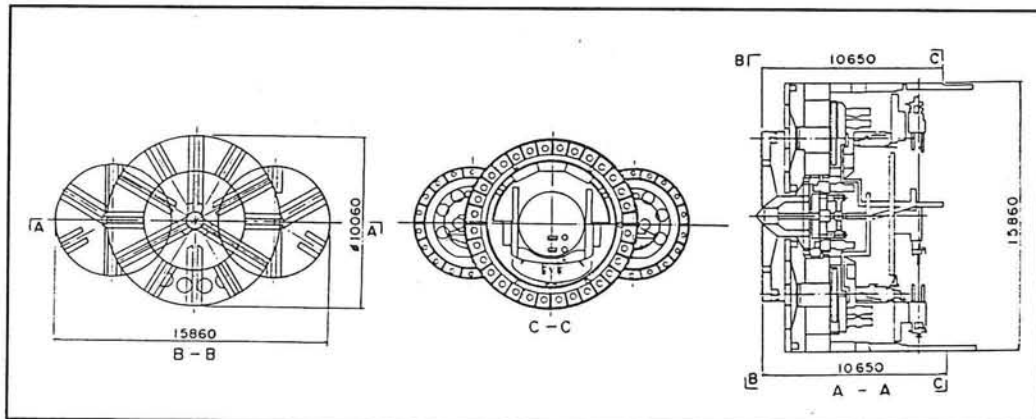
Het principe van deze methode is als volgt:

Met een normaal type schild-boormachine wordt een dubbelspoors tunnel geboord tot aan het te maken station. In een schacht, aan het begin van het station, worden nu aan beide zijden van de tunnelboormachine kleinere schildboormachines bevestigd (zie figuur 6.53).

Het geheel boort vervolgens verder en wordt op die manier een station met zij-perrons gemaakt. Aan het eindpunt van het station bevindt zich een tweede schacht. Hier worden de



Figuur 6.53 Uitvoeringsfasen Three Centered Slurry Type Shield Machine.



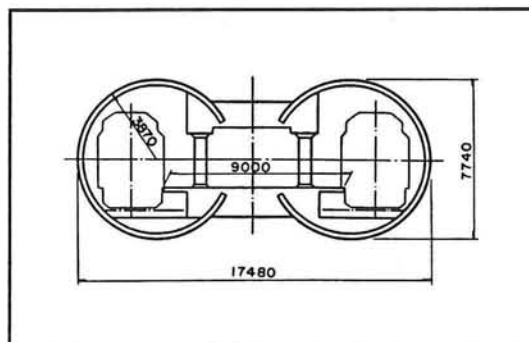
Figuur 6.54 Doorsneden van de machine.

twee extra boormachines weer verwijderd en vervolgt de enkele boormachine zijn weg. Eventuele overige stations in het tunneltraject kunnen op dezelfde wijze worden gemaakt.

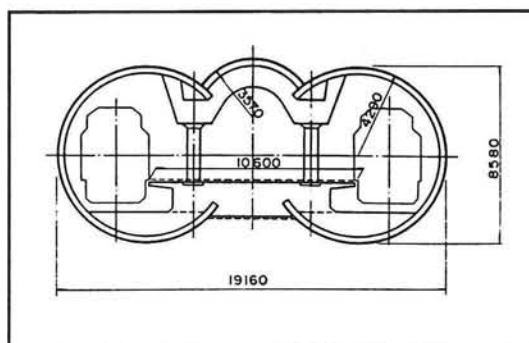
Volgens de Japanse onderzoekers is deze methode kostenbesparend, omdat de gewone boormachine, die het tunneltraject boort, ook kan worden ingezet bij het maken van de stations. Er zijn dan voor het maken van de stations geen afzonderlijke machines benodigd. De boormachine moet wel worden voorzien van een koppelmogelijkheid voor de beide kleinere machines. Verder is slechts één 'boortrein' benodigd.

Vergeleken met andere conventionele stationsbouwmethodes vanuit boortunnels, zoals de 'roof-beam-methode' en de 'roof-shield-methode' (zie figuur 6.55 en 6.56) zijn er bij deze methode geen aanvullende voorzieningen benodigd. Te denken valt hierbij aan vriezen of grouten om de grond plaatselijk te verstevigen.

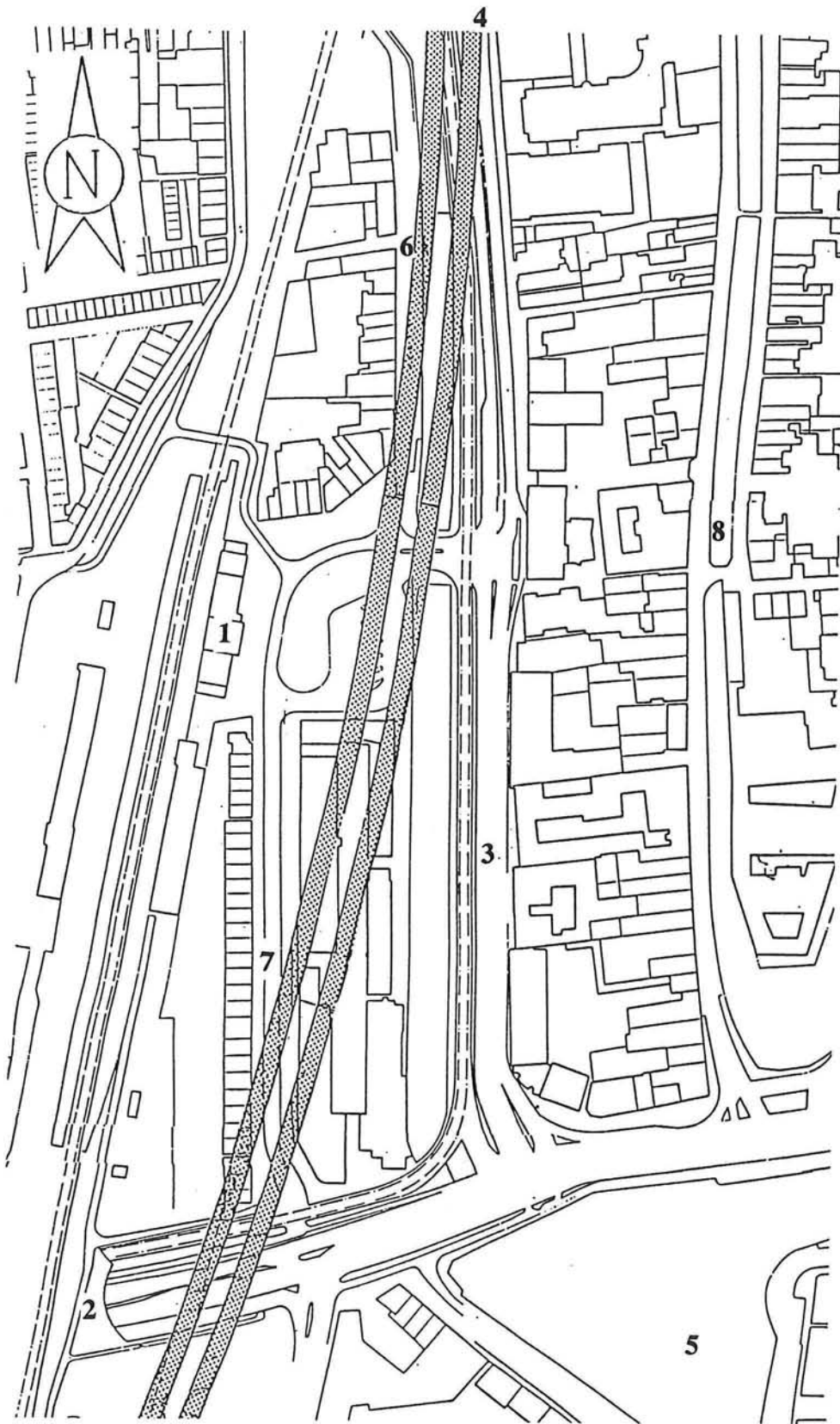
Een ander voordeel is een verkorting van de bouwtijd van het station, omdat het station in één (relatief) continu proces gebouwd kan worden, en niet bijvoorbeeld eerst één buis, daarna de andere en hiertussen een station bouwen.



Figuur 6.55 Roof-beam-methode.



Figuur 6.56 Roof-shield-methode.



Figuur 7.1 Plattegrond tunneltracé.

1. *Huidig NS-Station.*
2. *Irenetunnel.*
3. *Westvest.*
4. *Phoenixstraat.*
5. *Schie.*
6. *Houttuinen.*
7. *Van Leeuwenhoeksingel.*
8. *Oude Delft.*

## 7. Afweging en keuze uitvoeringsmethode.

### 7.1 Inleiding.

In het vorige hoofdstuk zijn een groot aantal uitvoeringsmethoden voor het creëren van een ondergrondse constructie op een rij gezet. De beschreven uitvoeringsmethoden zijn in beginsel algemeen toepasbaar. Het doel van dit hoofdstuk is het met elkaar vergelijken van de diverse uitvoeringsmethoden in relatie tot de Delftse situatie en het komen tot een keuze.

Een algemeen vergelijk in economische zin van de diverse uitvoeringsmethoden, los van een bepaald project, is niet echt mogelijk en reëel. Je kunt bijvoorbeeld niet klakkeloos zeggen: vriezen is te duur. Dit moet relatief worden gezien in relatie tot andere methoden en hangt helemaal af van de situatie en omstandigheden waarin wordt gebouwd.

Bij ieder project moeten de mogelijke uitvoeringsmethoden iedere keer weer worden getoetst aan de variabelen die aan dat specifieke project zijn verbonden, zoals: lokale omstandigheden, marktprijzen, mate van veiligheid (risico), etc. Deze variabelen kunnen per project enorm verschillen.



In dit hoofdstuk wordt specifiek het nieuw te bouwen ondergrondse station te Delft beschouwd. De diverse uitvoeringsmethoden worden getoetst aan een aantal, specifiek voor de Delftse situatie geldende, criteria.

Voordat met de toetsing begonnen wordt zal eerst de situatie in Delft in §7.2 samengevat worden weergegeven (geologisch profiel, GWS etc.).

Vervolgens worden de diverse methoden kort besproken. Hierbij wordt direct een grove schifting gemaakt aan de hand van twee hoofdcriteria. Met de overgebleven methoden volgt daarna een gedetailleerder vergelijking, waarna een keuze volgt.

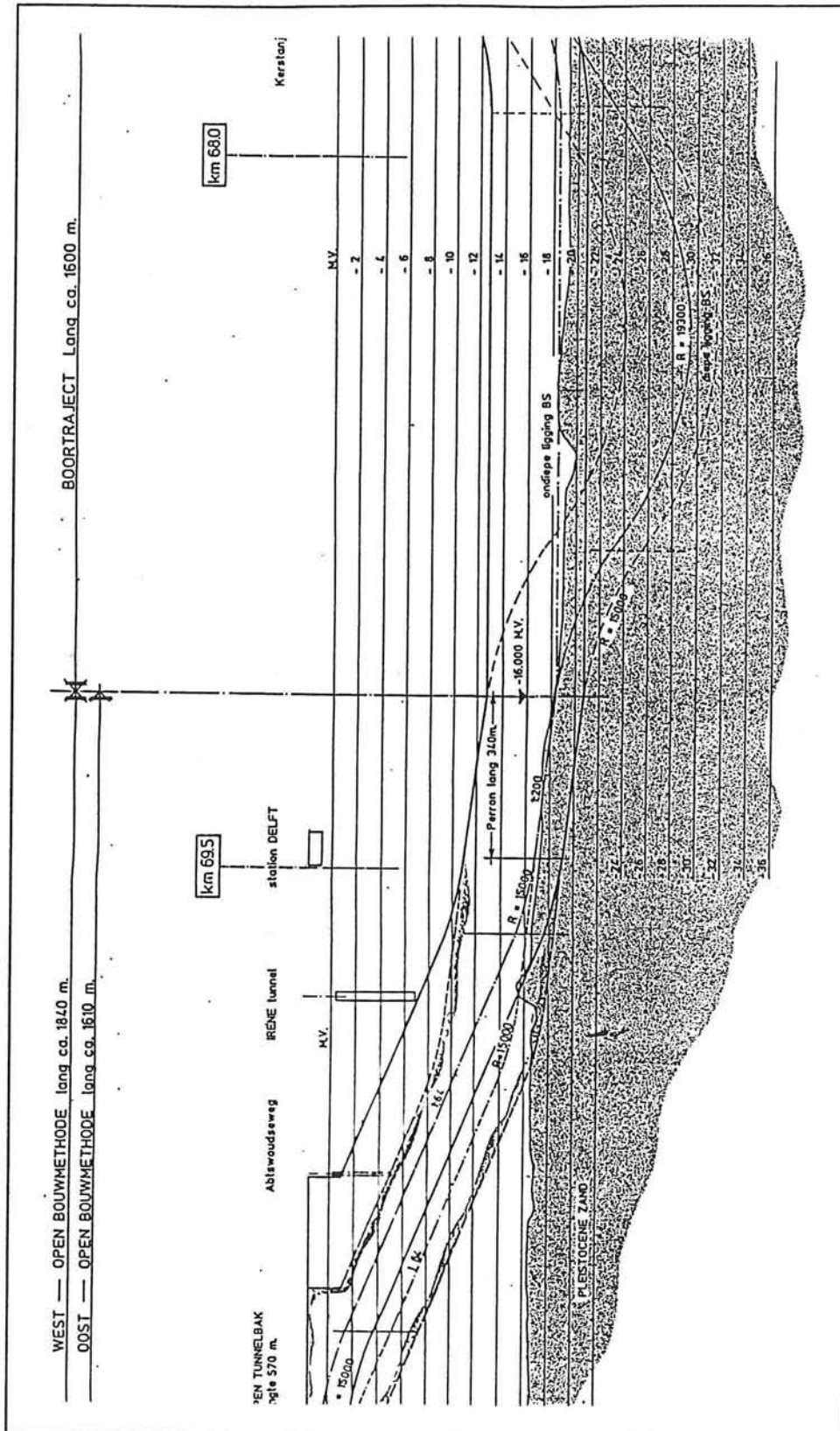
### 7.2 Samenvatting Delftse situatie.

#### Ondergrondse station (geometrie):

- Plattegrond en langsprofiel tunneltracé  figuur 7.1 en 7.2.
- Afmetingen station:
  - Lengte = 340 m.
  - Breedte = 24,88 m.<sup>1</sup>
  - Hoogte 1 = 9,26 m.<sup>1</sup> (Lage deel)
  - Hoogte 2 = ca. 14 m.<sup>1</sup> (Hoge deel)
- Voorlopig dwarsprofiel tunnel:  figuur 5.9

---


<sup>1</sup> Voorlopige aannamen; afm. dwarsdoorsnede zijn afhankelijk van de uiteindelijke dikten van de vloer de wanden en het dak.

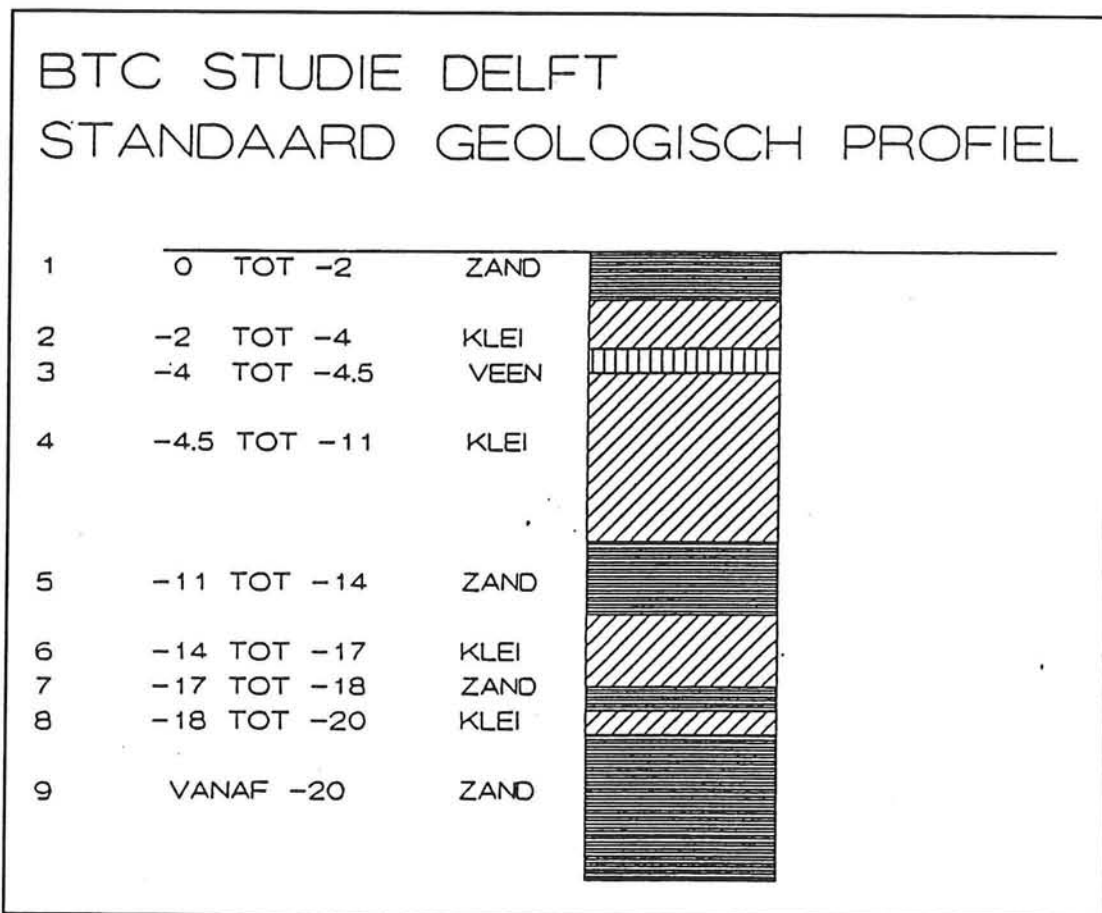


Figuur 7.2 Vertikaal alignement volgens BTC.

- Niveau onderzijde vloerconstructie station op 19.5 m ÷ NAP ( $\approx$  20 m ÷ MV).


**Grond en water:**

- Hoogteligging maaiveld (gemiddeld): 0.5 m + NAP.
- Niveau kanaalpeil: 0.1 m + NAP ( $\approx$  0,40 m ÷ MV)
- Stijghoogte eerste watervoerende laag (9 in figuur 7.3): 6.5 m ÷ NAP (extreme waarde)
- Verlaging van de GWS is niet toegestaan.
- Geologisch profiel  figuur 7.3.



Figuur 7.3 Geologisch profiel t.p.v. station Delft volgens NS-BTC.

**Bebouwing:**

De bebouwing rond het station zit de constructie van het ondergrondse station niet ernstig in de weg. Slechts drie panden aan de Houttuinen en de constructiewerkplaatsen ten zuiden van het stationsplein vormen een belemmering. Verder loopt het stationstracé onder achtereenvolgens: het stationsplein, de Westsingelgracht en een deel van de Westvest ( plattegrond figuur 7.1).





Wat betreft de constructiewerkplaatsen zijn er bij de gemeente reeds ideeën om dit complex in de toekomst te vervangen door nieuwbouw. Dit gegeven vormt dan ook een uitgangspunt bij de keuze van de uitvoeringsmethode.

### 7.3 Bespreking uitvoeringsmethoden en eerste schifting.

Bij deze bespreking wordt direct een grove schifting gemaakt naar de **mogelijkheid** van toepassing van de desbetreffende methode in deze specifieke situatie.

Bovendien blijkt het dat de situatie niet dermate complex is, dat we direct naar methoden moeten grijpen waarbij geen of nauwelijks aantasting van het maaiveld plaatsvindt. (ofwel: We moeten niet trachten de mug met een jachtgeweer te doden.) Temeer daar de gemeente in wezen van plan is het gebied rond het station op korte termijn te herinrichten.

Daarom is het dus niet **noodzakelijk** om zoveel mogelijk van het maaiveld intact te laten en de bouwactiviteiten van het station volledig ondergronds te laten plaatsvinden; het overhoop halen van dit gebied is voor de gemeente misschien zelfs een mooie aanleiding voor een herinrichting.

In eerste instantie worden dus twee hoofdcriteria toegepast:

- *De mogelijkheid.*
- *De noodzakelijkheid.*

#### a. Open bouwput met natuurlijke taluds.

Over de open bouwputmethode met natuurlijke taluds kunnen we feitelijk vrij kort zijn. Deze methode neemt dermate veel ruimte in, dat toepassing in de Delftse situatie niet tot de reële mogelijkheden kan worden gerekend.

#### b. Open bouwput met verticale wanden (bouwkuip).

De open bouwputmethode met verticale wanden is wel te rekenen tot een van de meest toegepaste methoden. Nadeel is wel dat het maaiveld langdurig wordt opengelegd. Ook het feit dat de bouwkuip droog moet worden gemaakt kan bij zeer diepe bouwkuipen soms problemen opleveren en is niet zonder risico's. Neem bijvoorbeeld de uitvoering van het deel van de Willemsspoortunnel te Rotterdam ter plaatse van het Noordereiland. In deze situatie is expliciet niet gekozen voor een drooggemaakte open bouwkuip vanwege de grote risico's die het maken van een droge bouwkuip van zo'n 20 m diepte met zich meebrengt (☞ [117]).

Een bouwkuip bestaat in hoofdzaak uit twee delen: de bodem en de wanden.

Een slecht waterdoorlatende laag als bodem van de bouwkuip is in de Delftse situatie niet of



nauwelijks aanwezig. D.w.z. dat gezien de benodigde diepte van de bouwkuip, we de aanwezige kleilagen op dat niveau reeds gepasseerd zijn. Slechts op zeer grote diepte (meer dan 30 m ÷ NAP) is nog een slecht waterdoorlatende laag aanwezig, zodat deze variant voorlopig nog wordt meegenomen.

Een horizontale injectie laag als bodemafluiting is mogelijk, mits voldoende gronddekking voor evenwicht beschikbaar is. Aan deze methode kleven echter wel relatief grote risico's. Een nadere beschouwing van deze methode van bodemafluiting laat zien dat, gegeven de randvoorwaarden als boven omschreven, de opwaartse waterdruk zodanig is dat een minimale gronddekking van zo'n 17.5 m benodigd is. Bovendien zijn dan bouwkuipwanden van minimaal 40 m lengte benodigd, hetgeen in deze situatie niet als reëel wordt beschouwd.

Een onderwaterbetonvloer, vooral in combinatie met trekpalen, is een veel toegepast alternatief en behoort ook hier tot de mogelijkheden. Ook hier geldt weer de grote opwaartse waterdruk die moet worden getrotseerd.

Een bemaling van het grondwater is in deze situatie niet toegestaan (eventueel wel een retourbemaling in combinatie met een ander type bodemafluiting).

Voor de wanden van de bouwkuip bezien we de stalen wanden en de diepwanden. Gezien de grote diepte voor de bouwkuip zijn gewone damwandprofielen vanwege hun geringe stijfheid al snel ontoereikend. Daarom wordt voor deze beschouwing de stalen combiwanden aangehouden. Verder wordt ook het toepassen van betonnen diepwanden als wanden voor de bouwkuip tot de mogelijkheden gerekend.

De paalwanden en de bentoniet-folie schermen worden hier verlaten. Een paalwand is feitelijk meer geschikt voor een kleinschaliger project en de bentoniet-folie schermen zijn op zichzelf niet grondkerend.

Het langdurig openliggen van het maaiveld vormt vaak, en zeker in dit geval, een belemmering voor de doorgang van het stadsverkeer. Dit kan, waar mogelijk, tijdelijk worden opgevangen door het aanbrengen van infrastructurele hulpvoorzieningen over de bouwkuip heen.

#### **c. Varianten construeren in open bouwkuip.**

Deze methoden hebben een droge bouwkuip, ongeacht de uitvoering daarvan, als uitgangspunt. Daarom wordt verwezen naar de bespreking van open bouwkuipen onder punt a en b.

#### **d. Wanden-dak-methode.**

Bij de wanden-dak-methode werd onderscheid gemaakt tussen een methode met stalen damwanden en een methode met diepwanden. Beide varianten worden mogelijk geacht, zij het dat de methode met diepwanden hier in het voordeel is. Diepwanden bezitten een grotere stijfheid en bovendien kunnen zij eventueel als definitieve wanden in de constructie worden opgenomen.



Nadeel van de wanden-dak-methode is dat bij afwezigheid van een voldoende dikke waterafsluitende laag, kunstmatig een waterdichte bodemafluiting moet worden gemaakt, of onder verhoogde luchtdruk moet worden gewerkt of een bemaling moet worden toegepast.

**e. Pneumatische caissons.**

De methode met pneumatische caissons zou in eerste instantie tot de mogelijkheden behoren, aangezien deze methode bijna niet door bebouwing wordt belemmerd. Echter vanaf het moment dat de bouw van de caissons wordt aangevangen tot het moment dat ze volledig onder de grond verdwenen zijn, zijn de caissons een constante sta-in-de-weg op het maaiveld. In vergelijking met de open bouwkuip methode kan die bouwkuip nog, daar waar nodig, worden afgedekt cq worden overbrugd met tijdelijke hulpconstructies.

Gezien de relatief geringe beschikbare ruimte, het dagelijks gebruik van die ruimte en gezien de veroorzaakte overlast, wordt de methode met pneumatische caissons in dit geval niet tot de reële alternatieven gerekend.

**f. Afzinkmethode.**

De afzinkmethode sec is in deze situatie ongeschikt, daar het hier een landlokatie betreft. Zie daarom verder onder punt *g*: *combinatie bouwkuip/afzinken*.

**g. Combinatie bouwkuip/afzinken.**

De methode combinatie bouwkuip/afzinken is voor deze situatie een goed alternatief. Mede gezien de grote diepte waarop de constructie moet worden aangelegd. Een minpunt van deze methode is weliswaar dat het maaiveld opengegraven wordt, maar dat hoeft echter gezien de situatie niet als een nadeel te worden gezien. (Een en ander is tenslotte te ondervangen met behulp van hulpconstructies.) Het grote voordeel van deze methode boven de reguliere open bouwkuip methode is dat de bouwkuip niet droog hoeft te worden gemaakt. De kosten, moeite en tijd van het toepassen van trekpalen voor de vloer van de bouwkuip wordt op die manier uitgespaard. Bovendien is de grondslag op de aanlegdiepte van dien aard dat de zinkelementen op staal kunnen worden gefundeerd.

Ook kan de constructie van de bouwkuipwand op die manier veel lichter worden uitgevoerd. Immers, omdat de bouwkuip niet wordt drooggemaakt ontbreekt een enkelzijdige waterdruk. De horizontale drukken op de wand zijn hierdoor veel lager. Bovendien kan ook het aanbrennen van een (vaak kostbare) waterdichte bodemafluiting achterwege worden gelaten. Een ander voordeel is dat het maaiveld slechts gedurende een uiterst minimale tijdspanne open ligt; n.l. vanaf het begin van het graven van de bouwkuip tot en met het afzinken van de elementen en het aanvullen van de sleuf, dat daarna volgt. In verhouding tot het in situ bouwen in een drooggemaakte open bouwkuip is de openingstijd van het maaiveld vele malen korter. Omdat de zinkelementen worden geprefabriceerd, kan de bouw van de stationsconstructie min



of meer parallel lopen met het maken van de bouwkuip (c.q. 'kanaal') Op die manier wordt de totale bouwtijd aanzienlijk verkort, en daarmee ook de duur van de veroorzaakte hinder. Het is echter voor deze methode van essentieel belang, dat een mogelijkheid voor het fabriceren van de zinkelementen beschikbaar is. Na nadere beschouwing is gebleken dat in de omgeving van het tunneltracé goede mogelijkheden aanwezig zijn voor deze prefabricage. Een voordeel van prefabricage is overigens, naast de tijdwinst, een relatief meer controleerbare en daarmee ook hogere kwaliteit van de constructie.

■ **No-dig-methoden:**

De hierna volgende methoden worden gekarakteriseerd door het feit dat zij het maaiveld voor een zeer groot deel onaangetaast laten. Algemeen geldt voor deze ondergrondse bouwmethoden dat de situatie in Delft niet dermate complex is dat deze methoden interessante alternatieven vormen, aangezien de 'open-maaiveld-methoden' doorgaans economischer zijn. Hier speelt het criterium '*noodzakelijkheid*' een grote rol. De noodzaak om persé onder de grond te blijven is hier, in de Delftse situatie, niet nadrukkelijk aanwezig. Hierbij dient de kanttekening te worden gemaakt dat hulpconstructies kostbaar kunnen zijn (bij de Willemsspoortunnel Rotterdam 40% van totale kosten!) en dat de aanwezigheid van zeer veel kabels en leidingen in de grond een no-dig-methode toch concurrerend kunnen maken.

**h. Vriesmethode.**

De vriesmethode is in wezen een mogelijk alternatief, zij het dat er feitelijk eenvoudiger (en wellicht goedkopere) methoden beschikbaar zijn.

Indien het openmaken van het maaiveld niet goed mogelijk zou zijn, danwel dat dit grote economisch nadelige gevolgen met zich mee zou brengen (bijvoorbeeld het opengraven van het enige beschikbare marktplein van de hele stad), dan zou de vriesmethode, ondanks zijn hoge prijs, toch een aantrekkelijk alternatief bieden. Van de vriesmethode moet gezegd worden dat de risicogevoeligheid vrij laag ligt. Volledigheidshalve kan nog vermeld worden, dat de vriesmethode wellicht plaatselijk ingezet kan worden. Op die plaatsen, waar bijvoorbeeld beneden de grondwaterstand een voeg tussen twee constructiedelen moet worden gemaakt, is het bevriezen van de grond een zeer bruikbaar hulpmiddel.

**i. Neue Österreichische Tunnelbauweise.**

Deze methode is feitelijk geëigend voor situaties waarbij geen grondwater in de bouw bodem aanwezig is en de grond bovendien een redelijke samenhang heeft. Daarom is het dat deze methode in het natte West Nederland ongeschikt is. Wel zou in situaties met aanwezig grondwater eventueel nog kunnen worden gedacht aan een combinatie van deze methode met de vriesmethode.





**j. Ondergronds uitbouwen vanuit boortunnel.**

Deze methode zou een zeer reële optie zijn geweest, indien het stationstraject (of de gehele tunnel) zou zijn geboord. In beginsel is dit echter niet het geval. (§ 1.2)

Toch wordt voor een gedetailleerder afweging in §7.4 dit alternatief meegenomen, uitgaande van de aanname dat in dat geval de boortunnel over een lengte van 340 m (de lengte van het station) verder zou zijn geboord. Aan het over een grotere afstand boren van de tunnel hangt vanzelfsprekend ook een prijskaartje.

Verder dient in het achterhoofd te worden gehouden, dat het geen pure noodzaak is om het station volledig ondergronds te realiseren.

**k. Antwerpse methode.**

De methode, toegepast bij de metrobouw te Antwerpen, is een knap bedachte methode voor gevallen waarbij volledig ondergronds gewerkt moet worden. De noodzaak van het toepassen van deze 'ondergrondse methode' is in dit geval echter niet aanwezig. Bovendien is deze methode uiterst complex. Omdat veel minder complexe (en snellere) alternatieve methoden voorhanden zijn, is deze methode niet geschikt voor deze situatie.

**l. Cellular Arch Methode: Venezia station.**

Deze methode vertoont grote gelijkenis met de Antwerpse Methode. Zie verder onder punt k.

**m. Three Centered Slurry Type Shield Machine.**

Deze methode bevindt zich nog in een ontwikkelingsstadium. Bovendien zou deze methode voor de Delftse situatie ook geen pure noodzaak zijn. De methode is eigenlijk slechts ter kennismaking aan hoofdstuk 6 toegevoegd, vanwege het sterk innovatieve karakter. In de toekomst, wanneer boortechnieken meer ingeburgerd zullen raken, biedt deze methode van stationsbouw interessante mogelijkheden voor complexe situaties.



#### 7.4 Gedetailleerd vergelijk overgebleven methoden.

Uit de eerste grove selectie van de diverse uitvoeringsmethoden naar *mogelijkheid* en *noodzakelijkheid* van toepassing van de desbetreffende methoden zijn de volgende methoden overgebleven:

|    |                                  |     |   |
|----|----------------------------------|-----|---|
| b. | Open bouwkuip methode            | b1. | ● onderwaterbeton, trekpalen, combiwand       |
|    |                                  | b2. | ● onderwaterbeton, trekpalen, diepwand        |
|    |                                  | b3. | ● zeer diepe waterafsluitende laag, combiwand |
|    |                                  | b4. | ● zeer diepe waterafsluitende laag, diepwand  |
| d. | Wanden-dak-methode               | d1. | ● met diepwanden                              |
|    |                                  | d2. | ● met damwanden                               |
| g. | Combinatie bouwkuip/afzinken     |     |   |
| k. | Ondergronds uitbouwen boortunnel |     |   |

De diverse bruikbare uitvoeringsmethoden beschouwend kan worden geconcludeerd dat de Delftse situatie geen geschikt scenario biedt voor de toepassing van een uiterst spectaculaire tunnelbouwmethode, hetgeen aan de ene kant gemakkelijk is en aan de andere kant ook wel jammer.

In dit tweede gedeelte van de variantenvergelijking worden de bovenstaande uitvoeringsmethoden getoetst aan een aantal gedetailleerder criteria. De volgende criteria zijn voor de tweede variantenvergelijking opgesteld:

1. Technische haalbaarheid/uitvoerbaarheid.
2. Bouwkosten.
3. Bouwtijd.
4. Maaiveldopeningstijd.
5. Overlast voor verkeer.
6. Mate van economische schade.
7. Overlast voor omwonenden (geluid etc.)
8. Risicogevoeligheid. (kans op misgaan)
9. Gevaar voor werknemers.

In beginsel zijn de geselecteerde uitvoeringsmethoden niet zeer nauwkeurig getoetst, maar zijn zij vergeleken ten opzichte van elkaar. Dat wil zeggen dat bijvoorbeeld bij het criterium 'de

|           | <b>Criteria.</b>                               |
|-----------|--|
| <b>1.</b> | <b>Technische haalbaarheid/uitvoerbaarheid</b> |
| <b>2.</b> | <b>Bouwkosten</b>                              |
| <b>3.</b> | <b>Bouwtijd</b>                                |
| <b>4.</b> | <b>Maaiveldopeningstijd</b>                    |
| <b>5.</b> | <b>Overlast voor verkeer</b>                   |
| <b>6.</b> | <b>Mate van economische schade</b>             |
| <b>7.</b> | <b>Overlast voor omwonenden</b>                |
| <b>8.</b> | <b>Risicogevoeligheid</b>                      |
| <b>9.</b> | <b>Gevaar voor werknemers</b>                  |

bouwkosten' niet per methode een exact bedrag is bepaald, maar dat een soort ranglijst is gemaakt uit een vergelijking tussen de diverse uitvoeringsmethoden. Op die manier is getracht een globaal beeld te verkrijgen van de aantrekkelijkheid van iedere individuele bouwmethode ten opzichte van de anderen.

|    | o.w.beton |       | afsl.laag |       | wanden-dak |      | afzinken | ondergr.-uitb. |
|----|-----------|-------|-----------|-------|------------|------|----------|----------------|
|    | combi     | diepw | combi     | diepw | diepw      | damw |          |                |
|    | b1.       | b2.   | b3.       | b4.   | d1.        | d2.  |          |                |
| 1. | ☺         | ☺     | ☹         | ☹     | ☺          | ☺    | ☺☺       | ☺              |
| 2. | ☺         | ☺     | ☺         | ☺     | ☺          | ☺    | ☺☺       | ☹☹             |
| 3. | ☺         | ☺     | ☺         | ☺     | ☺          | ☺    | ☺☺       | ☺              |
| 4. | ☹☹        | ☹☹    | ☹☹        | ☹☹    | ☺          | ☺    | ☺        | ☺☺             |
| 5. | ☹         | ☹     | ☹         | ☹     | ☺          | ☺    | ☺        | ☺☺             |
| 6. | ☹         | ☹     | ☹         | ☹     | ☺          | ☺    | ☺        | ☺☺             |
| 7. | ☹         | ☹     | ☹         | ☹     | ☺          | ☺    | ☺        | ☺☺             |
| 8. | ☺         | ☺     | ☹         | ☹     | ☺          | ☺    | ☺☺       | ☺              |
| 9. | ☺         | ☺     | ☺         | ☺     | ☺          | ☺    | ☺☺       | ☺              |

- ☺☺ = zeer aantrekkelijk
- ☺ = aantrekkelijk
- ☺ = neutraal
- ☹ = gematigd aantrekkelijk
- ☹☹ = tamelijk onaantrekkelijk

Bovenstaande tabel geeft een globaal beeld van de onderlinge verhoudingen ten aanzien van de gestelde criteria. Het totaalbeeld dat hieruit zou volgen, is natuurlijk niet geheel juist, daar het ene criterium meer waarde heeft dan het andere.

Om een zeer nauwkeurige analyse van de diverse bouwmethoden te maken zouden in feite weegfactoren moeten worden ingevoerd. In dit geval zou men zich af kunnen vragen in hoeverre zo'n nauwkeurige analyse zinvol is. Het is hier zinvoller om te onderzoeken of er ten aanzien van de Delftse situatie een uitvoeringsmethode is, die er echt uitspringt. Indien een 'uitspringer' wordt gevonden is een hoop werk bespaard gebleven.



Om die reden is in eerste instantie gekeken naar de meest belangrijke criteria. Dit zijn achtereenvolgens:

1. Technische haalbaarheid.
2. Bouwkosten.
3. Bouwtijd.
4. Maaiveldopeningstijd. (nrs.5,6 en 7 hangen nauw hiermee samen)
8. Risicogevoeligheid.

Qua overlast voor de stad (o.a. maaiveldopeningstijd) en de daarmee samenhangende economische schade is het ondergronds uitbouwen erg aantrekkelijk. De relatief hoge kosten en de risicogevoeligheid maken deze optie minder aantrekkelijk (althans in verhouding tot de andere mogelijkheden).

Grote concurrent van het ondergronds uitbouwen is de methode combinatie bouwkuip/afzinken. De bouwtijd is bij deze optie relatief kort en de kosten zijn aanmerkelijk lager dan het ondergronds uitbouwen.

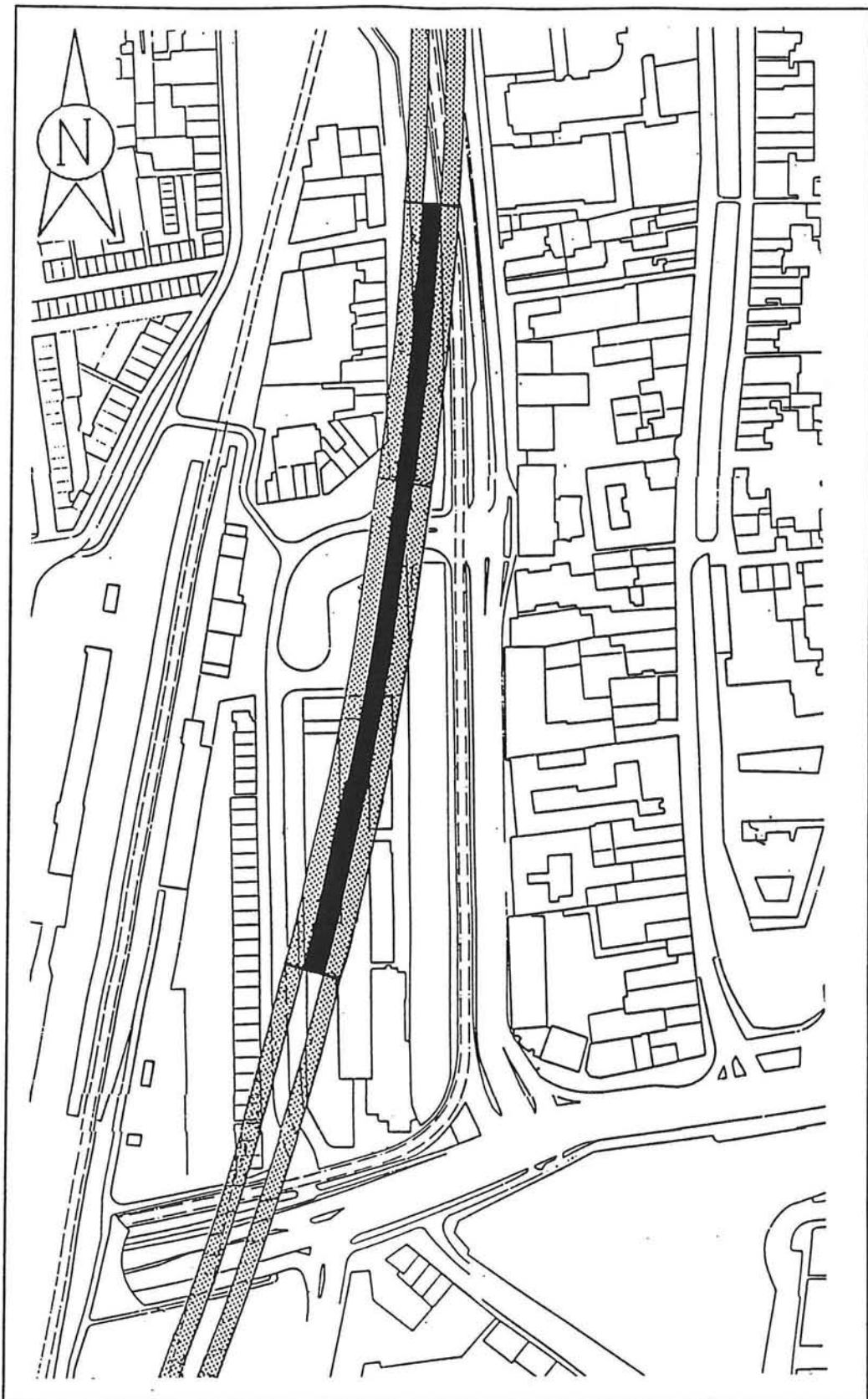
Bovenstaande vijf criteria beschouwende, blijkt het dat de methode combinatie bouwkuip/afzinken toch het meest aantrekkelijk is in deze situatie. Doordat deze methode er toch enigszins uitspringt is via een vrij grove schifting een bouwmethode opgeborreld zonder al te diep in te gaan op het exact bepalen van de waarderingen voor de diverse methoden aan de hand van de criteria. Zouden nu een aantal methoden zeer dicht bij elkaar liggen, dan was een nog gedetailleerder onderzoek uiteraard wel nodig.

Voor het construeren van het ondergrondse station te Delft wordt dus gekozen voor de methode **combinatie bouwkuip/afzinken**.

De gekozen uitvoeringsmethode kent een aantal karakteristieke punten, die om nadere uitwerking vragen. Deze punten zijn:

- Kruising met de Irenetunnel.
- Bouwdok-constructie.
- Keren van de TBM.

Deze punten worden in hoofdstuk 10 verder uitgewerkt.



Figuur 7.4 Overzicht locatievariant ondergronds station.



## 7.5 Nadere uitwerking methode combinatie bouwkuip/afzinken.

### 7.5.1 Inleiding.

Over de lengte van het tunneltracé wordt met een stalen combiwand een bouwkuip gemaakt, die niet wordt drooggepompt. Zo verkrijgt men een kanaal waardoor later de tunnelelementen kunnen worden ingevaren en afgezonken. Nadat de elementen zijn geplaatst wordt het 'kanaal' aangevuld met grond, en kan weer over het maaiveld worden beschikt.

In het kort worden de voor- en nadelen van deze methode nog even op een rij gezet:

#### Voordelen:

- De grondwaterstand behoeft niet te worden verlaagd, zodat hierdoor geen zettingen van de belendingen worden veroorzaakt en geen (kostbare) (retour-)bemaling is vereist.
- Door het ontbreken van een éézijdige horizontale waterdruk zijn minder zware bouwkuipwanden benodigd.
- Geen bodemafluiting voor de bouwkuip nodig.
- Kortere 'maaiveldopeningstijd', dus minder lang overlast (in feite een kwestie van graven, afzinken en dichtgooien).
- Het maken van de zinksleuf/bouwkuip en het maken van de zinkelementen kan parallel lopen, zodat de bouwtijd aanzienlijk wordt verkort.
- Door prefabricage van de elementen wordt een betere en beter controleerbare kwaliteit van de constructie verkregen.

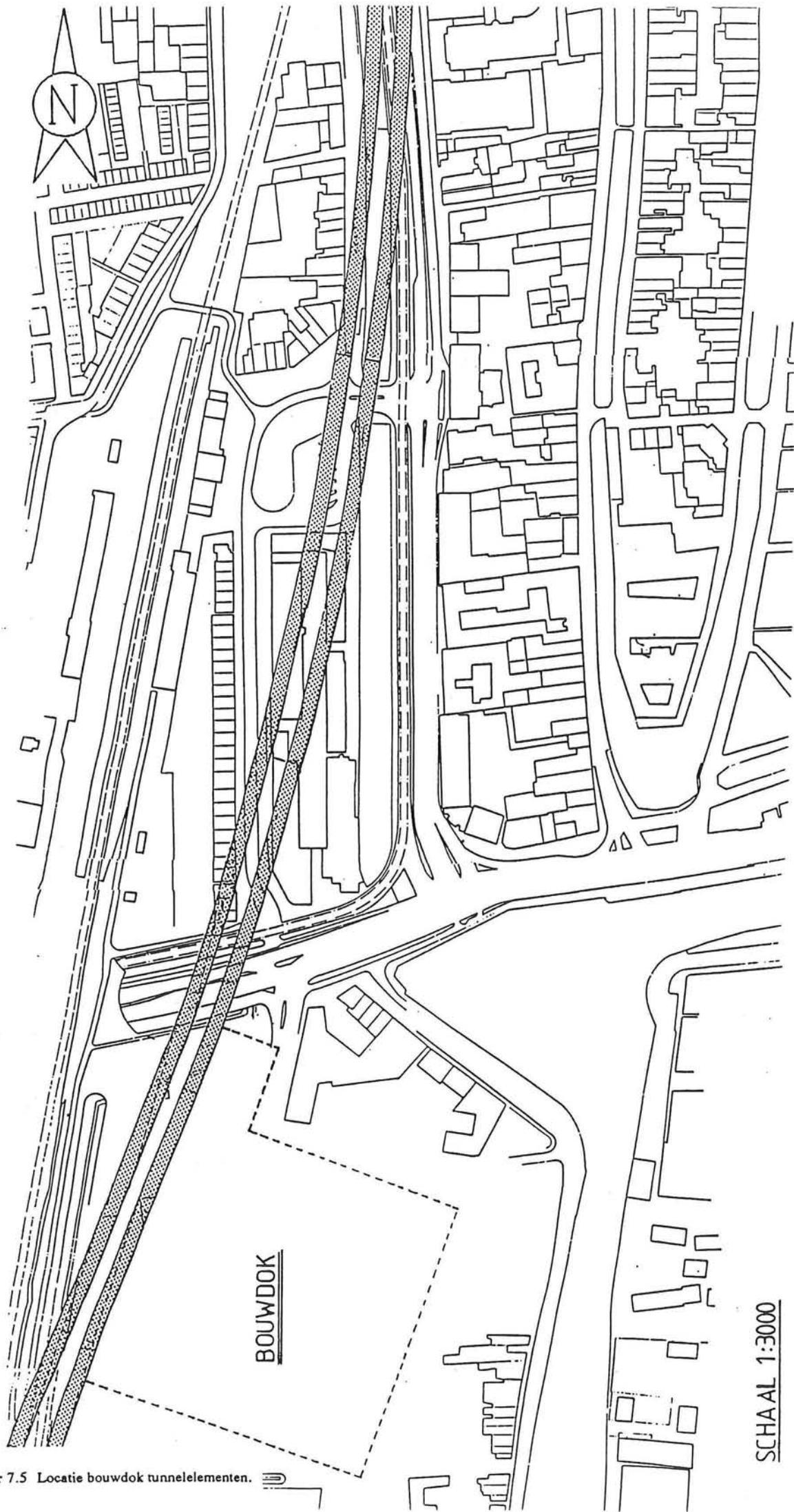
#### Nadelen:

- Voor de prefabricage van de elementen is een bouwdok nodig; is daar ruimte voor? en wat zijn de extra kosten van dit bouwdok?
- Het maaiveld moet, zij het tijdelijk, worden opengemaakt, hetgeen toch een zekere overlast veroorzaakt, en de nodige hulpvoorzieningen vraagt. Eventueel kan een fasering worden toegepast.

### 7.5.2 Locatievariant. (☞ figuur 7.4)

De gemeente heeft als wens om het ondergrondse station zodanig te situeren dat dit toegankelijk is ter hoogte van de Binnenwatersloot. Door deze wens van de gemeente is de locatie van het station enigszins ongelukkig uitgevallen. Hierdoor ontstaat voor de reguliere treinreizigers een relatief grotere loopafstand voor de treinen, omdat het bovengrondse en het ondergrondse perron relatief ver t.o.v. elkaar verschoven zijn. In het meest extreme geval moet een reiziger bijna 500 m (halve kilometer!) lopen om te kunnen overstappen.

Daarnaast is deze locatie uitvoeringstechnisch ook zeer ongunstig, aangezien onder het drukke kruispunt Westvest-Binnenwatersloot-Buitenwatersloot-Phoenixstraat gebouwd moet worden.



Figuur 7.5 Locatie bouwdok tunnelementen.

SCHAAL 1:3000

Daarom is besloten een variant voor de locatie van het ondergrondse station te ontwikkelen. Deze bestaat uit het verschuiven van het station in zuidelijke richting over een afstand van 117 meter. Dit is mogelijk, omdat de constructiewerkplaatsen ten zuiden van het stationsplein in de nabije toekomst toch zullen verdwijnen. Van dit gegeven kan dankbaar gebruik worden gemaakt.

Door deze verschuiving komen de ondergrondse- en bovengrondse perrons veel gunstiger t.o.v. elkaar te liggen; de toegang van het ondergrondse station komt nu ongeveer in het midden van het perron te liggen in plaats van aan de kop.

Uitvoeringstechnisch gezien, is het voordeel van deze variant dat het meest noordelijke puntje van het station net tot aan de rand van de Westvest reikt. Hierdoor wordt veel hinder voor het verkeer voorkomen. Het totaalbeeld ziet er dan uit als in figuur 7.4.

### 7.5.3 Doklocatie.

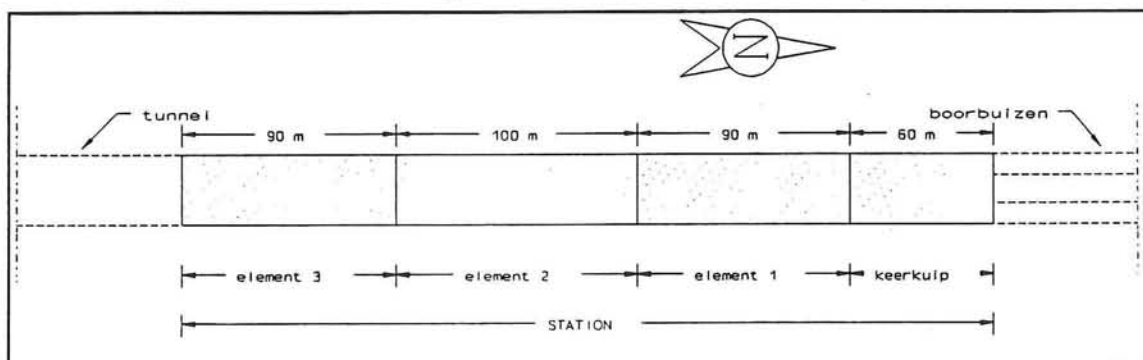
Een doklocatie voor de prefabricage van zinkelementen is in een stad vaak moeilijk te vinden. In Delft daarentegen, wordt de tunnelbouwer een handje geholpen met een groot braakliggend stuk terrein ten zuiden van de Irenetunnel (zie figuur 7.5).

Deze locatie is groot genoeg voor het aanleggen van een bouwdok ten behoeve van het maken van een groot aantal zinkelementen en grenst direct aan het tunneltracé.

### 7.5.4 Tunnelementen.

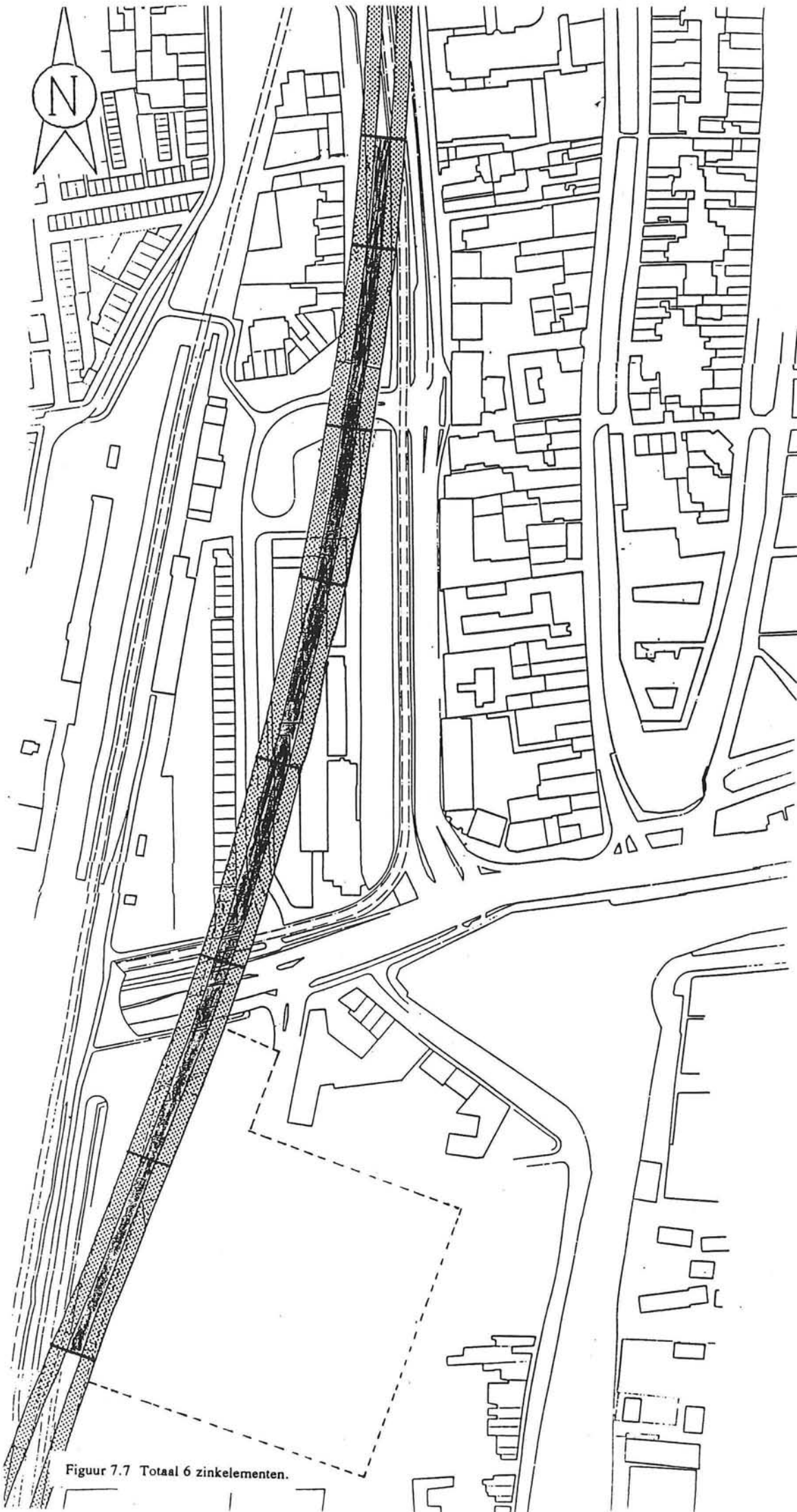
Het ondergrondse station (lengte 340 m) wordt opgesplitst in 4 delen (zie figuur 7.6), te weten:

- Kuipdeel : 60 m lengte (keerkuip)
- Noordelijke deel : 90 m lengte (element 1)
- Middelste deel : 100 m lengte (element 2)
- Zuidelijke deel : 90 m lengte (element 3)



Figuur 7.6 Overzicht stationsdelen.

Het kuipdeel, direct grenzend aan het noordelijke deel, wordt gebruikt als de keerkuip annex landhoofd (zie §7.5.5) en wordt in een droge bouwkuip uitgevoerd. De overige drie delen worden uitgevoerd als zinkelement (genummerd resp. element 1, 2 en 3) (zie figuur 7.6).



Figuur 7.7 Totaal 6 zinkelementen.

In het midden van het middelste element (element 2) zijn enkele constructies aanwezig voor een te maken trappartij (zie hoofdstuk 8). Hierdoor zou dit element een groter eigen gewicht per strekkende meter element krijgen en daarmee een grotere diepgang dan de overige twee elementen. Om de diepgang van de elementen ongeveer gelijk te houden is de lengte van het middelste element wat groter. Het extra gewicht kan hierdoor wat beter worden gespreid over het element, zodat het eigen gewicht per strekkende meter element voor alle elementen ongeveer gelijk is.

#### ■ Variant met zes zinkelementen.

Gezien de gekozen locatie van het bouwdok zou het voor de hand liggen om het tunneldeel, lopende vanaf het station in zuidelijke richting, óók met behulp van zinkelementen uit te voeren. Hiermee kan een langdurige overlast voor het verkeer door de Irenetunnel worden vermeden. Dit tunneldeel zou dan kunnen worden gesplitst in 3 elementen van 120 meter elk (zie figuur 7.7). In totaal zouden dan 6 grote zinkelementen in het bouwdok moeten worden gemaakt.

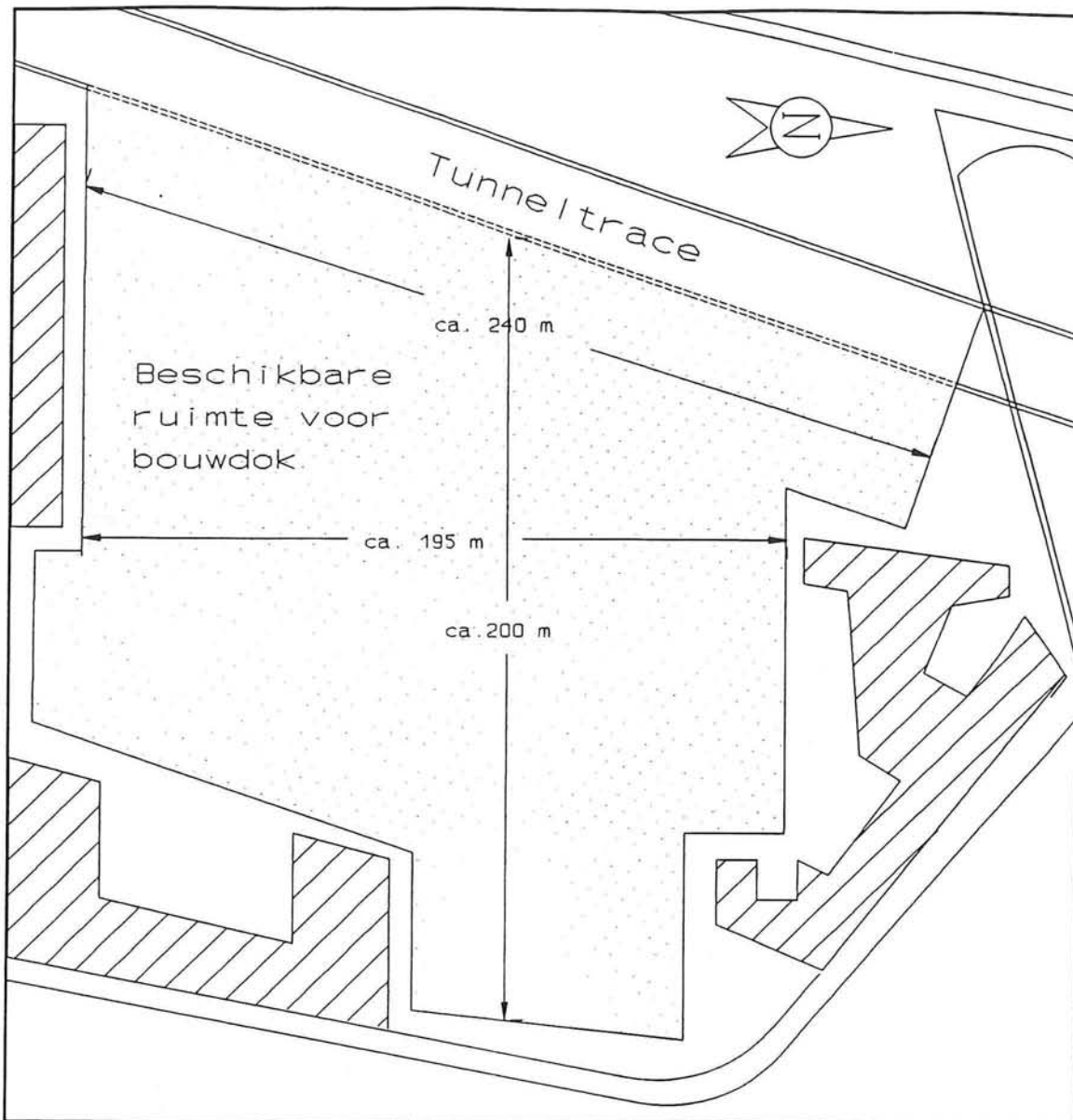
Indien we de maximaal beschikbare ruimte voor het maken van een bouwdok bekijken, dan is te zien dat deze bouwlocatie aan de westzijde wordt begrensd door de spoorlijn, een fabrieksgebouw aan de zuidzijde, aan de oostzijde een rij huizen en aan de noordkant de Irenetunnel. De maximale beschikbare ruimte en vorm daarvan is weergegeven in figuur 7.8. Ook het gedeelte naast het bouwdok, dat later als zinksleuf zal fungeren, kan bij het bouwdok worden betrokken.

Na de **beschikbare** ruimte geïnventariseerd te hebben, bekijken we de **benodigde** ruimte en haar vormen voor het maken van de 6 zinkelementen. De elementen zouden dan kunnen worden geconfigureerd, zoals is weergegeven in figuur 7.9.

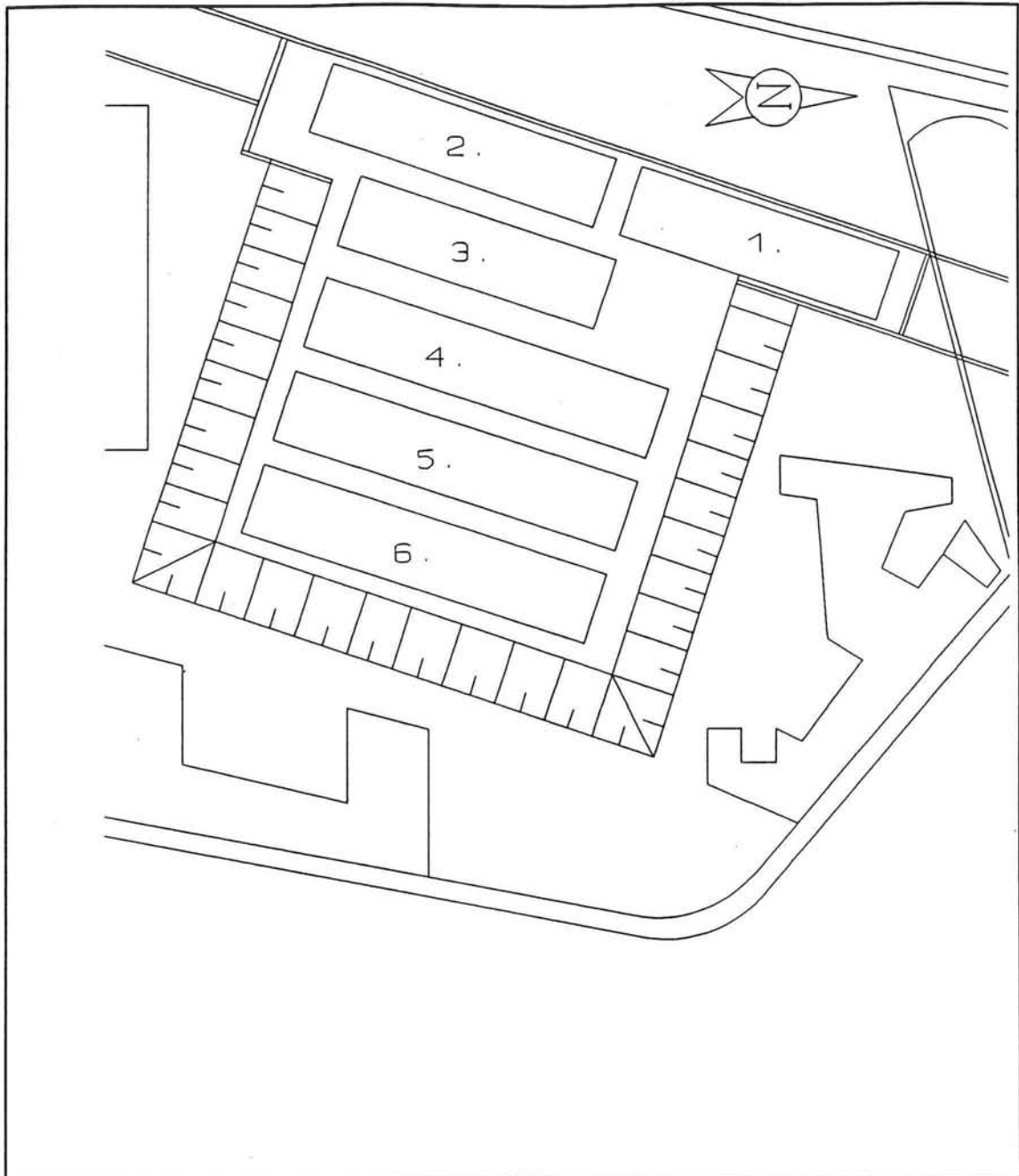
Zoals in de figuur is te zien, is voor deze zes zinkelementen een zeer groot bouwdok benodigd. In principe is de ruimte daarvoor wel aanwezig, maar de kosten van zo'n groot bouwdok zijn aanzienlijk. Deze kosten bestaan o.a. uit het ontgraven van het bouwdok met een volume van ca. 275000 m<sup>3</sup>. Maar, aangezien het zo ontstane 'gat' naderhand weer moet worden aangevuld, is het noodzakelijk deze grond tijdelijk op te slaan.

Na een nadere beschouwing is gebleken dat vooral dit opslaan van de grond (ca. Fl.20,-/m<sup>3</sup>) en het transport ervan (heen en terug) zeer grote kostenposten zijn, hetgeen dit grote bouwdok financieel onaantrekkelijk maakt.

Een mogelijk alternatief is een kleiner bouwdok, waarbij de elementen bijvoorbeeld in twee stappen worden gemaakt. Deze mogelijkheid is in feite weer ongunstig ten aanzien van het gekozen uitvoeringsprincipe. De essentie van het gekozen uitvoeringsprincipe is dat het fabriceren van de elementen en het maken van de zinksleuf op bij benadering hetzelfde tijdstip gereed is. Alle elementen kunnen dan vrijwel direct worden ingevaren en afgezonken. Op die manier wordt het tijdsbestek waarin het maaiveld open ligt en de daarmee samenhangende



Figuur 7.8 Beschikbare ruimte en vorm daarvan voor bouwdoek.



Figuur 7.9 Mogelijke rangschikking zes elementen in bouwdoek.

overlast voor omwonenden en het verkeer tot een minimum beperkt.

Wanneer de zinkelementen in twee shifts zouden worden gemaakt, dan ligt het maaiveld langer open dan bij bovenomschreven situatie. Hier kan tegenin worden gebracht dat bij de twee-shift situatie de ruimte boven de reeds afgezonken elementen alvast zou kunnen worden aangevuld. Hierbij dient echter te worden opgemerkt dat indien een plaatscorrectie van een bepaald reeds afgezonken element noodzakelijk zou blijken te zijn, dit niet meer mogelijk is zonder de gronddekking weer te hebben verwijderd (alhoewel de kans hierop erg klein is). Een ander





nadeel van de twee-shift variant is dat het bouwdok dan twee maal moet worden leeggepompt en geïnundeerd en bovendien twee maal volledig moet worden ingericht (opbouw kranen, loodsen e.d.). Daar komt bij dat de dokafsluiting met de zinksleuf moet worden verbroken en weer hersteld. Alles bij elkaar kost dit veel extra tijd en investeringen. Over het geheel genomen kent een kleiner bouwdok dus ook duidelijk z'n nadelen.

■ **Variant met vier zinkelementen.**

Vanuit dit oogpunt is gezocht naar een geheel ander alternatief. Dit alternatief is min of meer ontstaan naar aanleiding van de hoge kosten van het grote bouwdok en door het feit dat de elementen 5 en 6 feitelijk in het dok gebouwd worden, daarna worden opgedreven om vervolgens zo'n 50 meter verderop te worden afgezonken, hetgeen niet al te efficiënt is. Gekozen is om de stationsdelen 1, 2 en 3 als zinkelement uit te voeren, evenals 90 meter van het daarop aansluitende deel van de zuidelijke tunnel. Het resterende tunneldeel, dat meeren-deels buiten de drukke verkeersstromen ligt, wordt in een droge bouwput uitgevoerd, en niet, zoals eerst was voorgesteld, ook met zinkelementen.

Voordeel hiervan is dat het bouwdok voor deze vier elementen slechts klein is en dit bovendien deels met de later te maken droge bouwkuip kan worden geïntegreerd. De uit het bouwdok vrijkomende grond kan naast het bouwdok worden opgeslagen, hetgeen zeer veel kosten bespaard (ca.5 miljoen gulden).

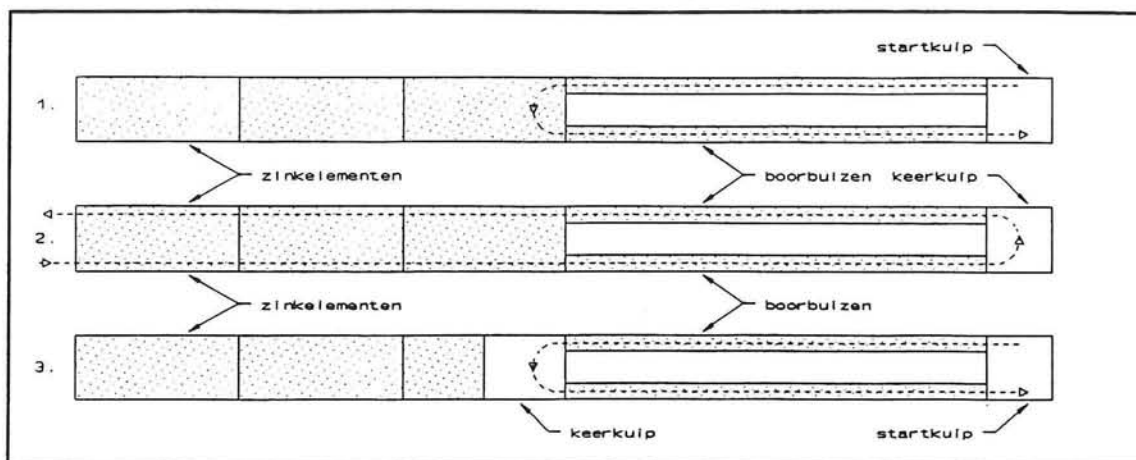
Een ander aspect dat niet uit het oog verloren moet worden, is het feit dat de tunnelbuizen, zuidwaarts vanaf het station, in hoogteligging gaan verschillen (zie lang profiel figuur 7.2). Dit, omdat de westelijke buis eerst nog onder de huidige bovengrondse sporen door moet gaan, alvorens boven de grond te komen. Bij het bouwen in een droge bouwkuip is dit aspect beter oplosbaar, dan wanneer dit in een zinkelement ingepast zou moeten worden. Ten aanzien van dit aspect is het gekozen alternatief dus zeer gunstig.

De gekozen oplossing zal in hoofdstuk 10 (*Uitvoering ondergronds station Delft*) uitvoerig aan de orde komen.



### 7.5.5 Keerkuip.

Voor het boren van de twee tunnelbuizen is het noodzakelijk de TBM op een bepaald punt te keren. Hiervoor zijn diverse mogelijkheden te bedenken (zie figuur 7.10):



Figuur 7.10 Varianten in keermogelijkheden TBM.

#### ■ Variant 1.

Bij de eerste variant wordt de TBM gekeerd in het op de boortunnel aansluitende zinkelement. Deze variant levert de nodige problemen op:

- Benodigde hijsinstallaties zijn door de beperkte hoogte moeilijk aan te brengen.
- Element moet breder worden uitgevoerd vanwege het keren van de TBM.
- Element moet reeds geplaatst zijn voordat de TBM moet worden gekeerd. Dit legt een grote stempel op het tijdschema, daar het boren en de bouw van het station in de tijd afhankelijk van elkaar worden gemaakt.

#### ■ Variant 2.

Bij de tweede variant wordt de gehele boortrein aangevoerd vanaf de zuidzijde, door de zinkelementen heen. De TBM wordt gekeerd in een noordelijke kuip. Nadelen die hieraan kleven zijn:

- De zinkelementen moeten aan het benodigd ruimteprofiel van de TBM worden aangepast.
- De zinktunnel moet volledig gereed zijn alvorens met het boren kan worden gestart.
- De afbouw van de zinktunnel (perrons e.d.) kan pas plaatsvinden nadat de TBM is teruggekeerd en is gedemonteerd.

Kortom, logistiek gezien is deze variant niet bepaald aantrekkelijk.

#### ■ Variant 3.

Bij de derde en gekozen variant wordt de TBM aangevoerd via een noordelijke startkuip en wordt deze gekeerd in een speciale keerkuip. Deze keerkuip zowel voor het keren van de



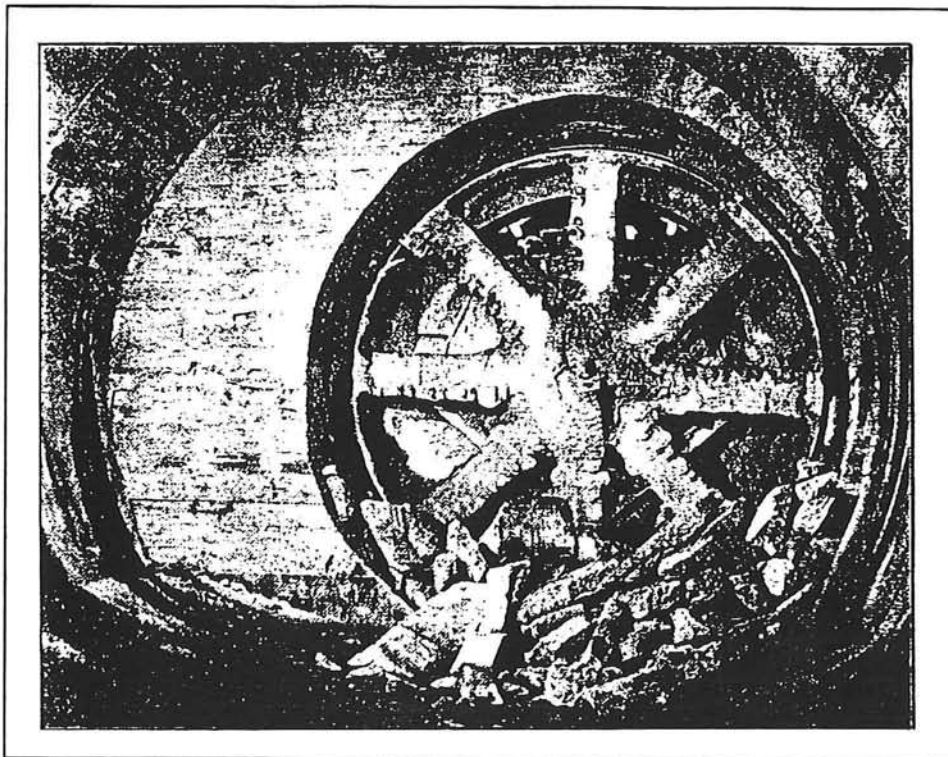
TBM, alswel als landhoofd voor het aansluitende zinkelement.

Nadeel van deze variant is dat deze keerkuip in den droge moet worden gerealiseerd en dat een tijdelijk open te houden bouwkuip verkregen wordt. Dit laatste is overigens niet storend, omdat deze kuip precies in het water van de Westsingelgracht kan worden gebouwd.

Groot voordeel t.o.v. de andere varianten is dat de tijdsrelatie tussen de zinkactiviteit en de booractiviteit volledig ontkoppeld is, hetgeen een kortere bouwtijd en een flexibele bouw oplevert.

Doordat de keerkuip aan de bovenzijde open is, kunnen de diverse benodigde materialen eenvoudig met hijskranen worden aangevoerd.

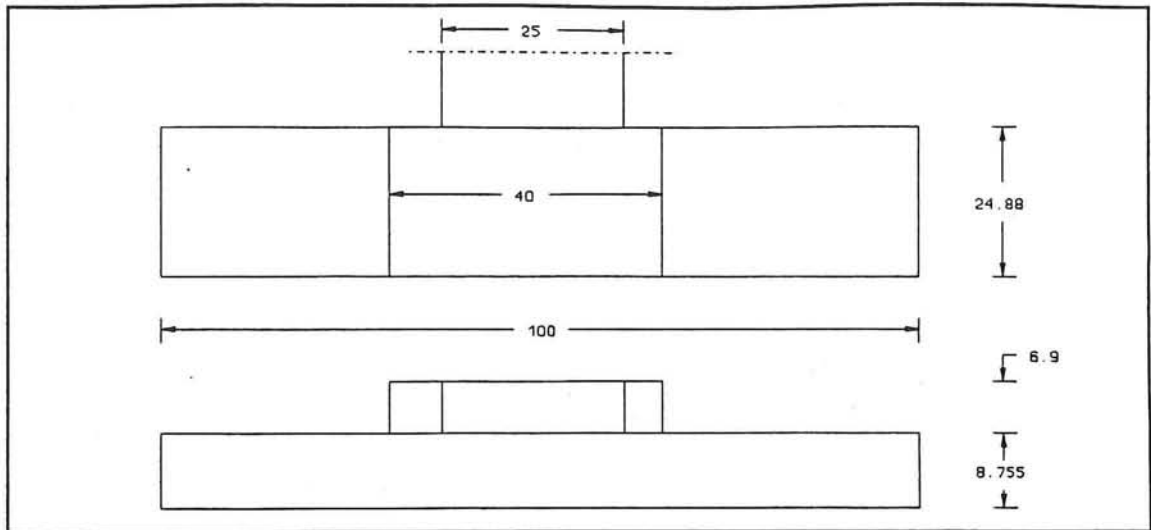
Na afloop van de activiteiten in de keerkuip wordt deze geïntegreerd met het naastliggende zinkelement.



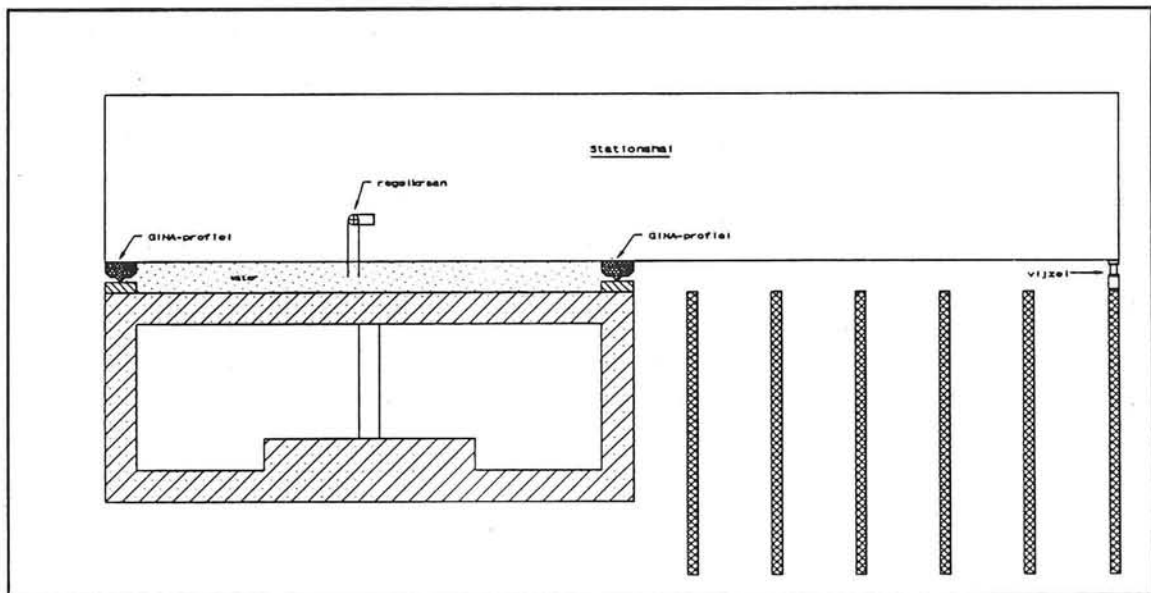
Figuur 7.1 Doorbraak TBM in ontvangstuip/keerkuip.

De afmetingen van de keerkuip worden bepaald door minimum eisen, die worden opgelegd door de grootte van de toegepaste TBM. De TBM zelf moet kunnen worden gedraaid met behulp van een hijsinstallatie. Verder is ruimte benodigd voor het opstellen van de boortrein, die zich achter de TBM bevindt. Voor dubbele boorbuizen met een uitwendige schild-diameter van 8.10 m geldt een keerkuip met de volgende afmetingen:

- lengte : 60 m
- breedte : 33 m [ = 2 x 8.10 m (buis) + 13 m (perron) + 2 x 2 m (zij-marge) ].



Figuur 7.12 Zij- en boven-aanzicht middelste element met opbouw.



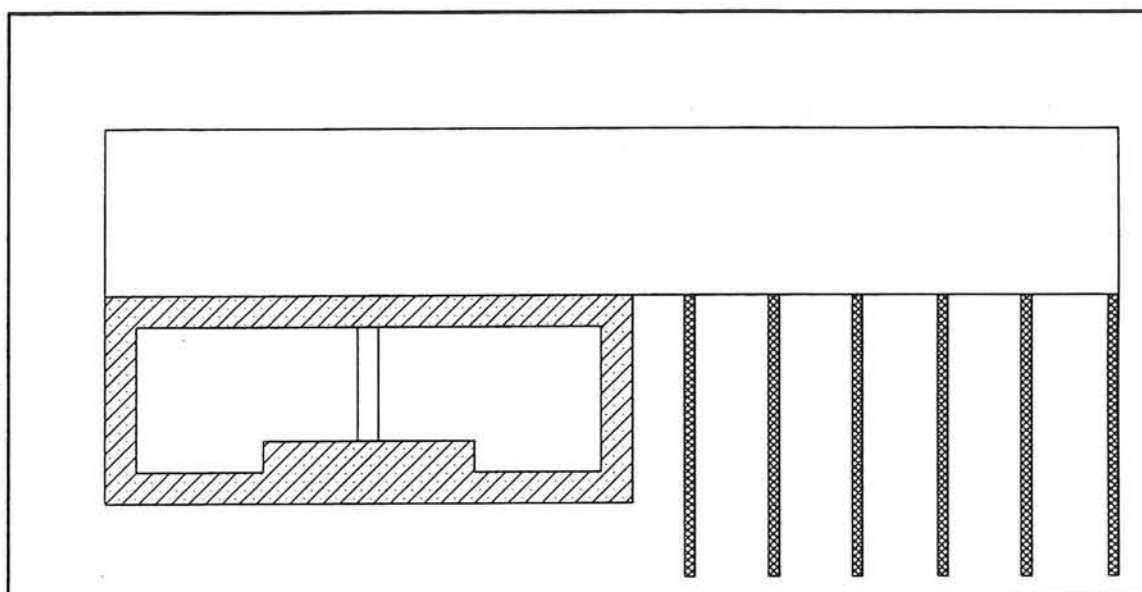
Figuur 7.14 Horizontale aansluiting: uitvoeringsfase.

### 7.5.6 Stationshal.

De stationshal, die dwars op het station zelf moet worden gebouwd, brengt toch wat kleine moeilijkheden met zich mee. De onderzijde van de halconstructie ligt op een diepte van ca. 10 m beneden het maaiveld. De grondslag op deze diepte bestaat voornamelijk uit klei. Daardoor zal voor deze constructie een paalfundering noodzakelijk zijn.

Daar de tunnel zelf op staal is gefundeerd zijn zettingsverschillen te verwachten. Hiermee dient t.a.v. de aansluiting van de hal op het middelste element terdege rekening te worden gehouden. Voor deze aansluiting zijn een aantal varianten mogelijk:

#### ■ Variant 1. Horizontale aansluiting.

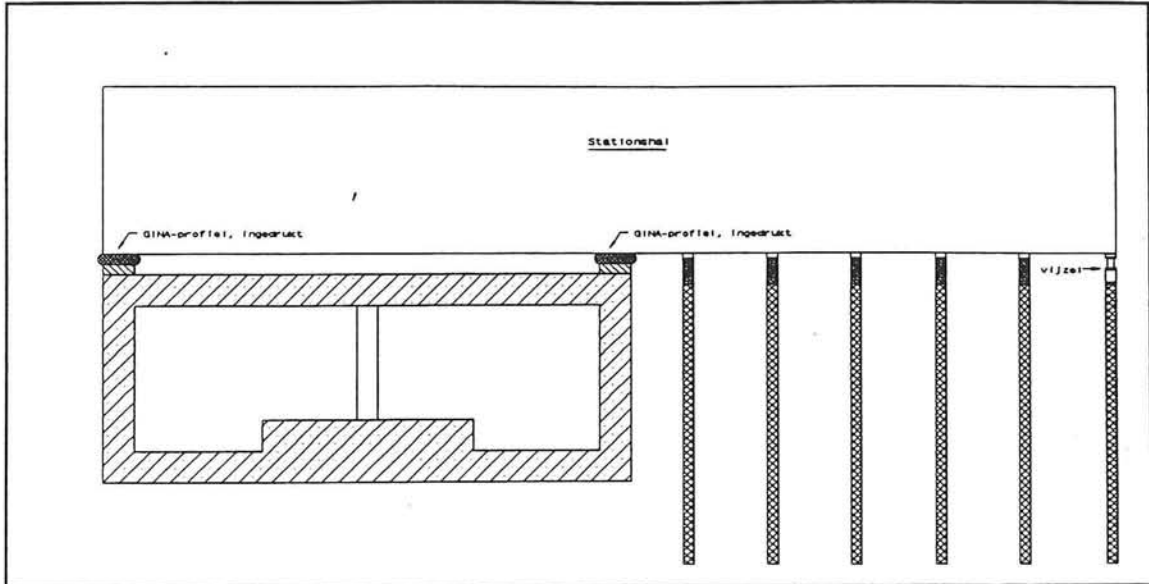


Figuur 7.13 Horizontale aansluiting stationshal op zinkelement.

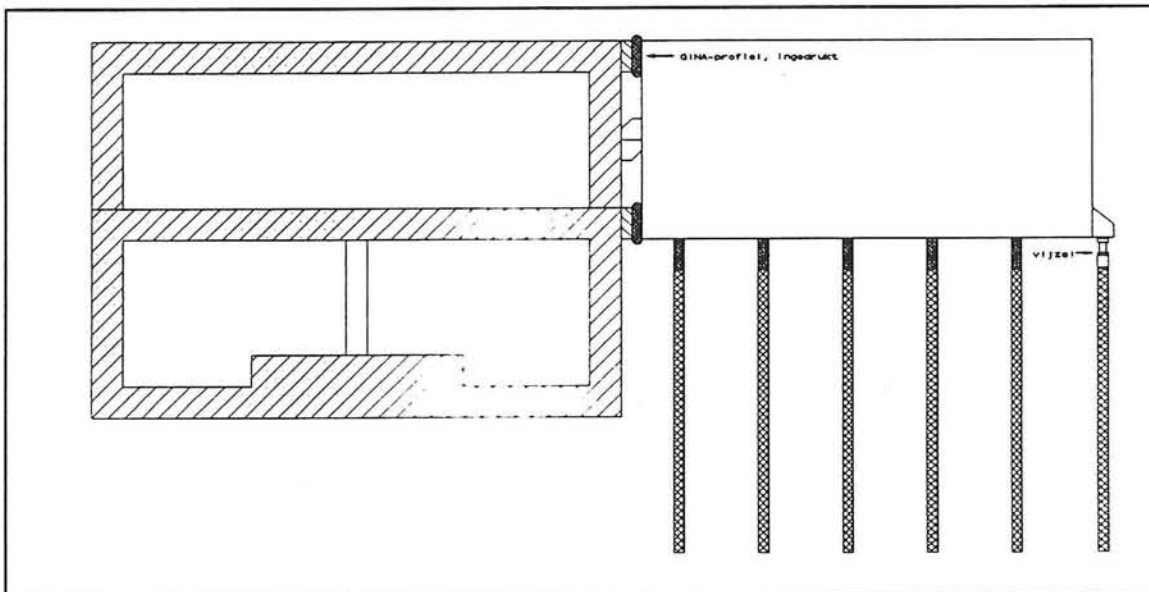
De stationshal wordt als zinkelement in zijn geheel dwars op de tunnel afgezonken, aan één zijde ondersteund door palen (zie figuur 7.13). Ter plaatse van de raakvlakken van beide delen zijn (tijdelijk met kopschotten afgedichte) uitsparingen aangebracht. Rond de uitsparing in de onderzijde van de hal is een GINA-profiel aangebracht. Bij de afzinkoperatie komt de halconstructie in eerste instantie te rusten op dit profiel en aan de andere zijde opgelegd op twee palen met vizels (zie figuur 7.14).

Door vervolgens het water in de ruimte tussen de GINA's af te laten, wordt de hal op de tunnel gedrukt. Maar, om nu de hal rechtstandig te laten zakken is het noodzakelijk dit wateraflaatsysteem elektronisch te koppelen met de vizels. Dit vergt een tamelijk kostbaar regelsysteem (orde 100 á 200 duizend gulden).

Nadat de GINA's zijn ingedrukt, wordt rondom een definitieve voeg gemaakt en worden de



Figuur 7.15 Horizontale aansluiting: eindfase.



Figuur 7.17 Vertikale aansluiting: eindfase.

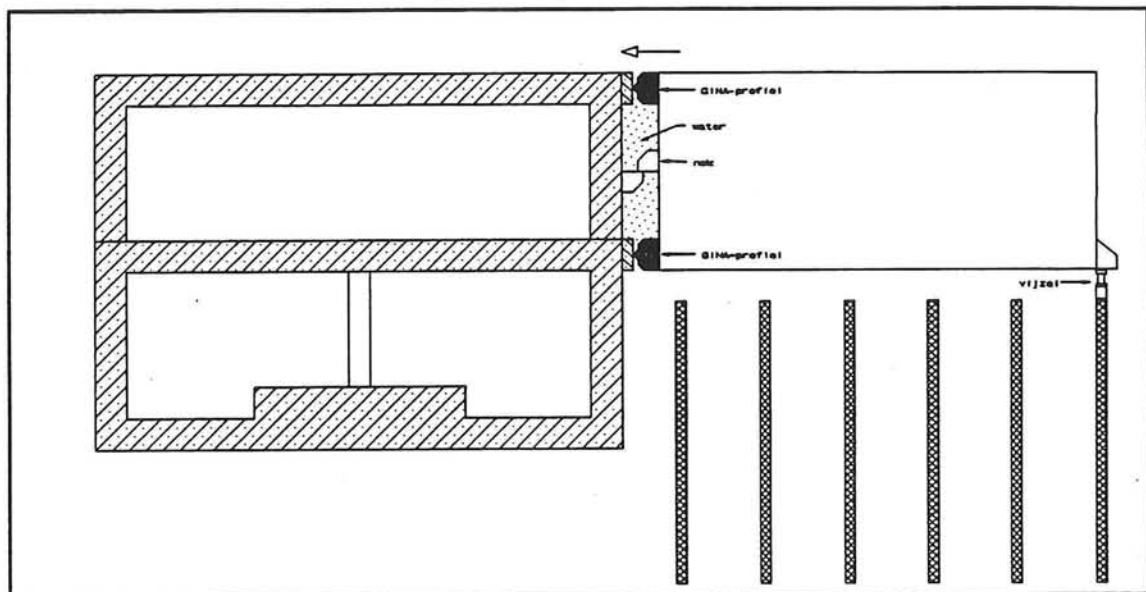


overige palen, m.b.v. met grout oppompbare paalkoppen, met de constructie verbonden. (zie figuur 7.15)

Het probleem dat met deze variant te verwachten is, is het zettingsverschil tussen de hal en de tunnel zelf. Zodra de zinksleuf met grond wordt aangevuld zal er zetting van de tunnel optreden. Door verschil in fundering van de hal en de tunnel zal een zettingsverschil ontstaan. Hierdoor kunnen enorme buigende momenten in het hal-element worden veroorzaakt.

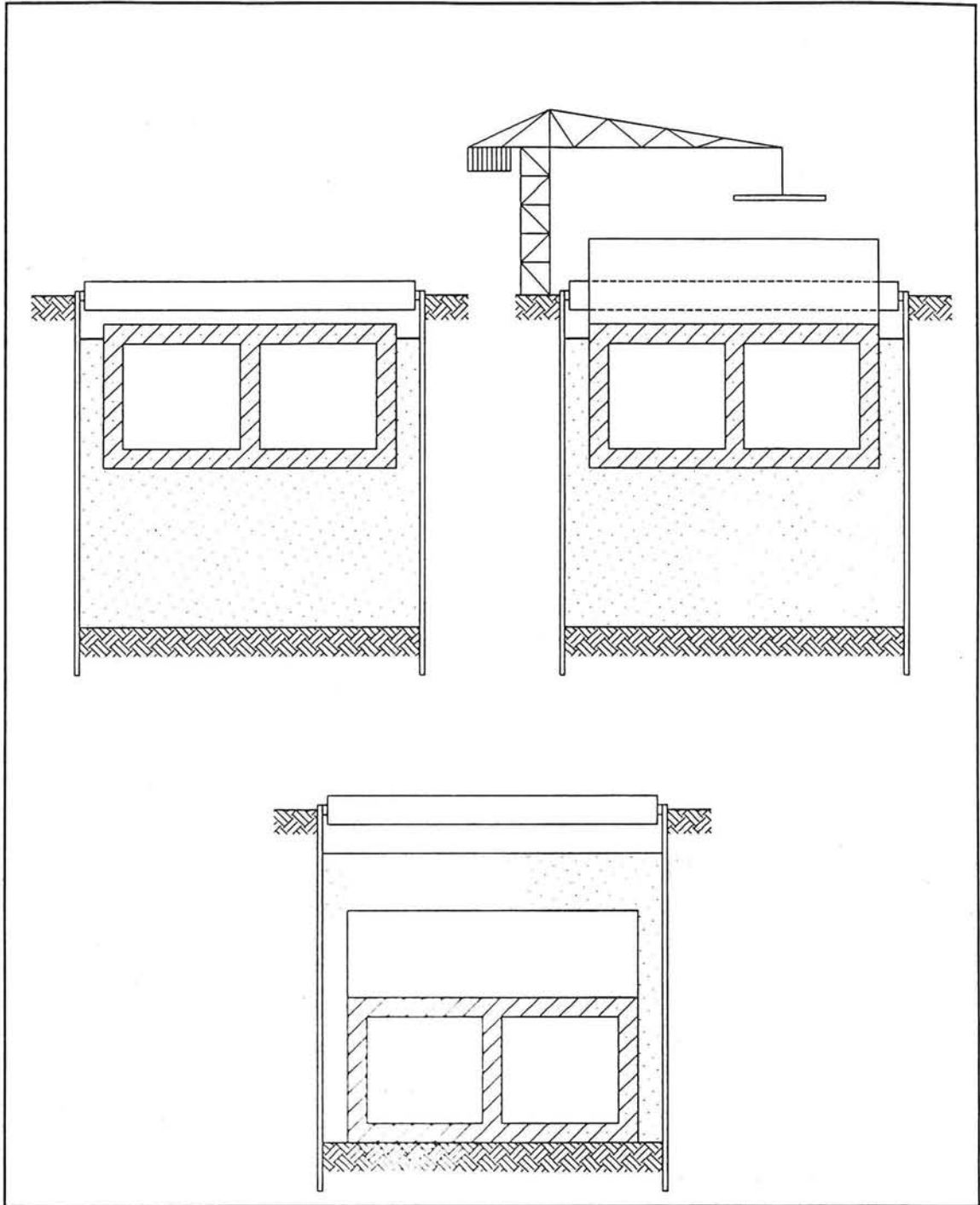
#### ■ Variant 2. Vertikale aansluiting.

Bij deze variant wordt een deel van de hal reeds van tevoren op het element gebouwd. Het resterende haldeel wordt hier later tegenaan afgezonken (zie figuur 7.16).



Figuur 7.16 Vertikale aansluiting: uitvoeringsfase.

Dit haldeel wordt van tevoren op de locatie afgemeerd. Zodra het zinkelement van het stationsdeel is afgezonken, wordt het halgedeelte hier tegenaan afgezonken. Tijdens dit zinkproces rust het halelement aan de ene zijde met een nok op het stationselement en aan de andere zijde op twee palen, voorzien van vijzels. Door het water uit de door de GINA afgesloten ruimte weg te pompen, wordt het hal-element tegen de ander aangedrukt. Door de relatief geringe beschikbare aandrukkracht dient de stijfheid van de GINA minder groot te zijn dan normaliter gebruikelijk is. Na het maken van de definitieve voeg worden de overige palen op het hal-element aangesloten (zie figuur 7.17). Bij het maken van deze voeg wordt de hal m.b.v. een verankering op het element gefixeerd. Dit om te voorkomen dat bij een eventuele waterstandsverlaging de hydrostatische druk en daarmee de spanning in de GINA wegvalt. Groot voordeel van deze variant boven de eerste, is dat de aansluiting vertikaal is. Omdat de zettingsverschillen zich ook in verticale richting zullen manifesteren (althans in dit geval), kunnen zij zonder al te veel problemen door de aansluiting worden opgenomen. Verder kan bij deze variant een kostbaar regelsysteem, als onder variant 1 omschreven, worden



Figuur 7.18 Uitvoeringsfasen variant 3.

bespaard.

Een probleem dat bij deze variant wel te verwachten is, is dat het haldeel bovenop het zinkelement een lastig uitsteeksel is bij de uitvoering. Met name tijdens het invaren moet het element onder de stempeling van de sleufwanden door kunnen. Eventueel is dit op te lossen door in plaats van een stempeling groutankers toe te passen. Maar, aangezien het toepassen van groutankers vele malen duurder is dan het toepassen van een stempeling op de sleufwanden, is dit niet rendabel. Een andere mogelijkheid is, om het element als het ware onder water te laten 'zweven', zodat het haldeel net onder de stempels doorgaat. Een derde mogelijkheid is verwoord in variant 3.

■ **Variant 3. Combinatie verticale aansluiting / haldeel element in situ.**

Variant 3 bestaat uit een combinatie van variant 2 met een in situ gebouwde opbouw op het element. Als eerste wordt de stationshal (als zinkelement uitgevoerd) op z'n plaats gevaren en hier tijdelijk geparkeerd. Vervolgens wordt het middelste element, zonder opbouw, naar z'n plaats gevaren. Hier aangekomen wordt, terwijl het element nog drijft, de opbouw ter plaatse op het element gebouwd. Nadat dit gereed is, wordt het element tegen zijn voorganger afgezonken (zie figuur 7.18). Daarna wordt de tijdelijk geparkeerde hal hier weer tegenaan afgezonken, zoals beschreven onder variant 2. De eindfase is in wezen dezelfde als in figuur 7.17.

De voordelen van de verticale aansluiting van variant 2 worden hier meegenomen. Bovendien kan het middelste zinkelement nu zonder moeite onder de stempeling door varen.

Nadeel is uiteraard wel dat het element op de zinkplaats nog moet worden afgebouwd. De totale extra tijd, benodigd voor het maken van de opbouw op het element, wordt in dit stadium van het ontwerp geschat op ongeveer één maand. Hierover meer in hoofdstuk 10.

■ **Keuze tussen de varianten.**

Binnen de varianten is variant 1 het minst aantrekkelijk vanwege het niet goed kunnen opvangen van ongelijkmatige zettingen van zinkelement en hal.

Variant 2 heeft als voordeel dat de verticale aansluiting de ongelijkmatige zettingen wèl goed kan opvangen en dat de opbouw reeds in het bouwdok op het zinkelement kan worden gebouwd. Nadeel is echter dat deze opbouw bij het invaren grote problemen veroorzaakt.

Variant 3 heeft de voordelen van variant 2 en levert bovendien bij het invaren geen problemen op. Klein nadeel is wel het maken van de opbouw ter plaatse van de afzinklokatie. Maar, hiervoor bestaan goede mogelijkheden om dit snel te kunnen realiseren (ca. 1 maand).

Bovendien is dit waarschijnlijk goedkoper en sneller dan wanneer bijvoorbeeld variant 2 wordt toegepast in combinatie met een verankering van de sleufwanden met groutankers in plaats van



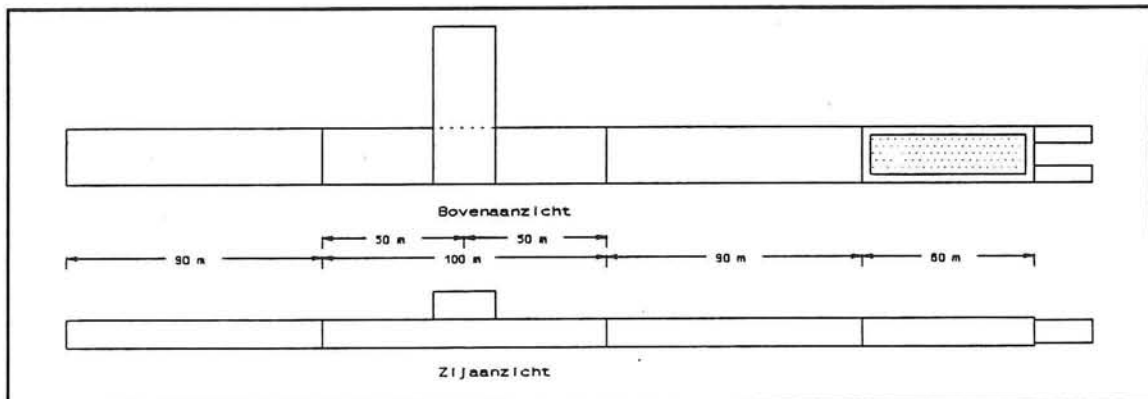
een stempeling.

Concluderend valt variant 1 snel af. De opbouw van variant 2 levert bij het invaren erg grote problemen op. Gekozen is voor variant 3, die het probleem bij het invaren niet kent. Wel dient nader onderzocht te worden hoe de opbouw ter plaatse het beste kan worden gerealiseerd. Dit komt aan de orde in hoofdstuk 10, §10.6.

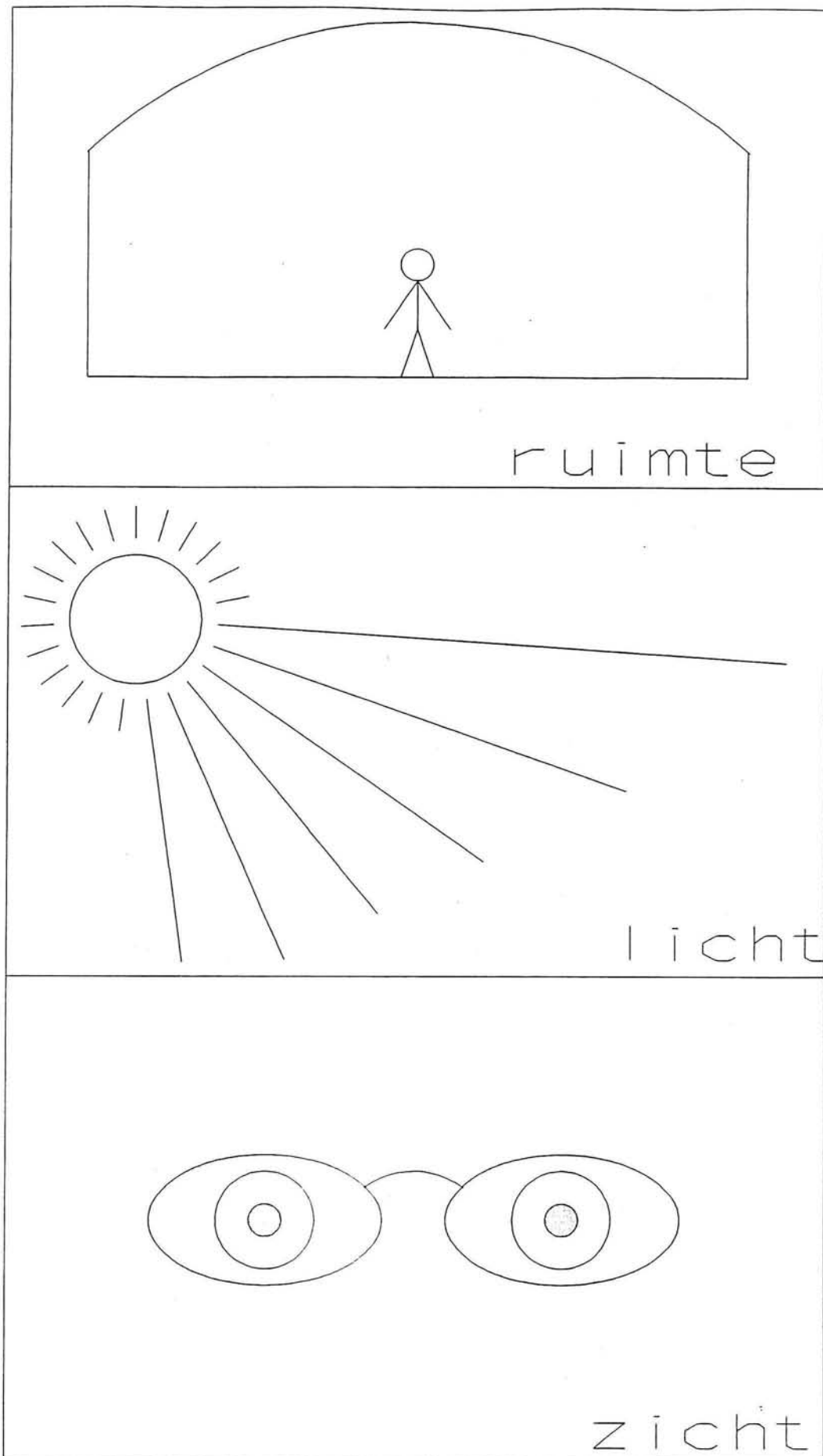
### 7.5.7 Vervolg van het ontwerp.

Alvorens de uitvoeringsmethode verder uit te werken moet eerst een terugkoppeling worden gemaakt naar het ontwerp van het ondergrondse station zelf. De uitwerking van het definitief ontwerp van het ondergrondse station vindt plaats in het volgende hoofdstuk (8). Daarna, in hoofdstuk 9, wordt de constructie berekend. In hoofdstuk 10 wordt de uitvoering gedetailleerd uitgewerkt.

De uitvoeringstechnische geometrie van het ondergrondse station is in ieder geval vastgesteld, zoals te zien is in figuur 7.19.



Figuur 7.19 Uitvoeringstechnische geometrie; boven- en zijaanzicht.



Figuur 8.1 Ruimte, licht en zicht.

## 8. Definitief ontwerp ondergronds station.

### 8.1 Inleiding.

Het veraangenamen van het verblijf in een stationsgebouw wordt vaak vertaald in een drietal aspecten, namelijk: *ruimte*, *licht* en *zicht* (zie figuur 8.1). Een ruim opgezet station voorkomt een benauwd gevoel, terwijl de aanwezigheid van licht en zicht een groot gevoel van veiligheid geeft. Ruimte, licht en zicht zijn tegenwoordig belangrijke begrippen geworden daar waar het openbare voorzieningen betreft. Sterker geldt dit nog voor ondergrondse ruimten. Gebleken is dat steeds meer mensen zich minder graag onder de grond begeven. Het is dus belangrijk in het ondergronds station een zo behaaglijk mogelijk klimaat te scheppen voor iedereen.

Bij een bovengronds station zijn de aspecten ruimte, licht en zicht vrij eenvoudig in het ontwerp aan te brengen. Vooral bij het verlichtings-aspect kan dankbaar gebruik worden gemaakt van daglichttoetreding, door middel van het toepassen van bijvoorbeeld transparante wanden en glazen koepels.

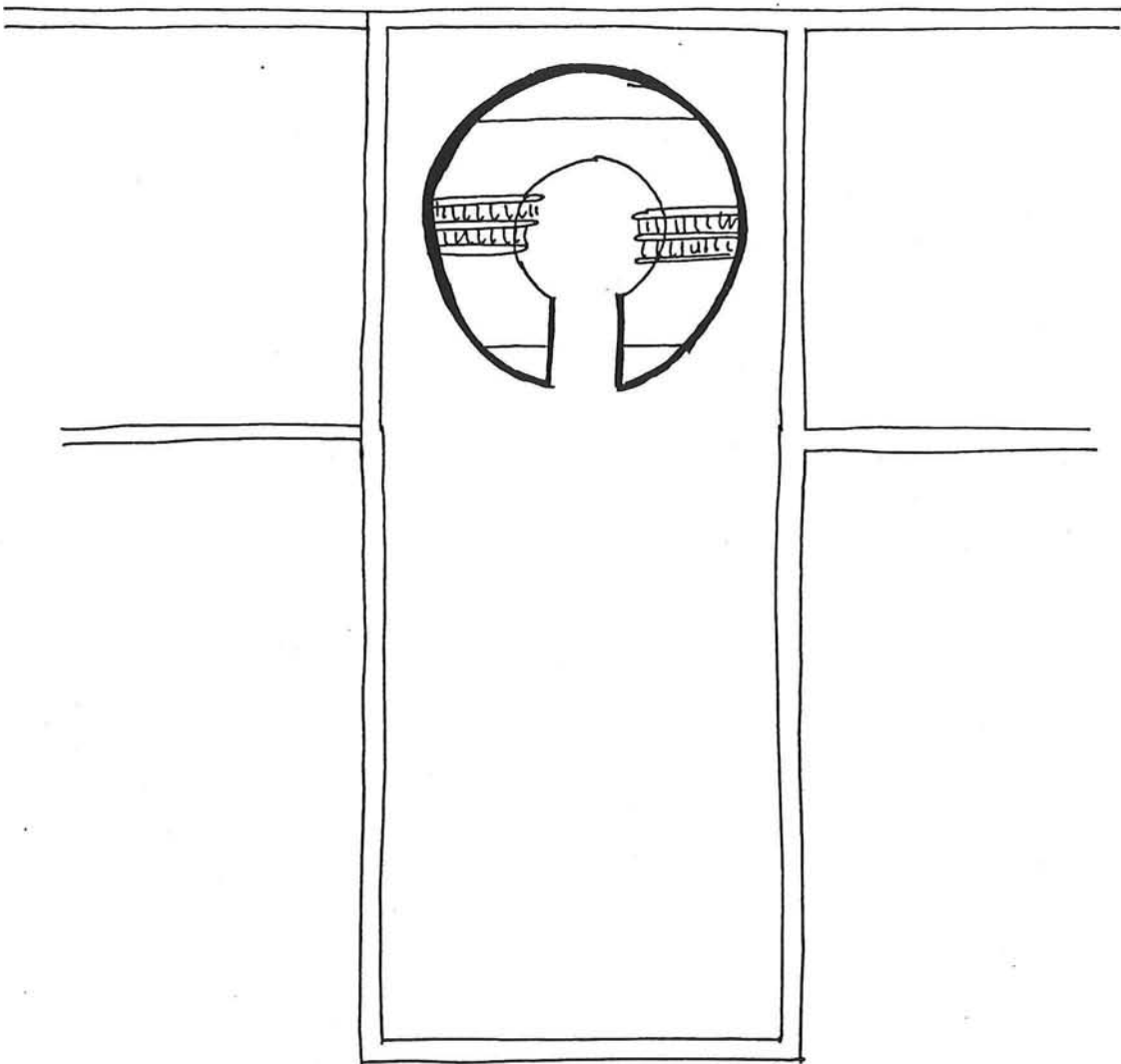
Een mooi voorbeeld hiervan is het ontwerp voor het nieuwe station van Leiden. Door de stalen kapconstructie met glas valt overdag veel licht naar binnen, waardoor de reiziger zich er behaaglijk en veilig zal voelen.

Bij een ondergronds station daarentegen, zijn de aspecten ruimte, licht en zicht veel minder gemakkelijk in het ontwerp aan te brengen. We zitten immers onder de grond, dus daglichttoetreding zal van boven moeten komen. Vaak echter, wil men de ruimte op het maaiveld -boven het station- weer benutten, zodat daglichttoetreding in het ondergrondse station zeer moeilijk wordt.

Daar komt bovendien bij dat men door de grote benodigde sterkte van de constructie (grond-drukken e.d.) vaak genoodzaakt is om onelegante en soms zelfs lompe constructie-onderdelen toe te passen. Dit doet natuurlijk weer afbreuk aan de aantrekkelijkheid van het ondergronds verblijf en aan de sociale veiligheid van de reizigers. (Bijvoorbeeld enorme dikke kolommen waar gemakkelijk iemand achter kan staan en die het zicht belemmeren.)

#### ■ **Ontwerpfilosofie station Delft.**

De primaire gedachte bij het ruimtelijk ontwerp van het ondergronds station in Delft is het creëren van een ruimtelijk, overzichtelijk en veilig station. Ondanks het feit dat het station zich onder de grond bevindt, moeten de reizigers zich er prettig en behaaglijk voelen. Helemaal mooi is het, wanneer de reizigers zich met plezier in het station begeven. Dit laatste is te verwezenlijken door het station iets speciaals te geven, iets ongewoons.



Schets 8.3



## 8.2 Ruimtelijk ontwerp.

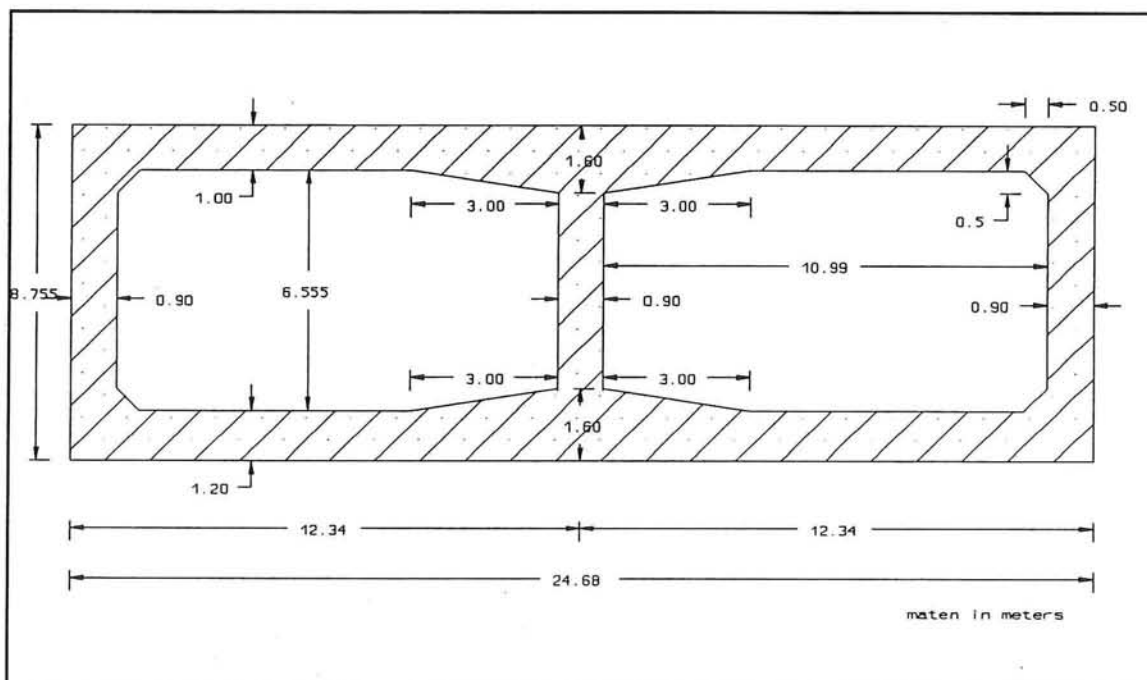
### 8.2.1 Overall layout station.

De overall layout van het station is gelijk gebleven, zoals deze was aangenomen in hoofdstuk 5 (zie figuur 8.2 *Het doosmodel*). Dit was mogelijk, omdat de gekozen uitvoeringsmethode goed op de overall layout aansloot. Ook de inwendige benodigde ruimte is in hoofdstuk 5 reeds vastgesteld (zie figuur 8.3 en 5.9 + 5.10).

Wat wel veranderd is, zijn de dak-, wand- en vloerdikten van de zinkelementen. Deze zijn vastgesteld op:

- vloerdikte  $d_1 = 1.2$  m
- dakdikte  $d_2 = 1.0$  m
- wanddikte  $d_3 = 0.9$  m

De nieuwe doorsnede ziet er dan uit als in figuur 8.4.



Figuur 8.4 Definitief vastgestelde doorsnede.

De dimensionering en berekening van de vloer, het dak en de wanden van de constructie is te vinden in hoofdstuk 9.



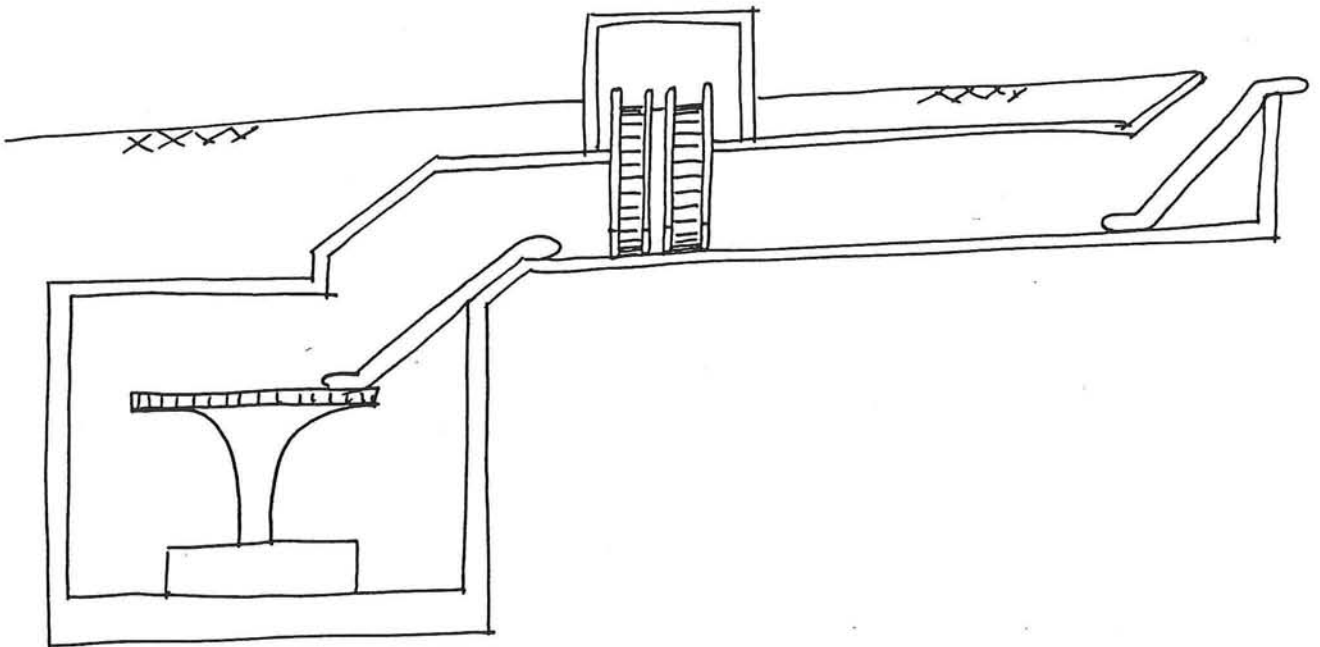
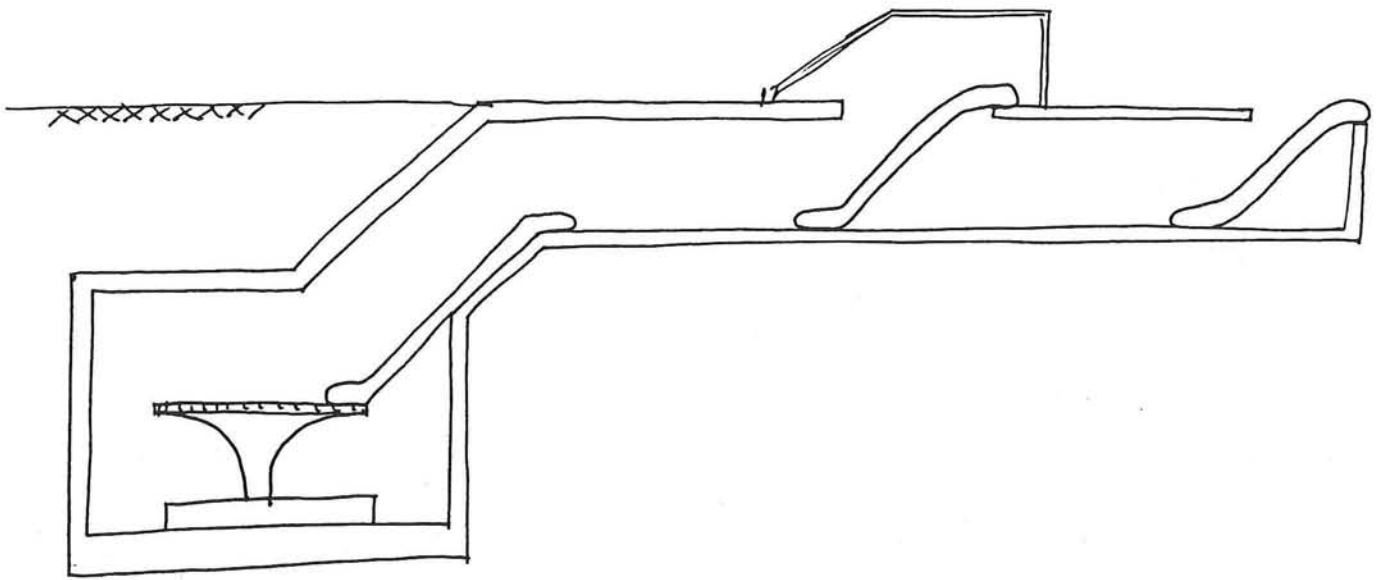
### **8.2.2 Ontwerpvarianten.**

Nu de overall-layout van het station en de uitvoeringsmethode zijn bepaald, kunnen ten aanzien van het stationsontwerp diverse schetsontwerpen worden gemaakt. Vooral de verbinding tussen de stationshal en het maaiveld en de verbinding tussen de stationshal en het perrondeel kunnen op diverse wijzen worden vormgegeven.

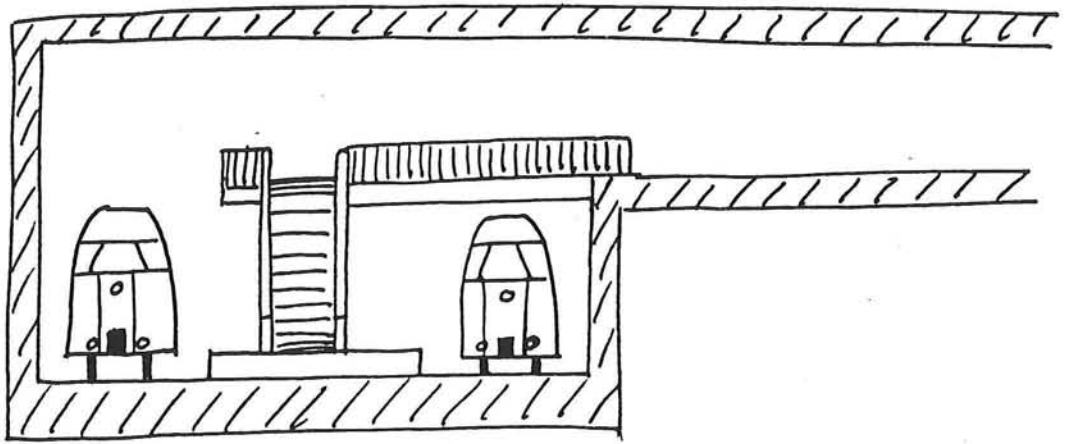
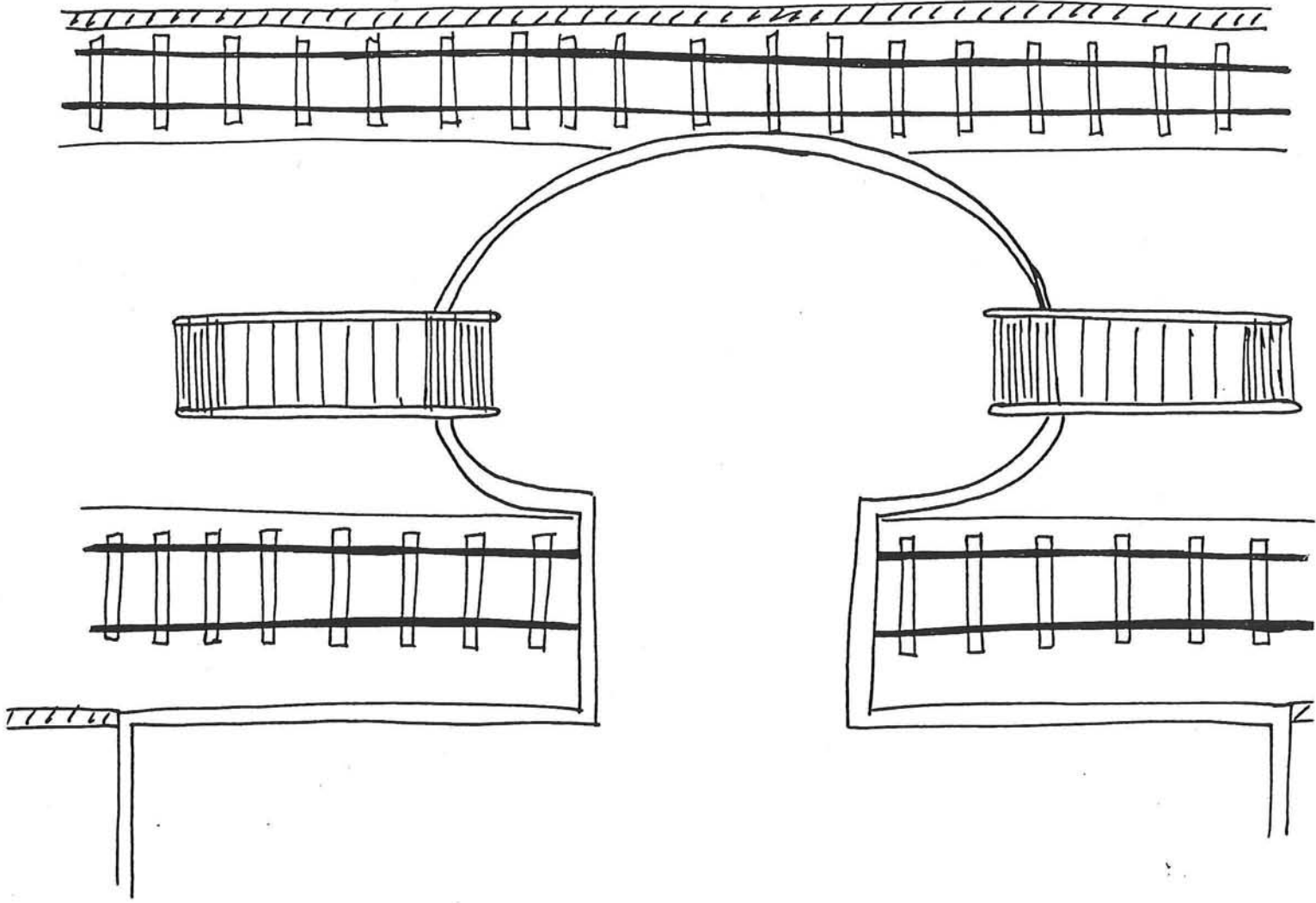
Bij het maken van de schetsen is vanzelfsprekend sterk vastgehouden aan de voornoemde ontwerpfilosofie: *ruimte, licht en zicht*.

Op de hiernavolgende pagina's zijn enkele schetsen weergegeven van mogelijke ontwerpen.



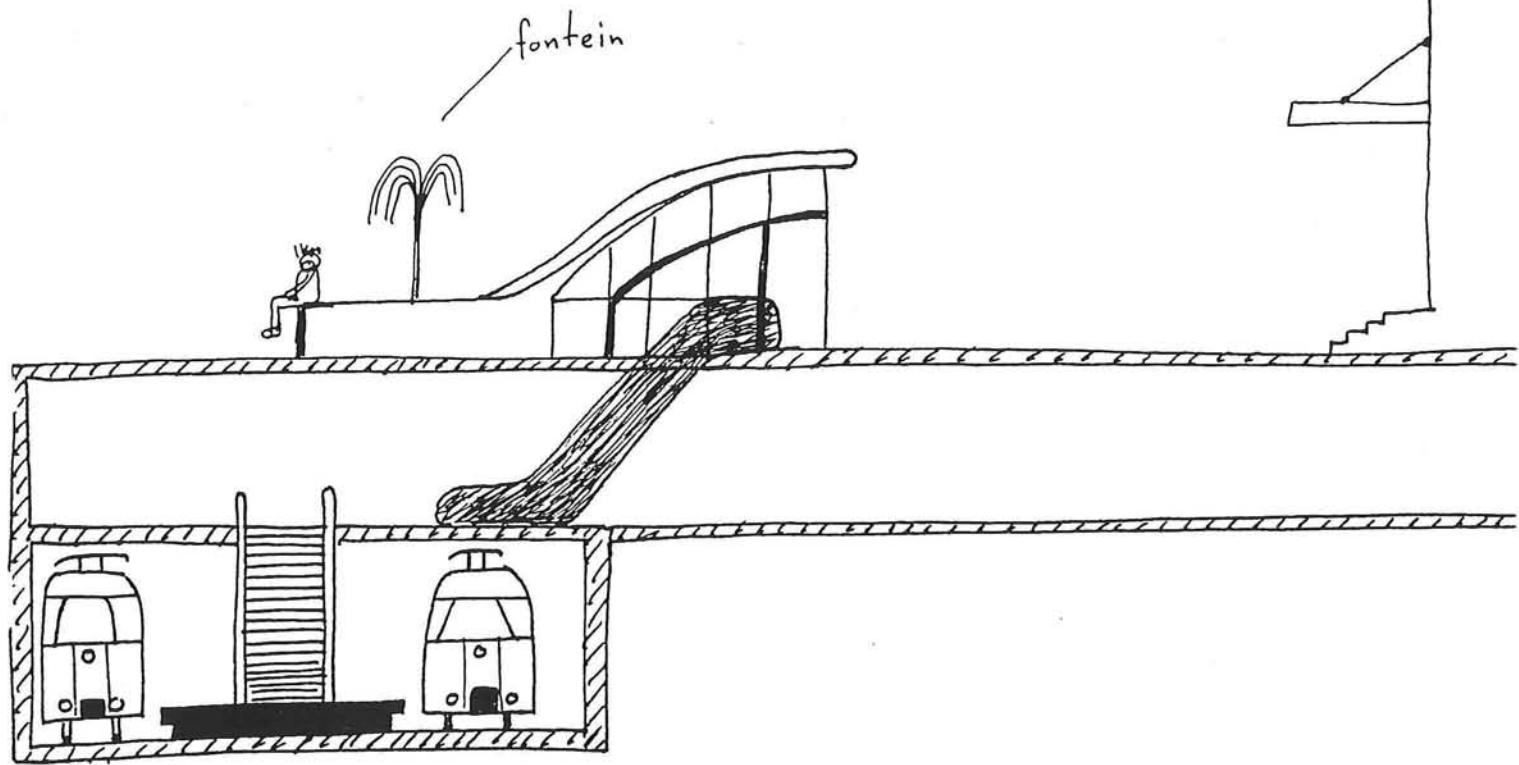


Schets 8.2

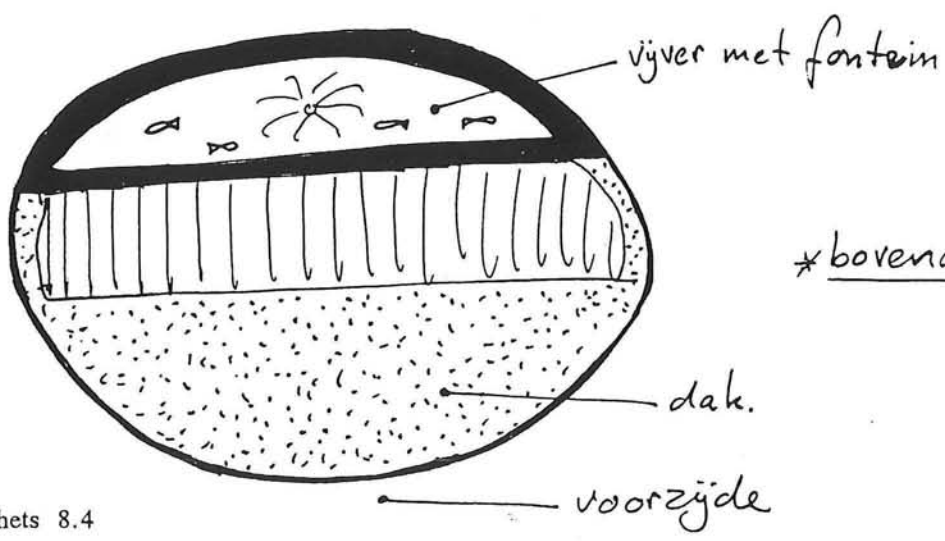
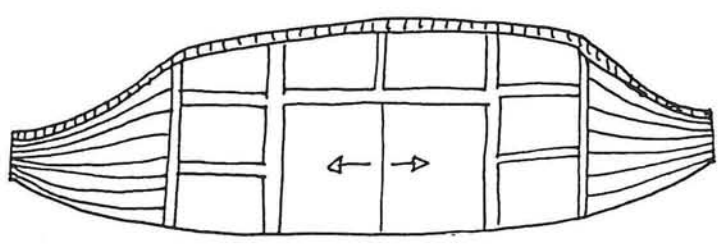


Schets 8.5

1000

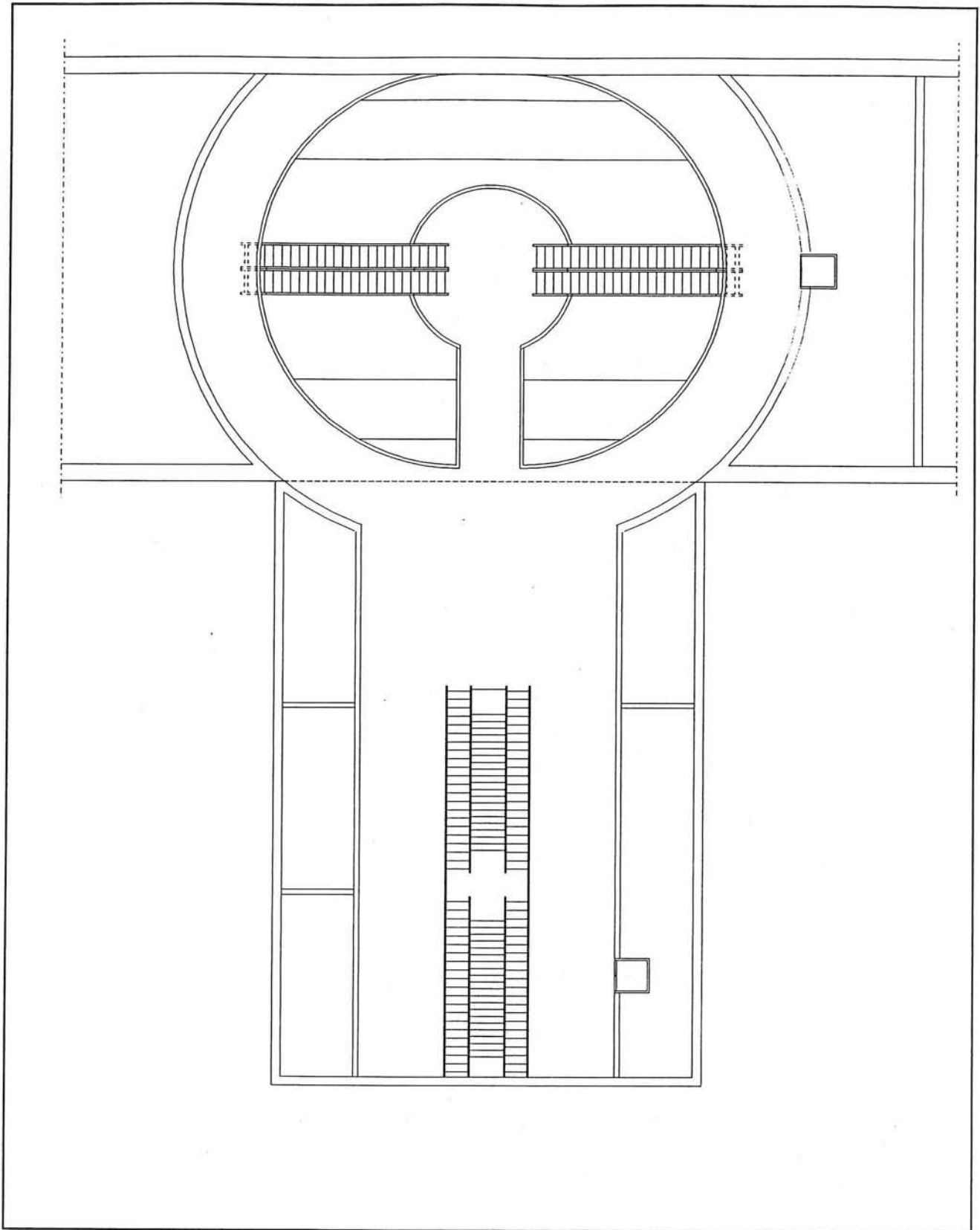


\* Vooraanzicht ingang op m.v.



\* bovenaanzicht

Schets 8.4



Figuur 8.5 Bovenanzicht ontwerp.

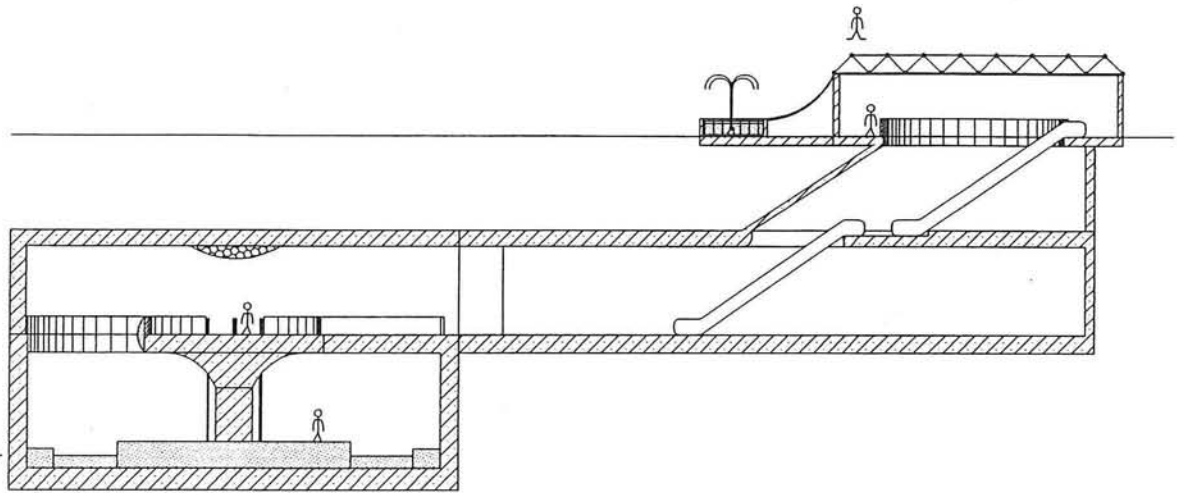
100



### **8.2.3 Definitief gekozen ontwerp.**

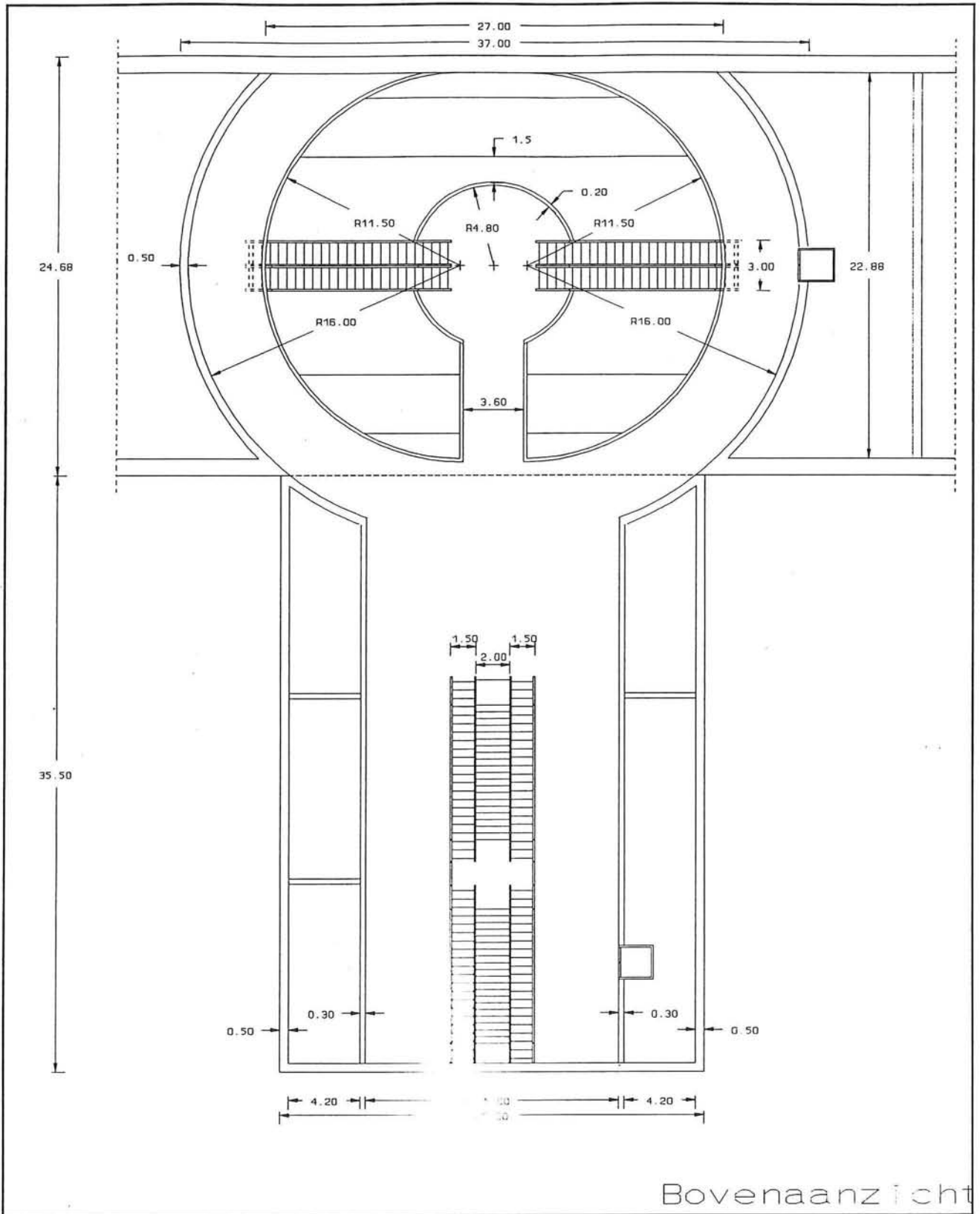
Na de diverse schetsen en ideeën nader geanalyseerd te hebben, is gekozen voor het ontwerp dat is weergegeven op de hiernavolgende 6 bladzijden. In §8.3 volgt een toelichting op dit ontwerp.

# Ondergronds station Delft

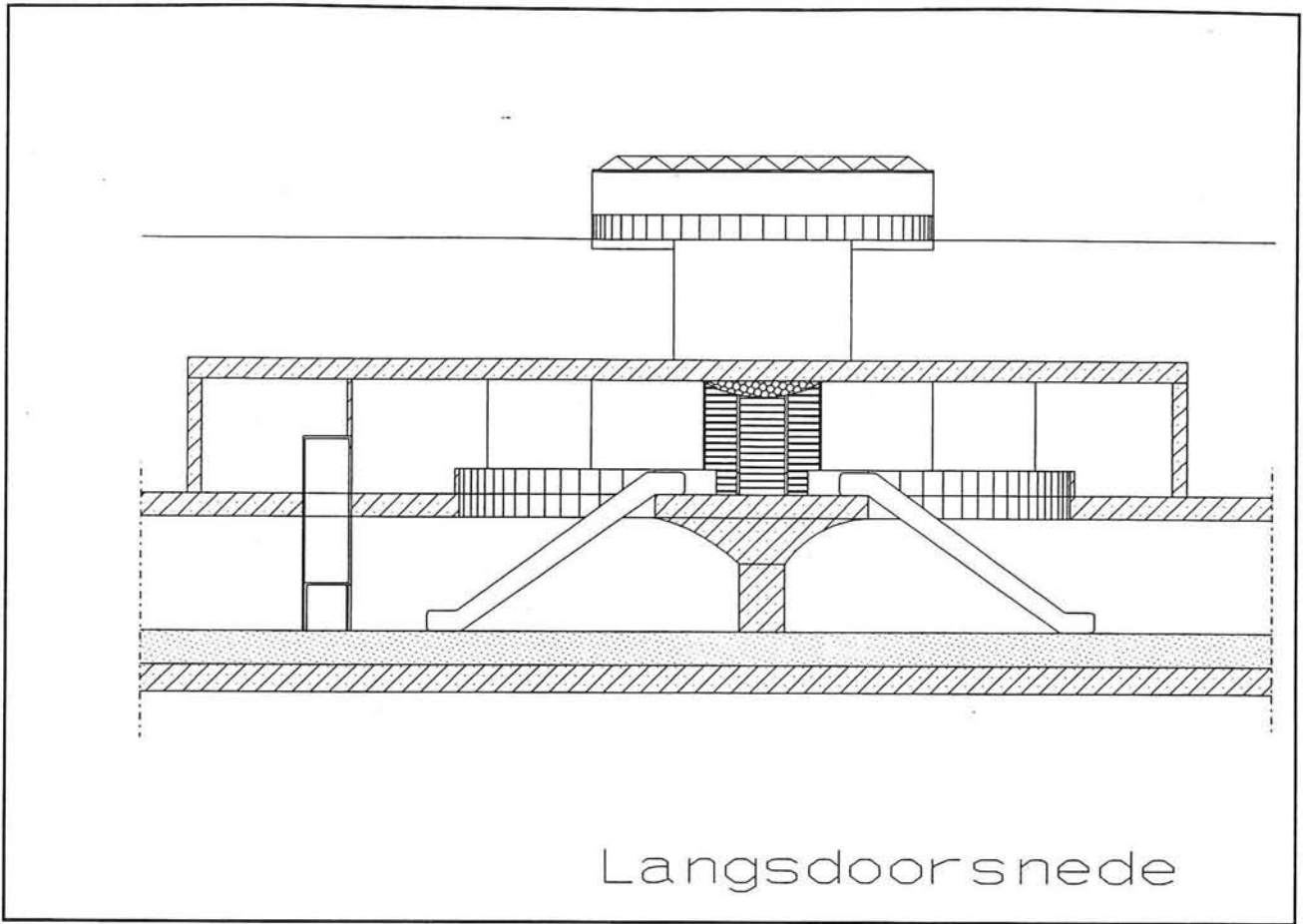


Doorsnede A-A

Figuur 8.7 Doorsnede A-A.

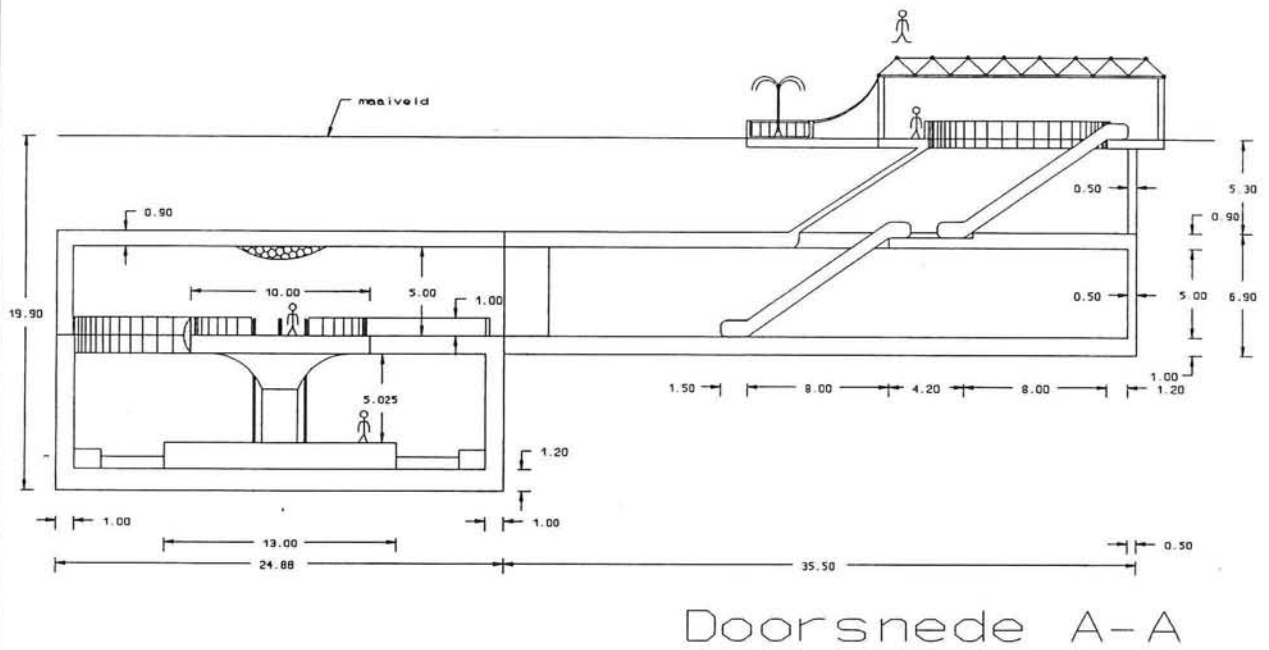


Figuur 8.6 Bovenaanzicht met bemating.



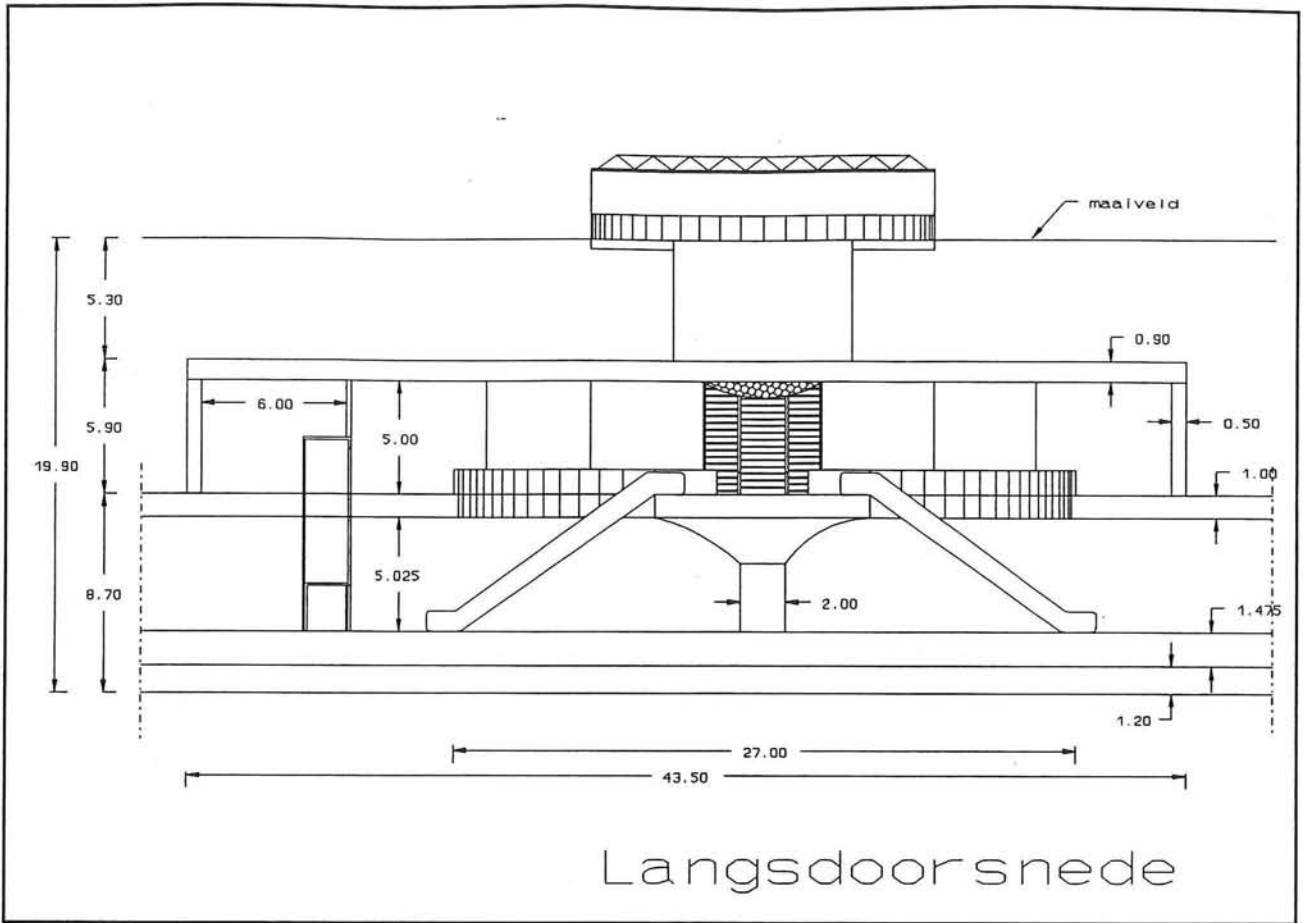
Figuur 8.9 Langsdoorsnede.

# Ondergronds station Delft



Figuur 8.8 Doorsnede A-A met bemating.





Figuur 8.10 Langsdoorsnede met maatvoering.





### **8.3 Toelichting op het gekozen ontwerp.**

#### **8.3.1 Stationshal.**

Gekozen is voor een ontwerp, waarbij de reizigers in twee stappen, via een stationshal, van het maaiveld naar de perrons worden gevoerd. Deze stationshal staat haaks op het station zelf, in de richting van het huidige station van Delft (☞ figuur 8.7). Omdat het nieuwe stationstracé op enige afstand ten oosten van het huidige station ligt, is het voordeel van deze oplossing dat de lengte van het verbindingstunneltje van het ondergrondse station met het huidige station minimaal wordt gehouden. Dit is vanuit het oogpunt van sociale veiligheid veel beter.

De stationshal krijgt een breedte van 15 meter. Deze relatief grote breedte moet een groot ruimtelijk effect creëren. Aan weerszijden van deze hal worden ruimten aangebracht met een inwendige breedte van 4.20 meter. De totale (uitwendige) breedte van het hal-element komt, de dikten van de wanden erbij inbegrepen, op 25 meter (☞ figuur 8.6).

Het dak van de hal wordt uitgevoerd in een kolomvrije overspanning van 15 meter. In de ruimten aan weerszijden van de hal worden de diverse benodigde dienstruimten ondergebracht, zoals kaartverkooploketten, personeelsruimten en installatieruimten voor elektriciteit, beveiliging en ventilatie.

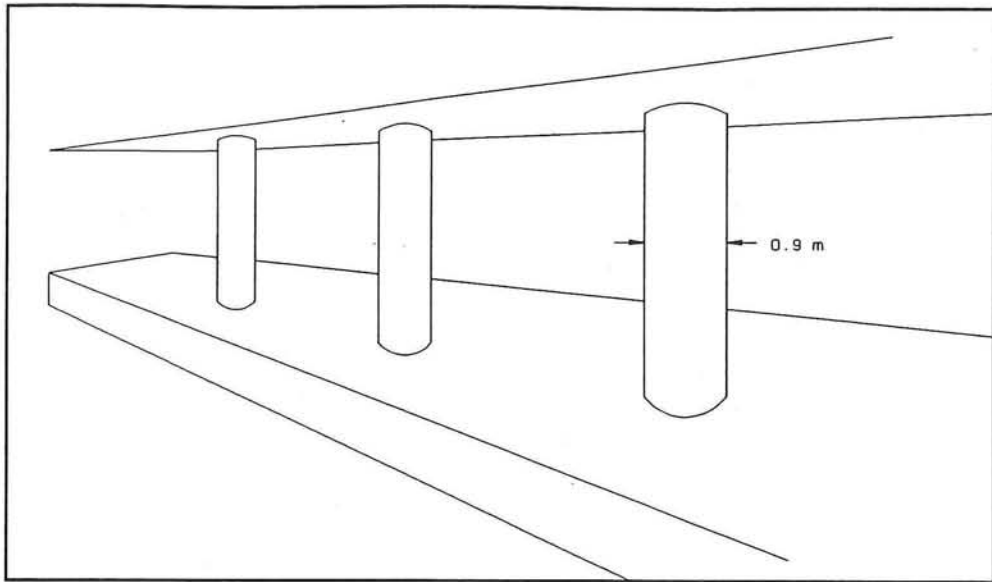
#### **8.3.2 Roltrappen en toegangen.**

Het laagste niveau van het station, het perron, ligt op een diepte van gemiddeld 18 m beneden het maaiveld. Het afdalen in het station betekent dus het overbruggen van een aanzienlijk hoogteverschil. Dit grote hoogteverschil is één van de redenen waarom gekozen is voor het ontwerp met twee niveaus. Dit grote hoogteverschil is ook de reden dat in het station roltrappen worden toegepast i.p.v. vaste trappen. Behalve bij de maaiveld-ingang. Hier wordt ook een vaste trap geplaatst.

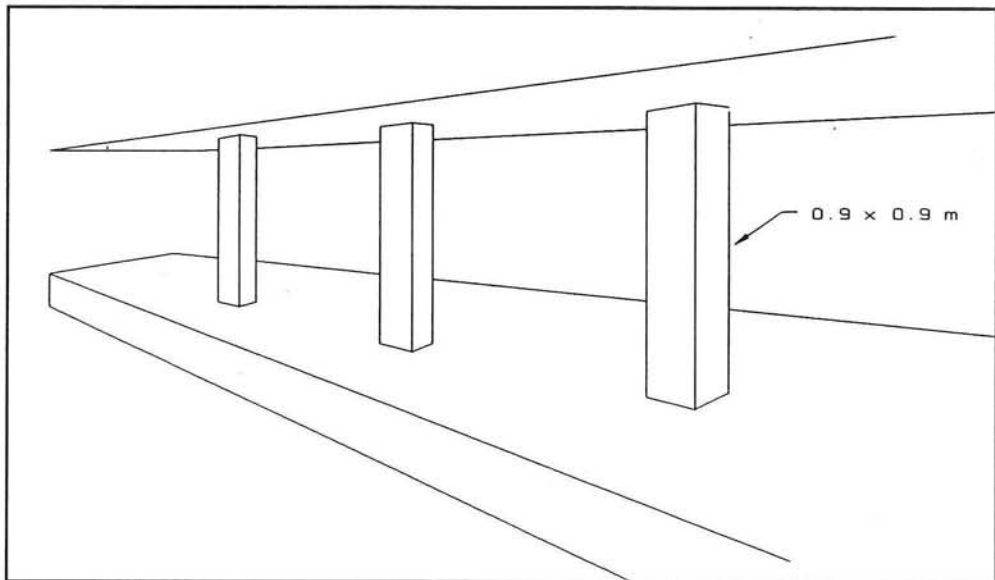
Roltrappen verschaffen de reizigers een groter comfort en gemak. Bovendien levert een roltrap een grotere capaciteit dan een vaste trap. Daar komt bij dat met een roltrap duidelijk de richting is aan te geven waarop deze gebruikt moet worden. Bij vaste trappen hebben veel mensen de neiging om de met borden aangegeven richting nogal eens te negeren, waardoor, vooral in de spits, enorme opstoppingen in de reizigersstromen kunnen ontstaan. Het toepassen van roltrappen verschaft als het ware een instrument om de reizigersstromen in goede banen te leiden, zodat conflicten tussen ingaande en uitgaande stromen van mensen kunnen worden voorkomen.

Eén stel roltrappen verbindt de stationshal met het stationsplein. Een tweede stel verbindt de stationshal met het huidige stationsgebouw. Vanuit de stationshal gaan roltrappen richting het perron.

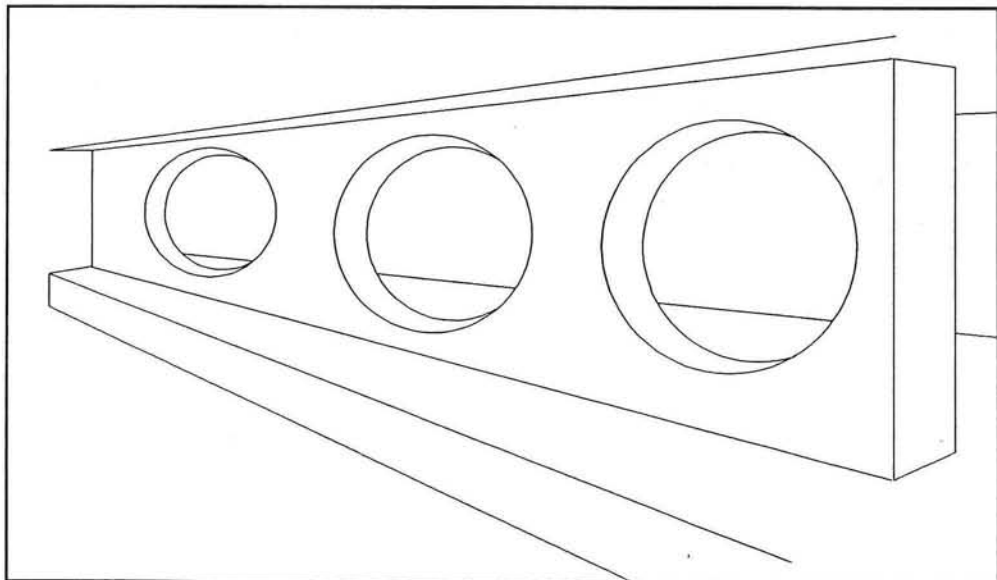
Verder wordt een tweetal liften aangebracht voor minder valide personen. De eerste lift brengt de reiziger vanaf het maaiveld-niveau één verdieping lager naar de stationshal. Vervolgens



Figuur 8.11 Ronde betonnen kolommen.



Figuur 8.12 Vierkante betonnen kolommen.



Figuur 8.13 Betonnen wand met ronde openingen.

moet een kleine afstand worden afgelegd naar de tweede lift, die zich direct boven het perron bevindt. De reden voor deze tweetraps-afdaling is dat het perron midden onder de bushaltes ligt. Was van een rechtlijnige verticale liftbeweging uitgegaan, dan zou dit tot gevolg hebben gehad dat de toegang tot de lift midden tussen de bushaltes terecht zou komen (vaak is dit dan een klein, vies en eng gebouwtje vol met graffiti). Door de tweetraps-afdaling kan de lifttoegang op maaiveld in het algemene toegangsgebouw (☞ §8.3.3) worden gesitueerd.

De opening in de vloer van de stationshal, boven het perron, kan in principe minimaal worden gehouden voor het plaatsen van alleen de roltrappen. Maar uit architectonische overwegingen en uit oogpunt van veiligheid kan men ook besluiten deze opening wat groter of zelfs veel groter te maken.

In het uiteindelijke ontwerp is gekozen voor de *paddestoel*. In de vloer van de stationshal boven het perron wordt een grote ovale opening ( $R_x = 13.5 \text{ m}$ ,  $R_y = 11.5 \text{ m}$ ) uitgespaard. In het midden van deze opening wordt een eilandje geplaatst, dat steunt op een kolom in het midden van het perron. Dit geheel vormt dan een soort paddestoel. De paddestoel is weer verbonden met de stationshal (☞ figuur 8.5 e.v.).

Vanaf de paddestoel gaan roltrappen naar het perron; een op- en neergaande roltrap aan weerszijden van de paddestoel.

Rondom de opening in de halvloer wordt een balustrade geplaatst. Het is voor de reizigers dus mogelijk om vanuit de hal reeds een blik te werpen op het perron en de treinen. De reizigers weten zo dus al van tevoren wat hen beneden aan de roltrap te wachten staat. Op deze manier wordt getracht een gevoel van ruimte en veiligheid te creëren, en de interesse en nieuwsgierigheid van de reizigers te wekken.

### 8.3.3 Toegang vanaf maaiveld: *de entree*.

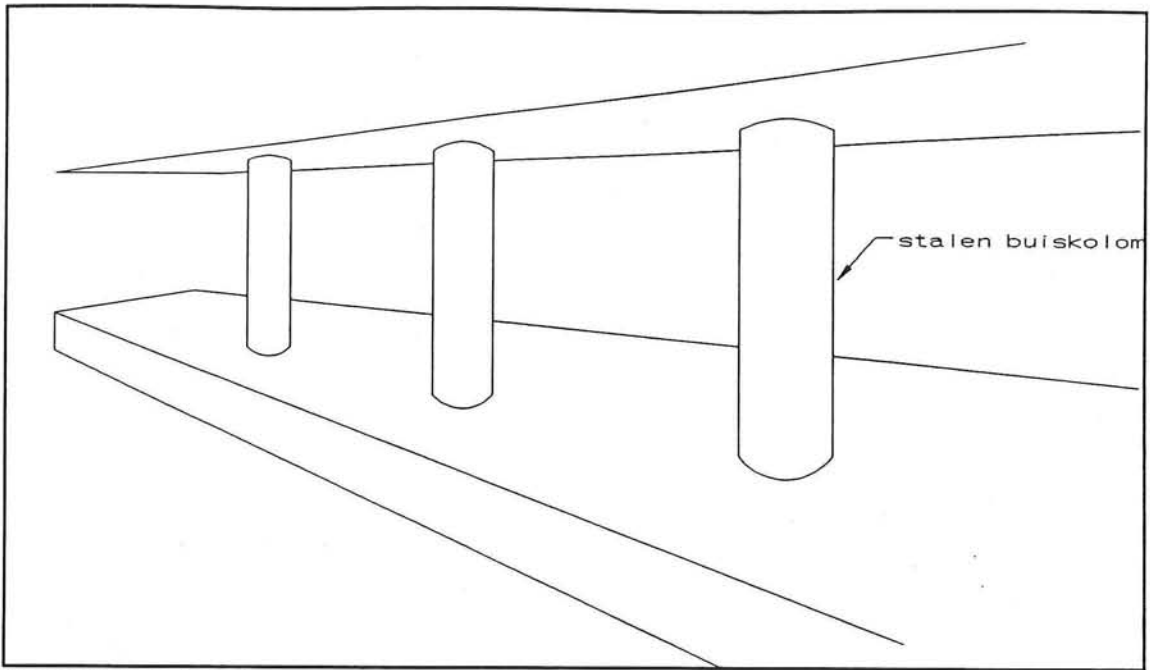
Het is belangrijk om de toegang vanaf het maaiveld, het stationsplein dus, voor de reizigers gemakkelijk en aantrekkelijk te maken <sup>1</sup>. Op die manier worden de mensen aangemoedigd om gebruik te maken van de ondergrondse spoorweg. De toegang moet ook een vorm van veiligheid en degelijkheid uitstralen, zodat een gevoel van vertrouwen en veiligheid wordt gewekt.

Om deze reden is gekozen om de toegang te combineren met de personeelsruimte van het busvervoerbedrijf. Deze ruimte heeft thans gestalte middels een klein houten gebouwtje op het stationsplein.

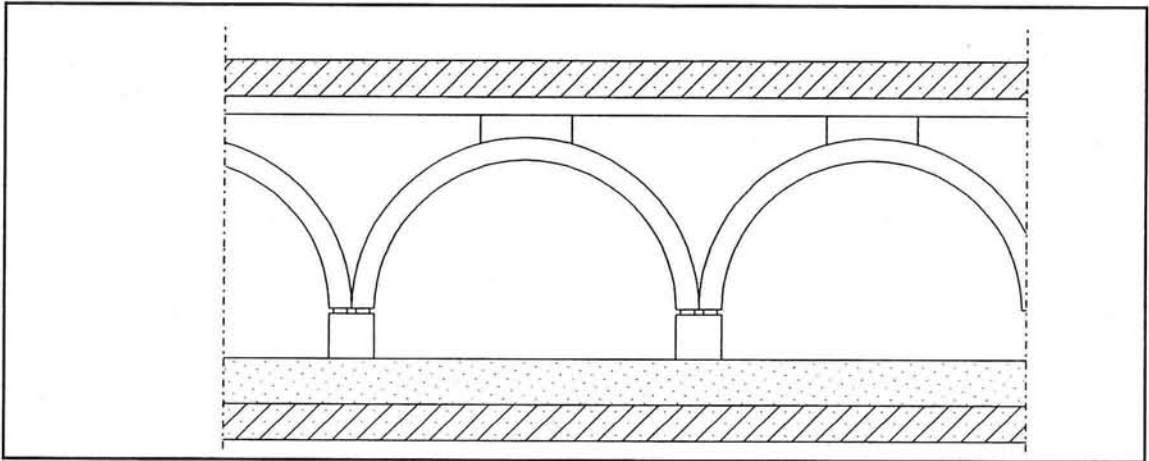
Door nu de toegangsfunctie van het ondergrondse station te combineren met voornoemde personeelsruimte krijgt het busvervoerbedrijf een mooi onderkomen enerzijds, en kan anderzijds de stationstoegang worden overdekt. Ook het loket van het busvervoerbedrijf kan in dit

---

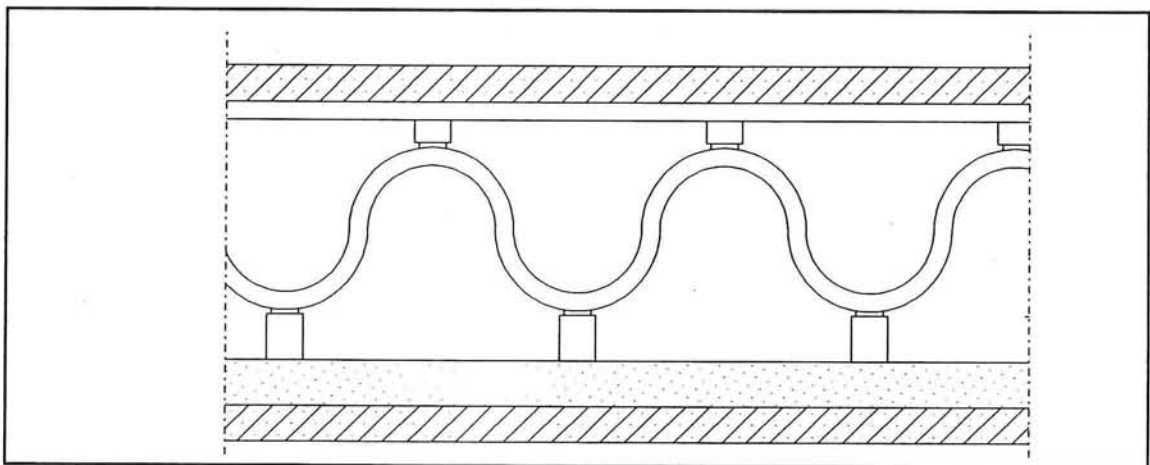
<sup>1</sup> Een mooi voorbeeld hiervan is de ingang van het nieuwe station Blaak te Rotterdam.



Figuur 8.15 Stalen buiskolommen.



Figuur 8.16 Stalen boogvorm.



Figuur 8.17 Stalen golfvorm.

gebouwtje worden ondergebracht. Het geheel wordt met een afschuining aan de achterzijde uitgevoerd, waarop een waterval met aansluitend een vijver wordt aangebracht. In figuur 8.7 wordt o.a. een doorsnede over deze entree weergegeven.

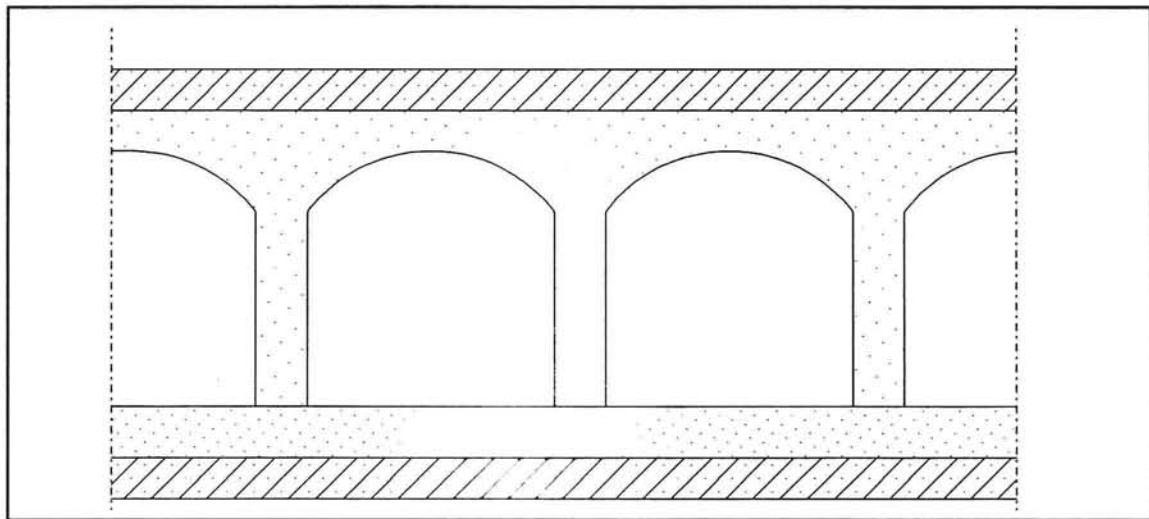
Binnenin de entree bevindt zich in de vloer een ronde opening met een straal  $R = 5.0$  m. Door deze opening gaan twee roltrappen en een vaste trap naar beneden richting stationshal. Dit gebeurt in twee stappen met halverwege een tussenniveautje (zie figuur 8.7).

Het dak van de entree wordt in helder glas uitgevoerd, zodat er voldoende daglicht in de stationshal kan komen. Het glazen dak wordt opgehangen aan een stalen ruimtelijk vakwerk.

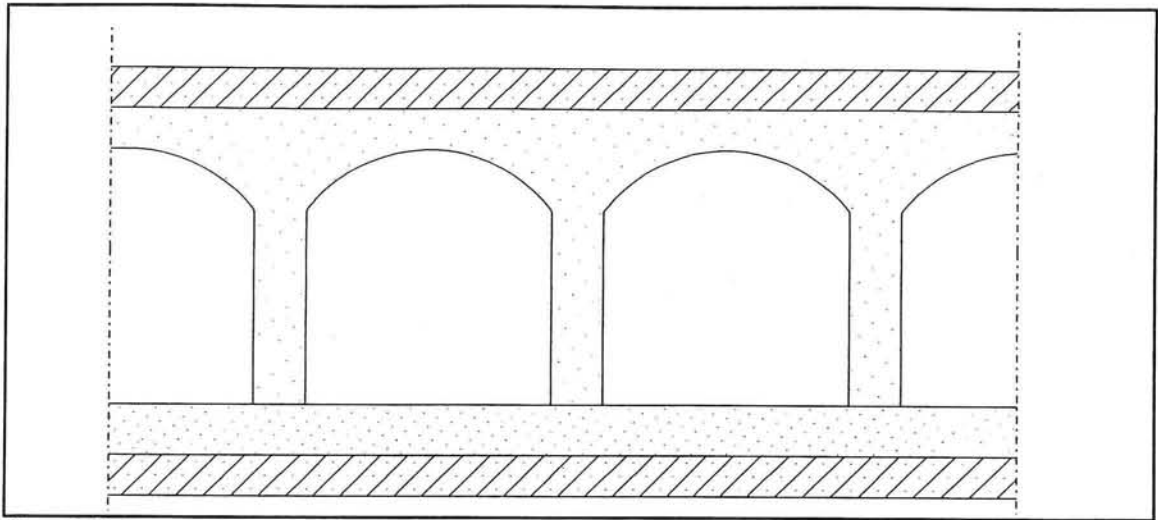
#### 8.3.4 Perrongedeelte.

De overspanning van het dak in het ondergrondse station wordt halverwege ondersteund. Op die manier worden de optredende momenten in het dak aanzienlijk gereduceerd. Dit is ook wel gewenst, gezien de relatief grote belasting op het dak van de constructie.

Deze midden-ondersteuning kan op diverse wijzen worden uitgevoerd (zie figuur 8.11 t/m 8.17). Men kan denken aan eenvoudige betonnen kolommen, rond (zie figuur 8.11) of rechthoekig (zie figuur 8.12). Ook kan men denken aan een betonnen muur met grote ronde gaten erin (zie figuur 8.13). Met beton zijn vanzelfsprekend nog vele andere varianten te bedenken (zie figuur 8.14).



Figuur 8.14 Betonnen boogvorm.

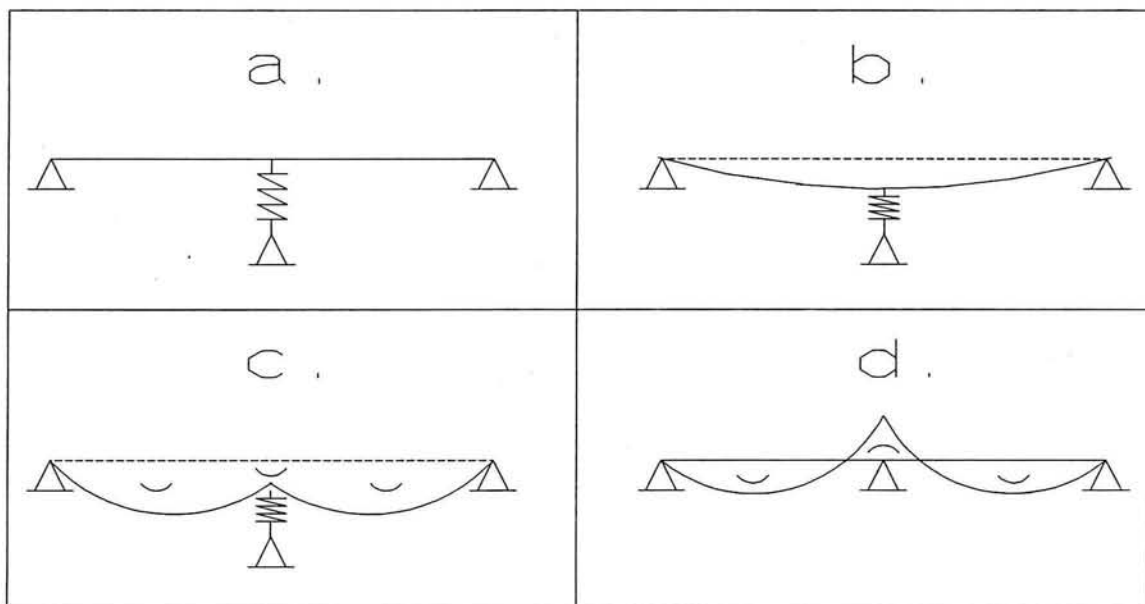


Figuur 8.19 Boogvormige midden-ondersteuning.

1/10/17

De ondersteuning van het dak kan natuurlijk ook in staal worden uitgevoerd. Bijvoorbeeld ronde stalen kolommen (☞ figuur 8.15), maar men kan ook een iets creatievere variant toepassen, zoals bogen in langsrichting (☞ figuur 8.16) of zelfs een golfvorm (☞ figuur 8.17). Maar ook vakwerkkolommen behoren tot de mogelijkheden.

Waar bij een stalen ondersteuning echter wel op gelet dient te worden is of deze ondersteuning wel stijf genoeg is om het dak goed te kunnen dragen. Indien dit niet het geval is en de kolom zich als een slappe veer gedraagt (☞ figuur 8.18a en b), dan zal het moment in de velden van het dak erg groot worden en in het ergste geval wordt het steunpuntsmoment in het midden zelfs tegenovergesteld (☞ figuur 8.18c) aan waarop het dak berekend is (☞ figuur 8.18d).<sup>1</sup>

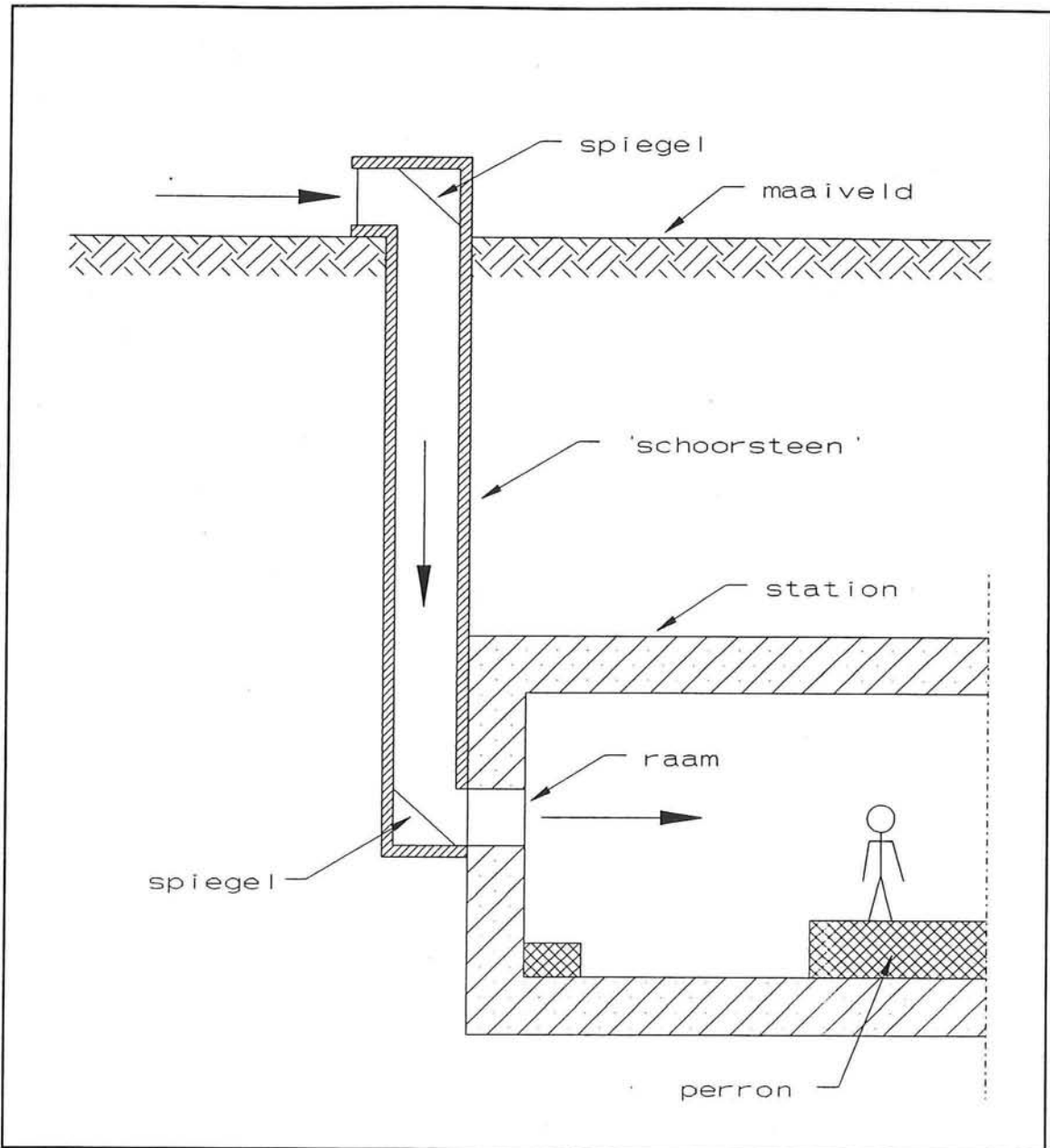


Figuur 8.18 Mogelijke consequenties stalen midden-ondersteuning.

Gekozen is, gezien de laatstgenoemde overweging, om de middenondersteuning in beton uit te voeren. Een stalen ondersteuning zal zich, ook gezien de relatief hoge belastingen op het dak, waarschijnlijk te slap gedragen.

Een eenvoudige rij kolommen op het perron of een doorgaande wand is uit esthetisch oogpunt niet toegepast. Gekozen is voor een boogvormige ondersteuningsconstructie (☞ figuur 8.19).

<sup>1</sup> Eventueel zou het mogelijk zijn de ondersteuning na te stellen.



Figuur 8.21 Loertoeter.



## 8.4 Stationsfaciliteiten.

### 8.4.1 Daglichttoetreding.

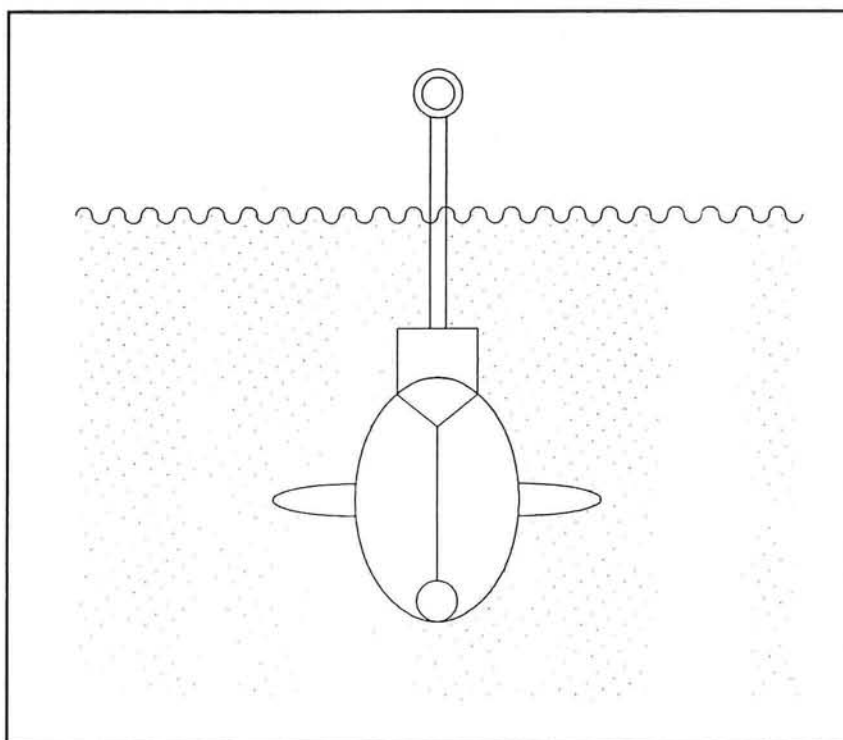
Daglichttoetreding diep in het ondergrondse station is, vanwege de zeer diepe ligging, erg moeilijk te realiseren. Vooral gezien het feit dat de bovengrondse ruimte zeer intensief gebruikt zal gaan worden.

Daglichttoetreding is toegepast bij de toegang op het maaiveld, zoals reeds in paragraaf 8.3.4 is beschreven. Op deze manier wordt een gedeelte van de stationshal, en met name de trappartij vanaf het maaiveld, overdag door daglicht verlicht.

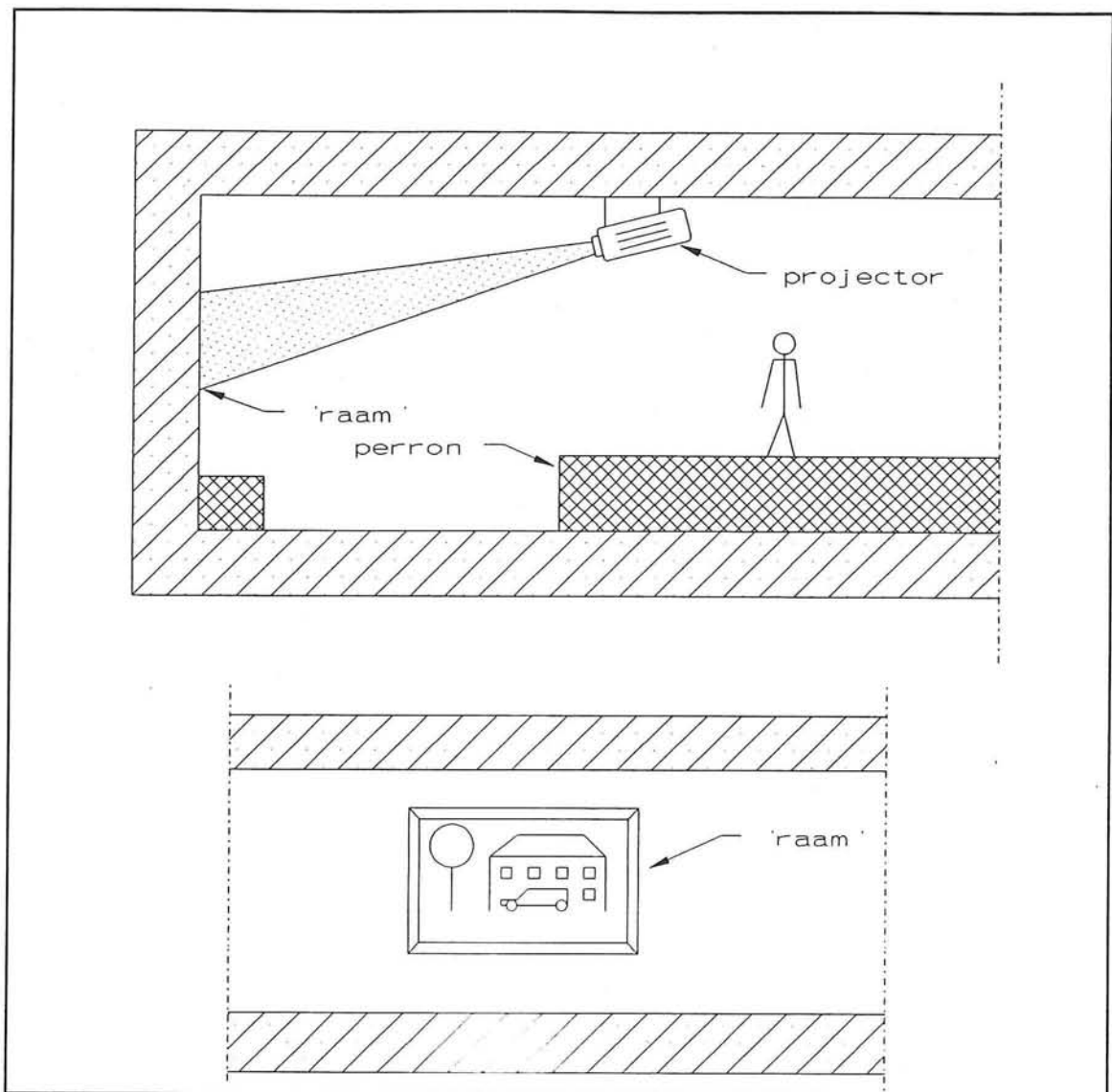
In het diepe perrongedeelte van het station ligt het toch moeilijker. Het dak van het ondergrondse station ligt gemiddeld 10 meter beneden het maaiveld, dus echt goede mogelijkheden voor het realiseren van daglichttoetreding zijn ook nauwelijks aanwezig. Toch zijn voor dit probleem een aantal ideeën ontwikkeld, die er bovendien toe leiden dat het station een speciaal karakter krijgt, waarover in de inleiding bij het kopje *ontwerpfilosofie* reeds werd gesproken. Het eerste idee ten aanzien van daglichttoetreding op het perronniveau is de zogenaamde *loertoeter*. Het tweede idee is een *elektronische daglichtprojectie*. Beiden ideeën worden hieronder nader uitgewerkt.

#### a. Loertoeter.

De werking van de loertoeter vindt z'n oorsprong bij de duikboten, en wel volgens het principe van de periscoop (☞ figuur 8.20).



Figuur 8.20 Periscoop op onderzeeër.



Figuur 8.22 Electronische daglichtprojectie.

In de wand van het station worden op diverse plaatsen openingen uitgespaard. Aan de buitenzijde van de wand wordt, aansluitend op voornoemde uitsparing, een soort *schoorsteen* tot aan het maaiveld-niveau aangebracht. Aansluitend op de schoorsteen komt een knik. Door nu in de twee knikken in het schachtenstelsel spiegels te plaatsen, wordt een soort periscoop verkregen. De beide openingen van de loertoeter worden met glas afgesloten (zie figuur 8.21). Op die manier is het dus mogelijk om -staande op het perron- vanuit het ondergrondse station te zien wat er op het maaiveld gebeurt, en kan zo bovendien daglicht in het station komen. (Voorwaarde hiervoor is uiteraard wel dat het buiten niet donker is.)

Het nadeel van deze loertoeters is echter wel, dat ze als het ware tegen de buitenzijde van de zinkelementen worden geplakt. Op die manier wordt het gemak van geprefabriceerde elementen enigszins teniet gedaan, omdat er zich 'in de uitvoering onhandige' tentakels aan de buitenzijde van het element bevinden.

Een groot voordeel van een dergelijk *technisch snuffje* is dat de reizigers zich in het ondergrondse station beter kunnen oriënteren, dat er daglicht in het station doordringt, en dat het station wordt voorzien van iets ongewoons dat het ondergrondse verblijf kan veraangenamen.



**b. Elektronische daglichtprojectie.**

Ook de elektronische daglichtprojectie is een middel om het station attractief op een hoger niveau te tillen. Op de wand van het station, wordt aan de binnenzijde op diverse plaatsen een denkbeeldig raam geschilderd of met tegels aangebracht. Het 'glas' van dit raam is wit. Vanaf het plafond boven het perron wordt nu met behulp van een videoprojector een beeld op dit raam geprojecteerd. Dit beeld wordt integraal met een video-camera op het maaiveld opgenomen (zie figuur 8.22).

Ook op deze manier is het dus mogelijk om vanuit het ondergrondse station te zien wat er zich op het maaiveld afspeelt. Veel echt daglicht treedt er op deze manier natuurlijk niet binnen, maar het ondergrondse karakter van het station wordt zo enigszins verdoezeld.



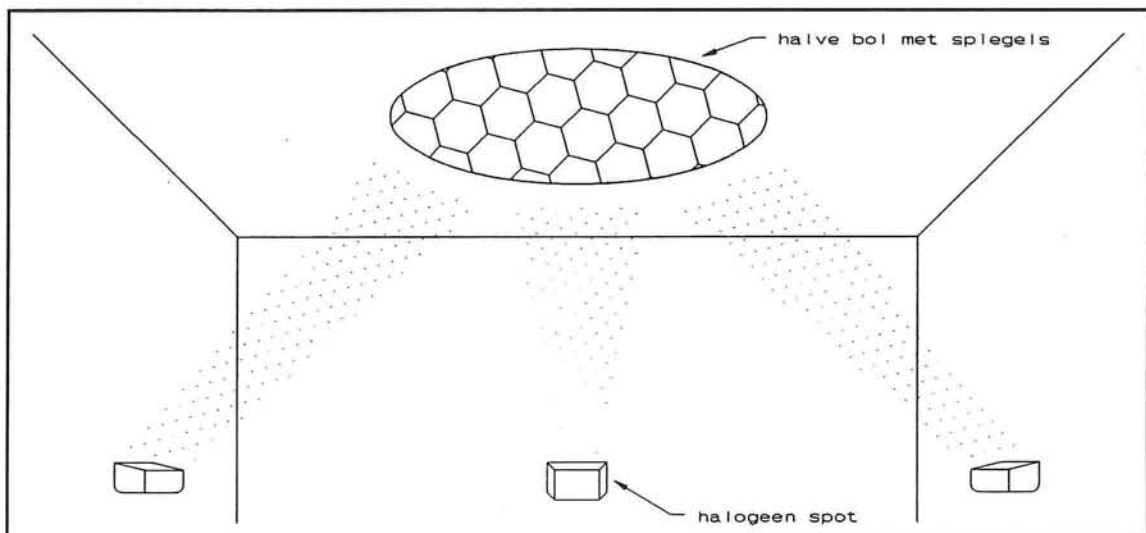
### 8.4.2 Verlichting.

De spoorwegtunnel is over de gehele lengte voorzien van een algemene verlichtingsinstallatie, die tevens kan worden gebruikt tijdens onderhoudswerkzaamheden.

Voor de ondergrondse stations gelden vanzelfsprekend andere normen dan in de tunnel. Daar moet de lichtopbrengst aan de treinzijde van de perrons ongeveer 300 Lux bedragen. Ook is een noodverlichtingssysteem aanwezig.

De verlichting op de perrons wordt geleverd door een op het perron geplaatste, naar boven gerichte halogeen spot, schijnend op een witte cirkel van ca. 1 m doorsnede. Deze cirkel is op het plafond geschilderd (zie figuur 8.23).

De verlichting boven de paddestoel en haar trappartij wordt verzorgd door het aanbrengen van ronde, bolle spiegels van 0.5 m doorsnede, op een oppervlak dat ook weer rond en bol van vorm is, maar met een diameter van ca. 5 meter. Vanaf de grond worden hier halogeen spots op gericht. Het weerkaatste licht verlicht de gehele ruimte (zie figuur 8.24).



Figuur 8.24 Spiegelverlichting boven trappartij.

### 8.4.3 Bekleding.

De wanden van het station worden voorzien van een geëmailleerde beplating. De bekleding heeft een decoratieve en een brandwerende functie. Het grote voordeel van deze geëmailleerde beplating is dat het verkrijgbaar is in alle gewenste kleuren en dessins.

Het plafond boven het perron wordt 0.9 m verlaagd m.b.v. een lattenmotief. Tussen dit verlaagde plafond en het tunneldak kunnen dan diverse leidingen worden aangebracht.





#### **8.4.4 Communicatie.**

Ten behoeve van de publieke communicatie wordt in de stationshal een drietal telefooncellen geplaatst. Ook wordt het station voorzien van een Kermit-greenpoint zend- en ontvangstinstallatie.

Verder wordt voor de veiligheid en het comfort van de reizigers een aantal andere communicatiemiddelen aangebracht. Te denken valt aan een heldere omroepinstallatie en een gesloten tv-circuit. Ook een FM-ondersteuningszender wordt aangebracht, om in geval van calamiteiten communicatie met behulp van portofoons en mobilofoons mogelijk te maken.

Ten behoeve van de treinenloop worden in het station de nodige seinen-installaties aangebracht.

#### **8.4.5 Nooduitgangen.**

Extra nooduitgangen worden aangebracht aan beide uiteinden van de perrons.

#### **8.4.6 Reizigersinformatie.**

Ten behoeve van het aangeven van de vertrektijden van de desbetreffende treinen worden op het perron op regelmatige afstanden voor beide sporen de gebruikelijke elektronisch geregelde displays aan het plafond opgehangen. Ook bij de ingang op het maaiveld zal reeds te zien zijn welke trein als eerste zal vertrekken en hoe laat. Bovendien zal hier worden aangegeven of de trein er al staat danwel dat deze nog in aantocht is. Zo weten de passagiers of zij zich moeten haasten of niet. Zij kunnen immers vanaf het maaiveld nog niet zien of de trein er al staat of niet.

Treinvertrekstaten worden geplaatst bij de entree op het maaiveld, in de stationshal, als ook op het perron. Uiteraard wordt het station voorzien van klokken.

#### **8.4.7 Sanitaire voorzieningen.**

In de stationshal worden in één van de zijruimten openbare toiletten aangebracht. Deze toiletten worden voorzien van zogenaamd groen-licht. Op die manier worden junks, die drugs intraveneus inbrengen, gehinderd en wordt een verblijf in deze ruimten voor hen onaantrekkelijk gemaakt.

#### **8.4.8 Kaartverkoop.**

Eén van de zijruimten van de stationshal wordt ingericht als kaartverkoop annex tv-bewakingsruimte.



## 8.5 Installaties.

### 8.5.1 Installatie- en serviceruimten.

De ruimten, benodigd voor de diverse installaties zijn gereserveerd bovenop het middelste zinkelement, achter de lift (zie figuur 8.6). Verder zijn ruimten gereserveerd in de zijruimten van de stationshal. In het vervolg van deze paragraaf wordt per installatie aangegeven waar deze is gepland. Zie ook de plattegrond in figuur 8.6.

### 8.5.2 Elektrische voeding.

Om economische- en veiligheidsredenen wordt de stroomvoorziening van het station niet van het normale lichtnet van de stad betrokken, maar van een eigen stroomvoorziening van de NS. Daar dit hoge voltages betreft (meestal 11kV) zijn transformatoren en schakelkasten nodig in het station. Verder zijn voor de stroomvoorziening nog standby-generatoren en batterijen benodigd. Deze elektrische installaties zijn ondergebracht in één van de zijruimten van de stationshal.

### 8.5.3 Ventilatie en klimaatbeheersing.

In een ondergronds station wordt een grote hoeveelheid warmte geproduceerd. Treinen geven warmte af, vooral als zij remmen, maar bijvoorbeeld ook de reizigers produceren warmte. Ook een groot aantal installaties produceren warmte, zoals de verlichting, de roltrappen, transformatoren etc.

Om binnen het station een redelijk klimaat te verkrijgen moet al deze warmte worden afgevoerd. In landen met een gematigd klimaat is een 'eenvoudige' ventilatie voldoende. In landen waar het vaak heet en vochtig is, moet men al gauw een air-conditioning toepassen.

In ons koude kikkerlandje kan worden volstaan met een normale ventilatie.

De ventilatie kan worden verkregen door het toepassen van ventilatieschachten aan weerszijden van het station, die in verbinding staan met de openlucht. De luchtverplaatsing, veroorzaakt door de treinen, in combinatie met de ventilatieschachten, is vaak voldoende voor een redelijke ventilatie van de tunnel.

Echter de warmteproductie van de treinen is van dien aard dat een extra ventilatie-voorziening noodzakelijk is. Omdat verreweg de meeste warmte die in de buurt van de perrons wordt geproduceerd afkomstig is van de onderzijde van de treinen, is het dus erg praktisch om ook onder het perron op regelmatige afstanden afvoerkanalen aan te brengen, om deze warmte af te voeren.

In de meeste gevallen is het ook wenselijk ventilatoren in de rest van het station toe te passen. Deze ventilatoren moeten in twee richtingen kunnen draaien, zodat zij ofwel frisse lucht in de tunnel en het station kunnen blazen of verontreinigde lucht aan het station kunnen onttrekken.



Een andere reden voor het in tweeën kunnen draaien van de ventilatoren is, om in geval van een brand in de tunnel, de rook in een bepaalde richting te kunnen dirigeren.

Gekozen is voor een combinatie van bovengenoemde opties. Aan beide uiteinden van het station worden twee ventilatie-schachten toegepast. Deze schachten dienen tegelijkertijd om de door de rijdende trein veroorzaakte luchtdrukverhoging (Piston-effect) te reduceren.

Verder worden in de zijkanten van het perron ventilatie-openingen aangebracht. Ook worden in het plafond ventilatie-openingen uitgespaard. De ventilatie-kanalen die hierop worden aangesloten hebben een diameter van ca 800 mm, en kunnen in de speciaal hiervoor gereserveerde ruimte tussen plafond en tunneldak worden ondergebracht.

De installatie voor de ventilatie-voorziening wordt geïnstalleerd in de ruimte op het middelste zinkelement achter de lift. De benodigde ruimte hiervoor bedraagt ca.300 m<sup>2</sup>.

De toegepaste afvoerkanalen zijn van dermate kwaliteit, dat zij bestand zijn tegen hoge temperaturen. Door brand veroorzaakte rook kan hoge temperaturen bereiken.

#### **8.5.4 Leidingen.**

De benodigde leidingen voor de diverse installaties en apparatuur worden ondergebracht in de ruimte onder het perron, alsmede in de speciaal hiervoor gereserveerde ruimte tussen het tunneldak en de plafond-bekleding.

#### **8.5.5 Brandbeveiliging.**

Het station wordt geheel voorzien van een brand- en rookdetectiesysteem, alsmede een volautomatische sprinklerinstallatie. Bescherming van de constructie tegen brand vindt plaats met behulp van een hittewerende beplating, zoals dit reeds beschreven in §8.4.3.

Toepassing van brandbare bouwmaterialen en materialen die bij brand giftige stoffen afscheiden wordt zoveel mogelijk vermeden.

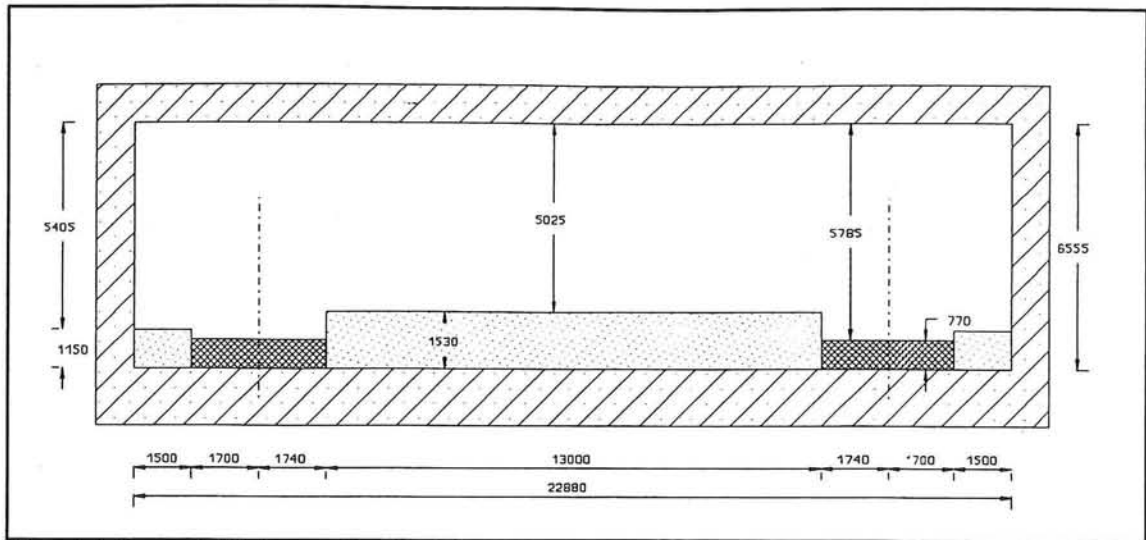
#### **8.5.6 Ontwatering.**

Bij regenachtig weer zal er water in de tunnel komen. Dit water komt via de tunnel-ingangen in de ondergrondse ruimte, of het is afkomstig van de natte druipende treinen. Maar ook zal voor de schoonmaak van de tunnel zal water worden gebruikt. Al dit water moet vanzelfsprekend worden verwijderd.

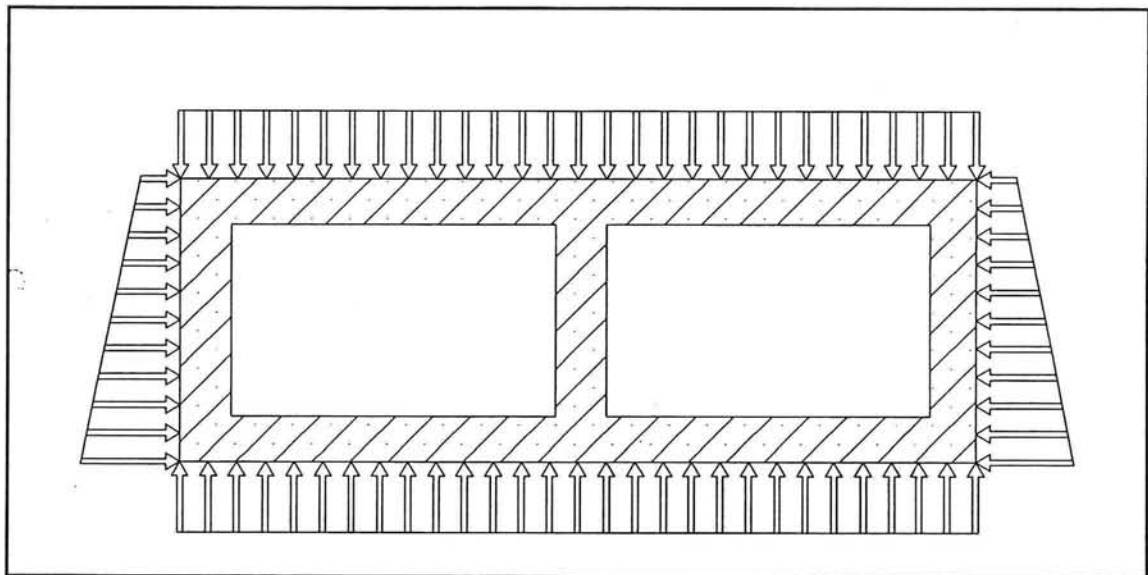
Een deel van het water zal verdampen, maar de rest van het water wordt uit het station gepompt. In het laagste gedeelte van het station wordt in de vloer een kleine pompkelder aangebracht om het water in op te vangen. Een pomp zal dit water verwijderen. Het aanbren-gen van de pompkelder in dit deel van het station is mogelijk, omdat dit gedeelte van het station in situ wordt uitgevoerd, en niet, zoals het overige gedeelte, met geprefabriceerde zinkelementen.



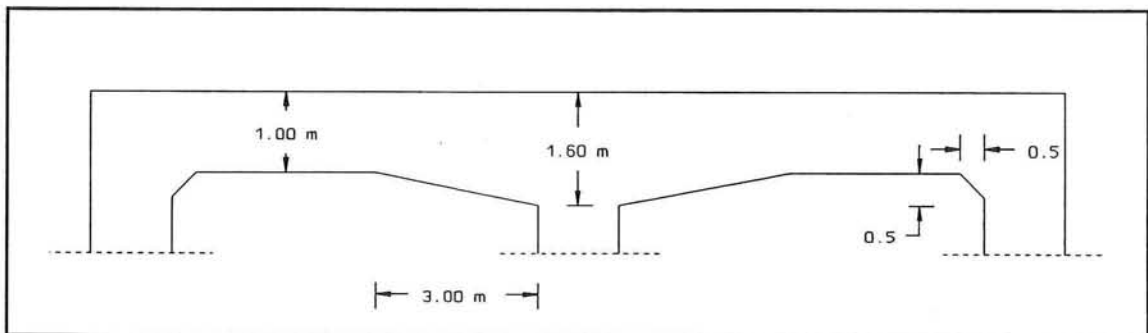




Figuur 9.1 Doorsnede zinkelement uit hoofdstuk 5.



Figuur 9.2 Belastingen op zinkelement.



Figuur 9.3 Afschuiningen in dak.



## 9. Berekening van de constructie.

### 9.1 Geometrie tunneldoorsnede.

De doorsnede-geometrie van de zinkelementen van het station, zoals deze was aangenomen in hoofdstuk 5 (☛ figuur 9.1), verdient uiteraard een nadere beschouwing. De optredende krachten en momenten en de plaats waar deze optreden bepalen voor een belangrijk deel de vormgeving van de doorsnede-geometrie. Vast staat uiteraard wel het in hoofdstuk 5 bepaalde benodigd profiel van vrije ruimte, hetgeen neerkomt op een benodigde inwendige breedte van 22.88 m en een benodigde inwendige hoogte van 6.555 m.

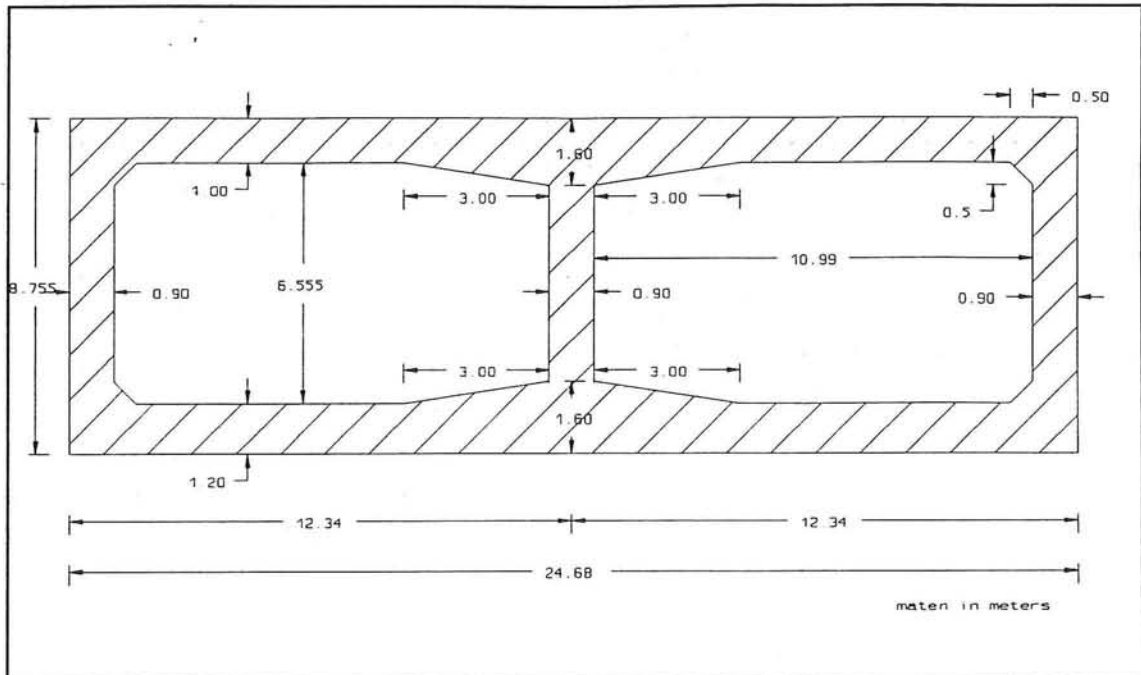
Kijken we naar de uitwendige belastingen op de constructie, dan is gemakkelijk in te zien dat het dak relatief zwaar zal worden belast (☛ figuur 9.2). Op dit dak komt immers ca. 10 meter grond te liggen. De grootste momenten in het dak zullen optreden ter plaatse van de middenondersteuning van het dak (ca.  $1/9 ql^2$ ).

Het dak krijgt een dikte van 1.00 m. Ondanks dat een kleinere dikte gunstiger is m.b.t. het eigen gewicht en de hiermee samenhangende diepgang, is toch gekozen voor deze wat grotere waarde. Dit om de benodigde hoeveelheid wapening te beperken en om de wapening überhaupt in de doorsnede kwijt te kunnen. Een kleine schattingsberekening leert dat voor een dikte van 0.90 m minstens 3 lagen wapening noodzakelijk zijn, hetgeen uitvoeringstechnisch minder aantrekkelijk is.

Vanwege de relatief grote waarden van het moment en de dwarskracht ter plaatse van het middensteunpunt zal hier een dikkere doorsnede worden toegepast (vout). De dikte van het dak wordt hier 1.60 m. De variatie van 1.00 m naar 1.60 m vindt plaats middels een afschuining onder een helling van 1:3. In de praktijk echter, wordt meestal een afschuiningslengte van 3.00 m aangehouden. Ook in de beide buitenhoeken (boven en onder) worden in verband met de optredende dwarskrachten en om uitvoeringstechnische redenen kleine afschuiningen toegepast van 0.5 x 0.5 m. Hierdoor is de (verrijdbare) bekisting eenvoudiger te hanteren dan wanneer een scherpe hoek van 90° wordt toegepast. De afschuiningen zullen het vastgestelde PVR, benodigd voor de trein, niet beïnvloeden. (☛ figuur 9.3)

De vloerdikte van het element krijgt een iets grotere waarde dan die van het dak. Dit om het zwaartepunt van de doorsnede enigszins laag te houden. De dikte van de vloer wordt 1.20 m. Ook hier geldt een afschuining over 3 meter naar de middenondersteuning tot een dikte van 1.60 m.

De dikte van de buitenwanden evenals de dikte van de middenondersteuning wordt vastgesteld op 0.90 m.



Figuur 9.4 Definitieve totaalgeometrie van de constructie-doorsnede.

De totale doorsnede van het zinkelement ziet er dan uit als in figuur 9.4.

## 9.2 Controles t.a.v. uitvoering.

Alvorens verder te gaan met het ontwerp en de dimensionering van de constructie wordt aan de hand van de vastgestelde geometrie gecontroleerd of de elementen voldoende drijfvermogen bezitten, of ze met een waterballast tot zinken kunnen worden gebracht en of de elementen tijdens het drijven voldoende stabiel zijn.

### 9.2.1 Drijfvermogen elementen.

Voordat met de berekening van de doorsnede van de elementen begonnen wordt, wordt eerst gecontroleerd of de elementen überhaupt blijven drijven. Bij het bepalen van het drijfvermogen is voor de volumieke massa van het beton aangehouden:  $\gamma_b = 24.6 \text{ kN/m}^3$ .

Het totale gewicht van het maatgevende element per strekkende meter element (inclusief zinkuitrusting e.d.) bedraagt:

$$G = 1814.61 \text{ kN/m}^1 \quad ^1$$

De diepgang van het element is derhalve:

$$d = \frac{G}{B \cdot \gamma_w} = \frac{1814.61}{24.68 \cdot 10} = 7.35 \text{ m}$$

en het vrijboord is dus:

$$\text{vrijboord} = 8.755 - 7.35 = 1.405 \text{ m} \quad (16\%)$$

Normaal gesproken zou men het liefst een zo klein mogelijk vrijboord (ca. 1%) willen hebben, teneinde de benodigde hoeveelheid ballastbeton zo laag mogelijk te houden. De noodzaak van het toepassen van ballastbeton is voornamelijk het geval bij bijvoorbeeld rivierkruisingen of ondiepe zinktunnels, waarbij de permanente dakbelasting niet toereikend is om de elementen in de eindfase aan de grond te houden. In de Delftse zinktunnel bestaat de ballast van de elementen in de eindfase uit ca. 11 meter zand, en is geen ballastbeton benodigd. In de uitvoeringsfase worden de elementen m.b.v. een (tijdelijke) waterballast aan de grond gehouden.

---

<sup>1</sup> Zie ook bijlage F.



De diepgang van de elementen bepaald ook de benodigde diepte van het bouwdok. De relatief geringe diepgang is hierbij natuurlijk zeer gunstig, daar het bouwdok het liefst zo ondiep mogelijk wordt gemaakt.

### 9.2.2 Zinkvermogen elementen.

Recht tegenover het drijven van het element staat het zinken. De elementen moeten, op de zinkplaats aangekomen, met behulp van een waterballast kunnen worden afgezonken. Omdat deze waterballast verkregen wordt door middel van het plaatsen van ballasttanks in het element, is deze ballast aan een maximum verbonden. (Ballasttanks moeten in het element passen). Het element mag hierbij dus niet té veel drijfvermogen hebben, omdat het anders niet wil zinken. Dit dient dus te worden gecontroleerd.

Bij het bepalen van het 'zinkvermogen' van de elementen is een lagere waarde voor het volumiek gewicht van beton genomen, namelijk  $\gamma_b = 24.2 \text{ kN/m}^3$ . Hierin zit in feite een veiligheidsfactor verwerkt, die eventuele onzekerheden die tijdens de uitvoering kunnen optreden dekt. Tijdens de uitvoeringsfase wordt een extra veiligheid van 7.5% gehanteerd. Het benodigd zinkgewicht volgt uit:

$$Z = 1.075 \cdot (8.755 \cdot 24.68 \cdot 10 - 1814.61) \cdot \frac{24.2}{24.6} = 403.8 \text{ kN} \quad (jm^1)$$

Indien we dit benodigd zinkgewicht uitdrukken in een hoeveelheid water per strekkende meter tunnelement, dan volgt:

$$A_{tot} = \frac{403.8}{10} = 40.38 \text{ m}^2 \quad (jm^1)$$

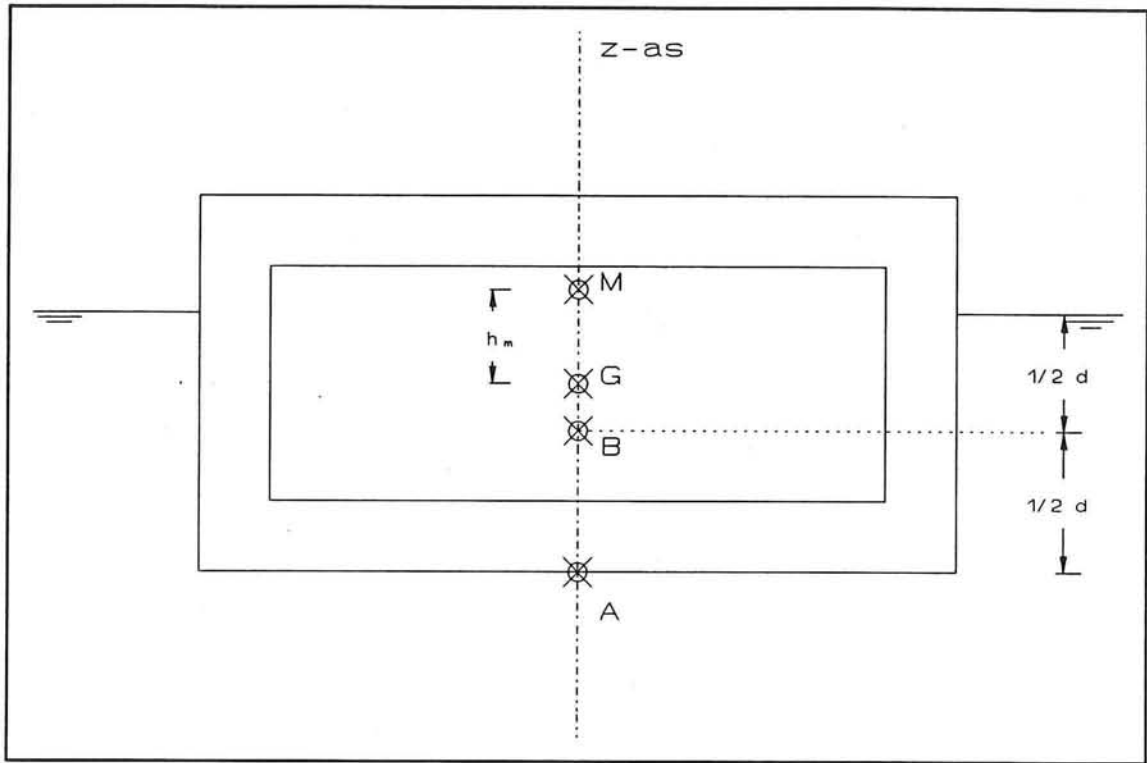
Verdeeld over 2 ballasttanks aan weerszijden van de tunneldoorsneden geldt dan per tank:

$$A_1 = A_2 = \frac{1}{2} \cdot 40.38 = 20.19 \text{ m}^2$$

Bij een breedte  $b_t$  van de tanks van bijvoorbeeld 8 meter geeft dit een waterniveau  $d_t$  in de tanks van:

$$b_t = 8 \text{ m} \quad \rightarrow \quad d_t = \frac{20.19}{8} = 2.52 \text{ m}$$

De inwendige hoogte van de zinkelementen bedraagt 6.555 m. De tanks zijn dus goed in het element in te passen.



Figuur 9.5 Karakteristieke punten in doorsnede.

### 9.2.3 Transport: Metastabiliteit.<sup>1</sup>

Tijdens het transport van het element is het niet alleen belangrijk dat het element blijft drijven, het moet ook een zekere stabiliteit bezitten: metastabiliteit.

Het *metastabiel* zijn wordt gezegd van evenwichtstoestanden bij welke na kleine storingen de oorspronkelijke toestand weer intreedt, maar na iets sterkere verstoringen een geheel nieuwe evenwichtstoestand ontstaat.<sup>2</sup> Een drijvend voorwerp, zoals een tunnelement of een schip, maar ook een vrachtwagen waarin vlees wordt vervoerd zijn daar voorbeelden van.

Het zinkelement mag tijdens het transport dus niet te gemakkelijk kantelen, d.w.z. het element moet een geringe hoekverdraaiing om de lengte-as kunnen weerstaan. Het ontwerp van het element moet dus zodanig zijn dat wanneer een hoekverdraaiing optreedt, er een corrigerend koppel wordt ontwikkeld, dat het element weer terugbrengt in de aanvankelijke evenwichtstand. Voornoemde hoekverdraaiing kan worden opgewekt door bijvoorbeeld een golf, trekkkrachten (trossen), botsingen of wanneer er met relatief veel impulsie iets bovenop wordt gegoid.

Is het element niet in staat een voldoende corrigerend koppel te ontwikkelen, dan bestaat er de kans dat het element bij een dergelijk hoekverdraaiing kantelt en (in het ergste geval) zinkt, waarbij ernstige beschadigingen van het element niet zijn uitgesloten.

Het is overigens wel mogelijk het element te helpen met behulp van sleepkabels of een ophanging, waarbij de kabels een zekere voorspanning bezitten. Hierover meer verderop in de paragraaf.

In figuur 9.5 is een elementdoorsnede weergegeven. Hierin zijn de ten aanzien van de stabiliteit karakteristieke punten aangegeven:

- $B$  : drukkingspunt, het aangrijpingspunt van de opdrijvende kracht in ruststand.  $B$  is dus het massazwaartepunt van het verplaatste water.
- $G$  : gewichtspunt, het massazwaartepunt van het element zelf (ook het gewicht van eventueel aanwezig ballastwater in rekening brengen).
- $M$  : metacentrum, het snijpunt van de opdrijvende kracht bij een hoekverdraaiing met de z-as.
- $A$  : oorsprong, referentiepunt.

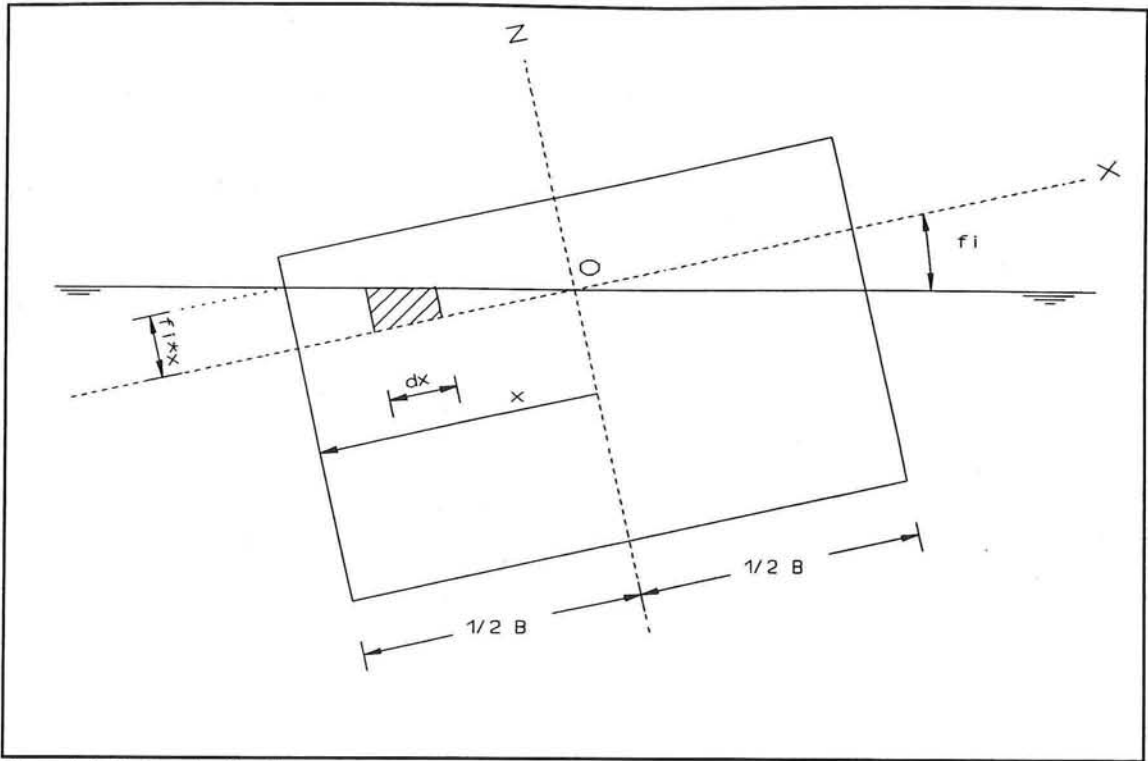
#### ■ Berekening.

Voor de statische stabiliteit is het nodig dat punt  $M$  boven punt  $G$  ligt: het lijnstuk  $GM$ , de metacentrumhoogte  $h_m$  genaamd, moet positief zijn. De waarde van de metacentrumhoogte  $h_m$  is

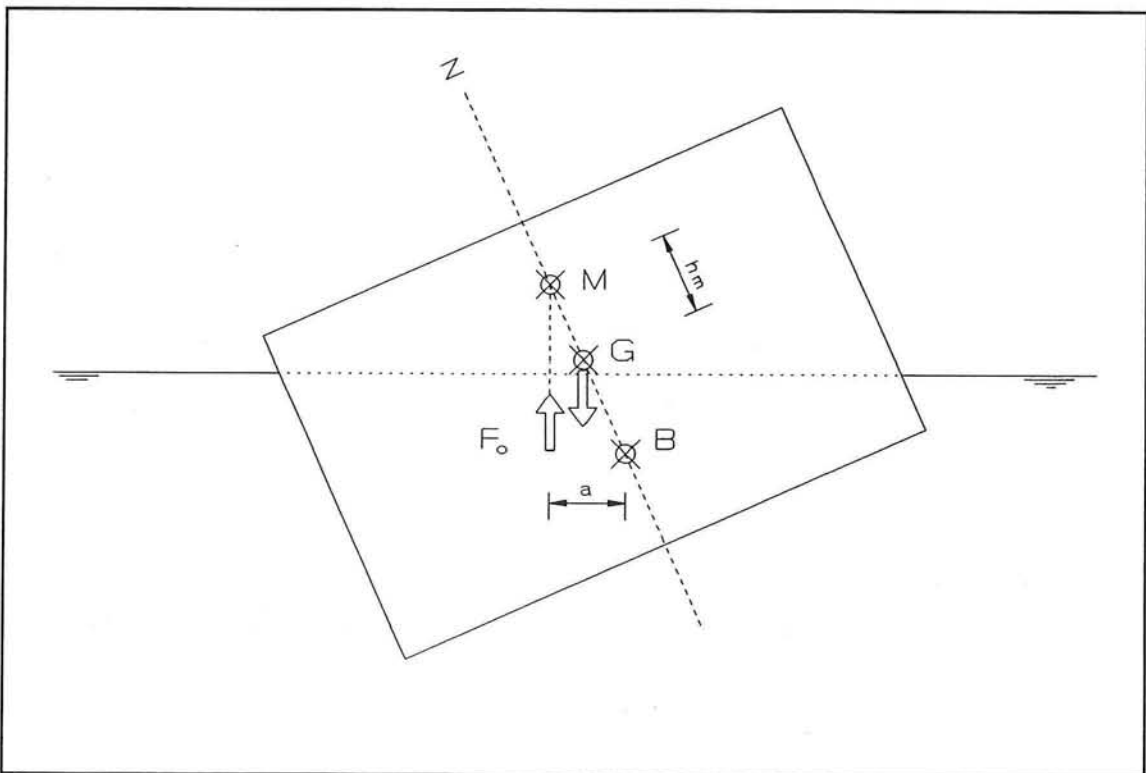
---

<sup>1</sup> Literatuur: ~~van~~ Glerum, Prof.ir.A., Collegediktaat f9, p.46 e.v., 1991.

<sup>2</sup> Definitie Van Dale.



Figuur 9.6 Hoekverdraaiing element.



Figuur 9.7 Krachten in doorsnede.

174



een maat voor de stabiliteit. Meestal wordt door de verzekeringsmaatschappijen een metacentrumhoogte geëist van tenminste 0.45 m.

Wanneer het element een hoekverdraaiing ondergaat (zie figuur 9.6), dan ondervindt het onder water gedrukte deeltje met een breedte van  $dx$  een opwaartse kracht  $dF$  ter grootte van:

$$dF = \phi \cdot x \cdot y \cdot dx \cdot \rho_w \cdot g \quad (\text{bij hoekverdraaiingen kleiner dan } 10^\circ)$$

Ten opzichte van punt  $O$  geeft dit een moment  $dM$  van:

$$dM = x \cdot dF$$

Voor de gehele breedte van het element geeft dit een corrigerend moment van:

$$M = \int_{-\frac{1}{2}B}^{+\frac{1}{2}B} (\phi \cdot x^2 \cdot y \cdot dx \cdot \rho_w \cdot g) = \phi \cdot \rho_w \cdot g \cdot I$$

( $I$  = traagheidsmoment van het waterdoorsnijdend oppervlak t.o.v. de  $y$ -as.)

In de ruststand greep de opdrijvende kracht  $F_o$  aan in het drukkingspunt  $B$ . Door de hoekverdraaiing  $\phi$  verschuift de werklijn van  $F_o$  over een afstand  $a$  (zie figuur 9.7), waarbij:

$$a = \frac{M}{F_o} = \frac{\phi \cdot \rho_w \cdot g \cdot I}{\rho_w \cdot g \cdot V} = \frac{\phi \cdot I}{V} \quad (i)$$

Afstand tussen drukkingspunt  $B$  en metacentrum  $M$ :

$$\overline{BM} = \frac{a}{\phi}$$

en met (i):

$$\overline{BM} = \frac{I}{V} \quad (ii)$$

■ Ligt nu  $M$  boven  $G$ , dan treedt een corrigerend moment op ter grootte van:

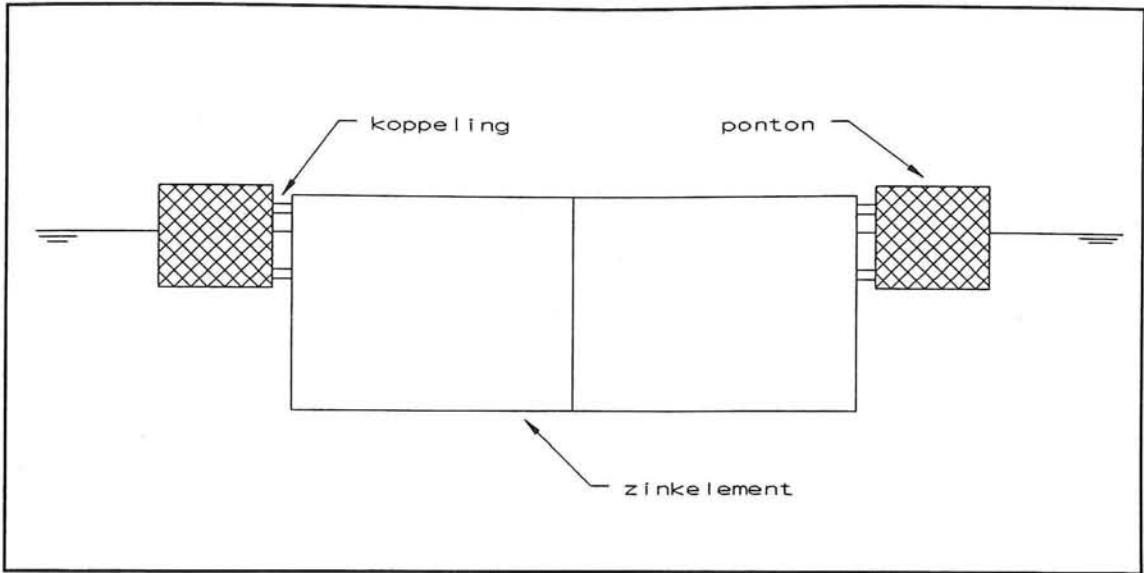
$$F_o \cdot h_m \cdot \phi = \rho_w \cdot g \cdot V \cdot h_m \cdot \phi$$

■ Ligt  $M$  onder  $G$  dan is het element labiel en zal het kantelen.

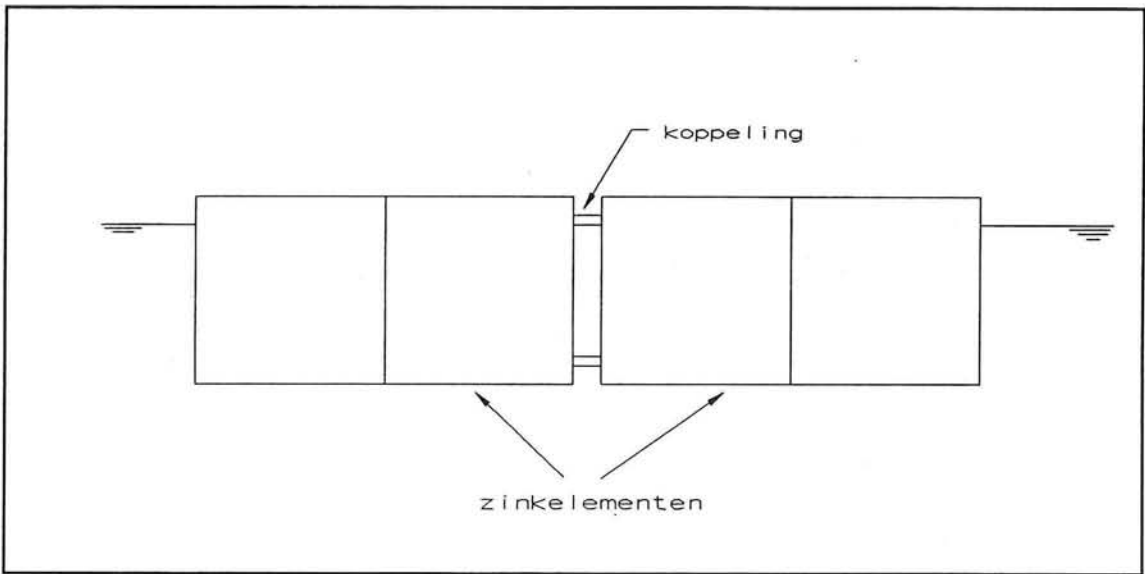
(N.B. Zoals in het voorgaande reeds werd genoemd geldt vaak:  $h_m \geq 0.45$  m.)

De controle op de statische stabiliteit bestaat dus uit de volgende stappen:

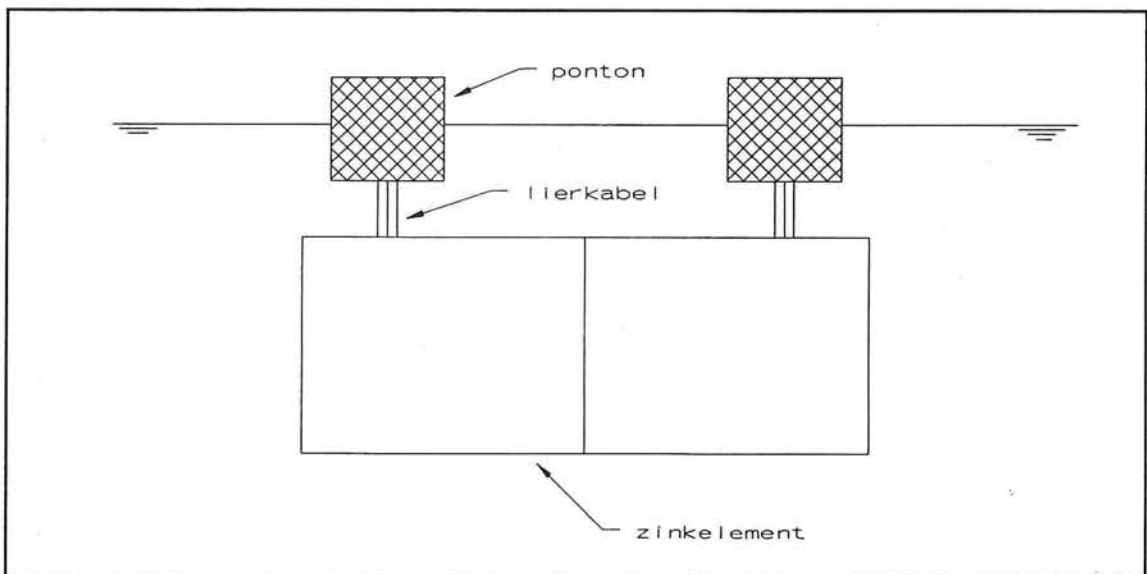
1. Bepaling van het gewicht en van de ligging van het zwaartepunt.



Figuur 9.8 Zinkelement met pontons.



Figuur 9.9 Zinkelementen koppelen.



Figuur 9.10 Zinkelement 'dragen'.

2. Uit het gewicht volgen de diepgang, de ligging van  $B$  en de waterverplaatsing  $V$  [ $m^3$ ].
3. Bepaling  $I$ .
4. Bepaling ligging van  $M$  met behulp van (ii).
5.  $M$  boven  $G$ : stabiel,  $M$  onder  $G$ : labiel.

#### ■ Hulpvoorzieningen.

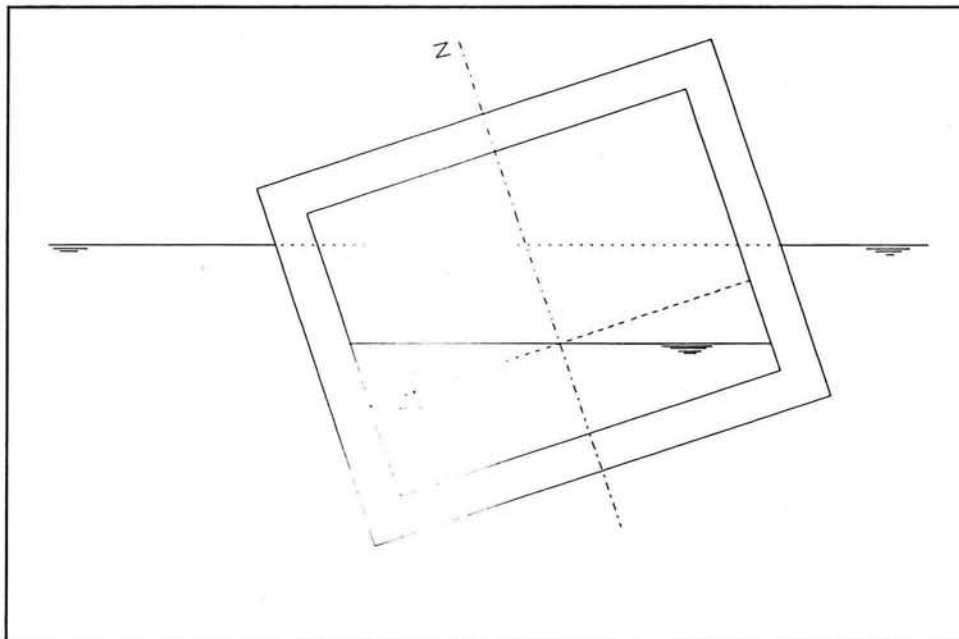
Indien het element niet of onvoldoende van zichzelf stabiel is, dan zijn een aantal maatregelen te noemen:

- Aanpassen van het ontwerp, bijvoorbeeld een verbreding van het element zodat  $I$  toeneemt. Ook kan de vloerdikte worden vergroot, zodat het massazwaartepunt omlaag wordt gebracht.
- Het aanbrengen van extra voorzieningen of het nemen van extra maatregelen, zoals:
  - Het element met behulp van pontons stabiel maken ( $I$  groter) (☞ figuur 9.8).
  - Het koppelen van elementen tijdens transport, mits dit gezien de breedte van de vaarroute mogelijk is (☞ figuur 9.9).
  - Het element met behulp van kabels in bedwang houden. In het Delftse geval zou kunnen worden gedacht aan een brugconstructie die langs het 'kanaal' kan rijden, waar het element als het ware aan 'opgehangen' is (☞ figuur 9.10).

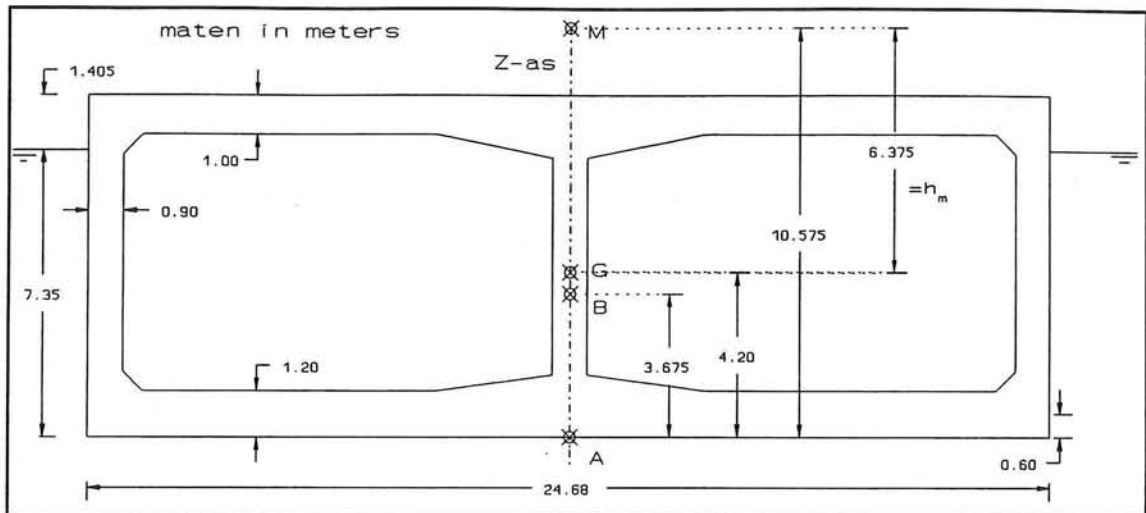
#### ■ Waterballast.

Wanneer water wordt gebruikt als ballast tijdens de zinkprocedure, wordt de stabiliteit van het element negatief beïnvloed.

Bij een hoekverdraaiing wil het inwendige water een positie innemen, waarbij het een horizontale waterspiegel heeft (☞ figuur 9.11).



Figuur 9.11 Element met waterballast.



Figuur 9.12 Elementdoorsnede met karakteristieke punten.

Er zal dus een verplaatsing van het water, en daarmee een verplaatsing van het massazwaartepunt van het ballastwater, plaatsvinden. Deze inwendige waterverplaatsing, en daarmee de verplaatsing van het massazwaartepunt t.o.v. de z-as, levert een extra moment, dat het element nog verder doet draaien.

Een remedie voor dit probleem is het aanbrengen van tussenschotten of het plaatsen van meerdere kleine ballasttanks.

De invloed van de aanwezigheid van ballastwater op de stabiliteit kan in rekening worden gebracht door middel van een aangepaste vergelijking voor het traagheidsmoment  $I$ :

$$I = I_u - \sum I_i$$

waarbij:  $I_u$  = traagheidsmoment waterdoorsnijdend oppervlak.

$I_i$  = traagheidsmoment ballastwater-oppervlak.

#### ■ Delftse situatie.

Beschouwen we nu de Delftse zinkelementen (zie figuur 9.12), dan zien we na een berekening (zie bijlage F) dat de metacentrumhoogte  $h_m$  een waarde bezit ter grootte van 6.375 m. Dit is ruimschoots voldoende om de stabiliteit van het element tijdens drijvend transport te kunnen garanderen. (De eis was dat  $h_m$  minimaal 0.45 m was.)

Voor de ligging van de karakteristieke punten  $B$ ,  $G$ ,  $M$  en metacentrumhoogte  $h_m$  wordt verwezen naar figuur 9.12. De berekening van deze punten is te vinden in bijlage F.

Tijdens het transport van het bouwdok naar de afzinkplaats zijn de waterballasttanks niet gevuld met water. Slechts tijdens het eigenlijke zinken worden deze met water gevuld. Bovendien geeft de aanwezigheid van ballastwater in het Delftse geval een reductie van het traagheidsmoment van ongeveer 1%. De reductie op de metacentrumhoogte  $h_m$  is dan vrijwel nihil. Om deze redenen is in de berekening in bijlage F de aanwezigheid van ballastwater niet meegenomen.

Door de relatief grote breedte van het element heeft het een groot traagheidsmoment ( $I \sim B^3$ ), hetgeen voor een hoge ligging van het metacentrum  $M$  zorgt. Deze hoge ligging van het metacentrum maakt dat het element zich in water stabiel gedraagt. Een eventuele kleine afwijking in de ligging van het massazwaartepunt van de doorsnede zal dan ook nauwelijks van invloed zijn op de stabiliteit.

Conclusie is dan ook dat het element tijdens het transport stabiel zal zijn, en dat ten aanzien van de statische stabiliteit geen extra maatregelen noodzakelijk zijn.



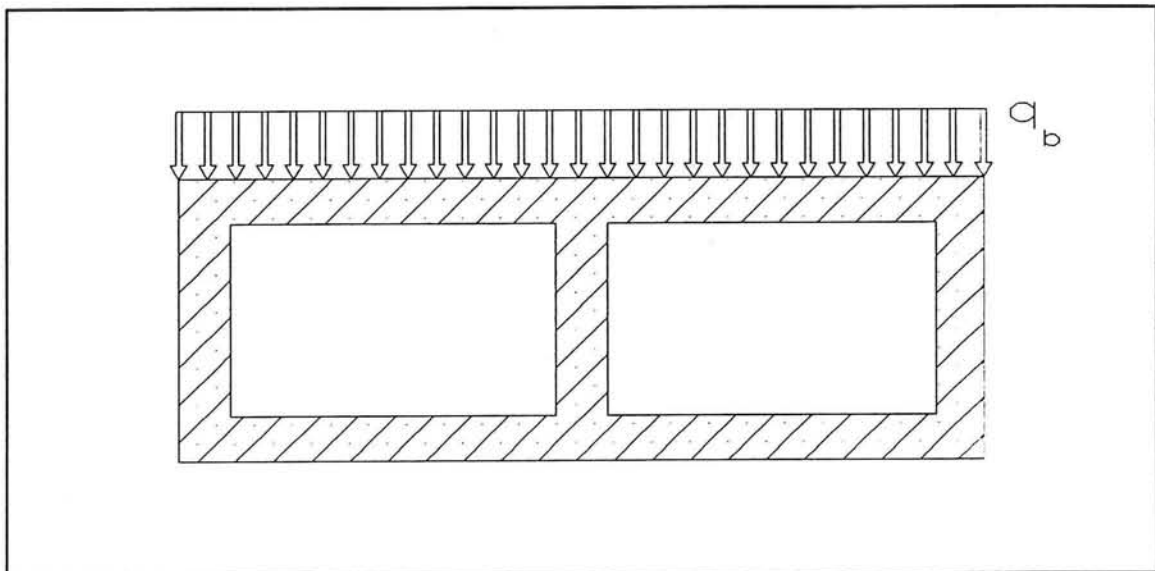
### 9.3 Bepaling krachtwerking in doorsnede zinkelement.

#### 9.3.1 Belasting op het element.

De belasting op het zinkelement is systematisch opgedeeld in de diverse verschillende componenten. Deze componenten worden hieronder bij de punten a, b en c kort besproken. Bij punt d worden de waarden van de belastingcomponenten vervolgens geparametriseerd in de variabelen  $d_1$  en  $d_2$ . Dit is weergegeven op pagina 107.

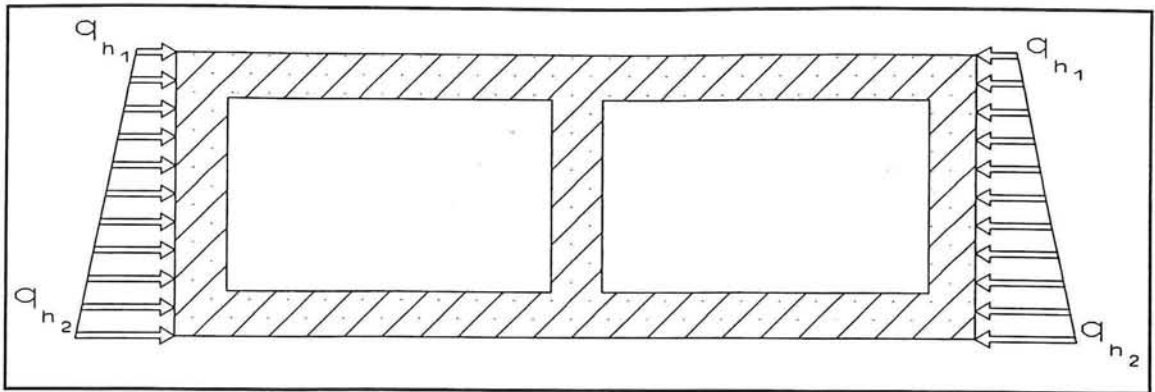
#### a. Belasting bovenop het element (dakbelasting).

De bovenbelasting bestaat uit een component van het eigen gewicht van het dak en een component die geleverd wordt door het gewicht aan grond (nat), dat na het afzinken bovenop het dak wordt aangebracht (zie figuur 9.13).

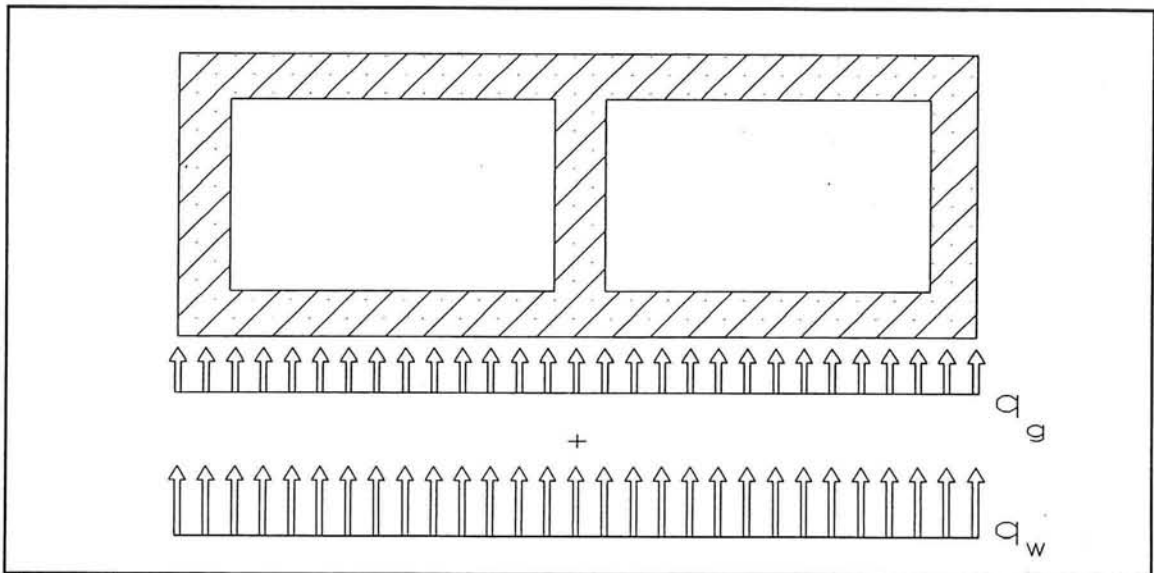


Figuur 9.13 Bovenbelasting op dak  $q_b$ .

Deze grondaanvulling vindt plaats met zand met een volumiek gewicht van  $\gamma_n = 20 \text{ kN/m}^3$ . Het terugstorten van de ontgraven grond kan natuurlijk ook. Voordelen hiervan zijn dat het goedkoper is en dat de bovenbelasting op het dak van het zinkelement dan lager uitvalt. Groot nadeel is echter dat deze grond, die voornamelijk uit klei bestaat, zeer moeizaam weer te verdichten is. Het gevolg is dat dan langdurige zettingen van het maaiveld zijn te verwachten. Gezien het toekomstig gebruik van het maaiveld (stationsplein e.d.) is dit een ongewenste situatie. Om die reden is dan ook gekozen voor een aanvulling met zand. Naast het voordeel van een betere verdichtbaarheid van het zand staat dus echter wel een groter volumiek gewicht van de grond (ca. 25% hoger), hetgeen een grotere belasting van het dak betekent.



Figuur 9.14 Belasting tegen wand  $q_n$ .



Figuur 9.15 Belasting tegen vloer  $q_w + q_g$ .



**b. Horizontale belasting tegen de wanden.**

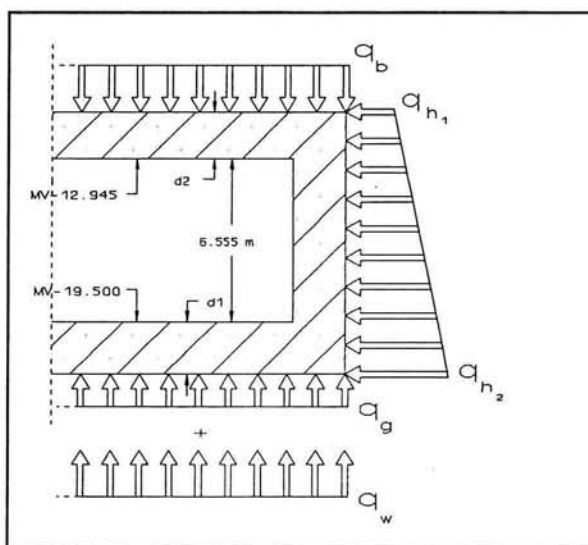
De horizontale belasting tegen de wanden bestaat uit een horizontale (hydrostatische) waterdruk en een horizontale korreldruk van de naastliggende grond (zie figuur 9.14). Bij de berekening van de horizontale korreldruk is gerekend met een neutrale gronddruk-coëfficiënt van  $\lambda_n = 0.5$ .

**c. Vertikale belasting op de vloer.**

Deze belasting bestaat uit een neerwaarts gerichte component van het eigen gewicht van de vloer, een opwaarts gerichte waterdruk plus een eveneens opwaarts gerichte reactiekracht die door de grond op de constructie wordt geleverd (zie figuur 9.15). Deze laatste component is als het ware afkomstig van de staal-fundering.

**d. Belastingen als functie van de vloerdikte  $d_1$  en de dakdikte  $d_2$ .**

Om enige vrijheid te houden in de in te voeren belastingen worden deze geparametriseerd in de variabelen  $d_1$  en  $d_2$ . Op die manier kunnen de belastingen bij een wijziging in de vloer- of dakdikte snel weer opnieuw worden berekend. Het enige dat wel vaststaat is het niveau van de bovenzijde van de vloer van het station, dat wordt gedicteerd door het niveau waarop het spoor moet komen te liggen. De bovenzijde vloer ligt op het diepste punt op 19.5 meter beneden het maaiveld. De benodigde inwendige hoogte is 6.555 meter. Derhalve ligt de onderzijde van het dak op een niveau van 12.945 m beneden het maaiveld (zie figuur 9.16).



Figuur 9.16 Belastingenschema.



■ **Constanten:**

$$\begin{aligned}w &= \text{waterstand t.o.v. maaiveld} = \div 0.4 \text{ m.} & \gamma_w &= 10 \text{ kN/m}^3 \text{ (vol. gewicht water)} \\n &= \text{porositeit} = 0.4 & \gamma_n &= 20 \text{ kN/m}^3 \text{ (vol. gewicht grond nat)}\end{aligned}$$

■ **Gebruikte grootheden:**

$$\begin{aligned}d_1 &= \text{vloerdikte} \\d_2 &= \text{dakdikte} \\\sigma &= \text{vertikale gronddruk} \\p &= \text{waterdruk} \\\sigma' &= \text{vertikale korreldruk} \\\sigma'_h &= \text{horizontale korreldruk} \\\sigma_h &= \text{horizontale gronddruk} \\\lambda_n &= \text{neutrale grondrukcoëfficiënt} \\\sigma_{h_1} &= \text{horizontale gronddruk boven} \\\sigma_{h_2} &= \text{horizontale gronddruk onder}\end{aligned}$$

■ **Bovenbelasting door grond  $q_b$ :**

$$\begin{aligned}q_b &= (12.945 - d_2) \cdot \gamma_g - w \cdot \gamma_w \cdot n \\&= (12.945 - d_2) \cdot 20 - w \cdot 10 \cdot 0.4 \\&= 258.9 - 20 \cdot d_2 - 4 \cdot w\end{aligned}$$

■ **Horizontale belasting:**

Zijwaartse belasting boven,  $q_{hi}$ :

$$\begin{aligned}\sigma &= q_b = 258.9 - 20 \cdot d_2 - 4 \cdot w \\p &= (12.945 - d_2 - w) \cdot \gamma_w = 129.45 - 10 \cdot d_2 - 10 \cdot w \\\sigma' &= \sigma - p \\&= 258.9 - 20 \cdot d_2 - 4 \cdot w - 129.45 + 10 \cdot d_2 + 10 \cdot w \\&= 129.45 - 10 \cdot d_2 + 6 \cdot w \\\sigma'_h &= \lambda_n \cdot \sigma' = 0.5 \cdot \sigma' \\&= 0.5 \cdot (129.45 - 10 \cdot d_2 + 6 \cdot w) \\&= 64.725 - 5 \cdot d_2 + 3 \cdot w \\\sigma_h &= \sigma'_h + p \\&= 129.45 - 10 \cdot d_2 - 10 \cdot w + 64.725 - 5 \cdot d_2 + 3 \cdot w \\\Rightarrow \sigma_{h_1} &= 194.175 - 15 \cdot d_2 - 7 \cdot w\end{aligned}$$



Zijwaartse belasting onder,  $q_{h2}$ :

$$\begin{aligned}\sigma &= q_b + (d_2 + 6.555 + d_1) \cdot \gamma_g \\ &= (258.9 - 20 \cdot d_2 - 4 \cdot w) + (d_2 + 6.555 + d_1) \cdot 20 \\ &= 258.9 - 20 \cdot d_2 - 4 \cdot w + 20 \cdot d_2 + 131.1 + 20 \cdot d_1 \\ &= 390 - 4 \cdot w + 20 \cdot d_1\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}p &= (12.945 + 6.555 + d_1 - w) \cdot \gamma_w \\ &= 129.45 + 65.55 + 10 \cdot d_1 - 10 \cdot w \\ &= 195 + 10 \cdot d_1 - 10 \cdot w\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma' &= \sigma - p \\ &= 390 - 4 \cdot w + 20 \cdot d_1 - 195 - 10 \cdot d_1 + 10 \cdot w \\ &= 195 + 10 \cdot d_1 + 6 \cdot w\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma'_h &= \lambda_n \cdot \sigma' = 0.5 \cdot \sigma' \\ &= 97.5 + 5 \cdot d_1 + 3 \cdot w\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_h &= \sigma'_h + p \\ &= 97.5 + 5 \cdot d_1 + 3 \cdot w + 195 + 10 \cdot d_1 - 10 \cdot w\end{aligned}$$

$$\Rightarrow \sigma_{h2} = 292.5 + 15 \cdot d_1 - 7 \cdot w$$

■ Opwaartse waterdruk  $q_w$ :

$$\begin{aligned}q_w &= [(12.945 + 6.555 + d_1) - w] \cdot \gamma_w \\ q_w &= 195 + 10 \cdot d_1 - 10 \cdot w\end{aligned}$$

■ Numerieke waarden:

De uit bovenstaande formules voortvloeiende waarden voor de diverse belastingcomponenten zijn hieronder weergegeven. In deze waarden zijn nog geen veiligheidscoëfficiënten voor de belastingen verwerkt.

Met de constanten:

$$d_1 = 1.20 \text{ m}$$

$$d_2 = 1.00 \text{ m}$$

$$w = 0.40 \text{ m}$$



volgt dan:

$$\begin{aligned}q_b &= 237.3 \text{ kN/m}^1 \\q_{e.g.-dak} &= 1.00 \text{ m} \cdot 24.6 \text{ kN/m}^3 \cdot 1 \text{ m}^1 = 24.6 \text{ kN/m}^1 \\q_{e.g.-vloer} &= 1.20 \text{ m} \cdot 24.6 \text{ kN/m}^3 \cdot 1 \text{ m}^1 = 29.52 \text{ kN/m}^1 \\q_{e.g.-wand} &= 0.90 \text{ m} \cdot 24.6 \text{ kN/m}^3 \cdot 1 \text{ m}^1 \cdot \frac{(7.655 - 0.50 - 0.60)}{7.655} = 18.9585 \text{ kN/m}^1 \\q_w &= 203 \text{ kN/m}^1 \\q_{h_1} &= 176.375 \text{ kN/m}^1 \\q_{h_2} &= 307.700 \text{ kN/m}^1\end{aligned}$$

### 9.3.2 Veiligheidsfilosofie.

In de berekeningen binnen dit rapport wordt de veiligheidsfilosofie volgens de nieuwe beton- en bouwvoorschriften gehanteerd (TGB 1990 en VBC 1990, NEN 6720).

De veiligheidsfilosofie volgens de oude richtlijnen (VB 74/84) waren dusdanig conservatief dat men besloten heeft om tot een nieuwe benadering van het veiligheidsaspect over te gaan. De oude benadering van de veiligheid was het simpelweg vermenigvuldigen van alle belastingen met een factor 1,7.

Binnen de nieuwe veiligheidsfilosofie volgens NEN 6720 wordt gewerkt met partiële veiligheidscoëfficiënten. Men heeft besloten verschillende veiligheidsfactoren voor eigen gewicht en nuttige belasting toe te passen. De belasting door het eigen gewicht wordt dan vergroot met een factor  $\gamma_g = 1,2$ . De nuttige belasting wordt met een factor  $\gamma_p = 1,5$  vermenigvuldigd.

Het hanteren van de nieuwe richtlijnen in de berekeningen heeft nadrukkelijk consequenties voor de invoer van de berekening. Was het vroeger mogelijk de uitkomsten simpelweg met 1,7 te vermenigvuldigen, nu moeten de partiële veiligheidscoëfficiënten reeds vóór de berekening aan de belastingen worden toegevoegd.

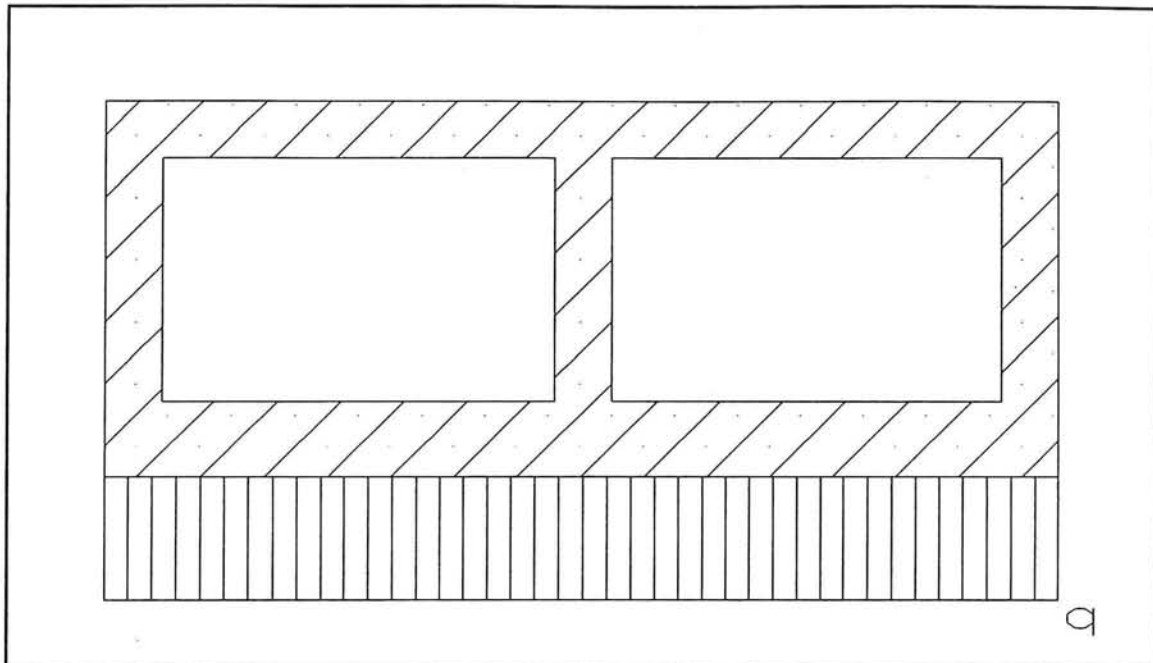
Ten aanzien van de veiligheidsfactoren die voor de verschillende bouwmaterialen worden aangehouden geldt:

- Beton (op druk belast)  $\gamma_m = 1,2$
- Beton (op trek belast)  $\gamma_m = 1,4$
- Staal  $\gamma_m = 1,15$





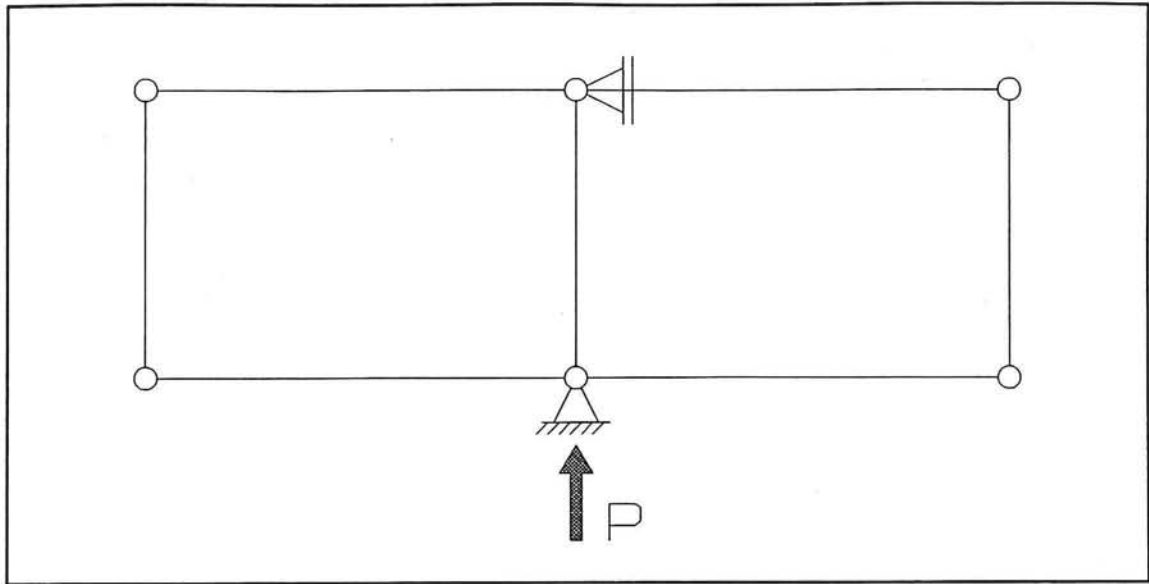
Maar, gezien het feit dat de vloer van het element zeer stijf is, is het geoorloofd de belasting gelijkmatig verdeeld aan te nemen (zie figuur 9.20). Uiteindelijk maakt dit namelijk in het eindresultaat weinig uit. Deze vereenvoudiging is natuurlijk ook veel eenvoudiger in een berekening mee te nemen.



Figuur 9.20 Gelijkmatig verdeelde funderingsdruk.

Voor de berekening van de krachswerking in de doorsnede van het tunnelelement is niet direct gegrepen naar een geavanceerd computerprogramma, zoals hiervoor beschreven. Om een goed overzicht te houden op de invloed van de diverse belastingen op de inwendige krachswerking, wordt in eerste instantie een berekening gemaakt volgens de hierboven beschreven 'belasting'-methode (§9.3.4). Ter vergelijking wordt daarna ook een berekening gemaakt met behulp van een computerprogramma dat de verende ondersteuning wel goed kan simuleren (§9.3.5).

Veiligheidshalve wordt bij de dimensionering van de wapening uitgegaan van de krachtsverdeling, welke gevonden wordt bij de eerste methode, de 'belasting'-methode.



Figuur 9.24 Oplegreactie  $P$  ter bepaling van het eigen gewicht.

eigen gewicht van de constructie per m<sup>1</sup> lengte (zie figuur 9.24). Het eigen gewicht van de constructie bedraagt dan per m<sup>1</sup> lengte van het zinkelement: **1771 kN**.

Door deze waarde nu per eenheid van breedte te nemen wordt de gronddruk  $q_{e.g.}$ , veroorzaakt door het eigen gewicht van de constructie, verkregen. Dus:

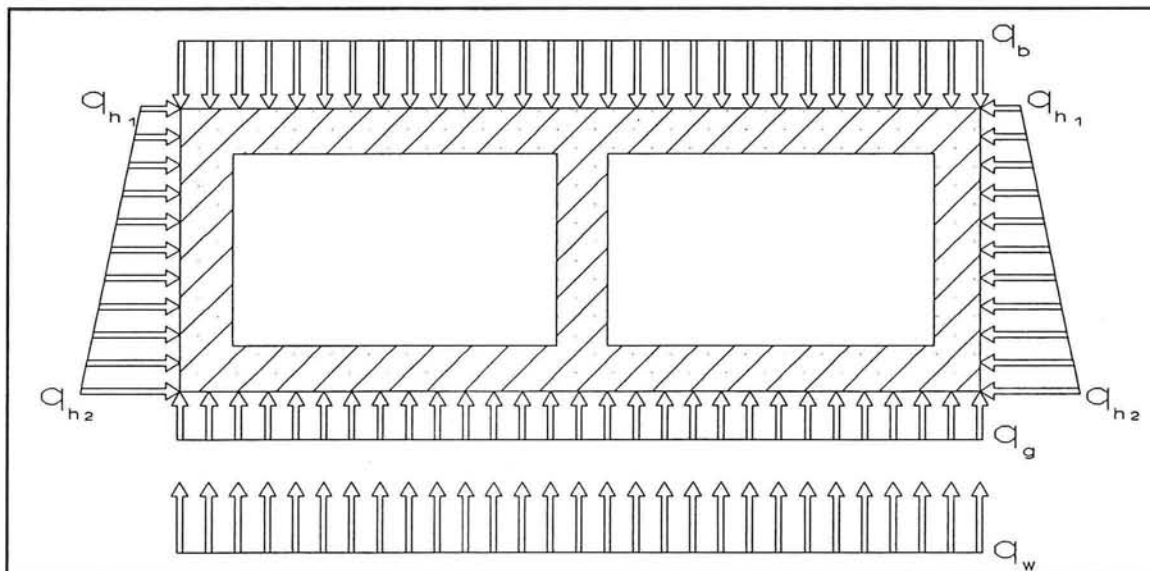
$$\begin{aligned} q_{e.g.} &= P/B \\ &= 1771/24.68 = 71.2 \text{ kN/m}^1 \end{aligned}$$

De belasting op de onderzijde van de constructie, welke door de korreldruk veroorzaakt wordt, bestaat nu uit de totale gronddruk ter plaatse van de onderzijde van de constructie minus de opwaartse waterdruk. Let wel: de partiële veiligheidscoëfficiënten dienen hierin te worden meegenomen, dus:

$$\begin{aligned} q_g &= \gamma_p \cdot q_b + \gamma_g \cdot q_{e.g.} - \gamma_p \cdot q_w \\ &= 1.5 \cdot 237.3 + 1.2 \cdot 71.2 - 1.5 \cdot 203 \\ &= 136.89 \text{ kN/m}^1 \end{aligned}$$

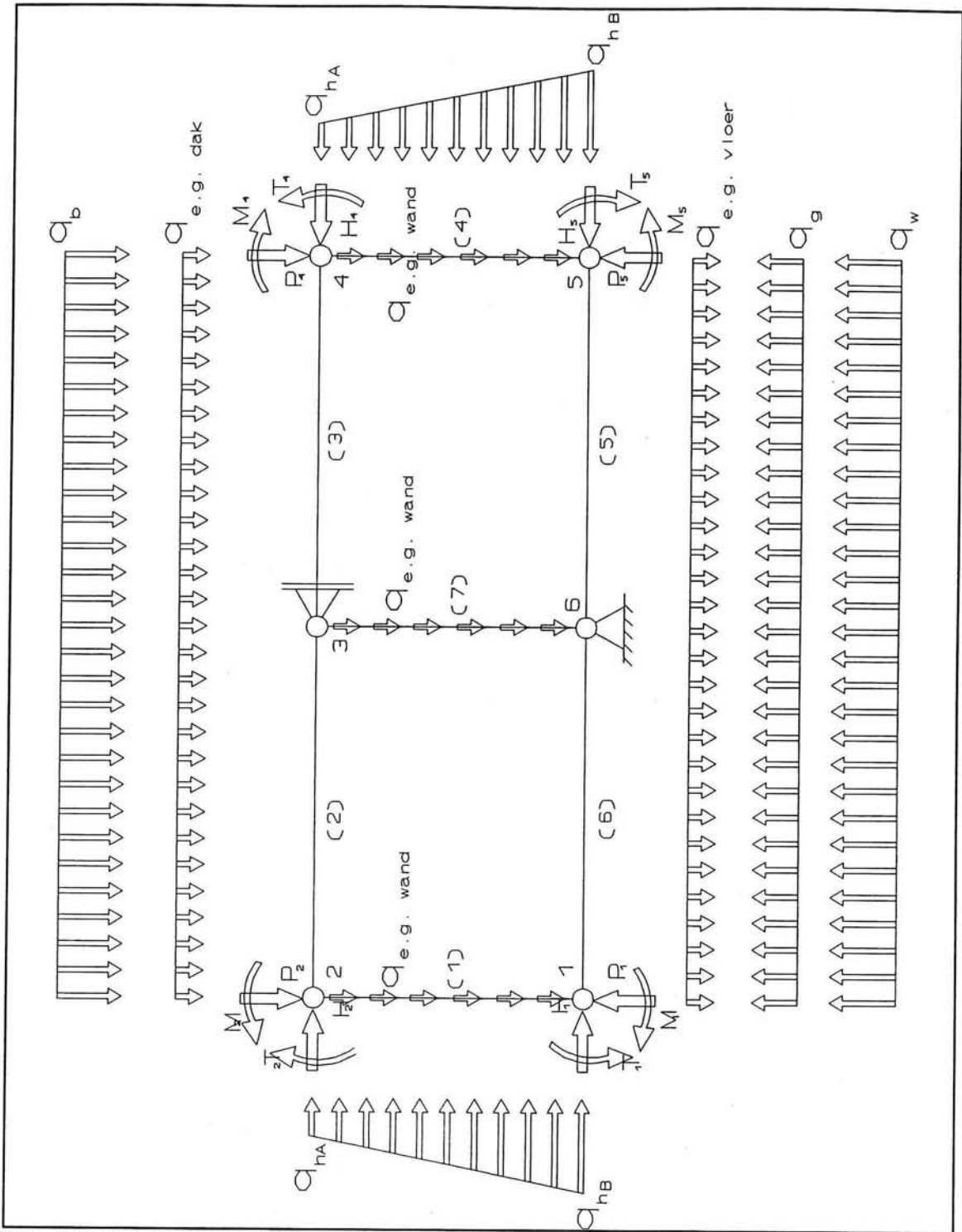
De **totale** belasting op de vloer bestaat uit de hierboven berekende korreldruk  $q_g$  plus de opwaartse waterdruk  $q_w$  (opwaarts gerichte component). Het eigen gewicht van de vloer heeft in dezen een gunstige werking (neerwaarts gerichte component).

Het (bijna) totale belastingschema op de constructie ziet er nu uit als in figuur 9.25.



Figuur 9.25 (Bijna) totale belastingschema.

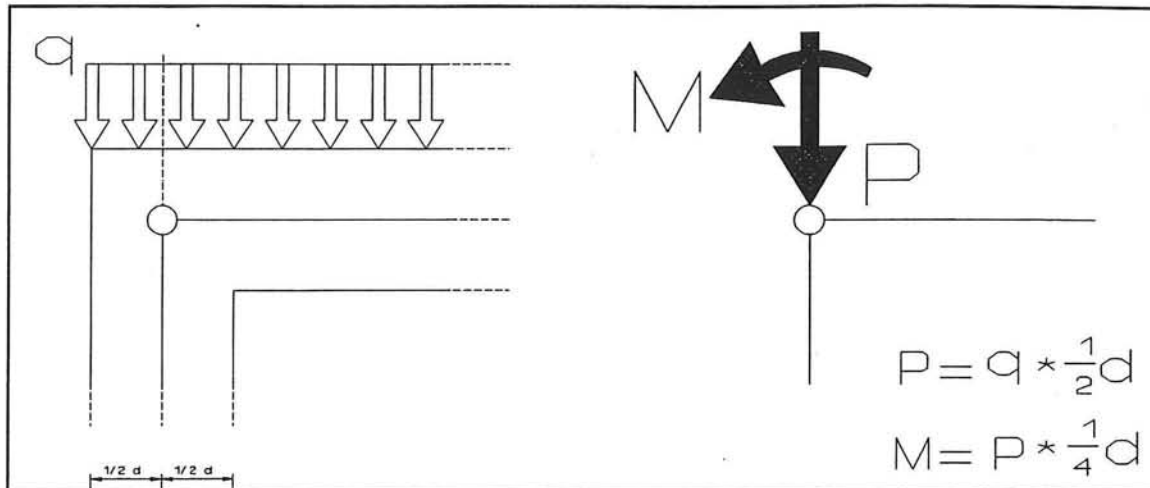
Schematiseren we nu de constructie tot een raamwerk, dan is bovenstaand belastingschema nog niet geheel compleet en behoeft dit enige aanpassing. Namelijk door de vereenvoudiging tot een



Figuur 9.27 Complete belastingschema.

raamwerk van staven en knopen zijn we wat 'vlees' verloren.

De staven tekenen de middellijnen van de doorsnede. Wat daarbuiten valt moeten we natuurlijk ook meenemen. De belasting werkt ook nog op deze randjes (zie figuur 9.26).



Figuur 9.26 Verloren krachten en momenten door schematisatie.

De verdeelde belasting links van de knoop moet de constructie wèl dragen. Dit kunnen we in rekening brengen d.m.v. een puntlast en een moment op de knoop (zie figuur 9.26). Deze extra momenten en puntlasten vinden gestalte in de grootheden  $P$ ,  $M$ ,  $H$  en  $T$ .

Ook de waarden van de horizontale belasting tegen de wanden van de constructie moeten worden aangepast. Het uiteindelijke belastingschema ziet er dan uit als in figuur 9.27:

Voor de belastingen, inclusief partiële veiligheidsfactoren geldt:

$$\begin{aligned}
 q_{e.g.} &= 1.2 \cdot 71.2 = 85.44 \text{ kN/m}^1 \\
 q_{e.g.-dak} &= 1.2 \cdot 1.00 \text{ m} \cdot 24.6 \text{ kN/m}^3 \cdot 1 \text{ m}^1 = 29.52 \text{ kN/m}^1 \\
 q_{e.g.-vloer} &= 1.2 \cdot 1.20 \text{ m} \cdot 24.6 \text{ kN/m}^3 \cdot 1 \text{ m}^1 = 35.42 \text{ kN/m}^1 \\
 q_{e.g.-wand} &= 1.2 \cdot 0.90 \text{ m} \cdot 24.6 \text{ kN/m}^3 \cdot 1 \text{ m}^1 \cdot \frac{(7.655 - 0.50 - 0.60)}{7.655} \\
 &= 1.2 \cdot 18.9585 = 22.75 \text{ kN/m}^1 \\
 q_b &= 1.5 \cdot 237.3 = 355.95 \text{ kN/m}^1 \\
 q_w &= 1.5 \cdot 203 = 304.5 \text{ kN/m}^1 \\
 q_g &= 355.95 + 85.44 - 304.5 = 136.89 \text{ kN/m}^1
 \end{aligned}$$



De horizontale belasting heeft vanwege het schematisatie-aspect een verschaling nodig:

$$q_{h_A} = \gamma_p \cdot q_{h_1} + \gamma_p \cdot \left( \frac{q_{h_2} - q_{h_1}}{H} \right) \cdot \frac{1}{2} \cdot d_2$$

$$= 1.5 \cdot 176.375 + 1.5 \cdot \left( \frac{307.7 - 176.375}{8.755} \right) \cdot 0.5 = 275.8 \text{ kN/m}^1$$

$$q_{h_B} = \gamma_p \cdot q_{h_2} - \gamma_p \cdot \left( \frac{q_{h_2} - q_{h_1}}{H} \right) \cdot \frac{1}{2} \cdot d_1$$

$$= 1.5 \cdot 307.700 - 1.5 \cdot \left( \frac{307.7 - 176.375}{8.755} \right) \cdot 0.6 = 448 \text{ kN/m}^1$$

De extra in te voeren puntlasten en momenten op de knopen 1,2,4 en 5 zijn:

$$P_1 = P_5 = q \cdot \frac{1}{2} d = (-35.42 + 136.89 + 304.5) \cdot 0.45 = 182.687 \text{ kN}$$

$$M_1 = -M_5 = P_1 \cdot \frac{1}{4} d = 182.687 \cdot 0.225 = 41.105 \text{ kNm}$$

$$P_2 = P_4 = q \cdot \frac{1}{2} d = (355.95 + 29.52) \cdot 0.45 = 173.462 \text{ kN}$$

$$M_2 = -M_4 = P_2 \cdot \frac{1}{4} d = 173.462 \cdot 0.225 = 39.029 \text{ kNm}$$

$$H_1 = H_5 = \left( \frac{q_{h_2} + q_{h_B}}{2} \right) \cdot \frac{1}{2} d = \left( \frac{461.55 + 448}{2} \right) \cdot 0.60 = 272.88 \text{ kN}$$

$$T_1 = -T_5 = H_1 \cdot \frac{1}{4} d = 272.88 \cdot 0.3 = 81.864 \text{ kNm}$$

$$H_2 = H_4 = \left( \frac{q_{h_1} + q_{h_A}}{2} \right) \cdot \frac{1}{2} d = \left( \frac{264.56 + 275.8}{2} \right) \cdot 0.50 = 135.094 \text{ kN}$$

$$T_2 = -T_4 = H_2 \cdot \frac{1}{4} d = 135.094 \cdot 0.25 = 33.773 \text{ kNm}$$

De momenten op de knopen ( $M_i$  en  $T_i$ ) kunnen gemakshalve worden gesommeerd:

$$K_1 = M_1 + T_1 = -41.105 + 81.864 = 40.759 \text{ kNm}$$

$$K_2 = M_2 + T_2 = 39.029 - 33.773 = 5.256 \text{ kNm}$$

$$K_4 = -K_2 = -5.256 \text{ kNm}$$

$$K_5 = -K_1 = -40.759 \text{ kNm}$$





Na de bepaling van alle aanwezige belastingen kan de berekening worden gestart. De berekening is uitgevoerd m.b.v. het raamwerkprogramma PC-Frame. De complete input en output van deze berekening is te vinden in bijlage G.

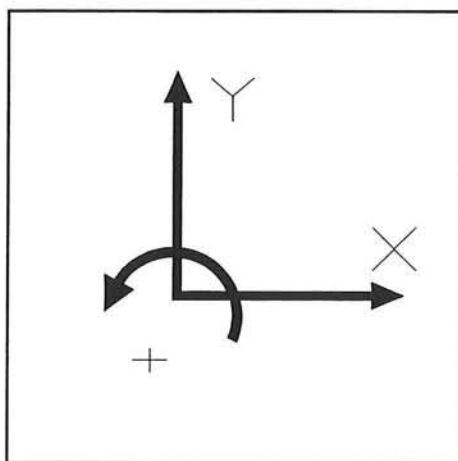
Binnen de invoer van de belastingen is een opsplitsing in belastinggevallen gemaakt van de diverse op zichzelf staande belastingcomponenten. Dit is verder voor de berekening niet van belang, maar geeft een beter inzicht in de invoergegevens. De volgende belastinggevallen zijn gehanteerd:

1. Eigen gewicht.
2. Uitwendige grondbelasting (boven).
3. Opwaartse waterdruk.
4. Korreldruk op vloer; funderingsbelasting.
5. Schematisatie-belastingen  $P, M, H$  en  $T$ .

De complete berekening is weer gevat in een zogenaamde belastingcombinatie, die uiteraard alle belastinggevallen (1 t/m 6) bevat.

Ook is in de invoer van het programma (☞ bijlage G) de niet-prismatische doorsnede van dak en vloer (☞ figuur 9.21) verwerkt. Dit is verwoord d.m.v. een aantal extra knopen en staven. De extra staven variëren in dikte. Zie voor verdere toelichting hierop bijlage G, pagina G.2.

Binnen de berekening is onderstaand assenstelsel gehanteerd (☞ figuur 9.28).



Figuur 9.28 Gehanteerde assenstelsel.

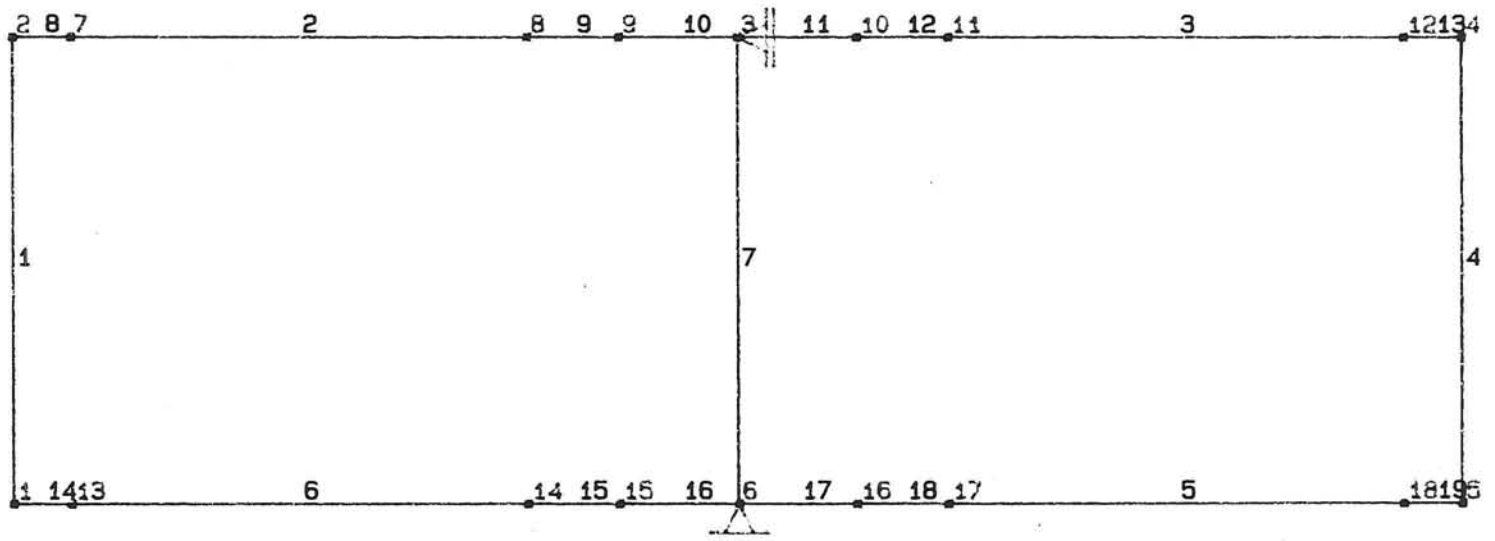


Hieronder worden de belangrijkste uitkomsten alsmede de normaalkracht-, dwarskracht- en momentenlijnen weergegeven.

De knoop- en staafnummering heeft betrekking op figuur 9.27.

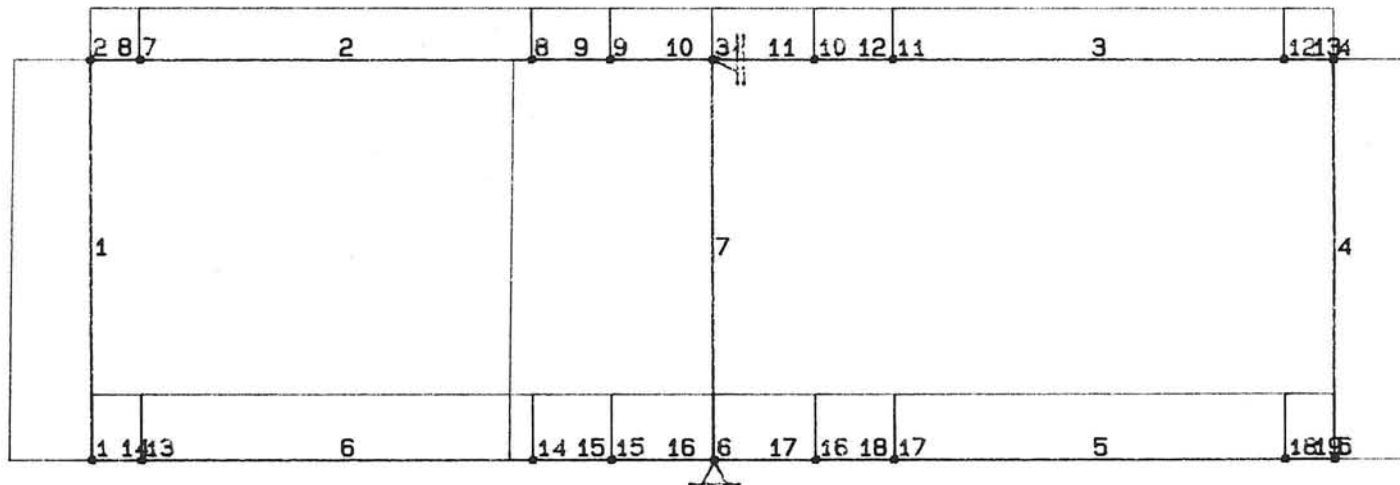
| Staafkrachten in lokaal assenstelsel. |         |         |             |             |             |             |              |              |
|---------------------------------------|---------|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| Stf nr.                               | St knp  | End knp | Fx beg (kN) | Fx end (kN) | Fy beg (kN) | Fy end (kN) | Tz beg (kNm) | Tz end (kNm) |
| 1                                     | 1       | 2       | 2235.420    | -2061.269   | 1505.496    | 1264.849    | 2548.034     | -2467.854    |
| 2                                     | 2       | 3       | 1399.943    | -1399.943   | 1887.807    | 2695.432    | 2473.110     | -7274.441    |
| 3                                     | 3       | 4       | 1399.943    | -1399.943   | 2695.432    | 1887.807    | 7274.441     | -2473.110    |
| 4                                     | 4       | 5       | 2061.269    | -2235.420   | 1264.849    | 1505.496    | 2467.854     | -2548.034    |
| 5                                     | 6       | 5       | 1778.376    | -1778.376   | -2774.250   | -2052.733   | -6796.696    | 2507.275     |
| 6                                     | 1       | 6       | 1778.376    | -1778.376   | -2052.733   | -2774.250   | -2507.275    | 6796.696     |
| 7                                     | 6       | 3       | 5565.014    | -5390.863   | -0.000      | 0.000       | -0.000       | -0.000       |
| Extrema veldmomenten.                 |         |         |             |             |             |             |              |              |
| Stf nr.                               | Beg knp | End knp | M beg (kNm) | M end (kNm) | M min (kNm) | Mmin plaats | M max (kNm)  | Mmax plaats  |
| 1                                     | 1       | 2       | 2548.034    | -2467.854   | -145.652    | 0.4840157   | 2548.034     | 0.0000000    |
| 2                                     | 2       | 3       | 2473.110    | -7274.441   | -2149.576   | 0.4118936   | 7274.441     | 1.0000000    |
| 3                                     | 3       | 4       | 7274.441    | -2473.110   | -2149.576   | 0.5881064   | 7274.441     | 0.0000000    |
| 4                                     | 4       | 5       | 2467.854    | -2548.034   | -145.652    | 0.5159843   | 2548.034     | 1.0000000    |
| 5                                     | 6       | 5       | -6796.696   | 2507.275    | -6796.696   | 0.0000000   | 2682.410     | 0.4252621    |
| 6                                     | 1       | 6       | -2507.275   | 6796.696    | -6796.696   | 1.0000000   | 2682.410     | 0.5747379    |





Schaal 1: 124



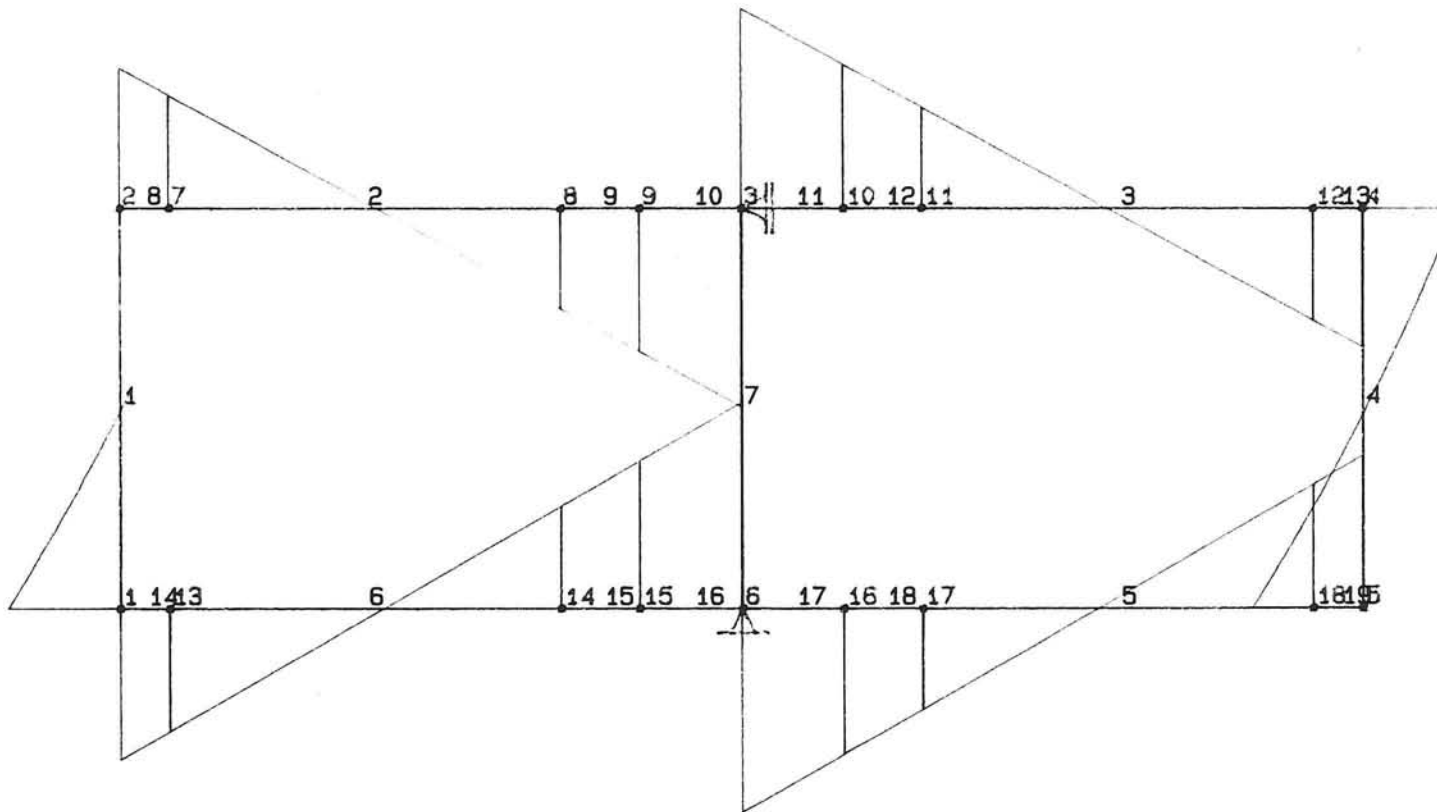


5565.01 (kN)

Bel.geval 1+2+3+4+5



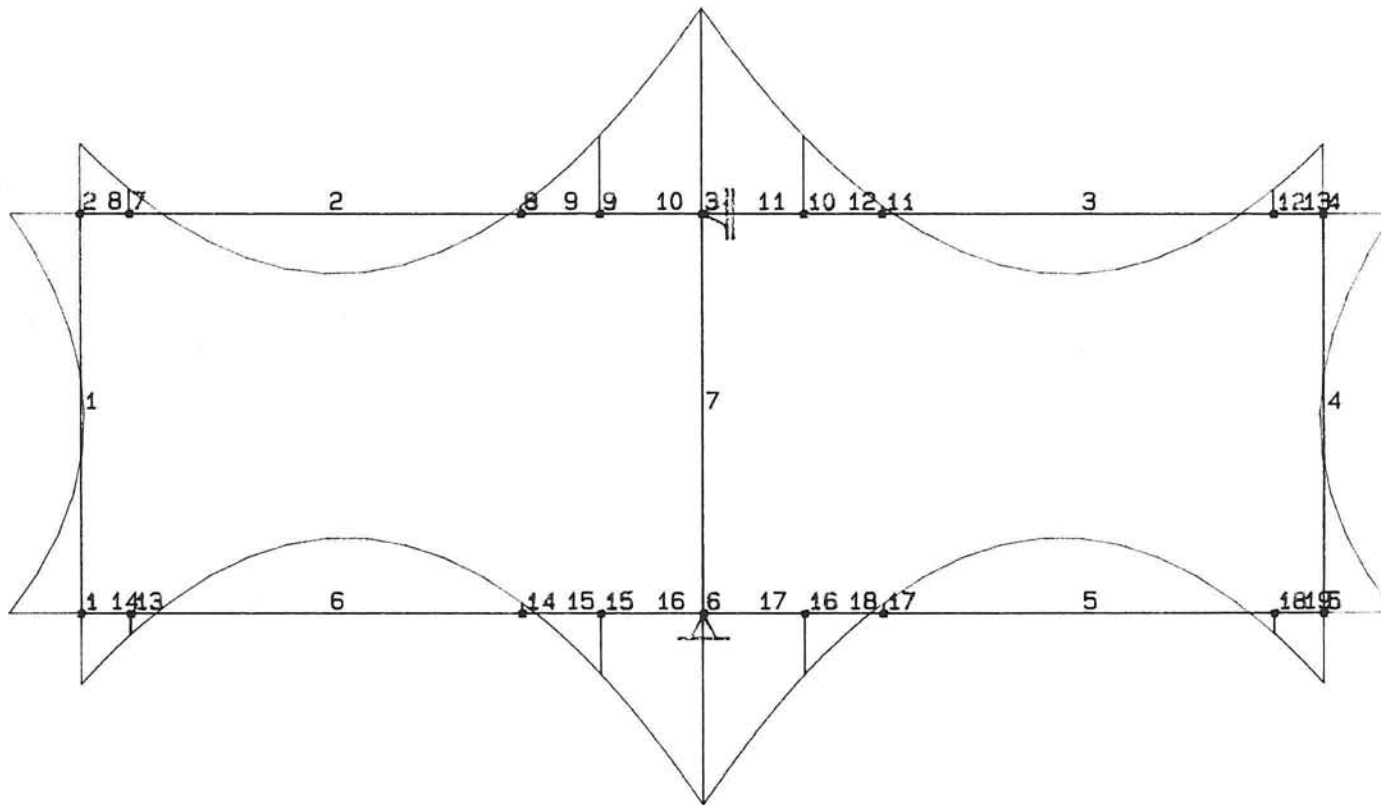




2774.25 (kN)

Bel.geval 1+2+3+4+5





7274.44 (kNm)

Bel.geval 1+2+3+4+5



### 9.3.5 Numerieke berekening m.b.v. veren.

Naast de doorsnede-berekening met het programma PC-Frame is ter vergelijking een berekening uitgevoerd met behulp van veren.

Voor deze numerieke berekening met verend elastische ondersteuning is gebruik gemaakt van het bij Rijkswaterstaat ontwikkelde raamwerkprogramma AIVEXE. Zoals reeds eerder is gezegd kan dit programma goed overweg met het geval dat grond trek zou moeten opnemen.

Bij de berekening met elastische ondersteuning wordt gebruik gemaakt van de *beddingsconstante*  $c$ . De gelijkmatig verdeelde elastische reactiekracht  $p$  van de grond op de constructie is dan als volgt gedefinieerd:

$$p = c \cdot v$$

waarbij  $v$  de verticale verplaatsing van de ligger is.

Er wordt dus aangenomen dat de reactie  $q$  overal onder de vloer evenredig is met de daar optredende verticale indrukking  $v$ . De enige moeilijkheid in deze berekening is het vaststellen van een goede, representatieve waarde van de beddingsconstante  $c$ . In de praktijk houdt men meestal een waarde van  $c = 1E4$  kN/m<sup>3</sup> aan. Toch zit in deze constante een vrij grote onnauwkeurigheid waarmee het rekenprogramma gevoed wordt.

De invoer van het programma is vrijwel identiek aan de invoer bij PC-Frame. Het enige verschil is dus de ondersteuning van de constructie. Ook bij deze berekening moeten wat extra (horizontale) ondersteuning worden aangebracht, omdat anders de rekenmatrix singulier wordt. De complete in- en uitvoer van het programma is te vinden in bijlage J.

In de hiernavolgende tabel zijn de staafkrachten in het lokale assenstelsel weergegeven. Deze tabel is vergelijkbaar met de tabel, weergegeven op pagina 117.

N.B. het assenstelsel, dat gehanteerd wordt in het programma AIVEXE is afwijkend van het assenstelsel gebruikt in PC-Frame. Binnen AIVEXE is de x-as ook naar rechts gericht, maar de y-as naar beneden. Hieruit volgt dan dat de rotatie om de z-as met de klok mee positief is.

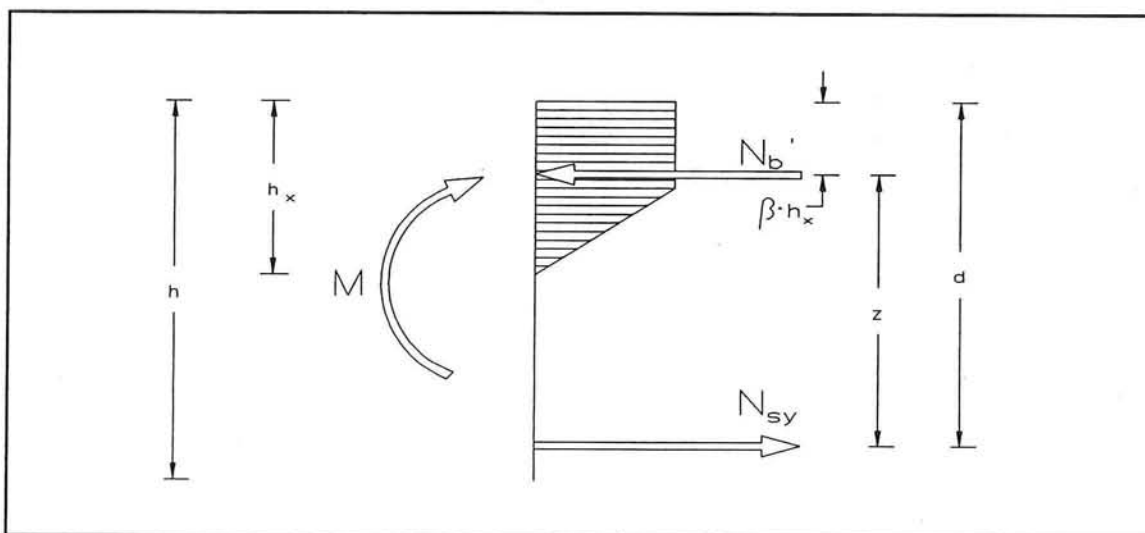


| Staafkrachten in lokaal assenstelsel. |         |         |             |             |             |             |              |              |
|---------------------------------------|---------|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| Stf nr.                               | St knp  | End knp | Fx beg (kN) | Fx end (kN) | Fy beg (kN) | Fy end (kN) | Tz beg (kNm) | Tz end (kNm) |
| 1                                     | 1       | 2       | 2240.896    | -2066.745   | -1495.043   | -1275.301   | -2496.261    | 2496.096     |
| 2                                     | 2       | 3       | 1410.395    | -1410.395   | -1893.283   | -2689.956   | -2501.352    | 7237.572     |
| 3                                     | 3       | 4       | 1405.424    | -1405.424   | -2689.956   | -1893.283   | -7237.572    | 2501.352     |
| 4                                     | 4       | 5       | 2066.745    | -2240.896   | -1275.301   | -1495.043   | -2496.096    | 2496.261     |
| 5                                     | 6       | 5       | 1767.923    | -1767.923   | 2777.031    | 2058.209    | 6703.013     | -2455.502    |
| 6                                     | 1       | 6       | 1767.923    | -1767.923   | 2058.209    | 2777.031    | 2455.502     | -6703.013    |
| 7                                     | 6       | 3       | 5554.062    | -5379.911   | 0.000       | -0.000      | 0.000        | 0.000        |
| Extrema veldmomenten.                 |         |         |             |             |             |             |              |              |
| Stf nr.                               | Beg knp | End knp | M beg (kNm) | M end (kNm) |             |             |              |              |
| 1                                     | 1       | 2       | 2496.261    | -2496.096   |             |             |              |              |
| 2                                     | 2       | 3       | 2501.352    | -7237.572   |             |             |              |              |
| 3                                     | 3       | 4       | 7237.572    | -2501.352   |             |             |              |              |
| 4                                     | 4       | 5       | 2496.096    | -2496.261   |             |             |              |              |
| 5                                     | 6       | 5       | -6703.013   | 2455.502    |             |             |              |              |
| 6                                     | 1       | 6       | -2455.502   | 6703.013    |             |             |              |              |

### 9.3.6 Keuze berekening.

Vergelijken we bovenstaande uitkomsten met de uitkomsten van PC-Frame, dan is te zien dat de gevonden waarden niet extreem veel afwijken. De waarden van AIVEXE zijn gemiddeld 2% lager dan die van PC-Frame. Dit verschil is uiteraard te zoeken in de juistheid van de schatting van de beddingsconstante  $c$ .

Bij de dimensionering en wapeningsberekening van de constructie-doorsnede is uitgegaan van de uitkomsten, verkregen met het raamwerkprogramma PC-Frame.



Figuur 9.30 Momenten-evenwicht in doorsnede.



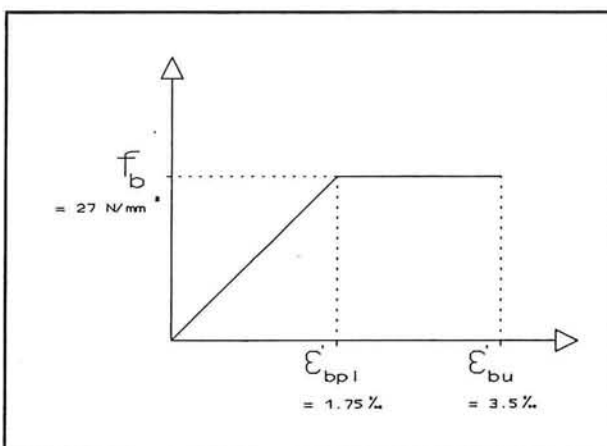
## 9.4 Bepaling dwarswapening in vloer, dak en wanden van zinkelement.

### 9.4.1 Inleiding.

Via bovenstaande berekeningen is een duidelijk beeld verkregen omtrent de krachtwerking in de doorsnede van het zinkelement. Het is nu mogelijk om de dwarswapening in de doorsnede van het element te bepalen. Voor alle duidelijkheid: met dwarswapening wordt de wapening loodrecht op de as van het tunnelement bedoeld.

Binnen de berekening is uitgegaan van de volgende materiaalconstanten:

- Betonstaal : FeB500  $f_s = 435 \text{ N/mm}^2$   $E_s = 200000 \text{ N/mm}^2$
- Beton : B35  $f_b = 21 \text{ N/mm}^2$   $E_b = 32000 \text{ N/mm}^2$



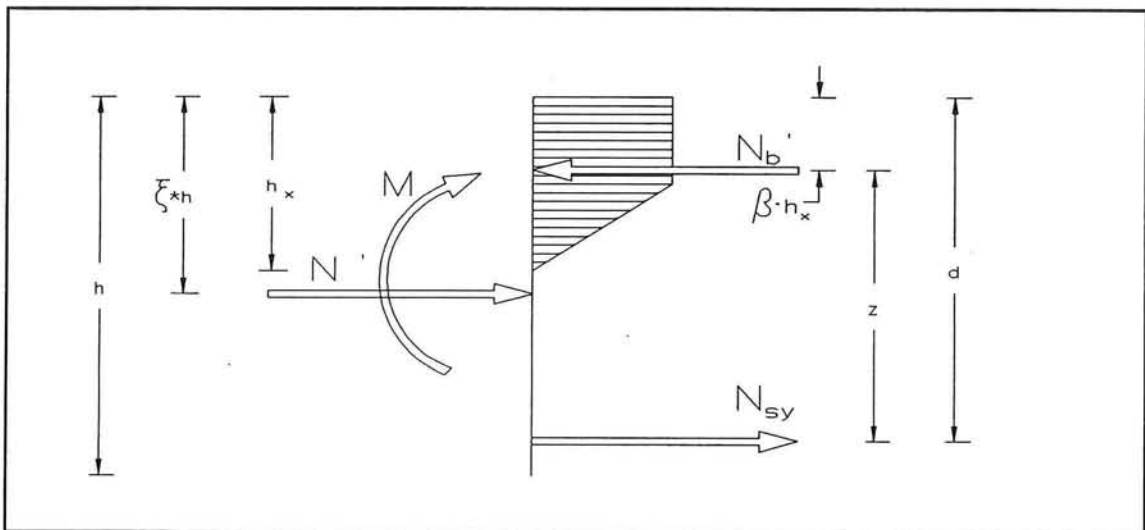
Figuur 9.29  $\sigma$ - $\epsilon$  diagram beton.

### 9.4.2 Berekeningswijze dwarswapening.

Zowel de vloer, het dak als de wand zijn elementen die op buiging en normaal(druk)kracht worden belast. Doordat de normaalkracht in de elementen relatief hoog is, kan de benodigde dwarswapening aanzienlijk worden gereduceerd.

In het geval sprake is van een balk belast op zuivere buiging, volgt de dwarswapening uit de volgende evenwichtsvergelijkingen (zie figuur 9.30):

$$\begin{aligned} \sum H = 0 : N_b' &= N_{sy} \\ \sum M = 0 : M &= N_{sy} \cdot z \quad \text{met: } z = d - \beta \cdot h_x \end{aligned}$$



Figuur 9.31 Momenten-evenwicht in doorsnede met drukkracht  $N'$ .

er geldt:

$$\begin{aligned} N_{sy} &= A_s \cdot f_{sy} \\ N_b' &= \alpha \cdot b \cdot h_x \cdot f_b' \end{aligned}$$

waaruit volgt:

$$M = A_s \cdot f_{sy} \cdot d - \frac{\beta}{\alpha} \cdot \frac{A_s^2 \cdot f_{sy}}{b \cdot f_b'}$$

met  $\omega_d = \frac{A_s}{b \cdot d}$  volgt:

$$M = A_s \cdot f_{sy} \cdot d \cdot \left( 1 - \frac{\beta \cdot f_{sy}}{\alpha \cdot f_b'} \cdot \omega_d \right) \quad (a)$$

Indien we de normaalkracht  $N'$  in rekening brengen (hetgeen geoorloofd is, omdat de normaalkracht altijd gelijktijdig met het buigend moment optreedt) dan worden de bovenstaande vergelijkingen als volgt (zie figuur 9.31):

$$\begin{aligned} \Sigma H = 0 : \quad N_b' &= N_{sy} + N' \\ \Sigma M = 0 : \quad M &= (\xi \cdot h - \beta \cdot h_x) \cdot N_b' + (d - \xi \cdot h) \cdot N_{sy} \end{aligned}$$

er geldt:

$$N_b' = A_s \cdot f_{sy} + N' \quad (i)$$

$$\begin{aligned} \alpha \cdot b \cdot h_x \cdot f_b' &= A_s \cdot f_{sy} + N' \\ h_x &= \frac{A_s \cdot f_{sy} + N'}{\alpha \cdot b \cdot f_b'} = \frac{A_s \cdot f_{sy}}{\alpha \cdot b \cdot f_b'} + \frac{N'}{\alpha \cdot b \cdot f_b'} \quad (ii) \end{aligned}$$



(i) invullen:

$$M = \xi \cdot h \cdot A_s \cdot f_{sy} + \xi \cdot h \cdot N' - \beta \cdot h_x \cdot A_s \cdot f_{sy} - \beta \cdot h_x \cdot N' + d \cdot A_s \cdot f_{sy} - \xi \cdot h \cdot A_s \cdot f_{sy}$$

$$M = \xi \cdot h \cdot N' - \beta \cdot h_x \cdot A_s \cdot f_{sy} - \beta \cdot h_x \cdot N' + d \cdot A_s \cdot f_{sy}$$

(ii) invullen:

$$M = \xi \cdot h \cdot N' - \frac{\beta \cdot A_s \cdot f_{sy} \cdot A_s \cdot f_{sy}}{\alpha \cdot b \cdot f'_b} - \frac{\beta \cdot A_s \cdot f_{sy} \cdot N'}{\alpha \cdot b \cdot f'_b} - \frac{\beta \cdot A_s \cdot f_{sy} \cdot N'}{\alpha \cdot b \cdot f'_b}$$

$$- \frac{\beta \cdot N' \cdot N'}{\alpha \cdot b \cdot f'_b} + d \cdot A_s \cdot f_{sy}$$

$$M = \xi \cdot h \cdot N' - \frac{\beta \cdot f_{sy}^2}{\alpha \cdot b \cdot f'_b} \cdot A_s^2 - \frac{2 \cdot \beta \cdot f_{sy} \cdot N'}{\alpha \cdot b \cdot f'_b} \cdot A_s - \frac{\beta \cdot N'^2}{\alpha \cdot b \cdot f'_b} + d \cdot A_s \cdot f_{sy}$$

(VBC 1990:  $\alpha=0.75$  en  $\beta=0.39$ )

Dus:

$$M_u = \xi \cdot h \cdot N' - 0.52 \cdot \frac{f_{sy}^2}{b \cdot f'_b} - 2 \cdot 0.52 \cdot \frac{f_{sy} \cdot N'}{b \cdot f'_b} \cdot A_s - 0.52 \cdot \frac{N'^2}{b \cdot f'_b} + d \cdot f_{sy} \cdot A_s$$

Dit is dus een vierkantsvergelijking in de wapeningsdoorsnede  $A_s$ . Vergelijken we deze laatste vergelijking met de vergelijking waarin de normaalkracht  $N'$  niet is meegenomen, dan is te zien dat de termen met  $N'$  een flinke reductie op het rekenmoment  $M_u$ , en daarmee een reductie op de benodigde hoeveelheid wapening  $A_s$  geven.

Als voorbeeld hiervoor beschouwen we het maximum moment in het veld van het linker vloerdeel (staaf 6), welke ligt op  $x = 6.83$  m. Vergeleken wordt (1.), de benodigde wapening zònder het in rekening brengen van de normaalkracht  $N'$  met (2.), de benodigde wapening waarbij de normaalkracht  $N'$  wèl in rekening is gebracht.

|      | $N'$ [kN] | $M$ [kNm] | $A_s$ [mm <sup>2</sup> ] | %     | %     |
|------|-----------|-----------|--------------------------|-------|-------|
| (1.) | 0         | 2682.410  | 5754                     | 151 % | 100 % |
| (2.) | -1778.376 | 2682.410  | 3813                     | 100 % | 66 %  |



### 9.4.3 Berekening dwarswapening tunneldoorsnede.

Uitgaande van de onder §9.3.4 berekende momenten, normaalkrachten en dwarskrachten is de dwarswapening bepaald voor de vloer, het dak en de wanden.

Vervolgens is de voor het moment benodigde wapening aan een scheurwijdte-controle onderworpen. Voor deze controle is uitgegaan van de gebruikstoestand; d.w.z. dat de veiligheidsfactor voor de belastingen  $\gamma=1.0$  bedraagt. Een volledig overzicht van de momenten, normaal- en dwarskrachten in de gebruikstoestand is weergegeven in bijlage I. Bij de scheurwijdte-controle bleek het dat het noodzakelijk was om op een paar plaatsen de hoeveelheid wapening  $A_s$  enigszins te vergroten, om aan de gestelde scheurwijdte-eis van  $w = 0.40$  mm te voldoen. De plaatsen waar dit noodzakelijk was zijn:

- onderwapening van het dak in het veld, verhoging  $A_s$  met ca.18%.
- bovenwapening in het dak t.p.v. de buitenwanden, verhoging  $A_s$  met ca.26%.
- bovenwapening in het dak t.p.v. de mideaanondersteuning, verhoging  $A_s$  met ca.17%.

In onderstaande tabellen is de benodigde langswapening  $A_s$  als functie van de afstand over de lengte-as van het element weergegeven, alsmede een (mogelijke) praktische wapening.

Ter oriëntatie:

| Element | Staafl | Beginknoop (i) | Eindknoop (j) | Staaflengte [m] | Staafl dikte [mm] |
|---------|--------|----------------|---------------|-----------------|-------------------|
| Vloer   | 6      | 1              | 6             | 11.890          | 1200              |
| Dak     | 2      | 2              | 3             | 11.890          | 1000              |
| Wand    | 1      | 1              | 2             | 7.655           | 900               |

N.B. Bovenstaande heeft uiteraard betrekking op slechts de linker helft van de (symmetrische) constructie.





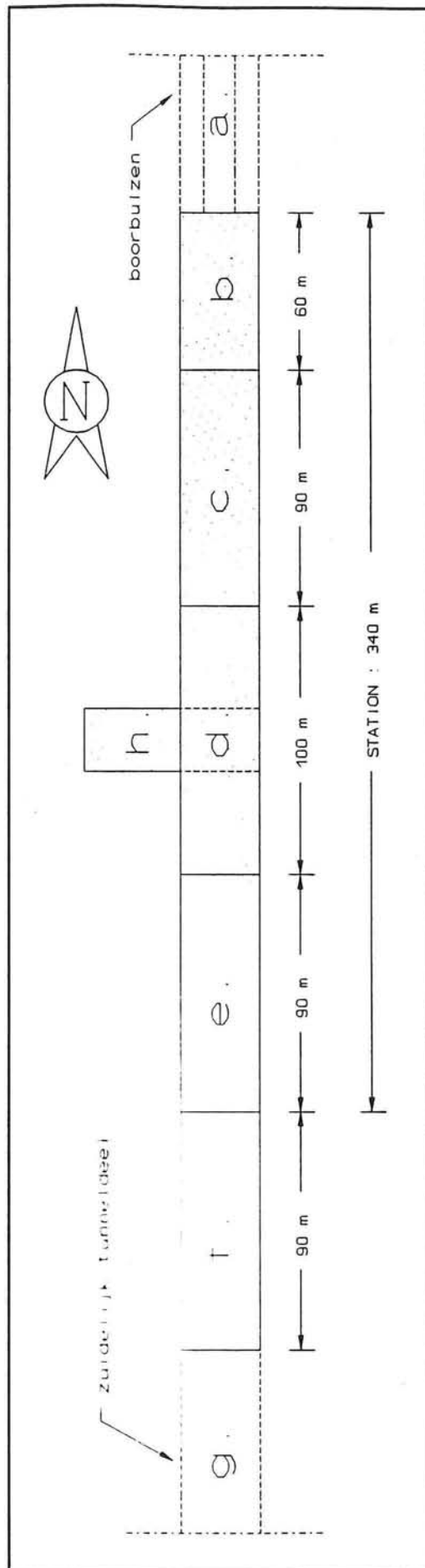
| Dwarswapening in vloer $A_{s, min} = 2025 \text{ mm}^2$ ( $\phi 20-150$ ) |                         |                             |                         |               |
|---|-------------------------|-----------------------------|-------------------------|---------------|
| Plaats<br>[m]   | Wapening onder          |                             | Wapening boven          |               |
|   | $A_s$ [ $\text{mm}^2$ ] | praktisch                   | $A_s$ [ $\text{mm}^2$ ] | praktisch     |
| 0.000   | 3404                    | $\phi 25-125$               | 0                       | $\phi 20-150$ |
| 0.594   | 3404                    | $\phi 25-125$               | 0                       | $\phi 20-150$ |
| 1.189   | 2936                    | $\phi 25-125$               | 262                     | $\phi 20-150$ |
| 1.783   | 395                     | $\phi 20-150$               | 1596                    | $\phi 20-150$ |
| 2.378   | 0                       | $\phi 20-150$               | 2631                    | $\phi 25-150$ |
| 2.972   | 0                       | $\phi 20-150$               | 3351                    | $\phi 25-125$ |
| 3.567   | 0                       | $\phi 20-150$               | 3743                    | $\phi 25-125$ |
| 4.161   | 0                       | $\phi 20-150$               | 3813                    | $\phi 25-125$ |
| 4.756   | 0                       | $\phi 20-150$               | 3813                    | $\phi 25-125$ |
| 5.350   | 0                       | $\phi 20-150$               | 3813                    | $\phi 25-125$ |
| 5.945   | 0                       | $\phi 20-150$               | 3813                    | $\phi 25-125$ |
| 6.539   | 0                       | $\phi 20-150$               | 3743                    | $\phi 25-125$ |
| 7.134   | 0                       | $\phi 20-150$               | 3351                    | $\phi 25-125$ |
| 7.728   | 0                       | $\phi 20-150$               | 2631                    | $\phi 25-150$ |
| 8.323   | 396                     | $\phi 20-150$               | 1595                    | $\phi 20-150$ |
| 8.917   | 3111                    | $\phi 25-150$               | 375                     | $\phi 20-150$ |
| 9.512   | 5988                    | $\phi 32-100 + \phi 25-150$ | 0                       | $\phi 20-150$ |
| 10.106  | 8503                    | $\phi 32-100 + \phi 25-150$ | 0                       | $\phi 20-150$ |
| 10.701  | 10532                   | $\phi 32-100 + \phi 25-150$ | 0                       | $\phi 20-150$ |
| 11.295  | 9806                    | $\phi 32-100 + \phi 25-150$ | 0                       | $\phi 20-150$ |
| 11.890  | 9165                    | $\phi 32-125 + \phi 25-150$ | 0                       | $\phi 20-150$ |



| Dwarswapening in dak $A_{s, \text{max}} = 1665 \text{ mm}^2 (\phi 20-150)$ |                          |               |                          |                             |
|--|--------------------------|---------------|--------------------------|-----------------------------|
| Plaats<br>[m]  | Wapening onder           |               | Wapening boven           |                             |
|  | $A_s$ [mm <sup>2</sup> ] | praktisch     | $A_s$ [mm <sup>2</sup> ] | praktisch                   |
| 0.000  | 0                        | $\phi 20-150$ | 5098                     | $\phi 32-125$               |
| 0.594  | 0                        | $\phi 20-150$ | 5098                     | $\phi 32-125$               |
| 1.189  | 0                        | $\phi 20-150$ | 3507                     | $\phi 32-125$               |
| 1.783  | 1459                     | $\phi 20-150$ | 763                      | $\phi 20-150$               |
| 2.378  | 2687                     | $\phi 25-100$ | 0                        | $\phi 20-150$               |
| 2.972  | 3557                     | $\phi 25-100$ | 0                        | $\phi 20-150$               |
| 3.567  | 4047                     | $\phi 25-100$ | 0                        | $\phi 20-150$               |
| 4.161  | 4146                     | $\phi 25-100$ | 0                        | $\phi 20-150$               |
| 4.756  | 4146                     | $\phi 25-100$ | 0                        | $\phi 20-150$               |
| 5.350  | 4146                     | $\phi 25-100$ | 0                        | $\phi 20-150$               |
| 5.945  | 4146                     | $\phi 25-100$ | 0                        | $\phi 20-150$               |
| 6.539  | 3849                     | $\phi 25-100$ | 0                        | $\phi 20-150$               |
| 7.134  | 3164                     | $\phi 25-100$ | 0                        | $\phi 20-150$               |
| 7.728  | 2111                     | $\phi 25-100$ | 0                        | $\phi 20-150$               |
| 8.323  | 713                      | $\phi 20-150$ | 2079                     | $\phi 20-150$               |
| 8.917  | 0                        | $\phi 20-150$ | 4974                     | $\phi 32-100$               |
| 9.512  | 0                        | $\phi 20-150$ | 7776                     | $\phi 32-100$               |
| 10.106   | 0                        | $\phi 20-150$ | 10580                    | $\phi 32-100 + \phi 25-100$ |
| 10.701   | 0                        | $\phi 20-150$ | 12778                    | $\phi 32-100 + \phi 25-100$ |
| 11.295   | 0                        | $\phi 20-150$ | 11472                    | $\phi 32-100 + \phi 25-100$ |
| 11.890   | 0                        | $\phi 20-150$ | 10403                    | $\phi 32-100 + \phi 25-100$ |



| Dwarswapening in wand $A_{s, min} = 1485 \text{ mm}^2$ ( $\phi 20-150$ ) |                          |               |                          |               |
|--|--------------------------|---------------|--------------------------|---------------|
| Plaats<br>[m]  | Wapening binnen          |               | Wapening buiten          |               |
|  | $A_s$ [mm <sup>2</sup> ] | praktisch     | $A_s$ [mm <sup>2</sup> ] | praktisch     |
| 0.000  | 0                        | $\phi 20-150$ | 5582                     | $\phi 32-140$ |
| 0.383  | 0                        | $\phi 20-150$ | 5590                     | $\phi 32-140$ |
| 0.765  | 0                        | $\phi 20-150$ | 5598                     | $\phi 32-140$ |
| 1.148  | 0                        | $\phi 20-150$ | 3970                     | $\phi 32-140$ |
| 1.531  | 0                        | $\phi 20-150$ | 2307                     | $\phi 20-100$ |
| 1.914  | 0                        | $\phi 20-150$ | 920                      | $\phi 20-150$ |
| 2.296  | 0                        | $\phi 20-150$ | 0                        | $\phi 20-150$ |
| 2.679  | 0                        | $\phi 20-150$ | 0                        | $\phi 20-150$ |
| 3.062  | 0                        | $\phi 20-150$ | 0                        | $\phi 20-150$ |
| 3.445  | 0                        | $\phi 20-150$ | 0                        | $\phi 20-150$ |
| 3.827  | 0                        | $\phi 20-150$ | 0                        | $\phi 20-150$ |
| 4.210  | 0                        | $\phi 20-150$ | 0                        | $\phi 20-150$ |
| 4.593  | 0                        | $\phi 20-150$ | 0                        | $\phi 20-150$ |
| 4.976  | 0                        | $\phi 20-150$ | 0                        | $\phi 20-150$ |
| 5.358  | 0                        | $\phi 20-150$ | 201                      | $\phi 20-150$ |
| 5.741  | 0                        | $\phi 20-150$ | 1302                     | $\phi 20-150$ |
| 6.124  | 0                        | $\phi 20-150$ | 2580                     | $\phi 20-100$ |
| 6.507  | 0                        | $\phi 20-150$ | 4050                     | $\phi 32-140$ |
| 6.889  | 0                        | $\phi 20-150$ | 5437                     | $\phi 32-140$ |
| 7.272  | 0                        | $\phi 20-150$ | 5445                     | $\phi 32-140$ |
| 7.655  | 0                        | $\phi 20-150$ | 5453                     | $\phi 32-140$ |



Figuur 10.1 Overzicht stationstracé. (zie ook de tabel)

## 10. Uitvoering Ondergronds station Delft.

### 10.1 Inleiding.

In hoofdstuk 7 is gekozen om het ondergrondse station uit te voeren door middel van het afzinken van tunnelementen. Het station is daarbij opgedeeld in 4 tunneldelen en een haldeel:

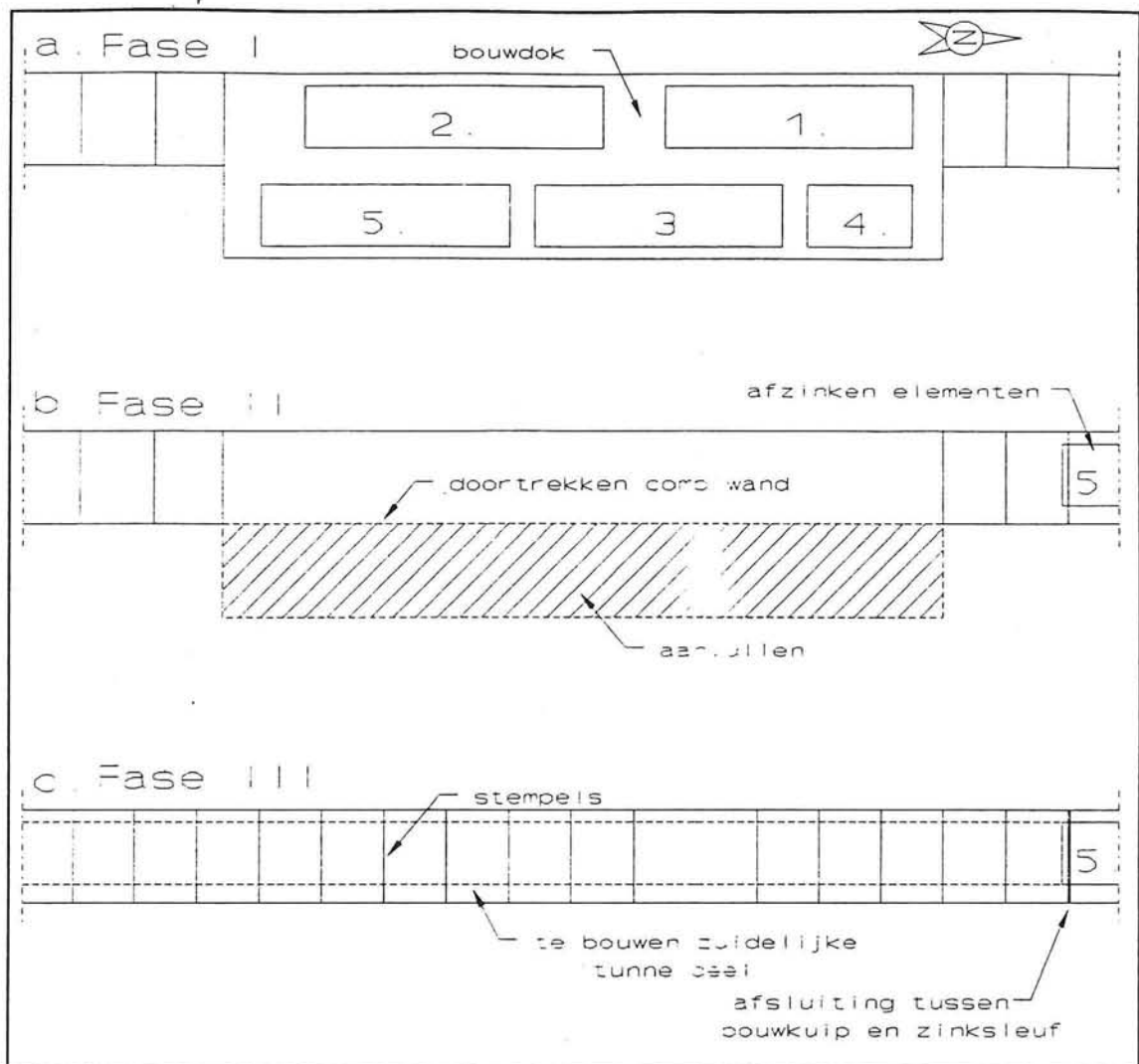
- Keerkuipdeel : 60 m (*open bouwput*)
- Noordelijke deel : 90 m (*zinkelement*)
- Middelste deel : 100 m (*zinkelement*)
- Zuidelijke deel : 90 m (*zinkelement*)
- Haldeel : 35.5 m (*zinkelement*)

Het tunnelgedeelte vanaf het station in zuidelijke richting wordt over een afstand van 90 meter eveneens uitgevoerd met een zinkelement. Het resterende gedeelte van het zuidelijke tunneldeel wordt uitgevoerd in een droge bouwkuip.

Zoals in hoofdstuk 7 reeds is beschreven, is afgezien van het idee om dit zuidelijke tunneldeel eveneens met behulp van zinkelementen uit te voeren, aangezien in dat geval een zeer groot bouwdok noodzakelijk zou zijn. De ruimte voor een dergelijk groot dok is weliswaar beschikbaar, de kosten echter van zo'n groot bouwdok (ontgraven, transport en opslag van de grond e.d.) bleken dermate hoog te zijn, dat dit een overheersende post in het totale kostenplaatje dreigde te worden.

Gerekend vanaf het boortunneldeel in zuidelijke richting, ziet het stationstracé er dan als volgt uit (ook figuur 10.1):

|    | Gedeelte                   | Lengte    | Methode                   | Onderdeel |
|----|----------------------------|-----------|---------------------------|-----------|
| a. | boortunneldeel             | ca.1600 m | <i>boren</i>              | TUNNEL    |
| b. | keerkuipdeel               | 60 m      | <i>droge open bouwput</i> | STATION   |
| c. | noordelijke deel           | 90 m      | <i>zinkelement</i>        |           |
| d. | middelste deel             | 100 m     | <i>zinkelement</i>        |           |
| e. | zuidelijke deel            | 90 m      | <i>zinkelement</i>        |           |
| f. | zinkdeel zuidelijke tunnel | 90 m      | <i>zinkelement</i>        | TUNNEL    |
| g. | zuidelijke tunnel          | ca.1500 m | <i>droge open bouwput</i> |           |
| h. | haldeel                    | 35.5 m    | <i>zinkelement</i>        |           |



Figuur 10.2 Uitvoeringsfasen.



### ■ Uitvoeringsfasen.

De nu gekozen uitvoeringsmethodiek kent de volgende uitvoeringsfasen (zie figuur 10.2 a, b en c):

In de eerste fase wordt het bouwdok voor de zinkelementen gemaakt. Dit bouwdok wordt geïntegreerd met het gedeelte waar in een later stadium in situ het resterende tunnelgedeelte wordt gemaakt. De ontgraven grond kan op de ruimte naast het bouwdok worden opgeslagen. Zodra het bouwdok gereed is en is drooggezet, kan het bouwdok worden ingericht en kunnen de zinkelementen worden gemaakt.

In de tweede fase wordt het bouwdok, zodra de zinkelementen gereed zijn, geïnundeerd. De elementen kunnen nu worden uitgevaren en afgezonken. Het bouwdok wordt deels aangevuld, waarna de grond wordt verdicht. Daarna worden de combiwanden ter weerszijden van het tijdelijke bouwdok met een laatste stuk combiwand verlengd, zodat een doorgaande tunnelsleuf ontstaat.

In de derde fase wordt tussen de combiwanden een stempeling aangebracht en wordt (nat) ontgraven, totdat het gewenste niveau is bereikt. De paalkoppen van de van tevoren ingeheide trekpalen komen zo bloot te liggen. Na met behulp van duikers de bodem geëgaliseerd te hebben en de damwandkassen te hebben schoongemaakt, kan onderwaterbeton worden gestort. Nadat dit voldoende is verhard, kan de bouwkuip worden drooggemaakt. De onderwaterbetonvloer werkt als tweede stempellaag op de combiwanden. Het tunneldeel gerekend zuidwaarts vanaf de zinkelementen kan nu in den droge worden gemaakt. De tunnelbekisting, welke gebruikt is bij het maken van de zinkelementen, kan ook hier worden ingezet.

### ■ Locatievariant.

Naast de bovenomschreven uitvoeringsmethodiek is in hoofdstuk 7 ook gekozen voor een locatievariant voor het station, daar dit uitvoeringstechnisch vele malen gunstiger is, en een logischer structuur voor het totale stationscomplex oplevert. Deze variant is weergegeven in figuur 7.4.

### ■ Aandachtspunten.

Ten aanzien van de uitvoering van het station zijn een aantal aandachtspunten gesignaleerd, die een nadere uitwerking behoeven. Deze punten zijn:

- Het bouwdok.
- Fabricage van de elementen.
- De zinksleuf.
- Kruising van de zinksleuf met de Irenetunnel.
- De hal-opbouw op het element.
- De keerkuip annex landhoofd.
- Transport en afzinken van de elementen.



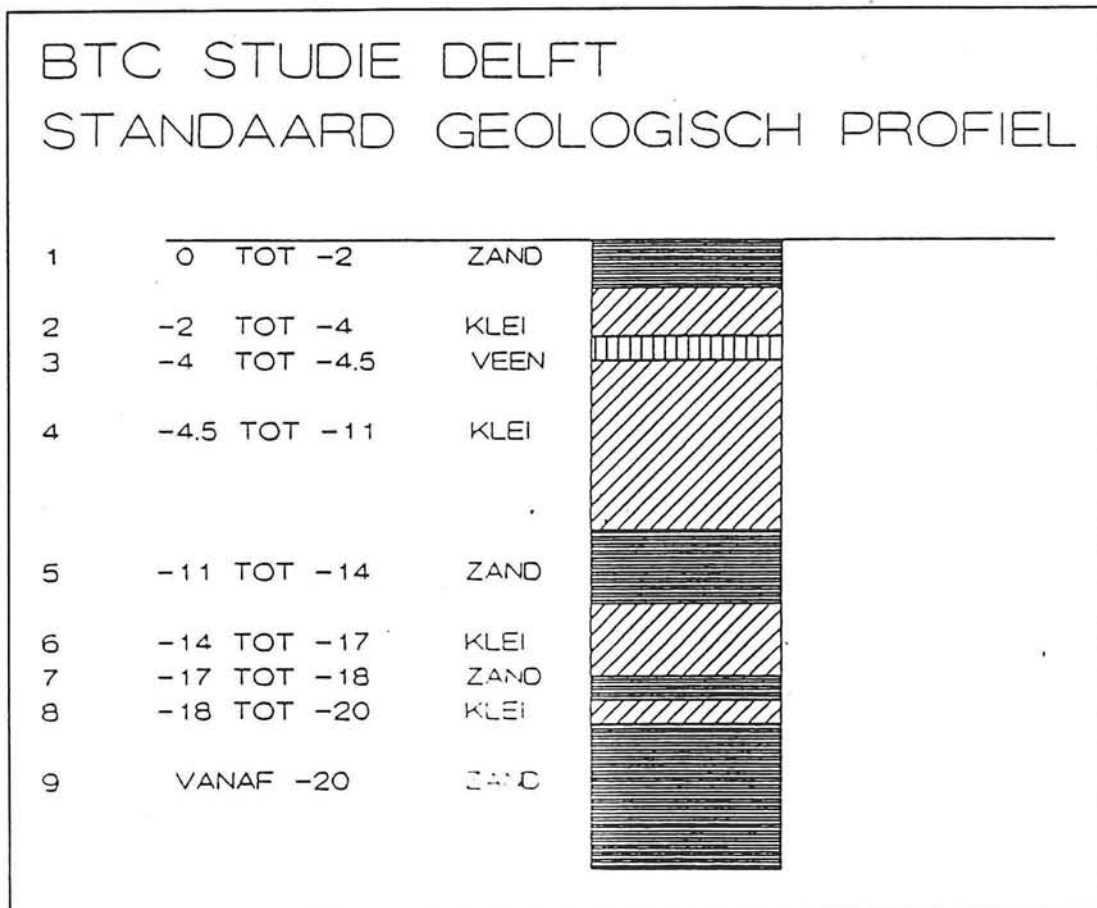
■ Planning en fasering van de activiteiten. (tijdschema)

Deze aandachtspunten komen in dit hoofdstuk stuk voor stuk aan de orde.

## 10.2 Grondgegevens.

### 10.2.1 Inleiding.

Alvorens berekeningen kunnen worden gemaakt ten behoeve van bijvoorbeeld het bouwdok en de zinksleuf, worden eerst de benodigde bodemgegevens systematisch op een rij gezet. Voor de NS-BTC-studie is een groot aantal sonderingen langs het traject van de tunnel verzameld. In dit afstudeerwerk wordt uitgegaan van het door NS-BTC ontwikkelde standaard geologisch profiel, hetgeen kan worden beschouwd als een redelijke doorsnede van de beschikbare gegevens (zie figuur 10.3).



Figuur 10.3 Standaard geologisch profiel volgens NS BTC

### 10.2.2 Grondparameters.

Van de diverse grondparameters behorend bij de verschillende grondlagen, is in de NS-BTC-studie vrij weinig bekend. Slechts de volumieke gewichten van de natte grond en een enkele inwendige wrijvingshoek zijn vermeld. Voor de ontbrekende gegevens is in de literatuur



gezocht naar bekende parameterwaarden van grondsoorten, die sterke overeenkomsten vertonen met de in Delft aanwezige grondlagen. De gebruikte waarden voor de verschillende grondparameters in dit rapport zijn dus benaderingen en zijn niet exact. Voor de exacte bepaling van deze waarden is ter plaatse van het tunneltraject aanvullend grondonderzoek noodzakelijk.

Voor de diverse grondlagen (1 t/m 9) zijn de volgende grondparameters bij benadering vastgesteld:

| Grondgegevens |            |                  |                                     |                                       |            |              |                          |       |       |       |
|---------------|------------|------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|------------|--------------|--------------------------|-------|-------|-------|
| Laag          | Grondsoort | Plaats t.o.v. MV | $\gamma_{nat}$ [kN/m <sup>3</sup> ] | $\gamma_{droog}$ [kN/m <sup>3</sup> ] | $\phi$ [°] | $\delta$ [°] | $c$ [kN/m <sup>2</sup> ] | $K_a$ | $K_p$ | $K_o$ |
| 1             | zand       | 0 tot -2         | 19.00                               | 16.00                                 | 30.0       | 20.0         | 0.0                      | 0.297 | 6.105 | 0.50  |
| 2             | klei       | -2 tot -4        | 14.50                               | 12.50                                 | 20.0       | 10.0         | 0.0                      | 0.447 | 2.635 | 0.66  |
| 3             | veen       | -4 tot -4.5      | 10.50                               | 2.00                                  | 15.0       | 0.0          | 10.0                     | 0.589 | 1.698 | 0.74  |
| 4             | klei       | -4.5 tot -11     | 14.50                               | 12.50                                 | 17.5       | 8.8          | 12.5                     | 0.493 | 2.296 | 0.70  |
| 5             | zand       | -11 tot -14      | 18.00                               | 16.00                                 | 32.5       | 21.7         | 0.0                      | 0.270 | 7.696 | 0.46  |
| 6             | klei       | -14 tot -17      | 15.00                               | 12.00                                 | 20.0       | 10.0         | 12.5                     | 0.447 | 2.635 | 0.66  |
| 7             | zand       | -17 tot -18      | 19.00                               | 16.00                                 | 30.0       | 20.0         | 0.0                      | 0.297 | 6.105 | 0.50  |
| 8             | klei       | -18 tot -20      | 15.00                               | 14.00                                 | 20.0       | 10.0         | 10.0                     | 0.447 | 2.635 | 0.66  |
| 9             | zand       | -20 en ↓         | 19.00                               | 17.00                                 | 35.0       | 23.3         | 0.0                      | 0.244 | 9.962 | 0.43  |

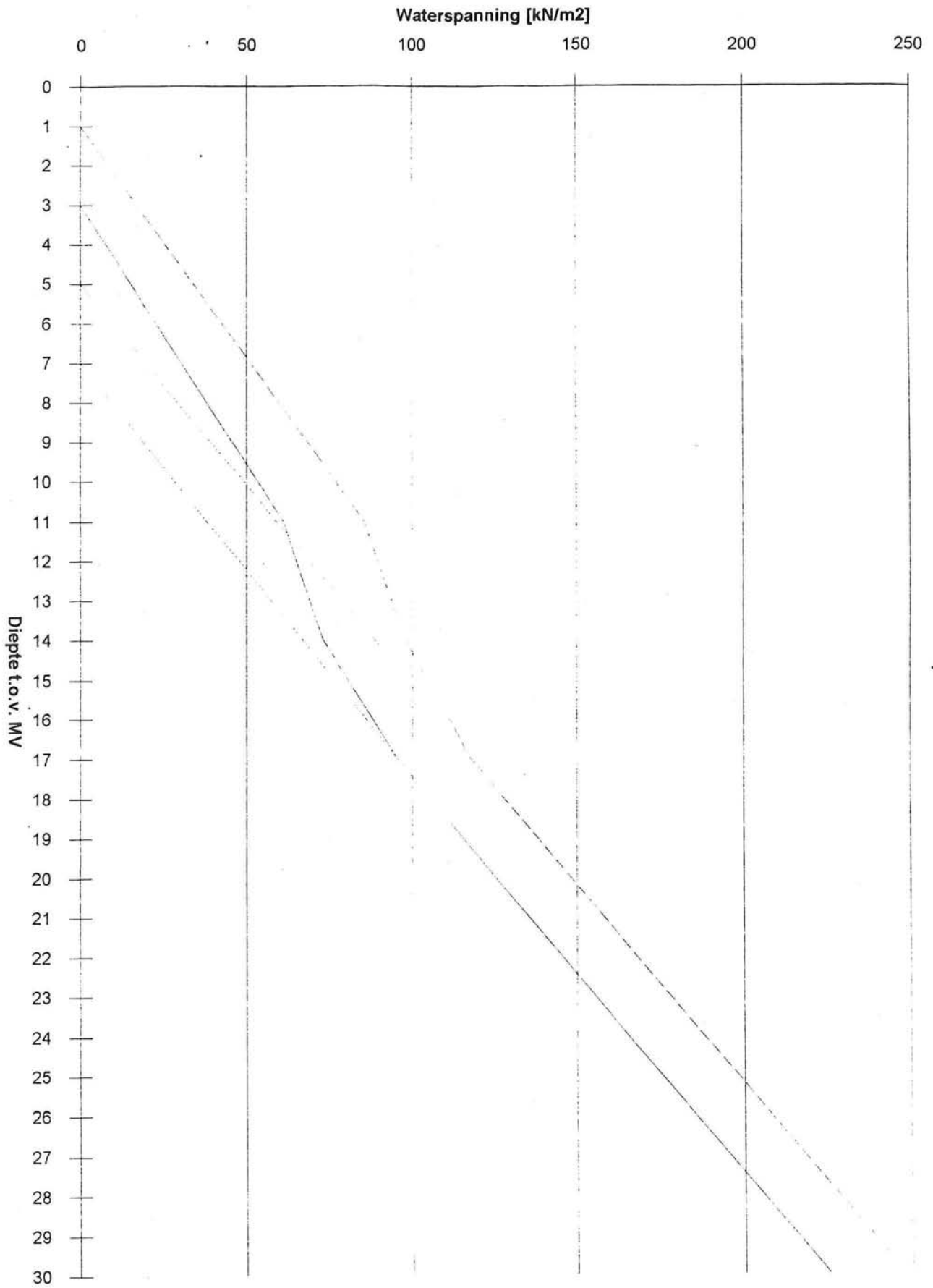
hierbij is:

|                  |                                  |                      |
|------------------|----------------------------------|----------------------|
| $\gamma_{nat}$   | = volumegewicht grond (nat)      | [kN/m <sup>3</sup> ] |
| $\gamma_{droog}$ | = volumegewicht grond (droog)    | [kN/m <sup>3</sup> ] |
| $\phi$           | = hoek van inwendige wrijving    | [°]                  |
| $\delta$         | = hoek van wandwrijving          | [°]                  |
| $c$              | = cohesie                        | [kN/m <sup>2</sup> ] |
| $K_a$            | = actieve korreldrukcoëfficiënt  | [-]                  |
| $K_p$            | = passieve korreldrukcoëfficiënt | [-]                  |
| $K_o$            | = neutrale korreldrukcoëfficiënt | [-]                  |

De invloed van de cohesie op de actieve- en passieve horizontale korreldruk is in de berekeningen meegenomen. Er geldt dan:

$$\sigma'_{h,actief} = K_a \cdot \sigma'_z - 2 \cdot c \cdot \sqrt{K_a}$$

$$\sigma'_{h,passief} = K_p \cdot \sigma'_z + 2 \cdot c \cdot \sqrt{K_p}$$



Figuur 10.4 Waterspanningsverloop.

Bij de bepaling van de coëfficiënten  $K_a$  en  $K_p$  is de hoek van wandwrijving in rekening gebracht, aangezien deze wandwrijving van redelijk grote betekenis kan zijn. De coëfficiënten  $K_a$  en  $K_p$  volgen in dat geval uit:

$$K_a = \frac{\cos^2(\phi + a)}{\cos^2 a \cdot \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \cdot \sin(\phi - \beta)}{\cos(a - \delta) \cdot \cos(a + \beta)}} \right]^2} \cdot \frac{1}{\cos(a - \delta)}$$

$$K_p = \frac{\cos^2(a - \phi)}{\cos^2 a \cdot \left[ 1 - \sqrt{\frac{\sin(\phi - \delta) \cdot \sin(\phi + \beta)}{\cos(a - \delta) \cdot \cos(a + \beta)}} \right]^2} \cdot \frac{1}{\cos(a - \delta)}$$

Voor een rechte wand en een horizontaal maaiveld geldt:  $a=0^\circ$  en  $\beta=0^\circ$ . De hoek van wandwrijving volgt uit:

- zand :  $\delta = \frac{2}{3}\phi$
- klei :  $\delta = \frac{1}{3}\phi$
- veen :  $\delta = 0^\circ$

Voor literatuur hieromtrent wordt verwezen naar het *Grundbau taschenbuch* [Smolczyk, U., 1980] en de collegehandleiding bij het vak b22: *Grondmechanica* [Verruijt, Prof.dr.ir.A., 1987.].

### 10.2.3 Bepaling verloop van de waterspanning.

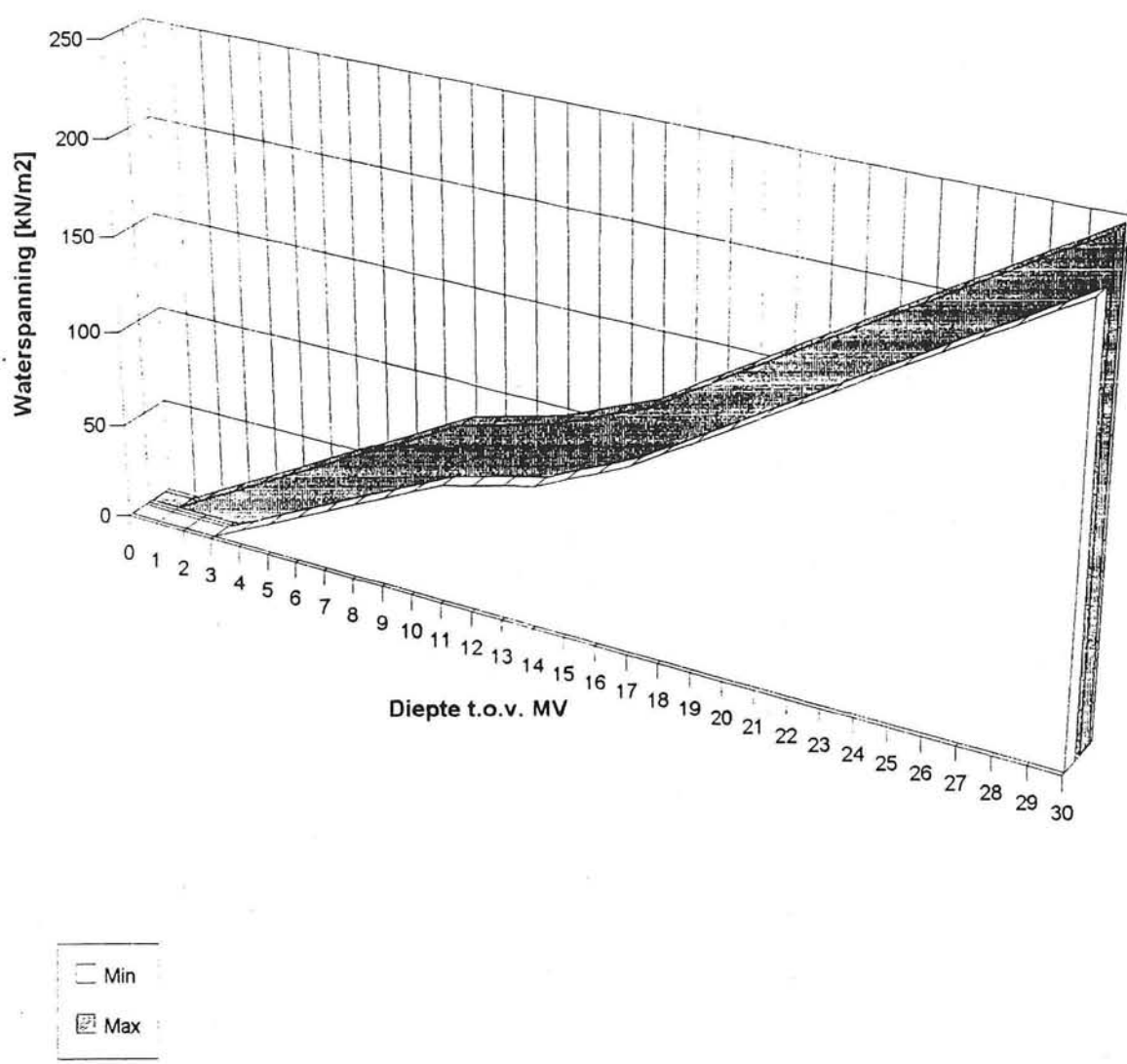
Bij de bepaling van het verloop van de waterspanningen in de diverse grondlagen is uitgegaan van metingen uitgevoerd door de Dienst Grondwaterverkenning van TNO Delft met behulp van peilbuizen. Verder is gebruik gemaakt van de isohypsenkaart van Delft en omgeving, welke is te zien in figuur 3.7. Op deze isohypsenkaart zijn de stijghoogten aangegeven, welke zich voordoen in het eerste watervoerend pakket (20 m ÷ MV en dieper). Plaatsen met gelijke stijghoogte zijn in de isohypsenkaart via een lijn met elkaar verbonden.

De waterdrukverlaging die in dit zandpakket optreedt, wordt veroorzaakt door de onttrekking van grondwater uit dit pakket door de Gist-fabrieken in Delft ten behoeve van industriële processen. Ter plaatse van het geprojecteerde ondergrondse station ligt de stijghoogte op ca. 6.5 m beneden N.A.P. In het waterspanningsverloop (zie figuur 10.4) is dan ook een relatief grote knik te zien. De waterspanningsverlaging is al merkbaar bij de zandlaag, welke begint op 11 m ÷ MV (laag 5) en loopt geleidelijk op tot de diepe zandlaag (laag 9).

De Dienst Grondwaterverkenning van TNO Delft heeft in de loop der tijd met de peilbuizen een groot aantal stijghoogten geregistreerd. Deze waarden zijn vervolgens als functie van de tijd uitgezet. Men heeft zo kunnen constateren dat de waterspanningen 's zomers een stuk lager zijn dan 's winters. Van de peilbuizen die representatief zijn voor het stationstracé zijn de extreme waarden van de metingen bepaald. Deze maxima en minima zijn omgerekend naar waterspanningen.

In figuur 10.5 zijn deze waterspanningsverlopen voor extreem hoge (meestal 's winters) en

### Minimum en maximum waterspanningen



Figuur 10.5 Extreem hoge en extreem lage waterspanningen.



extreem lage (meestal 's zomers) waterspanningen vereenvoudigd weergegeven.

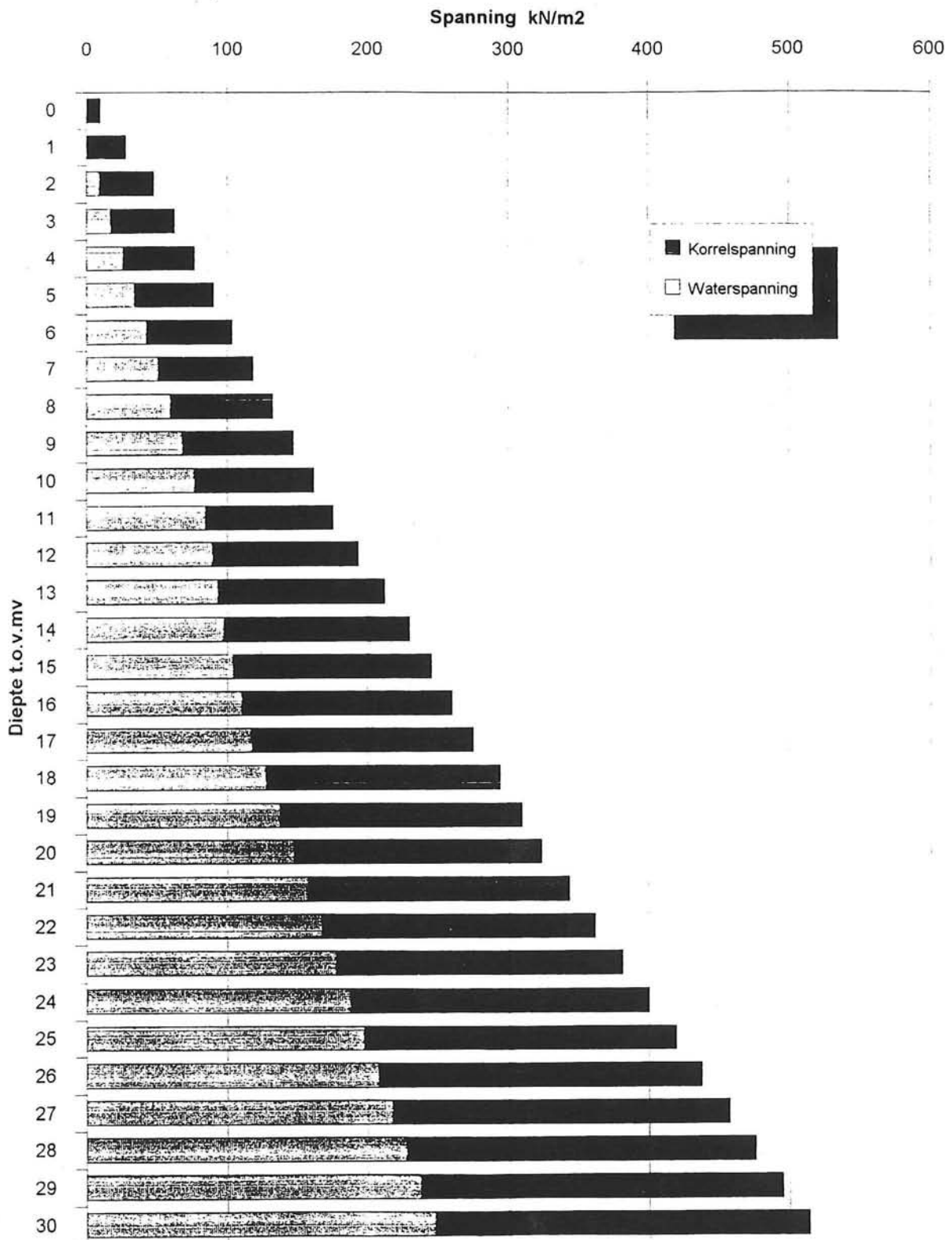
De diepte is weergegeven in meters beneden het maaiveld. De waarden voor de grafiek zijn ontleend aan de Dienst Grondwaterverkenning van TNO.

Opgemerkt zij, dat de getoonde grafiek metingen weergeeft, die zijn gedaan nabij het geplande station. De getoonde grafiek is echter niet voor 100% representatief voor het gehele stations-tracé. Plaatselijk zullen licht afwijkende waarden optreden.

Voor de verdere berekeningen in dit rapport wordt uitgegaan van de hoogste waarden van de waterspanningen. Deze zijn immers maatgevend.

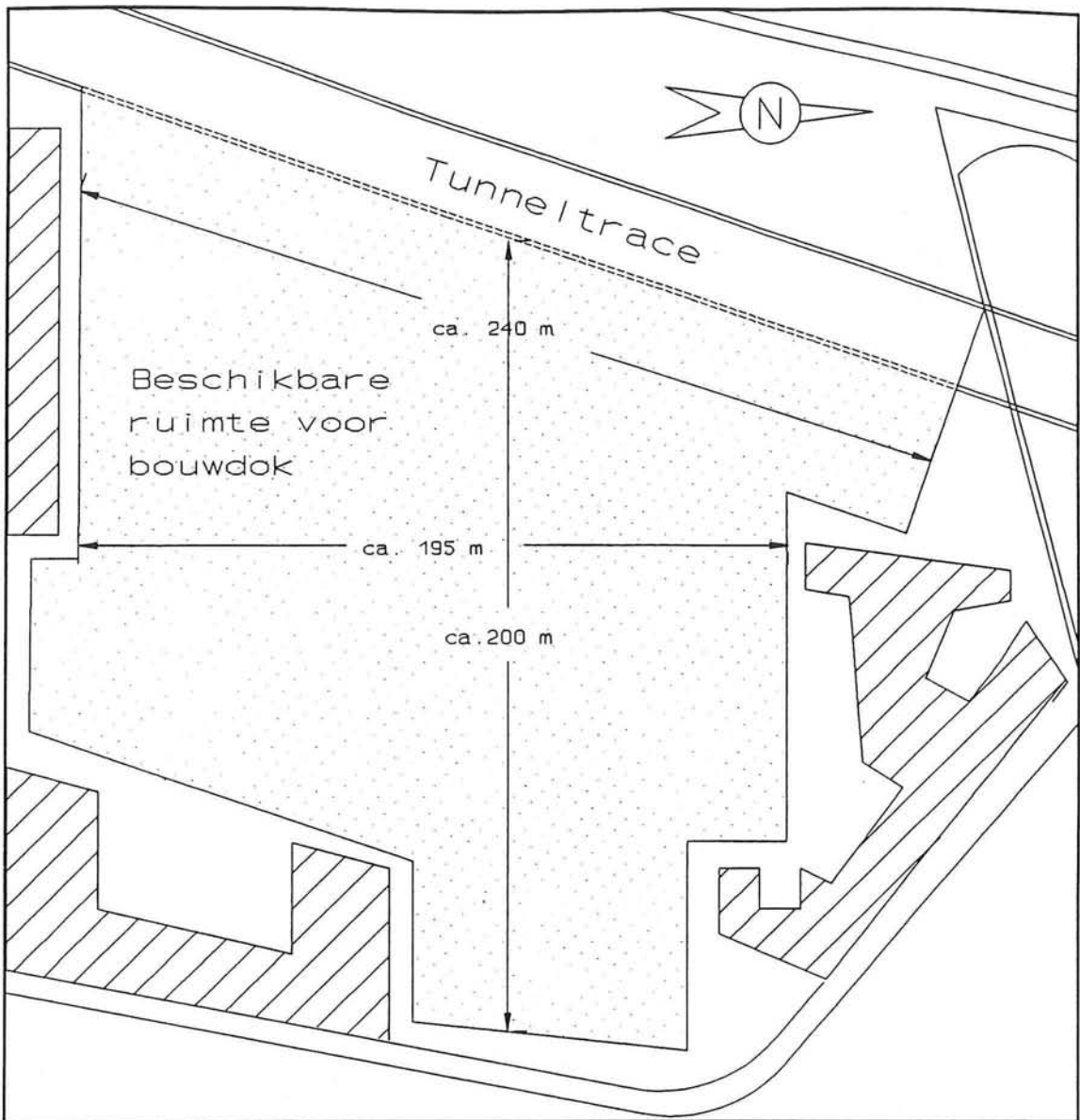
Overigens is het, indien dit nodig mocht blijken, toegestaan om de waterspanningen te verlagen, maximaal tot een waarde welke in het verleden is opgetreden (zie figuur 10.4).

# Vertikale water-, korrel- en grondspanning



10.2.4 Grond- en korrelspanningen.

| Grond- en korrelspanningen. |                                  |                           |  |  |  |  |  |  |  |
|-----------------------------|----------------------------------|---------------------------|--|--|--|--|--|--|--|
| Plaats<br>+MV               | $\sigma$<br>[kN/m <sup>2</sup> ] | p<br>[kN/m <sup>2</sup> ] | $\sigma' = \sigma - p$<br>[kN/m <sup>2</sup> ] | $\sigma'_{ha}$<br>[kN/m <sup>2</sup> ] | $\sigma'_{ha}$<br>[kN/m <sup>2</sup> ] | $\sigma'_{hp}$<br>[kN/m <sup>2</sup> ] | $\sigma'_{hp}$<br>[kN/m <sup>2</sup> ] | $\sigma'_{hm}$<br>[kN/m <sup>2</sup> ] | $\sigma'_{hm}$<br>[kN/m <sup>2</sup> ] |
| 0.00                        | 10.00                            | 0.00                      | 10.00  | 2.97                                   | 2.97                                   | 61.05                                  | 61.05                                  | 5.00                                   | 5.00                                   |
| 0.98                        | 28.24                            | 0.00                      | 28.24  | 8.40                                   | 8.40                                   | 172.42                                 | 172.42                                 | 14.12                                  | 14.12                                  |
| 2.00                        | 48.00                            | 9.60                      | 38.40  | 11.42                                  | 21.02                                  | 234.45                                 | 244.05                                 | 19.20                                  | 28.80                                  |
| 2.00                        | 48.00                            | 9.60                      | 38.40  | 17.15                                  | 28.75                                  | 101.20                                 | 110.80                                 | 25.27                                  | 34.87                                  |
| 4.00                        | 77.00                            | 25.80                     | 51.20  | 22.87                                  | 48.67                                  | 134.93                                 | 160.73                                 | 33.69                                  | 59.49                                  |
| 4.00                        | 77.00                            | 25.80                     | 51.20  | 14.80                                  | 40.60                                  | 113.02                                 | 138.82                                 | 37.95                                  | 63.75                                  |
| 4.50                        | 82.25                            | 30.00                     | 52.25  | 15.42                                  | 45.42                                  | 114.81                                 | 144.81                                 | 38.73                                  | 68.73                                  |
| 4.50                        | 82.25                            | 30.00                     | 52.25  | 8.19                                   | 38.19                                  | 157.82                                 | 187.82                                 | 36.54                                  | 66.54                                  |
| 6.00                        | 104.00                           | 42.80                     | 61.20  | 12.60                                  | 55.40                                  | 178.38                                 | 221.18                                 | 42.80                                  | 85.60                                  |
| 8.00                        | 133.00                           | 59.80                     | 73.20  | 18.51                                  | 78.31                                  | 205.91                                 | 265.71                                 | 51.19                                  | 110.99                                 |
| 10.00                       | 162.00                           | 76.80                     | 85.20  | 24.42                                  | 101.22                                 | 233.48                                 | 310.28                                 | 59.58                                  | 136.38                                 |
| 11.00                       | 178.50                           | 85.30                     | 91.20  | 27.38                                  | 112.68                                 | 247.23                                 | 332.53                                 | 63.78                                  | 149.08                                 |
| 11.00                       | 178.50                           | 85.30                     | 91.20  | 24.60                                  | 109.90                                 | 701.83                                 | 787.13                                 | 42.20                                  | 127.50                                 |
| 12.00                       | 194.50                           | 89.50                     | 105.00   | 28.32                                  | 117.82                                 | 808.03                                 | 897.53                                 | 48.58                                  | 138.08                                 |
| 14.00                       | 230.50                           | 97.90                     | 132.60   | 35.78                                  | 133.68                                 | 1020.43                                | 1118.33                                | 61.35                                  | 159.25                                 |
| 14.00                       | 230.50                           | 97.90                     | 132.60   | 42.53                                  | 140.43                                 | 390.04                                 | 487.94                                 | 87.25                                  | 185.15                                 |
| 16.00                       | 260.50                           | 111.30                    | 149.20   | 49.94                                  | 161.24                                 | 433.79                                 | 545.09                                 | 98.17                                  | 209.47                                 |
| 17.00                       | 275.50                           | 118.00                    | 157.50   | 53.65                                  | 171.65                                 | 455.67                                 | 573.67                                 | 103.63                                 | 221.63                                 |
| 17.00                       | 275.50                           | 118.00                    | 157.50   | 46.83                                  | 164.83                                 | 961.59                                 | 1079.59                                | 78.75                                  | 196.75                                 |
| 18.00                       | 294.50                           | 128.00                    | 166.50   | 49.50                                  | 177.50                                 | 1016.54                                | 1144.54                                | 83.25                                  | 211.25                                 |
| 18.00                       | 294.50                           | 128.00                    | 166.50   | 61.01                                  | 189.01                                 | 471.27                                 | 599.27                                 | 109.55                                 | 237.55                                 |
| 20.00                       | 324.50                           | 148.00                    | 176.50   | 65.48                                  | 213.48                                 | 497.62                                 | 645.62                                 | 116.13                                 | 264.13                                 |
| 20.00                       | 324.50                           | 148.00                    | 176.50   | 43.14                                  | 191.14                                 | 1758.23                                | 1908.23                                | 75.28                                  | 223.26                                 |
| 22.00                       | 362.50                           | 168.00                    | 194.50   | 47.54                                  | 215.54                                 | 1937.54                                | 2105.54                                | 82.94                                  | 250.94                                 |
| 24.00                       | 400.50                           | 188.00                    | 212.50   | 51.94                                  | 239.94                                 | 2116.85                                | 2304.85                                | 90.62                                  | 278.62                                 |
| 26.00                       | 438.50                           | 208.00                    | 230.50   | 56.34                                  | 264.34                                 | 2296.16                                | 2504.16                                | 98.29                                  | 306.29                                 |
| 28.00                       | 476.50                           | 228.00                    | 248.50   | 60.74                                  | 288.74                                 | 2475.47                                | 2703.47                                | 105.97                                 | 333.97                                 |
| 30.00                       | 514.50                           | 248.00                    | 266.50   | 65.14                                  | 313.14                                 | 2654.78                                | 2902.78                                | 113.64                                 | 361.64                                 |



Figuur 10.6 Beschikbare ruimte en vorm voor bouwdoek.

### 10.3 Het bouwdok.

#### 10.3.1 Inleiding.

Ten behoeve van de fabricage van de tunnelementen is een bouwdok benodigd. Zoals reeds in hoofdstuk 7 is beschreven, is een bouwlocatie beschikbaar ten zuiden van de Irenetunnel (zie figuur 10.6). Dit terrein, gelegen ten zuiden van de Irenetunnel, is een reeds lange tijd braakliggend terrein met een woonwijk als bestemming in de verre toekomst.

Bij de totstandkoming van een bouwdok voor het maken van zinkelementen moet bij een aantal zaken worden stilgestaan. In deze paragraaf zal aandacht worden besteed aan de volgende punten:

- De afmetingen van het bouwdok.
- De uitvoering van het bouwdok.
- De inrichting van het bouwdok.
- De verbinding met de zinksleuf.
- Fabricage van de zinkelementen.

#### 10.3.2 Randvoorwaarden en uitgangspunten.

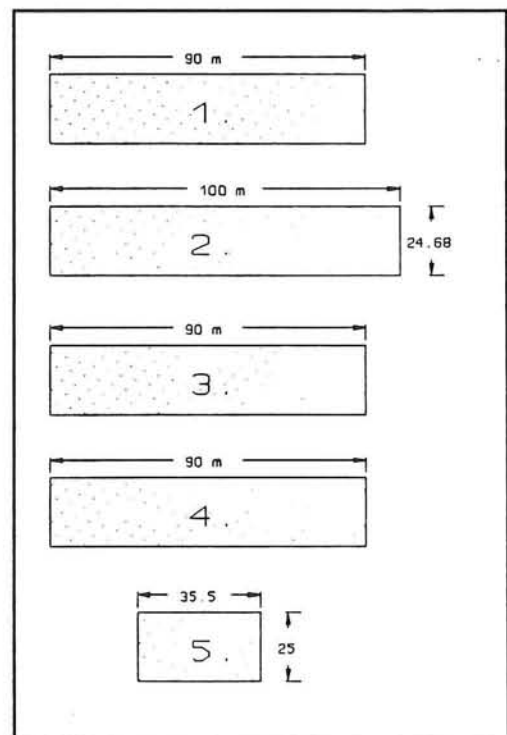
Alvorens een keuze te maken voor een bepaald type bouwdok wordt eerst een aantal randvoorwaarden en uitgangspunten op een rijtje gezet:

##### a. Beschikbare ruimte.

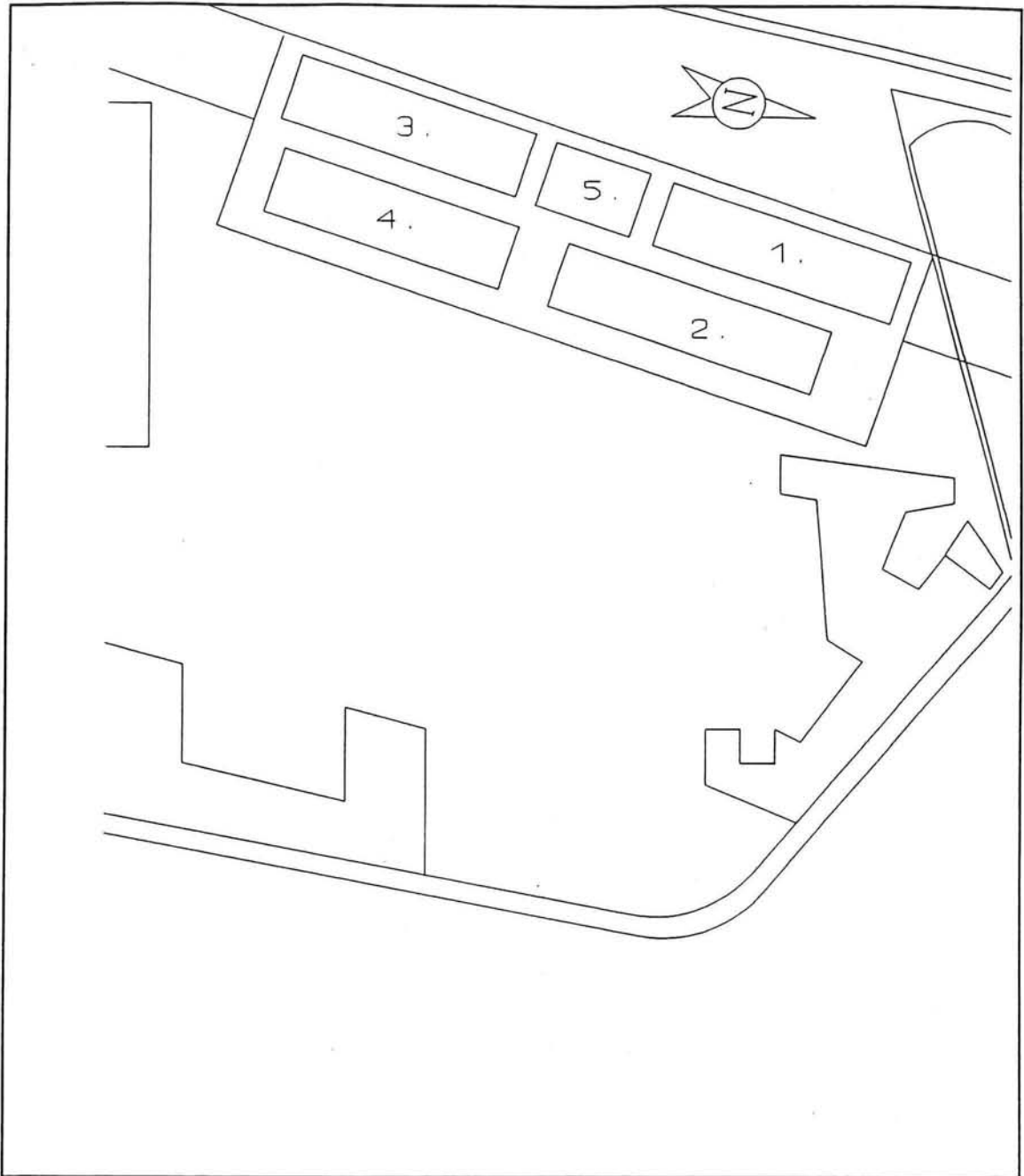
In hoofdstuk 7 is de maximaal beschikbare ruimte en de vorm daarvan voor de aanleg van een bouwdok reeds bekeken. De bouwlocatie wordt aan de westzijde begrensd door de spoorlijn, een fabrieksgebouw aan de zuidzijde, aan de oostzijde een rij huizen en aan de noordkant de Irenetunnel. De maximale beschikbare ruimte en vorm daarvan is weergegeven in figuur 10.6. Ook het gedeelte naast het bouwdok, dat later als zinksleuf zal fungeren, kan bij het bouwdok worden betrokken.

##### b. Benodigde ruimte.

Na de **beschikbare** ruimte geïnventariseerd te hebben, bekijken we de **benodigde** ruimte en haar vormen. In hoofdstuk 7 (§7.5.4) is de keuze voor een klein bouwdok reeds uitvoerig besproken. De zinkelementen die in het bouwdok moeten kunnen worden gemaakt hebben de volgende afmetingen (zie ook figuur 10.7):



Figuur 10.7 Te maken elementen.



Figuur 10.8 Rangschikking elementen in bouwdok.

108

| El.nr. | Beschrijving elementdeel | Lengte | Breedte |
|--------|--------------------------|--------|---------|
| 1.     | noordelijke stationsdeel | 90 m   | 24.68 m |
| 2.     | middelste stationsdeel   | 100 m  | 24.68 m |
| 3.     | zuidelijke stationsdeel  | 90 m   | 24.68 m |
| 4.     | zuidelijke tunneldeel    | 90 m   | 24.68 m |
| 5.     | stationshal              | 35.5 m | 25 m    |

Bij de inpassing in de bouwdok-ruimte wordt een vrije ruimte tussen de elementen van 5 á 10 m aangehouden. Dit in verband met de bewegingsvrijheid tussen de elementen en het eventueel kunnen plaatsen van een rail voor een verrijdbare hijsinstallatie.

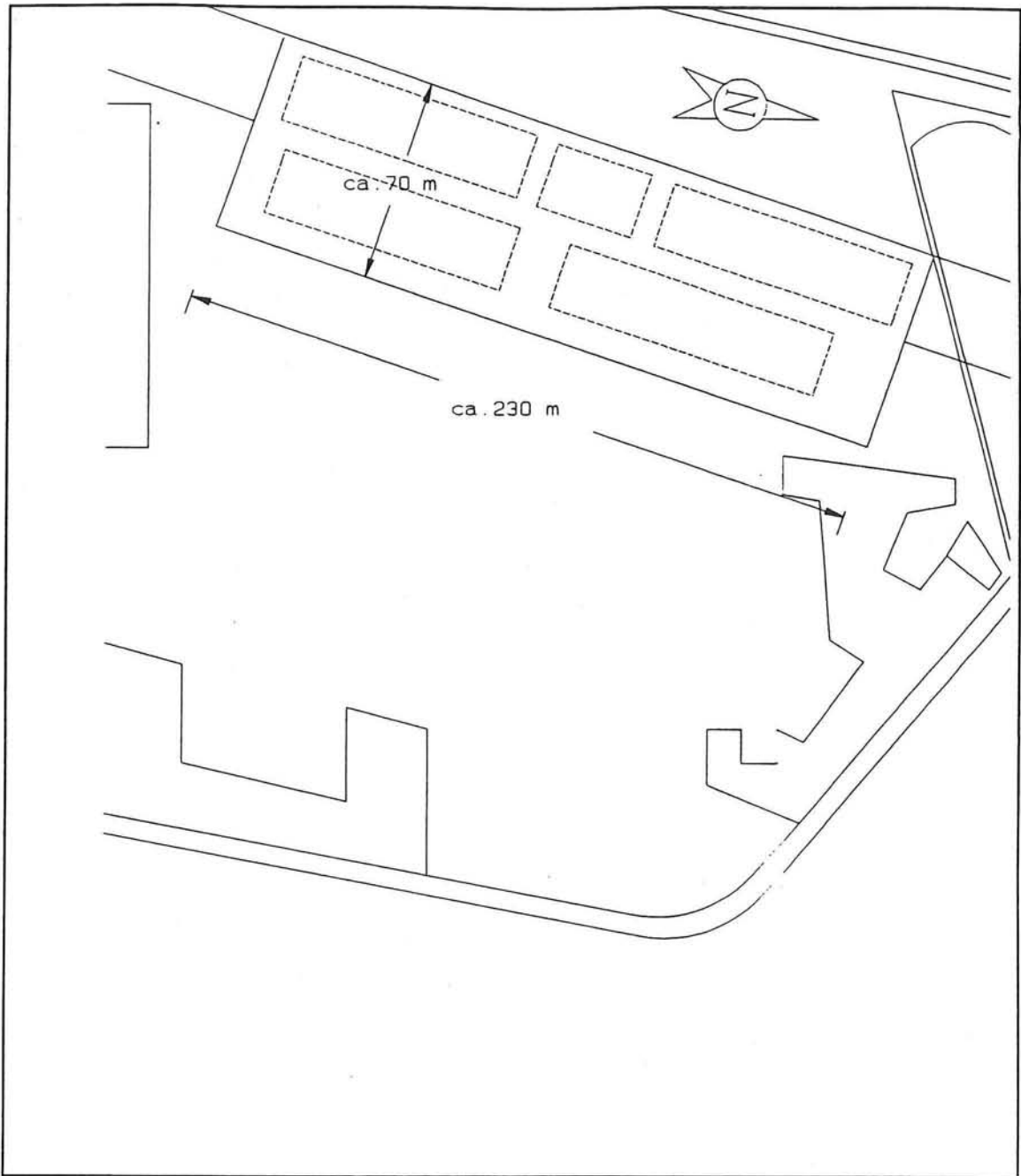
De elementen zijn uiteraard op velerlei wijze te rangschikken. Rekening moet worden gehouden met de volgorde waarin de elementen moeten worden uitgevaren. Voor rangeren zal weinig plaats zijn. Ook moet rekening worden gehouden met het feit dat de elementen licht gekromd zijn, aangezien het station in een flauwe bocht ligt. Gekozen is voor de variant, welke is weergegeven in figuur 10.8. Bij deze variant is voor het bouwdok gebruik gemaakt van de ruimte waar in een later stadium in situ het resterende tunnelgedeelte wordt gemaakt.

#### c. Bemaling.

De verlaging van de grondwaterspanningen is in principe niet toegestaan. Maar aangezien de grondwaterspanningen minima en maxima kennen (☞ §10.2.3), is het eventueel geoorloofd de waterspanning te verlagen maximaal tot een waarde die in het verleden reeds is opgetreden. Overigens kan, indien dit noodzakelijk wordt geacht, altijd nog worden besloten om een bronbemaling in combinatie met retourputten toe te passen.

#### d. 'Natuurlijke bemaling'.

Dankzij de onttrekking van grondwater uit de eerste watervoerende laag door de Gist- en Spiritusfabrieken, ligt de maximale waarde van de stijghoogte in die laag ter plaatse van het te maken bouwdok op ca.6.5 m beneden NAP. Ter plaatse van de bouwdoklokatie komt dit neer op een ligging van ca.7 m beneden het maaiveld.



Figuur 10.9 Afmetingen bouwdok.

10.9



### 10.3.3 De afmetingen van het bouwdok.

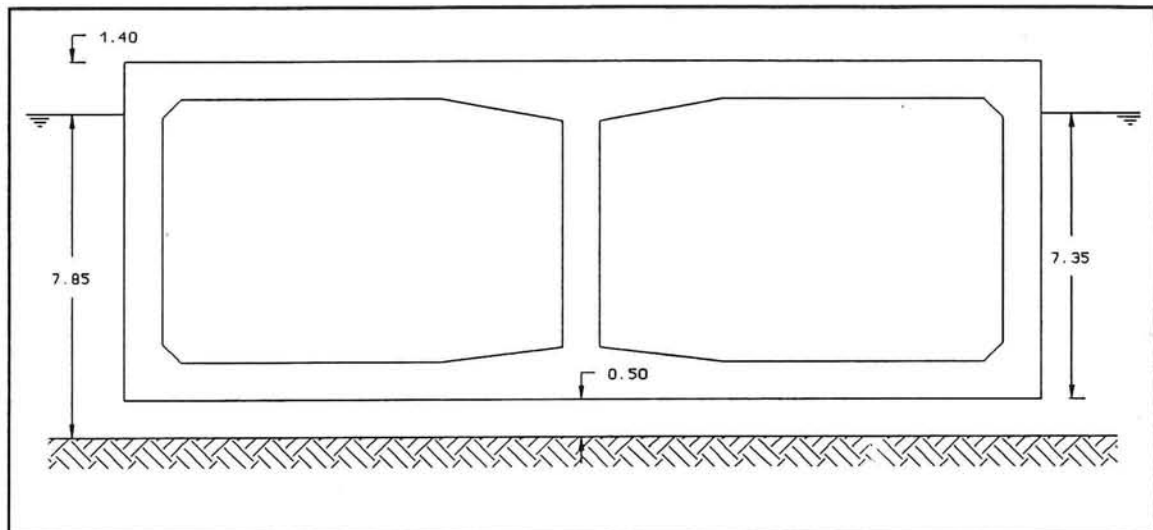
#### a. Oppervlakte-afmetingen.

De oppervlakte-afmetingen van het bouwdok (benodigde ruimte) volgen uit §10.3.3 en zijn weergegeven in figuur 10.9.

#### b. Diepte van het bouwdok.

De benodigde diepte van het bouwdok is een essentieel punt bij de keuze van het type bouwput dat wordt toegepast voor de realisatie van het bouwdok.

De minimale diepgang van de elementen bedraagt 7.35 meter (zie bijlage F). Uitgegaan wordt van een 'kielspeling' van de elementen in het dok van 0.5 meter. Derhalve dient een waterdiepte van 7.85 m in het bouwdok te kunnen staan (zie figuur 10.10).

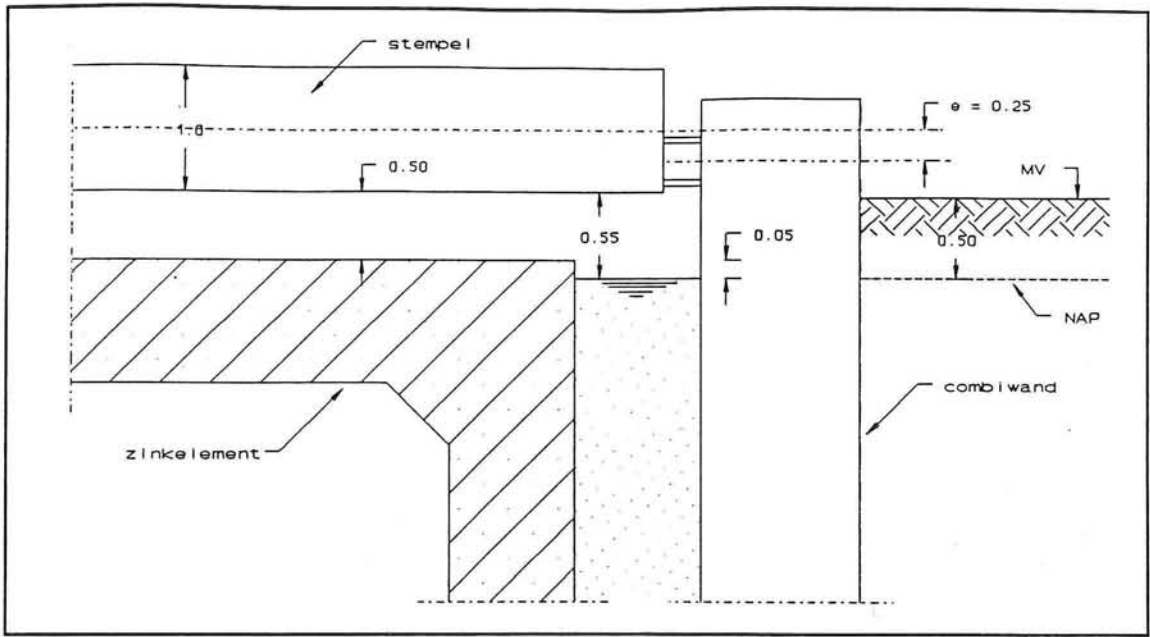


Figuur 10.10 Minimale diepgang element.

Het niveau waarop de waterspiegel in het bouwdok en de zinksleuf ligt, wordt het liefst zo hoog mogelijk gehouden (zo ondiep mogelijk bouwdok en zo groot mogelijke tegendrukken tegen de combiwanden door het water).

Het criterium dat het waterspiegelniveau in het geïndeundeerde dok en de zinksleuf bepaald is het feit dat de elementen onder de stempeling van de combiwanden van zinksleuf door moeten kunnen varen. Hiermee samenhangend zijn van belang: het vrijboord van de elementen, de speling tussen de elementen en de stempeling en het aanbrensniveau van de stempels.

Het vrijboord van de elementen is met behulp van de waterballasten in het element te regelen. Het minimale vrijboord is gesteld op 5 centimeter. Dit is in principe vrij gering, maar omdat het vaarwater in het bouwdok en in de zinksleuf zeer rustig is, kan met dit vrijboord worden gewerkt. Verder wordt een speling tussen het element en de stempels van ca.50 cm aangehou-



Figuur 10.11 Niveau waterspiegel en stempels.

den. Tussen waterspiegel en stempels zit dus een afstand van 55 cm.

Rest nu nog te bepalen op welk niveau de stempeling wordt aangebracht. Dit hangt onder meer af van de hoogte waarover de sleufwanden boven het maaiveld uitsteken. Het is namelijk te overwegen om de sleufwanden een stuk boven het maaiveld uit te laten steken en vervolgens de waterspiegel flink hoog (ca. 1 m boven het maaiveld) te maken. Op die manier wordt de diepte van het bouwdok beperkt gehouden en wordt zo ook de door het water geleverde gunstige tegendruk tegen de sleufwanden groter.

Dit heeft echter grote consequenties voor de verkeerswegen die de zinksleuf kruisen, en met name de Irenetunnel met haar vierstrooksweg en een trambaan. Vooral voor de tram is het bezwaarlijk om, komende uit de Irenetunnel, ook nog eens een extra helling te moeten nemen over een hulpbrug over de zinksleuf heen. Voornamelijk om die reden is gekozen om de sleufwanden te laten reiken tot ca. 1.3 m + NAP.

De stempellaag wordt aangebracht op een 0.5 m beneden de bovenkant van de sleufwanden op een niveau van 0.8 m + NAP. Door de stempels excentrisch aan te brengen wordt wat hoogte gewonnen. Daarbij komt dat dan een deel van het moment, veroorzaakt door het eigen gewicht, door de stempelkracht vermenigvuldigd met de excentriciteit  $e$  wordt opgeheven. Uit een korte globale berekening, vermeld in bijlage N, volgt dat bij een stempel met een diameter van 1.00 m, een excentriciteit  $e = 0.25$  m en een normaaldrukkkracht in de stempel van ca. 1400 kN het netto moment in de stempel ongeveer gelijk is aan nul. Onderkant stempel bevindt zich dan op 0.55 m + NAP (gem. 0.05 m + MV) (zie figuur 10.11).

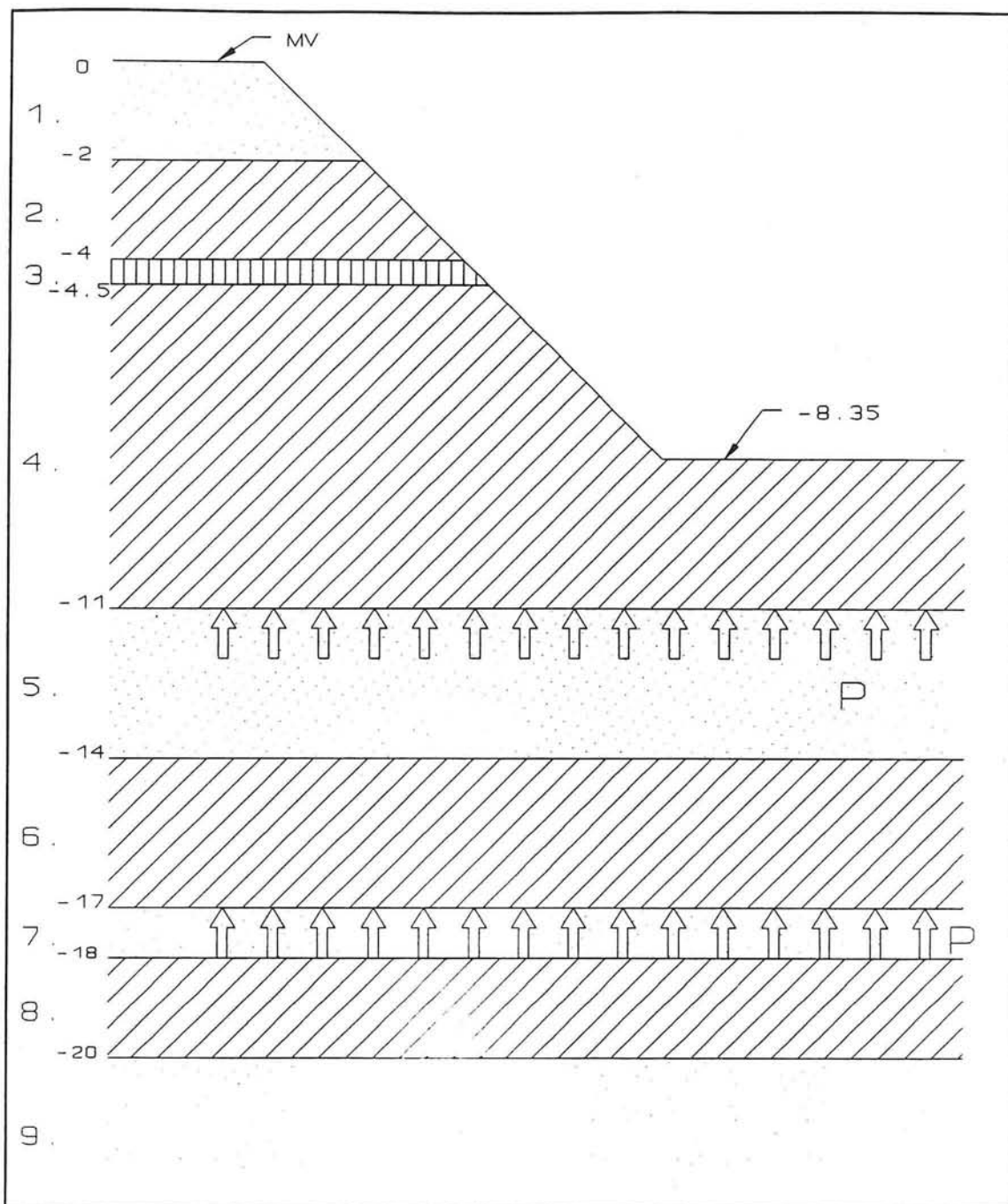
Ter plaatse van de kruising met de Irenetunnel worden geen stempels toegepast. Hier wordt de stempelfunctie geleverd door de aan te brengen hulpbruggen. Hierop wordt in §10.4.6 nog verder ingegaan.

Concluderend komt de waterspiegel in het bouwdok en de zinksleuf te liggen op NAP (= 0.5 meter beneden gemiddeld maaiveld niveau). De bodem van het bouwdok moet dus komen te liggen op een niveau van 7.85 m ÷ NAP (= 8.35 m beneden gem. maaiveld) (zie figuur 10.11).

#### 10.3.4 De uitvoering van het bouwdok.

Het bouwdok voor de tunnelementen kan op een aantal manieren worden vormgegeven.

Gekozen kan worden uit een bouwput met natuurlijke taluds of verticale wanden, met of zonder bemaling, met of zonder bodemafluiting etcetera (zie ook hoofdstuk 6). Voorop staat dat het bouwdok zo economisch mogelijk moet worden gemaakt, temeer daar het een tijdelijk karakter heeft; het bouwdok wordt naderhand weer ontdaan van zijn functie. Gezien dit tijdelijke karakter is het, economisch gezien, waarschijnlijk niet rendabel om dit dok te voorzien van een mooie betonnen vloer verankerd met trekpalen, tenzij dit noodzakelijk is. Daar komt bij dat de 'bouwdokconstructie' naderhand weer moet kunnen worden verwijderd, aangezien het terrein in



Figuur 10.12 Dwarsdoorsnede bouwdok.

de toekomst bestemd is als woonwijk. Later aan te brengen funderingen en leidingen zouden last kunnen ondervinden van in de grond achter gelaten constructies.

Bij het ontwerp van het bouwdok zijn een aantal zaken van belang. In hoofdlijnen komt dit neer op de wanden en de bodem van het bouwdok.

De meest goedkope en eenvoudigste oplossing voor het maken van een bouwdok is een open bouwput met natuurlijke taluds, waarbij bovendien geen aparte bodemafluiting behoeft te worden gemaakt. De toepassing van een dergelijke oplossing is afhankelijk van de grondwaterstand, de eventuele aanwezigheid van een waterafsluitende grondlaag, de waterspanning tegen de bodem van de put (opbarsten!) en de vraag of er ruimte is voor de aanleg van natuurlijke taluds (breedte talud is vaak globaal 2 à 3 maal de hoogte). Het uitgangspunt, vermeld onder 'natuurlijke bemaling', vormt in dit opzicht een interessant gegeven.

Indien er gevaar voor opbarsten van de putbodem bestaat, dan zijn maatregelen hiertegen noodzakelijk. Dit kan zijn in de vorm van een vertikaal scherm tot in een slecht waterdoorlatende laag, of het toepassen van een bemaling al of niet in combinatie met retourputten. Het moge duidelijk zijn dat de noodzaak van het moeten toepassen van een dergelijke maatregel ook in hoge mate de vormgeving van het bouwdok bepaald. Daarom is het belangrijk allereerst de bouwputbodem aan een onderzoek te onderwerpen.

#### ■ Controle bouwputbodem.

Voor het bepalen van de veiligheid tegen het opbarsten van de putbodem wordt eerst een doorsnede getoond in figuur 10.12. De aangegeven diepten zijn gerelateerd aan het maaiveldniveau. Op de bouwdoklocatie ligt het maaiveld op een niveau van 0.5 m boven NAP.

In de figuur is te zien dat er zich op een diepte van 14 tot 17 meter en van 18 tot 20 meter beneden het maaiveld waterafsluitende kleilagen bevinden. Bij de controle van de bouwputbodem zijn twee zandlagen van belang. De eerste laag is laag 5 en de tweede laag betreft een combinatie van de lagen 7+8+9 (zie figuur 10.12). (Laag 8 is een klein kleilaagje met zandlenzen, dat het waterspanningsverloop nauwelijks beïnvloed. Daarom kan de waterspanning vanaf laag 7 hydrostatisch worden verondersteld).

Allereerst bekijken we de tweede zandlaag. Door de onttrekking van grondwater uit deze laag door de Gist-fabrieken ligt de stijghoogte in deze laag op 6.5 m ÷ NAP. Uit de waterspanningsverlopen valt af te lezen dat de hoogst gemeten waterspanning aan de bovenzijde van deze laag 118 kN/m<sup>2</sup> bedraagt (zie tabel op pagina 137). Van dit gegeven gebruikmakend berekenen we het vertikaal evenwicht.

Als dekking op deze zandlaag, die begint bij 17 m ÷ MV, ligt als eerste een kleilaag van 3 m dikte. Als tweede bevindt zich de eerste zandlaag. Als laatste en tevens de bodemlaag van de bouwput is een kleilaag van ca. 2.65 m.



Voor het vertikaal evenwicht geldt:

■ Waterdruk:  $P_{\max} = 118.0 \text{ kN/m}^2 \quad \uparrow$

■ Gronddruk:  $G = 3 \text{ m} \cdot 16 \text{ kN/m}^3 + 3 \text{ m} \cdot 18 \text{ kN/m}^3 + 2.65 \text{ m} \cdot 14.5 \text{ kN/m}^3 = 141 \text{ kN/m}^2 \quad \downarrow$

De veiligheid tegen opbarsten van de putbodem bedraagt hier dus :

$$\gamma = \frac{141}{118} = 1.19 > 1.15$$

Dit is juist voldoende. Aangezien de laagst gemeten waterspanning op 17 m ÷ MV 95.5 kN/m<sup>2</sup> bedraagt, is eventueel een verlaging van de waterspanning tot deze waarde door middel van bemalen in deze laag ook mogelijk.

Stel nu dat in deze laag (17 m ÷ MV) gewoon een druk van zeg 17 meter waterkolom had geheerst, dus 170 kN/m<sup>2</sup>, dan was de put onherroepelijk opengebarsten. In deze situatie zijn wij Gist-Brocades dus zeer dankbaar.

Vervolgens bekijken we het vertikaal evenwicht in de eerste zandlaag onder de bouwputbodem. Op een niveau van 11 m ÷ MV, bovenkant zandlaag/onderkant kleilaag, heerst een waterspanning van maximaal 85.3 kN/m<sup>2</sup> (tabel op pagina 137). Voor het vertikaal evenwicht geldt:

■ Waterdruk:  $P = 85.3 \text{ kN/m}^2 \quad \uparrow$

■ Gronddruk:  $G = 2.65 \text{ m} \cdot 14.5 \text{ kN/m}^3 = 38.4 \text{ kN/m}^2 \quad \downarrow$

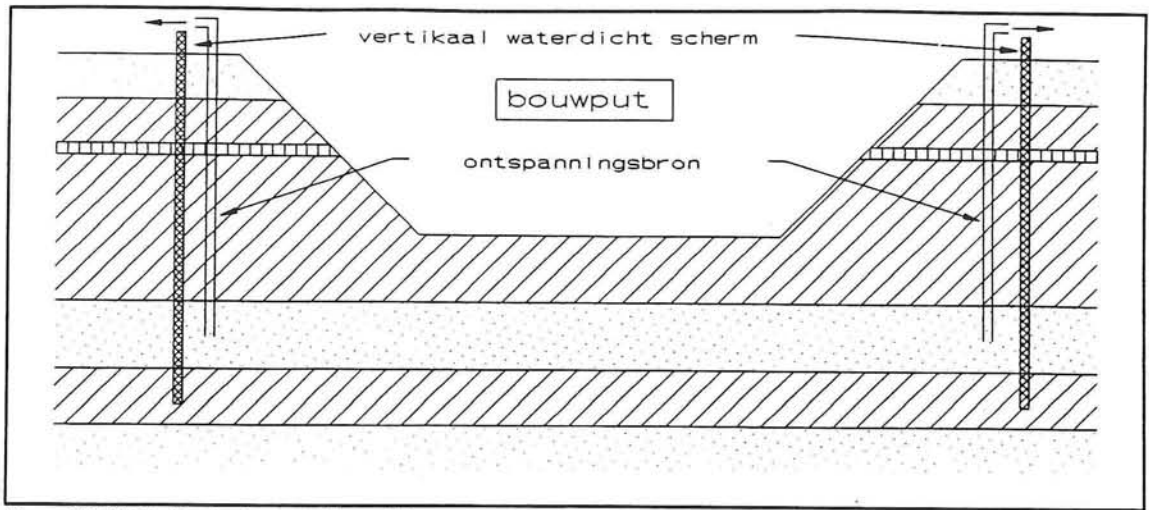
De veiligheid tegen opbarsten van de putbodem bedraagt hier dus :

$$\gamma = \frac{38.4}{85.3} = 0.45 < 1.15$$

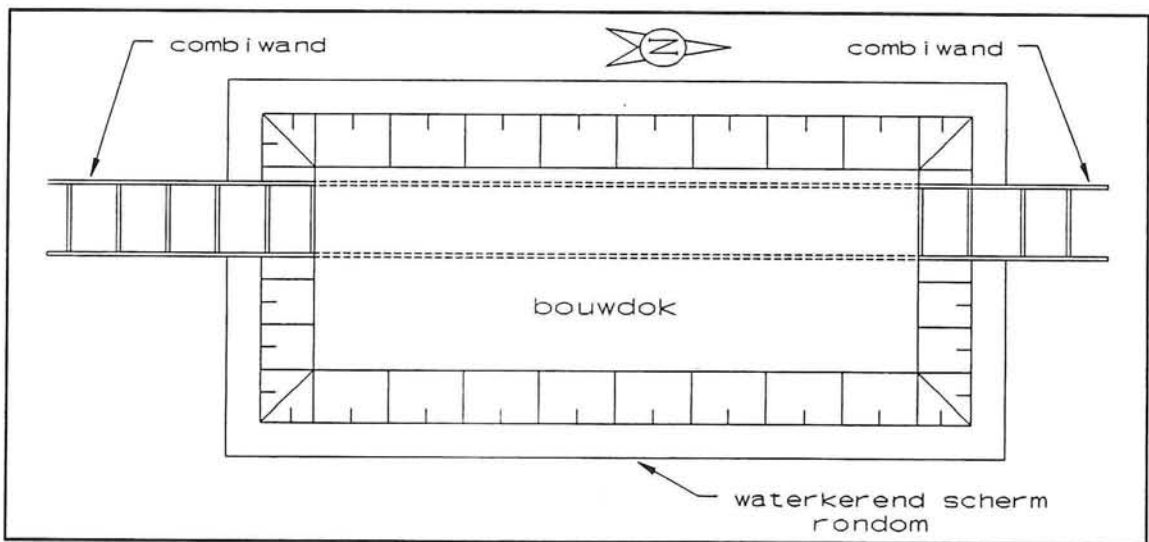
De bouwput zal dus opbarsten. Ook het verlagen van de waterspanning tot een in het verleden minimaal opgetreden waarde ( $p_{\min} = 61 \text{ kN/m}^2$ ) is niet voldoende. Er zijn dus aanvullende maatregelen noodzakelijk.

Zoals hiervoor reeds is vermeld, is het verlagen van de waterspanning in deze laag tot een maximaal toegestane waarde geen afdoende middel ter voorkoming van het opbarsten van de putbodem.

Een oplossing die kan worden overwogen is het nog verder verlagen van de waterspanning, in combinatie met een retourbemaling. Maar dan nog zal in het extreme geval de waterspanning in de grondschijf onder het bouwdok met ca. 6 meter waterkolom moeten worden verlaagd.



Figuur 10.13 Vertikaal scherm rond bouwput.



Figuur 10.14 Variant 1 : Bouwput met taluds en vertikaal scherm.



Aangezien dit relatief veel is, is het waarschijnlijk economischer een oplossing op een ander vlak te zoeken.

Aangezien het vertikaal evenwicht op 17 meter beneden het maaiveld wél gewaarborgd is, is het een goede oplossing om een vertikaal waterdoorlatend scherm aan te brengen rondom het bouwdok, reikend tot in de slecht waterdoorlatende kleilaag (laag 6). Het scherm zou moeten reiken tot ca.  $16 \text{ m} \div \text{MV}$  (zie figuur 10.13). Zo'n scherm behoeft slechts waterafsluitend te zijn en behoeft geen grond te keren.

In combinatie met een natuurlijk talud voor de bouwdokwanden kan dit waterafsluitende scherm relatief licht worden uitgevoerd (uitvoering maatgevend).

De waterkerende en grondkerende functie kunnen ook worden gecombineerd in de toepassing van een combiwand. Zodoende verkrijgt men dus een bouwdok met verticale wanden.

De keuze tussen één van beide principes zal in het hiernavolgende aandachtspunt aan de orde komen.

#### ■ Keuze vormgeving bouwdok.

Vanwege de te hoge waterdrukken onder de bouwdokbodem moeten, zoals hierboven reeds is beschreven, verticale waterafsluitende wanden tot in de slecht waterdoorlatende kleilaag (laag 6 in figuur 10.12) worden aangebracht.

#### Variant 1:

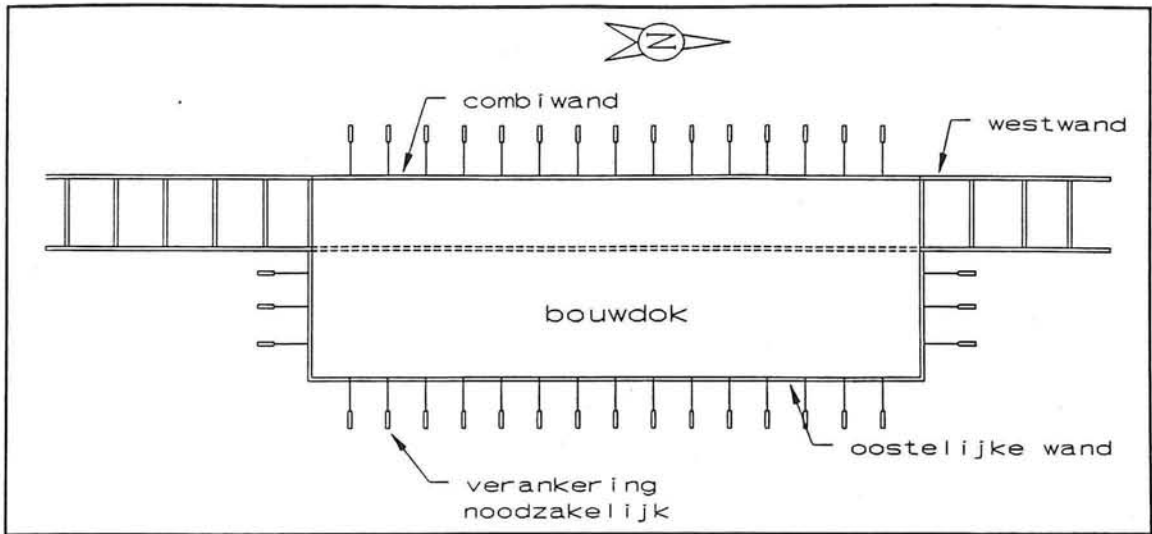
Bij een dokruimte met natuurlijke taluds is het dan noodzakelijk hieromheen een waterdoorlatend scherm aan te brengen in de vorm van een stalen damwandscherm of bijvoorbeeld een bentoniet-folie scherm of een bentoniet-cement scherm, hoewel deze laatste minder goed ondoorlatend is. Dit alternatief is verwoord in variant 1 (zie figuur 10.14).

Nadat de voltooide elementen uit het bouwdok zijn gesleept, moet een deel van het bouwdok worden opgenomen in de bouwkuipsleuf. Het bouwdok kan weer deels met grond worden aangevuld. Na deze grond te hebben verdicht kunnen de combiwanden voor het resterende stukje bouwkuip worden aangebracht. Na stempels te hebben aangebracht kan dit deel nu worden ontgraven. Na het aanbrengen van een onderwaterbetonvloer, verankerd aan van tevoren aangebrachte trekpalen, kan de bouwkuip worden drooggezet en kan het resterende tunneldeel worden gemaakt.

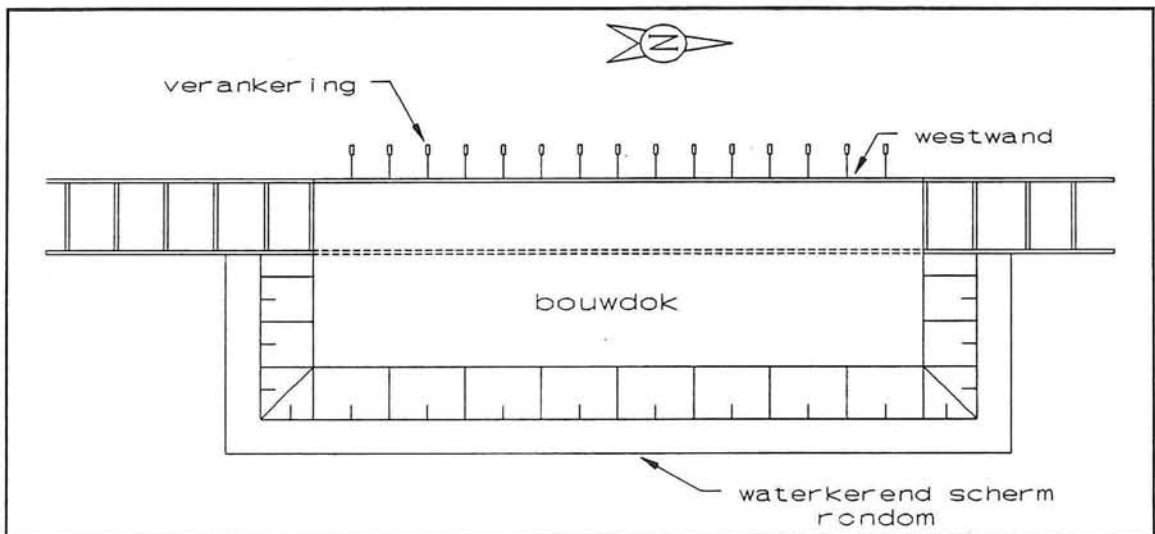
Het voordeel van deze variant zijn de relatief lage kosten van het bouwdok. Het nadeel is het grotere ruimtebeslag door de taluds; de benodigde ruimte voor het bouwdok wordt hierdoor ca. 1.5 maal breder. Daarbij komt het grotere benodigde grondverzet.

#### Variant 2:

Een andere mogelijkheid is een verticale bouwdokwand in de vorm van een combiwand. Deze wand heeft gelijktijdig zowel een grondkerende als een waterkerende functie. Bij deze variant,



Figuur 10.15 Variant 2 : Bouwdok met verticale combiwanden.



Figuur 10.16 Variant 3 : Combinatie talud en verticale combiwand.

zoals te zien is in figuur 10.15, kan de westelijke combiwand, die later ook nodig is bij de droge bouwput, reeds worden ingebracht en tijdelijk dienst doen als bouwdokwand. De oostelijke wand, ook een combiwand, kan na de bouwdokfase worden getrokken en worden verplaatst (☞ stippellijn in figuur 10.15), zodat ook zo een smallere bouwkuip voor het maken van het resterende tunneldeel ontstaat.

Voordeel van deze variant boven een bouwdok met natuurlijke taluds is het (veel) kleinere ruimtebeslag en de betere mogelijkheid om een stuk materieel, zoals een kraan, vlak naast de bouwdokrand te zetten. Aan en afvoer van materialen zal zo eenvoudiger zijn.

Nadeel van deze variant is dat de combiwanden in de bouwdokfase met behulp van ankers moeten worden gesteund, aangezien een stempeling in deze fase niet mogelijk is. In de droge bouwkuipfase (na de bouwdokfase) wordt de oostelijke bouwdokwand verplaatst. De beide wanden kunnen dan met stempels op elkaar worden afgesteund, of alleen het verplaatste deel van de oostelijke wand wordt opnieuw voorzien van ankers (het tegenoverliggende deel van de westelijke wand heeft deze ankers immers nog van de vorige fase). In beide gevallen gaan de voor de bouwdokfase aangebrachte ankers voor de oostelijke wand naderhand verloren. Dit is financieel nadelig.

Een ander nadeel is dat de oostelijke combiwand vanwege zijn grondkerende functie tot ca. 26 m diepte moet worden ingebracht, terwijl dit vanwege de waterkerende functie slechts ca. 16 meter behoeft te zijn. Dit is dus een lengteverschil van ca. 10 meter.

#### **Variant 3:**

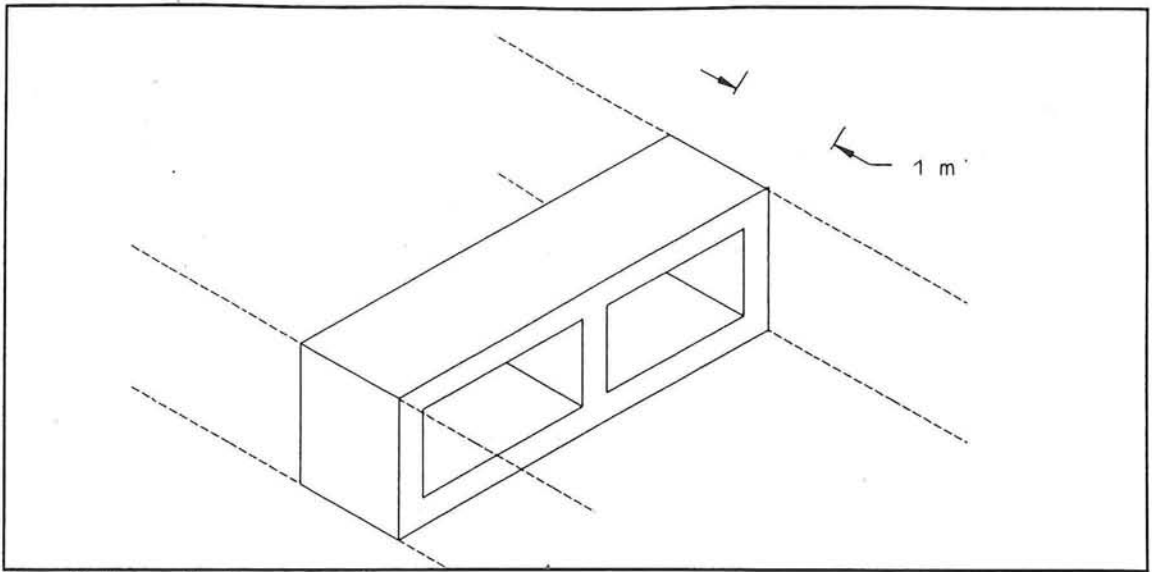
Vooraf ten aanzien van dit laatste (nadelige) aspect van variant 2 is een derde variant ontwikkeld. Deze variant bestaat uit een combinatie van variant 1 en 2.

De westzijde van het bouwdok wordt begrensd door een combiwand, welke naar achteren is verankerd. Deze combiwand zal later ook dienst doen als bouwkuipwand in de fase waarin het tunneldeel vanaf het station in den droge wordt gebouwd.

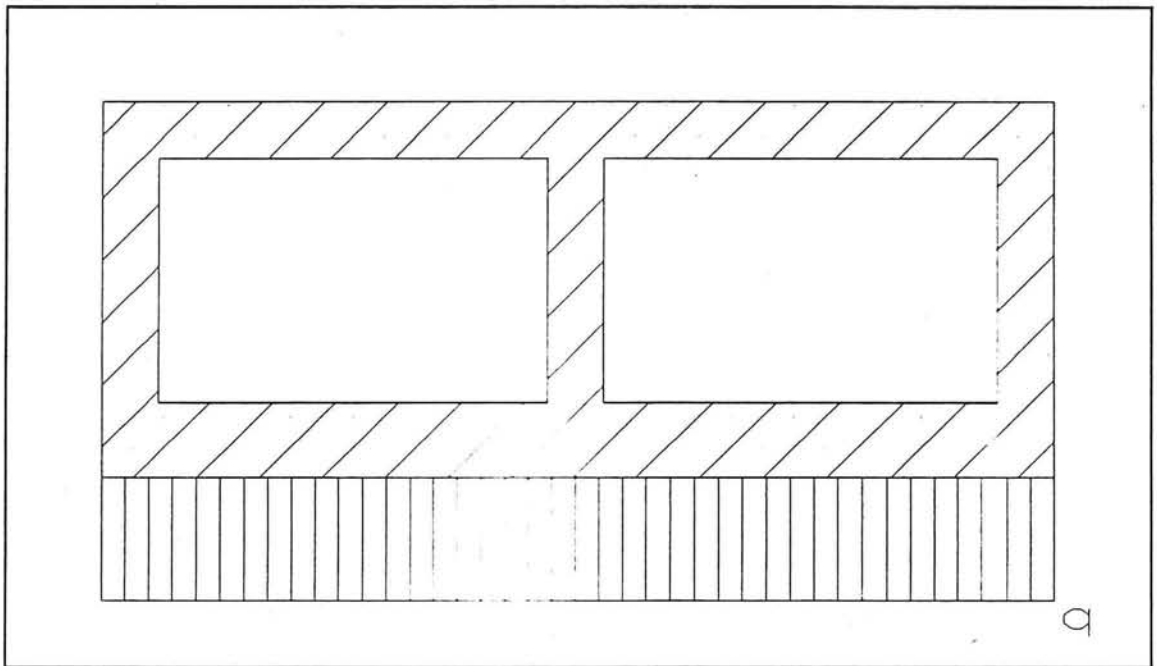
De oostzijde van het bouwdok wordt uitgevoerd met natuurlijke taluds, volledig omgeven door een stalen damwandscherm van 16 meter lengte, dat is aangesloten op de combiwanden van de doorgaande bouwkuipen ter weerszijden van het bouwdok (☞ figuur 10.16).

Na de bouwdokfase wordt het bouwdok deels aangevuld met grond, waarna de grond wordt verdicht. Het resterende gedeelte van de combiwand voor de droge bouwkuip kan worden aangebracht (☞ stippellijn in figuur 10.16). Het waterkerende damwandscherm kan weer worden teruggewonnen.

Het nadeel van deze variant is weliswaar het grotere ruimtebeslag, het voordeel is de lagere kosten (in vergelijking tot variant 2). De kosten van het aanbrengen en later verplaatsen, alsmede de verankering van de oostelijke bouwdokwand, zoals in variant 2, zijn bij variant 3 niet aanwezig.



Figuur 10.17 1 strekkende meter tunnel.



Figuur 10.18 Gelijkmatic verdeelde funderingsdruk.

**Keuze:**

De keuze tussen de drie varianten moet worden gebaseerd op de factoren *tijd, geld en bereikbaarheid*. Wat betreft de bereikbaarheid met bijvoorbeeld kranen is de tweede variant in het voordeel. Wat betreft het ruimtebeslag is de eerste variant duidelijk in het nadeel. Qua kosten is de derde variant het meest in het voordeel.

Uiteindelijk geeft de financiële factor in het algemeen de doorslag en is op grond daarvan gekozen voor de derde variant. Het mag dan minder goed mogelijk zijn een kraan o.i.d. vlak naast de oostelijke bouwdokrand te plaatsen, echter het aanbrengen en later weer verwijderen en het verankeren van een combiwand over een lengte van ca. 200 meter wordt bij deze variant vermeden. Dit is duidelijk een enorme besparing van kosten en tijd. Bovendien is het bij variant 2 nog maar de vraag of de delen van de te verplaatsen combiwand, na voltooiing van de bouwdokfase, wel ongeschonden uit de strijd komen en geschikt zijn gebleven voor hergebruik.

■ **Controle draagkracht bouwdokbodem.**

De (tijdelijke) funderingsgrondslag van de elementen in het bouwdok bestaat feitelijk uit de bouwputbodem. Ondanks het feit dat de gronddrukken onder het element tijdens de bouw gering zijn, is het toch gewenst om te controleren of de grondslag voldoende draagkrachtig is. Dit met name om ongelijke zettingen van de zinkelementen in aanbouw te voorkomen. Zulke ongelijke zettingen kunnen onverwachte momenten in het element veroorzaken. Mocht de grondslag onvoldoende draagkrachtig blijken, dan kan bijvoorbeeld een grondverbetering worden overwogen.

Uit geotechnisch onderzoek, gedaan door NS-BTC, volgt een waarde van de conusweerstand voor deze funderingsgrondslag voor de elementen van ca. 0.4 MPa (400 kN/m<sup>2</sup>). Maar, door de ontgraving (dus reductie van de gronddruk) neemt de bezwijkwaarde van de grond af. Stellen we deze reductie bij grove benadering op 50%, dan geldt een waarde van de bezwijkwaarde van de grond van ca. 0.2 MPa (200 kN/m<sup>2</sup>).

Voor het eigen gewicht van de elementen geldt per strekkende meter element (zie figuur 10.17) een belasting op de grond van ca. 71.2 kN/m<sup>1</sup>.

Per vierkante meter is dit dus een belasting van: (71.2 x 1m<sup>1</sup>) kN/m<sup>2</sup>.

Indien de funderingsdruk gelijkmatig verdeeld wordt aangenomen (zie figuur 10.18), dan geldt voor de bezwijkveiligheid van de grond:

$$\gamma = \frac{q_{c,red}}{q_{e.g.}} = \frac{200}{71.2} = 2.80$$

De grond is dan dus voldoende draagkrachtig.

Maar, redelijkerwijs gesproken is de funderingsdruk onder de wanden groter dan in de velden,



en verloopt daarbij ongeveer zoals is aangegeven in figuur 10.19. Stellen we de funderingsdruk onder wanden ongeveer 1.5 maal de gemiddelde funderingsdruk, dan geldt voor de bezwijkveiligheid:

$$\gamma = \frac{q_{c,red}}{q_{e.g.} \cdot 1.5} = \frac{200}{71.2 \cdot 1.5} = 1.90$$

Dit is nog steeds voldoende.

#### ■ Grindbed bouwdokbodem.

Ten aanzien van de funderingsgrondslag is nog het volgende op te merken:

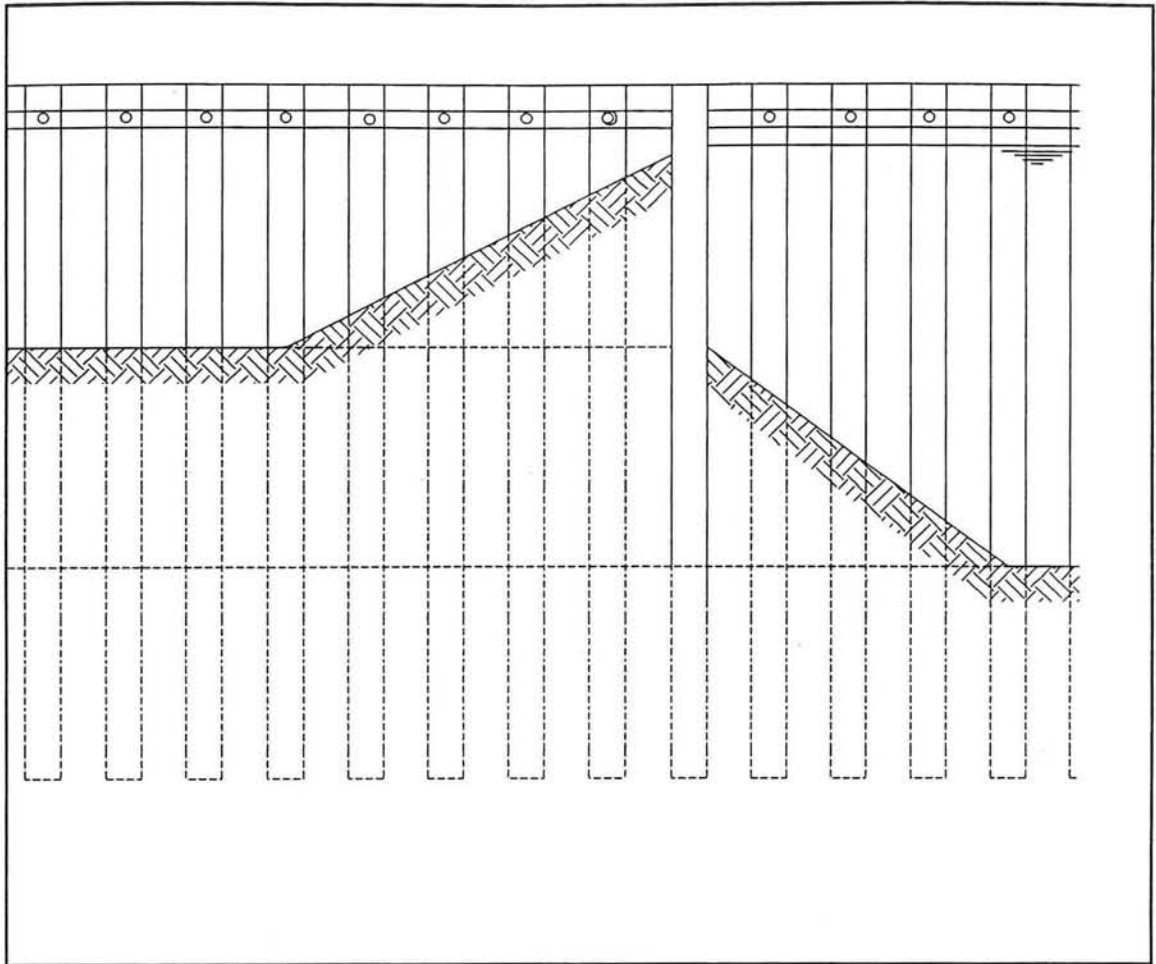
Bij het onder water zetten van het bouwdok zullen de elementen gaan drijven. Wanneer de elementen op een kale kleibodem liggen, kan het gebeuren dat bij het vollopen van het bouwdok de stijghoogten onder het element achter blijven bij de waterspiegel in het dok. De elementen blijven dan als het ware als een zuignap aan de bodem kleven. Afgezien van het feit dat het vervelend is als een element niet wil gaan drijven, kunnen hierdoor ongewenste krachten in de constructie optreden. Om dit te voorkomen, wordt van tevoren op de plaats van de te bouwen elementen een grindbed van ca.20 cm dikte aangebracht (zie figuur 10.20). De goede waterdoorlatendheid van het grindbed zorgt dan bij de inundatie van het bouwdok voor een snelle aanpassing van de stijghoogten onder het element.

Op deze grindlaag worden multiplex platen aangebracht, waarop het betonwerk voor de vloeren van de elementen wordt gestart.

#### ■ Ontgraving bouwdok.

Nadat het verticale waterkerende scherm, zoals hierboven beschreven, en de sleufwand aan de west-rand van het bouwdok zijn aangebracht (zie figuur 10.16), kan het bouwdok worden ontgraven. De ontgraving kan plaatsvinden met behulp van hydraulische graafmachines. De uit het bouwdok vrijgekomen grond kan tijdelijk worden opgeslagen op de ruimte naast het bouwdok. Hierbij moet overigens wel rekening worden gehouden met het feit dat de eronderliggende grond door de extra belasting zettingen zal gaan vertonen.

Een aspect dat bij de uitvoering van grote civieltechnische werken, en met name het ontgraven van grond, zeer aktueel is, is de milieukundige kwaliteit van de grond. Dit is bijvoorbeeld van belang bij mogelijke verspreiding van in de grond aanwezige verontreinigingen, maar kan ook van belang zijn bij mogelijk hergebruik van ontgraven grond, zoals het ophogen van een bouwterrein voor een woonwijk. In een zeer vroegtijdig stadium moet onderzoek worden verricht naar mogelijke verontreinigingen van de grond. Een vroegtijdige kennis van eventuele verontreinigingen in de grond voorkomt dat de bouwer voor onverwachte verrassingen komt te



Figuur 10.21 Doorsnede over verbinding bouwdok/zinksleuf.

114



staan en voorkomt dat het plotseling stuiten op een stuk verontreinigde grond, grote vertragingen in het totale project veroorzaakt.

In het kader van de *Wet Bodemsanering* bestaat een dergelijk onderzoek uit een aantal onderdelen. Allereerst is er het historisch onderzoek, waarbij wordt uitgezocht of er mogelijk verdachte bedrijven nabij het tunneltracé waren gevestigd. Vervolgens wordt een oriënterend onderzoek gedaan, waarbij langs het tunneltracé om de circa 50 meter een bodemonster wordt genomen. Indien een bepaald monster een hoge concentratie verontreiniging vertoont, dan wordt het gebied waar het monster is genomen aan een nader onderzoek onderworpen. Zo worden alle mogelijke verontreinigingen in kaart gebracht, waarbij de verontreinigde grond wordt ingedeeld in een aantal categoriën (A-F), die de verontreinigingsgraad aangeven. Vervolgens wordt in een saneringsonderzoek bepaald wat er met welke verontreinigde grond moet gebeuren. Licht verontreinigde grond mag voor bepaalde doeleinden alsnog worden gebruikt (bijvoorbeeld demping van een sloot, haven o.i.d.). Sterk verontreinigde grond moet worden gereinigd, alvorens te kunnen worden hergebruikt. Schone grond kan zonder meer worden hergebruikt of verhandeld.

Het belang van een grootscheeps milieu-onderzoek is bij het Willemspoortunnel-project te Rotterdam aangetoond. Bij dit project werd circa anderhalf miljoen kubieke meter grond verzet. Voordat er ook maar één spade de grond in ging, is er een uitgebreid onderzoek geweest naar eventuele verontreinigingen in de bodem. Bij dit onderzoek is op diverse hoeveelheden verontreinigde grond gestuit, verdeeld over de categorieën A-F. Er werd licht verontreinigde tot zeer zwaar vervuilde grond gevonden. Door het vroegtijdige karakter van het bodemonderzoek kon van tevoren de bestemming van de diverse soorten verontreinigde grond worden vastgesteld. Op die manier kon stagnatie in het ontgravingschema, dat in een strakke tijdplanning zat, zoveel mogelijk worden vermeden.<sup>1</sup>

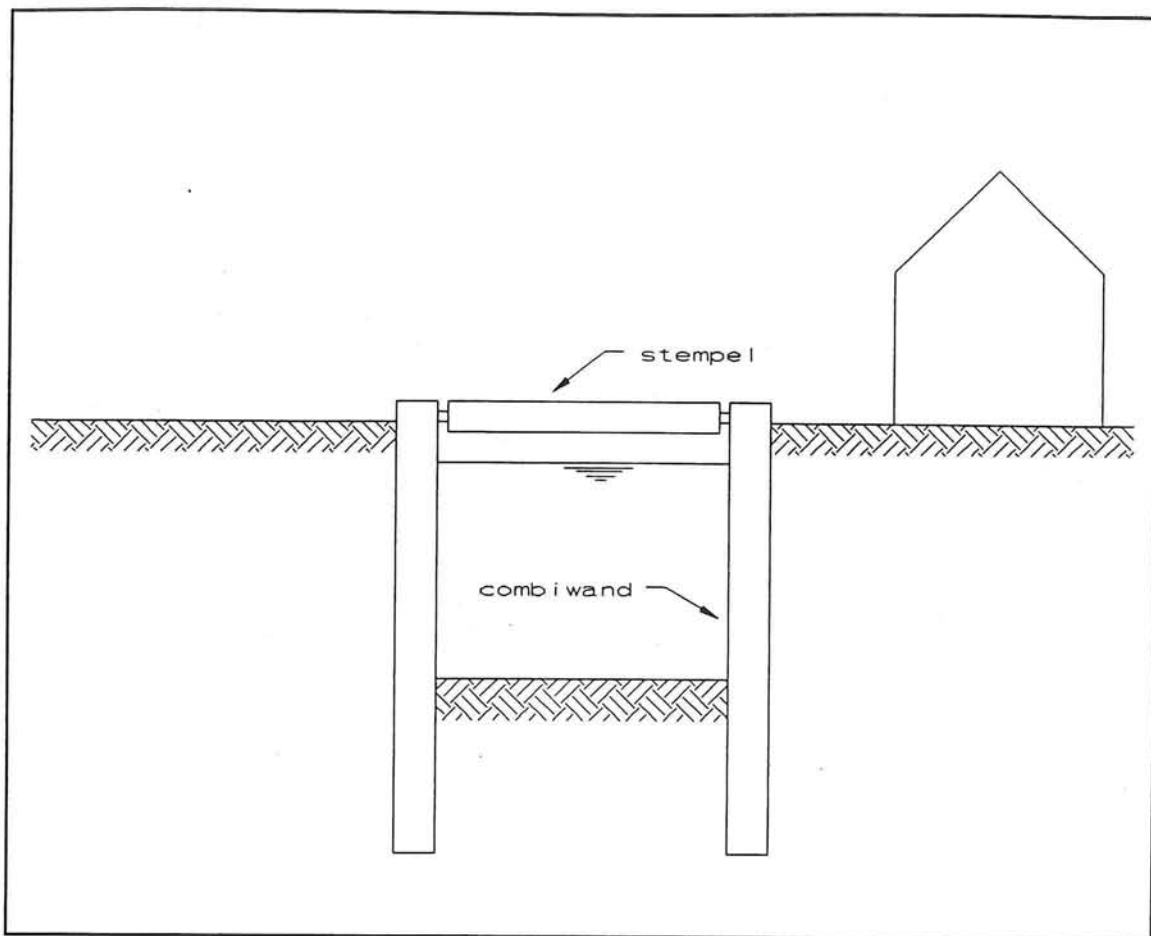
### 10.3.5 De inrichting van het bouwdok.

In paragraaf 10.3.2 is de indeling van de te maken elementen in het bouwdok reeds bepaald (zie figuur 10.6). Buiten de elementen zelf zijn nog een aantal andere zaken in het bouwdok benodigd.

Ten behoeve van het verplaatsen van materialen (betonstaal, beton, bekistingen e.d.) dient het bouwdok te worden voorzien van één of meerdere hijsinstallaties. Bij de inpassing van de elementen in de bouwdok-ruimte wordt een vrije ruimte tussen de elementen van 5 á 10 m aangehouden voor het kunnen plaatsen van een rail voor één of meerdere verrijdbare hijsinstallaties. Verder is een kleine opslagloods voor losse materialen benodigd. Deze en andere benodigde ruimten, zoals keten e.d. kunnen op het maaiveld worden gestationeerd en hoeven dus niet noodzakelijkerwijs in het bouwdok zelf te worden geplaatst.

---

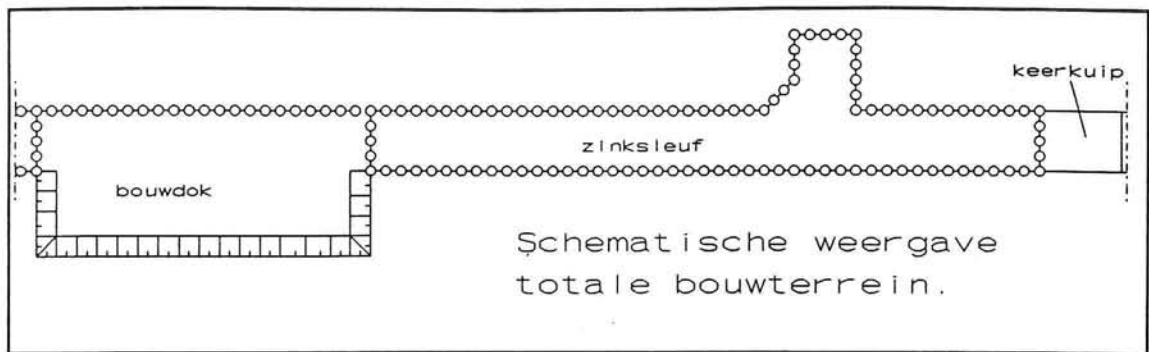
<sup>1</sup> Voor meer informatie hierover: Pulles, drs.ing.F.P.J.M., maart 1990.



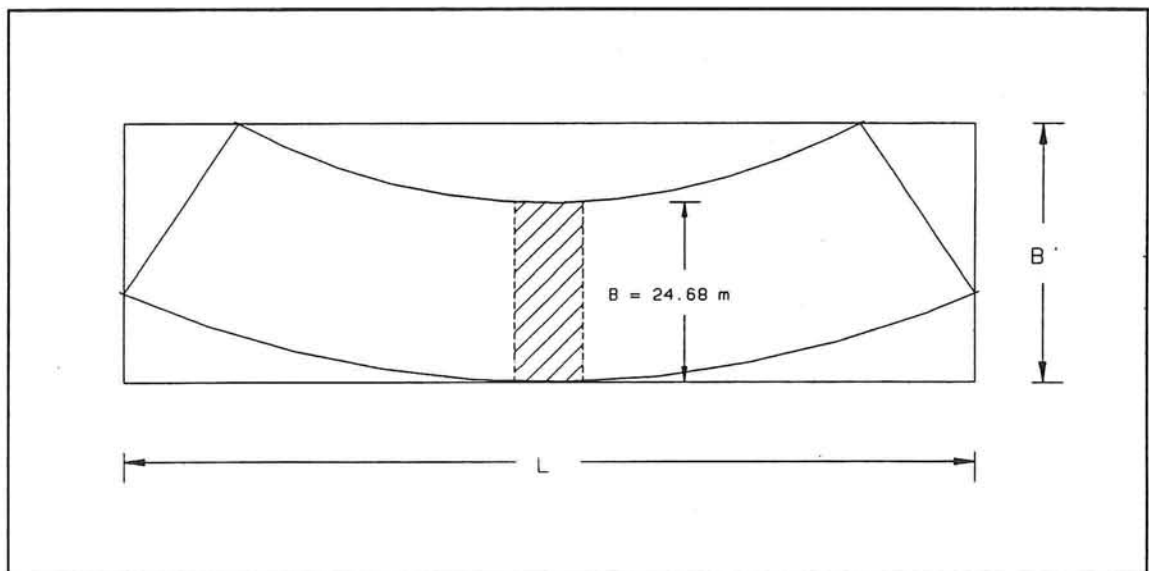
Figuur 10.22 Combiwand met stempeling.

### **10.3.6 Verbinding met de zinksleuf.**

Het bouwdok en de zinksleuf zijn tijdens de bouw van de elementen door middel van een eenvoudige damwand van elkaar gescheiden. Door een laag grond onder een helling hier tegenaan te laten liggen (zie figuur 10.21), kan deze wand licht worden uitgevoerd. Daardoor is deze wand in een later stadium, voor het afzinken van de elementen, op eenvoudige wijze te verwijderen.



Figuur 10.23 Schematisch bovenaanzicht bouwterrein.



Figuur 10.24 Bepaling omlijsting element t.b.v. bepalen sleufbreedte.

## 10.4 De zinksleuf.

### 10.4.1 Inleiding.

De zinksleuf door de stad wordt uitgevoerd als een soort natte bouwkuip. Voor het keren van de grond naast de kuip en om zettingen van belendende percelen zo klein mogelijk te houden, worden de wanden van de bouwkuip uitgevoerd met (relatief stijve) combiwanden. De wanden aan weerszijden van de kuip worden aan de bovenzijde met stempels op elkaar afgestempeld (zie figuur 10.22). Deze enkelvoudige stempellaag grijpt zo hoog mogelijk op de wanden aan. De h.o.h. afstand van deze stempels is 5 meter.

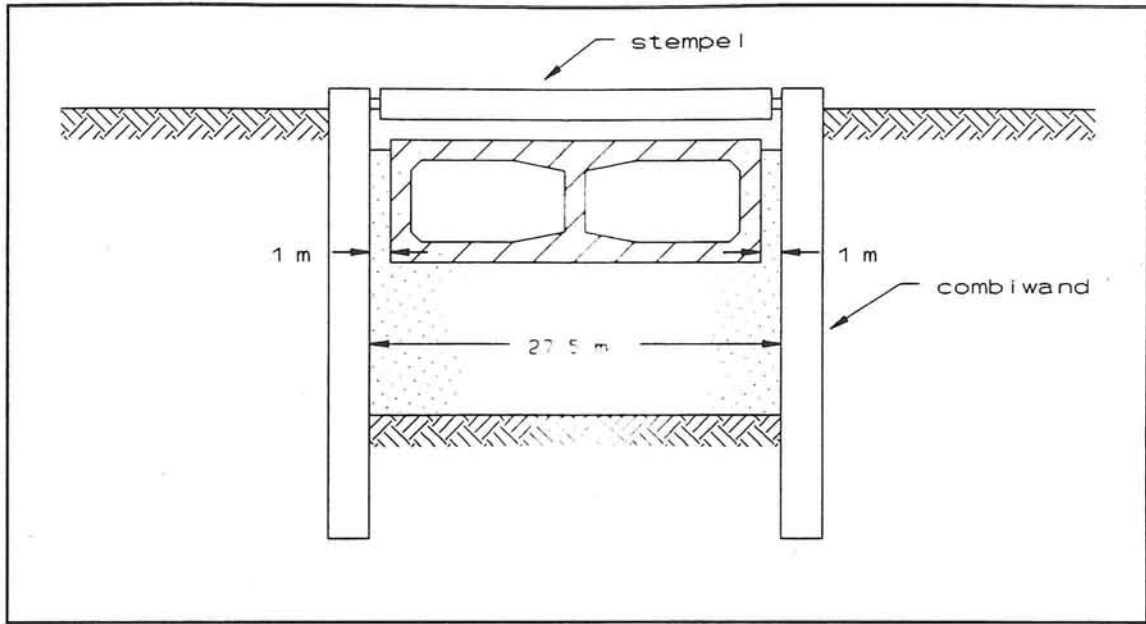
Op een aantal plaatsen komt de wand van de zinksleuf vrij dicht langs bestaande bebouwing te lopen. Dit is met name het geval bij de panden aan de Houttuinen en aan de Van Leeuwenhoeksingel. Ook op deze plaatsen moet een combiwand in de grond worden ingebracht. Het uitvoeren van hei-werkzaamheden nabij belendingen brengt extra risico's met zich mee. Het heien gaat gepaard met trillingen. Men kan zich afvragen of deze trillingen schadelijk zullen zijn voor de belendingen? Met name de huizen aan de Van Leeuwenhoeksingel zijn volgens insiders nogal krakkemikkig.

Over het algemeen kan worden gesteld dat trillingen, veroorzaakt door hei-werkzaamheden, geen schade kunnen toebrengen aan belendingen. Zand bijvoorbeeld, laat zich goed verdichten met behulp van trillingen. Maar de energie die daarvoor benodigd is, is vele malen groter dan de energie die vrijkomt bij het heien. Deze visie wordt mede ondersteund door het volgende citaat: *Trillingen moeten blijken een rapport van het Engelse Building Research Station zeer ernstig (ondraaglijk voor de mens) worden, alvorens er maar een eerste kans bestaat dat een gebouw er schade door kan ondervinden.*<sup>1</sup> Overigens kunnen trillingen wél schadelijk zijn voor in de belendingen aanwezige apparatuur, zoals computers en gevoelige meetapparatuur. De aanwezigheid hiervan dient van tevoren te worden geïnventariseerd en waar nodig moeten maatregelen worden genomen.

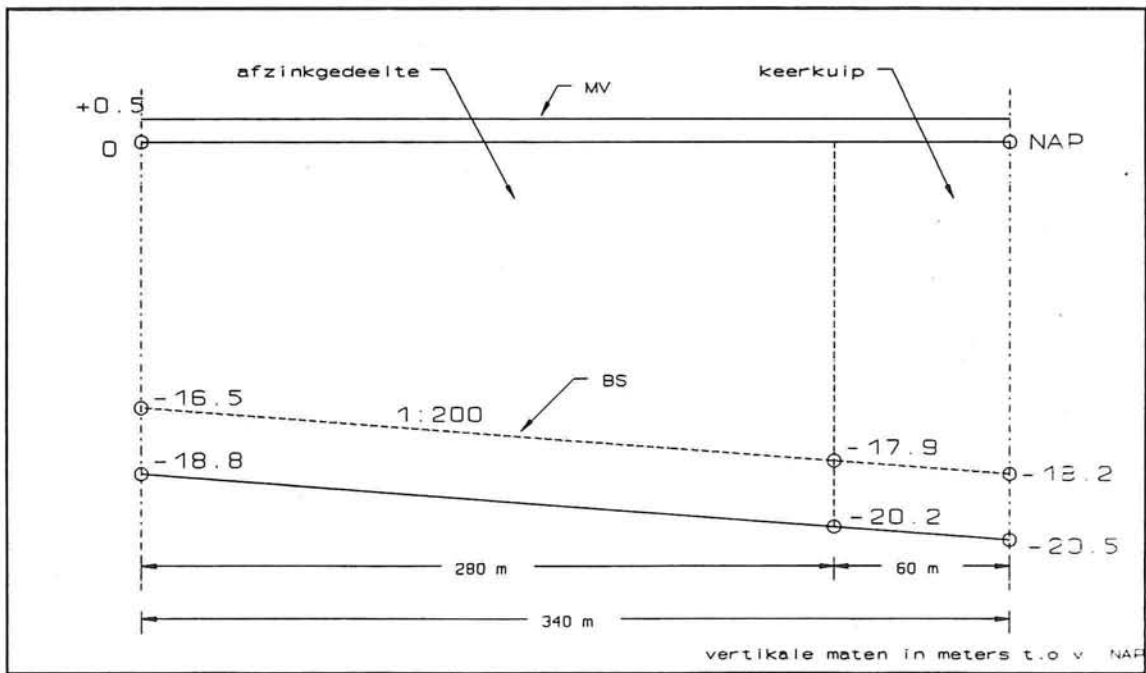
Anders dan door trillingen kan er wel op een andere manier door heien schade aan belendende percelen worden toegebracht. Dit heeft meer te maken met het inbrengen van grondverdringende elementen, zoals heipalen. Door het inheien van een paal in slappe klei- en veenlagen wordt in korte tijd een bepaald volume grond verplaatst. Door de slechte doorlatendheid van de grond kan het poriënwater in de korte tijd niet direct afvloeien en zal geen verdichting kunnen optreden. De volumetoename, veroorzaakt door de paal, heeft daardoor een grondverplaatsing tot gevolg. Hierdoor kan dus schade aan de belendingen worden veroorzaakt. In het geval van het inheien van een combiwand is de grondverdringing niet dermate groot dat het hiervoor genoemd probleem zich voor zal doen.

---

<sup>1</sup> Citaat uit: Weele, Prof.ir.A.F. van, 1991.



Figuur 10.25 Breedte zinksleuf.



Figuur 10.26 Langsprofiel zinksleuf.

Desondanks is het toch verstandig om, alvorens met het heien begonnen wordt, alle bestaande schade aan belendende panden nauwkeurig vast te leggen, zodat schadeclaims die voor deze schades achteraf worden ingediend kunnen worden gepareerd.

Een ander aspect van de ligging van de zinksleuf vlak naast een aantal panden is de bereikbaarheid van die panden. Dit ten aanzien van het dagelijks gebruik, maar ook in het geval van calamiteiten, zoals brand en dergelijke. De geplande hulpbruggen en overige hulpconstructies blijken in deze behoefte goed te kunnen voorzien.

Doordat de sleuf niet droog hoeft te worden gemaakt, is hier voor dit doel geen waterdichte bodemafsluiting nodig. Ten aanzien van de kortsluiting met de diepere lagen, waar een onttrekking van het grondwater plaatsvindt zijn aanvullende maatregelen noodzakelijk. Dit komt aan de orde in §10.4.4. Door het natte karakter van de sleuf levert de hydrostatische waterdruk aan de binnenzijde van de bouwkuip een gunstige tegendruk op de wanden. Zo kunnen de wanden lichter worden uitgevoerd, dan wanneer van een droge bouwkuip was uitgegaan. Dit geldt uiteraard alleen voor dat deel van de wand, waar de tegendruk van het water permanent aanwezig is.

De bepaling van de afmetingen van de zinksleuf en de dimensionering van de combiwand en de stempels komt in de hiernavolgende paragrafen aan de orde.

In figuur 10.23 is een schematisch bovenaanzicht van het bouwterrein weergegeven.

#### 10.4.2 Afmetingen van de zinksleuf.

##### a. Breedte zinksleuf.

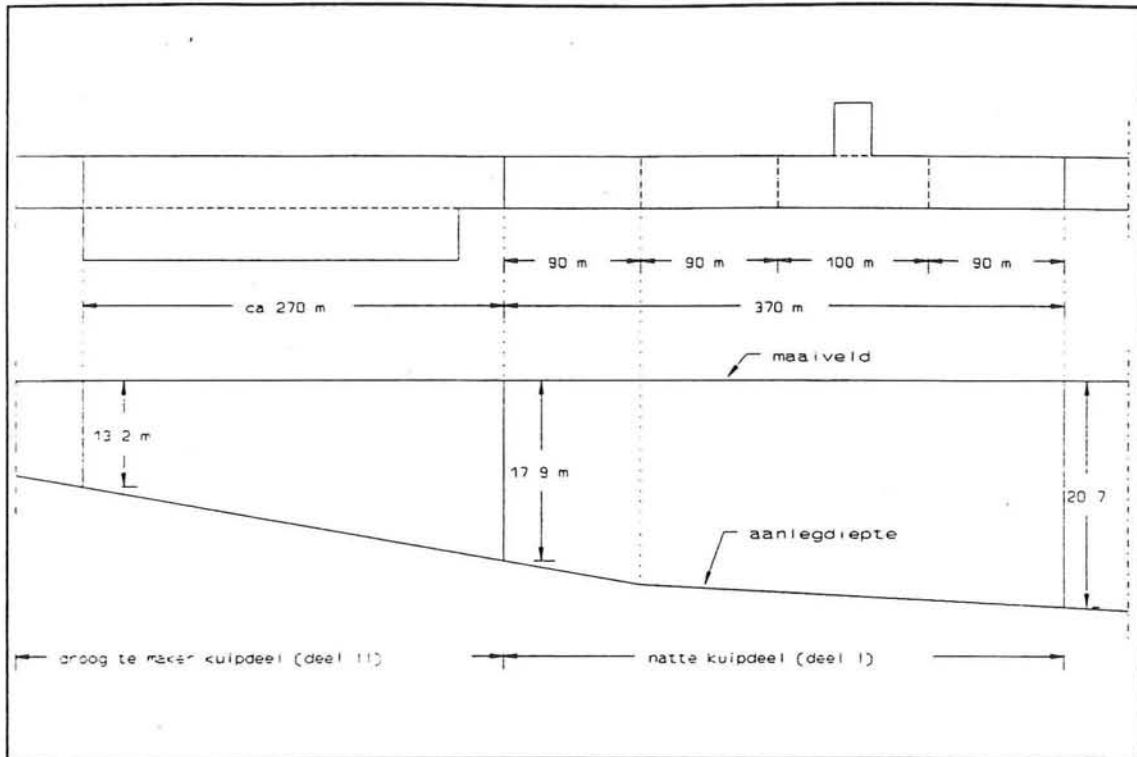
De inwendige breedte van de zinksleuf is afhankelijk van de breedte van de zinkelementen en van de speling die het element tussen de kuipwanden nodig heeft.

De lokale breedte  $B$  van een mootje  $dx$  van het element is 24,68 m (zie figuur 10.24). Lokaal, omdat het station in een lichte bocht ligt en de elementen dus een zeer lichte kromming vertonen. Tekenend we een rechthoek om het element heen, dan is de minimaal benodigde breedte  $B'$  iets groter dan de lokale breedte  $B$ . Overdreven getekend ziet dat er dus uit als in figuur 10.24.

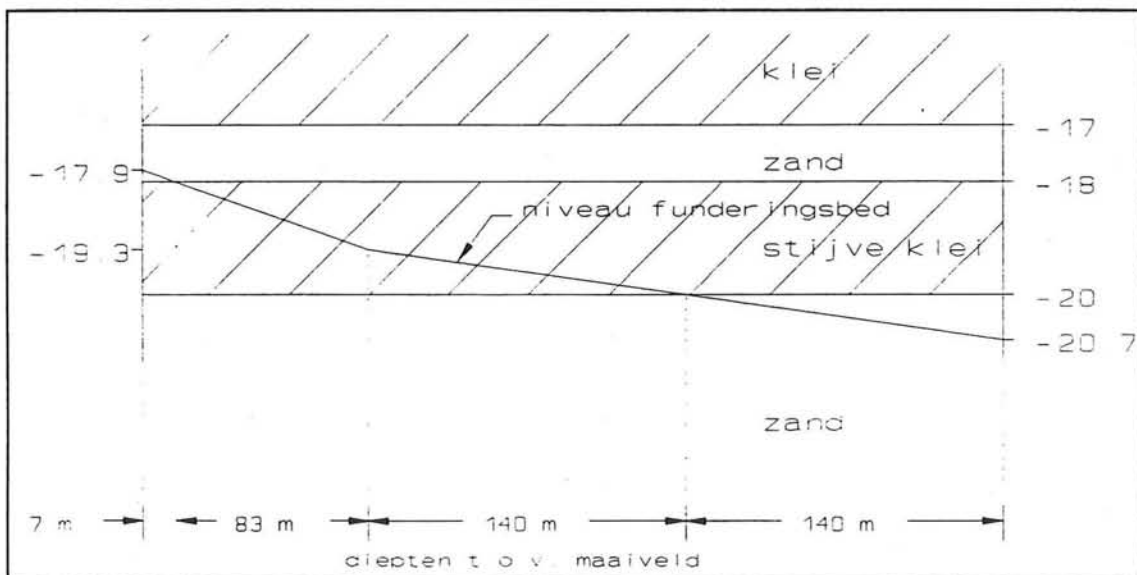
De kromming  $\kappa$  van het element is gelijk aan:

$$\kappa = \frac{1}{R}$$

De bochtstraal van de bocht waarin het station ligt is gelijk aan:  $R = 1800$  m. De Kromming  $\kappa$  is dus gelijk aan:  $5.55 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ .



Figuur 10.27 Overzicht vertikaal alignement.



Figuur 10.28 Langsdoorsnede funderingsbed; doorsnijding grondlagen.



Na berekening (☞ bijlage K) blijkt de omhullende rechthoek van het maatgevende element van 100 m lengte de volgende afmetingen te hebben:

- lengte  $L' = 100.68$  m
- Breedte  $B' = 25.37$  m

Dit is dus 68 cm langer dan de middellijn van het element en 69 cm breder dan de lokale breedte van het element.

Voor de benodigde breedte voor het drijvend transport van het element moet dus worden uitgegaan van een elementbreedte  $B'$  van 25.37 meter. Uitgaande van een speling tussen het element en de wanden aan beide zijden van 1 meter, komt de totale inwendige breedte van de zinksleuf op:  $25.37 + 2 \times 1 = 27.37$  m  $\approx 27.5$  m (☞ figuur 10.25).

#### **b. Diepte zinksleuf.**

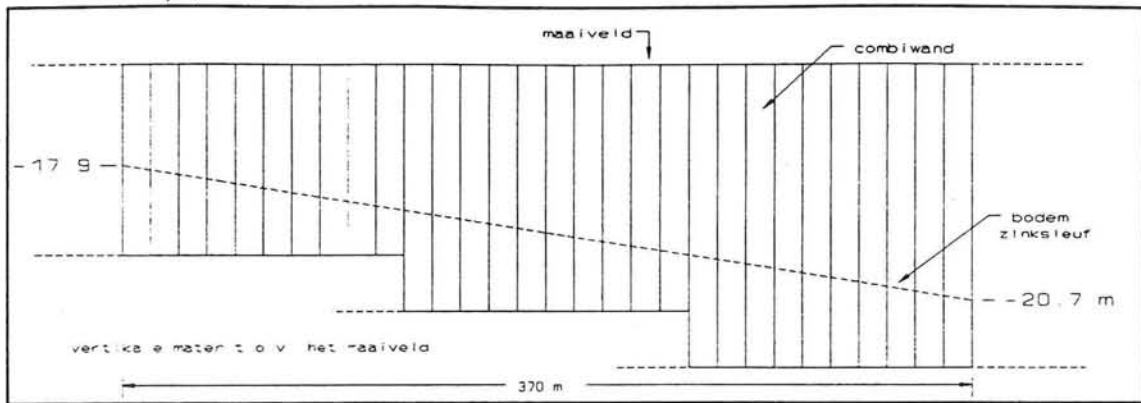
Op het diepste punt van het station (noordzijde) (☞ figuur 10.26) ligt het niveau Bovenkant Spoor (BS) op een diepte van 18.2 m ÷ NAP. Op het diepste punt van de zinkelementen ( $x=280$  m) ligt BS op een niveau van 17.9 m ÷ NAP. Het hoogste BS-punt van het station (zuidzijde) ligt op een niveau van 16.5 m ÷ NAP. De helling in langsrichting bedraagt 1:200. Met een ballastbed in de tunnel van ca.0.8 m, een vloerdikte van de elementen van 1.2 m en een ruimte van ca.0.3 m onder het zinkelement voor het funderingsbed van de constructie, komt de aanlegdiepte van het station op respectievelijk 18.8 m ÷ NAP aan de zuidzijde en 20.2 m ÷ NAP aan de noordzijde (☞ figuur 10.26). Het maaiveld ligt ter plaatse van dit laatste punt op een niveau van ca.0.5 m + NAP. Het diepste punt van de zinksleuf ligt dus op ca.20.7 meter (= 20.2 + 0.5) beneden het maaiveld.

Het gedeelte van de zinksleuf vanaf het station, zuidwaarts gerekend, is sterk stijgend (helling ca.1:64). De sleuf begint direct naast het station met een diepte van ca.18.8 m ÷ NAP en loopt op tot een diepte van ca.17.4 m ÷ NAP aan het eind van het laatste zinkelement (element 4). Vanaf dit punt gaat de zinksleuf zuidwaarts over in een na de afzinkfase droog te zetten bouwkuip. Dit is in §10.3.4 reeds besproken.

Het niveau BS loopt vanaf het eindpunt van element 4 op van 15.1 m ÷ NAP tot ca.10.9 m ÷ NAP aan de zuidrand van het bouwdok.

Samenvattend is er dus een nat kuipdeel (deel I), waarvan de wanden een kerende hoogte hebben die loopt van ca.20.7 m in het diepste punt tot ca.17.9 m in het hoogste punt.

Daarnaast is er het later droog te maken kuipdeel (deel II), waarvan de wanden een kerende hoogte hebben die loopt van ca.17.9 m in het diepste punt tot ca. 13.2 m aan de zuidrand van het bouwdok, en daarna aflopend tot aan het maaiveld (einde van de tunnel) (☞ figuur 10.27).



Figuur 10.29 Trapsgewijze lengtereductie combiwand.

Onderscheid wordt dus gemaakt tussen allereerst een nat kuipdeel (deel I), waarbij de wanden aan de ontgravingszijde o.a. gesteund worden door het in de kuip staande water en daarnaast een later droog te maken kuipdeel (deel II), waarbij de wanden de (gunstig) werkende druk van het water aanvankelijk wel (afzinkfase) maar later niet meer (droge bouwkuipfase) hebben. Vanzelfsprekend moet deze laatste wand zwaarder worden uitgevoerd dan de wanden van deel I en moet deze wand worden voorzien van meervoudige stempellagen. De wanden van deel I kunnen door de gunstige tegendruk van het water volstaan met een enkelvoudige stempellaag, zoals beschreven in §10.3.3.

Om een idee te krijgen van de benodigde sterkte van de combiwand van het natte kuipdeel (deel I), wordt deze wand in de volgende paragraaf (§10.4.3) berekend.

### c. Grondverbetering of niet?

De zinkelementen worden in de zinksleuf op staal gefundeerd. De elementen kunnen worden geplaatst op een gravel-bed of worden onderspoeld met zand, teneinde een goede aansluiting tussen element en funderingsgrondslag te verkrijgen.

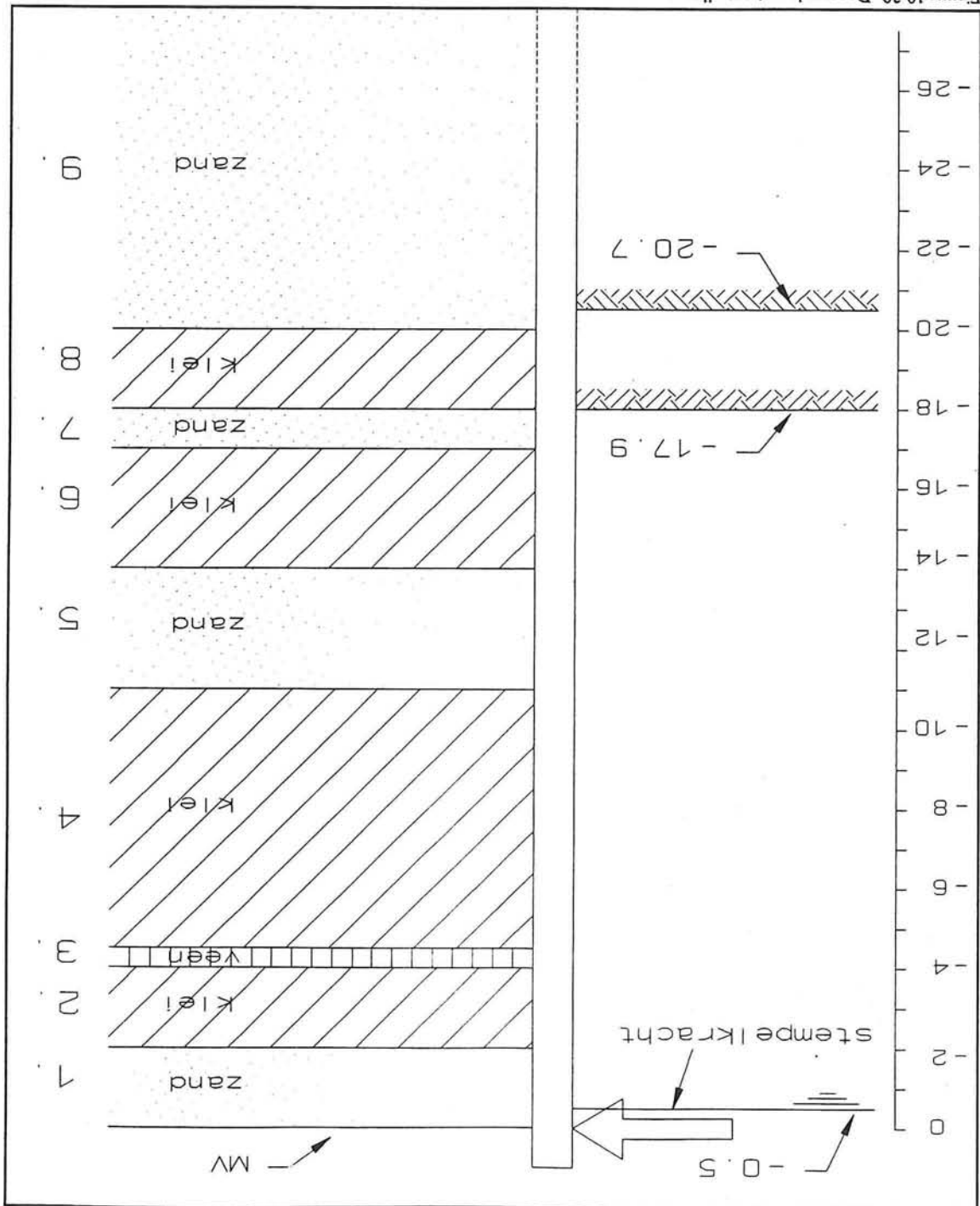
Zoals in figuur 10.27 is te zien, loopt het niveau van de funderingsbodem van de elementen van 20.7 m tot 17.9 m beneden het maaiveld. De grondslag van de funderingsbodem (zie figuur 10.28) bestaat in dit gebied uit het pleistocene zand, dat begint op 20 m diepte, met daarop een in dikte oplopend laagje zeer stijve klei. Op het laatste stukje vanaf een diepte van 18.0 m ÷ MV ligt nog een dun laagje zand.

De vraag is nu of het funderingsbed, en met name dat deel waar het bed uit klei bestaat, voldoende draagkrachtig zal zijn. Indien dit niet het geval is, dan is het noodzakelijk deze kleilaag over de volle zinksleuflengte te verwijderen en een grondverbetering toe te passen. Een gevolg hiervan is dat de sleuf dan tot aan het pleistocene zand (20 m ÷ MV) ontgraven moet worden. Dit heeft ook consequenties voor de combiwanden. Namelijk, een diepere ontgraving impliceert een grotere te keren hoogte (zij het tijdelijk) en vereist dus ook een zwaardere combiwand.

Indien een grondverbetering niet noodzakelijk is, dan is de te keren hoogte aflopend in zuidelijke richting (van 20.7 m tot 17.9 m, verschil 2.8 m). Het is in dat geval wellicht zinvol te onderzoeken of de wand in die richting niet stapsgewijs lichter zou kunnen worden uitgevoerd, en met name de inheidiepte mogelijk kan worden gereduceerd.

Om te onderzoeken of een grondverbetering wel of niet noodzakelijk is, wordt allereerst de belasting op de funderingsbodem in de eindsituatie bekeken.

Hiervoor nemen we een punt midden in de kleilaag op ca. 19 meter diepte. Bij de aanleg van de tunnel wordt allereerst de grond verwijderd tot die 19 meter diepte. Vervolgens wordt het zinkelement afgezonken. De tunnelconstructie (hoogte ca. 8.8 m) komt daarbij op de plaats waar



Figuur 10.30 Doorsnede met grondlagen.

aanvankelijk een laag grond met een dikte van die ca. 8.8 m heeft gezeten. De rest van de ruimte boven de tunnel wordt daarna aangevuld met aanvulzand.

De tunnelconstructie, die zich in de grond feitelijk onder water bevindt, weegt door de opwaartse druk van het water bijna niets. De ruimte die de tunnel nu inneemt was vroeger gevuld met eenzelfde volume aan grond met een veel groter volumiek gewicht dan dat van de tunnel. Doordat dit volume nu door de tunnel, wordt ingenomen, betekent dit een ontlasting van het funderingsbed.



Het aanvulzand bovenop de tunnel heeft een groter volumiek gewicht ( $\gamma \approx 19 \text{ kN/m}^3$ ) dan dat van de verwijderde grond ( $\gamma_{\text{gem}} \approx 16 \text{ kN/m}^3$ ). Dit betekent dus een hogere belasting dan oorspronkelijk aanwezig was.

Desondanks is de uiteindelijke totale belasting van het funderingsbed, met name door het geringe onder-water-gewicht van de tunnel, lager dan oorspronkelijk aanwezig was. De invloed van het grotere volumieke gewicht van het aanvulzand is pas merkbaar bij zeer grote aanlegdiepte van de tunnel (ca. 50 m beneden het maaiveld).

Conclusie is dus dat geen grondverbetering van het funderingsbed noodzakelijk is, aangezien de belasting op het funderingsbed in de uiteindelijke situatie niet hoger is dan de oorspronkelijk aanwezige belasting door de grond.

Zoals hiervoor reeds werd gezegd is het niet hoeven toepassen van een grondverbetering wellicht gunstig ten aanzien van de benodigde lengte en zwaarte van de combiwand. Daarnaast is dit een kostenbesparing ten aanzien van het ontgraven van de sleuf en het gebruik van aanvulzand.

#### 10.4.3 Dimensionering sleufwanden.

Zoals hiervoor reeds is aangestipt, zal worden gekeken of de combiwand van het natte kuipdeel (deel I ) over de lengte van ca. 370 meter stapsgewijs lichter kan worden uitgevoerd, dan wel dat de inheidiepte stapsgewijs kan worden gereduceerd. Ter vergelijking zullen twee berekeningen worden uitgevoerd. Eén berekening met een kerende hoogte van de wand van 20.7 meter en één berekening met een kerende hoogte van de wand van 17.9 meter (verschil 2.8 meter). Vergeleken wordt of dit zeer uiteenlopende waarden voor de inheidiepte en de momentenverdeling oplevert. Indien dit het geval is, zou het zinvol kunnen zijn om bijvoorbeeld trapsgewijs met een aantal verschillende (bijvoorbeeld drie) buis- en damwandplank-lengten te werken (.



Ter voorbereiding op een berekening van de wanden bekijken we eerst de situatie (☞ figuur 10.30). De verticale grond- korrel en waterspanningen die in de grond heersen, zijn weergegeven in de tabel en figuren in §10.2.4. Zo ook zijn in de tabel de horizontale gronddrukken als functie van de diepte reeds berekend.

**a. Berekeningsmethode.**

Voor de berekening van de benodigde wandlengte en de momentenverdeling in de wand, wordt gebruik gemaakt van de methode-Blum. Uiteraard zijn meer geavanceerde en nauwkeuriger methoden met meer mogelijkheden beschikbaar voor de berekening van een bouwkuipwand. Maar, gezien de relatieve eenvoud van de constructie (kerende wand met enkelvoudige stempellaag) en de aard van de berekening wordt een eenvoudige berekening gemaakt volgens de methode-Blum.

Bij de berekening volgens Blum wordt gebruik gemaakt van een grafische oplossingsmethode voor het bepalen van de krachtsverdeling in een ligger (damwand) belast met puntlasten en/of een gelijkmatig verdeelde belasting. Blum veronderstelt dat aan de kerende zijde van de damwand een actieve gronddruk heerst, en aan de andere zijde een passieve gronddruk. Deze actieve- en passieve gronddrukken worden bepaald door de verticale gronddruk om te rekenen naar een horizontale gronddruk met behulp van de coëfficiënten  $K_a$  en  $K_p$ . Een toelichting op deze coëfficiënten is gegeven in §10.2.2.

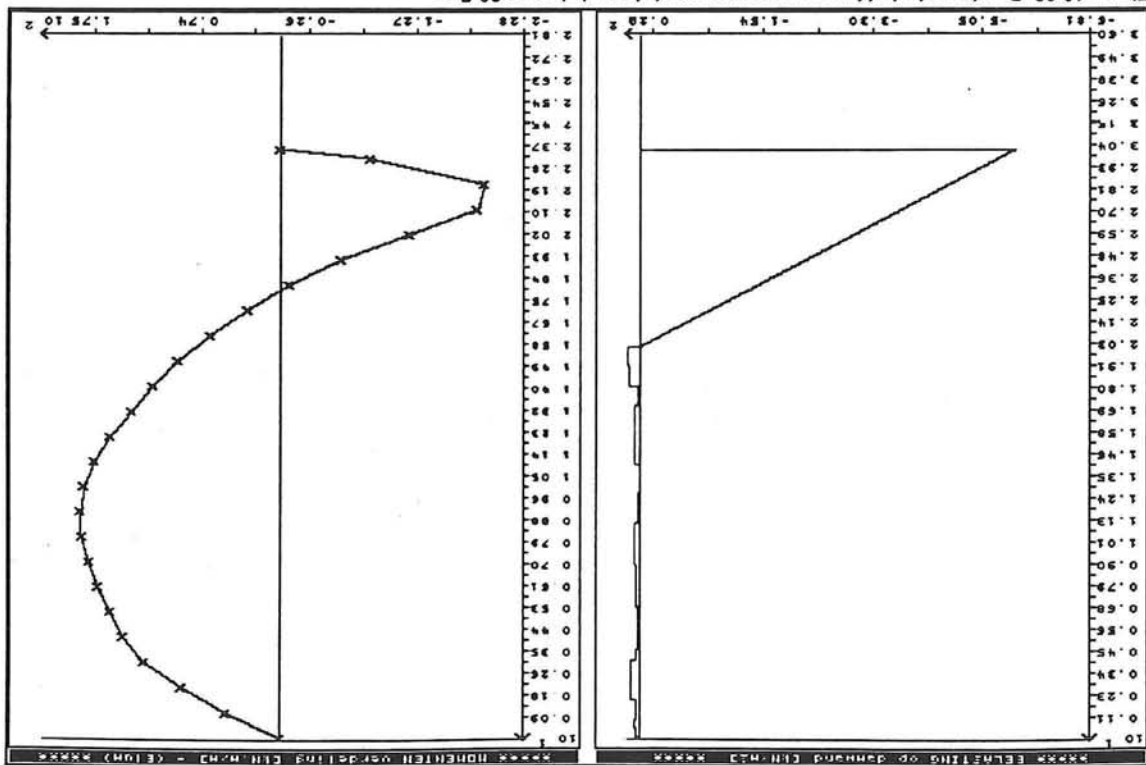
Door van de verticale grondspanningen  $\sigma$  de waterspanning  $p$  af te trekken, wordt de verticale korrelspanning  $\sigma'$  verkregen. Op de verkregen verticale korrelspanningen kan men nu de factoren  $K_a$  en  $K_p$  toepassen om de horizontale korreldrukken  $\sigma'_h$  te verkrijgen. Hierbij wordt de cohesie  $c$  van de grond in rekening gebracht. Door nu hier weer de waterspanning  $p$  bij op te tellen, wordt de horizontale grondspanning  $\sigma_h$  verkregen. Dus:

$$\begin{aligned} \sigma &\Rightarrow \sigma' = \sigma - p \Rightarrow \sigma'_{ha} = K_a \cdot \sigma' - 2 \cdot c \cdot \sqrt{K_a} \Rightarrow \sigma_{ha} = \sigma'_{ha} + p \\ &\Rightarrow \sigma'_{hp} = K_p \cdot \sigma' + 2 \cdot c \cdot \sqrt{K_p} \Rightarrow \sigma_{hp} = \sigma'_{hp} + p \end{aligned}$$

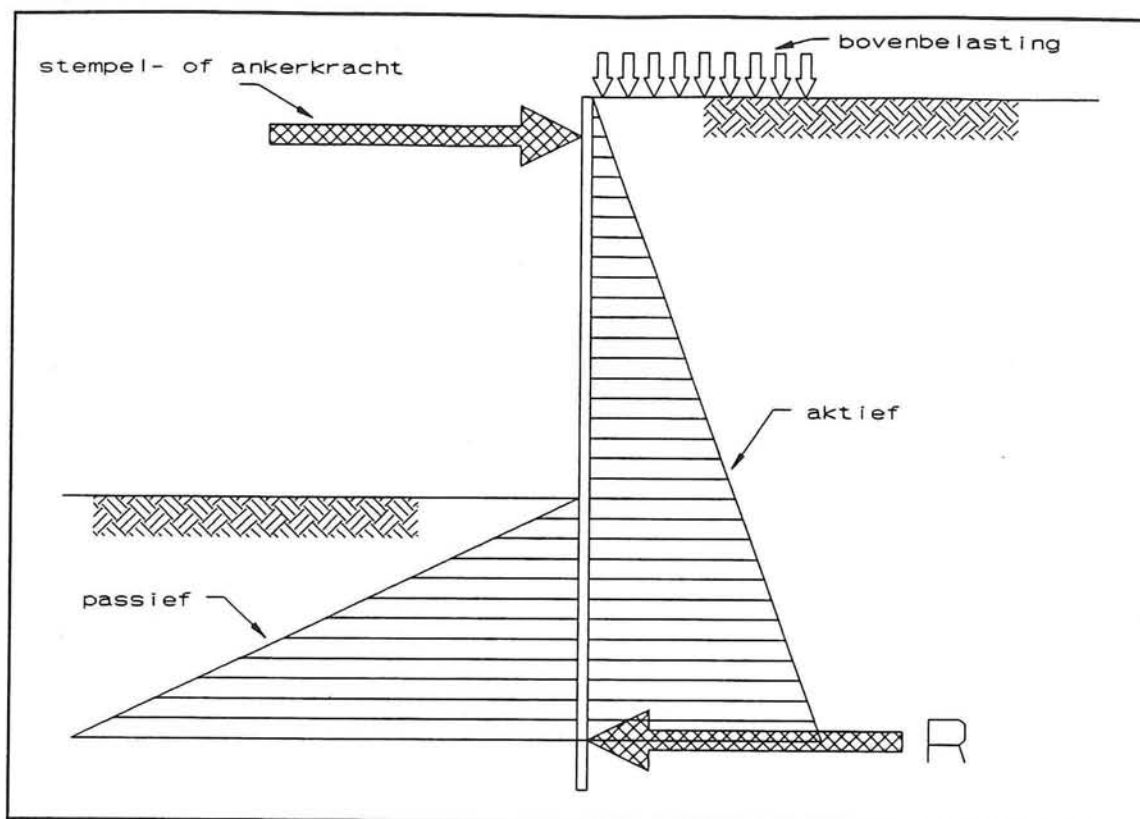
Bij de methode Blum wordt gesteld dat de kracht  $R$  aan de onderzijde van de wand (☞ figuur 10.31) er voor zorgt, dat in de damwand het grootste positieve moment en het grootste negatieve moment ongeveer gelijk zijn aan elkaar.  $R$  is feitelijk de resultante van een passieve gronddruk.

Door het langer/korter maken van de damwand, wordt iteratief het optimale aangrijppingspunt van de kracht  $R$  en daarmee de optimale lengte van de damwand bepaald. De passieve gronddruk, waarvan Blum uitgaat, moet zich wel kunnen ontwikkelen. Ten aanzien van dit punt wordt hiervoor in de praktijk de gevonden inheidiepte met 20% verhoogd.

Figuur 10.32 Resulterende drukkén en momenten wand, kerende hoogte 20,7 m.





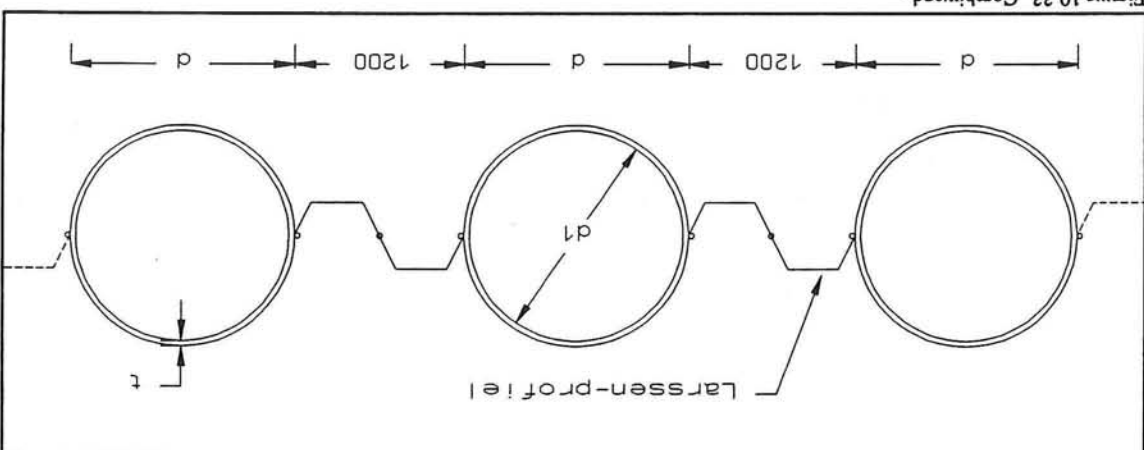


Figuur 10.31 Belastingeschema keerwand.

**b. Berekening wand, kerende hoogte 20.7 meter.**

Ter vergelijking van beide voornoemde keerhoogten wordt allereerst de combiwand met een kerende hoogte van 20.7 meter berekend. Voor de gebruikte grondgegevens wordt verwezen naar de tabel van §10.2.4. In de volgende tabel op pagina 157 zijn de horizontale gronddrukken links en rechts van de wand, alsmede de resulterende gronddrukken weergegeven. De resulterende drukken op de wand, alsmede de momentenlijn van de wand is in figuur 10.32 weergegeven.

1100.7



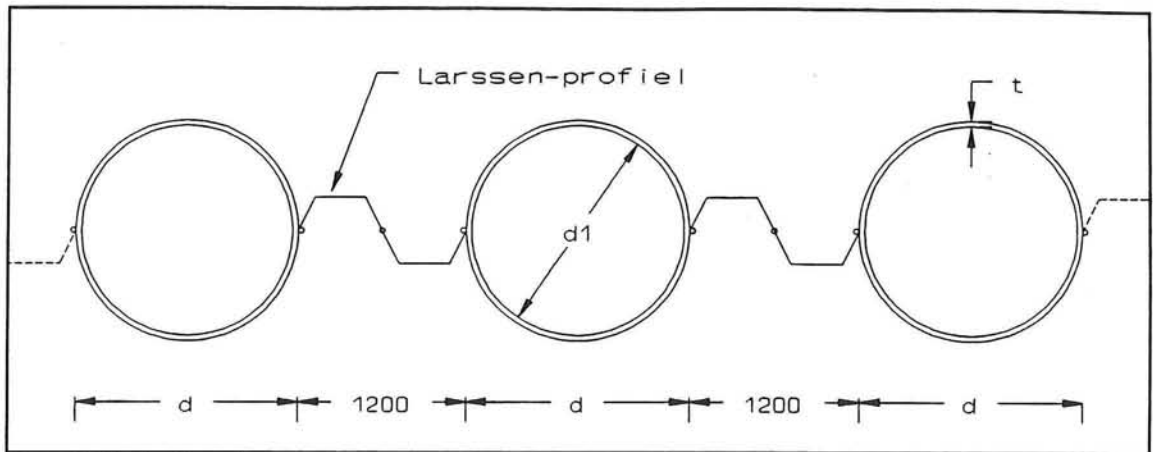
Figur 10.33 Combiwand.

| Laag | plaats | x =  | $\sigma_{h, \text{links}}$<br>[kN/m <sup>2</sup> ] | $\sigma_{h, \text{rechts}}$<br>[kN/m <sup>2</sup> ] | $\sigma_{h, \text{ree}}$<br>[kN/m <sup>2</sup> ] |
|------|--------|------|--|---|--|
| 1.a  | boven: | 0    | 0  | 2.97  | 2.97   |
|      | onder: | 0.5  | 0  | 8.40  | 8.40   |
| 1.b  | boven: | 0.5  | 0  | 8.40  | 8.40   |
|      | onder: | 2.0  | 15   | 21.02   | 6.02   |
| 2.   | boven: | 2.0  | 15   | 26.75   | 11.75  |
|      | onder: | 4.0  | 35   | 48.67   | 13.67  |
| 3.   | boven: | 4.0  | 35   | 40.60   | 5.60   |
|      | onder: | 4.5  | 40   | 45.42   | 5.42   |
| 4.   | boven: | 4.5  | 40   | 38.19   | -1.81  |
|      | onder: | 11.0 | 105  | 112.68  | 7.68   |
| 5.   | boven: | 11.0 | 105  | 109.90  | 4.90   |
|      | onder: | 14.0 | 135  | 133.66  | -1.34  |
| 6.   | boven: | 14.0 | 135  | 140.43  | 5.43   |
|      | onder: | 17.0 | 165  | 171.65  | 6.65   |
| 7.   | boven: | 17.0 | 165  | 164.83  | -0.17  |
|      | onder: | 18.0 | 175  | 177.50  | 2.50   |
| 8.   | boven: | 18.0 | 175  | 189.01  | 14.01  |
|      | onder: | 20.0 | 195  | 213.48  | 18.48  |
| 9.   | boven: | 20.0 | 195  | 191.14  | -3.86  |
|      | onder: | 30.0 | 880.9  | 313.14  | -567.76  |

$\sigma_{h, \text{links}}$  naar rechts gericht,  $\sigma_{h, \text{rechts}}$  naar links gericht.

Uit berekening volgt:

- Lengte damwand: 24.05 m.
- Grootte maximum veldmoment : 187.94 kNm
- Grootte maximum inklemmingsmoment : -197.90 kNm
- De maximum waarde ligt op ca. 8.88 m van de top.
- De minimum waarde ligt op ca. 21.60 m van de top.
- Stempelkracht: 52.62 kN



Figuur 10.33 Combiwand.

Het maximaal door de wand op te nemen moment is  $197.90 \approx 198$  kNm. Deze relatief lage waarde is te danken aan de (gunstige) tegendruk van het water in de sleuf. De invloed hiervan is ook goed te zien in figuur 10.32.

Per meter te keren grond (horizontaal gezien) moet door de wand dus een moment worden opgenomen van 198 kNm. Met een veiligheidsfactor voor het staal van  $\gamma = 1.5$  wordt het maximum op te nemen moment:  $M_{\max} = 1.5 * 198 = 297$  kNm.

Het type wand dat wordt toegepast is de zogenaamde combiwand. Deze wand bestaat uit een rij buispalen met een grote diameter, met daartussen geschakeld twee (kortere) damwandprofielen (zie figuur 10.33).

In principe wordt er van uitgegaan dat de buisprofielen de volledige momenten moeten kunnen opnemen. De benodigde sterkte van de damwandprofielen wordt in hoofdzaak bepaald door de uitvoering (damwandplank moet heikbaar zijn en niet verfrommelen). Voor de damwandplanken worden planken van het type RL 120 (Larssen) toegepast. De werkende breedte van deze planken is 600 mm.

Het benodigd doorsnedeprofiel voor de buizen volgt uit het benodigd weerstandsmoment, dat hoort bij het op te nemen moment. Uitgaande van een maximaal toelaatbare staalspanning van:

$$\bar{\sigma} = 120 \text{ N/mm}^2$$

volgt voor het benodigd weerstandsmoment  $W_{\text{ben}}$  per meter wand:

$$\frac{M_{\max}}{W_{\text{ben}}} < \bar{\sigma}$$
$$W_{\text{ben}} > \frac{M_{\max}}{\bar{\sigma}} = \frac{297 \cdot 10^6}{120} = 2.475 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

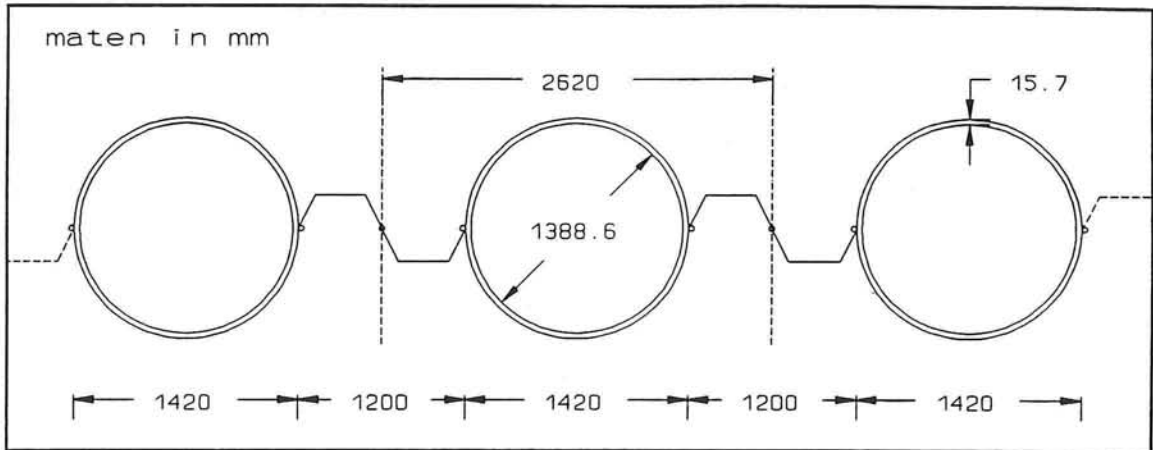
Uitgaande van het feit dat de buizen het moment volledig opnemen, neemt de buis de belasting op van een wanddeel ter breedte van:

$$(\text{diameter buis} + 2 \cdot \text{breedte damwandplank}) = (d + 2 \cdot 600) = (d + 1200) \text{ mm}$$

Het benodigd weerstandsmoment dient dus met een factor:

$$\frac{(d + 1200)}{1000} \frac{\text{mm}}{\text{mm}^1}$$

vermenigvuldigd te worden.



Figuur 10.34 Combiwand met maatvoering.

10.34

Nemen we een goed heibare buis met  $d=1420$  mm /  $t=15,7$  mm (zie figuur 10.34), dan is de vermenigvuldigingsfactor gelijk aan:

$$\frac{1420 + 1200}{1000} = 2.62$$

Het benodigd weerstandsmoment van het buisprofiel is dan:

$$W_{ben} = 2.475 \cdot 10^6 \cdot 2.62 = 6.4845 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

Het weerstandsmoment van de gekozen buis is:

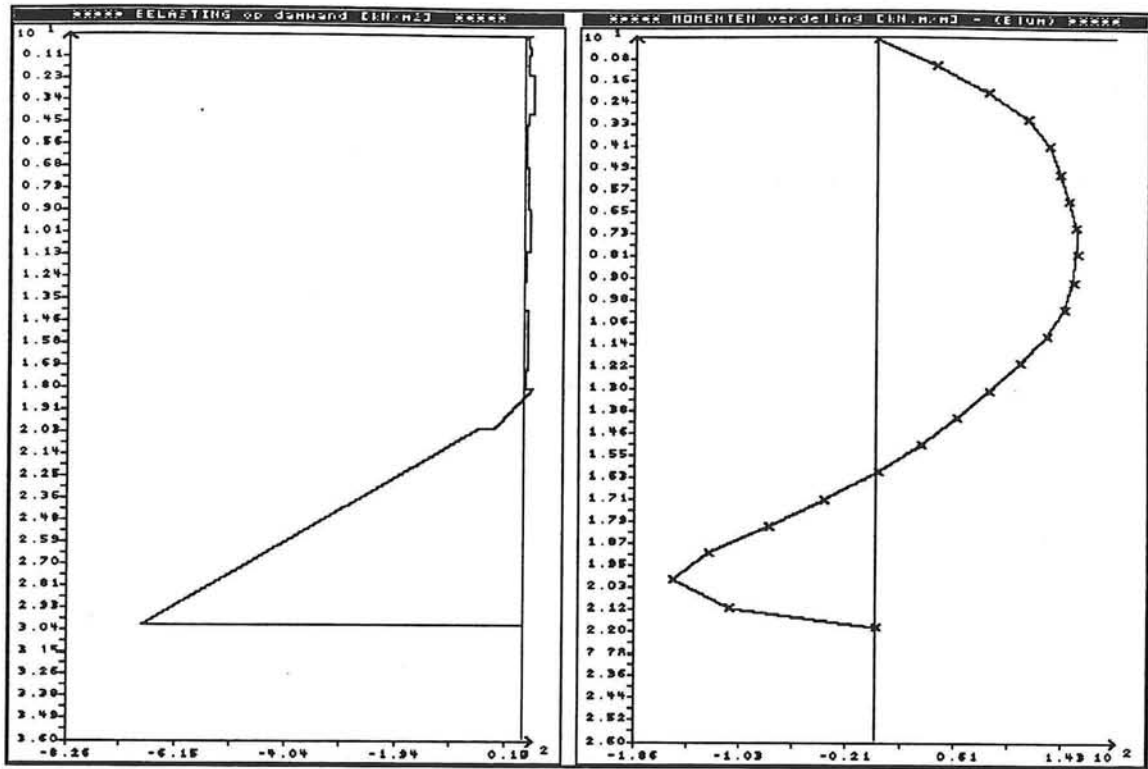
$$W = \frac{\pi \cdot (d^4 - d_1^4)}{32 \cdot d}$$

$$W = \frac{\pi \cdot (1420^4 - 1388.6^4)}{32 \cdot 1420} = 24.051 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

Deze buis voldoet goed.

**c. Berekening wand, kerende hoogte 17.9 meter.**

De wand met een kerende hoogte van 20.7 m bleek een inheidiepte te hebben van 24.05 m en een maximum moment van 198 kNm. Nu wordt de wand met een kerende hoogte van 17.9 meter berekend. Voor de gebruikte grondgegevens wordt wederom verwezen naar de tabel van §10.2.4. In de volgende tabel op pagina 160 zijn de horizontale gronddrukken links en rechts van de wand, alsmede de resulterende gronddrukken weergegeven. De resulterende drukken op de wand, alsmede de momentenlijn van de wand is in figuur 10.35 weergegeven.



Figuur 10.35 Resulterende drücken en momenten wand, kerende hoogte 17.9 m.

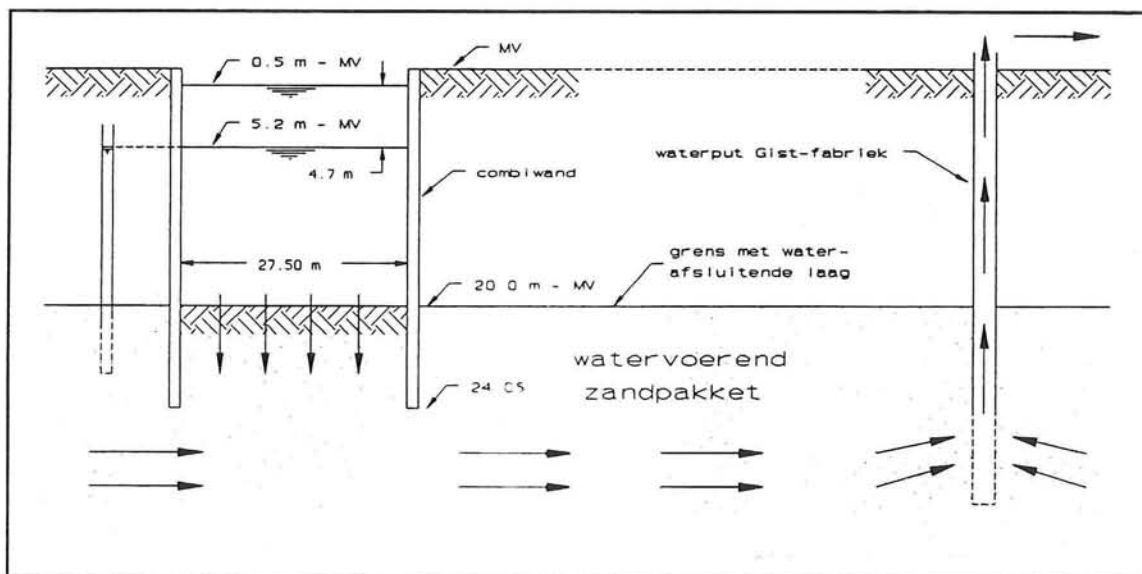


| Laag | plaats | x =  | $\sigma_{h, \text{linkt}}$<br>[kN/m <sup>2</sup> ] | $\sigma_{h, \text{rechts}}$<br>[kN/m <sup>2</sup> ] | $\sigma_{h, \text{ree}}$<br>[kN/m <sup>2</sup> ] |
|------|--------|------|--|---|--|
| 1.a  | boven: | 0    | 0  | 2.97  | 2.97   |
|      | onder: | 0.5  | 0  | 8.40  | 8.40   |
| 1.b  | boven: | 0.5  | 0  | 8.40  | 8.40   |
|      | onder: | 2.0  | 15   | 21.02   | 6.02   |
| 2.   | boven: | 2.0  | 15   | 26.75   | 11.75  |
|      | onder: | 4.0  | 35   | 48.67   | 13.67  |
| 3.   | boven: | 4.0  | 35   | 40.60   | 5.60   |
|      | onder: | 4.5  | 40   | 45.42   | 5.42   |
| 4.   | boven: | 4.5  | 40   | 38.19   | -1.81  |
|      | onder: | 11.0 | 105  | 112.68  | 7.68   |
| 5.   | boven: | 11.0 | 105  | 109.90  | 4.90   |
|      | onder: | 14.0 | 135  | 133.66  | -1.34  |
| 6.   | boven: | 14.0 | 135  | 140.43  | 5.43   |
|      | onder: | 17.0 | 165  | 171.65  | 6.65   |
| 7.   | boven: | 17.0 | 165  | 164.83  | -0.17  |
|      | onder: | 18.0 | 175  | 177.50  | 2.50   |
| 8.   | boven: | 18.0 | 175  | 189.01  | 14.01  |
|      | onder: | 20.0 | 265.2  | 213.48  | -51.72   |
| 9.   | boven: | 20.0 | 271.3  | 191.14  | -80.16   |
|      | onder: | 30.0 | 1001.3   | 313.14  | -688.16  |

$\sigma_{h, \text{linkt}}$  naar rechts gericht,  $\sigma_{h, \text{rechts}}$  naar links gericht.

Uit berekening volgt:

- Lengte damwand: 22.44 m.
- Grootte maximum veldmoment : 153.47 kNm
- Grootte maximum inklemmingsmoment : -154.91 kNm
- De maximum waarde ligt op ca. 8.07 m van de top.
- De minimum waarde ligt op ca. 20.05 m van de top.
- Stempelkracht: 48.56 kN



Figuur 10.36 Onttrekking grondwater door Gist-fabrieken

Het maximaal door de wand op te nemen moment is  $154.91 \approx 155$  kNm. Met een veiligheidsfactor voor het staal van  $\gamma = 1.5$  wordt het maximum op te nemen moment:

$$M_{\max} = 1.5 \times 155 = 232.5 \text{ kNm.}$$

#### d. Vergelijking.

De gevonden waarden van inheidiepte en maximum moment voor beide wanden worden in onderstaande tabel met elkaar vergeleken.

|                               | Inheidiepte<br>[m] | Maximum moment<br>[kNm] |
|-------------------------------|--------------------|-------------------------|
| <b>Kerende hoogte 20.7 m.</b> | 24.05              | 198                     |
| <b>Kerende hoogte 17.9 m</b>  | 22.44              | 155                     |
| <b>Verschil</b>               | 1.61               | 43                      |

Zoals te zien is in de tabel is met name de benodigde inheidiepte van de tweede wand een redelijk stuk kleiner dan die van de eerste. In procenten uitgedrukt is dit verschil ongeveer 7%. Het is dus te overwegen om de inheidiepte stapsgewijs te verkleinen. Dit scheelt in het materiaalgebruik en in de tijd, benodigd voor het heien van de buispalen.

#### 10.4.4 Gevuld houden zinksleuf.

Door de onttrekking van grondwater uit de diepe zandlaag door de Gist-fabrieken is in de met water gevulde zinksleuf een neerwaartse stroming van water waar te nemen (zie figuur 10.36).

De waterspanning op 20 meter beneden het maaiveld bedraagt hierdoor ca.  $148 \text{ kN/m}^2$ .

De waterspiegel in de zinksleuf ligt op een niveau van 0.5 m beneden het maaiveld. Door de hydrostatische waterdruk wordt hierdoor op 20 m diepte een druk veroorzaakt van  $195 \text{ kN/m}^2$ . Netto is er in de sleuf dus een soort 'overdruk' van water aanwezig ter grootte van ca. 4.7 m waterkolom. Anders gezegd is er een verhang tussen de zinksleuf en de omringende grond. Dit verhang bedraagt 4.7 meter.

Zouden we niets doen, dan zou de waterspiegel in de zinksleuf dalen tot uiteindelijk een niveau van  $5.2 \text{ m} \div \text{MV}$ .

Uiteraard is het wenselijk het waterniveau in de zinksleuf constant te houden en wel op  $0.5 \text{ m} \div \text{MV}$ . Om dit te bereiken moet de sleuf feitelijk constant met water worden bijgevoerd. Dit kan natuurlijk niet met onbeperkte hoeveelheden per tijdseenheid. Zinvol is het dus, om te onderzoeken met welke hoeveelheden per tijdseenheid (debiet) het water aan de sleuf wordt onttrokken. Indien dit dusdanig groot is, dat het met een pompinstallatie niet kan worden



bijgebeend, dan kan worden overwogen om bijvoorbeeld de bouwputbodem van een klein laagje slecht waterdoorlatend materiaal te voorzien, teneinde het waterverlies af te remmen. In ieder geval is het belangrijk om het waterverlies tijdens de uitvoering met metingen nauwkeurig in de gaten te houden, aangezien de wanden van de zinksleuf op de aanwezigheid van de gunstig werkende tegendruk van het water zijn berekend.

Uit een berekening (☞ bijlage M) blijkt dat in een situatie met een kale zandbodem het waterniveau met een snelheid van ca. 116 cm per strekkende meter sleuf per etmaal daalt. Overigens is dat deel van de sleufbodem dat een kale zandbodem heeft 'slechts' 37% van het totale bodemoppervlak. De rest van de bodem bestaat uit een slecht waterdoorlatende kleilaag (☞ figuur 10.28). De daling van het waterniveau is dan dus bij benadering 37% van de 116 cm. Dit is gelijk aan ca. 44 cm. Dit is voor de totale sleuf gelijk aan ca. 4500 m<sup>3</sup> per dag.

Indien we daarentegen een klein laagje bentoniet (ca. 5 cm) op de bodem aanbrengen, dan gaat het waterverhang over dit laagje staan. De kleinere doorlatendheid van het materiaal remt de waterstroming aanzienlijk af. De daling van de waterspiegel in de sleuf is dan teruggebracht naar ca. 9 cm per etmaal. De hoeveelheid onttrokken water per strekkende meter sleuf met een breedte van 27.5 m is in dat geval:  $Q = 2.58 \text{ m}^3/\text{dag} / \text{m}^1$ . Voor de totale sleuf komt dit neer op  $(0.37 \times 0.09 \times 27.5 \times 370) = \text{ca. } 400 \text{ m}^3/\text{dag}$ .

De bovenstaande berekeningen zijn slechts grove schattingen. De waarde die voor de doorlatendheid  $k$  van het bodemmateriaal wordt gekozen, is van grote invloed op het resultaat en kan dit zo met een factor 10 doen veranderen. Het doel van de berekening is dan ook om aan te tonen dat het waterverlies met een kleine kunstgreep aanzienlijk kan worden afgeremd. Het is duidelijk dat ten aanzien van dit aspect nader (bodem-)onderzoek vereist is, alvorens hierover harde uitspraken te doen. Met name de waarde van de doorlatendheid  $k$  van het bodemmateriaal zou nauwkeuriger moeten worden bepaald.

In sommige gevallen bestaat er uit milieukundig oogpunt een zekere weerstand tegen het gebruik van bentoniet. Dit is overigens niet geheel terecht, aangezien bentoniet feitelijk gewoon een natuurlijk gewonnen kleipoeder is. Maar nochtans is het mogelijk dat het gebruik ervan niet is toegestaan. In dat geval moet een andere oplossing worden gezocht.

Een ander bezwaar tegen de toepassing van een dergelijk laagje bentoniet op de bodem van de zinksleuf is dat dit laagje de fundering nadelig zou kunnen beïnvloeden. Met name wanneer het element wordt onderspoelt met zand, wordt de bentoniet waarschijnlijk alle kanten op geblazen. Dit laagje zou dan dus eigenlijk vlak voor de afzinkoperatie weer verwijderd moeten worden. Maar in dat geval zou de sleuf weer gaan leeglopen, aangezien er dan weer een kale zandbodem aanwezig is. De oplossing met het aanbrengen van een waterremmend laagje op de sleufbodem is dus eigenlijk maar tijdelijk van aard. Bovendien is het te onzeker of een goede afdichting wordt verkregen, waardoor het uitvoeringsrisico wordt vergroot. Daarnaast is het ook belangrijk dat voor de definitieve situatie ook een goede afdichting aanwezig is, teneinde



een kortsluiting tussen het grondwater en het watervoerend pakket te voorkomen. (Door de wateronttrekking van de Gist-fabrieken zou anders de grondwaterstand in heel Delft worden verlaagd). Beter is het dus om een permanente waterremming cq waterdichting op de sleufbodem aan te brengen.

Een mogelijke oplossing zou dan zijn het van tevoren aanbrengen van een laag cementmortel op de (zand)bodem van de zinksleuf of het plaatselijk chemisch injecteren van de sleufbodem. De relatief hoge kosten van deze oplossingen zijn een nadeel.

Een geheel andere visie t.a.v. hiervan is het combineren van de waterafdichting met het funderingsbed van de tunnel. Dat wil zeggen dat de zinkelementen niet worden onderspoeld met zand, maar dat zij op een van tevoren aangebracht vlak gravel-bed worden geplaatst. Deze gravellaag wordt dan waar nodig met een mortel geïnjecteerd. Deze methode is, zowel in de uitvoeringsfase als in de definitieve situatie, veel betrouwbaarder. Daarnaast wordt een kostbaar zand-onderspoelsysteem voor de zinkelementen uitgespaard. Deze methode van funderen van zinkelementen is in het verleden reeds met succes toegepast. In §10.7.2 wordt op het funderen van de zinkelementen teruggekomen.

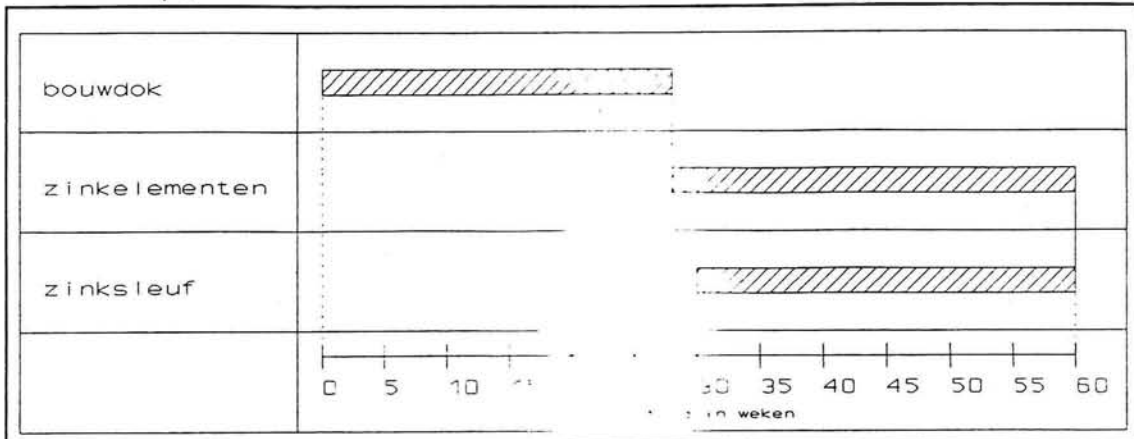
Nog een punt dat ten aanzien van deze waterlek-problematiek van belang is, is het feit dat de combiwanden ter weerszijden van de zinksleuf de waterafsluitende grondlagen als het ware doorsnijden. Bij het trekken van de combiwanden is het daarom van belang de grond ter plaatse van dit snijvlak te injecteren, daar waar de waterafsluitende laag zit. Dit om de natuurlijke waterafsluitende functie van deze grondlaag weer te herstellen.

#### **10.4.5 Uitvoering zinksleuf.**

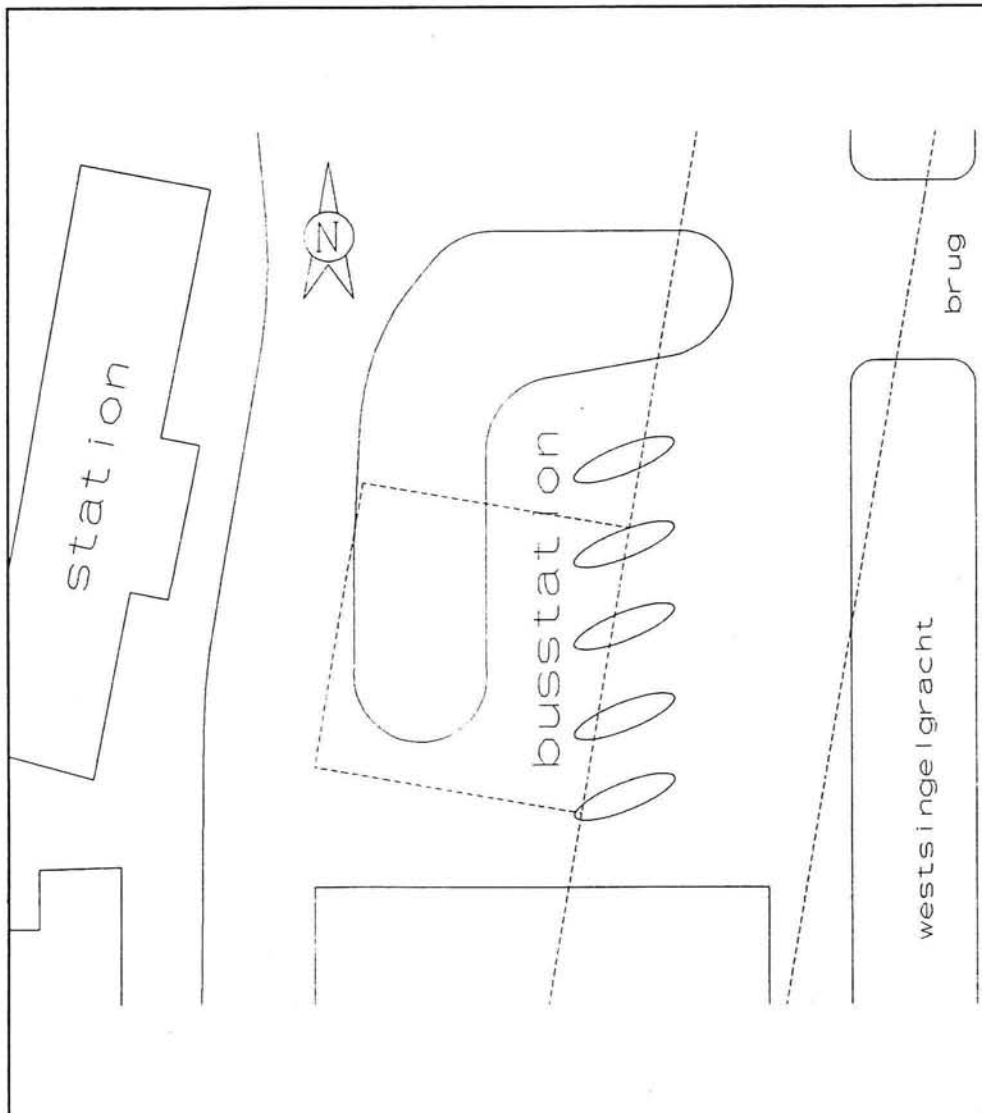
##### **a. Tijdsaspect.**

De aanleg van de zinksleuf is min of meer parallel gepland met de bouw van de zinkelementen in het bouwdok. Dat wil zeggen dat de zinksleuf en de elementen ongeveer gelijk gereed zijn. Dit houdt dus in dat de planning zodanig moet zijn, dat de wanneer de zinksleuf gereed is, de bouw van de zinkelementen ook is afgerond en het bouwdok onder water kan worden gezet. Zodoende kunnen de elementen direct worden ingevaren en afgezonken. Zodra de totale afzinkprocedure is afgerond, kan de zinksleuf weer worden aangevuld en kan het maaiveld weer worden hersteld. De tijd dat het maaiveld t.p.v. het afzinktraject is opengebrouwen wordt zo tot een minimum beperkt.

Binnen de afzink-operatie vindt bij het middelste element een klein intermezzo plaats, te weten de fabricage van de hal-opbouw. De tijdsduur hiervan wordt zo minimaal mogelijk gehouden. Hoe dit te realiseren is, wordt besproken in §10.5 en (uitvoeriger) in bijlage O.



Figuur 10.37 Globale tijdsindicatie maken zinksleuf en bouwdok



Figuur 10.38 Busstation en omgeving.



Qua tijdplanning kan globaal worden gezegd, dat het maken van het bouwdok en het maken van de zinkelementen hierin ongeveer 45 weken in beslag neemt. Het maken van de zinksleuf daarentegen kost circa 30 weken. (Meer gedetailleerder informatie hierover is te vinden in §10.9.) Het maken van de zinksleuf kan dus ca. 15 weken na aanvang van de bouwdokaanleg worden aangevangen, om tegelijk met de zinkelementen klaar te zijn. Globaal ziet dit er ongeveer uit als in figuur 10.37.

Een kanttekening die hierbij gemaakt dient te worden is dat de tijd die een bepaalde activiteit in beslag neemt, hand in hand gaat met de kosten. D.w.z. dat het goed mogelijk is een bepaald onderdeel sneller te laten verlopen, maar dat dit meer geld kost. Bijvoorbeeld als een heilmachine 12m<sup>1</sup> damwand per dag kan aanbrengen, dan kunnen twee machines uiteraard 24 m<sup>1</sup> damwand per dag aanbrengen. Het heien van de damwand gaat dan twee maal zo snel, maar de kosten zijn vanzelfsprekend ook direct veel hoger. Het aantal strekkende meters damwand waarbij het rendabel wordt om twee heilmachines in te zetten, is weer afhankelijk van een groot aantal factoren. Dit betreft een optimalisatievraagstuk, waarop hier niet verder wordt ingegaan.

#### **b. Voorbereiding.**

Alvorens met de aanleg van de zinksleuf, die toch een ingrijpende open wond in het maaiveld veroorzaakt, kan worden begonnen, moet eerst een aantal voorbereidingsactiviteiten plaatsvinden. Deze behoeven overigens niet allemaal bij de start van de aanleg van de zinksleuf volledig gereed te zijn, aangezien langs het traject gefaseerd achter elkaar aan kan worden gewerkt. Een toelichting hierop wordt verderop gegeven. Vooropgesteld zij, dat de grote verkeersaders rondom het tunneltraject een zo gering mogelijke overlast van de bouwactiviteiten mogen ondervinden.

De diverse voorbereidingen zijn o.a het slopen van een deel van de constructiewerkplaatsen, de sloop van een aantal panden aan de Van Leeuwenhoeksingel en de Houttuinen, de sloop van de brug over de Westsingelgracht en het maken van een hulpbrug, de ontmanteling van het busstation, het omleggen van kabels en leidingen en het verwijderen van beplanting e.d.

#### **c. Aanbrengen combiwand.**

Het aanbrengen van de combiwand voor de wand van de zinksleuf kan zodanig in fasen plaatsvinden, dat de stads-activiteiten op het maaiveld (verkeer e.d.) steeds op tijd van een goed alternatief zijn voorzien.

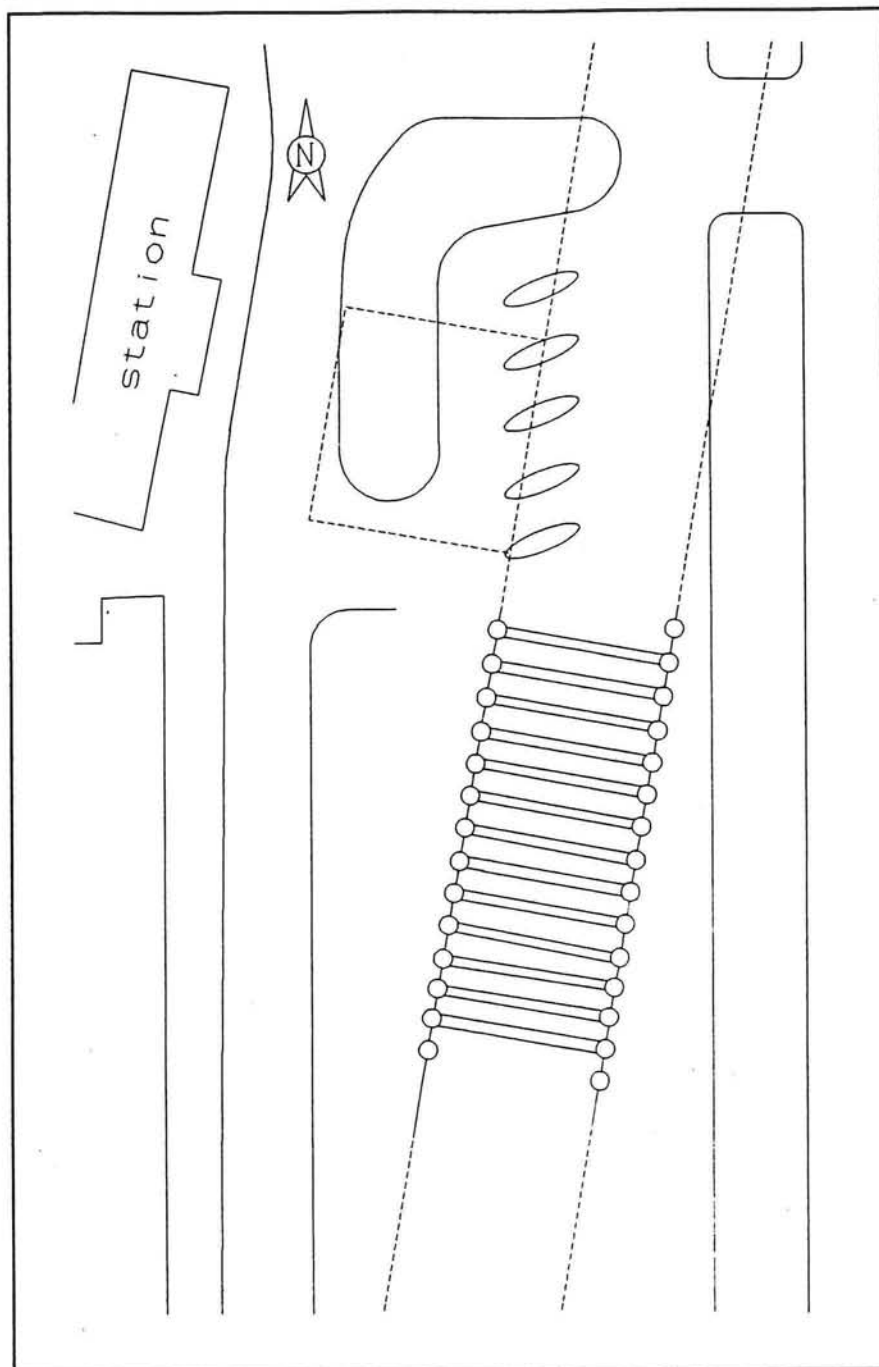
Als voorbeeld kunnen we kijken naar het busstation (zie figuur 10.38).

Het huidige busstation is precies gesitueerd op de plaats waar de stationshal voor het ondergrondse station is gepland. Bovendien moet ongeveer op deze plaats de hal-opbouw op het middelste element worden aangebracht. Kortom, juist op deze plaats wordt een hoge bouwactiviteit verwacht. Om die redenen is het dus zinvol om het busstation tijdelijk te verplaatsen naar een 'rustiger' gedeelte. Het busstation moet uiteraard nog wel binnen loopafstand van het



huidige NS-station blijven.

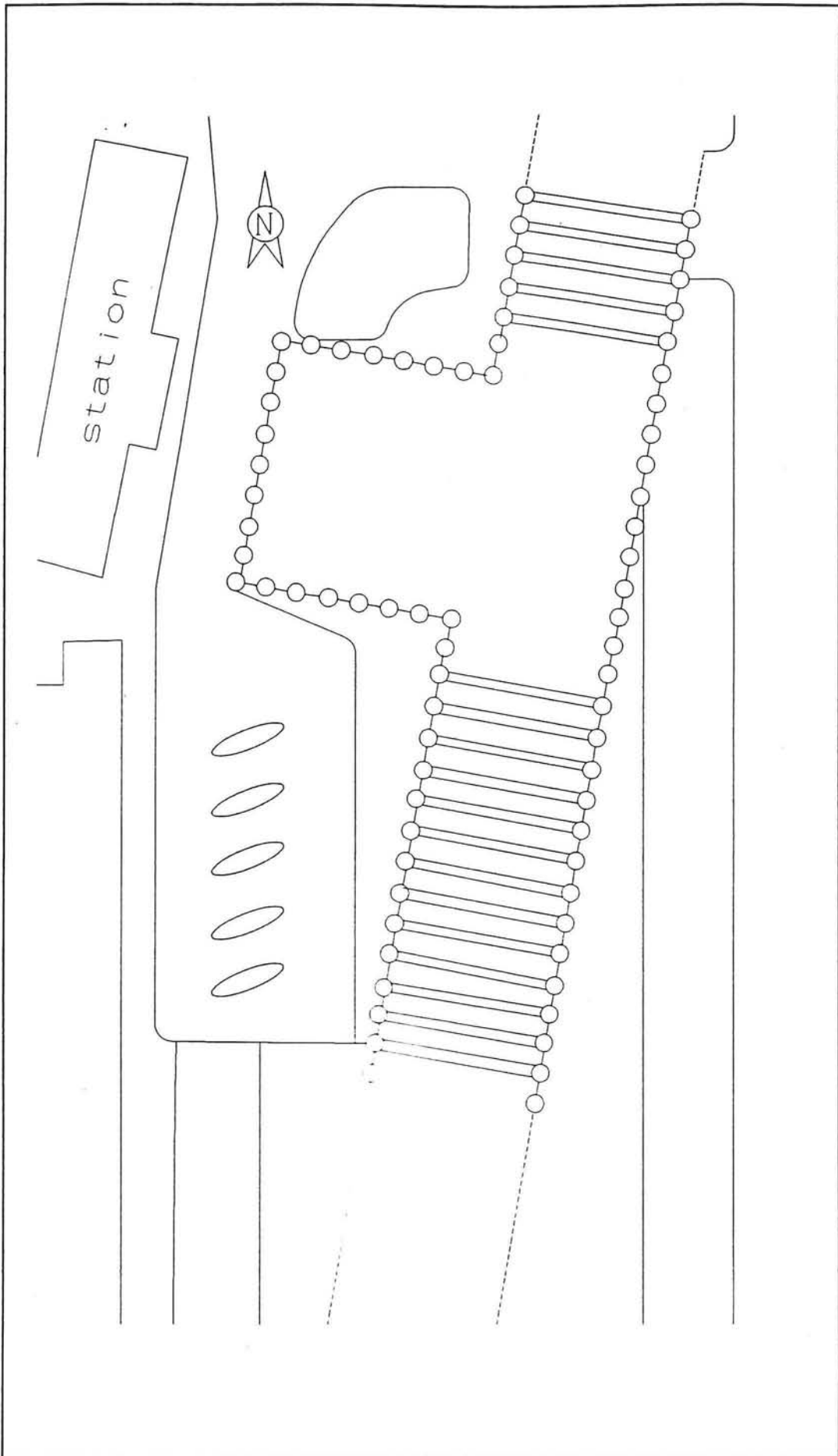
Na het slopen van het deel van de constructiewerkplaatsen, gelegen direct naast het busstation, kunnen op dit terrein de combiwanden voor de zinksleuf worden aangebracht (zie figuur 10.39).



Figuur 10.39 Maken combiwand ten zuiden van stationsplein en bushaltes.

Daarna wordt de grond tussen de combiwanden een klein stukje ontgraven en kan de stempe-  
ling worden aangebracht.

Zodra dit gereed is, wordt naast de sleuf op de ruimte even ten zuid-westen van het huidige



Figuur 10.40 Verplaatsen busstation.

busstation een tijdelijk busstation gecreëerd. Vervolgens wordt het oorspronkelijke busstation ontmanteld en kan op die plaats de combiwand worden ingeheid (☞ figuur 10.40).

Een ander voorbeeld van een fasering bij het aanbrengen van de combiwand voor de zinksleuf, is de kruising met de drukke weg onder de Irenetunnel. Dit komt in §10.4.6 aan de orde.

#### d. Ontgraving zinksleuf.

Voor de ontgraving van de zinksleuf wordt deels gebruik gemaakt van hydraulische graafmachines, voorzien van lange 'lepel'armen.

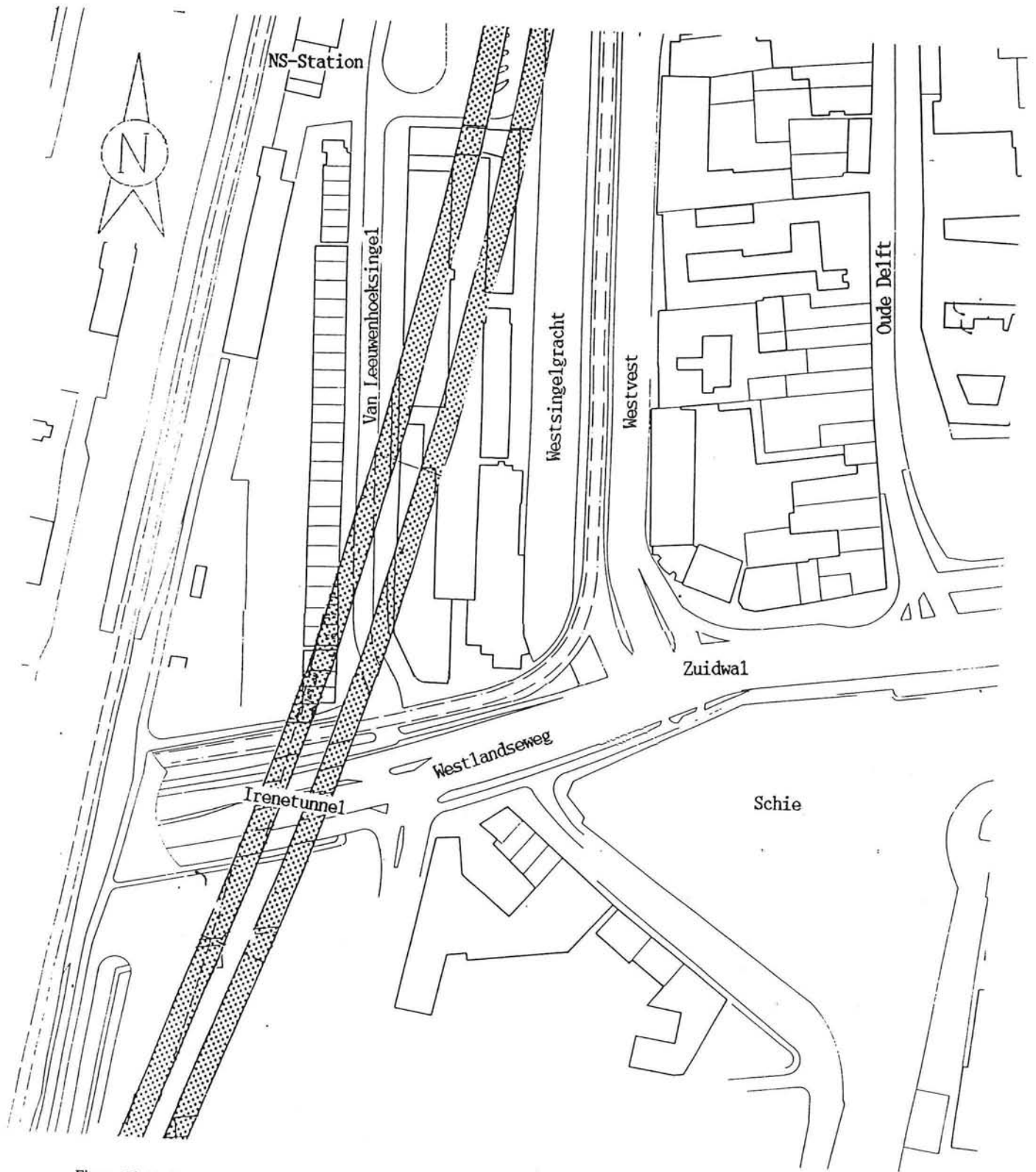
Zodra de waterdiepte voldoende is, kan eventueel gebruik worden gemaakt van een speciaal baggervaartuig, zoals het voor de Willemspoortunnel te Rotterdam ontwikkelde baggervaartuig de *Willem Bever*<sup>1</sup>. De *Willem Bever* is een kleine demontabele snijkop- of cutterzuiger, die uit twee pontons bestaat. Het scharnier tussen de twee pontons, de hydraulische leidingen en de elektronische bekabeling zitten met een speciale snelkoppelconstructie vast, zodat het mogelijk is het geheel snel te demonteren. De *Bever* kan uit elkaar worden gehaald en over de weg worden vervoerd. Groot voordeel van deze zuiger is dat hij maar net boven het water uitsteekt (vrijboord ca.40 cm), en zo onder de stempels door kan varen. De machine perst de gebaggerde grond door een persleiding met een diameter van 0.4 m naar een sproeiopont. Bij toepassing van deze baggermachine bij het Delftse tunnel-/stationsproject zou De Kolk (de 'dode hoek' in de bocht van de Schie) net naast het bouwdok, de aangelegen plaats zijn om zo'n sproeiopont af te meren. Onder het sproeiopont worden beunbakken geladen die, voortbewogen m.b.v. duwboten, de grond over de Schie afvoeren. Het toekomstig gebruik van de grond (bijvoorbeeld een terreinophoging) is afhankelijk van de (milieukundige) kwaliteit ervan. Deze kwaliteit moet uit onderzoeken blijken (☞ voor milieukundige aspecten §10.3.4).

Gedurende de (natte) ontgraving moet ervoor worden gezorgd, dat de sleuf vol water blijft staan. Dit is immers de essentie van het kunnen toepassen van een relatief lichte wand met een enkelvoudige stempeling. Overigens is bij het begin van de ontgraving de te keren hoogte nog maar gering en is de tegendruk van het water nog niet noodzakelijk.

Indien het waterniveau veel achter blijft bij de ontgraving (doordat met de grond ook water wordt verwijderd of doordat water in de op diverse plaatsen blootliggende diepe zandlaag verdwijnt), moet dit water kunstmatig aan de sleuf worden toegevoegd. Dit water kan bijvoorbeeld grachtenwater zijn. Maar aangezien dit water dan mogelijk het diepe grondwater zal 'vervuilen' is het mogelijk dat de Gist en Spiritusfabrieken (grootverbruiker van het grondwater) dit niet toestaan, danwel dat dit grachtenwater tevoren moet worden gereinigd. Een andere mogelijkheid is het oppompen van het grondwater uit de diepe zandlaag op een wat

---

<sup>1</sup> Zie voor meer informatie over de *Willem Bever*: Bolier, D., maart 1990.



Figuur 10.41 Plattegrond gebied rond Irenetunnel. (schaal 1:2000)

grotere afstand van de zinksleuf en dit vervolgens weer aan de sleuf toe te dienen.

Overigens is het waterverlies naar de diepe zandlaag, veroorzaakt door het stijghoogteverschil, tegen te gaan door de sleuf pas op het laatst volledig tot aan de zandlaag te ontgraven en dus tijdelijk een kleine laag (minder doorlatende) klei te laten zitten.

Voor de zinksleuf zelf (gerekend vanaf de keerkuip tot aan het bouwdok) moet over een lengte van ca.460 meter worden ontgraven tot gemiddeld ca.17 meter diepte. Ter indicatie is de totale hoeveelheid grond die moet worden verwijderd dan ongeveer gelijk aan:

$$\begin{aligned} V &= L \cdot B \cdot d \\ &= 460 \cdot 27.5 \cdot 17 \approx 220000 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Een ander aspect dat bij het ontgraven van de zinksleuf van belang is, is de lichte zwel die optreedt in de minder goed waterdoorlatende lagen. Door deze zwel (tijdsafhankelijk) zal de sleufbodem de neiging hebben wat omhoog te veren. Door het plaatsen van de zinkelementen en het aanvullen van de sleuf met aanvulzand zal de grond weer terugveren (veer wordt a.h.w. ingedrukt) en zal zetting optreden. Met dit aspect dient tijdens de uitvoering terdege rekening te worden gehouden.<sup>1</sup>

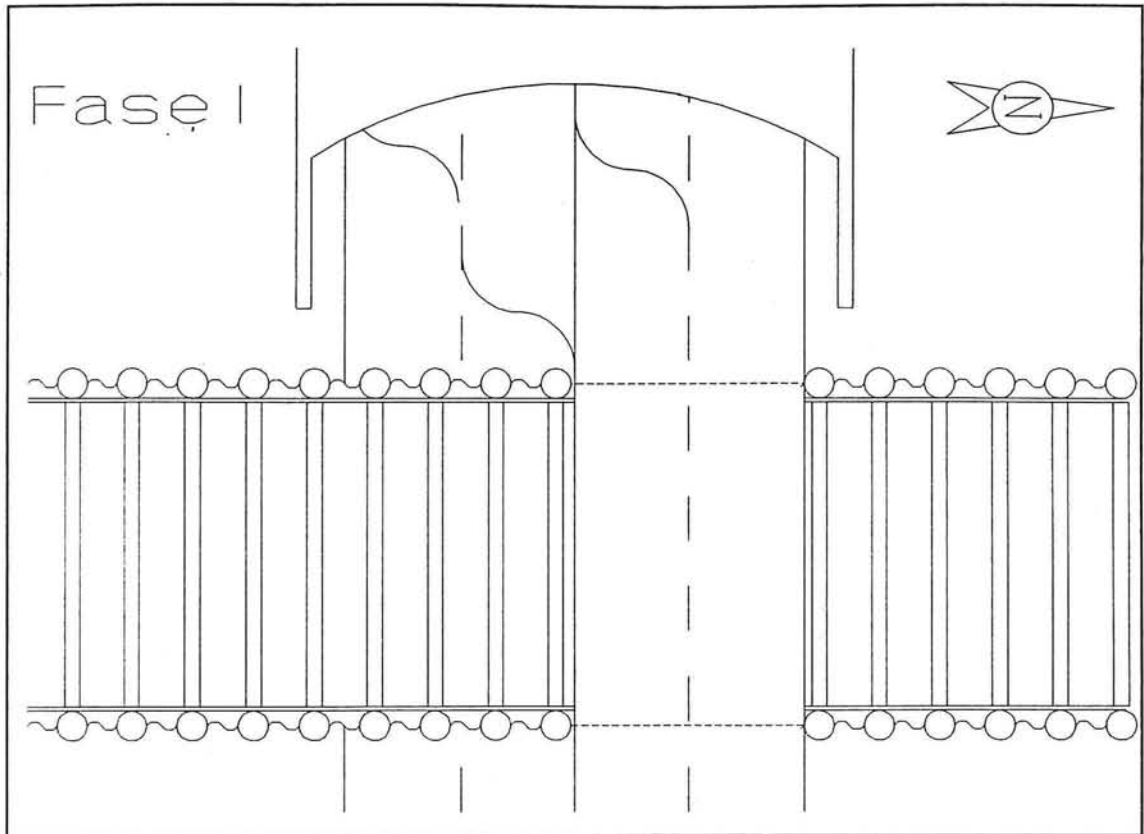
#### 10.4.6 Kruising zinksleuf met inrit Irenetunnel.

Het maken van de zinksleuf, en met name het aanbrengen van de combiwand, ter plaatse van de inrit van de Irenetunnel (Westlandseweg) (zie foto 2.4 en figuur 10.41) is ook een **faseringsprobleem**. Vanzelfsprekend is het onvermijdelijk deze weg, zij het zeer tijdelijk, open te breken voor het aanbrengen van de combiwanden. Belangrijk is het, om het verkeer dat van deze weg gebruik maakt zo min mogelijk te hinderen. Om dit te bereiken wordt in de eerste plaats bij voorkeur 's nachts aan het maken van deze kruising gewerkt.

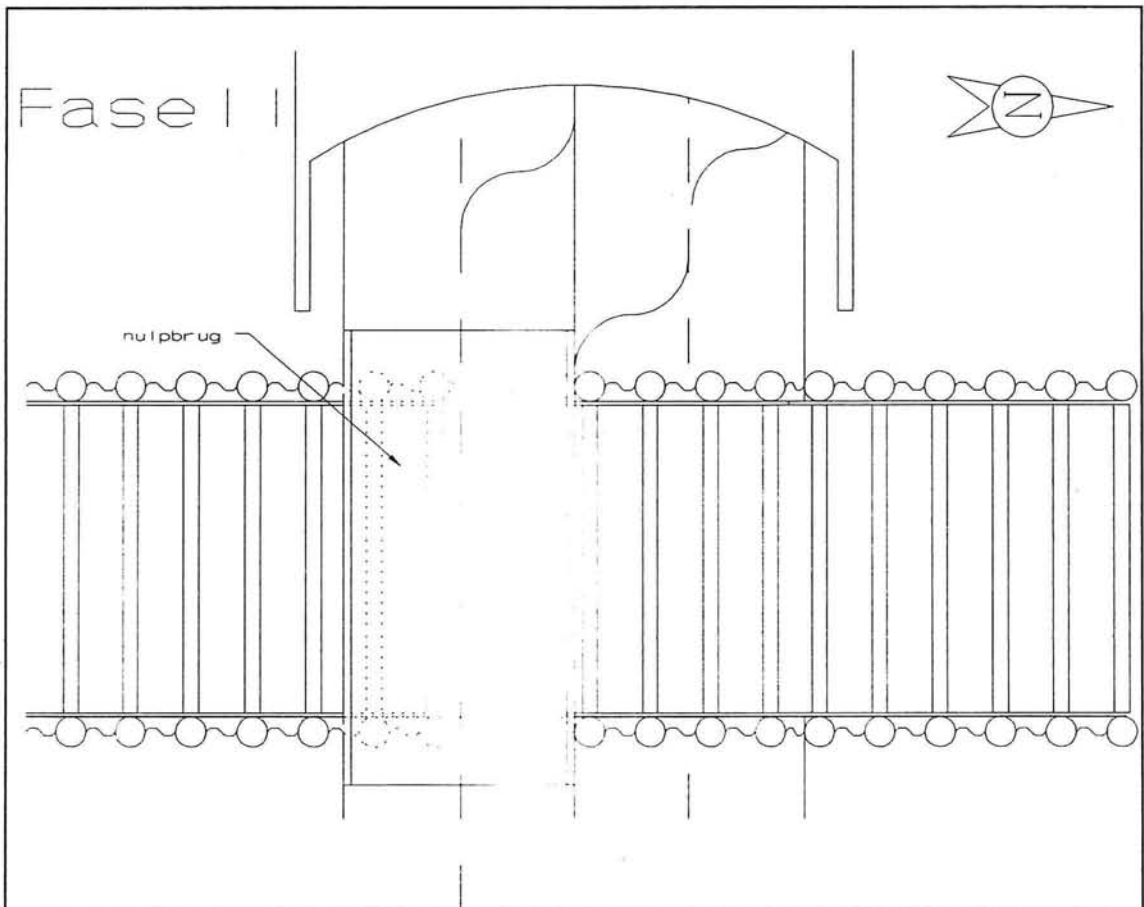
In de eerste fase (zie figuur 10.42) wordt het verkeer over de noordelijke weghelft geleid. De nu ongebruikte weghelft kan worden opengebrouwen en de combiwand kan worden ingehaald. Na een kleine ondiepe ontgraving kan het eerste deel van de hulpbrug over de sleuf worden aangelegd, welke tevens dienst doet als stempeling van de combiwanden. Deze hulpbrug is

---

<sup>1</sup> Zie voor meer informatie over zwel: Weele, Prof.ir.A.F. van, 1991.



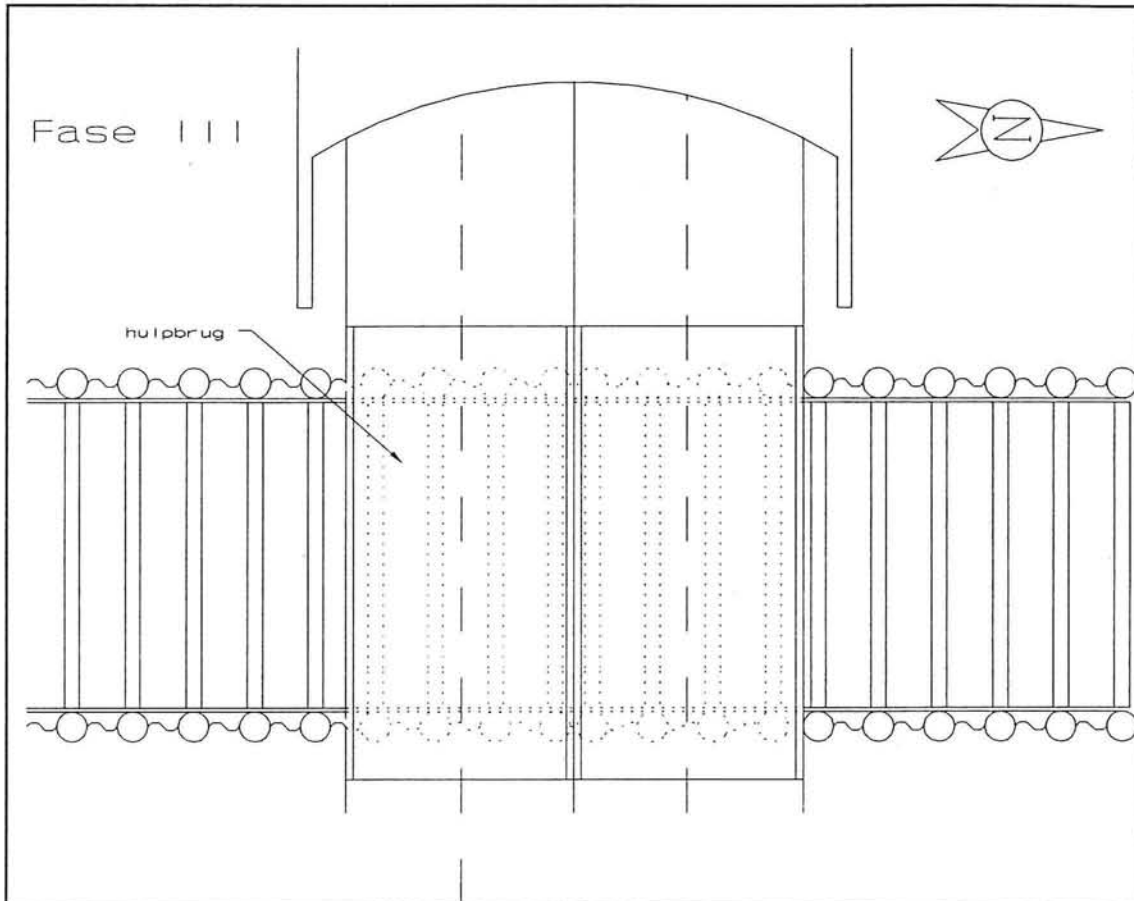
Figuur 10.42 Kruising met Irenetunnel Fase I.



Figuur 10.43 Kruising met Irenetunnel Fase II.



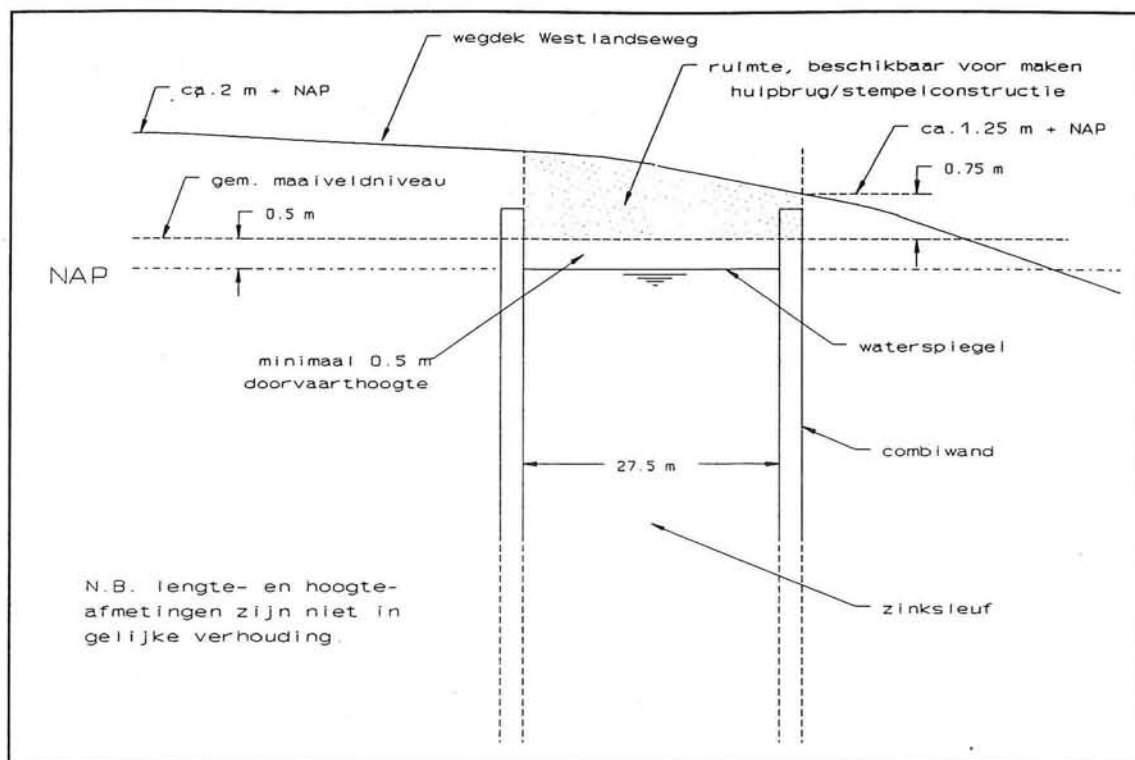
reeds geprefabriceerd en ligt op de bouwplaats klaar, teneinde zoveel mogelijk tijd te besparen. In de tweede fase (zie figuur 10.43) wordt het verkeer over de andere weghelft geleid, waarbij het gebruik maakt van de zojuist aangelegde hulpbrug. Het vervolg van de tweede fase is dezelfde als fase één. Fase drie is de eindfase (zie figuur 10.44), waarbij het verkeer gebruik maakt van beide hulpbruggen.



Figuur 10.44 Kruising met Irenetunnel Fase III.

In een later stadium, wanneer de gehele combiwand gereed is, kan de sleuf ter plaatse van de Irenetunnel verder worden ontgraven met behulp van bijvoorbeeld de hiervoor genoemde drijvende cutterzuiger. De enige overlast die het verkeer door de Irenetunnel nog van de bouw zal ondervinden is het trekken van de combiwand en het herstellen van het wegdek na het gereedkomen van het station.

Het tijdelijk versmallen van de Irenetunnel is toegestaan. Vooral wanneer deze activiteiten in een weekend plaatsvinden, zal het verkeer daar weinig hinder van ondervinden. Op dit ogenblik is de Irenetunnel, in verband met het doortrekken van tramlijn 1 naar Delft-Zuid, gedurende een aantal maanden slechts voor driekwart in gebruik. Het blijkt hierbij dat de verkeersintensiteit dusdanig is, dat het verkeer vrij weinig overlast van deze versmalling ondervindt.



Figuur 10.45 Langsdoorsnede over Westlandseweg (inrit Irenetunnel).

Een aspect dat bij de kruising met de inrit van de Irenetunnel niet uit het oog mag worden verloren, is het feit dat deze weg ter plaatse van het tunneltracé reeds dalende is en dus onder een helling loopt. Een gunstige bijkomstigheid is dat het kruispunt Westvest-Westlandseweg-Zuidwal (☞ figuur 10.41) op circa 2 m + NAP gelegen is en dus ongeveer 1.5 meter boven het gemiddeld maaiveldniveau. Hierdoor ligt de Westlandseweg ook wat hoger. Ter plaatse van de kruising met de zinksleuf van de te maken tunnel ligt deze weg in het laagste punt dan nog op ca. 1.25 m + NAP (=ca. 0.75 m + MV) (☞ figuur 10.45).

Het is uiteraard wenselijk om het wegdek van de aan te brengen hulpbrug op ongeveer hetzelfde niveau te houden als het aansluitende wegdek van de weg zelf. Door de hulpbrug tevens dienst te laten doen als stempeling voor de combiwanden, kan de constructiehoogte van de gehele hulpbrug- en stempelingconstructie zo minimaal mogelijk worden gehouden. Om nog een vrije ruimte van ca. 50 cm tussen deze constructie en de waterspiegel te houden, mag de constructiehoogte maximaal ca. 0.75 m bedragen (ervan uitgaande dat het wegdek van de hulpbrug gelijk loopt met het wegdek van de weg zelf). Deze vrije ruimte tussen constructie en waterspiegel is primair benodigd voor het drijvend transport van de zinkelementen. Daarnaast speelt het eventueel kunnen toepassen van een speciaal baggervaartuig, zoals beschreven onder §10.4.5.d., een rol bij deze minimaal aan te houden doorvaarthoogte. Door toepassing van een aantal breedflensbalken op rij<sup>1</sup>, voor het dragende deel van de hulpbrug en tegelijk stempeling, kan aan deze eis voor de constructiehoogte goed worden voldaan. De doorbuiging is hierbij maatgevend.

### 10.5 Hal-opbouw op middelste element.

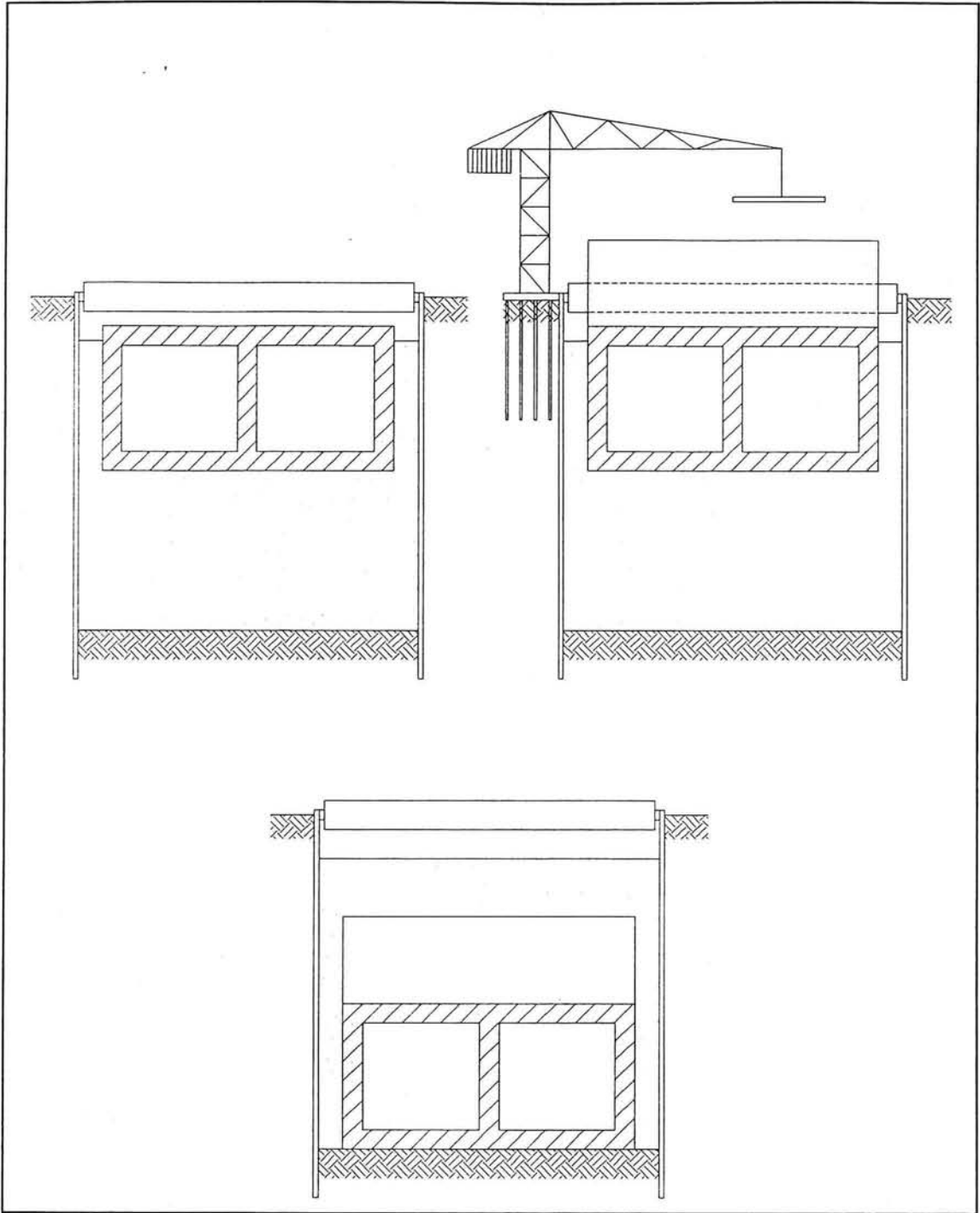
Voor de constructie van een gedeelte van de stationshal is in hoofdstuk 7 gekozen voor een opbouw op het zinkelement, die op de afzinklocatie wordt gebouwd (☞ figuur 10.46).

In het afzinkproces wordt als eerste element nr. 1 (☞ figuur 10.7) ingevaren en afgezonken tegen het landhoofd (zuidwand van de keerkuip). Daarna wordt het kleine stationshal-element nr. 5 op z'n plaats gevaren en hier al drijvende tijdelijk geparkeerd. Vervolgens wordt het middelste element nr. 2, zonder opbouw, naar z'n plaats gevaren. Hier aangekomen wordt, terwijl het element nog drijft, de hal-opbouw ter plaatse op het element gebouwd. Nadat dit gereed is, wordt het element tegen zijn voorganger afgezonken. Daarna wordt de tijdelijk geparkeerde hal hier weer aan de zijkant tegenaan afgezonken. Zodra dit gereed is, kunnen de elementen 3 en 4 worden ingevaren en afgezonken.

Het motief voor de keuze om de hal-opbouw in situ uit te voeren, was dat wanneer de opbouw reeds in het bouwdok op het element was gebouwd, deze niet meer onder de stempels door kan

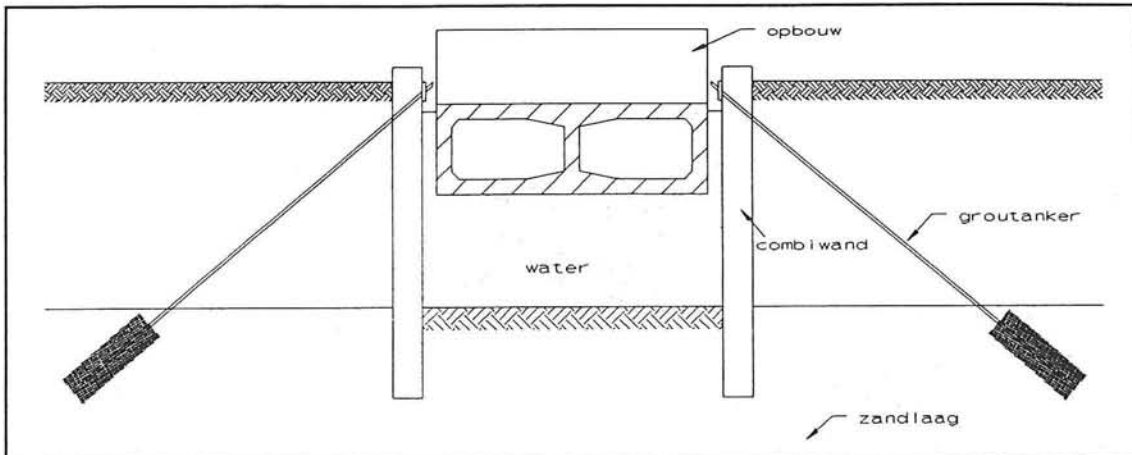
---

<sup>1</sup> Bijvoorbeeld: HE600A, grote  $I_{xx}$  en  $A$ .



Figuur 10.46 In situ maken opbouw op drijvend element.

varen. Oplossing voor dit probleem zou zijn geweest, het toepassen van een verankering van de sleufwanden met behulp van groutankers in plaats van stempels, zodat een vrije doorvaarthoogte wordt verkregen (zie figuur 10.47).



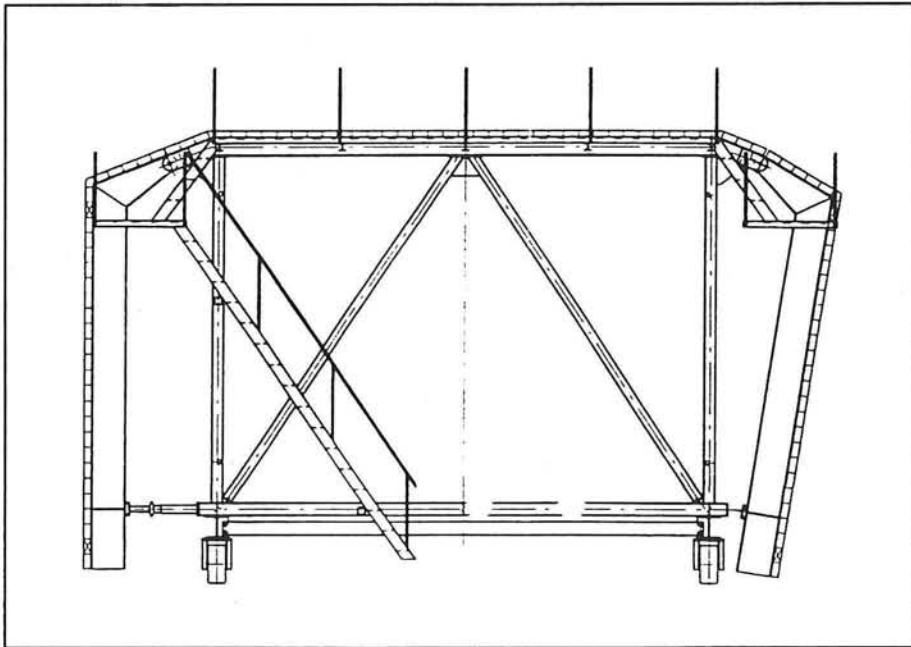
Figuur 10.47 Vrije doorvaarthoogte door toepassing groutankers.

De nu gekozen oplossing, het maken van de opbouw in situ, heeft als nadeel dat een klein oponthoud in de continuïteit van het zinkproces wordt veroorzaakt. Daar staat tegenover dat deze oplossing in verhouding goedkoper en sneller is, dan wanneer in plaats van een stempeling van de wanden (relatief dure) groutankers zouden worden toegepast.

Zoals hiervoor reeds werd gezegd, is de consequentie van de gekozen oplossing dat een onderbreking van de continuïteit van het zinkproces optreedt. Het is dus belangrijk te onderzoeken op welke wijze deze onderbreking zo minimaal mogelijk kan worden gehouden. Temeer, daar een langere totale duur van de zinkoperatie, de overlast voor de omgeving ook verlengt.

In concreto komt het er dus op neer dat de hal-opbouw in een zo kort mogelijk tijdsbestek op het element moet worden gebouwd. De gewenste snelheid kan worden gerealiseerd door een goed bekistingssysteem en een zeer goed afgestemde logistiek. De bouwtijd wordt in hoge mate bepaald door het aanbrengen en stellen van de bekisting. Ten aanzien van het bekistingssysteem zou kunnen worden gedacht aan een in het bouwdok reeds aangebrachte uitvouwbare bekisting of bijvoorbeeld een geprefabriceerde bekisting die kant en klaar op het element kan worden gehesen.

Dit onderdeel van het bouwproces is in bijlage O uitvoerig uitgewerkt. Het is gebleken dat het zonder meer on-economisch is om voor het bekisten van de diverse onderdelen van de hal-opbouw, die in feite relatief standaard vormen bezitten, een speciaal vervaardigde en eenmalige bekisting (zoals bijvoorbeeld een snelle, uitvouwbare) toe te passen. Alle onderdelen van de hal-opbouw (wanden en dak) zijn met standaard verkrijgbare bekistingselementen te bekisten.



Figuur 10.48 Tunnelkist voor maken wanden en dak van zinkelementen.

Bij de keuze van het type en fabrikaat bekisting is het van belang dat de bekisting deels geprefabriceerd klaar kan staan. Zodra het tunnelement is ingevaren en op de afzinkplaats is afgemeerd, kunnen de voorbereidingen voor de fabricage van de hal-opbouw feitelijk beginnen. De van tevoren gemonteerde bekistingsdelen kunnen in z'n geheel op het element worden gehesen en aan elkaar worden gekoppeld. Als eerste worden de wanden gestort. Zodra de wanden voldoende zijn verhard volgt het dak. Het dak vraagt een langere verhardingstijd. Wanneer het zinkelement gereed is, kan het tegen zijn voorganger worden afgezonken.

Een kenmerk van de gehele operatie is dat de opbouw *snel* moet worden gerealiseerd. Nu is *snel* een relatief begrip. Bij dit project wordt uitgegaan van een benodigde bouwtijd voor de hal-opbouw van ca. 1.5 maand (6 weken). Een oponthoud in het afzinkproces van ca. 1.5 maand wordt aanvaardbaar geacht, indien dit wordt gezien in verhouding tot de totale bouwtijd van het project en de kosten.

De snelheid van het plaatsen en stellen van de bekisting wordt in feite bepaald door het aantal mensen dat bij de operatie wordt ingezet. Immers, iedere m<sup>2</sup> bekisting die wordt aangebracht staat voor een aantal manuren. Dit is in bijlage O nader uitgewerkt.

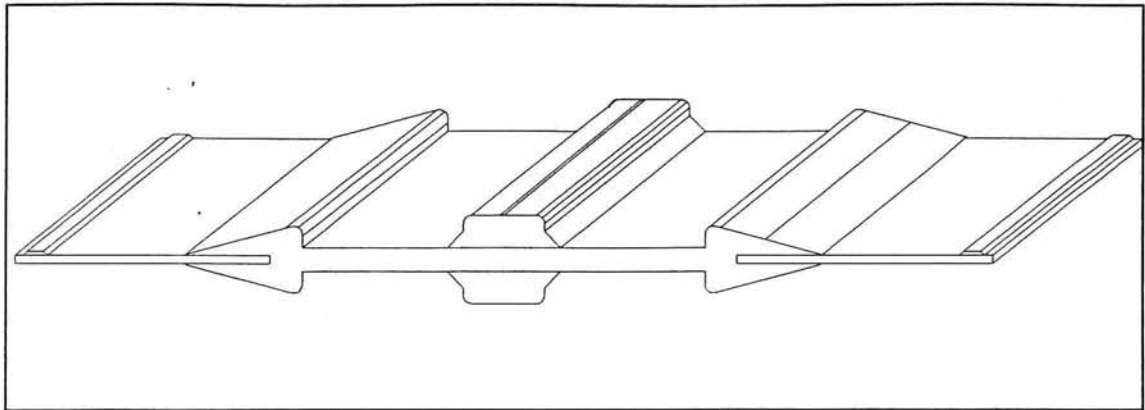
De eindconclusie van bijlage O is dat de operatie met circa 13 mensen binnen de gestelde termijn van zes weken is te voltooien. Dit aantal mensen is, gezien de complexiteit van het geheel, heel redelijk.

Bij de uitvoering van de gehele operatie ligt de nadruk op de prefabricage van de wandbekistingspanelen in combinatie met een zeer strak geregelde logistiek. Alleen bij juiste toepassing van deze aspecten is de voor de bouwtijd gestelde tijdlimiet van 6 weken te halen.

## 10.6 Fabricage van de zinkelementen.

Wanneer het bouwdok gereed is en is ingericht, kan de fabricage van de zinkelementen beginnen. Allereerst wordt op de plaatsen van de te bouwen elementen een laag grind van ca. 30 cm dikte aangebracht. Dit grindbed fungeert als drainage-laag bij het opdrijven van de elementen (☞ §10.3.4). Vervolgens wordt op het grind een werkvloer van betonplexplaten gelegd. Op deze houten platen, die zowel fungeren als 'fundering' en als vloerkist, worden de tunnelementen gefaseerd opgebouwd. De tunnelementen zijn elk opgedeeld in een aantal stortmoten.

Begonnen wordt met de vloerconstructie. Daarna wordt de middenondersteuning gestort. Als laatste worden in één stort zowel het dak als de buitenwanden gestort. Hierbij worden de wanden waar nodig gekoeld om verticale scheurvorming in de onderzijde van de wanden, als gevolg van de verhinderde krimpverkorting door de aanhechting tussen wand en vloer, te voorkomen. Bij het storten van de wanden en het dak wordt gebruik gemaakt van een speciale tunnelkist, waarvan een voorbeeld is te zien in figuur 10.48. Gezien het aantal te maken



Figuur 10.49 Snede uit rubber-metalen voegstrook ter waterdichting dilatatievoeg.



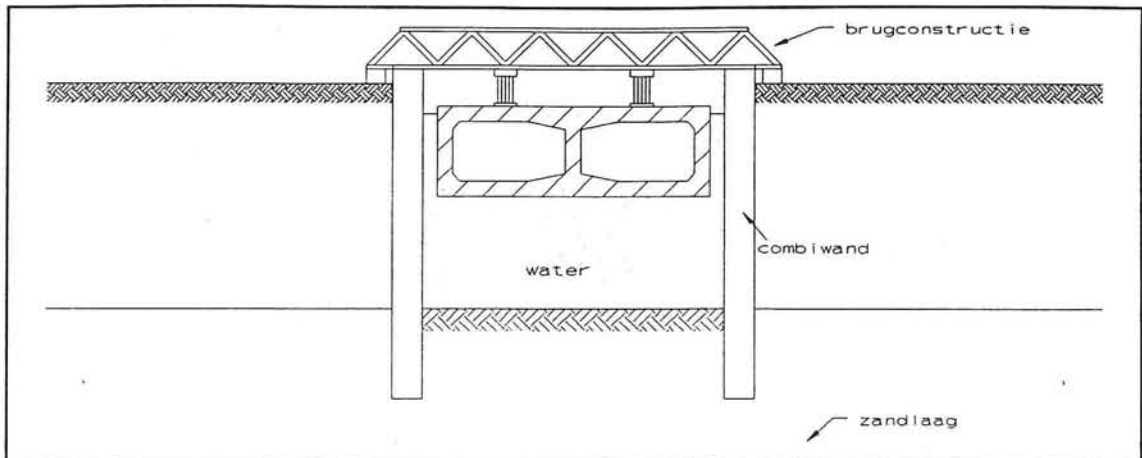
stortmoten en het kunnen inzetten van deze bekisting bij het later in een droge bouwput te maken zuidelijke tunneldeel (☞ §7.5.4 en §10.1) is het gebruik van een dergelijke bekisting rendabel.

De tunnelelementen zijn elk opgedeeld in een aantal stortmoten met een lengte van ca.22.5 m. De 90 meter lange elementen bestaan dan elk uit 4 stortmoten. Een klein rekensommetje wijst uit dat het 100 meter lange element niet deelbaar is door 22.5 meter. Dit is echter wel juist, aangezien voor de middelste 10 meter een op maat gemaakte bekisting met een afwijkende vorm moet worden toegepast. Dit, vanwege de daar te creëren toegang tot het ondergrondse station (☞ hoofdstuk 8).

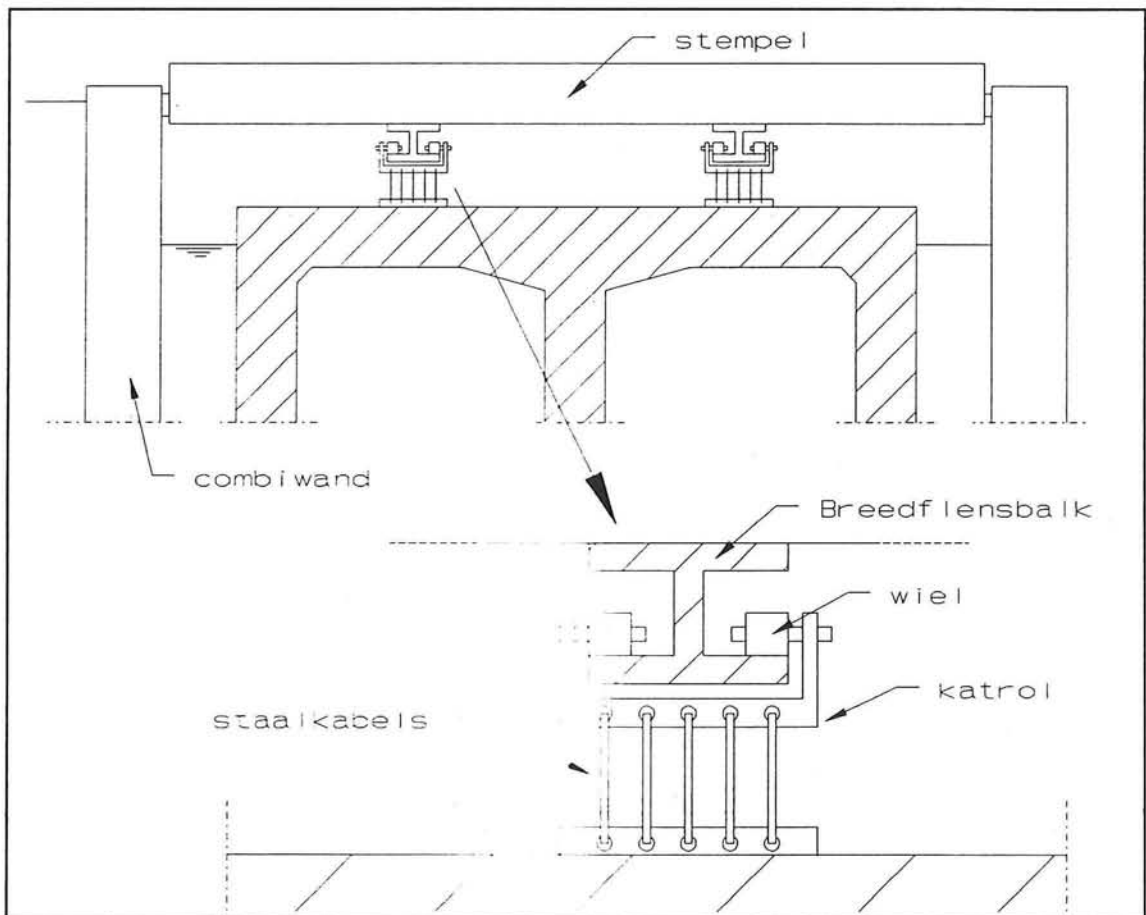
In feite bestaat ieder tunnelelement dus uit een aantal kleinere delen, de stortmoten. Deze stortmoten zijn ter waterdichting door middel van rubber metalen voegstroken (☞ figuur 10.49) aan elkaar verbonden. Deuvels of een vertanding in het voegvlak voorkomen verticale verschuivingen van de moten ten opzichte van elkaar. De voegen tussen de elementen (dilatatievoegen) zijn op die manier redelijk flexibel. Het element zelf vormt als het ware een flexibele ketting van schakels (stortmoten). Door de flexibiliteit van het element kunnen zettingsverschillen, veroorzaakt door eventuele toekomstige bebouwing nabij de tunnel of veroorzaakt door verschillen in zetting van onder de tunnel dieper gelegen lagen worden opgenomen. Ook lengteveranderingen (krimpen/uitzetten) van de tunnel door temperatuursvariaties kunnen door de dilatatievoegen worden opgenomen.

De dilatatievoegen tussen de moten zijn niet in staat trekspanningen op te nemen. Tijdens het transport en afzinken van het element en dan met name wanneer het element op de driepuntsoplegging op de bodem van de zinksleuf staat, zullen langsmomenten in de tunnel optreden. Ook op punten waar lieren aan het element zijn bevestigd, zullen puntlasten op het element aangrijpen. Door golven veroorzaakte momenten kunnen in dit geval buiten beschouwing worden gelaten, aangezien het te bevaren water zeer stil is. (Dit is beduidend anders dan wanneer de elementen bijvoorbeeld over zee zouden moeten worden versleept.) Wanneer geconcentreerde ballasttanks (puntlasten) zouden worden gebruikt, zouden ook hierdoor grote langsmomenten in het element kunnen optreden. Ter voorkoming van deze door de ballasttanks veroorzaakte langsmomenten, kunnen ballasttanks over de gehele lengte van het zinkelement worden aangebracht (belasting gelijkmatig verdeeld). Een andere mogelijkheid is het inlaten van ballastwater in het element zelf, waarbij voor de metastabiliteit slingerschotten in het element zijn aangebracht.

Ter voorkoming van trekspanningen in de voegen tussen de moten, veroorzaakt door de optredende langsmomenten, wordt ieder element voorzien van een tijdelijk voorspanning. Deze voorspanning, aangebracht in bijvoorbeeld vloer en dak, moet zodanig worden gedimensioneerd dat in de meest extreme situatie in de voegen tussen de stortmoten nog een drukspanning van ca.0.2 N/mm<sup>2</sup> aanwezig is.



Figuur 10.50 Brugconstructie voor afzinken elementen.



Figuur 10.51 Geleiderailconstructie in de zinksluif.

Zodra het element op de definitieve fundering is komen te rusten, kan de voorspanning worden afgelaten. Wanneer VZA (voorspanning zonder aanhechting) is toegepast, kunnen de kabels uit het element worden getrokken. In het geval VMA (voorspanning met aanhechting) is toegepast, worden de voorspankabels ter plaatse van de voegen tussen de stortmoten doorgeslepen. In dat geval kunnen de kabels niet worden teruggewonnen en blijft er in de afzonderlijke stortmoten een permanente drukspanning aanwezig.

Wanneer de fabricage van de zinkelementen gereed is, worden de elementen aan de kopvlakken met behulp van kopschotten tijdelijk afgedicht en worden zij gereed gemaakt voor transport.

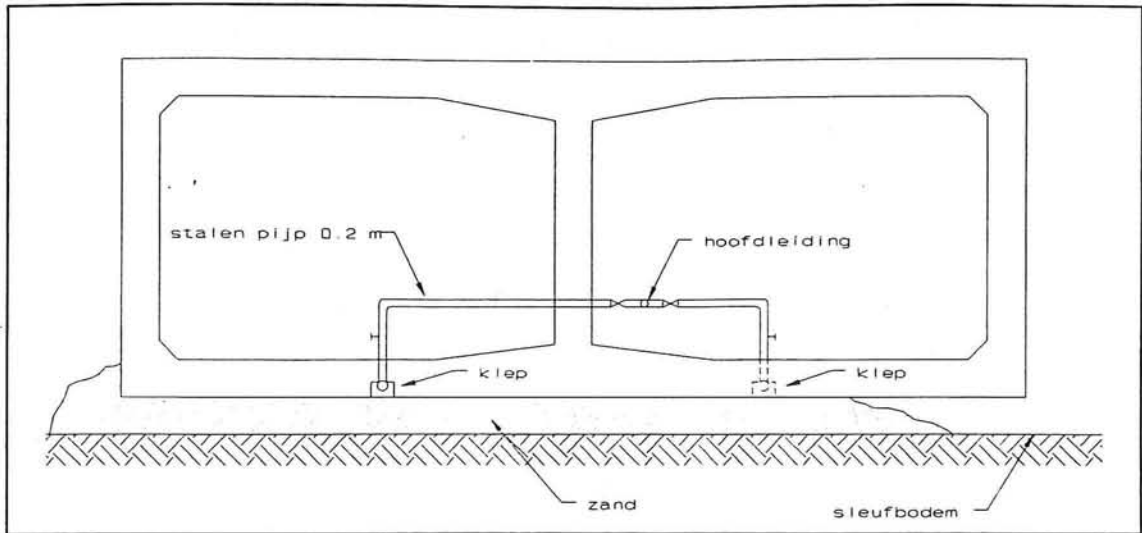
## 10.7 Transport en afzinken van de elementen.

### 10.7.1 Drijvend transport.

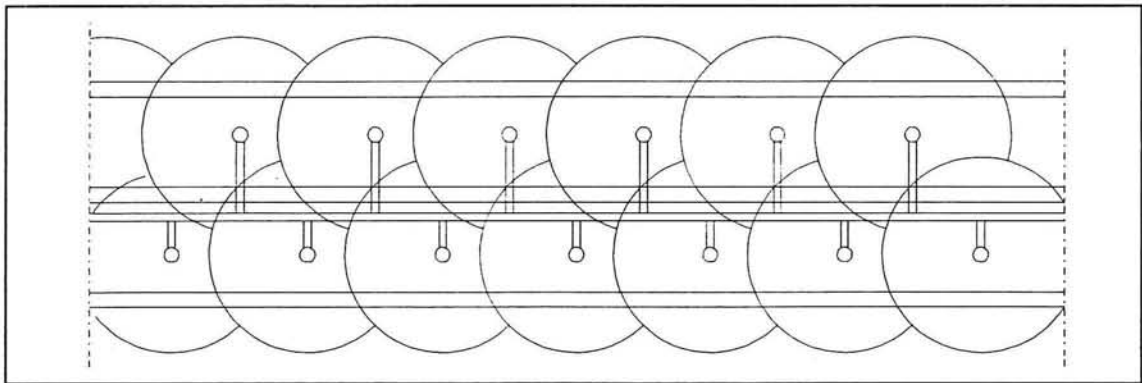
Zodra de tunnelementen gereed zijn voor transport, wordt het bouwdok geïnundeerd. De tijdelijke afsluiting tussen het bouwdok en de zinksleuf kan worden verwijderd. Door het van tevoren in het element gepompte ballastwater langzaam uit het element te pompen zal het element opdrijven. Zodra het gewenste vrijboord is bereikt, kan het element in de richting van de zinksleuf worden verhaald. Eén voor één kunnen de elementen nu worden ingevaren en afgezonken.

Op de desbetreffende zinklokatie aangekomen wordt het element op vier punten met katrollen en lierkabels bevestigd aan twee over de zinksleuf aangebrachte brugconstructies (☞ figuur 10.50). Het element wordt als het ware aan deze brugconstructies 'opgehangen'. De lierkabels kunnen vanuit één centraal punt worden bediend. Zodra het afzinken wordt gestart, wordt de hoeveelheid ballastwater in het element enigszins vergroot, zodat het element een geringe *negative buoyancy* krijgt. Door de lierkabels te laten vieren, zakt het element geleidelijk in het water.

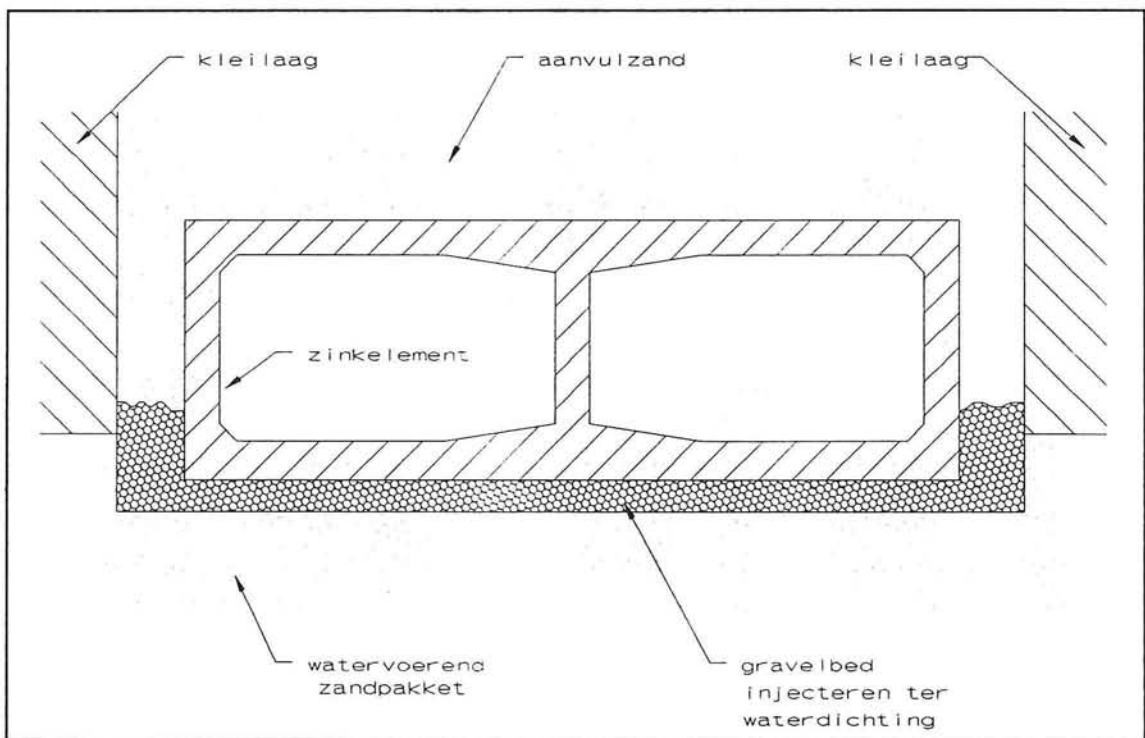
Overigens is het ook te overwegen om aan de onderzijde van de stempels van de zinksleuf een geleiderail-constructie aan te brengen, bestaande uit stalen I-profielen (☞ figuur 10.51). Zoals in de figuur is te zien, lopen over deze geleiderails loopkatten, voorzien van katrollen. Het element wordt hieraan a.h.w. 'opgehangen'. Ook bij deze optie is het element voorzien van vier 'ophangpunten'. De kabels die het element met de loopkatten verbinden worden met lieren bediend. Lierkabels aan de voor- en achterzijde zorgen voor de voortbeweging van het element in de zinksleuf. De geleiderailconstructie zorgt op die manier voor een goede geleiding van het element tijdens het transport door de zinksleuf. Eenmaal aangekomen op de afzinklokatie is de procedure dezelfde als hierboven omschreven. Voorwaarde voor het kunnen toepassen van een dergelijke geleiderailconstructie is uiteraard wel dat de stempels, waaraan de constructie is bevestigd, bestand zijn tegen de hierop werkende krachten.



Figuur 10.52 Leidingen in element t.b.v. aanvoer onderspoelzand.



Figuur 10.53 Onderspoelen element; vorming zandpannekoeken.



Figuur 10.53a Fundering zinkelementen op gravelbed.

### 10.7.2 Fundering elementen.

Zodra het element de bodem van de zinksleuf nadert, komt dit te rusten op drie tijdelijke oplegpunten. Aan de ene kopse zijde steunt het element, dat voorzien is van consoles, op zijn voorganger (of het landhoofd bij het eerste element). Aan de andere zijde steunt het element op een drukpen, die op zijn beurt weer komt te rusten op een van tevoren op de bodem geplaatste betonnen tegel. Dit, om de afgegeven puntlasten over de bodem te kunnen spreiden. De oplegpunten zijn voorzien van hydraulische vijzels, waarmee het element in de juiste positie kan worden gebracht.

Een vrij gebruikelijke methode voor het maken van een funderingsbed onder het element, is het onderspoelen van het element met zand. In het zinkelement zijn dan voor dit doel leidingen aangebracht (☞ figuur 10.52). Door die leidingen wordt een zand-water-mengsel gepompt, dat de holle ruimte onder het element opvult. Onder het element worden zo als het ware zandpannekoeken gevormd (☞ figuur 10.53).

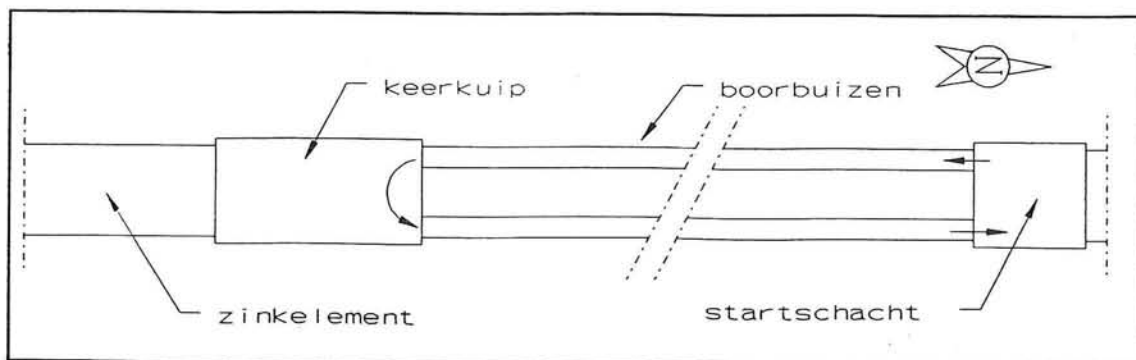
Zoals in §10.4.4 al werd vermeld worden de zinkelementen in de Delftse situatie op een gravelbed geplaatst i.p.v. te worden onderspoeld met zand. De reden hiervoor is het kunnen combineren van de funderingsfunctie van het gravelbed met een waterafsluitende functie door dit gravelbed waar nodig met een mortel te injecteren (☞ figuur 53a en §10.4.4). De elementen worden, na met behulp van de vijzels in de juiste positie te zijn gebracht, voorzichtig op het funderingsbed gelegd. Aan de vlakheid van het gravelbed worden hoge eisen gesteld. De vereiste nauwkeurigheid ligt in de orde van grootte van  $\pm 3$  cm, afhankelijk van de gradatie van het gebruikte materiaal. Het vlak maken van het gravelbed wordt uitgevoerd met behulp van een screeder.

Het voordeel van deze specifieke situatie, waarbij het water in de zinksleuf zeer rustig is, is dat het funderingsbed niet door bijvoorbeeld golven en/of stromingen wordt aangetast. De uitvoeringsrisico's ten aanzien van deze fundering blijven dan uiterst klein.

De rest van de zinksleuf wordt droog aangevuld. Een deel van de ontgraven grond is geschikt om als bovengrond te worden verwerkt en kan tijdelijk in depot worden gezet. Het overige deel van de aanvulling bestaat uit gewoon zand, dat van elders wordt aangevoerd. Dit met name om langdurige zakkings (vele jaren) van de grond boven de tunnel te vermijden (steeds moeten ophogen van straten e.d.). In tegenstelling tot zand is ontgraven kleigrond erg moeilijk te verdichten en blijft dit lang nazakken.



Figuur 10.54 Plattegrond t.p.v. de keerkuij. (schaal 1:2000)



Figuur 10.55 Boren 1° buis, keren in keerkuij, boren 2° buis.

## 10.8 De keerkuip annex landhoofd.

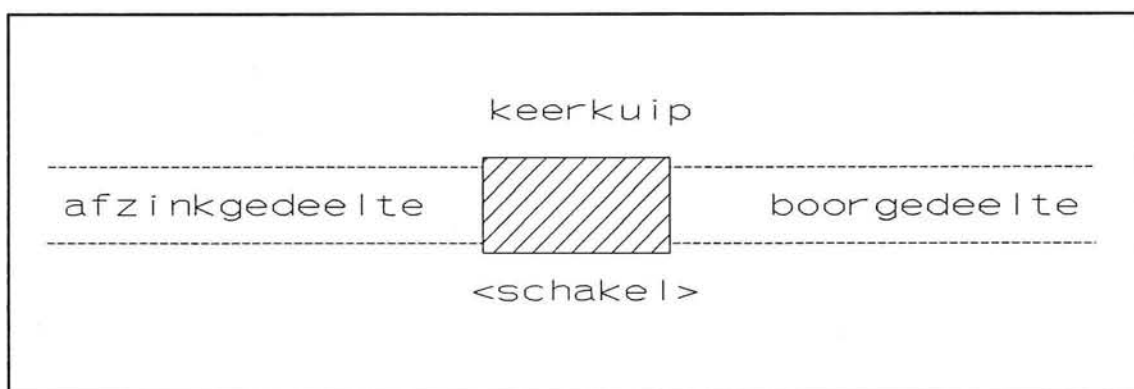
### 10.8.1 Inleiding.

Een volgend aspect van de uitvoering dat in de inleiding (§10.1) werd aangestipt is de keerkuip annex landhoofd. Dit meest noordelijke deel van het station (☞ figuur 10.54) zal gedurende de bouw van het station diverse verschillende functies vervullen. Uitgangspunt is dat deze keerkuip als een droge bouwkuip zal worden uitgevoerd. Doordat de kuip aan de bovenzijde open is, kunnen de diverse benodigde materialen (ook voor de boortunnel) eenvoudig met hijskranen worden aangevoerd.

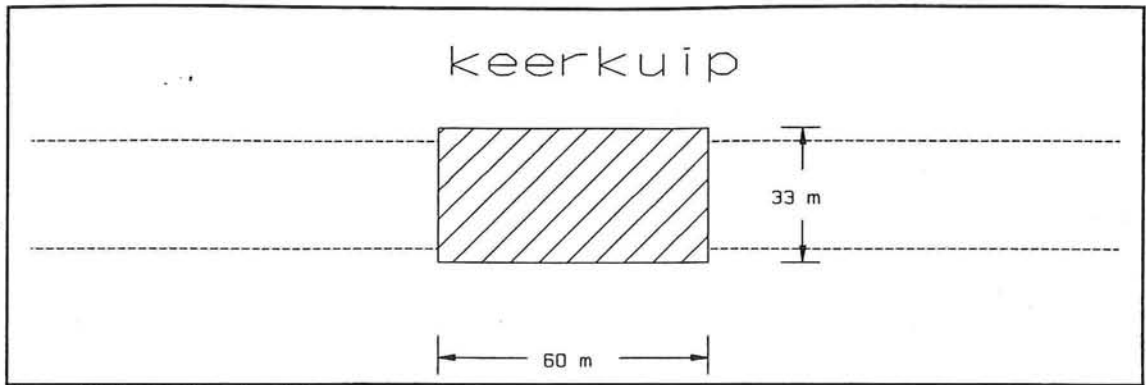
Primair doet deze droge kuip dienst als keerschacht voor de TunnelBoorMachine (TBM), waarmee het noordelijke deel van het tunneltracé wordt gemaakt (☞ §7.5.5). De TBM boort vanuit de noordelijk gelegen startschacht in zuidelijke richting een enkelsporige tunnelbuis met een lengte van ca.1600 meter en eindigt in de keerschacht (keerkuip). Vervolgens wordt de TBM met behulp van een hijsinstallatie omgedraaid en gepositioneerd voor het boren van de tweede buis, terug, in noordelijke richting (☞ figuur 10.55). De keerkuip dient ruim van afmeting te zijn (en met name de lengte), teneinde de gehele boortrein achter de TBM op te kunnen stellen.

Naast de keerfunctie van de kuip doet deze tevens dienst als landhoofd voor de zinkelementen, die de kuip vanaf de zuidzijde naderen. De zuidelijke wand van de keerkuip is voor dit doel voorzien van een koppelingsmogelijkheid tussen kuip en zinkelement. Het 1° zinkelement wordt tegen deze wand afgezonken. Daarna worden de opeenvolgende zinkelementen telkens tegen hun voorganger afgezonken.

Binnen de gehele bouwprocedures van het boren van de tunnelbuizen met de TBM en het afzinken van de tunnelementen, vormt de keerkuip een neutrale *schakel* in het geheel. Een neutrale *schakel*, omdat door de toepassing van deze keerkuip, de beide bouwprocessen (boorgedeelte en afzinkgedeelte) volledig van elkaar zijn ontkoppeld (☞ figuur 10.56).



Figuur 10.56 Keerkuip als neutrale schakel tussen boor- en afzinkproces.



Figuur 10.57 Afmetingen keerkuip.



Dit houdt bijvoorbeeld in, dat een vertraging in het boorproces geen gevolgen zal hebben voor het bouwen of afzinken van de tunnelementen. Het zou ook goed denkbaar zijn om de TBM te keren in een ter plaatse afgezonken tunnelement. Wanneer het afzinken van dit element om de één of andere reden vertraging oploopt, ondervindt het boorproces (waarvan de continuïteit erg belangrijk is) hiervan ook hinder.

Na het afzinken van de tunnelementen en het keren van de TBM, krijgt de keerkuip een nieuwe functie. Allereerst wordt de kuip voorzien van een extra vloer ter hoogte van het tunneldak. De ruimte tussen deze extra vloer en de vloer van de kuip wordt volledig geïntegreerd met de zinkelementen en vormt zo het laatste deel van het station.

Over blijft de ruimte hierboven, waarvan het zonde zou zijn wanneer met dit onbenut zou laten. Een mogelijke invulling aan het hergebruik van deze ruimte is gegeven in §10.8.4. In ieder geval dient het dak van de totale constructie beneden de 2 m ÷ NAP te blijven, aangezien de Westsingelgracht boven een groot gedeelte van de keerkuip loopt (zie figuur 10.54). Dit water heeft een waterdiepte van ca.2 meter (ligplaatsen voor pleziervaart). Het waterspiegelniveau in de Westsingelgracht ligt op NAP (ca.0.5 m beneden gemiddeld maaiveld).

### 10.8.2 Afmetingen keerkuip.

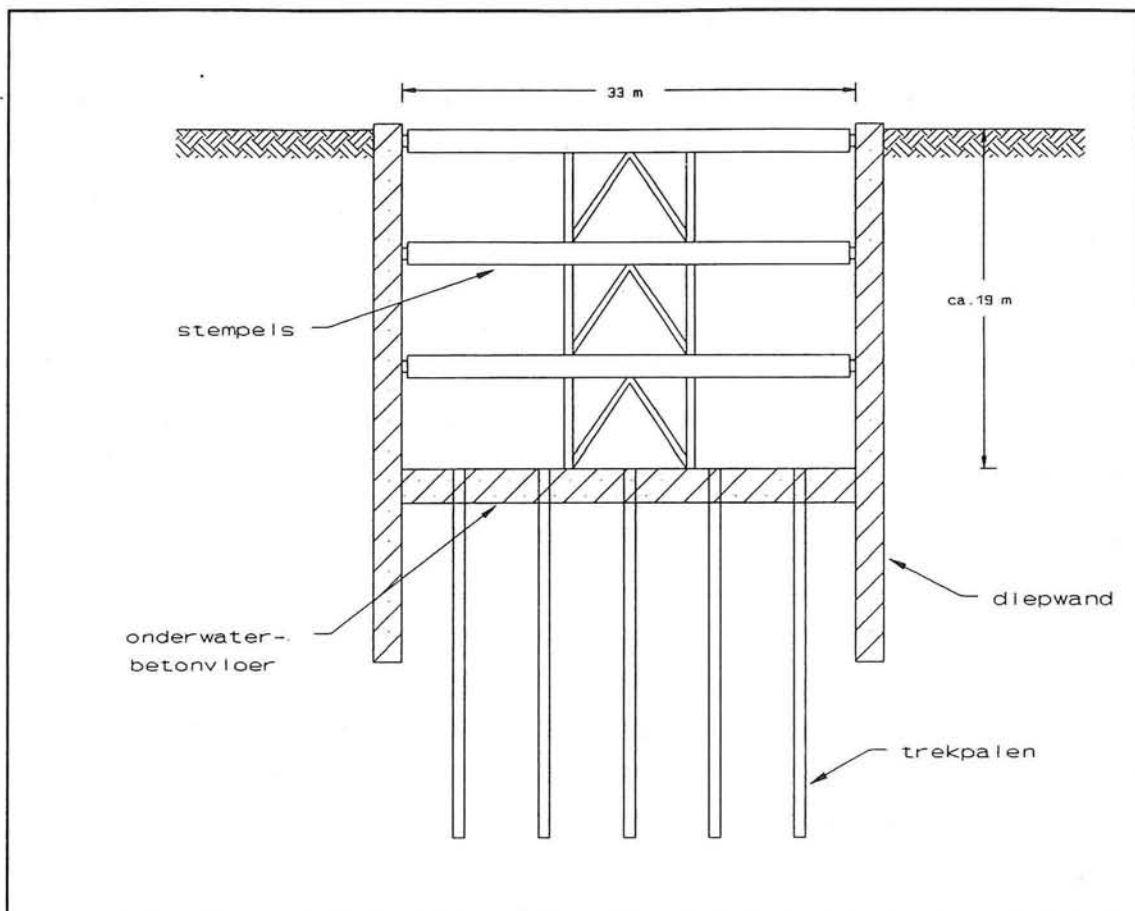
De afmetingen van de keerkuip worden bepaald door minimum eisen, die worden opgelegd door de grootte van de toegepaste TunnelBoorMachine (TBM). De TBM zelf moet kunnen worden gedraaid met behulp van een hijsinstallatie. Verder is ruimte benodigd voor het opstellen van de boortrein, die zich achter de TBM bevindt. Voor twee boorbuizen naast elkaar, elk met een uitwendige schild-diameter van 8.10 m gelden de volgende afmetingen:

- lengte : 60 m
- breedte : 33 m [= 2 x 8.10 m (buis) + 13 m (perron) + 2 x 2 m (zij-marge)].

zie figuur 10.57

De bovenzijde van de vloer van de kuip moet komen te liggen op ca.19 m ÷ NAP. Dit sluit dan precies aan bij de zinkelementen en de boorbuizen. Om precies te zijn ligt de bovenkant van de vloer van de kuip aan de zuidzijde op 18.7 m ÷ NAP en aan de noordzijde op 19 m ÷ NAP, aangezien er een helling van 1:200 in het traject aanwezig is. Bij de vaststelling van deze twee punten is een ballastbed voor de sporen van ca.0.8 m meegerekend, zodat Bovenkant Spoor (BS) in dit deel op respectievelijk 17.9 en 18.2 meter beneden NAP ligt. Met behulp van het ballastbed (los gestort materiaal) is het goed mogelijk enigszins in hoogte te variëren.

Daarom is gekozen om de bovenkant van de vloer horizontaal te maken en aan te brengen op ca.19 m ÷ NAP, aangezien dit uitvoeringstechnisch veel eenvoudiger is.



Figuur 10.58 Keerkuip, uitgevoerd als diepwand.

### 10.8.3 Uitvoering van de keerkuip.

De keerkuip wordt als het ware uitgevoerd als een grote betonnen doos in de grond. Door de in hoofdstuk 7 gekozen locatievariant (het over ca. 100 m in zuidelijke richting verschuiven van het ondergrondse station) is het maken van de kuip redelijk eenvoudig. Bij de door NS-BTC gekozen locatie van het ondergrondse station zou de koppeling tussen het ondergrondse station en de boorbuizen precies onder het kruispunt Westvest-Phoenixstraat-Binnenwatersloot-Buitenwatersloot moeten worden gerealiseerd. In het nu gekozen geval is de te maken keerkuip gesitueerd onder een deel van de Westsingelgracht en is geheel buiten de drukke verkeersstromen gelegen.

De vloer van de keerkuip zal in eerste instantie worden gevormd door een onderwaterbetonvloer, verankerd met trekpalen. Hierop wordt de definitieve constructievloer gestort.

De circa 19 meter hoge wanden van de keerkuip worden uitgevoerd in gewapend beton. Voor het maken van deze wanden zijn een aantal mogelijkheden beschikbaar.

De eerste mogelijkheid is dat er allereerst rondom de te maken keerkuip een complete combiwand wordt gezet. Hierbinnen wordt vervolgens ontgraven, waarbij de combiwanden op diverse hoogten worden gestempeld en/of verankerd. Daarna wordt de onderwaterbetonvloer gestort en wordt de zo verkregen bouwkuip leeggepompt. Binnen deze droge bouwkuip kan nu de keerkuip worden gemaakt.

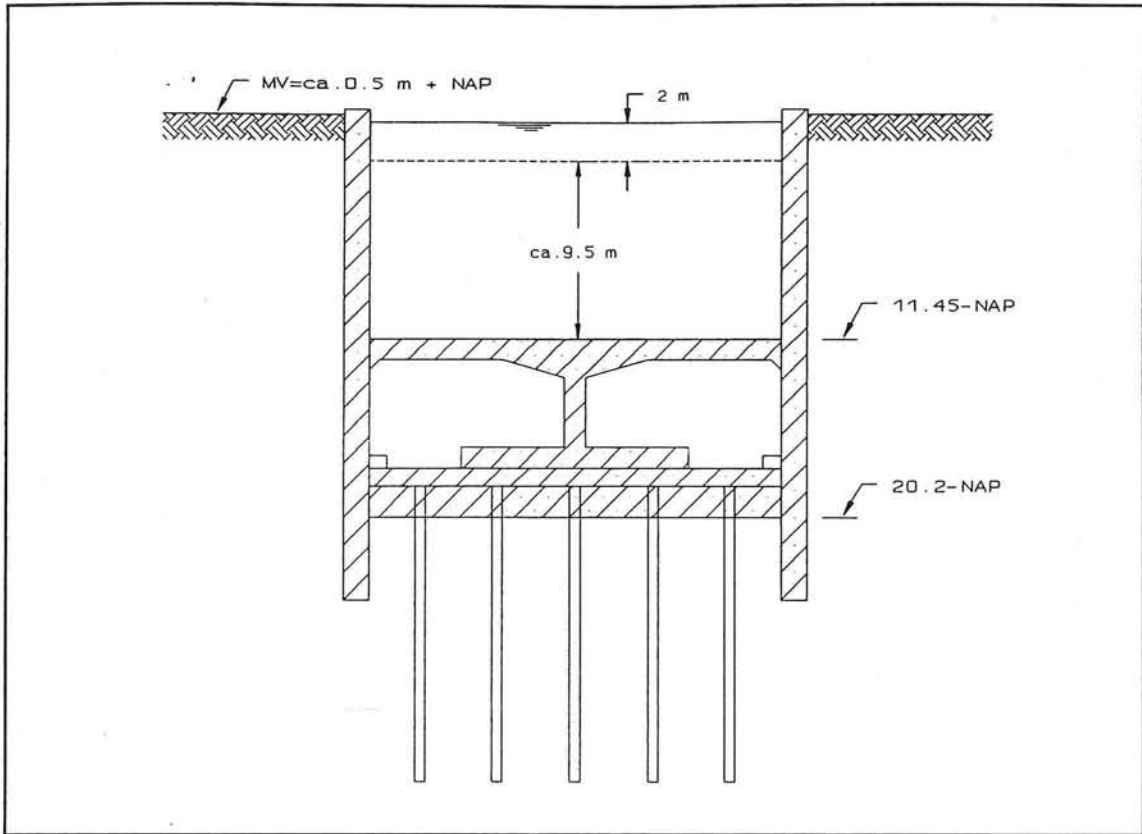
Een andere mogelijkheid is dat de wanden van de keerkuip als diepwand worden uitgevoerd (zie figuur 10.58). De diepwand fungeert dan tegelijkertijd als grondkerende wand voor de bouwkuip en als definitieve wand van de keerkuipconstructie. De diepwand kan met behulp van stempels of ankers of een combinatie van beiden worden gesteund. Het voordeel van de toepassing van een diepwand is dat de wand tegelijkertijd twee functies vervult en dat de wand van zichzelf relatief stijf is. Nadeel is dat het aanbrengen van een diepwand een vrij trage voortgang kent en dat uitgebreide zuiveringsinstallaties voor het reinigen van de steunvloeistof (bijv. bentoniet) noodzakelijk zijn.

Een voorwaarde voor het kunnen opnemen van de diepwand in de uiteindelijke keerkuipconstructie is dat deze van redelijk tot goede kwaliteit is.

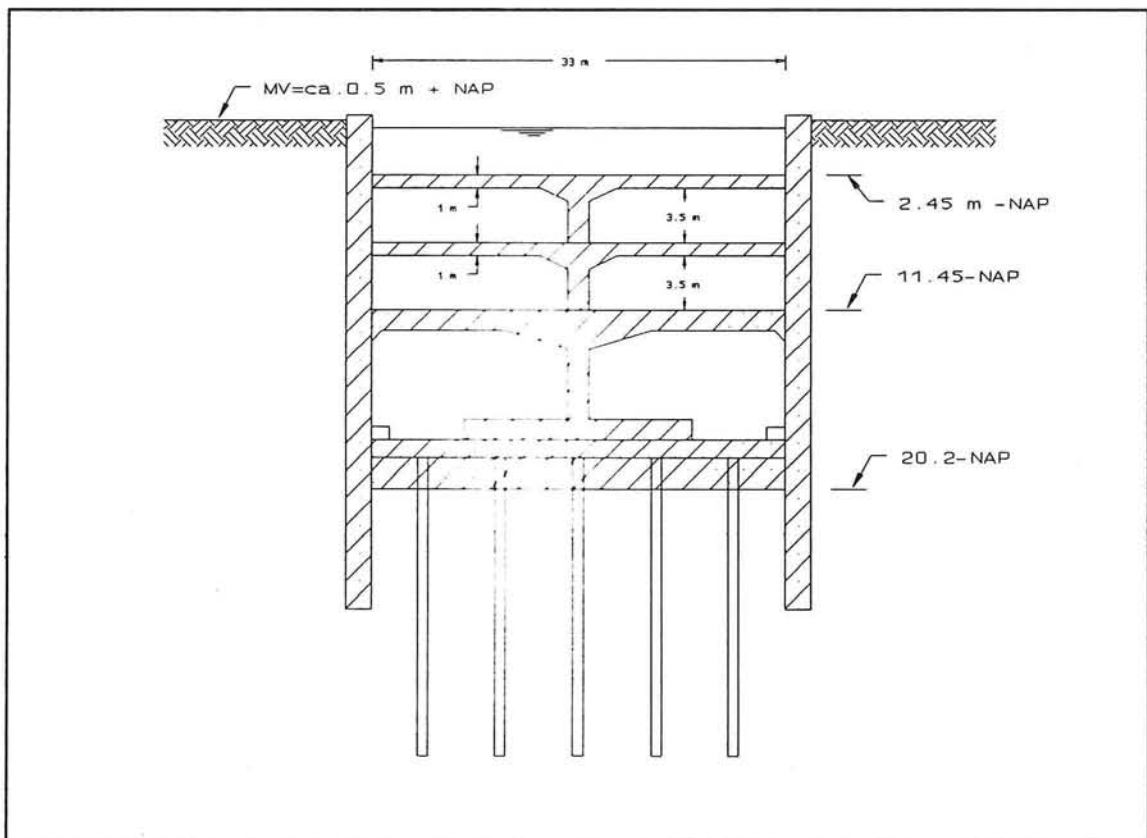
### 10.8.4 Invulling keerkuip-ruimte: ondergrondse parkeergarage.

Zoals in §10.8.1 reeds werd gezegd is het zonde om de rest van de keerkuipconstructie boven het perrongedeelte van het station niet te benutten. De wanden voor een mogelijke constructie staan er immers al.

Het totale vloeroppervlak van de keerkuip bedraagt ca. 60 m x 30 m (1980 m<sup>2</sup>). De hoogte van de overgebleven ruimte bedraagt ca. 9.5 m (inclusief aftrek van de over te laten waterdiepte van de Westsingelgracht) (zie figuur 10.59).

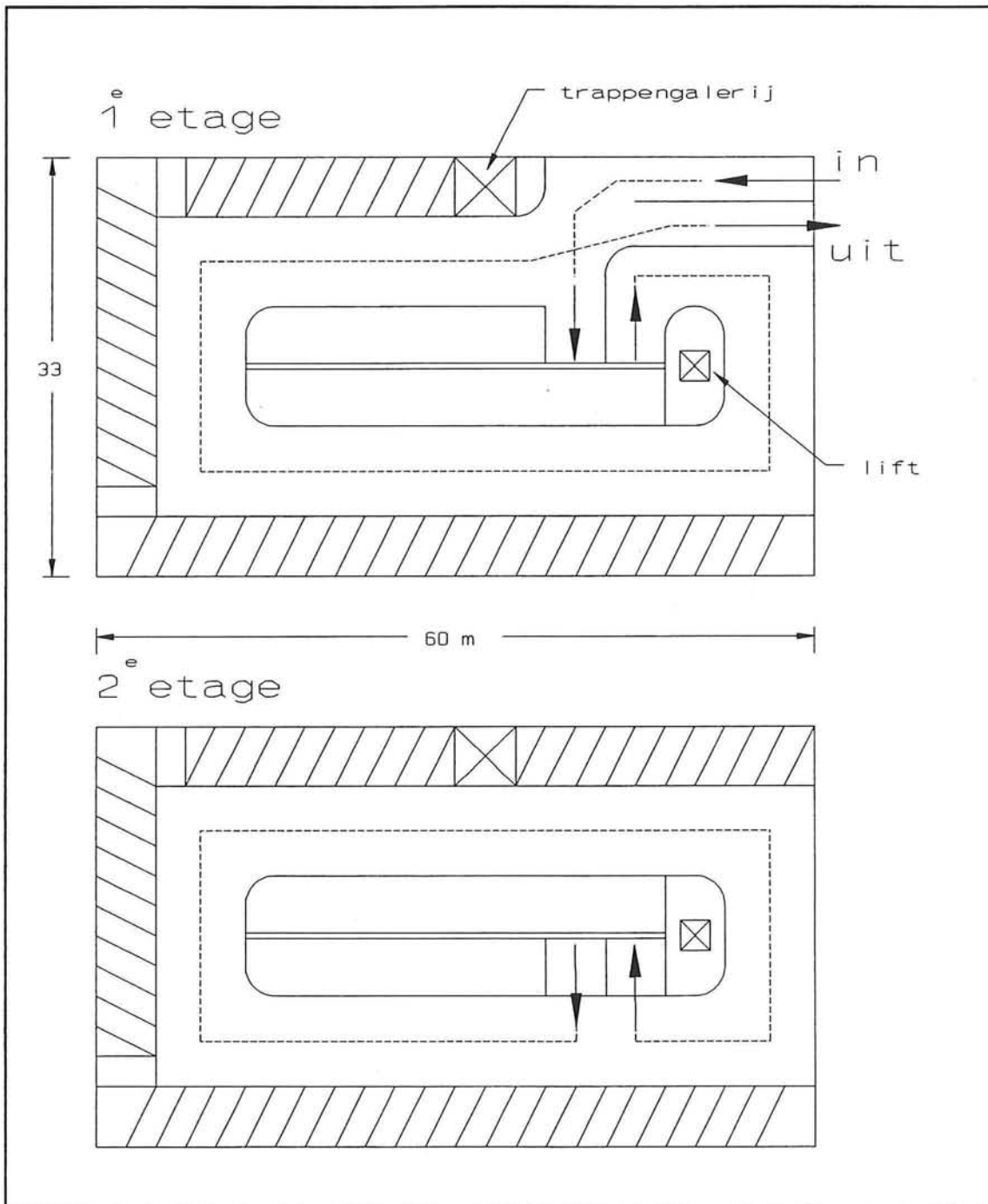


Figuur 10.59 Overgebleven ruimte in de keerkuij boven ondergrondse station.



Figuur 10.60 Dwarsdoorsnede ondergrondse parkeergarage.

Aangezien de beschikbare ruimte relatief groot is, is een mogelijke invulling hiervan een twee verdiepingen tellende parkeergarage. Indien wordt uitgegaan van een minimale hoogte van de verdiepingen van 3.5 m en vloerdikten van ca.1 meter, dan passen er exact twee verdiepingen in de loze ruimte (zie figuur 10.60). De ingang van de parkeergarage zou kunnen worden gesitueerd of aan de Houttuinen of aan de andere zijde, aan de Westvest. De parkeergarage zou plaats kunnen bieden aan circa 120 auto's. Een mogelijke indeling van de garage over de twee verdiepingen is weergegeven in figuur 10.61.



Figuur 10.61 Mogelijk ontwerp parkeergarage.



Vanaf beide verdiepingen is er een lift en een trap, die uitkomen op het perron van het station. Op die manier is het dus zeer goed mogelijk om de auto in de garage te parkeren en de reis per trein te vervolgen (Park and Ride, P+R). Daarnaast is er vanzelfsprekend een verbinding tussen de garage en het maaiveld. De mogelijkheid bestaat dus ook om vanaf het maaiveld in het station te komen. Zo kan alsnog min of meer tegemoet worden gekomen aan de wens van de gemeente om een stationsingang aan de centrumzijde, nabij de Binnenwatersloot, te hebben. Deze in-/uitgang kan worden gemaakt aan de Houttuinen-zijde of aan de Westvest-zijde. Aan de Westvest-zijde is het bovendien denkbaar om een kleine onderdoorgang onder de straat aan te leggen, die op de stoep van de Westvest (aan de oostzijde) uitkomt.

De loze keerkuipruimte kan dus goed worden benut. Met deze oplossing wordt tegemoetgekomen aan de parkeerproblemen van de gemeente Delft, aan de wens voor een toegang van het station aan de centrumzijde, en wordt het door de Nederlandse regering zo gepromote P+R-beginsel aangemoedigd.

Door de reeds aanwezige constructiedelen kan de ondergrondse parkeergarage bovendien relatief goedkoop worden gerealiseerd. Daarnaast wordt voorkomen dat een groot gedeelte van de keerkuip, hetgeen toch een redelijk kostbare constructie is, niet verloren in de grond achter blijft.

## **10.9 Overzicht planning en fasering.**

### **10.9.1 Inleiding.**

De kosten van een ondergronds station zitten over het algemeen meer gecompliceerd in elkaar dan de kosten van de aangrenzende tunneldelen. De kosten hangen onder andere af van de aanlegdiepte van het station, het aantal sporen, de perronlengte, de plaats van een stationshal, de aan te brengen installaties, de grondcondities en uiteraard de gekozen uitvoeringsmethode. Naast een aantal kosten die per m<sup>1</sup> station goed te bepalen zijn (bijvoorbeeld rails etc.), zijn er ook een groot aantal kosten die niet minder eenvoudig zijn vast te leggen.

Zoals in §10.4.5 al even werd aangestipt gaan binnen een bouwproject de factoren tijd en kosten hand in hand. Hier werd het voorbeeld aangehaald van een heimachine. Wanneer een heimachine 12 m<sup>1</sup> damwand per dag kan aanbrengen, dan produceren twee machines het dubbele (24 m<sup>1</sup>/dg). Het heien van de damwand gaat dan twee maal zo snel, maar de kosten zijn vanzelfsprekend ook direct veel hoger. Het aantal strekkende meters damwand waarbij het rendabel wordt om twee heimachines in te zetten, is weer afhankelijk van een groot aantal factoren. Dit betreft een optimalisatievraagstuk. Ieder onderdeel van het project zou afzonderlijk aan een optimalisatie kunnen worden onderworpen. Aan het optimaliseren van het project *Ondergronds Station Delft* zou op die manier op zich al een compleet afstudeerproject kunnen worden gewijd. Daarom wordt hier in dit rapport niet al te diep op ingegaan.





In uitvoeringstechnisch opzicht kan het totale stationsproject, zoals dat in de voorgaande hoofdstukken is beschreven, globaal worden ingedeeld in een aantal hoofd-onderdelen, te weten:

- Het maken van de zinksleuf.
- Het maken van het bouwdok.
- Het fabriceren van de zinkelementen in het bouwdok.
- Het transport en afzinken van de elementen.
- Het maken van de keerkuip.
- Afbouw van het station.

In de diverse voorgaande hoofdstukken is getracht van de uitvoeringsprocedures van deze onderdelen een zo compleet mogelijk beeld te geven.

In deze paragraaf zal een globaal overzicht worden gegeven van de benodigde tijd voor de uitvoering van bovenstaande hoofd-onderdelen. Tevens zal worden aangegeven hoe de uitvoering van deze onderdelen ten opzichte van elkaar in de tijd verloopt. Vervolgens zal een vergelijking worden gemaakt tussen de in afstudeerproject gekozen afzinkmethode voor de uitvoering van het ondergrondse station en een uitvoering met behulp van een (droge) open bouwkuip methode.

### **10.9.2 Globaal tijds- en faseringsoverzicht.**

#### **a. Zinksleuf.**

Voor het aanleggen van de zinksleuf voor het station (natte bouwkuipgedeelte tussen bouwdok en keerkuip) zijn een aantal deelactiviteiten van belang. Naast het aanbrengen van combiwanden met een stempeling en het ontgraven van de sleuf, moeten ook een tal van kabels en andere ondergrondse leidingen worden omgelegd. Daarnaast moeten hulpbruggen en andere tijdelijke voorzieningen worden aangebracht. Ook de sloop van een aantal panden speelt hierbij een rol. Een aantal van deze activiteiten kunnen min of meer gelijktijdig plaatsvinden, danwel in fasen achter elkaar aan lopen. Zo kan het aanbrengen van de combiwand, na enige tientallen meters te zijn gevorderd, worden gevolgd door het aanbrengen van de stempeling en daarachter het ontgraven van de sleuf. Een aantal andere activiteiten daarentegen moeten persé na elkaar plaatsvinden.

Om een indicatie te geven van de benodigde tijd voor het maken van de zinksleuf zijn hieronder wat gegevens ten aanzien hiervan verzameld. Onderstaande tijdsindicaties zijn inclusief bijkomende werken. D.w.z. dat bijvoorbeeld onder 'combiwand' naast het aanbrengen van de combiwand zelf, ook wordt verstaan het aanbrengen van gordingen en stempels e.d.



| Zinksleuf                |                          |                         |       |       |
|--------------------------|--------------------------|-------------------------|-------|-------|
| Activiteit               | hoev                     | eenh/tijd               | dagen | weken |
| ■ Omleggen kabels e.d.   | -                        | -                       | 25    | 5     |
| ■ Openbreken straten e.d | -                        | -                       | 20    | 4     |
| ■ Hulpconstructies       | -                        | -                       | 10    | 2     |
| ■ Sloop panden           | -                        | -                       | 15    | 3     |
| ■ Combiwand              | ca.800 m                 | 7.5 m <sup>1</sup> /dg  | 110   | 22    |
| ■ Ontgraven              | ca.194000 m <sup>3</sup> | 2500 m <sup>3</sup> /dg | 78    | 16    |

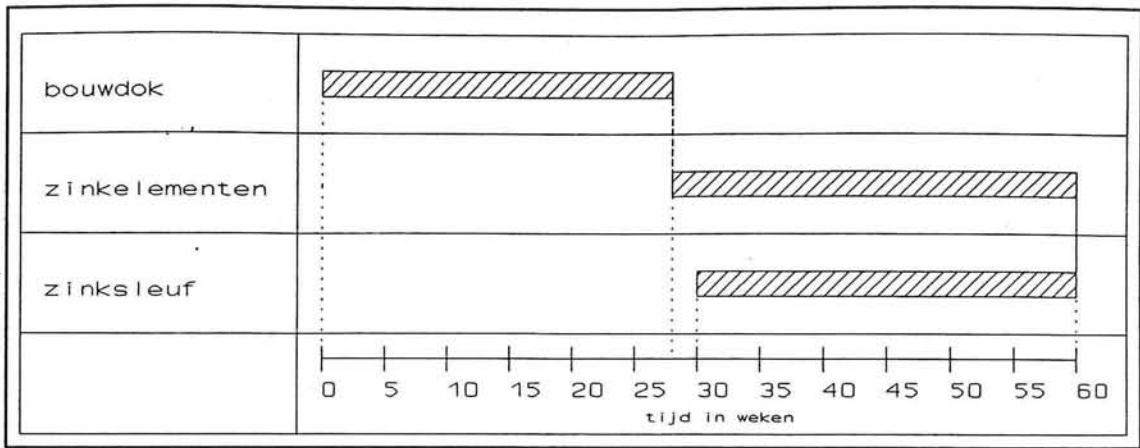
Aangezien diverse van deze activiteiten min of meer parallel kunnen lopen, wordt de totale tijdsduur van het aanbrengen van de zinksleuf geschat op ca. 30 weken ( $\approx$  6 maanden).

#### b. Bouwdok.

De activiteiten in en om het bouwdok zijn eveneens op te splitsen in een aantal deel-activiteiten. Zo is er het aanbrengen van de combiwand aan de westzijde van het bouwdok, het aanbrengen van een damwand rondom de overige drie zijden van het bouwdok, het ontgraven en de inrichting van het bouwdok. Zodra de inrichting van het bouwdok gereed is, volgt de bouw van de zinkelementen.

Van bovenstaande deel-activiteiten is hieronder een globaal tijdsoverzicht aangegeven:

| Bouwdok                   |                          |                         |       |       |
|---------------------------|--------------------------|-------------------------|-------|-------|
| Activiteit                | hoev                     | eenh/tijd               | dagen | weken |
| ■ Combiwand               | ca.400 m                 | 8 m <sup>1</sup> /dg    | 50    | 10    |
| ■ Damwand                 | ca.300 m                 | 15 m <sup>1</sup> /dg   | 20    | 4     |
| ■ Ontgraven               | ca.130000 m <sup>3</sup> | 2400m <sup>3</sup> /dg  | 55    | 11    |
| ■ Inrichting bouwdok      | -                        | -                       | ca.25 | 5     |
| ■ Tunnelementen           | 370 m                    | ca.3 m <sup>1</sup> /dg | -     | 32    |
| ■ Reconstructie na afloop | -                        | -                       | -     | ca.16 |



Figuur 10.62 Tijdsverhouding zinksleuf- en bouwdok-activiteiten.

Met inachtneming van het parallel lopen van diverse activiteiten, wordt de totale benodigde tijdsduur van het aanbrengen van het bouwdok en het maken van de zinkelementen daarin geschat op circa 60 weken ( $\approx$  15 maanden).

Eén van de kenmerken van de gekozen uitvoeringsmethode is dat het gereedkomen van de zinksleuf ongeveer samenvalt met het gereedkomen van de zinkelementen in het bouwdok. De zinkelementen kunnen dan vrijwel direct worden ingevaren en afgezonken. Wordt het maken van de zinksleuf en de activiteiten rondom het bouwdok tegen de tijd uitgezet, dan ziet dat er ongeveer uit als in figuur 10.62.

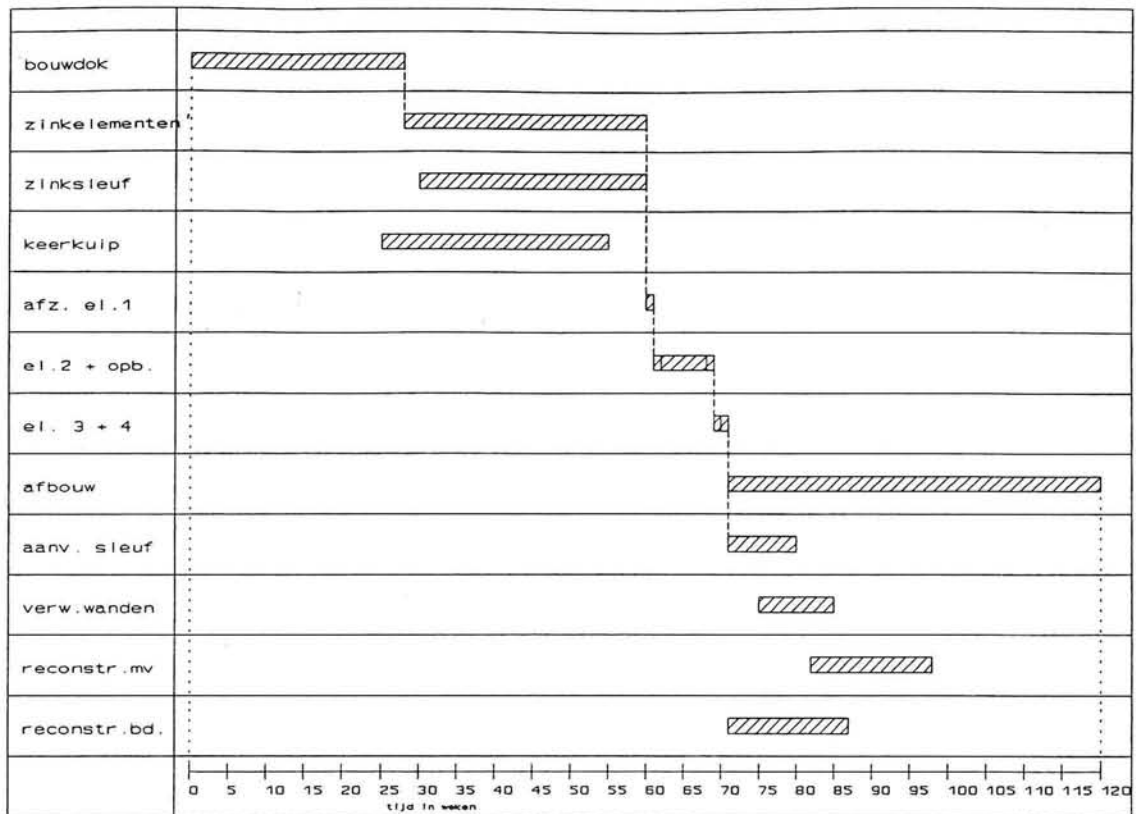
#### c. Transport en afzinken elementen e.d.

Zodra de zinkelementen en de zinksleuf gereed zijn, kunnen de zinkelementen worden getransporteerd en afgezonken. Nadat de elementen op het funderingsbed zijn geplaatst kan de sleuf verder worden aangevuld. De combiwanden kunnen vervolgens worden verwijderd, waarna het maaiveld wordt hersteld. Van de hoofd-activiteiten die hierbij van belang zijn, is ook hier weer een overzicht gegeven:

| Transport en afzinken elementen e.d. |                          |                         |       |       |
|--------------------------------------|--------------------------|-------------------------|-------|-------|
| Activiteit                           | hoev                     | eenh/tijd               | dagen | weken |
| ■ Afzinken                           | 5 el                     | 1 el/wk                 | -     | 5     |
| ■ Halopbouw                          | -                        | -                       | -     | 6     |
| ■ Aanvullen sleuf                    | ca.102000 m <sup>3</sup> | 4000 m <sup>3</sup> /dg | ca.40 | 8     |
| ■ Verwijderen combiwand              | 800 m                    | 16 m <sup>1</sup> /dg   | 50    | 10    |
| ■ Herstel maaiveld                   |                          | -                       | -     | 16    |

#### d. Keerkuip.

Een volgend hoofd-onderdeel betreft de keerkuip. Hiervan kan worden gezegd dat deze kuip gereed moet zijn, alvorens de TunnelBoorMachine (TBM) hier aankomt om gekeerd te worden en voordat de elementen van het station worden afgezonken. Het aanbrengen van deze kuip bestaat onder andere uit het aanbrengen van diepwanden, het heien van trekpalen, het ontgraven van de kuip en het storten van een onderwaterbetonvloer. Daarna volgt de afwerking van de keerkuip ter voorbereiding op de ontvangst van de TBM en het eerste zinkelement.



Figuur 10.63 Totaaloverzicht bouwplanning ondergronds station Delft.

| Keerkuip               |                      |                        |       |       |
|------------------------|----------------------|------------------------|-------|-------|
| Activiteit             | hoev                 | eenh/tijd              | dagen | weken |
| ■ Diepwand             | 200 m <sup>1</sup>   | 4 m <sup>1</sup> /dg   | 50    | 10    |
| ■ Trekpalen heien      | ca.100 st            | 10 st/dg               | 10    | 2     |
| ■ Ontgraven            | 36000 m <sup>3</sup> | 1400m <sup>3</sup> /dg | ca.25 | 5     |
| ■ Onderwaterbetonvloer | -                    | -                      | -     | ca.2  |
| ■ Droog maken kuip     | -                    | -                      | ca.10 | 2     |
| ■ Afwerken constructie | -                    | -                      | -     | 10    |

Ook hier zijn bij de afzonderlijke kopjes de voorbereidingen en dergelijke bij inbegrepen. De totale bouwtijd van de keerkuip wordt geschat op ca.30 weken. Hierbij is niet inbegrepen de integratie met het ondergrondse station naderhand en de voorgestelde eventuele ombouw naar een ondergrondse parkeergarage.

#### e. Afbouw.

Verreweg het grootste deel van de totale bouwtijd wordt in beslag genomen door de afbouw van het station. Een pluspunt is in ieder geval wel dat dit zich grotendeels onder de grond afspeelt. De afbouw houdt onder andere in: het aanbrengen van installaties, rail-infrastructuur, trappen en roltrappen, de afwerking van het betonwerk, betegeling vloeren etc. etc.

De totaal hiervoor benodigde tijd wordt geschat op ca. 60 weken ( $\approx$  15 maanden).

Bij de planning van de afbouw van het station komt een klein nadeel van de gekozen uitvoeringsmethode naar voren. Namelijk, de afbouw van het station kan pas beginnen nadat de elementen zijn afgezonken. In het geval in een droge open bouwkuip zou worden gewerkt, kan deze afbouwfase reeds in een eerder stadium aanvangen. Dit levert ten aanzien van de afbouw dan vanzelfsprekend een tijdwinst op.

#### f. Totaaloverzicht.

In figuur 10.63 is een globaal totaaloverzicht gegeven van de diverse uitvoeringsonderdelen van het station als functie van de tijd. Hierbij dient te worden opgemerkt dat, zoals in §10.9.1 reeds werd aangestipt, bepaalde onderdelen tegen meerprijs sneller zouden kunnen verlopen door bijvoorbeeld het inzetten van meer mankracht en/of materieel (capaciteitsverhoging). Zoals al eerder gezegd betreft dit een optimalisatievraagstuk, waarop hier niet verder wordt ingegaan. De totale bouwtijd van het ondergrondse station komt ongeveer op 120 weken ( $\approx$  3 jaar).





### 10.9.3 Vergelijk met open bouwkuip methode.

Nu een redelijk beeld is verkregen van de toegepaste uitvoeringsmethode is het wellicht interessant om een vergelijking te maken tussen de voorgestelde uitvoeringsmethode en een vergelijkbare methode.

De gekozen uitvoeringsmethode voor het bouwen van het ondergrondse station, het afzinken van tunnelelementen, is in feite goed vergelijkbaar met een open bouwkuip methode. In beide gevallen wordt een sleuf door de stad gemaakt. Het principe-verschil tussen beide sleuven is dat de sleuf bij de afzinkmethode niet droog behoeft te worden gemaakt, terwijl dit bij een droge open bouwkuip juist wel essentieel is. Bij de laatste methode is voor dat doel bovendien een waterdichte bodemafluiting van de bouwkuip noodzakelijk. Dit kan zijn een diepgelegen waterafsluitende laag, maar in de Delftse situatie is een onderwaterbetonvloer noodzakelijk. Het verschil in kosten tussen beide methoden uit zich in een aantal punten. Voor de gekozen methode (het afzinken) geldt dat:

1. géén kostbare onderwaterbetonvloer in combinatie met trekpalen benodigd is.
2. de wanden van de bouwkuip lichter kunnen worden uitgevoerd, aangezien de sleuf niet wordt droog gemaakt.
3. het tijdsbestek dat het maaiveld open ligt (overlast veroorzaakt) vele malen korter is.

Daarentegen is er wel:

4. een bouwdok voor de zinkelementen benodigd.
5. een extra kostenpost, specifiek voor de zinkelementen, zoals kopschotten, onderspoel-systeem, hydraulische vijzels, te maken voegen etc.

De eerste twee punten geven qua kosten een groot verschil tussen beide uitvoeringsmethoden, vanwege de relatief zeer diepe ligging van het station. Deze diepe ligging wordt opgelegd door de randvoorwaarde, dat het op het ondergrondse station aansluitende noordelijke tunneldeel wordt uitgevoerd als boortunnel. Voor de boortunnel is, vanwege het vertikaal evenwicht tussen de vloeistofdruk in het boorfront en de gronddruk van de bovenliggende grond, een minimale gronddekking van 1.2 à 1.5 maal de tunneldiameter noodzakelijk. Voor een buisdiameter van ca. 8 meter betekent dit dan een ligging van de onderzijde van de tunnelbuis op ca.  $2.5 \times 8 \text{ m} = 20 \text{ m}$  diepte. Het station, dat op de boortunnel aansluit heeft deze diepe ligging dan automatisch ook.

Wanneer het station in een droge open bouwkuip zou worden uitgevoerd, dan zijn de resulterende horizontale drukken tegen de kerende wanden van de kuip, door deze diepe ligging van het station, zeer hoog. De resulterende horizontale drukken tegen de kerende wanden bij de gekozen afzinkmethode zijn uiterst klein. Dit is te danken aan de gunstig werkende tegendruk van het water dat in de sleuf staat.

Ten aanzien van het derde punt is moeilijk een inschatting van kostenbesparing te geven,



aangezien economische- en maatschappelijke schade (want daar gaat het hier grotendeels om) moeilijk in geld is uit te drukken. De gemeente Delft (die omwonenden en middenstanders vertegenwoordigt) zal voorstander zijn van een zo kort mogelijke duur van de veroorzaakte overlast. De NS daarentegen zal hiervoor moeten betalen.

Het vierde en vijfde punt zijn kosten, die de gekozen afzinkmethode wél heeft en de open bouwkuipmethode niet, gelijk aan de punten één en twee, waarbij het tegenovergestelde het geval is.

Ter indicatie zal het station, uitgevoerd met behulp van de afzinkmethode, een kostprijs hebben die ligt tussen de 70 en 75 miljoen gulden. Dit zou dan neer komen op een strekkende meter prijs van 205 à 220 duizend gulden. Een variant waarbij het ondergrondse station met behulp van een open bouwkuipmethode wordt aangelegd, is door NS-BTC geschat op een prijs van ca.263.000,- gulden per strekkende meter (ca.89.4 miljoen).

Indien de twee uitvoeringsvarianten qua bouwtijd met elkaar worden vergeleken, dan blijkt dat de totale bouwtijd van het ondergrondse station voor beide varianten elkaar niet veel ontloopt. Bij beide varianten ligt dit in de buurt van de 3 jaar. De gekozen afzinkmethode heeft echter het grote voordeel dat het opengraven van het maaiveld (maken zinksleuf) nog even kan worden uitgesteld, totdat de zinkelementen gereed zijn. Bij een droge bouwkuip daarentegen, is het maaiveld van het begin tot het einde van het maken van de constructie geopend. De afbouw van het station kan uiteraard net als bij de afzinkmethode onder de grond plaatsvinden.

In grote lijnen vergeleken, is te concluderen dat de gekozen afzinkmethode goedkoper zal uitvallen dan bijvoorbeeld de (droge) open bouwkuip methode. De oorzaak hiervan is met name te zoeken in de diepe ligging van het station (aanlegdiepte ca.20 m ÷ MV). Hierdoor zijn voor een droge bouwkuip zeer stijve kuipwanden en een meer dan gemiddeld sterke kuipvloer benodigd. Indien het ondergrondse station een minder diepe ligging zou hebben, dan zou dit een volstrekt ander licht op het geheel werpen (vergelijk met station Blaak te Rotterdam, uitgevoerd in een open bouwkuip). De diepe ligging van het station is het gevolg van het uitvoeren van een deel van het tunneltracé als boortunnel. In dit afstudeerproject, het ontwerp en de uitvoering van het ondergronds station te Delft, was dit echter als randvoorwaarde opgelegd.

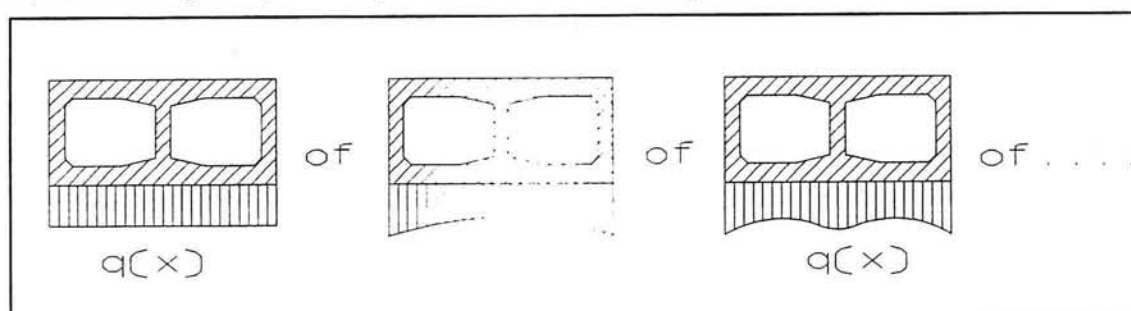


## 11. Conclusies en aanbevelingen.

Algemeen kan worden geconcludeerd dat, indien wordt uitgegaan van het toepassen van een tunnelboormethode voor een deel van het Delftse tunnelproject, dat dan de in dit afstudeerproject beschreven uitvoeringsmethode voor het bouwen van het ondergrondse station te Delft wellicht een concurrerende oplossing kan zijn. Naast de gekozen uitvoeringsmethode is in hoofdstuk 7 ook gekozen voor een locatievariant voor het station. Gebleken is dat dit zowel uitvoeringstechnisch als in het ontwerp opmerkelijk eleganter is.

Evenals iedere toe te passen uitvoeringsmethode kent ook de gekozen uitvoeringsmethode enkele knelpunten. Het is gebleken dat deze punten goed zijn op te lossen. In uitvoeringstechnisch opzicht is getracht om zoveel mogelijk van de bij de uitvoering van belang zijnde aspecten aan de orde te stellen. Vanzelfsprekend is dit niet geheel compleet. Een aantal aspecten zouden in detail nader moeten worden onderzocht. Als voorbeeld is te noemen de detail-aansluiting tussen de keerkuip en de boorbuizen en de aansluiting tussen de keerkuip en het eerste zinkelement. Daarnaast is het zinvol te onderzoeken hoe de fasering en planning van het gepresenteerde stationsproject zou kunnen worden geoptimaliseerd. Als derde kan worden onderzocht of het nu voorgestelde bouwdok niet nog kleiner zou kunnen worden gemaakt, en geheel kan worden opgenomen in de droge bouwkuip voor het later te bouwen zuidelijke tunneldeel.

Ten aanzien van de berekeningen van de doorsnede van de in dit rapport beschouwde zinkelementen en ook in algemene zin, is het zinvol te onderzoeken wat nu de beste schematisatie is van de funderingsdruk, welke op de constructie wordt uitgeoefend (zie figuur 11.1).



Figuur 11.1 Mogelijke schematiseringen funderingsdruk op constructie.

In de theorie (en praktijk) zijn de meningen hierover nogal verdeeld. Veiligheidshalve wordt meestal een gelijkmatig verdeelde funderingsdruk aangehouden. Wellicht is met behulp van een eindige elementen programma hierop een antwoord te vinden.

Het in dit rapport gepresenteerde stationsontwerp is niet tot in de kleinste details uitgewerkt. Getracht is het ontwerp voor het ondergrondse station zo ruim mogelijk op te zetten, om het



ondergrondse verblijf zo aangenaam mogelijk te maken. Ook is getracht de attractiviteit van het ondergronds karakter van het station te vergroten door toepassing van een spiegelsysteem dat daglicht in het station kan brengen. De voor het station benodigde installaties zijn slechts in het kort aangegeven. In ieder geval is hiervoor in het ontwerp ruimte gereserveerd. De inpassing van deze installaties (kabels, leidingen, elektrische voorzieningen etc.) is niet gedetailleerd uitgewerkt.

Het gehele Delftse tunnelproject beziende, is het **kostentechnisch** in principe af te raden om in Delft bij de uitvoering van een tunnel ten behoeve van een spoorverdubbeling een boortunnel toe te passen. Dit, omdat er in deze situatie in feite goedkopere alternatieven bestaan. Ook het ondergrondse station zou dan door een ondiepere ligging van het tunneltracé aanmerkelijk goedkoper worden.

Indien daarentegen de **overlast** voor de stad Delft wordt bekeken, dan is een variant met daarin deels een boortunneltraject het meest aantrekkelijk. Grote overlast door het opbreken van grote delen van de stad wordt dan vermeden.

Daarnaast is het Delftse tunnelproject de aangewezen mogelijkheid voor het opdoen van ervaring met het in Nederland nog onbekende boren van tunnels in slappe grond. Door de (nu nog) redelijke onervarenheid van de nederlandse tunnelbouwers ten aanzien van deze problematiek, zijn de risico's tijdens de uitvoering nog relatief hoog. Het door NS-BTC gekozen tunneltracé voert nauwelijks onder bebouwing door. Het uitvoeringsrisico zou dan bij dit project enigszins worden beperkt.

Het beperken van de overlast voor de stad Delft en de grote mogelijkheden die hier worden geboden voor het kunnen uitvoeren van een proefboorproject door de nederlandse aannemerswereld, zouden zwaar moeten wegen in de beslissing om hier al of niet een boortunnel toe te passen. Het is bovendien belangrijk dat de nederlandse overheid tijdig het belang inziet van het investeren in nieuwe technologieën. Op dit moment staat dit in vergelijking tot andere landen op een laag pitje. Vergeleken met bijvoorbeeld Japan, waar bijna 3% van het bruto nationaal product wordt besteed aan technologie-ontwikkeling op bouwgebied, staat Nederland nog maar in de kinderschoenen.

Naast een ondergrondse spoorverdubbeling is door de projectgroep OVI een bovengrondse spoorverdubbeling onderzocht. Naast het huidige viaduct door de stad zou een tweede viaduct moeten worden gerealiseerd. Deze projectgroep concludeerde dat de veroorzaakte geluids-overlast nauwelijks zou toenemen, en dat in dat opzicht een ondergrondse spoorverdubbeling niet noodzakelijk zou zijn.

Toch blijft een bovengrondse spoorverdubbeling geen geweldig alternatief. Buiten het feit dat deze oplossing (oplossing?) zeer onesthetisch is, is een vermeerdering van de door treinen





veroorzaakte overlast, als gevolg van het opvoeren van de treinfrequentie, onvermijdelijk. Wellicht is een bovengrondse variant goedkoper in aanleg dan een ondergrondse variant. Toch zou men een ondergrondse variant vanwege bovenstaande argumenten boven een bovengrondse variant moeten laten prevaleren. Waarschijnlijk de beste oplossing zou zijn om ook de bestaande sporen ondergronds te brengen. Op die manier zou de stad Delft van alle door treinen veroorzaakte overlast verlost worden.



# Literatuurlijst.

**Aerts, ir.L.,** *De ondergrondse bouwwijze van pre-metrotunnels met de schildmethode.*  
Ingenieursblad, nr.3 mar 1982, ISSN 00201235.

**Algemene Richtlijnen Tunnel Ontwerp.**  
Utrecht, Bouwdienst Rijkswaterstaat, 1990.

**Arches give open look to Washington metro stations.**  
Tunnels & Tunneling, nr.6 1979, ISSN 0041414x.

**Attewell, P.B.,** *Tunneling in compressible soils: Large ground movements and structural implications.*  
Tunneling & Underground Space Technology, nr.4 1989, ISSN 08867798.

**Bavel, J.M.van,** *Metrostation in de Koningshaven.*  
Delft, CT, Afstudeerverslag april 1990.

**Benecke, Dipl.-Ing.P.,** *U-Bahnen und S-Bahnen in der Bundesrepublik Deutschland.*

**Bestuurders enthousiast maken voor ondergronds bouwen.**  
Land + Water nu, nr.5 1991.

**Bickel, J.O.,** *Tunnel engineering handbook.*  
New York, Van Nostrand Reinhold Company, 1982.

**Bodin, J.B.,** *Gasbedrijven zien nu ook brood in boren.*  
Land + Water nu, nr.6 1992.

**Bolier, D.,** *Sleuf voor spoortunnel is specifiek baggerwerk.*  
Land + Water nu, maart 1990.

**Boormethode meest geschikt voor Utrechtse sneltram.**  
Land + Water nu, november 1990.

**Brassinga, H.E. en A.F.van Tol,** *Deformation of a highrise building adjacent to a strutted diaphragm wall.*  
Proceedings of the 10th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering.  
Florence, Italy, 26-30 may 1991, ISBN 905410001x.

**Brink, ing.F.,** *Tunnels bouwen met horizontaal gestuurde schildboor.*  
Land + Water nu, nr.1/2 1989.



**BTC/NS-IB Haalbaarheidsstudie Delft.**

Eindrapport Boortunnelcombinatie NS-BTC, 1991.

**Channel Tunnel, The, part 1.**

Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1992.

**Copperthwaite, W.Ch., *Tunnel shields and the use of compressed air in subaqueous works.***

London, 1906.

**CUR-publicatie 162, Construeren met grond.**

Gouda, CUR, 1992, ISBN 9037600247.

**Delgado, C., *Underground river forces freezing at Valencia.***

Tunnels & Tunneling, nr.7 1989, ISSN 0041414x.

**Dubbeldam, ir.J.W., *Verdubbeling spoorinfrastructuur Schiphol.***

Cement, nr.7/8 1990, ISSN 0088811.

**Dusch, Dr.-ing.K., *Planung, Entwurf und Ausführung des Fahrlachtunnels Mannheim.***

STUVA Tagung, U-Verkehr und unterirdisches bauen, Tunnel und Umwelt Herausforderung für Technik und Volkswirtschaft, nr.33 Forschung + Praxis.

**Edwards, J.T., *Civil engineering for underground rail transport.***

London, Butterworth, 1990.

**Fechtig, Prof.R., *Erkenntnisse aus ersten Anwendungen de Jetting-Verfahrens im Tunnelbau.***

STUVA Tagung, U-Verkehr und unterirdisches bauen, Tunnel: Chancen und Grenzen moderner Technik, nr.32 Forschung + Praxis.

**Feijen, ir.Th.A. en ir.G. Hannink, *Underground station Wilhelminapier, Rotterdam.***

Proceedings International Congress 'Options for tunneling 1993', Amsterdam, 19-22 april 1993  
Amsterdam, Elsevier, 1993.

**Fukuoka, Yoshiaki, *Railway construction technologies applied to the Tohoku Shinkansen Ueno and Omiya stations.***

Japanese Railway Engineering, nr.95 jun 1985, ISSN 04488938.

**Garbe, Bauing.SIA L., *Zürcher S-Bahn - Einflüsse der Umwelt auf die Gestaltung des Projectes und die organisation der Ausführungsarbeiten.***

STUVA Tagung, U-Verkehr und unterirdisches bauen, Tunnel und Umwelt Herausforderung für Technik und Volkswirtschaft, nr.33 Forschung + Praxis.



Glerum, Prof.ir.A., *Waterbouwkundige kunstwerken: tunnels.*

TU Delft, CT, Collegedictaat f9c, 1992.

Glerum, Prof.ir.A., *Waterbouwkundige kunstwerken.*

TU Delft, CT, Collegedictaat f9, 1991.

Gorter, ir.J., *Techniek vertelt exact waar de boorkop opduikt.*

Land + Water nu, nr.1/2 1992.

Grentzius, ir.E., *Numerieke methoden bieden nieuwe mogelijkheden.*

Land + Water nu, nr.7/8 1991.

Greschik, G., *Injected soil stabilization in constructing the Budapest underground.*

Proceedings of the 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering:  
Improvement of Ground. Volume 1, 23-26 may 1983, ISBN 9061912415.

Groot, ir.E.H.M., *Spoortunnel onder Nieuwe Maas aangelegd met afzinkelementen.*

Land + Water nu, nr.1/2 1989.

Groundfreezing '91.

Proceedings of the sixth international symposium on ground freezing, Beijing 10-12 sept 1991, vol.1.  
Rotterdam, Balkema, 1991.

Haack, Dr.-ing.A., *Brandschutz in Verkehrstunneln - Erste Erkenntnisse aus Großversuchen.*

STUVA Tagung, U-Verkehr und unterirdisches bauen, Tunnelbau - Neue Chancen aus europäischen  
Impulsen, nr.34 Forschung + Praxis.

Haak, Prof.ir.a.j.h., *De menselijke maat.*

Delft, Waltman, 1989.

Hagen, ing.H.J., *WillemsSpoortunnel. Bouwputten rechter Maasoever.*

Cement, nr.4 1990, ISSN 0088811.

Hakkesteegt, Prof.ir.P., *Verkeerskunde & Infrastructuur.*

TU Delft, BK, Collegedictaat BK 104-88.

Hakkesteegt, Prof.ir.P., *Naslagwerk Verkeers- / Vervoerskunde.*

TU Delft, BK, Collegedictaat BK 104,105,206.

Hammer, ir.G.M.F.J., *Rail 21, een plan van vele miljarden.*

Cement, nr.2 1992, ISSN 0088811.





**Harding, Piers G.**, *Rome metro: Driving a new line under an ancient city.*

Tunnels & Tunneling, nr.6 1979, ISSN 0041414x.

**Hemerykx, E.**, *Tubular thrust jacking for underground roof construction on the antwerp metro, part 2.*

Tunnels & Tunneling, nr.6 1983, ISSN 0041414x.

**Hemerykx, ir.E.**, *De ondergrondse bouw van de premetrokunstwerken met de buizenmethode.*

Ingenieursblad, nr.3 mar 1982, ISSN 00201235.

**Hertsenberg, ing.A.F.**, *Slow traffic tunnel Heinenoord, comparing 5 tunneling methods.*

Proceedings International Congress 'Options for tunneling 1993', Amsterdam, 19-22 april 1993  
Amsterdam, Elsevier, 1993.

**Immersed tunnels 1.**

Proceedings of the Delta Tunneling Symposium Amsterdam, 16-17 nov 1978.

**Immersed tunnels 2.**

Proceedings of the Delta Tunneling Symposium Amsterdam, 12-13 nov 1987.

**Inose, J.**, *Development of three centered slurry type shield method at station by effectively using the running shield for double-track subway.*

Proceedings International Congress 'Options for tunneling 1993', Amsterdam, 19-22 april 1993  
Amsterdam, Elsevier, 1993.

**Irshad, M.**, *Mined and Cut-and-Cover Stations for a Modern-Generation Subway System.*

Proceedings International Congress 'Options for tunneling 1993', Amsterdam, 19-22 april 1993  
Amsterdam, Elsevier, 1993.

**Joas, Dipl.-ing.H.**, *Entwicklungstendenzen für die bergmännische Auffahrung von U-Bahnhöfen.*

STUVA Tagung, U-Verkehr und unterirdisches bauen, Moderne U-Verkehrs- und Tunnelbautechnik,  
nr.19 Forschung + Praxis.

**Kasteren, J.van**, *Tunnelen in slappe grond is goed te doen.*

De Ingenieur, nr.4 april 1991, ISSN 00201146.

**Koolhoven, M.**, *Wie durft er nog door de tunnel?*

De Telegraaf, 30-5-1992.



- Krimmer, Dr.ing.H.**, *Gestaltung unterirdischen Stationen - Gedanken und Beispiele aus dem Frankfurter U-Bahnbau.*  
STUVA Tagung, U-Verkehr und unterirdisches bauen, Tunnel und Umwelt Herausforderung für Technik und Volkswirtschaft, nr.33 Forschung + Praxis.
- Langner, Dipl.-ing.U.**, *Unterirdische S-Bahn-Stationen in Frankfurt am Main.*  
STUVA Tagung, U-Verkehr und unterirdisches bauen, Tunnel und Umwelt Herausforderung für Technik und Volkswirtschaft, nr.33 Forschung + Praxis.
- Leeuwenburgh, ir.W.**, *Ondergronds bouwen, fin. haalbaar? Financieel haalbaar!*  
Cement, nr.3 1992, ISSN 0088811.
- Lessmann, H.**, *Moderner tunnelbau bei der Müncher U-bahn.*  
Wien, Springer, 1978.
- Lohuizen, H.P.S.van**, *A new pre-metro line for Amsterdam?*  
Tunneling & Underground Space Technology, nr.3 1989, ISSN 08867798.
- Lunardi, P.**, *Cellular Arch Method. Technical solution for the construction of the Milan railway's Venezia station.*  
Tunneling & Underground Space Technology, nr.4 1990, ISSN 08867798.
- Macaulay, D.**, *Ondergronds.*  
Amsterdam, Ploegsma, 1990.
- Maeda, Masayasu**, *Construction of a Large-Face NATM for a station under a city street.*  
Japanese Railway Engineering, nr.111 sep 1989, ISSN 04488938.
- Martinek, Dipl.Ing.K.**, *Soft ground tunneling problems solved in German metros.*  
Tunnels & Tunneling, nov 1979, ISSN 0041414x.
- Megaw, T.M.**, *Tunnels: planning, design, construction. Volume 1*  
Chichester, Horwood, 1981.
- Megaw, T.M.**, *Tunnels: planning, design, construction. Volume 2*  
Chichester, Horwood, 1982.
- Musso, G.**, *Jacked pipe provides roof for underground construction in busy urban area.*  
Civil Engineering-ASCE, nr.11 nov 1979, ISSN 00097853.



- Nelissen, M.G.P., *Willemsspoortunnel Rotterdam in vogelvlucht*.  
Cement, nr.2 1989, ISSN 0088811.
- Nelissen, M.G.P., *Twee tunnels en een brug. Störebaelt*.  
Cement, nr.1 1992, ISSN 0088811.
- Niemann, H.J., *Tiefenlage und bauweise des tunnels*.  
Düsseldorf, Werner, 1961.
- Oude Luttkhuis, ir.E.H.J., *Straten vaak opbreken kost burgerij onnodig veel geld*.  
Land + Water nu, nr.10 1989.
- Premetro te Antwerpen, De.  
Orgaan van de Maatschappij voor het intercommunaal vervoer te Antwerpen., nr.7, Ondergrondse  
bouwwijzen., maart 1979.
- Pulles, drs.ing.F.P.J.M., *Bestemming vervuilde grond voor ontgraven vastgelegd*.  
Land + Water nu, maart 1990.
- Quellmelz, F., *Die neue Österreichische Tunnelbauweise*.  
Wiesbaden, Bauverlag, 1987.
- Rapporteurscommissie, *Ondergronds bouwen in Japan; technologie investeren in de toekomst*.  
Ministerie van economische zaken, feb/maart 1991.
- Richtlijnen en aanbevelingen voor openbare verlichting.  
Noord-Nederlandse drukkerij, 1974.
- Roggen, M., *Geboorde tunnel favoriet als oeververbinding Westerschelde*.  
Polytechnisch Weekblad, nr.33/34 1992
- Roggen, M., *Een metrostation met stijl. Station Kop van Zuid*.  
Polytechnisch Weekblad, nr.13 1992.
- Roggen, M., *Amsterdamse railtunnel krijgt gestalte door boren en vriezen*.  
Polytechnisch Weekblad, nr.35 1992
- Roisin, Prof.Dr.Ing.V., *Innovation at the cross-roads of Europe*.  
Tunnels & Tunneling, nr.5 1989, ISSN 0041414x.



Rozsa, L., *Station construction on Budapest's underground railway.*

Tunnels & Tunneling, nov-dec 1970, ISSN 0041414x.

Scheelhaase, Ltd.Baudir.Prof.Dipl.-Ing.K., *Der einfluß des geänderten Umweltbewußtseins auf den städtischen Bahntunnelbau der 80er Jahre.*

STUVA Tagung, U-Verkehr und unterirdisches bauen, Tunnel und Umwelt Herausforderung für Technik und Volkswirtschaft, nr.33 Forschung + Praxis.

Schneider, Dr.-ing.F.X., *Der U-Bahnhof an der Poccistraße in München - ein Untertagebauwerk.*

STUVA Tagung, U-Verkehr und unterirdisches bauen, Moderne U-Verkehrs- und Tunnelbautechnik, nr.19 Forschung + Praxis.

Schrijver, P.de, *Results of geotechnical instrumentation monitoring the Pre-metro tunneling works under the river Scheldt at Antwerp, Belgium.*

Proceedings of the 10th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Florence, Italy, 26-30 may 1991, ISBN 905410001x.

Smeele, ir.Th.F., *De metro/sneltram Coolhaven-Ommoord-West.*

Cement, nr.10 1977, ISSN 0088811.

Smolczyk, U., *Grundbau Taschenbuch, Teil 1.*

Wilhelm Ernst&Sohn, Berlin, 1980

**Speciale uitvoeringstechnieken metrobouw Berlijn.**

Cement, nr.3 1978, ISSN 0088811.

Stiksma, K., *Tunnels in the Netherlands.*

Rotterdam, Illustra, 1993.

Stiksma, K., *Tunnels in Nederland.*

Rotterdam, Illustra, 1987.

Taguchi, Hirokazu, *Planning and field works for an underground station construction using a special structural pattern combining the shield and driving methods.*

Japanese Railway Engineering, nr.114 jun 1990, ISSN 04488938.

**Taschenbuch für den tunnelbau, 1988.**

Tol, ir.A.F.van, *Funderingstechnieken kenmerken Spoortunnel Rotterdam.*

Land + Water nu, nr.12 1988.





U5/9 ost, Die.

Nürnberg, Deutschland, 1988.

Vahle, ing.F., *Spoortunnel Rotterdam II.*

Cement, nr.2 1992, ISSN 0088811.

Vahle, ing.F., *Spoortunnel Rotterdam I. Linker Maasoever.*

Cement, nr.1 1992, ISSN 0088811.

Veerling, ir.C., *Het architectonisch ontwerp.*

Cement, nr.10 1977, ISSN 0088811.

Ventilatie Railtunnels; slotbeschouwing studiegroep 4.

Den Haag, Koninklijk Instituut van Ingenieurs, 1973.

Verkeers- en vervoersvoorzieningen in en rond het station.

Den Haag, ANWB, 1979.

Vermeer, P.A. en P.G. Bonnier, *Pile settlements due to tunneling.*

Proceedings of the 10th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering.

Florence, Italy, 26-30 may 1991, ISBN 905410001x.

Vermeer, B., *Liever de grond in.*

Ingenieurskrant, nr.14/15 1992, ISSN 09231919.

Verruijt, Prof.dr.ir.A., *Grondmechanica.*

Delft, DUM, 1987.

Voordt, D.J.M. van der, *Sociaal veilig ontwerpen.*

Delft, Publicatieburo bouwkunde, 1990.

Vos, Prof.ir.Ch.J., *Uitvoeringstechnologie van betonconstructies.*

TU Delft, CT, Collegedictaat g23B, 1988.

Walraven, Prof.dr.ir.J.C., *Gewapend beton.*

TU Delft, CT, Collegedictaat g20A, 1991.

Walraven, Prof.dr.ir.J.C., *Voorgespannen beton.*

TU Delft, CT, Collegedictaat g23A, 1992.



**Weele, Prof.ir.A.F.van, *Funderingstechnieken.***

TU Delft, CT, Collegedictaat g80, 1988.

**Weele, Prof.ir.A.F.van, *Fundering en constructie.***

TU Delft, CT, Collegedictaat g81, 1991.

**Weele, Prof.ir.A.F.van, *Moderne funderingstechnieken.***

Delft, Waltman, 1983.

**Weixing, Feng, *The option of construction method for shallow buried metro station.***

Proceedings International Congress 'Options for tunneling 1993', Amsterdam, 19-22 april 1993  
Amsterdam, Elsevier, 1993.

**Whittaker, Barry N., *Tunneling: design, stability and construction.***

London, Institute of Mining and Metallurgy, 1990.

**Wiemans, ir.H., *Railbouwtechniek deel B.***

TU Delft, CT, Collegedictaat e61, 1991.

**Wittemans, ir.A. en ir.L. Aerts, *Ondergronds bouwen van tunnels en stations te Antwerpen.***

Cement, nr.10 1979, ISSN 0088811.

**Wittemans, ir.A., *De premetro te Antwerpen.***

Ingenieursblad, nr.3 mar 1982, ISSN 00201235.

**Wittemans, ir.A., *Ondergronds bouwen van tunnels en stations te Antwerpen.***

Cement, nr.10 1979, ISSN 0088811.

**Zand, ir.J.van't, *Railbouwtechniek deel A.***

TU Delft, CT, Collegedictaat e61, 1991.

**Zwol, van, *Ruimtelijkheid in het ontwerp.***

TU Delft, BK, Collegedictaat BK 245.



---

**Ontwerp en Uitvoering**

**Ondergronds Station**

**Delft**

*M. Smitt*

**Bijlagen**

## **Bijlage A. Samenvatting en conclusies NS-BTC studie.**

## SAMENVATTING EN CONCLUSIES

In opdracht van de NV Nederlandse Spoorwegen is door de Sector Civiele Werken van het Ingenieursbureau van de NS, NS-IB, in samenwerking met de Boortunnelcombinatie BTC een haalbaarheidsonderzoek uitgevoerd naar de toepassingsmogelijkheden van een geboorde tunnel ten behoeve van railtransport in West-Nederland. Hierbij heeft de Sector Civiele Werken kennis en ervaring ingebracht op het gebied van tracébeplanning, ruimtelijke ordening, doorsneden van de tunnels en de inpassing van stations; terwijl de Boortunnelcombinatie BTC dat deed op het gebied van het boren volgens de Hydroschildmethode en bijkomende bouwtechnieken.

Het tot nu toe verrichte onderzoek betreft de technische haalbaarheid van de aanleg van een spoortunnel in de gemeente Delft door middel van de zogenaamde schildboormethode, ten einde de twee huidige bovengrondse sporen met twee ondergrondse sporen uit te kunnen breiden. Voor het beoordelen van de technische haalbaarheid dienen twee essentiële vragen te worden beantwoord, te weten:

- ▶ Is de schildboormethode technisch uitvoerbaar, gezien de eigenschappen van de ondergrond langs het voorgenomen tracé.
- ▶ Zijn de zettingen die door de aanleg van de tunnel veroorzaakt worden acceptabel.

### *De Delftse ondergrond*

De ondergrond langs het voorgenomen tracé in Delft bestaat uit een Holocene bovenlaag, die in dikte ongeveer varieert van 17 tot 20 meter, en opgebouwd is uit fluviale en maritieme zand- en kleilagen waarin ook veenlagen voorkomen. Hieronder bevindt zich het Pleistocene zand. Voor de Holocene lagen geeft de waarde van de ongedraineerde schuifsterkte een globale indicatie van de eigenschappen van de grond. De klei- en veenlagen van het Holoceen zijn globaal onder te verdelen in stijvere lagen met een ongedraineerde schuifsterkte van 30 tot 60 kN/m<sup>2</sup> en slappere lagen met een ongedraineerde schuifsterkte van 15 tot 30 kN/m<sup>2</sup>. In het algemeen komen de stijvere lagen voor in de onderste helft van de Holocene laag terwijl de slappere lagen overwegend in de bovenste helft van de Holocene laag voorkomen. Het zand in het Holoceen heeft een sondeerwaarde van ongeveer 10 MN/m<sup>2</sup>. Het Pleistoceen bestaat over het bereik van de tunnel uit homogeen compact zand met sondeerwaarden in orde van grootte van 20 MN/m<sup>2</sup>.

***Technische uitvoerbaarheid van de schildboormethode.***

Ten aanzien van de technische uitvoerbaarheid is in de vakliteratuur gezocht naar publicaties over geboorde tunnels, die zijn aangelegd in een ondergrond die vergelijkbaar is met de Delftse omstandigheden. De praktijk is in deze immers de beste referentie. Aan de hand hiervan is een overzicht van uitgevoerde tunnels samengesteld van projecten die op grond van een lage schuifsterkte vergelijkbaar zijn met de Delftse omstandigheden of die blijkens de geologische beschrijving als vergelijkbaar aangemerkt kunnen worden.

Als aansprekende voorbeelden uit dit overzicht worden genoemd:

De vuilwater tunnel "Semiprofundo Iztapalapa" in Mexico City waarbij schuifsterkten van 23 tot 40 kN/m<sup>2</sup> vermeld worden

De Osaka Munic Transport Tunnel in Japan met schuifsterkten van 20 tot 40 kN/m<sup>2</sup> voor zover het de aanleg in slappere grondlagen betreft.

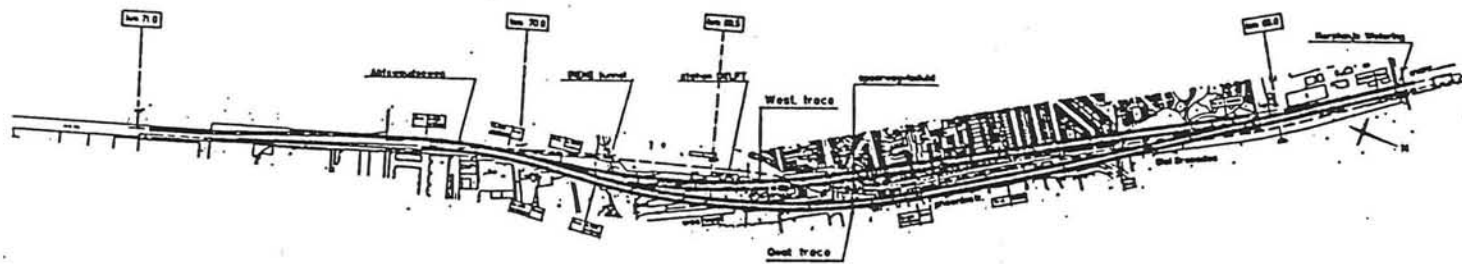
De Sludge Treatment Pipe in Tokyo waarbij uit de geologische beschrijving en de vermelde SPT-waarden valt af te leiden dat het de aanleg betreft in matig tot losgepakte zandgronden.

Gedetailleerde gegevens over de opbouw van de ondergrond worden in het literatuuronderzoek niet gegeven. De globale aanduiding door middel van de ongedraineerde schuifsterkte voor cohesieve gronden en de SPT-waarden voor niet samenhangende grond geeft echter voldoende houvast. Geconcludeerd kan worden dat de schildboormethode toepasbaar is in grondsoorten die qua sterkte-eigenschappen vergelijkbaar zijn met de ondergrond in Delft.

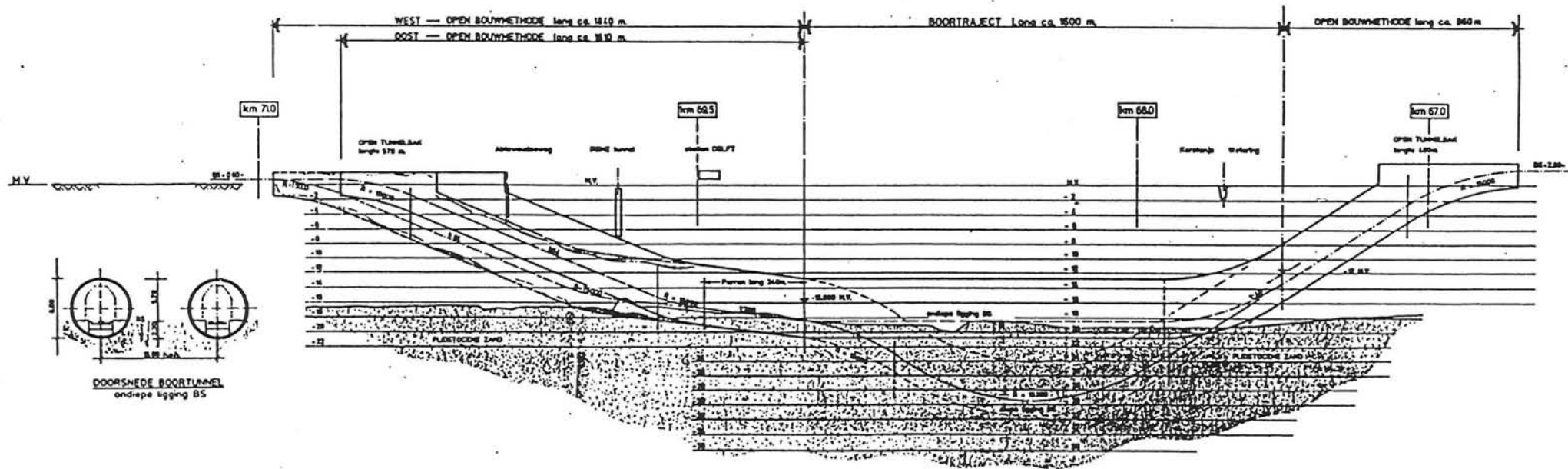
Vanuit het bovengeschetste globale beeld wordt nader ingegaan op de specifieke omstandigheden zoals die zich op het voorgenomen tracé voordoen. Ter oriëntatie volgt eerst een schets van de situatie.

Zoals op de bijgevoegde tekening is te zien heeft het tunnelgedeelte inclusief op- en afritten een totale lengte van ongeveer 4000 meter. Er wordt vanuitgegaan, dat het station vanaf het maaiveld zal worden gebouwd en de passage van de ten zuiden van het station gelegen Irenetunnel op dezelfde wijze tot stand zal komen. Voor het boren van tunnels blijft dan nog een lengte over van ongeveer 1600 meter. Bij het toepassen van twee enkelsporige tunnels blijft dus een totale boorlengte van  $2 \times 1600 = 3200$  meter beschikbaar. Voor de hoogteligging is van twee varianten uitgegaan.





**OVERZICHT HORIZONTAAL TRACE**  
lengteschaal 1:5000



**OVERZICHT VERTICAAL ALIGNMENT**  
lengteschaal 1:5000  
hoogteschaal 1:200

Fig. 95: Horizontaal trace ten noorden van station Duff  
(Oost- en Westkant) schaal 1: 5000  
Fig. 96: Horizontaal trace ten zuiden van station Duff  
(Oost- en Westkant) schaal 1: 5000  
Fig. 97: Horizontaal en verticaal alignment schaal 1: 5000

**BTC/NS-IB** Hoofdwerkstuk Duff

Centraal: N.V. Internationale Spoorwegen  
Staat Railwet 1912 en Wet 1917  
Nederlandse Staat- en Waterbouw  
Bijzondere Wet 1912  
Seyss & Freytag

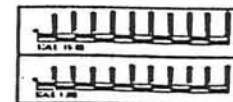
Spoorw. Horizontaal en verticaal alignment schaal 1: 5000

Datum: 08 september 1931

Blz. 22

Tekn.: WTR / PMS / SF

Drs. PMS



Bij de diepe variant passeert de tunnel in de stijgende en dalende tak de overgang tussen het Holoceen en het Pleistoceen over een lengte van tweemaal 400 meter en bevindt zich in het tussenliggende traject over een lengte van ongeveer 1000 meter in het goede Pleistocene zand.

Bij de ondiepe variant ligt deze tunnel over de gehele lengte in het minder draagkrachtige Holoceen met variërende grondslag met dienverstande dat de onderkant van de tunnel daarbij tot in het Pleistoceen reikt.

***Boren in het Pleistocene zand.***

De aanleg van de tunnel in het Pleistocene zand kan vergeleken worden met de aanleg van grote delen van de reeds geboorde tunnels in Lille en Antwerpen. Bij beide projecten bestaat de ondergrond uit zand dat in min of meerdere mate klei- of slibhoudend is. Zoals in het geotechnische rapport is aangegeven is dit ook voor het bovenste deel van het Pleistocene zand het geval. Van de ondergrond van Lille is een sondering beschikbaar die met Delft vergelijkbare conuswaarden aangeeft. Op het niveau van de tunnel ligt de conusweerstand in Lille rond de 15 MN/m<sup>2</sup> en in Delft rond de 20 MN/m<sup>2</sup>.

***Boren in een bodem met variërende grondslag.***

In bijlagen is door de specialisten van W&F in kwalitatieve zin aangegeven wat de samenhang is van de eigenschappen van de ondergrond en de diverse aspecten van het boorproces en de geschiktheid van de Delftse ondergrond in dit opzicht. Tabel 1 geeft hiervan een overzicht:

tabel 1

| GRONDEIGENSCHAP  |   | INVLOED   |
|--|---|---|
| <b>Fysische eigenschappen + Minerale samenstelling</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- korrelverdeling</li> <li>- plasticiteit</li> <li>- watergehalte</li> <li>- volume-gewichten</li> <li>- klei-mineralen</li> <li>- korrel-mineralen</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>-ondersteuning boorfront</li> <li>-geschiktheid m.b.t. ontgraving: (gereedschap; steenbrekers; taalheid; slijtage)</li> <li>-geschiktheid m.b.t. scheiding</li> <li>-grondtransport</li> </ul> |
| <b>Mechanische eigenschappen</b>                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>- schuifsterkte</li> <li>PHI<sub>v</sub>                      PHI'</li> <li>c<sub>v</sub>                              c'</li> </ul>                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>-stabiliteit boorfront</li> <li>-geschiktheid m.b.t. ontgraving</li> </ul>   |
| <b>Vervormingseigenschappen</b>                        | Elasticiteitsmodulus<br>E <sub>s</sub>  | -zettingen  |

Zoals in de tabel is aangegeven betreft een beoordeling aan de hand van de korrelverdeling voornamelijk de uitvoeringstechnische aspecten van het boren. De sterkte-eigenschappen van de grond zijn vooral van belang met betrekking tot de stabiliteit van het boorfront.

Op grond van de beschikbare geologische gegevens is, een korrelverdelingsdiagram samengesteld waarin de in Delft te verwachten zand en kleilagen zijn aangegeven. Deze zijn vergelijkbaar met de korrelverdelingen van de grondsoorten bij de tunnelprojecten in Antwerpen en Lille. Zowel de korrelverdelingen van het zand als van de klei komen hiermee overeen. De sonderingen geven echter aan dat de klei in Delft slapper is.

In een grondslag waar in zowel cohesieve gronden als zandgronden voorkomen is de uitvoering mogelijk door middel van een gronddruk schild, een vloeistofschild of een combinatie van beide.

Uit de verzamelde gegevens van ruim 300 projecten blijkt dat hiermee 35 % is uitgevoerd in klei- en silt houdende zandgronden en in 14 % van de gevallen de ondergrond uit klei of een combinatie van klei en silt bestaat. Op grond hiervan en gelet op de reeds uitgevoerde tunnelprojecten in slappere ondergronden, zoals deze in het literatuuroverzicht zijn vermeld, wordt geconcludeerd dat het boren in een bodem met variërende grondslag zoals die in Delft voorkomt haalbaar is.

Ter verdere ondersteuning van de technische uitvoerbaarheid wordt in het rapport en de bijlagen ingegaan op de elementen die een rol spelen bij de keuze en het ontwerp van een tunnelboormachine gezien in het licht van de Delftse ondergrond.

Bij een tunnelboormachine zijn de volgende deelfuncties te onderscheiden:

- 1 Het steunen van het boorfront
- 2 Los maken van de grond
- 3 Transport van de grond
- 4 Scheiden van de vaste stoffen uit de steunvloeistof en
- 5 Opbouw van de tunnelwand.

Voor ieder van deze deelfuncties dient voor de Delftse omstandigheden een keuze gemaakt te worden uit beschikbare mogelijkheden. De te passeren grondsoorten sluiten de aanleg zonder directe ondersteuning van het boorfront en tunnelgang uit. Een methode zoals de Nieuwe Oostenrijkse Tunnelbouwmethode komt daarom niet in aanmerking. Evenzo blijven methoden buiten beschouwing die niet meer in overeenstemming zijn met de huidige stand van de techniek, zoals het onder luchtdruk afgraven met de hand. In bijlage Q worden de verschillende systemen uitvoerig behandeld zoals een luchtdrukschild, een vloeistofschild of een grondbalansschild al of niet in combinatie met een geheel of gedeeltelijk afsluitbaar boorfront.

Voor het onderhavige project leidt de vergelijking van verschillende mogelijkheden tot de volgende aanbeveling:

**ad 1** *Het steunen van het boorfront.*

Van de verschillende alternatieven die worden besproken zal het werken met een schild met vloeistofsteun tot de beste resultaten leiden. Voor cohesieloze grondsoorten wordt de steunvloeistof zodanig samengesteld dat zich een ondoorlatende film op het grondoppervlak vormt die een overdruk van de steunvloeistof ten opzichte van de grondwaterdruk mogelijk maakt. Klassieke toevoegingen aan de steunvloeistof zijn fijnkorrelige materialen en bentoniet. De samenstelling van de steunvloeistof wordt tijdens het boren voortdurend aangepast aan de aangetroffen grondsoort. Via de steunvloeistof is het mogelijk om de druk voortdurend te meten en te regelen. Een vloeistofschild biedt daardoor van alle alternatieven de beste mogelijkheid om in te spelen op de wisselende samenstelling van de grond zoals die zich in Delft voordoet. Het vloeistofschild biedt tevens voordelen ten aanzien van de veenlagen die zich in het Holoceen voordoen. Vermeden wordt door lucht dat het water uit de veenlagen wordt weggeperst waardoor latere inklinking van de veenlagen wordt voorkomen. Het W&F-vloeistofschild is bovendien uitgerust met een luchtbuffer waarmee te sterke fluctuaties in de steundruk worden vermeden.

**ad 2            *Afgraven van de grond.***

De grondsoorten in het voorgenomen tracé kunnen worden afgegraven met bijv. stiftbeitels die op spaken gemonteerd zijn. In de openingen tussen de spaken treedt het bentoniet mengsel toe. Tussen de spaken kunnen schotten worden aangebracht om het boorfront extra te steunen, wanneer toegang tot de werkkamer wordt vereist voor onderhoud, inspectie of het verwijderen van obstakels. Tijdens dergelijke werkzaamheden wordt de werkkamer onder verhoogde luchtdruk gebracht ter vervanging van de vloeistofsteundruk. Het vervangen van de beitels geschiedt bij voorkeur in de hoogste stand van de beitels zodat de steunvloeistof slechts gedeeltelijk weggedrukt hoeft te worden. De beitels kunnen vanaf de achterzijde van de spaken worden vervangen.

**ad 3            *Transport van de specie.***

Inherent aan het vloeistofschild is het hydraulisch transport van de specie waarbij de steunvloeistof tevens als transportmedium dient. Grondsoorten van uiteenlopende samenstelling kunnen op die manier probleemloos getransporteerd worden.

**ad 4            *Scheiding van de vaste delen uit de steun/transportvloeistof.***

In het geval van hydraulisch transport moet de grondspecie van de steunvloeistof worden gescheiden, om de steunvloeistof opnieuw te kunnen gebruiken. Aangezien in de bebouwde omgeving het werken met bezinkbassins vanwege het ruimte beslag en de lange doorlooptijd niet praktisch is, zullen mechanische scheidings- en sorteerinstallaties moeten worden ingezet. Gezien de grote hoeveelheid fijne delen in met name het Holocene pakket, is de inzet nodig van filterpersen, centrifuges en zgn. hydrocyclonen. In verband met de kosten die aan het scheiden van grond en steunvloeistof verbonden zijn, zal een economische afweging gemaakt moeten worden tussen de kosten van een ver doorgevoerde scheiding en van eventuele opslag van grond die nog resten van bentoniet bevat.

**ad 5            *De tunnelwand***

Aangezien achter de werkkamer in de tunnelbuis atmosferische druk heerst dient de tunnelwand-constructie meteen na het plaatsen waterdicht te zijn. De tunnelbekleding bestaat uit prefab tunnelringsegmenten van gietstaal, staal of gewapend beton. De afdichting geschiedt daarbij met de neoprene profielen, die hun effectiviteit reeds bij vele tunnelprojecten bewezen hebben.

Het bovenstaande kan als antwoord op de vraag of, voor de grondgesteldheid in Delft de schildboormethode technisch uitvoerbaar is als volgt worden samengevat:

Het boren in grond van verschillende samenstelling, variërend van klei tot zandgrond, behoort tot de normale praktijk. Van de huidige boorsystemen is een vloestofschild het meest geschikt voor een dergelijke ondergrond.

De aanleg in het Pleistoceen komt qua grondopbouw goed overeen met de uitgevoerde projecten in Antwerpen en Lille. Beide projecten zijn voorbeelden die de technische haalbaarheid bevestigen.

Voor wat betreft de aanleg in het Holoceen in Delft geldt dat de uitgevoerde tunnelprojecten in cohesieve grond in het algemeen in sterkere grond zijn aangelegd. Uit de literatuurstudie blijkt desalniettemin dat verschillende tunnels zijn geboord in cohesieve gronden van vergelijkbare sterkte. Overigens komen in het Holoceen ook zeer slappe klei/veen lagen voor met, ter indicatie een ongedraineerde schuifsterkte van 15-30 Kn/m<sup>2</sup>. Praktijkvoorbeelden van tunnelaanleg in deze zeer slappe lagen zijn schaars. Afhankelijk van de omvang van dergelijke lagen kan het nodig zijn extra maatregelen te treffen zoals het aanbrengen van zandpalen of het bevriezen van de ondergrond. Om dit te kunnen beoordelen dienen de werkelijke eigenschappen van de betreffende lagen door gedetailleerd onderzoek te worden vastgesteld.

#### ***Technische haalbaarheid met het oog op zettingen.***

Naast de uitvoerings-aspecten, zoals hierboven besproken, wordt de technische haalbaarheid ook bepaald door de effecten die de tunnelaanleg heeft op de bebouwde omgeving. Door de aanleg van de tunnel treden horizontale en verticale verplaatsingen op die de draagkracht van funderingen kunnen beïnvloeden. Tevens is het effect van grondverplaatsingen op de ondergrondse infrastructuur van belang. De gevolgen voor de bebouwde omgeving hangen enerzijds af van de grootte van de optredende zettingen en anderzijds van de gevoeligheid van de betreffende constructies.

#### ***Optredende zettingen.***

Zettingen bij de aanleg van een tunnel vinden hun oorzaak in verschillende bijdragen die in het algemeen worden uitgedrukt in termen van "volumeverlies". Hiermee wordt het verschil aangeduid tussen het volume dat ondergronds wordt vrijgemaakt en het volume dat de tunnelbuis uiteindelijk inneemt een en ander meestal uitgedrukt in een percentage van de tunneldoorsnede.

De belangrijkste oorzaken zijn:

- ▶ Volumeverlies tengevolge van de ontspanning van de grond aan het boorfront;
- ▶ Volumeverlies aan de staart van de tunnelmachine ten gevolge van imperfecties bij het grouten;
- ▶ Krimp van de groutspecie;

tevens spelen een rol:

- ▶ Verschillen in grond-inname en voortgang van de tunnelmachine;
- ▶ Volumeverlies ten gevolge van stuurcorrecties;
- ▶ Verschil in binnen- en buitenstraal bij bogen in het tracé;
- ▶ Verdichting van de grond rond de tunnelmachine ten gevolge van trillingen;
- ▶ Vervorming van de tunnelwand en volumeverlies als netto verschil van grondspanning en uitzetting ten gevolge van verandering van de grondspanningen.

Enkele van de genoemde factoren zijn niet door de uitvoering te beïnvloeden. Het verlies in bogen is inherent aan het tracé, de boogstralen in het boortracé zijn echter tenminste 2000 meter of groter zodat dit volumeverlies gering is. Verdichting van de grond door trillingen is niet te voorkomen. In het algemeen is de bijdrage hiervan gering. In dit geval komt er veel kiel voor in de ondergrond hetgeen op zich niet te verdichten is waardoor het volumeverlies beperkt blijft. De samendrukking van de grond is inherent aan lokale spanningstoename in de ondergrond. Uit de uitgevoerde eindige elementen berekening volgt echter dat de samendrukking door spanningstoename vrijwel geheel wordt gecompenseerd door uitzetten door spanningsafname op andere plaatsen.

De belangrijkste zakkingsoorzaken zijn door een accurate uitvoering in grote mate te beïnvloeden. Verschillen in grond-inname en voortgang van de tunnelmachine kunnen voorkomen worden door een goede afstemming tussen booromwenteling en voortbeweging van de tunnelboormachine. Stuurcorrecties kunnen worden beperkt door een nauwkeurige en frequente plaatsbepaling. Verliezen bij het grouten kunnen worden beperkt door een fijnmaziger groutpatroon en door ná-grouten van de ruimte die door krimp van het groutmengsel ontstaat.

De grootte van het frontverlies is afhankelijk van de mate waarin de oorspronkelijk aanwezige grondspanningen veranderen. Deze worden het beste in stand gehouden indien geboord wordt met een systeem waarbij het boorfront met een steunvloeistof gericht gesteund wordt en dat uitgerust is met een luchtbuffer om fluctuaties op te vangen. Aan de hand van een gedetailleerde verkenning van de grond vooraf wordt voor ieder deel van het traject de samenstelling van de steunvloeistof en de benodigde steundruk vastgesteld. Vervolgens wordt

tijdens het boren het proces systematisch bewaakt en waar nodig bijgesteld.

De grootte van de zettingen ten gevolge van het boren hangt daarom in sterke mate af van de zorgvuldigheid van de uitvoering en worden niet louter door de grondeigenschappen opgelegd. Maximale zakkingen worden in de bestekken vastgelegd en vormen voor de bouwer de limiet waaraan door een op de grondeigenschappen afgestemd ontwerp van de boormachine en boorproces wordt voldaan. Opgemerkt wordt dat bij de projecten in Antwerpen en Lille de zakkingen minder dan 25 mm bedroegen. Antwerpen deden de zettingen zich voornamelijk voor aan de staart van de tunnelmachine, terwijl de gevolgen van het front- en oversnijdingsverlies verwaarloosbaar bleken te zijn. Aan deze projecten wordt gerefereerd vanwege de overeenkomst die bestaat met de aanleg in Delft, vooral waar het de aanleg in het Pleistoceen betreft. Voor de aanleg in het hoger gelegen Holoceen gaat de vergelijking in mindere mate op omdat de sterkte en stijfheid van de cohesieve grondsoorten in het Holoceen in Delft lager is dan de grond bij genoemde projecten. Met betrekking tot de volumeverliezen kan dit van invloed zijn op het grondverlies ten gevolge van ontspanning van de grond aan het boorfront en op verschillen in de grond-inname ten opzichte van de voortgang van de tunnelboormachine wanneer het boorfront zich voor een deel in de slappe klei en voor een deel in het harde zand bevindt. De boorspecialisten zijn echter van mening dat ook in die situaties het boorproces goed te beheersen zal zijn.

#### ***Berekening van de zettingen.***

Bij het berekenen van de zettingen is uitgegaan van twee tunnels  $\phi$  8 meter met een onderlinge tussenafstand van 8 meter. De te verwachten zettingen zijn in eerste instantie berekend met behulp van empirische methoden. Deze gaan uit van een schatting van het zogenaamde volumeverlies dat in sterke mate afhangt van de uitvoerings-methode. Een traditionele berekeningswijze is de methode Peck die ontwikkeld is de tijd dat de steun van het boorfront door luchtdruk werd gerealiseerd. Een volumeverlies van 1 à 3 % van de doorsnede is hierbij gebruikelijk. De berekening volgens Peck leidt bij een volumeverlies van 2% en een uitwendige diameter van 8 meter tot een zakking van circa 60 mm bij de aanleg van twee tunnelbulzen met de as op 16 meter diepte en van ca 40 mm bij een aanleg van de as op 22 meter diepte.

W&F hanteert als uitgangspunt voor de zettingsberekening een volumeverlies van ca 20 % van de spleet aan de staart aan de tunnelmachine. Dit is gebaseerd op de ervaring met de verbeterde boortechniek zoals die ook in Antwerpen is toegepast. Hierbij blijken het zogenaamde frontverlies en oversnijdingsverlies van ondergeschikt belang te zijn ten opzichte van het staartverlies. Omgerekend naar de tunneldoorsnede is dit ongeveer 1 %. De resulterende zakking aan het maaiveld bij de ondiepe en de diepe ligging is respectievelijk 25



en 20 mm.

In aanvulling op de empirische berekeningen van zijn, door Grondmechanica Delft berekeningen uitgevoerd met een eindige elementen methode. Het doel van deze berekeningen is om informatie over spanningen en verplaatsingen te krijgen op de diepere niveaus aangezien de empirische methode alleen de zakking aan het maaiveld beschouwen. Het computermodel gaat evenals de empirische methoden uit van een volumeverlies rond de tunnel en zijn met dezelfde dieptelggingen als bij de empirische berekening doorgerekend.

Enkele opmerkelijke resultaten van de eindige elementen zijn de volgende:

De elementenmethode geeft bij dezelfde opgelegde volume- verliezen als de bij empirische methode nagenoeg gelijke zakkingen aan het maaiveld .

De inhoud van de zakkingstrog aan het maaiveld is fractioneel groter dan het opgelegde verplaatsingsverlies rond de tunnel. Het netto effect van grondspanning en opvering is kennelijk gering.

Met behulp van de berekende spanningsveranderingen in de ondergrond is van een representatieve sondering op korte afstand naast de tunnel het verschil in conusweerstand voor en na het boren rekentechnisch bepaald . De verschillen blijken marginaal te zijn.

#### ***Gevolgen voor funderingen***

Aan de hand van de resultaten van de eindige elementen berekening is het effect op het paal draagvermogen voor beide dieptelggingen bepaald. De paalpunt bevindt zich daarbij in alle gevallen op 22 meter diepte. Bij de ondiepe ligging blijft de onderzijde van de tunnel 2 meter boven paalpuntniveau en kan de tunnel dicht langs de palen worden geleid zonder dat verlies van het punt draagvermogen optreedt. Wel moet rekening gehouden worden met zijdelingse belasting van de paal door horizontale grondbewegingen en tevens kan negatieve kleeft worden ontwikkeld voor zover deze nog niet is opgetreden. Bij de diepere ligging van de tunnel met de onderzijde op 26 meter diepte zal het punt draagvermogen niet noemenswaard afnemen indien een horizontale afstand van circa 10-maal de equivalente paaldiameter (ca 4 meter) tot de tunnelzijde wordt aangehouden. Bij een afstand van 5-maal de equivalente paaldiameter (ca 2 meter) reduceert het punt draagvermogen tot circa 50%. Voor afstanden tussen 10- en 5-maal de equivalente paaldiameter kan rechtlijnig worden geïnterpoleerd. Afstanden kleiner dan 5-maal de equivalente diameter tot de tunnelwand moeten worden ontraden omdat het effect op het draagvermogen dan niet goed te voorspellen is. Evenals bij de ondiepe ligging moet bij de diepe ligging het effect van horizontale belasting en negatieve kleeft worden beschouwd. Een lagere ligging van de tunnel is niet onderzocht. Voorlopig wordt

verondersteld dat bij diepere ligging de afstand tot de fundatiepalen evenredig vergroot dient te worden om zodoende buiten de invloedssfeer van de zakkingsrog te blijven.

Voor funderingen op staal is de relatieve verplaatsing van belang. In de literatuur wordt als grens een helling van 1:300 aangegeven. De berekening van het zakkingsverloop op fundatiediepte laat zien dat in het geval van de ondiepe tunnel deze helling bereikt wordt bij een grootste zakking aan maaiveld van circa 35 mm. In het geval van de diepe ligging zijn de verplaatsingen op de diepte van de fundaties meer worden gespreid, zodat de optredende hellingen dan gunstiger zijn.

Ten aanzien van de zakkingsen kan het voorgaande als volgt worden samengevat:

Zakkingsen zijn in hoge mate beheersbaar door een accurate uitvoering met een tunnelmachine waarvan het ontwerp is afgestemd op de specifieke omstandigheden. Het complex van zakkingsoorzaken kan daardoor beperkt worden, in termen van volumeverlies, tot 1%. Bij een ligging van de tunnelas op 16 meter beneden het maaiveld leidt dit tot een maximale zakking van ongeveer 25 mm aan het maaiveld en bij een diepere ligging, met het hart op 22 meter onder het maaiveld tot ongeveer 20 mm. Deze waarden komen overeen met de zakkingsen die bij de aanleg van de tunnels in Antwerpen en Lille zijn opgetreden.

Bij de te verwachten maaiveldzettingen van circa 25 mm zijn de relatieve zakkingsen van staalfunderingen minder dan 1:300 hetgeen in de literatuur als acceptabele grens wordt aangegeven. Een diepe ligging van de tunnel is wat dit betreft gunstiger omdat dan de relatieve (en ook absolute) verplaatsingen kleiner zijn.

Voor paalfunderingen geldt dat het punt draagvermogen niet beïnvloed wordt indien de onderkant van de tunnel circa twee meter boven het paalpuntniveau blijft. Voor de diepere ligging van de tunnel, met de tunnelas op paalpuntniveau, kan de tunnel op een afstand van 10-maal de equivalente paaldiameter gelegd worden zonder het punt draagvermogen te beïnvloeden. Bij kleinere afstanden neemt het punt draagvermogen gradueel af tot 50% bij een afstand van 5-maal de equivalente paaldiameter.

#### *Haalbaarheid t.a.v. diepteligging*

Voor wat betreft de afweging tussen verschillende diepteliggingen kan het volgende gesteld worden t.a.v. risico's.

- In verband met invloed op funderingen op staal door zettingen en zettingsverschillen is de diepe ligging gunstiger.
- In verband met invloed op paalfunderingen is de ondiepe ligging gunstiger.

***Te boren tracés***

(zie plattegronden op volgende bladzijden)

Voor het vervolg van de studie komen twee tracés in aanmerking. Gerekend vanaf de noordzijde ter hoogte van de Kerstanje Wetering beginnen beide tracés ten westen van de bestaande spoorbaan. Het zogenaamde Oost tracé kruist de spoorbaan ondergronds en volgt daarna aan de oostkant van het spoorviaduct in Delft de Phoenixstraat. De meeste gebouwen langs deze straat zijn op staal gefundeerd.

Het zogenaamde West tracé vervolgt zijn loop ten westen van het spoorviaduct en gaat daarbij onder bebouwing door die op staal is gefundeerd. Na het spoorviaduct kruist dit tracé de bestaande spoorbaan en eindigt evenals het Oost tracé bij het huidige station.

In beide tracés wordt tussen de Binnenwatersloot en het spoorwegstation een ondergrondse halteplaats voorzien met een perronlengte van 340 meter. Ten zuiden van de halteplaats wordt aangesloten op de huidige spoorbaan ter hoogte van de Abtswoudseweg. De halteplaats en het vervolg tot aan de aansluiting worden vanaf het maaiveld gebouwd in verband met de te passeren Irene-tunnel en de hoge lligging.

***Obstakels***

In het Oost tracé kruist een van de tunnelbuizen de fundatiepalen van het bestaande spoorviaduct over een lengte van circa 100 meter. De betreffende palen dienen voor het boren te worden verwijderd. Hiertoe dient de fundatie van het viaduct te worden aangepast. Het zelfde geldt ten aanzien van de kruising met de kademuren van de Westsingelgracht waarbij over een lengte van ongeveer 200 meter palen verwijderd moeten worden om de ondergrondse halteplaats vanaf het maaiveld te kunnen bouwen.

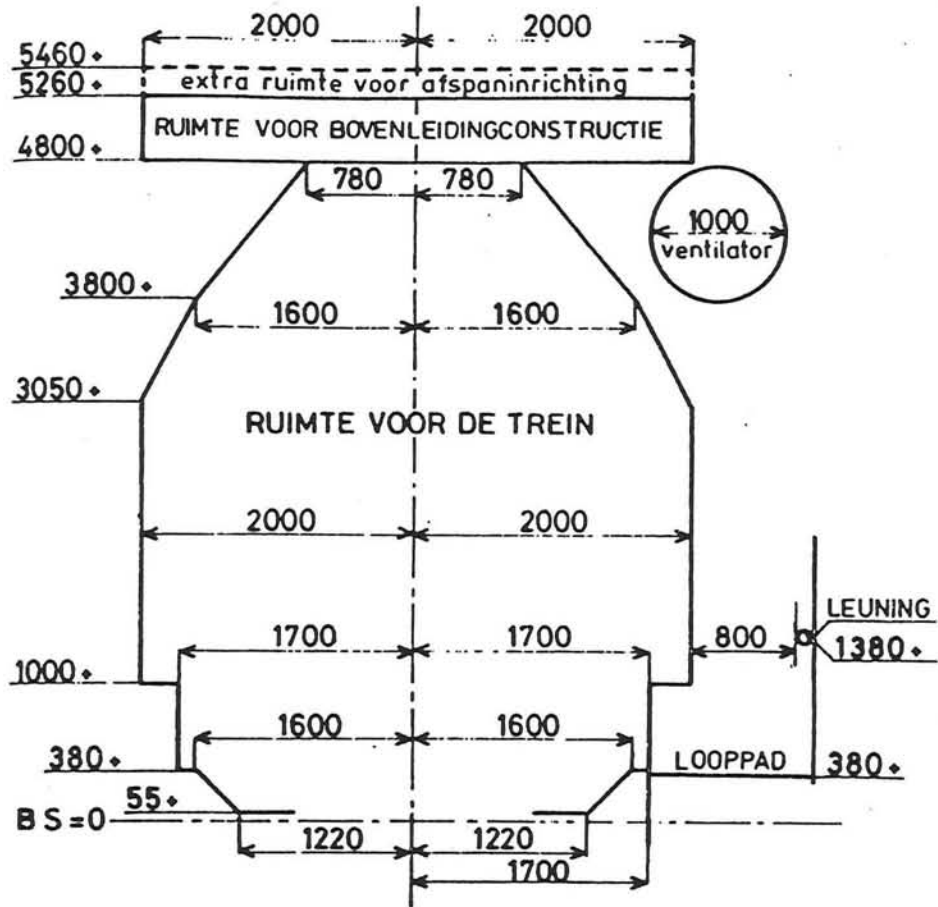
De ondergrondse halteplaats van het West tracé kruist voor zover bekend alleen palen ter hoogte van de Westsingelgracht over een lengte van circa 50 meter en is daarmee gunstiger dan het Oost tracé.

***Dubbelsporige tunnelbuis***

Bij de uitwerking van de berekeningen is in de studie uitgegaan van twee enkelsporige tunnelbuizen met een buiten diameter van 8 meter. Voor een dubbelsporige tunnelbuis is een diameter nodig van 12 meter. Naar de mening van de tunnel-specialisten is de aanleg daarvan haalbaar in het Pleistocene zand. Aangezien de ervaring met deze diameter beperkt is tot de hardere grondsoorten bestaan er reserves ten aanzien van het beperken van de zakkings veroorzaakt door het frontverlies en de stabiliteit van de tunnelwand bij aanleg in het Holoceen.

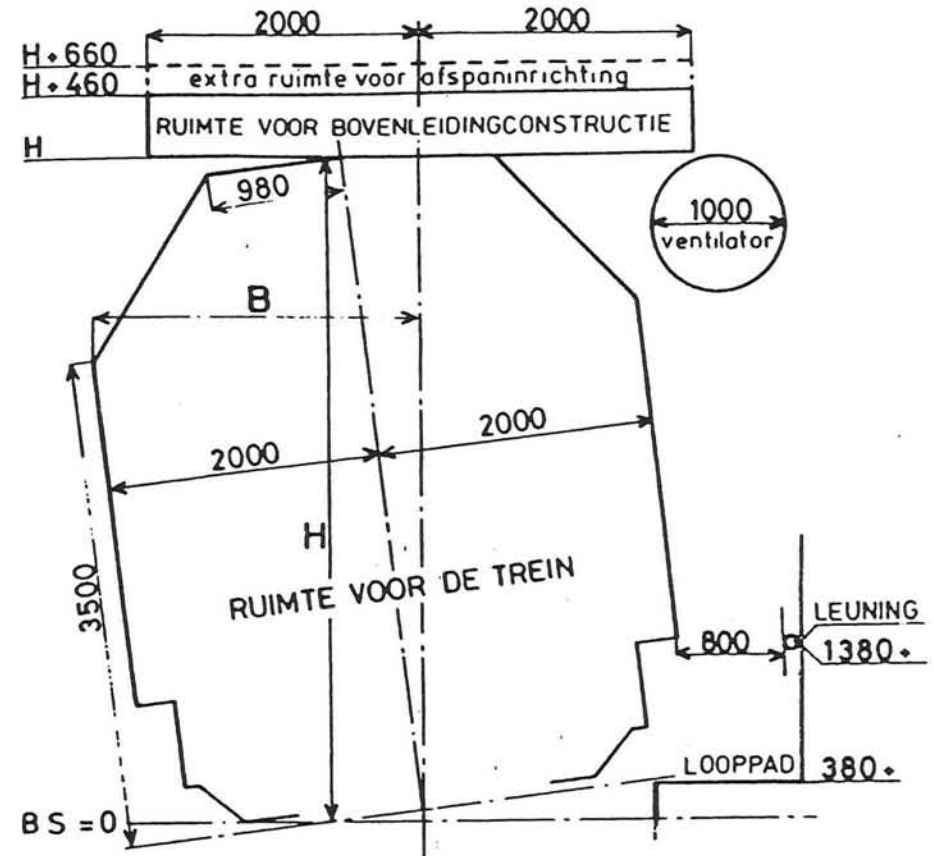
## **Bijlage B. Profiel van vrije ruimte.**

**VTG deel VI, bijlage I-IX**



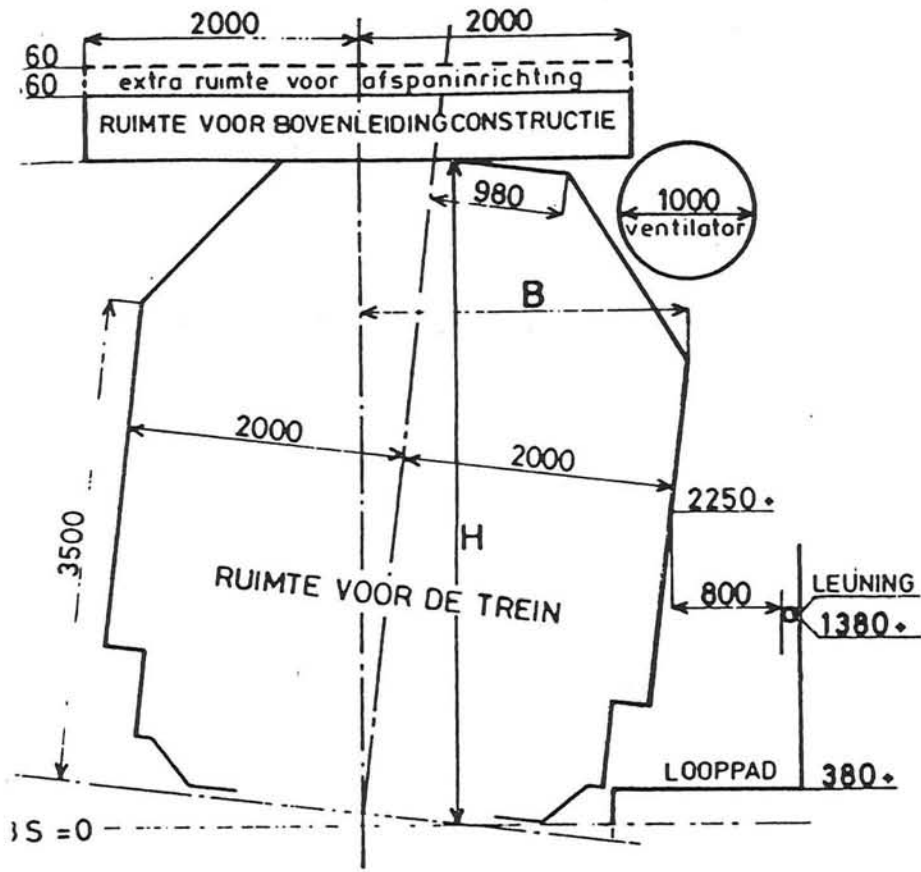
RECHTHOEKIGE TUNNELDOORSNEDE  
 SPOOR ZONDER VERKANTING  
 BAANVAKSNELHEID  $V_{max}$  130 km/h  
 RODE MEETGEBIED NIET VAN TOEPASSING

B.2



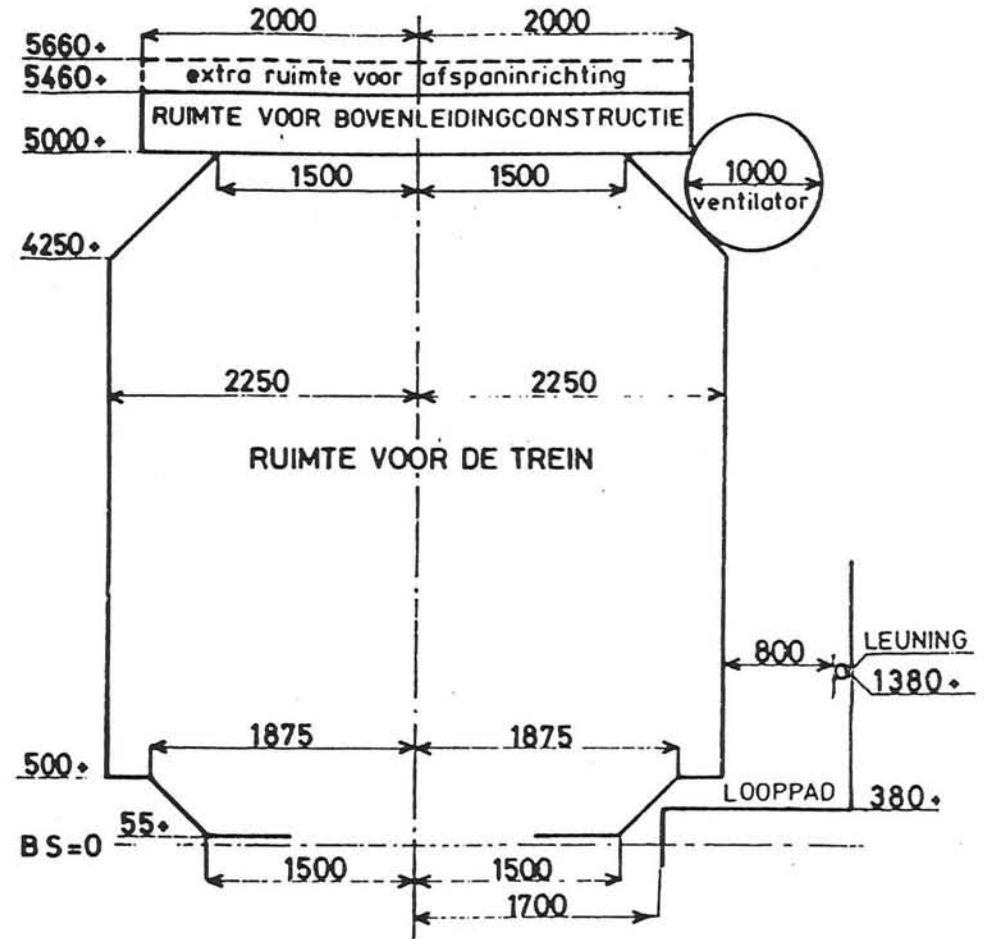
$$H = \frac{h}{2} \cdot \frac{16}{5} \sqrt{1500^2 - h^2} \quad B = \frac{7}{3} h \cdot \frac{5}{6} \sqrt{1500^2 - h^2} \cdot 750 \quad h = \text{verkanting}$$

RECHTHOEKIGE TUNNELDOORSNEDE  
 SPOOR MET VERKANTING  
 (BUITENZIJDEN BOOG AAN LOOPPADZIJDE)  
 BAANVAKSNELHEID  $V_{max}$  130 km/h  
 RODE MEETGEBIED NIET VAN TOEPASSING

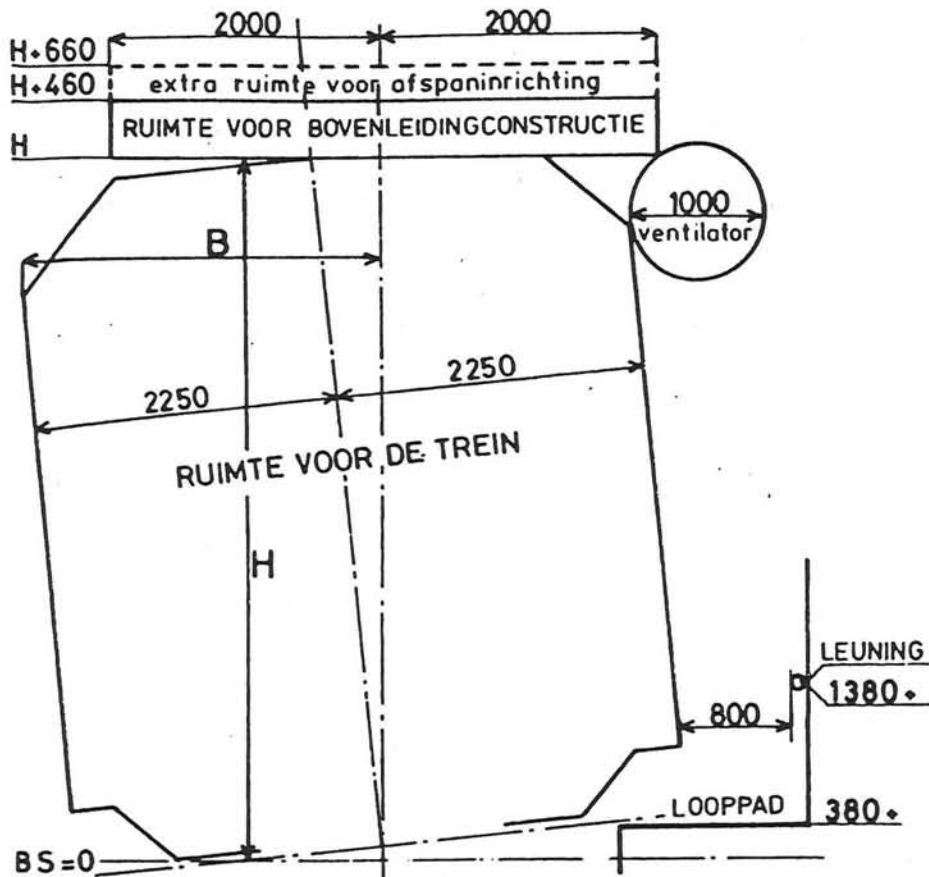


$$H = \frac{h}{2} \cdot \frac{16}{5} \sqrt{1500^2 - h^2} \quad B = \frac{7}{3} h \cdot \frac{5}{6} \sqrt{1500^2 - h^2} \cdot 750 \quad h = \text{verkanting}$$

RECHTHOEKIGE TUNNELDOORSNEDE  
 SPOOR MET VERKANTING  
 (BINNENZIJDE BOOG AAN LOOPPADZIJDE)  
 BAANVAKSNELHEID  $V_{\max}$  130 km/h  
 RODE MEETGEBIED NIET VAN TOEPASSING

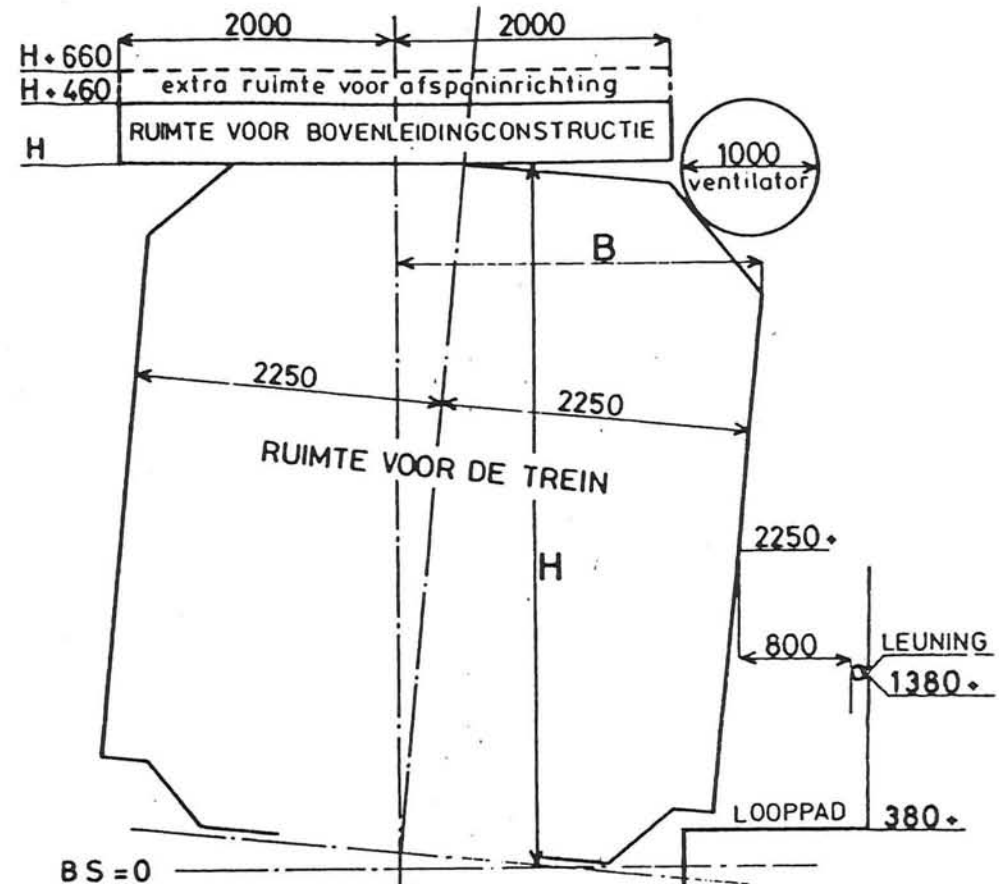


RECHTHOEKIGE TUNNELDOORSNEDE  
 SPOOR ZONDER VERKANTING  
 BAANVAKSNELHEID  $V_{\max}$  130 km/h  
 RODE MEETGEBIED VAN TOEPASSING



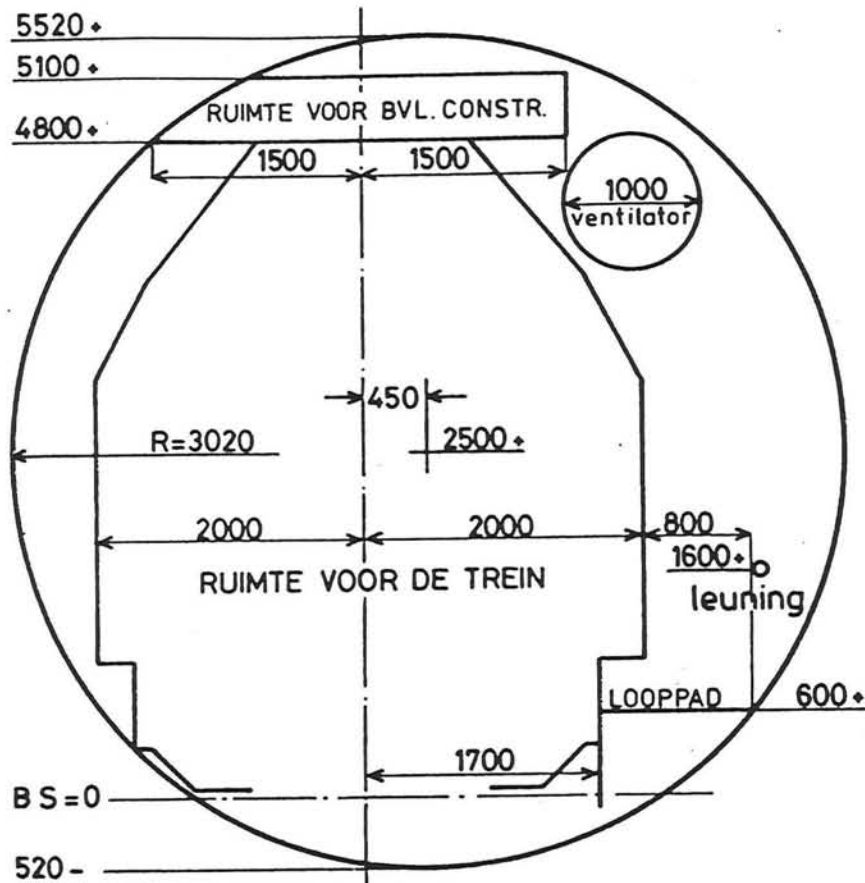
$$H = \frac{h}{2} \cdot \frac{10}{3} \sqrt{1500^2 - h^2} \quad B = \frac{17}{6} h \cdot \sqrt{1500^2 - h^2} + 750 \quad h = \text{verkanting}$$

RECHTHOEKIGE TUNNELDOORSNEDE  
 SPOOR MET VERKANTING  
 (BUITENZIJDE BOOG AAN LOOPPADZIJDE)  
 BAANVAKSNELHEID V max 130 km/h  
 RODE MEETGEBIED VAN TOEPASSING

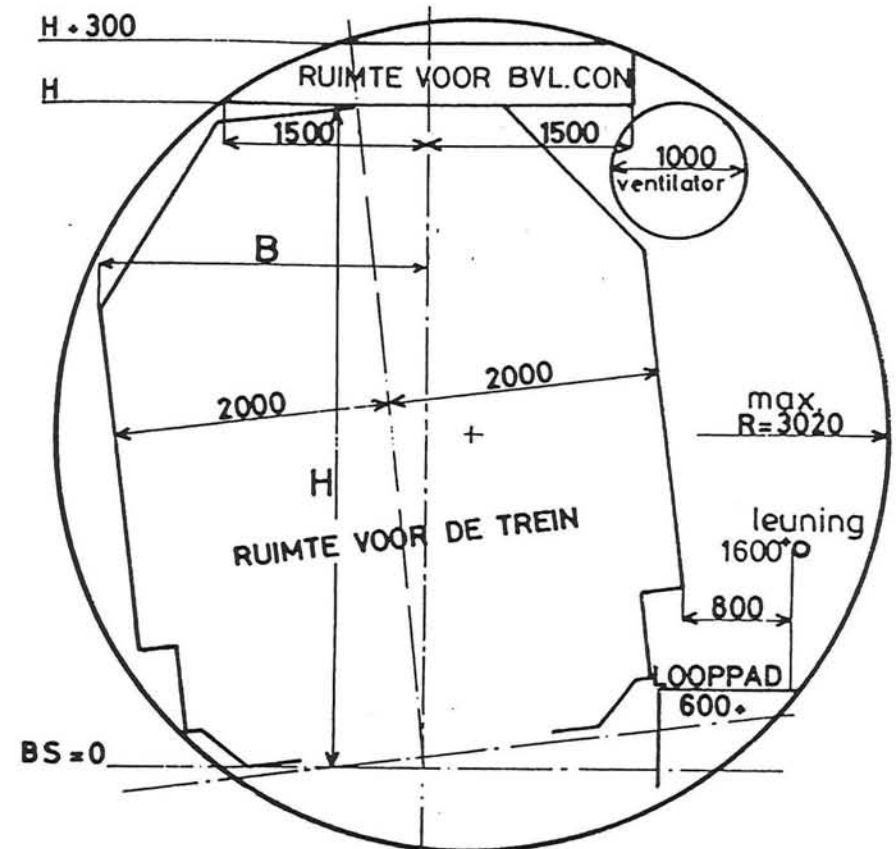


$$H = \frac{h}{2} \cdot \frac{10}{3} \sqrt{1500^2 - h^2} \quad B = \frac{17}{6} h \cdot \sqrt{1500^2 - h^2} + 750 \quad h = \text{verkanting}$$

RECHTHOEKIGE TUNNELDOORSNEDE  
 SPOOR MET VERKANTING  
 (BINNENZIJDE BOOG AAN LOOPPADZIJDE)  
 BAANVAKSNELHEID V max 130 km/h  
 RODE MEETGEBIED VAN TOEPASSING



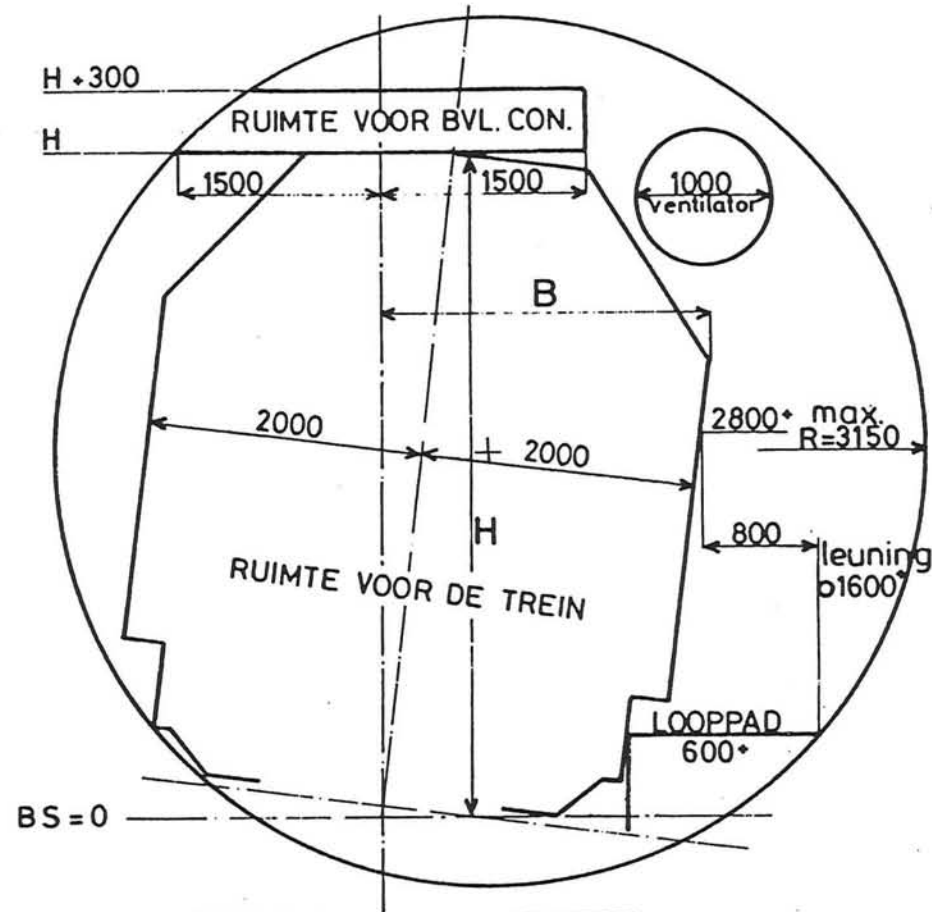
CIRKELVORMIGE TUNNELDOORSNEDE  
 SPOOR ZONDER VERKANTING  
 BAANVAKSNELHEID V max 80 km/h  
 RODE MEETGEBIED NIET VAN TOEPASSING



$$H = \frac{h}{2} + \frac{16}{5} \sqrt{1500^2 - h^2} \quad B = \frac{7}{3} h + \frac{5}{6} \sqrt{1500^2 - h^2} + 750 \quad h = \text{verkanting}$$

CIRKELVORMIGE TUNNELDOORSNEDE  
 SPOOR MET VERKANTING  
 (BUITENZIJDE BOOG AAN LOOPPADZIJDE)  
 BAANVAKSNELHEID V max 80 km/h  
 RODE MEETGEBIED NIET VAN TOEPASSING





$$H = \frac{h}{2} + \frac{16}{5} \sqrt{1500^2 - h^2} \quad B = \frac{7}{3} h + \frac{5}{6} \sqrt{1500^2 - h^2} + 750 \quad h = \text{verkanting}$$

CIRKELVORMIGE TUNNELDOORSNEDE  
 SPOOR MET VERKANTING  
 (BINNENZIJDSE BOOG AAN LOOPPADZIJDSE)  
 BAANVAKSNELHEID  $V_{\max} 80 \text{ km/h}$   
 RODE MEETGEBIED NIET VAN TOEPASSING

## Bijlage C. Uitgebreide grondgegevens.

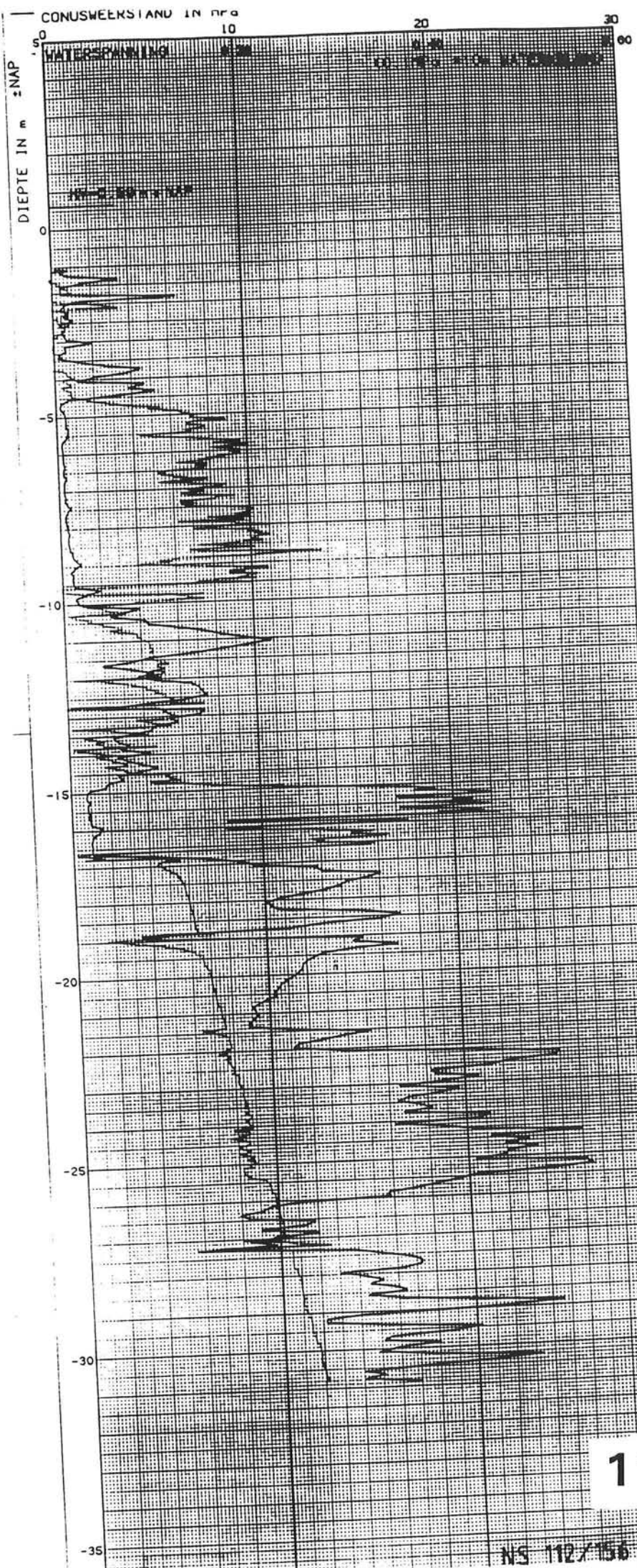
### *Toelichting:*

*In deze bijlage zijn een aantal sonderingen en grondboringen uit het BTC-rapport weergegeven, verzameld uit een aantal bestaande grond-onderzoeken. Deze grond-onderzoeken zijn gedaan door de NV Nederlandse Spoorwegen en Grondmechanica Delft.*

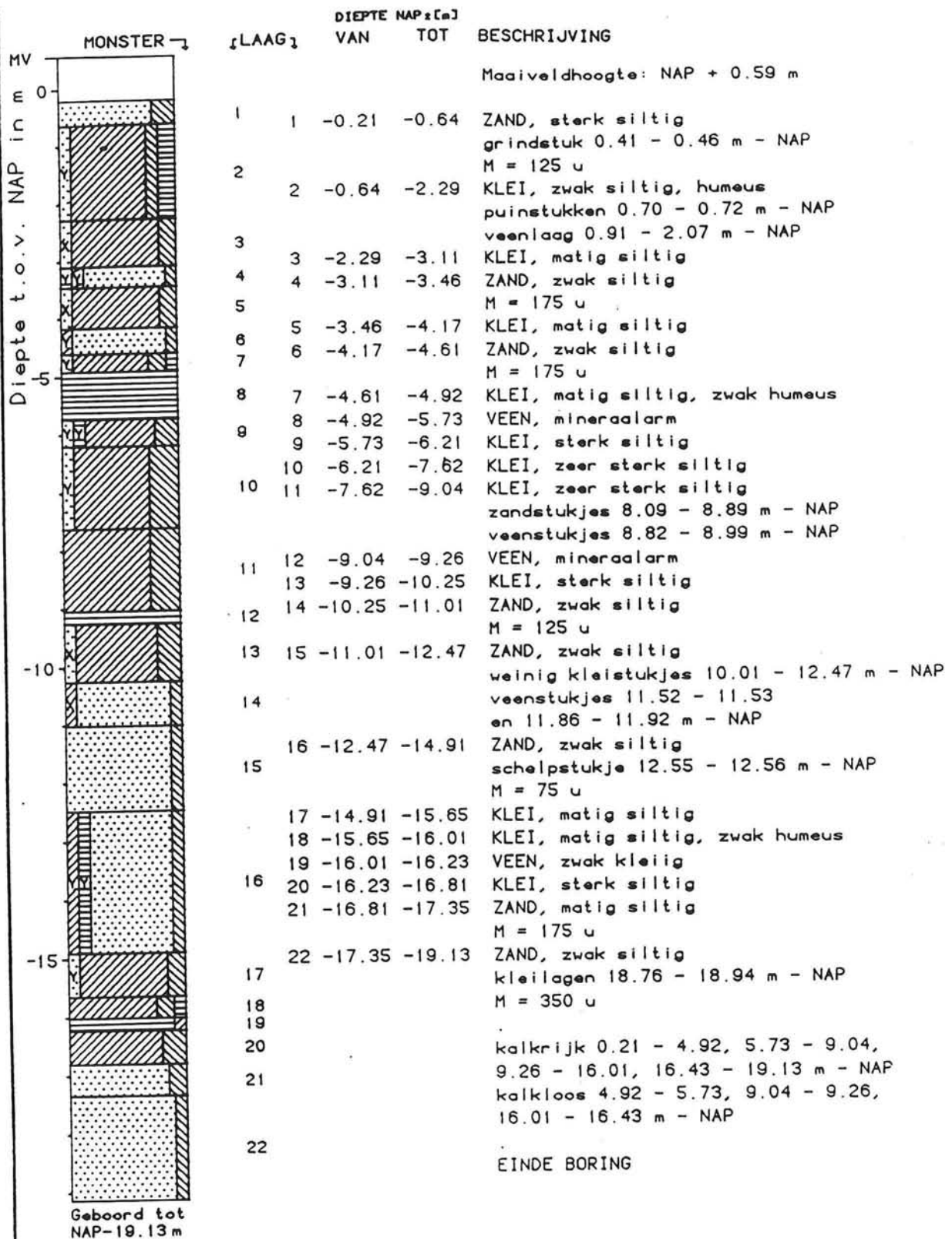
*De gegevens zijn genummerd en representeren de grond ter hoogte van:*

- 11: Irenetunnel.*
- 17: Midden Van Leeuwenhoeksingel.*
- 19: Stationsgebouw station Delft.*
- 23: Westsingelgracht.*

N.B.: 1 MPa = 1000 kN/m<sup>2</sup>



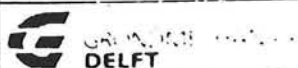
11



11

NS 112/157

Voor legenda zie bijlage E



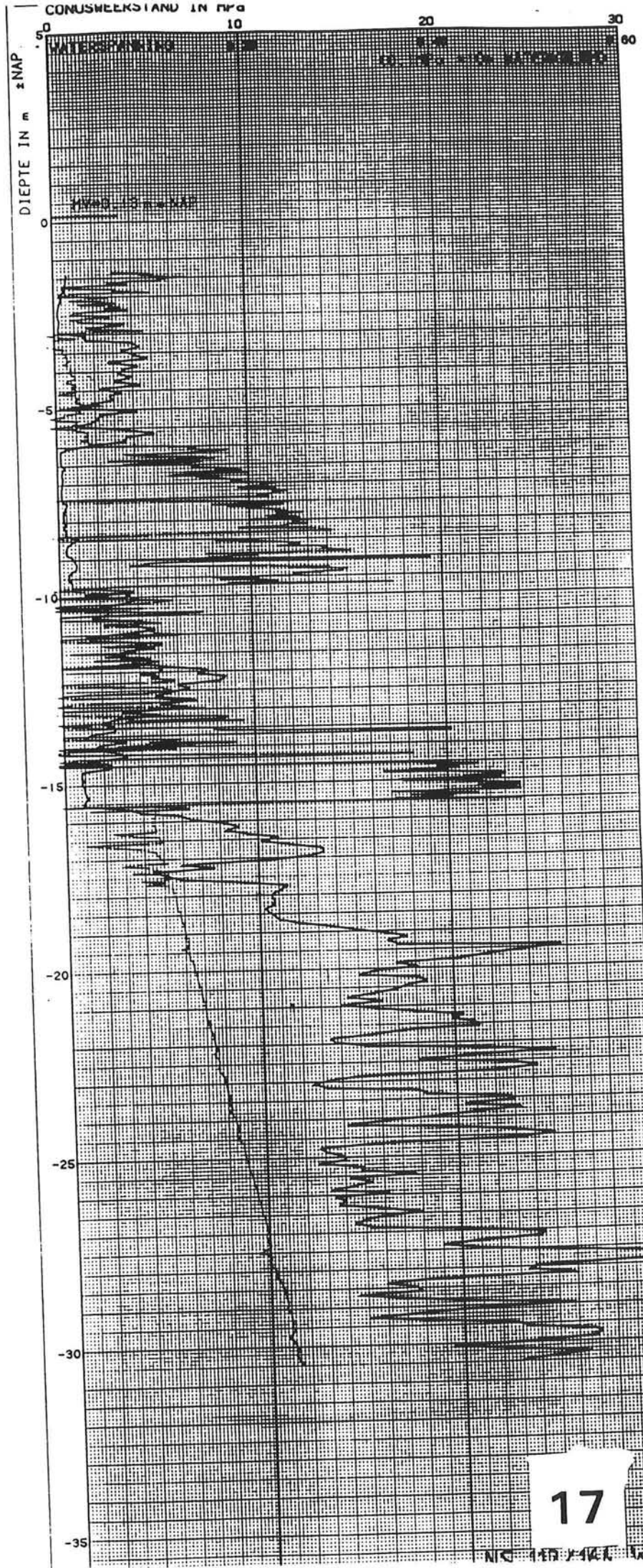
TRAMTUNNEL ONDER SPOORL. DEN HAAG -  
R'DAM T.P.V. KM 69.75 TE DELFT

Begemannboring 66 mm 01

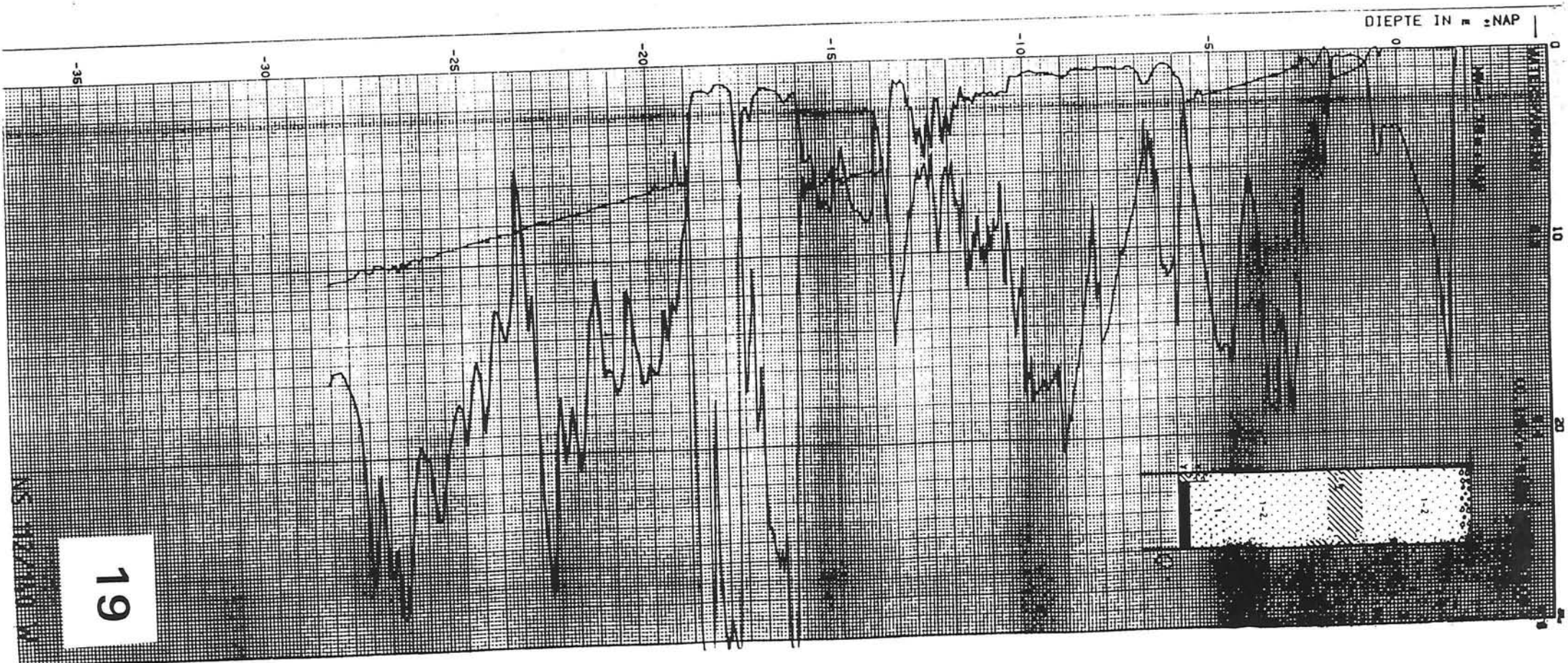
90-07-26

CO-319100 VNO

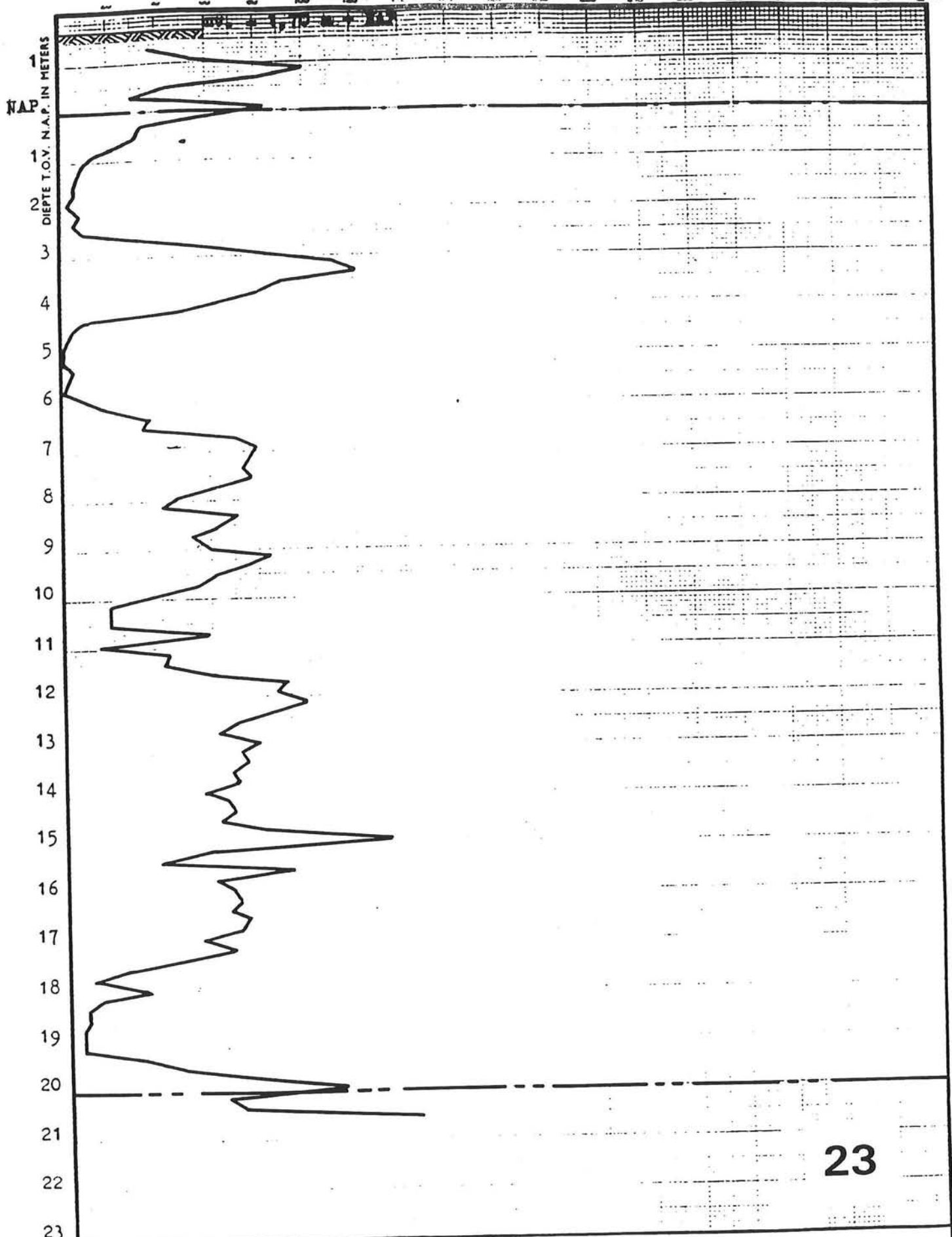
BIJL. 2B



DIEPTE IN m ±NAP



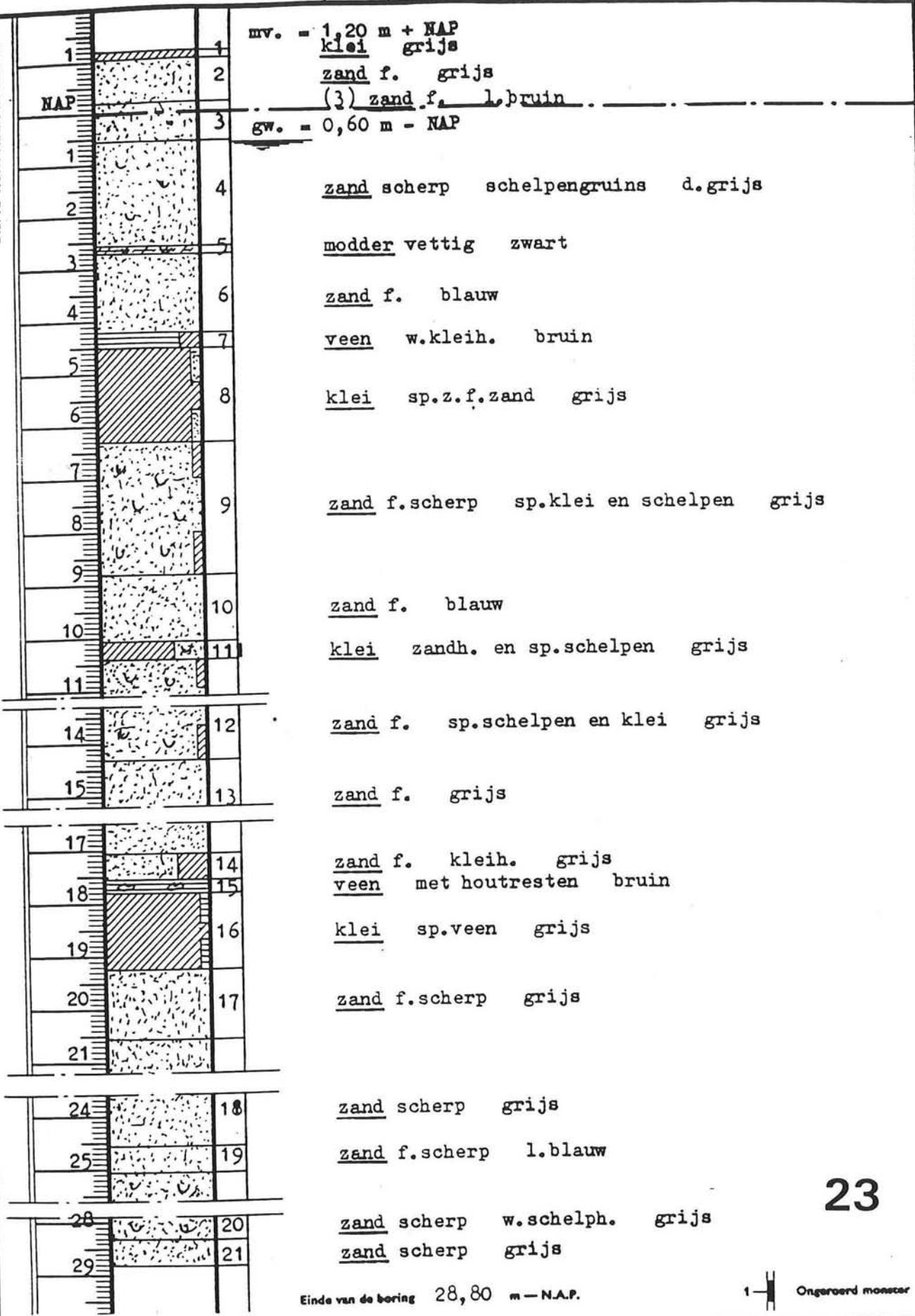
19



23

|  |                          |               |           |                         |
|--|--------------------------|---------------|-----------|-------------------------|
| c.b.v.: viaductplan Delft  |                          |               |           |                         |
| <b>N.V. NEDERLANDSCHE SPOORWEGEN</b><br>Dienst van Weg en Werken<br>6de Afdeling | lijn/                    | Uitg.         | LGM       |                         |
|  | Den Haag H.S. - Schiedam | Get. 12-7-'60 | V.        |                         |
|  | <b>BODEMONDERZOEK</b>    | Gez.          | M.        | <b>SONDERING</b>        |
|  |                          | Gez.          |           | km 69.209 <sup>20</sup> |
|  |                          |               | ▼ 112/54A |                         |

DIEPTE T.O.V. N.A.P. IN METERS



23

Einde van de boring 28,80 m - N.A.P.

1 Ongevoerd monster

c.b.v.: viaductplan Delft

**N.V. NEDERLANDSCHE SPOORWEGEN**  
 Dienst van Weg en Werken  
 6de Afdeling

lijn/  
 Den Haag H.S.-Schiedam

**BODEMONDERZOEK**

Ukg. 10.5.'60 R.  
 Get. 5.7.'60 V.  
 Get. M.  
 Get.

**BORING**  
 km 69.202<sup>50</sup>

● 112/46



## Bijlage D. Berekening afmetingen rode meetgebied.

■ Zie figuur 5.5 en 5.6 van hoofdstuk 5.

■  $h = 80 \text{ mm}$

■ **Buitenbocht:**

$$B = \frac{17}{6}h + \sqrt{1500^2 - h^2} + 750 = 2475 \text{ mm}$$

$$H = \frac{h}{2} + \frac{10}{3}\sqrt{1500^2 - h^2} = 5035 \text{ mm}$$

- Breedte vanuit ♥-lijn spoor aan perronzijde = 2475 mm.
- Breedte vanuit ♥-lijn spoor aan muurzijde = 2250 mm.
- Afstand vanuit ♥-lijn spoor tot aan muur:  
= breedte  $B'$  op hoogte van 2250 mm<sup>+</sup> BS + 800 mm looppad.  
= 2125 + 800 = 2925 mm.

■ **Binnenbocht:**

$$B = 2475 \text{ mm}$$

$$H = 5035 \text{ mm}$$

- Breedte vanuit ♥-lijn spoor aan perronzijde = 2250 mm.
- Breedte vanuit ♥-lijn spoor aan muurzijde = 2475 mm.
- Afstand vanuit ♥-lijn spoor tot aan muur:  
= breedte  $B'$  op hoogte van 2250 mm<sup>+</sup> BS + 800 mm looppad  
= 2375 + 800 = 3175 mm, afgerond = 3200 mm.

■ **Conclusie:**

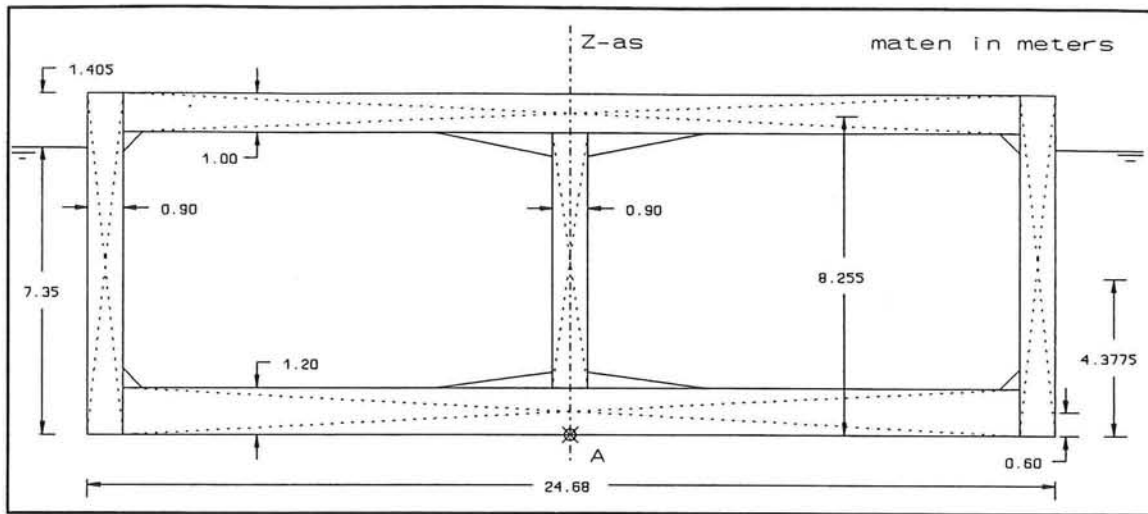
Uit symmetrie-overwegingen (uitvoeringstechnische aspecten) is gekozen om op beide sporen van de maximale waarden uit te gaan.

Samengevat houdt dit dus in:

- Breedte  $B$  van het rode meetgebied = 2475 mm. (zie figuur 5.8)
- De afstand ♥-lijn spoor  $\Leftrightarrow$  muur = 3200 mm.
- De rand van het looppad ligt op 1700 mm vanuit ♥-lijn spoor, en krijgt het looppad derhalve een breedte van  $3200 - 1700 = 1500$  mm.

De totale dwarsdoorsnede van het stationsdeel van de treintunnel die uit deze gegevens volgt is weergegeven in figuur 5.9 van hoofdstuk 5.

## Bijlage F. Berekening statische stabiliteit zinkelement.



Figuur F.1 Geometrie doorsnede element.

|                     | Gewicht [kN/m <sup>1</sup> ]                               |                | Gewicht x arm [kNm/m <sup>1</sup> ] |                |
|---------------------|--|----------------|-------------------------------------|----------------|
|                     |  |                |                                     |                |
| Wand 1              | $0.9 \times 8.755 \times 24.6 =$                           | 193.84         | $193.84 \times 4.3775 =$            | 848.54         |
| Wand 2              | $0.9 \times 8.755 \times 24.6 =$                           | 193.84         | $193.84 \times 4.3775 =$            | 848.54         |
| Kolom               | $\frac{1}{2} \times 0.9 \times 6.555 \times 24.6 =$        | 72.56          | $72.56 \times 4.3775 =$             | 317.63         |
| Vloer               | $1.2 \times 22.88 \times 24.6 =$                           | 675.42         | $675.42 \times 0.60 =$              | 405.25         |
| Dak                 | $1.0 \times 22.88 \times 24.6 =$                           | 562.85         | $562.85 \times 8.255 =$             | 4646.31        |
| Vouten<br>boven     | $2 \times \frac{1}{2} \times 3.0 \times 0.6 \times 24.6 =$ | 44.28          | $44.28 \times 7.555 =$              | 334.53         |
| Vouten<br>onder     | $2 \times \frac{1}{2} \times 3.0 \times 0.4 \times 24.6 =$ | 29.52          | $29.52 \times 1.333 =$              | 39.35          |
| Hoeken<br>boven     | $2 \times \frac{1}{2} \times 0.5 \times 0.5 \times 24.6 =$ | 6.15           | $6.15 \times 7.588 =$               | 46.66          |
| Hoeken<br>onder     | $2 \times \frac{1}{2} \times 0.5 \times 0.5 \times 24.6 =$ | 6.15           | $6.15 \times 1.366 =$               | 8.40           |
| Zinkuit-<br>rusting | 30 kN/m <sup>1</sup> element                               | 30             | $30 \times 4.3775 =$                | 131.32         |
|                     | Totaal gewicht =   | <b>1814.61</b> | Totaal =                            | <b>7626.53</b> |

- Ligging massa-zwaartepunt doorsnede:

$$\overline{GA} = \frac{(\text{gewicht} * \text{arm})}{\text{gewicht}} = \frac{7626.53}{1814.61} = 4.20 \text{ m}$$

- Diepgang element:

$$d = \frac{G}{B \cdot \gamma_w} = \frac{1814.61}{24.68 \cdot 10} = 7.35 \text{ m}$$

- Ligging drukingspunt  $B$ :

$$\Rightarrow \overline{BA} = \frac{1}{2} \cdot 7.35 = 3.675 \text{ m}$$

- Traagheidsmoment  $I$ :

$$I = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3 = \frac{1}{12} \cdot 1 \text{ m}^1 \cdot (24.68 \text{ m})^3 = 1252.72 \text{ m}^4$$

- Waterverplaatsing  $V$ :

$$\begin{aligned} V &= d \cdot B \cdot 1 \text{ m}^1 \\ &= 7.35 \cdot 24.68 \cdot 1 \\ &= 181.40 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

- Ligging metacentrum  $M$ :

$$\overline{BM} = \frac{I}{V} = \frac{1252.72}{181.40} = 6.90 \text{ m}$$

- Metacentrumhoogte  $h_m$ :

$$\begin{aligned} \overline{GM} = h_m &= \overline{BM} + \overline{BA} - \overline{GA} \\ &= 6.90 + 3.675 - 4.20 \\ &= 6.375 \text{ m} > 0.45 \Rightarrow \text{voldoet!} \end{aligned}$$

Door de relatief grote breedte van het element heeft het een groot traagheidsmoment ( $I \sim B^3$ ), hetgeen voor een hoge ligging van het metacentrum  $M$  zorgt. Deze hoge ligging van het metacentrum maakt dat het element zich in water stabiel gedraagt. Een eventuele kleine afwijking in de ligging van het massazwaartepunt van de doorsnede zal dan ook nauwelijks van invloed zijn op de stabiliteit.

Conclusie is dan ook dat het element tijdens het transport stabiel zal zijn, en dat ten aanzien van de statische stabiliteit geen extra maatregelen noodzakelijk zijn.


Voor ligging karakteristieke punten  $B$ ,  $G$ ,  $M$  en metacentrumhoogte  $h_m$  zie figuur F.2.

# **Bijlage G. Berekening doorsnede zinkelement.**

**Uitvoer PC-Frame.**

**Met partiële veiligheidscoëfficiënten.**

■ **Toelichting op de invoergegevens:**

In de hiernavolgende uitvoer van de doorsnedeberekening van het tunnelement met behulp van het programma PC-Frame, zijn meer knopen en staven ingevoerd dan waarvan in hoofdstuk 9 figuur 9.27 sprake is. In de invoer van het programma is de niet-prismaticiteit van de vloer en het dak verwerkt (afschuiningen  figuur 9.4). Dit is verwoord door middel van het invoeren van een aantal extra staven en knopen, waarbij de extra staven variëren in dikte. De 'hoofdknopen' nrs. 1 t/m 6 zijn binnen deze invoer dezelfde als vermeld in hoofdstuk 9 figuur 9.27. De knopen 7 t/m 18 zijn extra knopen.

Voor de staven geldt:

| Hoofdstuk 9<br>(Staaf) | Bijlage G<br>(= Staven) |
|------------------------|-------------------------|
| 1                      | 1                       |
| 2                      | 8 + 2 + 9 + 10          |
| 3                      | 11 + 12 + 3 + 13        |
| 4                      | 4                       |
| 5                      | 17 + 18 + 5 + 19        |
| 6                      | 17 + 6 + 15 + 16        |
| 7                      | 7                       |

=====

TU-Delft, Civiele Techniek

Bestandsnaam : TUN\_TOT3  
Project : Ondergronds Station Delft  
Onderdeel : Berekening met niet-prismatische staven, partiële veiligheidsfactoren.  
Datum : 27/5/1993

=====

Berekeningsresultaten van programma PC-FRAME      Versie 3.50    september 1990

Eenheden:    lengte : m  
              kracht : kN  
              hoek  : rad

Probleem specificatie

=====

18 Knopen  
19 Staven  
9 Profielen  
2 Opleggingen  
0 Voorgescreven verplaatsingen  
5 Belastinggevallen  
1 Belastingcombinaties  
12 Knoopbelastingen  
45 Staafbelastingen

Knoopcoördinaten

=====

| Knoop<br>nummer | X<br>coördinaat<br>(m) | Y<br>coördinaat<br>(m) |
|-----------------|------------------------|------------------------|
|-----------------|------------------------|------------------------|

=====

|    |         |        |
|----|---------|--------|
| 1  | 0.0000  | 0.0000 |
| 2  | 0.0000  | 7.6550 |
| 3  | 11.8900 | 7.6550 |
| 4  | 23.7800 | 7.6550 |
| 5  | 23.7800 | 0.0000 |
| 6  | 11.8900 | 0.0000 |
| 7  | 0.9500  | 7.6550 |
| 8  | 8.4400  | 7.6550 |
| 9  | 9.9400  | 7.6550 |
| 10 | 13.8400 | 7.6550 |
| 11 | 15.3400 | 7.6550 |
| 12 | 22.8300 | 7.6550 |
| 13 | 0.9500  | 0.0000 |
| 14 | 8.4400  | 0.0000 |
| 15 | 9.9400  | 0.0000 |
| 16 | 13.8400 | 0.0000 |
| 17 | 15.3400 | 0.0000 |
| 18 | 22.8300 | 0.0000 |

Bijlage G. Berekening doorsnede zinkelement.

| Staafgegevens |           |           |           |                 |            | Staaftype : |
|---------------|-----------|-----------|-----------|-----------------|------------|-------------|
| Staaftype     | Beg knoop | End knoop | Staaftype | Profiel nr/type | Lengte (m) |             |
| 1             | 1         | 2         | 1         | 3               | 7.655      | 1 ----      |
| 2             | 7         | 8         | 1         | 2               | 7.490      | 2 o----     |
| 3             | 11        | 12        | 1         | 2               | 7.490      | 3 ----o     |
| 4             | 4         | 5         | 1         | 3               | 7.655      | 4 o---o     |
| 5             | 17        | 18        | 1         | 1               | 7.490      |             |
| 6             | 13        | 14        | 1         | 1               | 7.490      |             |
| 7             | 6         | 3         | 1         | 3               | 7.655      |             |
| 8             | 2         | 7         | 1         | 6               | 0.950      |             |
| 9             | 8         | 9         | 1         | 5               | 1.500      |             |
| 10            | 9         | 3         | 1         | 4               | 1.950      |             |
| 11            | 3         | 10        | 1         | 4               | 1.950      |             |
| 12            | 10        | 11        | 1         | 5               | 1.500      |             |
| 13            | 12        | 4         | 1         | 6               | 0.950      |             |
| 14            | 1         | 13        | 1         | 9               | 0.950      |             |
| 15            | 14        | 15        | 1         | 8               | 1.500      |             |
| 16            | 15        | 6         | 1         | 7               | 1.950      |             |
| 17            | 6         | 16        | 1         | 7               | 1.950      |             |
| 18            | 16        | 17        | 1         | 8               | 1.500      |             |
| 19            | 18        | 5         | 1         | 9               | 0.950      |             |

| Profielgegevens |   |   |                                    |                                     |              |
|-----------------|---|---|------------------------------------|-------------------------------------|--------------|
| Profielnummer   | Elasticiteitsmodulus (kN/m <sup>2</sup> ) | Oppervlakte doorsnede (m <sup>2</sup> ) | Traagheidsmoment (m <sup>4</sup> ) | Weerstands moment (m <sup>3</sup> ) | Naam profiel |
| 1               | 3.20000E+07                               | 1.20000E+00                             | 1.44000E-01                        | 2.40000E-01                         | BETON_120    |
| 2               | 3.20000E+07                               | 1.00000E+00                             | 8.33333E-02                        | 1.66667E-01                         | BETON_100    |
| 3               | 3.20000E+07                               | 9.00000E-01                             | 6.07500E-02                        | 1.35000E-01                         | BETON_09     |
| 4               | 3.20000E+07                               | 1.45000E+00                             | 2.54052E-01                        | 3.50417E-01                         | BETON_145    |
| 5               | 3.20000E+07                               | 1.15000E+00                             | 1.26740E-01                        | 2.20417E-01                         | BETON_115    |
| 6               | 3.20000E+07                               | 1.25000E+00                             | 1.62760E-01                        | 2.60400E-01                         | BETON_125    |
| 7               | 3.20000E+07                               | 1.50000E+00                             | 2.81250E-01                        | 3.75000E-01                         | BETON_150    |
| 8               | 3.20000E+07                               | 1.30000E+00                             | 1.83080E-01                        | 2.81600E-01                         | BETON_130    |
| 9               | 3.20000E+07                               | 1.45000E+00                             | 2.54052E-01                        | 3.50417E-01                         | BETON_145    |

| Opleggingen     |             |               | Oplegging type : |
|-----------------|-------------|---------------|------------------|
| Opleggingnummer | Knoopnummer | Opleggingtype |                  |
| 1               | 6           | 3             | 1 rol ux = 0     |
| 2               | 3           | 1             | 2 rol uy = 0     |
|                 |             |               | 3 scharnier      |
|                 |             |               | 4 inklemming     |



Bijlage G. Berekening doorsnede zinkelement.

| Knoopbelastingen (kN) |                 | (kNm)        |      |               |                            |
|-----------------------|-----------------|--------------|------|---------------|----------------------------|
| Knoopbel nummer       | Belasting geval | Knoop nummer | Type | Kracht/koppel | Type: 1 Fx<br>2 Fy<br>3 Tz |
| 1                     | 5               | 1            | 2    | 182.68700     |                            |
| 2                     | 5               | 2            | 2    | -173.46200    |                            |
| 3                     | 5               | 4            | 2    | -173.46200    |                            |
| 4                     | 5               | 5            | 2    | 182.68700     |                            |
| 5                     | 5               | 1            | 1    | 272.88000     |                            |
| 6                     | 5               | 5            | 1    | -272.88000    |                            |
| 7                     | 5               | 2            | 1    | 135.09400     |                            |
| 8                     | 5               | 4            | 1    | -135.09400    |                            |
| 9                     | 5               | 1            | 3    | 40.75900      |                            |
| 10                    | 5               | 2            | 3    | 5.25600       |                            |
| 11                    | 5               | 4            | 3    | -5.25600      |                            |
| 12                    | 5               | 5            | 3    | -40.75900     |                            |

| Staafelastingen |           | (kN)        | (kNm)     | (kN/m)  |               |         |               |
|-----------------|-----------|-------------|-----------|---------|---------------|---------|---------------|
| Bel. nr.        | Bel. gev. | Staafl. nr. | Bel. type | Beg     | Belasting beg | End     | Belasting end |
| Bel. type: 1 Tz |           |             |           |         |               |         |               |
|                 | 2 FxL     | 6 qxL/xL    |           |         |               |         |               |
|                 | 3 FyL     | 7 qyL/xL    |           |         |               |         |               |
|                 | 4 FxG     | 8 qxG/xL    | 10 qxG/yG |         |               |         |               |
|                 | 5 FyG     | 9 qyG/xL    | 11 qyG/xG |         |               |         |               |
| 1               | 1         | 1           | 6         | 0.00000 | -22.7500      | 1.00000 | -22.7500      |
| 2               | 1         | 8           | 9         | 0.00000 | -29.5200      | 1.00000 | -29.5200      |
| 3               | 1         | 2           | 9         | 0.00000 | -29.5200      | 1.00000 | -29.5200      |
| 4               | 1         | 9           | 9         | 0.00000 | -29.5200      | 1.00000 | -29.5200      |
| 5               | 1         | 10          | 9         | 0.00000 | -29.5200      | 1.00000 | -29.5200      |
| 6               | 1         | 11          | 9         | 0.00000 | -29.5200      | 1.00000 | -29.5200      |
| 7               | 1         | 12          | 9         | 0.00000 | -29.5200      | 1.00000 | -29.5200      |
| 8               | 1         | 3           | 9         | 0.00000 | -29.5200      | 1.00000 | -29.5200      |
| 9               | 1         | 13          | 9         | 0.00000 | -29.5200      | 1.00000 | -29.5200      |
| 10              | 1         | 14          | 9         | 0.00000 | -35.4200      | 1.00000 | -35.4200      |
| 11              | 1         | 6           | 9         | 0.00000 | -35.4200      | 1.00000 | -35.4200      |
| 12              | 1         | 15          | 9         | 0.00000 | -35.4200      | 1.00000 | -35.4200      |
| 13              | 1         | 16          | 9         | 0.00000 | -35.4200      | 1.00000 | -35.4200      |
| 14              | 1         | 17          | 9         | 0.00000 | -35.4200      | 1.00000 | -35.4200      |
| 15              | 1         | 18          | 9         | 0.00000 | -35.4200      | 1.00000 | -35.4200      |
| 16              | 1         | 5           | 9         | 0.00000 | -35.4200      | 1.00000 | -35.4200      |
| 17              | 1         | 19          | 9         | 0.00000 | -35.4200      | 1.00000 | -35.4200      |
| 18              | 1         | 4           | 6         | 0.00000 | 22.7500       | 1.00000 | 22.7500       |
| 19              | 1         | 7           | 6         | 0.00000 | -22.7500      | 1.00000 | -22.7500      |
| 20              | 2         | 8           | 9         | 0.00000 | -355.9500     | 1.00000 | -355.9500     |
| 21              | 2         | 2           | 9         | 0.00000 | -355.9500     | 1.00000 | -355.9500     |
| 22              | 2         | 9           | 9         | 0.00000 | -355.9500     | 1.00000 | -355.9500     |
| 23              | 2         | 10          | 9         | 0.00000 | -355.9500     | 1.00000 | -355.9500     |
| 24              | 2         | 11          | 9         | 0.00000 | -355.9500     | 1.00000 | -355.9500     |
| 25              | 2         | 12          | 9         | 0.00000 | -355.9500     | 1.00000 | -355.9500     |

*Bijlage G. Berekening doorsnede zinkelement.*

|    |   |    |   |         |           |         |           |
|----|---|----|---|---------|-----------|---------|-----------|
| 26 | 2 | 3  | 9 | 0.00000 | -355.9500 | 1.00000 | -355.9500 |
| 27 | 2 | 13 | 9 | 0.00000 | -355.9500 | 1.00000 | -355.9500 |
| 28 | 2 | 1  | 8 | 0.00000 | 448.0000  | 1.00000 | 275.8000  |
| 29 | 2 | 4  | 8 | 0.00000 | -275.8000 | 1.00000 | -448.0000 |
| 30 | 3 | 14 | 9 | 0.00000 | 304.5000  | 1.00000 | 304.5000  |
| 31 | 3 | 6  | 9 | 0.00000 | 304.5000  | 1.00000 | 304.5000  |
| 32 | 3 | 15 | 9 | 0.00000 | 304.5000  | 1.00000 | 304.5000  |
| 33 | 3 | 16 | 9 | 0.00000 | 304.5000  | 1.00000 | 304.5000  |
| 34 | 3 | 17 | 9 | 0.00000 | 304.5000  | 1.00000 | 304.5000  |
| 35 | 3 | 18 | 9 | 0.00000 | 304.5000  | 1.00000 | 304.5000  |
| 36 | 3 | 5  | 9 | 0.00000 | 304.5000  | 1.00000 | 304.5000  |
| 37 | 3 | 19 | 9 | 0.00000 | 304.5000  | 1.00000 | 304.5000  |
| 38 | 4 | 14 | 9 | 0.00000 | 136.8900  | 1.00000 | 136.8900  |
| 39 | 4 | 6  | 9 | 0.00000 | 136.8900  | 1.00000 | 136.8900  |
| 40 | 4 | 15 | 9 | 0.00000 | 136.8900  | 1.00000 | 136.8900  |
| 41 | 4 | 16 | 9 | 0.00000 | 136.8900  | 1.00000 | 136.8900  |
| 42 | 4 | 17 | 9 | 0.00000 | 136.8900  | 1.00000 | 136.8900  |
| 43 | 4 | 18 | 9 | 0.00000 | 136.8900  | 1.00000 | 136.8900  |
| 44 | 4 | 5  | 9 | 0.00000 | 136.8900  | 1.00000 | 136.8900  |
| 45 | 4 | 19 | 9 | 0.00000 | 136.8900  | 1.00000 | 136.8900  |

Belastingcombinatie 1

```

=====
Bel.      Verm.
geval     factor
=====
1         1.00000
2         1.00000
3         1.00000
4         1.00000
5         1.00000
=====

```

Bijlage G. Berekening doorsnede zinkelement.

Staafrachten in lokaal assenstelsel BELASTINGCOMBINATIE 1  
 "Bel.geval 1+2+3+4+5"

| Stf nr. | St knp | End knp | Fx beg (kN) | Fx end (kN) | Fy beg (kN) | Fy end (kN) | Tz beg (kNm) | Tz end (kNm) |
|---------|--------|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| 1       | 1      | 2       | 2235.420    | -2061.269   | 1505.496    | 1264.849    | 2548.034     | -2467.854    |
| 2       | 7      | 8       | 1399.943    | -1399.943   | 1521.610    | 1365.560    | 853.637      | -269.230     |
| 3       | 11     | 12      | 1399.943    | -1399.943   | 1365.560    | 1521.610    | 269.230      | -853.637     |
| 4       | 4      | 5       | 2061.269    | -2235.420   | 1264.849    | 1505.496    | 2467.854     | -2548.034    |
| 5       | 17     | 18      | 1778.376    | -1778.376   | -1373.654   | -1667.061   | 358.439      | 740.372      |
| 6       | 13     | 14      | 1778.376    | -1778.376   | -1667.061   | -1373.654   | -740.372     | -358.439     |
| 7       | 6      | 3       | 5565.014    | -5390.863   | -0.000      | 0.000       | -0.000       | -0.000       |
| 8       | 2      | 7       | 1399.943    | -1399.943   | 1887.807    | -1521.610   | 2473.110     | -853.637     |
| 9       | 8      | 9       | 1399.943    | -1399.943   | -1365.560   | 1943.765    | 269.230      | -2751.224    |
| 10      | 9      | 3       | 1399.943    | -1399.943   | -1943.765   | 2695.432    | 2751.224     | -7274.441    |
| 11      | 3      | 10      | 1399.943    | -1399.943   | 2695.432    | -1943.765   | 7274.441     | -2751.224    |
| 12      | 10     | 11      | 1399.943    | -1399.943   | 1943.765    | -1365.560   | 2751.224     | -269.230     |
| 13      | 12     | 4       | 1399.943    | -1399.943   | -1521.610   | 1887.807    | 853.637      | -2473.110    |
| 14      | 1      | 13      | 1778.376    | -1778.376   | -2052.733   | 1667.061    | -2507.275    | 740.372      |
| 15      | 14     | 15      | 1778.376    | -1778.376   | 1373.654    | -1982.609   | 358.439      | 2158.758     |
| 16      | 15     | 6       | 1778.376    | -1778.376   | 1982.609    | -2774.250   | -2158.758    | 6796.696     |
| 17      | 6      | 16      | 1778.376    | -1778.376   | -2774.250   | 1982.609    | -6796.696    | 2158.758     |
| 18      | 16     | 17      | 1778.376    | -1778.376   | -1982.609   | 1373.654    | -2158.758    | -358.439     |
| 19      | 18     | 5       | 1778.376    | -1778.376   | 1667.061    | -2052.733   | -740.372     | 2507.275     |

Staafrachten in globaal assenstelsel BELASTINGCOMBINATIE 1  
 "Bel.geval 1+2+3+4+5"

| Stf nr. | St knp | End knp | Fx beg (kN) | Fx end (kN) | Fy beg (kN) | Fy end (kN) | Tz beg (kNm) | Tz end (kNm) |
|---------|--------|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| 1       | 1      | 2       | -1505.496   | -1264.849   | 2235.420    | -2061.269   | 2548.034     | -2467.854    |
| 2       | 7      | 8       | 1399.943    | -1399.943   | 1521.610    | 1365.560    | 853.637      | -269.230     |
| 3       | 11     | 12      | 1399.943    | -1399.943   | 1365.560    | 1521.610    | 269.230      | -853.637     |
| 4       | 4      | 5       | 1264.849    | 1505.496    | -2061.269   | 2235.420    | 2467.854     | -2548.034    |
| 5       | 17     | 18      | 1778.376    | -1778.376   | -1373.654   | -1667.061   | 358.439      | 740.372      |
| 6       | 13     | 14      | 1778.376    | -1778.376   | -1667.061   | -1373.654   | -740.372     | -358.439     |
| 7       | 6      | 3       | 0.000       | -0.000      | 5565.014    | -5390.863   | -0.000       | -0.000       |
| 8       | 2      | 7       | 1399.943    | -1399.943   | 1887.807    | -1521.610   | 2473.110     | -853.637     |
| 9       | 8      | 9       | 1399.943    | -1399.943   | -1365.560   | 1943.765    | 269.230      | -2751.224    |
| 10      | 9      | 3       | 1399.943    | -1399.943   | -1943.765   | 2695.432    | 2751.224     | -7274.441    |
| 11      | 3      | 10      | 1399.943    | -1399.943   | 2695.432    | -1943.765   | 7274.441     | -2751.224    |
| 12      | 10     | 11      | 1399.943    | -1399.943   | 1943.765    | -1365.560   | 2751.224     | -269.230     |
| 13      | 12     | 4       | 1399.943    | -1399.943   | -1521.610   | 1887.807    | 853.637      | -2473.110    |
| 14      | 1      | 13      | 1778.376    | -1778.376   | -2052.733   | 1667.061    | -2507.275    | 740.372      |
| 15      | 14     | 15      | 1778.376    | -1778.376   | 1373.654    | -1982.609   | 358.439      | 2158.758     |
| 16      | 15     | 6       | 1778.376    | -1778.376   | 1982.609    | -2774.250   | -2158.758    | 6796.696     |
| 17      | 6      | 16      | 1778.376    | -1778.376   | -2774.250   | 1982.609    | -6796.696    | 2158.758     |
| 18      | 16     | 17      | 1778.376    | -1778.376   | -1982.609   | 1373.654    | -2158.758    | -358.439     |
| 19      | 18     | 5       | 1778.376    | -1778.376   | 1667.061    | -2052.733   | -740.372     | 2507.275     |

Bijlage G. Berekening doorsnede zinkelement.

Extreme veldmomenten BELASTINGCOMBINATIE 1

"Bel.geval 1+2+3+4+5"

| Stf nr. | Beg knp | End knp | M beg (kNm) | M end (kNm) | M min (kNm) | Mmin plaats | M max (kNm) | Mmax plaats |
|---------|---------|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 1       | 1       | 2       | 2548.034    | -2467.854   | -145.652    | 0.4840157   | 2548.034    | 0.0000000   |
| 2       | 7       | 8       | 853.637     | -269.230    | -2149.576   | 0.5270247   | 853.637     | 0.0000000   |
| 3       | 11      | 12      | 269.230     | -853.637    | -2149.576   | 0.4729753   | 853.637     | 1.0000000   |
| 4       | 4       | 5       | 2467.854    | -2548.034   | -145.652    | 0.5159843   | 2548.034    | 1.0000000   |
| 5       | 17      | 18      | 358.439     | 740.372     | -740.372    | 1.0000000   | 2682.410    | 0.4517535   |
| 6       | 13      | 14      | -740.372    | -358.439    | -740.372    | 0.0000000   | 2682.410    | 0.5482465   |

Oplegreacties in globaal assenstelsel BELASTINGCOMBINATIE 1

"Bel.geval 1+2+3+4+5"

| Oplegging nummer | Knoop nummer | Oplegging type | Fx (kN)  | Fy (kN)  | Tz (kNm) |
|------------------|--------------|----------------|----------|----------|----------|
| 1                | 6            | 3              | 0.00000  | 16.51375 | 0.00000  |
| 2                | 3            | 1              | -0.00000 | 0.00000  | 0.00000  |

Verplaatsingen BELASTING COMBINATIE 1

"Bel.geval 1+2+3+4+5"

| Knoop nummer | ux (m)   | uy (m)   | phi z (rad) |
|--------------|----------|----------|-------------|
| 1            | 0.00052  | -0.00160 | 0.00144     |
| 2            | 0.00048  | -0.00217 | -0.00148    |
| 3            | 0.00000  | -0.00146 | -0.00000    |
| 4            | -0.00048 | -0.00217 | 0.00148     |
| 5            | -0.00052 | -0.00160 | -0.00144    |
| 6            | 0.00000  | 0.00000  | -0.00000    |
| 7            | 0.00044  | -0.00374 | -0.00178    |
| 8            | 0.00012  | -0.00505 | 0.00170     |
| 9            | 0.00006  | -0.00278 | 0.00117     |
| 10           | -0.00006 | -0.00278 | -0.00117    |
| 11           | -0.00012 | -0.00505 | -0.00170    |
| 12           | -0.00044 | -0.00374 | 0.00178     |
| 13           | 0.00048  | -0.00013 | 0.00162     |
| 14           | 0.00014  | 0.00273  | -0.00115    |
| 15           | 0.00007  | 0.00108  | -0.00094    |
| 16           | -0.00007 | 0.00108  | 0.00094     |
| 17           | -0.00014 | 0.00273  | 0.00115     |
| 18           | -0.00048 | -0.00013 | -0.00162    |

Bijlage G. Berekening doorsnede zinkelement.

Snedekrachten staaf 1; BELASTINGCOMBINATIE 1  
 "Bel.geval 1+2+3+4+5"

| Snede<br>nummer | Plaats   | N<br>(kN) | V<br>(kN) | M<br>(kNm) | phi<br>(rad) | Doorbuiging<br>relatief<br>(m) |
|-----------------|----------|-----------|-----------|------------|--------------|--------------------------------|
| 0               | 0.000000 | -2235.420 | -1505.496 | 2548.034   | 0.00144      | 0.00000                        |
| 1               | 0.100000 | -2218.005 | -1169.143 | 1525.157   | 0.00064      | 0.00076                        |
| 2               | 0.200000 | -2200.590 | -845.971  | 754.713    | 0.00020      | 0.00106                        |
| 3               | 0.300000 | -2183.175 | -535.982  | 226.611    | 0.00002      | 0.00113                        |
| 4               | 0.400000 | -2165.759 | -239.175  | -69.240    | -0.00001     | 0.00112                        |
| 5               | 0.500000 | -2148.344 | 44.451    | -142.929   | 0.00004      | 0.00113                        |
| 6               | 0.600000 | -2130.929 | 314.894   | -4.549     | 0.00008      | 0.00117                        |
| 7               | 0.700000 | -2113.514 | 572.156   | 335.810    | 0.00002      | 0.00121                        |
| 8               | 0.800000 | -2096.099 | 816.235   | 868.057    | -0.00021     | 0.00114                        |
| 9               | 0.900000 | -2078.684 | 1047.133  | 1582.102   | -0.00069     | 0.00081                        |
| 10              | 1.000000 | -2061.269 | 1264.849  | 2467.854   | -0.00148     | -0.00000                       |

Snedekrachten staaf 2; BELASTINGCOMBINATIE 1  
 "Bel.geval 1+2+3+4+5"

| Snede<br>nummer | Plaats   | N<br>(kN) | V<br>(kN) | M<br>(kNm) | phi<br>(rad) | Doorbuiging<br>relatief<br>(m) |
|-----------------|----------|-----------|-----------|------------|--------------|--------------------------------|
| 0               | 0.000000 | -1399.943 | -1521.610 | 853.637    | -0.00178     | 0.00000                        |
| 1               | 0.100000 | -1399.943 | -1232.893 | -177.924   | -0.00187     | -0.00125                       |
| 2               | 0.200000 | -1399.943 | -944.176  | -993.237   | -0.00170     | -0.00247                       |
| 3               | 0.300000 | -1399.943 | -655.459  | -1592.300  | -0.00133     | -0.00349                       |
| 4               | 0.400000 | -1399.943 | -366.742  | -1975.114  | -0.00083     | -0.00417                       |
| 5               | 0.500000 | -1399.943 | -78.025   | -2141.680  | -0.00024     | -0.00445                       |
| 6               | 0.600000 | -1399.943 | 210.692   | -2091.996  | 0.00036      | -0.00427                       |
| 7               | 0.700000 | -1399.943 | 499.409   | -1826.063  | 0.00091      | -0.00366                       |
| 8               | 0.800000 | -1399.943 | 788.126   | -1343.881  | 0.00136      | -0.00267                       |
| 9               | 0.900000 | -1399.943 | 1076.843  | -645.450   | 0.00165      | -0.00140                       |
| 10              | 1.000000 | -1399.943 | 1365.560  | 269.230    | 0.00170      | -0.00000                       |

*Bijlage G. Berekening doorsnede zinkelement.*

Snedekrachten staaf 3; BELASTINGCOMBINATIE 1  
 "Bel.geval 1+2+3+4+5"

| Snede<br>nummer | Plaats   | N<br>(kN) | V<br>(kN) | M<br>(kNm) | phi<br>(rad) | Doorbuiging<br>relatief<br>(m) |
|-----------------|----------|-----------|-----------|------------|--------------|--------------------------------|
| 0               | 0.000000 | -1399.943 | -1365.560 | 269.230    | -0.00170     | 0.00000                        |
| 1               | 0.100000 | -1399.943 | -1076.843 | -645.450   | -0.00165     | -0.00140                       |
| 2               | 0.200000 | -1399.943 | -788.126  | -1343.881  | -0.00136     | -0.00267                       |
| 3               | 0.300000 | -1399.943 | -499.409  | -1826.063  | -0.00091     | -0.00366                       |
| 4               | 0.400000 | -1399.943 | -210.692  | -2091.996  | -0.00036     | -0.00427                       |
| 5               | 0.500000 | -1399.943 | 78.025    | -2141.680  | 0.00024      | -0.00445                       |
| 6               | 0.600000 | -1399.943 | 366.742   | -1975.114  | 0.00083      | -0.00417                       |
| 7               | 0.700000 | -1399.943 | 655.459   | -1592.300  | 0.00133      | -0.00349                       |
| 8               | 0.800000 | -1399.943 | 944.176   | -993.237   | 0.00170      | -0.00247                       |
| 9               | 0.900000 | -1399.943 | 1232.893  | -177.924   | 0.00187      | -0.00125                       |
| 10              | 1.000000 | -1399.943 | 1521.610  | 853.637    | 0.00178      | -0.00000                       |

Snedekrachten staaf 4; BELASTINGCOMBINATIE 1  
 "Bel.geval 1+2+3+4+5"

| Snede<br>nummer | Plaats   | N<br>(kN) | V<br>(kN) | M<br>(kNm) | phi<br>(rad) | Doorbuiging<br>relatief<br>(m) |
|-----------------|----------|-----------|-----------|------------|--------------|--------------------------------|
| 0               | 0.000000 | -2061.269 | -1264.849 | 2467.854   | 0.00148      | 0.00000                        |
| 1               | 0.100000 | -2078.684 | -1047.133 | 1582.102   | 0.00069      | 0.00081                        |
| 2               | 0.200000 | -2096.099 | -816.235  | 868.057    | 0.00021      | 0.00114                        |
| 3               | 0.300000 | -2113.514 | -572.156  | 335.810    | -0.00002     | 0.00121                        |
| 4               | 0.400000 | -2130.929 | -314.894  | -4.549     | -0.00008     | 0.00117                        |
| 5               | 0.500000 | -2148.344 | -44.451   | -142.929   | -0.00004     | 0.00113                        |
| 6               | 0.600000 | -2165.759 | 239.175   | -69.240    | 0.00001      | 0.00112                        |
| 7               | 0.700000 | -2183.175 | 535.982   | 226.611    | -0.00002     | 0.00113                        |
| 8               | 0.800000 | -2200.590 | 845.971   | 754.713    | -0.00020     | 0.00106                        |
| 9               | 0.900000 | -2218.005 | 1169.143  | 1525.157   | -0.00064     | 0.00076                        |
| 10              | 1.000000 | -2235.420 | 1505.496  | 2548.034   | -0.00144     | -0.00000                       |

Bijlage G. Berekening doorsnede zinkelement.

Snedekrachten staaf 5; BELASTINGCOMBINATIE 1  
 "Bel.geval 1+2+3+4+5"

| Snede<br>nummer | Plaats   | N<br>(kN) | V<br>(kN) | M<br>(kNm) | phi<br>(rad) | Doorbuiging<br>relatief<br>(m) |
|-----------------|----------|-----------|-----------|------------|--------------|--------------------------------|
| 0               | 0.000000 | -1778.376 | 1373.654  | 358.439    | 0.00115      | 0.00000                        |
| 1               | 0.100000 | -1778.376 | 1069.582  | 1273.431   | 0.00102      | 0.00111                        |
| 2               | 0.200000 | -1778.376 | 765.511   | 1960.673   | 0.00075      | 0.00207                        |
| 3               | 0.300000 | -1778.376 | 461.439   | 2420.166   | 0.00039      | 0.00279                        |
| 4               | 0.400000 | -1778.376 | 157.368   | 2651.909   | -0.00002     | 0.00321                        |
| 5               | 0.500000 | -1778.376 | -146.704  | 2655.903   | -0.00046     | 0.00332                        |
| 6               | 0.600000 | -1778.376 | -450.775  | 2432.147   | -0.00087     | 0.00311                        |
| 7               | 0.700000 | -1778.376 | -754.847  | 1980.642   | -0.00124     | 0.00260                        |
| 8               | 0.800000 | -1778.376 | -1058.918 | 1301.387   | -0.00151     | 0.00185                        |
| 9               | 0.900000 | -1778.376 | -1362.990 | 394.382    | -0.00165     | 0.00095                        |
| 10              | 1.000000 | -1778.376 | -1667.061 | -740.372   | -0.00162     | 0.00000                        |

Snedekrachten staaf 6; BELASTINGCOMBINATIE 1  
 "Bel.geval 1+2+3+4+5"

| Snede<br>nummer | Plaats   | N<br>(kN) | V<br>(kN) | M<br>(kNm) | phi<br>(rad) | Doorbuiging<br>relatief<br>(m) |
|-----------------|----------|-----------|-----------|------------|--------------|--------------------------------|
| 0               | 0.000000 | -1778.376 | 1667.061  | -740.372   | 0.00162      | 0.00000                        |
| 1               | 0.100000 | -1778.376 | 1362.990  | 394.382    | 0.00165      | 0.00095                        |
| 2               | 0.200000 | -1778.376 | 1058.918  | 1301.387   | 0.00151      | 0.00185                        |
| 3               | 0.300000 | -1778.376 | 754.847   | 1980.642   | 0.00124      | 0.00260                        |
| 4               | 0.400000 | -1778.376 | 450.775   | 2432.147   | 0.00087      | 0.00311                        |
| 5               | 0.500000 | -1778.376 | 146.704   | 2655.903   | 0.00046      | 0.00332                        |
| 6               | 0.600000 | -1778.376 | -157.368  | 2651.909   | 0.00002      | 0.00321                        |
| 7               | 0.700000 | -1778.376 | -461.439  | 2420.166   | -0.00039     | 0.00279                        |
| 8               | 0.800000 | -1778.376 | -765.511  | 1960.673   | -0.00075     | 0.00207                        |
| 9               | 0.900000 | -1778.376 | -1069.582 | 1273.431   | -0.00102     | 0.00111                        |
| 10              | 1.000000 | -1778.376 | -1373.654 | 358.439    | -0.00115     | 0.00000                        |

Bijlage G. Berekening doorsnede zinkelement.

Snedekrachten staaf 7; BELASTINGCOMBINATIE 1  
 "Bel.geval 1+2+3+4+5"

| Snede<br>nummer | Plaats   | N<br>(kN) | V<br>(kN) | M<br>(kNm) | phi<br>(rad) | Doorbuiging<br>relatief<br>(m) |
|-----------------|----------|-----------|-----------|------------|--------------|--------------------------------|
| 0               | 0.000000 | -5565.014 | 0.000     | -0.000     | -0.00000     | 0.00000                        |
| 1               | 0.100000 | -5547.599 | 0.000     | -0.000     | -0.00000     | -0.00000                       |
| 2               | 0.200000 | -5530.184 | 0.000     | -0.000     | -0.00000     | -0.00000                       |
| 3               | 0.300000 | -5512.769 | 0.000     | -0.000     | 0.00000      | -0.00000                       |
| 4               | 0.400000 | -5495.354 | 0.000     | -0.000     | 0.00000      | -0.00000                       |
| 5               | 0.500000 | -5477.939 | 0.000     | -0.000     | 0.00000      | -0.00000                       |
| 6               | 0.600000 | -5460.524 | 0.000     | 0.000      | 0.00000      | 0.00000                        |
| 7               | 0.700000 | -5443.109 | 0.000     | 0.000      | 0.00000      | 0.00000                        |
| 8               | 0.800000 | -5425.693 | 0.000     | 0.000      | -0.00000     | 0.00000                        |
| 9               | 0.900000 | -5408.278 | 0.000     | 0.000      | -0.00000     | 0.00000                        |
| 10              | 1.000000 | -5390.863 | 0.000     | 0.000      | -0.00000     | -0.00000                       |

Snedekrachten staaf 8; BELASTINGCOMBINATIE 1  
 "Bel.geval 1+2+3+4+5"

| Snede<br>nummer | Plaats   | N<br>(kN) | V<br>(kN) | M<br>(kNm) | phi<br>(rad) | Doorbuiging<br>relatief<br>(m) |
|-----------------|----------|-----------|-----------|------------|--------------|--------------------------------|
| 0               | 0.000000 | -1399.943 | -1887.807 | 2473.110   | -0.00148     | 0.00000                        |
| 1               | 0.100000 | -1399.943 | -1851.187 | 2295.508   | -0.00153     | 0.00001                        |
| 2               | 0.200000 | -1399.943 | -1814.567 | 2121.385   | -0.00157     | 0.00002                        |
| 3               | 0.300000 | -1399.943 | -1777.948 | 1950.740   | -0.00160     | 0.00003                        |
| 4               | 0.400000 | -1399.943 | -1741.328 | 1783.575   | -0.00164     | 0.00003                        |
| 5               | 0.500000 | -1399.943 | -1704.708 | 1619.888   | -0.00167     | 0.00004                        |
| 6               | 0.600000 | -1399.943 | -1668.089 | 1459.680   | -0.00170     | 0.00003                        |
| 7               | 0.700000 | -1399.943 | -1631.469 | 1302.951   | -0.00172     | 0.00003                        |
| 8               | 0.800000 | -1399.943 | -1594.849 | 1149.701   | -0.00174     | 0.00002                        |
| 9               | 0.900000 | -1399.943 | -1558.230 | 999.930    | -0.00176     | 0.00001                        |
| 10              | 1.000000 | -1399.943 | -1521.610 | 853.637    | -0.00178     | 0.00000                        |



*Bijlage G. Berekening doorsnede zinkelement.*

Snedekrachten staaf 9; BELASTINGCOMBINATIE 1  
 "Bel.geval 1+2+3+4+5"

| Snede<br>nummer | Plaats   | N<br>(kN) | V<br>(kN) | M<br>(kNm) | phi<br>(rad) | Doorbuiging<br>relatief<br>(m) |
|-----------------|----------|-----------|-----------|------------|--------------|--------------------------------|
| 0               | 0.000000 | -1399.943 | 1365.560  | 269.230    | 0.00170      | 0.00000                        |
| 1               | 0.100000 | -1399.943 | 1423.381  | 478.400    | 0.00169      | 0.00003                        |
| 2               | 0.200000 | -1399.943 | 1481.201  | 696.244    | 0.00167      | 0.00005                        |
| 3               | 0.300000 | -1399.943 | 1539.022  | 922.761    | 0.00164      | 0.00007                        |
| 4               | 0.400000 | -1399.943 | 1596.842  | 1157.950   | 0.00160      | 0.00009                        |
| 5               | 0.500000 | -1399.943 | 1654.663  | 1401.813   | 0.00155      | 0.00010                        |
| 6               | 0.600000 | -1399.943 | 1712.483  | 1654.349   | 0.00150      | 0.00010                        |
| 7               | 0.700000 | -1399.943 | 1770.304  | 1915.558   | 0.00143      | 0.00009                        |
| 8               | 0.800000 | -1399.943 | 1828.124  | 2185.440   | 0.00136      | 0.00007                        |
| 9               | 0.900000 | -1399.943 | 1885.945  | 2463.995   | 0.00127      | 0.00004                        |
| 10              | 1.000000 | -1399.943 | 1943.765  | 2751.224   | 0.00117      | -0.00000                       |

Snedekrachten staaf 10; BELASTINGCOMBINATIE 1  
 "Bel.geval 1+2+3+4+5"

| Snede<br>nummer | Plaats   | N<br>(kN) | V<br>(kN) | M<br>(kNm) | phi<br>(rad) | Doorbuiging<br>relatief<br>(m) |
|-----------------|----------|-----------|-----------|------------|--------------|--------------------------------|
| 0               | 0.000000 | -1399.943 | 1943.765  | 2751.224   | 0.00117      | 0.00000                        |
| 1               | 0.100000 | -1399.943 | 2018.932  | 3137.587   | 0.00110      | 0.00009                        |
| 2               | 0.200000 | -1399.943 | 2094.098  | 3538.607   | 0.00102      | 0.00017                        |
| 3               | 0.300000 | -1399.943 | 2169.265  | 3954.285   | 0.00093      | 0.00022                        |
| 4               | 0.400000 | -1399.943 | 2244.432  | 4384.620   | 0.00083      | 0.00026                        |
| 5               | 0.500000 | -1399.943 | 2319.598  | 4829.613   | 0.00072      | 0.00028                        |
| 6               | 0.600000 | -1399.943 | 2394.765  | 5289.264   | 0.00060      | 0.00028                        |
| 7               | 0.700000 | -1399.943 | 2469.932  | 5763.572   | 0.00047      | 0.00025                        |
| 8               | 0.800000 | -1399.943 | 2545.098  | 6252.537   | 0.00032      | 0.00020                        |
| 9               | 0.900000 | -1399.943 | 2620.265  | 6756.160   | 0.00017      | 0.00012                        |
| 10              | 1.000000 | -1399.943 | 2695.432  | 7274.441   | -0.00000     | -0.00000                       |

*Bijlage G. Berekening doorsnede zinkelement.*

Snedekrachten staaf 11; BELASTINGCOMBINATIE 1  
 "Bel.geval 1+2+3+4+5"

| Snede<br>nummer | Plaats   | N<br>(kN) | V<br>(kN) | M<br>(kNm) | phi<br>(rad) | Doorbuiging<br>relatief<br>(m) |
|-----------------|----------|-----------|-----------|------------|--------------|--------------------------------|
| 0               | 0.000000 | -1399.943 | -2695.432 | 7274.441   | -0.00000     | 0.00000                        |
| 1               | 0.100000 | -1399.943 | -2620.265 | 6756.160   | -0.00017     | 0.00012                        |
| 2               | 0.200000 | -1399.943 | -2545.098 | 6252.537   | -0.00032     | 0.00020                        |
| 3               | 0.300000 | -1399.943 | -2469.932 | 5763.572   | -0.00047     | 0.00025                        |
| 4               | 0.400000 | -1399.943 | -2394.765 | 5289.264   | -0.00060     | 0.00028                        |
| 5               | 0.500000 | -1399.943 | -2319.598 | 4829.613   | -0.00072     | 0.00028                        |
| 6               | 0.600000 | -1399.943 | -2244.432 | 4384.620   | -0.00083     | 0.00026                        |
| 7               | 0.700000 | -1399.943 | -2169.265 | 3954.285   | -0.00093     | 0.00022                        |
| 8               | 0.800000 | -1399.943 | -2094.098 | 3538.607   | -0.00102     | 0.00017                        |
| 9               | 0.900000 | -1399.943 | -2018.932 | 3137.587   | -0.00110     | 0.00009                        |
| 10              | 1.000000 | -1399.943 | -1943.765 | 2751.224   | -0.00117     | -0.00000                       |

Snedekrachten staaf 12; BELASTINGCOMBINATIE 1  
 "Bel.geval 1+2+3+4+5"

| Snede<br>nummer | Plaats   | N<br>(kN) | V<br>(kN) | M<br>(kNm) | phi<br>(rad) | Doorbuiging<br>relatief<br>(m) |
|-----------------|----------|-----------|-----------|------------|--------------|--------------------------------|
| 0               | 0.000000 | -1399.943 | -1943.765 | 2751.224   | -0.00117     | 0.00000                        |
| 1               | 0.100000 | -1399.943 | -1885.945 | 2463.995   | -0.00127     | 0.00004                        |
| 2               | 0.200000 | -1399.943 | -1828.124 | 2185.440   | -0.00136     | 0.00007                        |
| 3               | 0.300000 | -1399.943 | -1770.304 | 1915.558   | -0.00143     | 0.00009                        |
| 4               | 0.400000 | -1399.943 | -1712.483 | 1654.349   | -0.00150     | 0.00010                        |
| 5               | 0.500000 | -1399.943 | -1654.663 | 1401.813   | -0.00155     | 0.00010                        |
| 6               | 0.600000 | -1399.943 | -1596.842 | 1157.950   | -0.00160     | 0.00009                        |
| 7               | 0.700000 | -1399.943 | -1539.022 | 922.761    | -0.00164     | 0.00007                        |
| 8               | 0.800000 | -1399.943 | -1481.201 | 696.244    | -0.00167     | 0.00005                        |
| 9               | 0.900000 | -1399.943 | -1423.381 | 478.400    | -0.00169     | 0.00003                        |
| 10              | 1.000000 | -1399.943 | -1365.560 | 269.230    | -0.00170     | 0.00000                        |

Snedekrachten staaf 13; BELASTINGCOMBINATIE 1  
 "Bel.geval 1+2+3+4+5"

| Snede nummer | Plaats   | N<br>(kN) | V<br>(kN) | M<br>(kNm) | phi<br>(rad) | Doorbuiging<br>relatief<br>(m) |
|--------------|----------|-----------|-----------|------------|--------------|--------------------------------|
| 0            | 0.000000 | -1399.943 | 1521.610  | 853.637    | 0.00178      | 0.00000                        |
| 1            | 0.100000 | -1399.943 | 1558.230  | 999.930    | 0.00176      | 0.00001                        |
| 2            | 0.200000 | -1399.943 | 1594.849  | 1149.701   | 0.00174      | 0.00002                        |
| 3            | 0.300000 | -1399.943 | 1631.469  | 1302.951   | 0.00172      | 0.00003                        |
| 4            | 0.400000 | -1399.943 | 1668.089  | 1459.680   | 0.00170      | 0.00003                        |
| 5            | 0.500000 | -1399.943 | 1704.708  | 1619.888   | 0.00167      | 0.00004                        |
| 6            | 0.600000 | -1399.943 | 1741.328  | 1783.575   | 0.00164      | 0.00003                        |
| 7            | 0.700000 | -1399.943 | 1777.948  | 1950.740   | 0.00160      | 0.00003                        |
| 8            | 0.800000 | -1399.943 | 1814.567  | 2121.385   | 0.00157      | 0.00002                        |
| 9            | 0.900000 | -1399.943 | 1851.187  | 2295.508   | 0.00153      | 0.00001                        |
| 10           | 1.000000 | -1399.943 | 1887.807  | 2473.110   | 0.00148      | 0.00000                        |

Snedekrachten staaf 14; BELASTINGCOMBINATIE 1  
 "Bel.geval 1+2+3+4+5"

| Snede nummer | Plaats   | N<br>(kN) | V<br>(kN) | M<br>(kNm) | phi<br>(rad) | Doorbuiging<br>relatief<br>(m) |
|--------------|----------|-----------|-----------|------------|--------------|--------------------------------|
| 0            | 0.000000 | -1778.376 | 2052.733  | -2507.275  | 0.00144      | 0.00000                        |
| 1            | 0.100000 | -1778.376 | 2014.166  | -2314.097  | 0.00146      | -0.00001                       |
| 2            | 0.200000 | -1778.376 | 1975.599  | -2124.583  | 0.00149      | -0.00002                       |
| 3            | 0.300000 | -1778.376 | 1937.031  | -1938.733  | 0.00151      | -0.00002                       |
| 4            | 0.400000 | -1778.376 | 1898.464  | -1756.547  | 0.00153      | -0.00002                       |
| 5            | 0.500000 | -1778.376 | 1859.897  | -1578.025  | 0.00155      | -0.00002                       |
| 6            | 0.600000 | -1778.376 | 1821.330  | -1403.167  | 0.00157      | -0.00002                       |
| 7            | 0.700000 | -1778.376 | 1782.763  | -1231.972  | 0.00159      | -0.00002                       |
| 8            | 0.800000 | -1778.376 | 1744.196  | -1064.442  | 0.00160      | -0.00001                       |
| 9            | 0.900000 | -1778.376 | 1705.629  | -900.575   | 0.00161      | -0.00001                       |
| 10           | 1.000000 | -1778.376 | 1667.061  | -740.372   | 0.00162      | 0.00000                        |

*Bijlage G. Berekening doorsnede zinkelement.*

Snedekrachten staaf 15; BELASTINGCOMBINATIE 1  
 "Bel.geval 1+2+3+4+5"

| Snede nummer | Plaats   | N<br>(kN) | V<br>(kN) | M<br>(kNm) | phi<br>(rad) | Doorbuiging<br>relatief<br>(m) |
|--------------|----------|-----------|-----------|------------|--------------|--------------------------------|
| 0            | 0.000000 | -1778.376 | -1373.654 | 358.439    | -0.00115     | 0.00000                        |
| 1            | 0.100000 | -1778.376 | -1434.549 | 147.824    | -0.00116     | -0.00001                       |
| 2            | 0.200000 | -1778.376 | -1495.445 | -71.926    | -0.00116     | -0.00002                       |
| 3            | 0.300000 | -1778.376 | -1556.340 | -300.810   | -0.00116     | -0.00003                       |
| 4            | 0.400000 | -1778.376 | -1617.236 | -538.828   | -0.00115     | -0.00003                       |
| 5            | 0.500000 | -1778.376 | -1678.131 | -785.980   | -0.00113     | -0.00004                       |
| 6            | 0.600000 | -1778.376 | -1739.027 | -1042.267  | -0.00110     | -0.00004                       |
| 7            | 0.700000 | -1778.376 | -1799.922 | -1307.688  | -0.00107     | -0.00004                       |
| 8            | 0.800000 | -1778.376 | -1860.818 | -1582.244  | -0.00104     | -0.00003                       |
| 9            | 0.900000 | -1778.376 | -1921.713 | -1865.934  | -0.00099     | -0.00002                       |
| 10           | 1.000000 | -1778.376 | -1982.609 | -2158.758  | -0.00094     | 0.00000                        |

Snedekrachten staaf 16; BELASTINGCOMBINATIE 1  
 "Bel.geval 1+2+3+4+5"

| Snede nummer | Plaats   | N<br>(kN) | V<br>(kN) | M<br>(kNm) | phi<br>(rad) | Doorbuiging<br>relatief<br>(m) |
|--------------|----------|-----------|-----------|------------|--------------|--------------------------------|
| 0            | 0.000000 | -1778.376 | -1982.609 | -2158.758  | -0.00094     | 0.00000                        |
| 1            | 0.100000 | -1778.376 | -2061.773 | -2553.085  | -0.00089     | -0.00007                       |
| 2            | 0.200000 | -1778.376 | -2140.937 | -2962.849  | -0.00083     | -0.00013                       |
| 3            | 0.300000 | -1778.376 | -2220.101 | -3388.051  | -0.00076     | -0.00018                       |
| 4            | 0.400000 | -1778.376 | -2299.265 | -3828.689  | -0.00068     | -0.00021                       |
| 5            | 0.500000 | -1778.376 | -2378.430 | -4284.764  | -0.00060     | -0.00023                       |
| 6            | 0.600000 | -1778.376 | -2457.594 | -4756.277  | -0.00050     | -0.00023                       |
| 7            | 0.700000 | -1778.376 | -2536.758 | -5243.226  | -0.00039     | -0.00021                       |
| 8            | 0.800000 | -1778.376 | -2615.922 | -5745.612  | -0.00027     | -0.00016                       |
| 9            | 0.900000 | -1778.376 | -2695.086 | -6263.435  | -0.00014     | -0.00009                       |
| 10           | 1.000000 | -1778.376 | -2774.250 | -6796.696  | -0.00000     | -0.00000                       |

Bijlage G. Berekening doorsnede zinkelement.

Snedekrachten staaf 17; BELASTINGCOMBINATIE 1

"Bel.geval 1+2+3+4+5"

| Snede nummer | Plaats   | N<br>(kN) | V<br>(kN) | M<br>(kNm) | phi<br>(rad) | Doorbuiging<br>relatief<br>(m) |
|--------------|----------|-----------|-----------|------------|--------------|--------------------------------|
| 0            | 0.000000 | -1778.376 | 2774.250  | -6796.696  | -0.00000     | 0.00000                        |
| 1            | 0.100000 | -1778.376 | 2695.086  | -6263.435  | 0.00014      | -0.00009                       |
| 2            | 0.200000 | -1778.376 | 2615.922  | -5745.612  | 0.00027      | -0.00016                       |
| 3            | 0.300000 | -1778.376 | 2536.758  | -5243.226  | 0.00039      | -0.00021                       |
| 4            | 0.400000 | -1778.376 | 2457.594  | -4756.277  | 0.00050      | -0.00023                       |
| 5            | 0.500000 | -1778.376 | 2378.430  | -4284.764  | 0.00060      | -0.00023                       |
| 6            | 0.600000 | -1778.376 | 2299.265  | -3828.689  | 0.00068      | -0.00021                       |
| 7            | 0.700000 | -1778.376 | 2220.101  | -3388.051  | 0.00076      | -0.00018                       |
| 8            | 0.800000 | -1778.376 | 2140.937  | -2962.849  | 0.00083      | -0.00013                       |
| 9            | 0.900000 | -1778.376 | 2061.773  | -2553.085  | 0.00089      | -0.00007                       |
| 10           | 1.000000 | -1778.376 | 1982.609  | -2158.758  | 0.00094      | 0.00000                        |

Snedekrachten staaf 18; BELASTINGCOMBINATIE 1

"Bel.geval 1+2+3+4+5"

| Snede nummer | Plaats   | N<br>(kN) | V<br>(kN) | M<br>(kNm) | phi<br>(rad) | Doorbuiging<br>relatief<br>(m) |
|--------------|----------|-----------|-----------|------------|--------------|--------------------------------|
| 0            | 0.000000 | -1778.376 | 1982.609  | -2158.758  | 0.00094      | 0.00000                        |
| 1            | 0.100000 | -1778.376 | 1921.713  | -1865.934  | 0.00099      | -0.00002                       |
| 2            | 0.200000 | -1778.376 | 1860.818  | -1582.244  | 0.00104      | -0.00003                       |
| 3            | 0.300000 | -1778.376 | 1799.922  | -1307.688  | 0.00107      | -0.00004                       |
| 4            | 0.400000 | -1778.376 | 1739.027  | -1042.267  | 0.00110      | -0.00004                       |
| 5            | 0.500000 | -1778.376 | 1678.131  | -785.980   | 0.00113      | -0.00004                       |
| 6            | 0.600000 | -1778.376 | 1617.236  | -538.828   | 0.00115      | -0.00003                       |
| 7            | 0.700000 | -1778.376 | 1556.340  | -300.810   | 0.00116      | -0.00003                       |
| 8            | 0.800000 | -1778.376 | 1495.445  | -71.926    | 0.00116      | -0.00002                       |
| 9            | 0.900000 | -1778.376 | 1434.549  | 147.824    | 0.00116      | -0.00001                       |
| 10           | 1.000000 | -1778.376 | 1373.654  | 358.439    | 0.00115      | 0.00000                        |

*Bijlage G. Berekening doorsnede zinkelement.*

---

Snedekrachten staaf 19; BELASTINGCOMBINATIE 1  
"Bel.geval 1+2+3+4+5"

| Snede<br>nummer | Plaats   | N<br>(kN) | V<br>(kN) | M<br>(kNm) | phi<br>(rad) | Doorbuiging<br>relatief<br>(m) |
|-----------------|----------|-----------|-----------|------------|--------------|--------------------------------|
| 0               | 0.000000 | -1778.376 | -1667.061 | -740.372   | -0.00162     | 0.00000                        |
| 1               | 0.100000 | -1778.376 | -1705.629 | -900.575   | -0.00161     | -0.00001                       |
| 2               | 0.200000 | -1778.376 | -1744.196 | -1064.442  | -0.00160     | -0.00001                       |
| 3               | 0.300000 | -1778.376 | -1782.763 | -1231.972  | -0.00159     | -0.00002                       |
| 4               | 0.400000 | -1778.376 | -1821.330 | -1403.167  | -0.00157     | -0.00002                       |
| 5               | 0.500000 | -1778.376 | -1859.897 | -1578.025  | -0.00155     | -0.00002                       |
| 6               | 0.600000 | -1778.376 | -1898.464 | -1756.547  | -0.00153     | -0.00002                       |
| 7               | 0.700000 | -1778.376 | -1937.031 | -1938.733  | -0.00151     | -0.00002                       |
| 8               | 0.800000 | -1778.376 | -1975.599 | -2124.583  | -0.00149     | -0.00002                       |
| 9               | 0.900000 | -1778.376 | -2014.166 | -2314.097  | -0.00146     | -0.00001                       |
| 10              | 1.000000 | -1778.376 | -2052.733 | -2507.275  | -0.00144     | 0.00000                        |

**Bijlage I. Berekening doorsnede zinkelement  $\gamma=1.0$ .**

**Uitvoer PC-Frame.**

**Veiligheidsfactor = 1.0**

**Gebruikstoestand.**

=====

TU-Delft, Civiele Techniek

Bestandsnaam : TUN\_TOT4  
Project : Ondergronds Station Delft  
Onderdeel : Berekening niet-prism. staven.  $\gamma=1.0$  (gebruikstoestand)  
Datum : 30/5/1993

=====

Berekeningsresultaten van programma PC-FRAME      Versie 3.50    september 1990

Eenheden:    lengte : m  
              kracht : kN  
              hoek  : rad

Probleem specificatie

=====

18 Knopen  
19 Staven  
9 Profielen  
2 Opleggingen  
0 Voorgescreven verplaatsingen  
5 Belastinggevallen  
1 Belastingcombinaties  
12 Knoopbelastingen  
45 Staafbelastingen



Knoopcoördinaten

| Knoop<br>nummer | X<br>coördinaat<br>(m) | Y<br>coördinaat<br>(m) |
|-----------------|------------------------|------------------------|
| 1               | 0.0000                 | 0.0000                 |
| 2               | 0.0000                 | 7.6550                 |
| 3               | 11.8900                | 7.6550                 |
| 4               | 23.7800                | 7.6550                 |
| 5               | 23.7800                | 0.0000                 |
| 6               | 11.8900                | 0.0000                 |
| 7               | 0.9500                 | 7.6550                 |
| 8               | 8.4400                 | 7.6550                 |
| 9               | 9.9400                 | 7.6550                 |
| 10              | 13.8400                | 7.6550                 |
| 11              | 15.3400                | 7.6550                 |
| 12              | 22.8300                | 7.6550                 |
| 13              | 0.9500                 | 0.0000                 |
| 14              | 8.4400                 | 0.0000                 |
| 15              | 9.9400                 | 0.0000                 |
| 16              | 13.8400                | 0.0000                 |
| 17              | 15.3400                | 0.0000                 |
| 18              | 22.8300                | 0.0000                 |

Staafgegevens

| Staaf<br>nummer | Beg<br>knoop | End<br>knoop | Staaf<br>type | Profiel<br>nr/type | Lengte<br>(m) |
|-----------------|--------------|--------------|---------------|--------------------|---------------|
| 1               | 1            | 2            | 1             | 3                  | 7.655         |
| 2               | 7            | 8            | 1             | 2                  | 7.490         |
| 3               | 11           | 12           | 1             | 2                  | 7.490         |
| 4               | 4            | 5            | 1             | 3                  | 7.655         |
| 5               | 17           | 18           | 1             | 1                  | 7.490         |
| 6               | 13           | 14           | 1             | 1                  | 7.490         |
| 7               | 6            | 3            | 1             | 3                  | 7.655         |
| 8               | 2            | 7            | 1             | 6                  | 0.950         |
| 9               | 8            | 9            | 1             | 5                  | 1.500         |
| 10              | 9            | 3            | 1             | 4                  | 1.950         |
| 11              | 3            | 10           | 1             | 4                  | 1.950         |
| 12              | 10           | 11           | 1             | 5                  | 1.500         |
| 13              | 12           | 4            | 1             | 6                  | 0.950         |
| 14              | 1            | 13           | 1             | 9                  | 0.950         |
| 15              | 14           | 15           | 1             | 8                  | 1.500         |
| 16              | 15           | 6            | 1             | 7                  | 1.950         |
| 17              | 6            | 16           | 1             | 7                  | 1.950         |
| 18              | 16           | 17           | 1             | 8                  | 1.500         |
| 19              | 18           | 5            | 1             | 9                  | 0.950         |

Staaf type :

- 1 -----
- 2 o----
- 3 ----o
- 4 o----o

Bijlage I. Berekening doorsnede zinkelement  $\gamma=1.0$ .

Profielgegevens

| Profiel nummer | Elasticiteits modulus (kN/m <sup>2</sup> ) | Oppervlakte doorsnede (m <sup>2</sup> ) | Traagheids moment (m <sup>4</sup> ) | Weerstands moment (m <sup>3</sup> ) | Naam profiel |
|----------------|--|---|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------|
| 1              | 3.20000E+07                                | 1.20000E+00                             | 1.44000E-01                         | 2.40000E-01                         | BETON_120    |
| 2              | 3.20000E+07                                | 1.00000E+00                             | 8.33333E-02                         | 1.66667E-01                         | BETON_100    |
| 3              | 3.20000E+07                                | 9.00000E-01                             | 6.07500E-02                         | 1.35000E-01                         | BETON_09     |
| 4              | 3.20000E+07                                | 1.45000E+00                             | 2.54052E-01                         | 3.50417E-01                         | BETON_145    |
| 5              | 3.20000E+07                                | 1.15000E+00                             | 1.26740E-01                         | 2.20417E-01                         | BETON_115    |
| 6              | 3.20000E+07                                | 1.25000E+00                             | 1.62760E-01                         | 2.60400E-01                         | BETON_125    |
| 7              | 3.20000E+07                                | 1.50000E+00                             | 2.81250E-01                         | 3.75000E-01                         | BETON_150    |
| 8              | 3.20000E+07                                | 1.30000E+00                             | 1.83080E-01                         | 2.81600E-01                         | BETON_130    |
| 9              | 3.20000E+07                                | 1.45000E+00                             | 2.54052E-01                         | 3.50417E-01                         | BETON_145    |

Opleggingen

Oplegging type :

| Oplegging nummer | Knoop nummer | Oplegging type |
|------------------|--------------|----------------|
| 1                | 6            | 3              |
| 2                | 3            | 1              |

Knoopbelastingen (kN) (kNm)

| Knoopbel nummer | Belasting geval | Knoop nummer | Type | Kracht/ koppel | Type: |
|-----------------|-----------------|--------------|------|----------------|-------|
| 1               | 5               | 1            | 2    | 125.54100      | 1 Fx  |
| 2               | 5               | 2            | 2    | -117.85500     | 2 Fy  |
| 3               | 5               | 4            | 2    | -117.85500     | 3 Tz  |
| 4               | 5               | 5            | 2    | 125.54100      |       |
| 5               | 5               | 1            | 1    | 181.92000      |       |
| 6               | 5               | 5            | 1    | -181.92000     |       |
| 7               | 5               | 2            | 1    | 90.06250       |       |
| 8               | 5               | 4            | 1    | -90.06250      |       |
| 9               | 5               | 1            | 3    | 26.32927       |       |
| 10              | 5               | 2            | 3    | 4.00175        |       |
| 11              | 5               | 4            | 3    | -4.00175       |       |
| 12              | 5               | 5            | 3    | -26.32927      |       |

Bijlage I. Berekening doorsnede zinkelement  $\gamma=1.0$ .

| Staaftbelastingen |           |            |           | (kN)    | (kNm)         | (kN/m)  |               |  |
|-------------------|-----------|------------|-----------|---------|---------------|---------|---------------|--|
| =====             |           |            |           |         |               |         |               |  |
| Bel. type:        | 1 Tz      | 5 FyG      | 9 qyG/xL  |         |               |         |               |  |
|                   | 2 FxL     | 6 qxL/xL   | 10 qxG/yG |         |               |         |               |  |
|                   | 3 FyL     | 7 qyL/xL   | 11 qyG/xG |         |               |         |               |  |
|                   | 4 FxG     | 8 qxG/xL   |           |         |               |         |               |  |
| =====             |           |            |           |         |               |         |               |  |
| Bel. nr.          | Bel. gev. | Staaft nr. | Bel. type | Beg     | Belasting beg | End     | Belasting end |  |
| =====             |           |            |           |         |               |         |               |  |
| 1                 | 1         | 1          | 6         | 0.00000 | -18.9585      | 1.00000 | -18.9585      |  |
| 2                 | 1         | 8          | 9         | 0.00000 | -24.6000      | 1.00000 | -24.6000      |  |
| 3                 | 1         | 2          | 9         | 0.00000 | -24.6000      | 1.00000 | -24.6000      |  |
| 4                 | 1         | 9          | 9         | 0.00000 | -24.6000      | 1.00000 | -24.6000      |  |
| 5                 | 1         | 10         | 9         | 0.00000 | -24.6000      | 1.00000 | -24.6000      |  |
| 6                 | 1         | 11         | 9         | 0.00000 | -24.6000      | 1.00000 | -24.6000      |  |
| 7                 | 1         | 12         | 9         | 0.00000 | -24.6000      | 1.00000 | -24.6000      |  |
| 8                 | 1         | 3          | 9         | 0.00000 | -24.6000      | 1.00000 | -24.6000      |  |
| 9                 | 1         | 13         | 9         | 0.00000 | -24.6000      | 1.00000 | -24.6000      |  |
| 10                | 1         | 14         | 9         | 0.00000 | -29.5200      | 1.00000 | -29.5200      |  |
| 11                | 1         | 6          | 9         | 0.00000 | -29.5200      | 1.00000 | -29.5200      |  |
| 12                | 1         | 15         | 9         | 0.00000 | -29.5200      | 1.00000 | -29.5200      |  |
| 13                | 1         | 16         | 9         | 0.00000 | -29.5200      | 1.00000 | -29.5200      |  |
| 14                | 1         | 17         | 9         | 0.00000 | -29.5200      | 1.00000 | -29.5200      |  |
| 15                | 1         | 18         | 9         | 0.00000 | -29.5200      | 1.00000 | -29.5200      |  |
| 16                | 1         | 5          | 9         | 0.00000 | -29.5200      | 1.00000 | -29.5200      |  |
| 17                | 1         | 19         | 9         | 0.00000 | -29.5200      | 1.00000 | -29.5200      |  |
| 18                | 1         | 4          | 6         | 0.00000 | 18.9585       | 1.00000 | 18.9585       |  |
| 19                | 1         | 7          | 6         | 0.00000 | -18.9585      | 1.00000 | -18.9585      |  |
| 20                | 2         | 8          | 9         | 0.00000 | -237.3000     | 1.00000 | -237.3000     |  |
| 21                | 2         | 2          | 9         | 0.00000 | -237.3000     | 1.00000 | -237.3000     |  |
| 22                | 2         | 9          | 9         | 0.00000 | -237.3000     | 1.00000 | -237.3000     |  |
| 23                | 2         | 10         | 9         | 0.00000 | -237.3000     | 1.00000 | -237.3000     |  |
| 24                | 2         | 11         | 9         | 0.00000 | -237.3000     | 1.00000 | -237.3000     |  |
| 25                | 2         | 12         | 9         | 0.00000 | -237.3000     | 1.00000 | -237.3000     |  |
| 26                | 2         | 3          | 9         | 0.00000 | -237.3000     | 1.00000 | -237.3000     |  |
| 27                | 2         | 13         | 9         | 0.00000 | -237.3000     | 1.00000 | -237.3000     |  |
| 28                | 2         | 1          | 8         | 0.00000 | 298.7000      | 1.00000 | 183.8750      |  |
| 29                | 2         | 4          | 8         | 0.00000 | -183.8750     | 1.00000 | -298.7000     |  |
| 30                | 3         | 14         | 9         | 0.00000 | 203.0000      | 1.00000 | 203.0000      |  |
| 31                | 3         | 6          | 9         | 0.00000 | 203.0000      | 1.00000 | 203.0000      |  |
| 32                | 3         | 15         | 9         | 0.00000 | 203.0000      | 1.00000 | 203.0000      |  |
| 33                | 3         | 16         | 9         | 0.00000 | 203.0000      | 1.00000 | 203.0000      |  |
| 34                | 3         | 17         | 9         | 0.00000 | 203.0000      | 1.00000 | 203.0000      |  |
| 35                | 3         | 18         | 9         | 0.00000 | 203.0000      | 1.00000 | 203.0000      |  |
| 36                | 3         | 5          | 9         | 0.00000 | 203.0000      | 1.00000 | 203.0000      |  |
| 37                | 3         | 19         | 9         | 0.00000 | 203.0000      | 1.00000 | 203.0000      |  |
| 38                | 4         | 14         | 9         | 0.00000 | 105.5000      | 1.00000 | 105.5000      |  |
| 39                | 4         | 6          | 9         | 0.00000 | 105.5000      | 1.00000 | 105.5000      |  |
| 40                | 4         | 15         | 9         | 0.00000 | 105.5000      | 1.00000 | 105.5000      |  |
| 41                | 4         | 16         | 9         | 0.00000 | 105.5000      | 1.00000 | 105.5000      |  |
| 42                | 4         | 17         | 9         | 0.00000 | 105.5000      | 1.00000 | 105.5000      |  |
| 43                | 4         | 18         | 9         | 0.00000 | 105.5000      | 1.00000 | 105.5000      |  |
| 44                | 4         | 5          | 9         | 0.00000 | 105.5000      | 1.00000 | 105.5000      |  |
| 45                | 4         | 19         | 9         | 0.00000 | 105.5000      | 1.00000 | 105.5000      |  |

Belastingcombinatie 1

=====

| Bel.<br>geval | Verm.<br>factor |
|---------------|-----------------|
|---------------|-----------------|

=====

|   |         |
|---|---------|
| 1 | 1.00000 |
| 2 | 1.00000 |
| 3 | 1.00000 |
| 4 | 1.00000 |
| 5 | 1.00000 |

-----

Staafrachten in lokaal assenstelsel BELASTINGCOMBINATIE 1  
"Bel.geval 1+2+3+4+5"

| Stf nr. | St knp | End knp | Fx beg (kN) | Fx end (kN) | Fy beg (kN) | Fy end (kN) | Tz beg (kNm) | Tz end (kNm) |
|---------|--------|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| 1       | 1      | 2       | 1538.341    | -1393.214   | 1011.280    | 835.775     | 1747.912     | -1636.886    |
| 2       | 7      | 8       | 925.838     | -925.838    | 1026.554    | 935.077     | 547.479      | -204.897     |
| 3       | 11     | 12      | 925.838     | -925.838    | 935.077     | 1026.554    | 204.897      | -547.479     |
| 4       | 4      | 5       | 1393.214    | -1538.341   | 835.775     | 1011.280    | 1636.886     | -1747.912    |
| 5       | 17     | 18      | 1193.200    | -1193.200   | -941.791    | -1147.769   | 266.078      | 505.313      |
| 6       | 13     | 14      | 1193.200    | -1193.200   | -1147.769   | -941.791    | -505.313     | -266.078     |
| 7       | 6      | 3       | 3822.391    | -3677.264   | -0.000      | 0.000       | -0.000       | -0.000       |
| 8       | 2      | 7       | 925.838     | -925.838    | 1275.359    | -1026.554   | 1640.888     | -547.479     |
| 9       | 8      | 9       | 925.838     | -925.838    | -935.077    | 1327.927    | 204.897      | -1902.150    |
| 10      | 9      | 3       | 925.838     | -925.838    | -1327.927   | 1838.632    | 1902.150     | -4989.545    |
| 11      | 3      | 10      | 925.838     | -925.838    | 1838.632    | -1327.927   | 4989.545     | -1902.150    |
| 12      | 10     | 11      | 925.838     | -925.838    | 1327.927    | -935.077    | 1902.150     | -204.897     |
| 13      | 12     | 4       | 925.838     | -925.838    | -1026.554   | 1275.359    | 547.479      | -1640.888    |
| 14      | 1      | 13      | 1193.200    | -1193.200   | -1412.800   | 1147.769    | -1721.583    | 505.313      |
| 15      | 14     | 15      | 1193.200    | -1193.200   | 941.791     | -1360.261   | 266.078      | 1460.461     |
| 16      | 15     | 6       | 1193.200    | -1193.200   | 1360.261    | -1904.272   | -1460.461    | 4643.380     |
| 17      | 6      | 16      | 1193.200    | -1193.200   | -1904.272   | 1360.261    | -4643.380    | 1460.461     |
| 18      | 16     | 17      | 1193.200    | -1193.200   | -1360.261   | 941.791     | -1460.461    | -266.078     |
| 19      | 18     | 5       | 1193.200    | -1193.200   | 1147.769    | -1412.800   | -505.313     | 1721.583     |

Staafrachten in globaal assenstelsel BELASTINGCOMBINATIE 1  
"Bel.geval 1+2+3+4+5"

| Stf nr. | St knp | End knp | Fx beg (kN) | Fx end (kN) | Fy beg (kN) | Fy end (kN) | Tz beg (kNm) | Tz end (kNm) |
|---------|--------|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| 1       | 1      | 2       | -1011.280   | -835.775    | 1538.341    | -1393.214   | 1747.912     | -1636.886    |
| 2       | 7      | 8       | 925.838     | -925.838    | 1026.554    | 935.077     | 547.479      | -204.897     |
| 3       | 11     | 12      | 925.838     | -925.838    | 935.077     | 1026.554    | 204.897      | -547.479     |
| 4       | 4      | 5       | 835.775     | 1011.280    | -1393.214   | 1538.341    | 1636.886     | -1747.912    |
| 5       | 17     | 18      | 1193.200    | -1193.200   | -941.791    | -1147.769   | 266.078      | 505.313      |
| 6       | 13     | 14      | 1193.200    | -1193.200   | -1147.769   | -941.791    | -505.313     | -266.078     |
| 7       | 6      | 3       | 0.000       | -0.000      | 3822.391    | -3677.264   | -0.000       | -0.000       |
| 8       | 2      | 7       | 925.838     | -925.838    | 1275.359    | -1026.554   | 1640.888     | -547.479     |
| 9       | 8      | 9       | 925.838     | -925.838    | -935.077    | 1327.927    | 204.897      | -1902.150    |
| 10      | 9      | 3       | 925.838     | -925.838    | -1327.927   | 1838.632    | 1902.150     | -4989.545    |
| 11      | 3      | 10      | 925.838     | -925.838    | 1838.632    | -1327.927   | 4989.545     | -1902.150    |
| 12      | 10     | 11      | 925.838     | -925.838    | 1327.927    | -935.077    | 1902.150     | -204.897     |
| 13      | 12     | 4       | 925.838     | -925.838    | -1026.554   | 1275.359    | 547.479      | -1640.888    |
| 14      | 1      | 13      | 1193.200    | -1193.200   | -1412.800   | 1147.769    | -1721.583    | 505.313      |
| 15      | 14     | 15      | 1193.200    | -1193.200   | 941.791     | -1360.261   | 266.078      | 1460.461     |
| 16      | 15     | 6       | 1193.200    | -1193.200   | 1360.261    | -1904.272   | -1460.461    | 4643.380     |
| 17      | 6      | 16      | 1193.200    | -1193.200   | -1904.272   | 1360.261    | -4643.380    | 1460.461     |
| 18      | 16     | 17      | 1193.200    | -1193.200   | -1360.261   | 941.791     | -1460.461    | -266.078     |
| 19      | 18     | 5       | 1193.200    | -1193.200   | 1147.769    | -1412.800   | -505.313     | 1721.583     |

Extreme veldmomenten BELASTINGCOMBINATIE 1  
"Bel.geval 1+2+3+4+5"

| Stf nr. | Beg knp | End knp | M beg (kNm) | M end (kNm) | M min (kNm) | Mmin plaats | M max (kNm) | Mmax plaats |
|---------|---------|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 1       | 1       | 2       | 1747.912    | -1636.886   | -76.014     | 0.4880578   | 1747.912    | 0.0000000   |
| 2       | 7       | 8       | 547.479     | -204.897    | -1464.383   | 0.5233166   | 547.479     | 0.0000000   |
| 3       | 11      | 12      | 204.897     | -547.479    | -1464.383   | 0.4766834   | 547.479     | 1.0000000   |
| 4       | 4       | 5       | 1636.886    | -1747.912   | -76.014     | 0.5119422   | 1747.912    | 1.0000000   |
| 5       | 17      | 18      | 266.078     | 505.313     | -505.313    | 1.0000000   | 1855.743    | 0.4507124   |
| 6       | 13      | 14      | -505.313    | -266.078    | -505.313    | 0.0000000   | 1855.743    | 0.5492876   |

Oplegreacties in globaal assenstelsel BELASTINGCOMBINATIE 1  
"Bel.geval 1+2+3+4+5"

| Oplegging nummer | Knoop nummer | Oplegging type | Fx (kN)  | Fy (kN)  | Tz (kNm) |
|------------------|--------------|----------------|----------|----------|----------|
| 1                | 6            | 3              | 0.00000  | 13.84755 | 0.00000  |
| 2                | 3            | 1              | -0.00000 | 0.00000  | 0.00000  |

Verplaatsingen BELASTING COMBINATIE 1  
"Bel.geval 1+2+3+4+5"

| Knoop nummer | ux (m)   | uy (m)   | phiz (rad) |
|--------------|----------|----------|------------|
| 1            | 0.00035  | -0.00132 | 0.00102    |
| 2            | 0.00032  | -0.00171 | -0.00101   |
| 3            | 0.00000  | -0.00100 | -0.00000   |
| 4            | -0.00032 | -0.00171 | 0.00101    |
| 5            | -0.00035 | -0.00132 | -0.00102   |
| 6            | 0.00000  | 0.00000  | -0.00000   |
| 7            | 0.00029  | -0.00277 | -0.00120   |
| 8            | 0.00008  | -0.00347 | 0.00118    |
| 9            | 0.00004  | -0.00190 | 0.00081    |
| 10           | -0.00004 | -0.00190 | -0.00081   |
| 11           | -0.00008 | -0.00347 | -0.00118   |
| 12           | -0.00029 | -0.00277 | 0.00120    |
| 13           | 0.00032  | -0.00028 | 0.00114    |
| 14           | 0.00009  | 0.00186  | -0.00078   |
| 15           | 0.00005  | 0.00074  | -0.00064   |
| 16           | -0.00005 | 0.00074  | 0.00064    |
| 17           | -0.00009 | 0.00186  | 0.00078    |
| 18           | -0.00032 | -0.00028 | -0.00114   |

Snedekrachten staaf 1; BELASTINGCOMBINATIE 1

"Bel.geval 1+2+3+4+5"

| Snede nummer | Plaats   | N<br>(kN) | V<br>(kN) | M<br>(kNm) | phi<br>(rad) | Doorbuiging<br>relatief<br>(m) |
|--------------|----------|-----------|-----------|------------|--------------|--------------------------------|
| 0            | 0.000000 | -1538.341 | -1011.280 | 1747.912   | 0.00102      | 0.00000                        |
| 1            | 0.100000 | -1523.829 | -787.021  | 1060.173   | 0.00047      | 0.00055                        |
| 2            | 0.200000 | -1509.316 | -571.550  | 540.741    | 0.00016      | 0.00077                        |
| 3            | 0.300000 | -1494.803 | -364.870  | 182.887    | 0.00002      | 0.00083                        |
| 4            | 0.400000 | -1480.290 | -166.980  | -20.118    | -0.00001     | 0.00083                        |
| 5            | 0.500000 | -1465.778 | 22.121    | -75.002    | 0.00002      | 0.00083                        |
| 6            | 0.600000 | -1451.265 | 202.431   | 11.506     | 0.00004      | 0.00085                        |
| 7            | 0.700000 | -1436.752 | 373.952   | 232.677    | -0.00001     | 0.00086                        |
| 8            | 0.800000 | -1422.240 | 536.683   | 581.784    | -0.00016     | 0.00080                        |
| 9            | 0.900000 | -1407.727 | 690.624   | 1052.096   | -0.00048     | 0.00056                        |
| 10           | 1.000000 | -1393.214 | 835.775   | 1636.886   | -0.00101     | -0.00000                       |

Snedekrachten staaf 2; BELASTINGCOMBINATIE 1

"Bel.geval 1+2+3+4+5"

| Snede nummer | Plaats   | N<br>(kN) | V<br>(kN) | M<br>(kNm) | phi<br>(rad) | Doorbuiging<br>relatief<br>(m) |
|--------------|----------|-----------|-----------|------------|--------------|--------------------------------|
| 0            | 0.000000 | -925.838  | -1026.554 | 547.479    | -0.00120     | 0.00000                        |
| 1            | 0.100000 | -925.838  | -830.391  | -147.947   | -0.00126     | -0.00086                       |
| 2            | 0.200000 | -925.838  | -634.228  | -696.447   | -0.00113     | -0.00170                       |
| 3            | 0.300000 | -925.838  | -438.065  | -1098.020  | -0.00088     | -0.00239                       |
| 4            | 0.400000 | -925.838  | -241.902  | -1352.668  | -0.00053     | -0.00285                       |
| 5            | 0.500000 | -925.838  | -45.739   | -1460.389  | -0.00013     | -0.00304                       |
| 6            | 0.600000 | -925.838  | 150.424   | -1421.184  | 0.00027      | -0.00291                       |
| 7            | 0.700000 | -925.838  | 346.588   | -1235.053  | 0.00065      | -0.00249                       |
| 8            | 0.800000 | -925.838  | 542.751   | -901.996   | 0.00095      | -0.00181                       |
| 9            | 0.900000 | -925.838  | 738.914   | -422.013   | 0.00114      | -0.00095                       |
| 10           | 1.000000 | -925.838  | 935.077   | 204.897    | 0.00118      | 0.00000                        |

Snedekrachten staaf 3; BELASTINGCOMBINATIE 1  
 "Bel.geval 1+2+3+4+5"

| Snede nummer | Plaats   | N<br>(kN) | V<br>(kN) | M<br>(kNm) | phi<br>(rad) | Doorbuiging<br>relatief<br>(m) |
|--------------|----------|-----------|-----------|------------|--------------|--------------------------------|
| 0            | 0.000000 | -925.838  | -935.077  | 204.897    | -0.00118     | 0.00000                        |
| 1            | 0.100000 | -925.838  | -738.914  | -422.013   | -0.00114     | -0.00095                       |
| 2            | 0.200000 | -925.838  | -542.751  | -901.996   | -0.00095     | -0.00181                       |
| 3            | 0.300000 | -925.838  | -346.588  | -1235.053  | -0.00065     | -0.00249                       |
| 4            | 0.400000 | -925.838  | -150.424  | -1421.184  | -0.00027     | -0.00291                       |
| 5            | 0.500000 | -925.838  | 45.739    | -1460.389  | 0.00013      | -0.00304                       |
| 6            | 0.600000 | -925.838  | 241.902   | -1352.668  | 0.00053      | -0.00285                       |
| 7            | 0.700000 | -925.838  | 438.065   | -1098.020  | 0.00088      | -0.00239                       |
| 8            | 0.800000 | -925.838  | 634.228   | -696.447   | 0.00113      | -0.00170                       |
| 9            | 0.900000 | -925.838  | 830.391   | -147.947   | 0.00126      | -0.00086                       |
| 10           | 1.000000 | -925.838  | 1026.554  | 547.479    | 0.00120      | 0.00000                        |

Snedekrachten staaf 4; BELASTINGCOMBINATIE 1  
 "Bel.geval 1+2+3+4+5"

| Snede nummer | Plaats   | N<br>(kN) | V<br>(kN) | M<br>(kNm) | phi<br>(rad) | Doorbuiging<br>relatief<br>(m) |
|--------------|----------|-----------|-----------|------------|--------------|--------------------------------|
| 0            | 0.000000 | -1393.214 | -835.775  | 1636.886   | 0.00101      | 0.00000                        |
| 1            | 0.100000 | -1407.727 | -690.624  | 1052.096   | 0.00048      | 0.00056                        |
| 2            | 0.200000 | -1422.240 | -536.683  | 581.784    | 0.00016      | 0.00080                        |
| 3            | 0.300000 | -1436.752 | -373.952  | 232.677    | 0.00001      | 0.00086                        |
| 4            | 0.400000 | -1451.265 | -202.431  | 11.506     | -0.00004     | 0.00085                        |
| 5            | 0.500000 | -1465.778 | -22.121   | -75.002    | -0.00002     | 0.00083                        |
| 6            | 0.600000 | -1480.290 | 166.980   | -20.118    | 0.00001      | 0.00083                        |
| 7            | 0.700000 | -1494.803 | 364.870   | 182.887    | -0.00002     | 0.00083                        |
| 8            | 0.800000 | -1509.316 | 571.550   | 540.741    | -0.00016     | 0.00077                        |
| 9            | 0.900000 | -1523.829 | 787.021   | 1060.173   | -0.00047     | 0.00055                        |
| 10           | 1.000000 | -1538.341 | 1011.280  | 1747.912   | -0.00102     | 0.00000                        |



Snedekrachten staaf 5; BELASTINGCOMBINATIE 1  
 "Bel.geval 1+2+3+4+5"

| Snede<br>nummer | Plaats   | N<br>(kN) | V<br>(kN) | M<br>(kNm) | phi<br>(rad) | Doorbuiging<br>relatief<br>(m) |
|-----------------|----------|-----------|-----------|------------|--------------|--------------------------------|
| 0               | 0.000000 | -1193.200 | 941.791   | 266.078    | 0.00078      | 0.00000                        |
| 1               | 0.100000 | -1193.200 | 732.835   | 893.225    | 0.00069      | 0.00077                        |
| 2               | 0.200000 | -1193.200 | 523.879   | 1363.864   | 0.00050      | 0.00143                        |
| 3               | 0.300000 | -1193.200 | 314.923   | 1677.995   | 0.00025      | 0.00193                        |
| 4               | 0.400000 | -1193.200 | 105.967   | 1835.618   | -0.00004     | 0.00223                        |
| 5               | 0.500000 | -1193.200 | -102.989  | 1836.733   | -0.00034     | 0.00230                        |
| 6               | 0.600000 | -1193.200 | -311.945  | 1681.340   | -0.00063     | 0.00215                        |
| 7               | 0.700000 | -1193.200 | -520.901  | 1369.439   | -0.00088     | 0.00180                        |
| 8               | 0.800000 | -1193.200 | -729.857  | 901.030    | -0.00106     | 0.00128                        |
| 9               | 0.900000 | -1193.200 | -938.813  | 276.113    | -0.00116     | 0.00066                        |
| 10              | 1.000000 | -1193.200 | -1147.769 | -505.313   | -0.00114     | 0.00000                        |

Snedekrachten staaf 6; BELASTINGCOMBINATIE 1  
 "Bel.geval 1+2+3+4+5"

| Snede<br>nummer | Plaats   | N<br>(kN) | V<br>(kN) | M<br>(kNm) | phi<br>(rad) | Doorbuiging<br>relatief<br>(m) |
|-----------------|----------|-----------|-----------|------------|--------------|--------------------------------|
| 0               | 0.000000 | -1193.200 | 1147.769  | -505.313   | 0.00114      | 0.00000                        |
| 1               | 0.100000 | -1193.200 | 938.813   | 276.113    | 0.00116      | 0.00066                        |
| 2               | 0.200000 | -1193.200 | 729.857   | 901.030    | 0.00106      | 0.00128                        |
| 3               | 0.300000 | -1193.200 | 520.901   | 1369.439   | 0.00088      | 0.00180                        |
| 4               | 0.400000 | -1193.200 | 311.945   | 1681.340   | 0.00063      | 0.00215                        |
| 5               | 0.500000 | -1193.200 | 102.989   | 1836.733   | 0.00034      | 0.00230                        |
| 6               | 0.600000 | -1193.200 | -105.967  | 1835.618   | 0.00004      | 0.00223                        |
| 7               | 0.700000 | -1193.200 | -314.923  | 1677.995   | -0.00025     | 0.00193                        |
| 8               | 0.800000 | -1193.200 | -523.879  | 1363.864   | -0.00050     | 0.00143                        |
| 9               | 0.900000 | -1193.200 | -732.835  | 893.225    | -0.00069     | 0.00077                        |
| 10              | 1.000000 | -1193.200 | -941.791  | 266.078    | -0.00078     | 0.00000                        |

Bijlage I. Berekening doorsnede zinkelement  $\gamma=1.0$ .

Snedekrachten staaf 7; BELASTINGCOMBINATIE 1

"Bel.geval 1+2+3+4+5"

| Snede<br>nummer | Plaats   | N<br>(kN) | V<br>(kN) | M<br>(kNm) | phi<br>(rad) | Doorbuiging<br>relatief<br>(m) |
|-----------------|----------|-----------|-----------|------------|--------------|--------------------------------|
| 0               | 0.000000 | -3822.391 | 0.000     | -0.000     | -0.00000     | 0.00000                        |
| 1               | 0.100000 | -3807.878 | 0.000     | -0.000     | -0.00000     | -0.00000                       |
| 2               | 0.200000 | -3793.366 | 0.000     | -0.000     | -0.00000     | -0.00000                       |
| 3               | 0.300000 | -3778.853 | 0.000     | -0.000     | 0.00000      | -0.00000                       |
| 4               | 0.400000 | -3764.340 | 0.000     | -0.000     | 0.00000      | -0.00000                       |
| 5               | 0.500000 | -3749.827 | 0.000     | 0.000      | 0.00000      | 0.00000                        |
| 6               | 0.600000 | -3735.315 | 0.000     | 0.000      | 0.00000      | 0.00000                        |
| 7               | 0.700000 | -3720.802 | 0.000     | 0.000      | 0.00000      | 0.00000                        |
| 8               | 0.800000 | -3706.289 | 0.000     | 0.000      | -0.00000     | 0.00000                        |
| 9               | 0.900000 | -3691.777 | 0.000     | 0.000      | -0.00000     | 0.00000                        |
| 10              | 1.000000 | -3677.264 | 0.000     | 0.000      | -0.00000     | 0.00000                        |

Snedekrachten staaf 8; BELASTINGCOMBINATIE 1

"Bel.geval 1+2+3+4+5"

| Snede<br>nummer | Plaats   | N<br>(kN) | V<br>(kN) | M<br>(kNm) | phi<br>(rad) | Doorbuiging<br>relatief<br>(m) |
|-----------------|----------|-----------|-----------|------------|--------------|--------------------------------|
| 0               | 0.000000 | -925.838  | -1275.359 | 1640.888   | -0.00101     | 0.00000                        |
| 1               | 0.100000 | -925.838  | -1250.479 | 1520.911   | -0.00104     | 0.00001                        |
| 2               | 0.200000 | -925.838  | -1225.598 | 1403.297   | -0.00106     | 0.00002                        |
| 3               | 0.300000 | -925.838  | -1200.718 | 1288.047   | -0.00109     | 0.00002                        |
| 4               | 0.400000 | -925.838  | -1175.837 | 1175.161   | -0.00111     | 0.00002                        |
| 5               | 0.500000 | -925.838  | -1150.957 | 1064.638   | -0.00113     | 0.00002                        |
| 6               | 0.600000 | -925.838  | -1126.076 | 956.479    | -0.00115     | 0.00002                        |
| 7               | 0.700000 | -925.838  | -1101.196 | 850.684    | -0.00117     | 0.00002                        |
| 8               | 0.800000 | -925.838  | -1076.315 | 747.252    | -0.00118     | 0.00001                        |
| 9               | 0.900000 | -925.838  | -1051.435 | 646.184    | -0.00119     | 0.00001                        |
| 10              | 1.000000 | -925.838  | -1026.554 | 547.479    | -0.00120     | -0.00000                       |

Bijlage I. Berekening doorsnede zinkelement  $\gamma=1.0$ .

Snedekrachten staaf 9; BELASTINGCOMBINATIE 1  
 "Bel.geval 1+2+3+4+5"

| Snede nummer | Plaats   | N (kN)   | V (kN)   | M (kNm)  | phi (rad) | Doorbuiging relatief (m) |
|--------------|----------|----------|----------|----------|-----------|--------------------------|
| 0            | 0.000000 | -925.838 | 935.077  | 204.897  | 0.00118   | 0.00000                  |
| 1            | 0.100000 | -925.838 | 974.362  | 348.105  | 0.00117   | 0.00002                  |
| 2            | 0.200000 | -925.838 | 1013.647 | 497.206  | 0.00115   | 0.00004                  |
| 3            | 0.300000 | -925.838 | 1052.932 | 652.199  | 0.00113   | 0.00005                  |
| 4            | 0.400000 | -925.838 | 1092.217 | 813.085  | 0.00110   | 0.00006                  |
| 5            | 0.500000 | -925.838 | 1131.502 | 979.864  | 0.00107   | 0.00007                  |
| 6            | 0.600000 | -925.838 | 1170.787 | 1152.536 | 0.00103   | 0.00007                  |
| 7            | 0.700000 | -925.838 | 1210.072 | 1331.100 | 0.00099   | 0.00006                  |
| 8            | 0.800000 | -925.838 | 1249.357 | 1515.557 | 0.00093   | 0.00005                  |
| 9            | 0.900000 | -925.838 | 1288.642 | 1705.907 | 0.00087   | 0.00003                  |
| 10           | 1.000000 | -925.838 | 1327.927 | 1902.150 | 0.00081   | 0.00000                  |

Snedekrachten staaf 10; BELASTINGCOMBINATIE 1  
 "Bel.geval 1+2+3+4+5"

| Snede nummer | Plaats   | N (kN)   | V (kN)   | M (kNm)  | phi (rad) | Doorbuiging relatief (m) |
|--------------|----------|----------|----------|----------|-----------|--------------------------|
| 0            | 0.000000 | -925.838 | 1327.927 | 1902.150 | 0.00081   | 0.00000                  |
| 1            | 0.100000 | -925.838 | 1378.997 | 2166.075 | 0.00076   | 0.00006                  |
| 2            | 0.200000 | -925.838 | 1430.068 | 2439.959 | 0.00070   | 0.00011                  |
| 3            | 0.300000 | -925.838 | 1481.138 | 2723.801 | 0.00064   | 0.00015                  |
| 4            | 0.400000 | -925.838 | 1532.209 | 3017.603 | 0.00057   | 0.00018                  |
| 5            | 0.500000 | -925.838 | 1583.279 | 3321.363 | 0.00050   | 0.00020                  |
| 6            | 0.600000 | -925.838 | 1634.350 | 3635.082 | 0.00041   | 0.00019                  |
| 7            | 0.700000 | -925.838 | 1685.420 | 3958.759 | 0.00032   | 0.00017                  |
| 8            | 0.800000 | -925.838 | 1736.491 | 4292.396 | 0.00022   | 0.00014                  |
| 9            | 0.900000 | -925.838 | 1787.561 | 4635.991 | 0.00012   | 0.00008                  |
| 10           | 1.000000 | -925.838 | 1838.632 | 4989.545 | -0.00000  | 0.00000                  |

Snedekrachten staaf 11; BELASTINGCOMBINATIE 1  
"Bel.geval 1+2+3+4+5"

| Snede nummer | Plaats   | N<br>(kN) | V<br>(kN) | M<br>(kNm) | phi<br>(rad) | Doorbuiging<br>relatief<br>(m) |
|--------------|----------|-----------|-----------|------------|--------------|--------------------------------|
| 0            | 0.000000 | -925.838  | -1838.632 | 4989.545   | -0.00000     | 0.00000                        |
| 1            | 0.100000 | -925.838  | -1787.561 | 4635.991   | -0.00012     | 0.00008                        |
| 2            | 0.200000 | -925.838  | -1736.491 | 4292.396   | -0.00022     | 0.00014                        |
| 3            | 0.300000 | -925.838  | -1685.420 | 3958.759   | -0.00032     | 0.00017                        |
| 4            | 0.400000 | -925.838  | -1634.350 | 3635.082   | -0.00041     | 0.00019                        |
| 5            | 0.500000 | -925.838  | -1583.279 | 3321.363   | -0.00050     | 0.00020                        |
| 6            | 0.600000 | -925.838  | -1532.209 | 3017.603   | -0.00057     | 0.00018                        |
| 7            | 0.700000 | -925.838  | -1481.138 | 2723.801   | -0.00064     | 0.00015                        |
| 8            | 0.800000 | -925.838  | -1430.068 | 2439.959   | -0.00070     | 0.00011                        |
| 9            | 0.900000 | -925.838  | -1378.997 | 2166.075   | -0.00076     | 0.00006                        |
| 10           | 1.000000 | -925.838  | -1327.927 | 1902.150   | -0.00081     | -0.00000                       |

Snedekrachten staaf 12; BELASTINGCOMBINATIE 1  
"Bel.geval 1+2+3+4+5"

| Snede nummer | Plaats   | N<br>(kN) | V<br>(kN) | M<br>(kNm) | phi<br>(rad) | Doorbuiging<br>relatief<br>(m) |
|--------------|----------|-----------|-----------|------------|--------------|--------------------------------|
| 0            | 0.000000 | -925.838  | -1327.927 | 1902.150   | -0.00081     | 0.00000                        |
| 1            | 0.100000 | -925.838  | -1288.642 | 1705.907   | -0.00087     | 0.00003                        |
| 2            | 0.200000 | -925.838  | -1249.357 | 1515.557   | -0.00093     | 0.00005                        |
| 3            | 0.300000 | -925.838  | -1210.072 | 1331.100   | -0.00099     | 0.00006                        |
| 4            | 0.400000 | -925.838  | -1170.787 | 1152.536   | -0.00103     | 0.00007                        |
| 5            | 0.500000 | -925.838  | -1131.502 | 979.864    | -0.00107     | 0.00007                        |
| 6            | 0.600000 | -925.838  | -1092.217 | 813.085    | -0.00110     | 0.00006                        |
| 7            | 0.700000 | -925.838  | -1052.932 | 652.199    | -0.00113     | 0.00005                        |
| 8            | 0.800000 | -925.838  | -1013.647 | 497.206    | -0.00115     | 0.00004                        |
| 9            | 0.900000 | -925.838  | -974.362  | 348.105    | -0.00117     | 0.00002                        |
| 10           | 1.000000 | -925.838  | -935.077  | 204.897    | -0.00118     | -0.00000                       |

Snedekrachten staaf 13; BELASTINGCOMBINATIE 1  
 "Bel.geval 1+2+3+4+5"

| Snede nummer | Plaats   | N (kN)   | V (kN)   | M (kNm)  | phi (rad) | Doorbuiging relatief (m) |
|--------------|----------|----------|----------|----------|-----------|--------------------------|
| 0            | 0.000000 | -925.838 | 1026.554 | 547.479  | 0.00120   | 0.00000                  |
| 1            | 0.100000 | -925.838 | 1051.435 | 646.184  | 0.00119   | 0.00001                  |
| 2            | 0.200000 | -925.838 | 1076.315 | 747.252  | 0.00118   | 0.00001                  |
| 3            | 0.300000 | -925.838 | 1101.196 | 850.684  | 0.00117   | 0.00002                  |
| 4            | 0.400000 | -925.838 | 1126.076 | 956.479  | 0.00115   | 0.00002                  |
| 5            | 0.500000 | -925.838 | 1150.957 | 1064.638 | 0.00113   | 0.00002                  |
| 6            | 0.600000 | -925.838 | 1175.837 | 1175.161 | 0.00111   | 0.00002                  |
| 7            | 0.700000 | -925.838 | 1200.718 | 1288.047 | 0.00109   | 0.00002                  |
| 8            | 0.800000 | -925.838 | 1225.598 | 1403.297 | 0.00106   | 0.00002                  |
| 9            | 0.900000 | -925.838 | 1250.479 | 1520.911 | 0.00104   | 0.00001                  |
| 10           | 1.000000 | -925.838 | 1275.359 | 1640.888 | 0.00101   | 0.00000                  |

Snedekrachten staaf 14; BELASTINGCOMBINATIE 1  
 "Bel.geval 1+2+3+4+5"

| Snede nummer | Plaats   | N (kN)    | V (kN)   | M (kNm)   | phi (rad) | Doorbuiging relatief (m) |
|--------------|----------|-----------|----------|-----------|-----------|--------------------------|
| 0            | 0.000000 | -1193.200 | 1412.800 | -1721.583 | 0.00102   | 0.00000                  |
| 1            | 0.100000 | -1193.200 | 1386.297 | -1588.626 | 0.00104   | -0.00001                 |
| 2            | 0.200000 | -1193.200 | 1359.794 | -1458.187 | 0.00105   | -0.00001                 |
| 3            | 0.300000 | -1193.200 | 1333.291 | -1330.265 | 0.00107   | -0.00001                 |
| 4            | 0.400000 | -1193.200 | 1306.788 | -1204.861 | 0.00108   | -0.00002                 |
| 5            | 0.500000 | -1193.200 | 1280.285 | -1081.975 | 0.00110   | -0.00002                 |
| 6            | 0.600000 | -1193.200 | 1253.782 | -961.607  | 0.00111   | -0.00001                 |
| 7            | 0.700000 | -1193.200 | 1227.279 | -843.757  | 0.00112   | -0.00001                 |
| 8            | 0.800000 | -1193.200 | 1200.776 | -728.424  | 0.00113   | -0.00001                 |
| 9            | 0.900000 | -1193.200 | 1174.273 | -615.609  | 0.00114   | -0.00000                 |
| 10           | 1.000000 | -1193.200 | 1147.769 | -505.313  | 0.00114   | 0.00000                  |

Snedekrachten staaf 15; BELASTINGCOMBINATIE 1  
 "Bel.geval 1+2+3+4+5"

| Snede<br>nummer | Plaats   | N<br>(kN) | V<br>(kN) | M<br>(kNm) | phi<br>(rad) | Doorbuiging<br>relatief<br>(m) |
|-----------------|----------|-----------|-----------|------------|--------------|--------------------------------|
| 0               | 0.000000 | -1193.200 | -941.791  | 266.078    | -0.00078     | 0.00000                        |
| 1               | 0.100000 | -1193.200 | -983.638  | 121.670    | -0.00079     | -0.00001                       |
| 2               | 0.200000 | -1193.200 | -1025.485 | -29.014    | -0.00079     | -0.00001                       |
| 3               | 0.300000 | -1193.200 | -1067.332 | -185.975   | -0.00079     | -0.00002                       |
| 4               | 0.400000 | -1193.200 | -1109.179 | -349.213   | -0.00078     | -0.00002                       |
| 5               | 0.500000 | -1193.200 | -1151.026 | -518.729   | -0.00077     | -0.00003                       |
| 6               | 0.600000 | -1193.200 | -1192.873 | -694.521   | -0.00075     | -0.00003                       |
| 7               | 0.700000 | -1193.200 | -1234.720 | -876.590   | -0.00073     | -0.00003                       |
| 8               | 0.800000 | -1193.200 | -1276.567 | -1064.937  | -0.00071     | -0.00002                       |
| 9               | 0.900000 | -1193.200 | -1318.414 | -1259.561  | -0.00068     | -0.00001                       |
| 10              | 1.000000 | -1193.200 | -1360.261 | -1460.461  | -0.00064     | 0.00000                        |

Snedekrachten staaf 16; BELASTINGCOMBINATIE 1  
 "Bel.geval 1+2+3+4+5"

| Snede<br>nummer | Plaats   | N<br>(kN) | V<br>(kN) | M<br>(kNm) | phi<br>(rad) | Doorbuiging<br>relatief<br>(m) |
|-----------------|----------|-----------|-----------|------------|--------------|--------------------------------|
| 0               | 0.000000 | -1193.200 | -1360.261 | -1460.461  | -0.00064     | 0.00000                        |
| 1               | 0.100000 | -1193.200 | -1414.662 | -1731.016  | -0.00061     | -0.00005                       |
| 2               | 0.200000 | -1193.200 | -1469.063 | -2012.179  | -0.00057     | -0.00009                       |
| 3               | 0.300000 | -1193.200 | -1523.464 | -2303.951  | -0.00052     | -0.00012                       |
| 4               | 0.400000 | -1193.200 | -1577.865 | -2606.330  | -0.00047     | -0.00014                       |
| 5               | 0.500000 | -1193.200 | -1632.266 | -2919.318  | -0.00041     | -0.00016                       |
| 6               | 0.600000 | -1193.200 | -1686.667 | -3242.914  | -0.00034     | -0.00015                       |
| 7               | 0.700000 | -1193.200 | -1741.068 | -3577.118  | -0.00027     | -0.00014                       |
| 8               | 0.800000 | -1193.200 | -1795.470 | -3921.931  | -0.00019     | -0.00011                       |
| 9               | 0.900000 | -1193.200 | -1849.871 | -4277.351  | -0.00010     | -0.00006                       |
| 10              | 1.000000 | -1193.200 | -1904.272 | -4643.380  | -0.00000     | 0.00000                        |

Bijlage I. Berekening doorsnede zinkelement  $\gamma=1.0$ .

Snedekrachten staaf 17; BELASTINGCOMBINATIE 1  
 "Bel.geval 1+2+3+4+5"

| Snede nummer | Plaats   | N<br>(kN) | V<br>(kN) | M<br>(kNm) | phi<br>(rad) | Doorbuiging<br>relatief<br>(m) |
|--------------|----------|-----------|-----------|------------|--------------|--------------------------------|
| 0            | 0.000000 | -1193.200 | 1904.272  | -4643.380  | -0.00000     | 0.00000                        |
| 1            | 0.100000 | -1193.200 | 1849.871  | -4277.351  | 0.00010      | -0.00006                       |
| 2            | 0.200000 | -1193.200 | 1795.470  | -3921.931  | 0.00019      | -0.00011                       |
| 3            | 0.300000 | -1193.200 | 1741.068  | -3577.118  | 0.00027      | -0.00014                       |
| 4            | 0.400000 | -1193.200 | 1686.667  | -3242.914  | 0.00034      | -0.00015                       |
| 5            | 0.500000 | -1193.200 | 1632.266  | -2919.318  | 0.00041      | -0.00016                       |
| 6            | 0.600000 | -1193.200 | 1577.865  | -2606.330  | 0.00047      | -0.00014                       |
| 7            | 0.700000 | -1193.200 | 1523.464  | -2303.951  | 0.00052      | -0.00012                       |
| 8            | 0.800000 | -1193.200 | 1469.063  | -2012.179  | 0.00057      | -0.00009                       |
| 9            | 0.900000 | -1193.200 | 1414.662  | -1731.016  | 0.00061      | -0.00005                       |
| 10           | 1.000000 | -1193.200 | 1360.261  | -1460.461  | 0.00064      | 0.00000                        |

Snedekrachten staaf 18; BELASTINGCOMBINATIE 1  
 "Bel.geval 1+2+3+4+5"

| Snede nummer | Plaats   | N<br>(kN) | V<br>(kN) | M<br>(kNm) | phi<br>(rad) | Doorbuiging<br>relatief<br>(m) |
|--------------|----------|-----------|-----------|------------|--------------|--------------------------------|
| 0            | 0.000000 | -1193.200 | 1360.261  | -1460.461  | 0.00064      | 0.00000                        |
| 1            | 0.100000 | -1193.200 | 1318.414  | -1259.561  | 0.00068      | -0.00001                       |
| 2            | 0.200000 | -1193.200 | 1276.567  | -1064.937  | 0.00071      | -0.00002                       |
| 3            | 0.300000 | -1193.200 | 1234.720  | -876.590   | 0.00073      | -0.00003                       |
| 4            | 0.400000 | -1193.200 | 1192.873  | -694.521   | 0.00075      | -0.00003                       |
| 5            | 0.500000 | -1193.200 | 1151.026  | -518.729   | 0.00077      | -0.00003                       |
| 6            | 0.600000 | -1193.200 | 1109.179  | -349.213   | 0.00078      | -0.00002                       |
| 7            | 0.700000 | -1193.200 | 1067.332  | -185.975   | 0.00079      | -0.00002                       |
| 8            | 0.800000 | -1193.200 | 1025.485  | -29.014    | 0.00079      | -0.00001                       |
| 9            | 0.900000 | -1193.200 | 983.638   | 121.670    | 0.00079      | -0.00001                       |
| 10           | 1.000000 | -1193.200 | 941.791   | 266.078    | 0.00078      | 0.00000                        |

Snedekrachten staaf 19; BELASTINGCOMBINATIE 1  
"Bel.geval 1+2+3+4+5"

| Snede<br>nummer | Plaats   | N<br>(kN) | V<br>(kN) | M<br>(kNm) | phi<br>(rad) | Doorbuiging<br>relatief<br>(m) |
|-----------------|----------|-----------|-----------|------------|--------------|--------------------------------|
| 0               | 0.000000 | -1193.200 | -1147.769 | -505.313   | -0.00114     | 0.00000                        |
| 1               | 0.100000 | -1193.200 | -1174.273 | -615.609   | -0.00114     | -0.00000                       |
| 2               | 0.200000 | -1193.200 | -1200.776 | -728.424   | -0.00113     | -0.00001                       |
| 3               | 0.300000 | -1193.200 | -1227.279 | -843.757   | -0.00112     | -0.00001                       |
| 4               | 0.400000 | -1193.200 | -1253.782 | -961.607   | -0.00111     | -0.00001                       |
| 5               | 0.500000 | -1193.200 | -1280.285 | -1081.975  | -0.00110     | -0.00002                       |
| 6               | 0.600000 | -1193.200 | -1306.788 | -1204.861  | -0.00108     | -0.00002                       |
| 7               | 0.700000 | -1193.200 | -1333.291 | -1330.265  | -0.00107     | -0.00001                       |
| 8               | 0.800000 | -1193.200 | -1359.794 | -1458.187  | -0.00105     | -0.00001                       |
| 9               | 0.900000 | -1193.200 | -1386.297 | -1588.626  | -0.00104     | -0.00001                       |
| 10              | 1.000000 | -1193.200 | -1412.800 | -1721.583  | -0.00102     | 0.00000                        |



## **Bijlage J. Berekening met elastische ondersteuning.**

Bijlage J. Berekening met elastische ondersteuning.

AIVEXE RAAMWERK programma-verplaatsingsmethode  
Versie 4.0  
Datum is : 30/05/93

Ondergronds Station Delft  
Berekening met elastische ondersteuning.  
Opslag op floppy onder: TUNELAS3

\*\*\*\* I N V O E R G E G E V E N S \*\*\*\*

\*\* K N O O P G E G E V E N S \*\*

| Knoop nr. | X-coördinaat<br>[m] | Y-coördinaat<br>[m] |
|-----------|---------------------|---------------------|
| 1         | 0.000               | 7.655               |
| 2         | 0.000               | 0.000               |
| 3         | 11.890              | 0.000               |
| 4         | 23.780              | 0.000               |
| 5         | 23.780              | 7.655               |
| 6         | 11.890              | 7.655               |
| 7         | 0.950               | 0.000               |
| 8         | 8.440               | 0.000               |
| 9         | 9.940               | 0.000               |
| 10        | 13.840              | 0.000               |
| 11        | 15.340              | 0.000               |
| 12        | 22.830              | 0.000               |
| 13        | 0.950               | 7.655               |
| 14        | 8.440               | 7.655               |
| 15        | 9.940               | 7.655               |
| 16        | 13.840              | 7.655               |
| 17        | 15.340              | 7.655               |
| 18        | 22.830              | 7.655               |

**\*\* S T A A F G E G E V E N S \*\***

| Staafr. nr. | Beginknoop | Eindknoop | E-modulus<br>[kN/m <sup>2</sup> ] | Soort.mas.<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | Oppervl.<br>[m <sup>2</sup> ] | Traagheidsmom.<br>[m <sup>4</sup> ] |
|-------------|------------|-----------|-----------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| 1           | 1          | 2         | 32000000                          | 0                                  | 0.90000                       | 0.06075000                          |
| 2           | 7          | 8         | 32000000                          | 0                                  | 1.00000                       | 0.08333300                          |
| 3           | 11         | 12        | 32000000                          | 0                                  | 1.00000                       | 0.08333300                          |
| 4           | 4          | 5         | 32000000                          | 0                                  | 0.90000                       | 0.06075000                          |
| 5           | 17         | 18        | 32000000                          | 0                                  | 1.20000                       | 0.14400000                          |
| 6           | 13         | 14        | 32000000                          | 0                                  | 1.20000                       | 0.14400000                          |
| 7           | 6          | 3         | 32000000                          | 0                                  | 0.90000                       | 0.06075000                          |
| 8           | 2          | 7         | 32000000                          | 0                                  | 1.25000                       | 0.16276000                          |
| 9           | 8          | 9         | 32000000                          | 0                                  | 1.15000                       | 0.12674000                          |
| 10          | 9          | 3         | 32000000                          | 0                                  | 1.45000                       | 0.25405200                          |
| 11          | 3          | 10        | 32000000                          | 0                                  | 1.45000                       | 0.25405200                          |
| 12          | 10         | 11        | 32000000                          | 0                                  | 1.15000                       | 0.12674000                          |
| 13          | 12         | 4         | 32000000                          | 0                                  | 1.25000                       | 0.16276000                          |
| 14          | 1          | 13        | 32000000                          | 0                                  | 1.45000                       | 0.25405200                          |
| 15          | 14         | 15        | 32000000                          | 0                                  | 1.30000                       | 0.18308000                          |
| 16          | 15         | 6         | 32000000                          | 0                                  | 1.50000                       | 0.28125000                          |
| 17          | 6          | 16        | 32000000                          | 0                                  | 1.50000                       | 0.28125000                          |
| 18          | 16         | 17        | 32000000                          | 0                                  | 1.30000                       | 0.18308000                          |
| 19          | 18         | 5         | 32000000                          | 0                                  | 1.45000                       | 0.25405200                          |

**\*\* V O O R G E S C H R E V E N V E R P L A A T S I N G E N \*\***

| Knoop nr. | U <sub>x</sub><br>[m] | U <sub>y</sub><br>[m] | f <sub>i</sub><br>[graden] |
|-----------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|
| 3         | 0.000                 |                       |                            |
| 6         | 0.000                 |                       |                            |

**\*\* V E R E N D E L A S T I S C H E O N D E R S T E U N D E S T A V E N \*\***

| Staafr. nr. | Beddingsconstante<br>[kN/m <sup>2</sup> ] |
|-------------|---|
| 14          | 10000                                     |
| 6           | 10000                                     |
| 15          | 10000                                     |
| 16          | 10000                                     |
| 17          | 10000                                     |
| 18          | 10000                                     |
| 5           | 10000                                     |
| 19          | 10000                                     |

Basis-belastinggeval nr. 1 (totale belasting)

**\*\* K N O O P B E L A S T I N G E N \*\***

| Knoop nr. | F-x<br>[kN] | F-y<br>[kN] | Moment<br>[kN.m] |
|-----------|-------------|-------------|------------------|
| 1         | 272.8800    |             |                  |
| 1         |             | -182.6870   |                  |
| 1         |             |             | -40.7590         |
| 2         | 135.0940    |             |                  |
| 2         |             | 173.4620    |                  |
| 2         |             |             | -5.2560          |
| 4         | -135.0940   |             |                  |
| 4         |             | 173.4620    |                  |
| 4         |             |             | 5.2560           |
| 5         | -272.8800   |             |                  |
| 5         |             | -182.6870   |                  |
| 5         |             |             | 40.7590          |

\*\*\*\* STAAF BELASTINGEN \*\*\*\*

\*\* VERDEELDE BELASTINGEN \*\*

| Staf nr. | Beginknoop(1) | Eindknoop(2) | Hoek(X-as, globaal)<br>[graden] | Grootte(1)<br>[kN/m] | Grootte(2)<br>[kN/m] |
|----------|---------------|--------------|---------------------------------|----------------------|----------------------|
| 1        | 1             | 2            | 90.00                           | 22.750               | 22.750               |
| 8        | 2             | 7            | 90.00                           | 29.520               | 29.520               |
| 2        | 7             | 8            | 90.00                           | 29.520               | 29.520               |
| 9        | 8             | 9            | 90.00                           | 29.520               | 29.520               |
| 10       | 9             | 3            | 90.00                           | 29.520               | 29.520               |
| 11       | 3             | 10           | 90.00                           | 29.520               | 29.520               |
| 12       | 10            | 11           | 90.00                           | 29.520               | 29.520               |
| 3        | 11            | 12           | 90.00                           | 29.520               | 29.520               |
| 13       | 12            | 4            | 90.00                           | 29.520               | 29.520               |
| 14       | 1             | 13           | 90.00                           | 35.420               | 35.420               |
| 6        | 13            | 14           | 90.00                           | 35.420               | 35.420               |
| 15       | 14            | 15           | 90.00                           | 35.420               | 35.420               |
| 16       | 15            | 6            | 90.00                           | 35.420               | 35.420               |
| 17       | 6             | 16           | 90.00                           | 35.420               | 35.420               |
| 18       | 16            | 17           | 90.00                           | 35.420               | 35.420               |
| 5        | 17            | 18           | 90.00                           | 35.420               | 35.420               |
| 19       | 18            | 5            | 90.00                           | 35.420               | 35.420               |
| 4        | 4             | 5            | 90.00                           | 22.750               | 22.750               |
| 7        | 6             | 3            | 90.00                           | 22.750               | 22.750               |
| 8        | 2             | 7            | 90.00                           | 355.950              | 355.950              |
| 2        | 7             | 8            | 90.00                           | 355.950              | 355.950              |
| 9        | 8             | 9            | 90.00                           | 355.950              | 355.950              |
| 10       | 9             | 3            | 90.00                           | 355.950              | 355.950              |
| 11       | 3             | 10           | 90.00                           | 355.950              | 355.950              |
| 12       | 10            | 11           | 90.00                           | 355.950              | 355.950              |
| 3        | 11            | 12           | 90.00                           | 355.950              | 355.950              |
| 13       | 12            | 4            | 90.00                           | 355.950              | 355.950              |
| 1        | 1             | 2            | 0.00                            | 448.000              | 275.800              |
| 4        | 4             | 5            | 180.00                          | 275.800              | 448.000              |
| 14       | 1             | 13           | 270.00                          | 304.500              | 304.500              |
| 6        | 13            | 14           | 270.00                          | 304.500              | 304.500              |
| 15       | 14            | 15           | 270.00                          | 304.500              | 304.500              |
| 16       | 15            | 6            | 270.00                          | 304.500              | 304.500              |
| 17       | 6             | 16           | 270.00                          | 304.500              | 304.500              |
| 18       | 16            | 17           | 270.00                          | 304.500              | 304.500              |
| 5        | 17            | 18           | 270.00                          | 304.500              | 304.500              |
| 19       | 18            | 5            | 270.00                          | 304.500              | 304.500              |

*Bijlage J. Berekening met elastische ondersteuning.*

---

\*\*\*\*\* U I T V O E R berekeningsresultaten \*\*\*\*\*

Opslag op floppy onder: TUNELAS3

Basis belastinggeval nr. 1 (totale belasting)

\*\*\*\* Knoopverplaatsingen t.o.v. globaalsysteem \*\*\*\*

| Knoop nr. | Ux<br>[m] | Uy<br>[m] | fi<br>[graden] |
|-----------|-----------|-----------|----------------|
| 1         | 0.00052   | 0.01754   | -0.07934       |
| 2         | 0.00048   | 0.01811   | 0.08512        |
| 3         | 0.00000   | 0.01759   | 0.00000        |
| 4         | -0.00048  | 0.01811   | -0.08512       |
| 5         | -0.00052  | 0.01754   | 0.07934        |
| 6         | 0.00000   | 0.01614   | 0.00000        |
| 7         | 0.00045   | 0.01969   | 0.10247        |
| 8         | 0.00012   | 0.02116   | -0.09678       |
| 9         | 0.00006   | 0.01891   | -0.06678       |
| 10        | -0.00006  | 0.01891   | 0.06678        |
| 11        | -0.00012  | 0.02116   | 0.09678        |
| 12        | -0.00045  | 0.01969   | -0.10247       |
| 13        | 0.00048   | 0.01612   | -0.08968       |
| 14        | 0.00014   | 0.01346   | 0.06471        |
| 15        | 0.00007   | 0.01508   | 0.05298        |
| 16        | -0.00007  | 0.01508   | -0.05298       |
| 17        | -0.00014  | 0.01346   | -0.06471       |
| 18        | -0.00048  | 0.01612   | 0.08968        |

Bijlage J. Berekening met elastische ondersteuning.

\*\*\*\* Staafbelastingen t.o.v. lokaalassenstelsel \*\*\*\*

| Staat nr. | Knoop nr. | Normaalkracht<br>[kN] | Dwarskracht<br>[kN] | Moment<br>[kN.m] |
|-----------|-----------|-----------------------|---------------------|------------------|
| 1         | 1         | 2240.896              | -1495.043           | -2496.261        |
|           | 2         | -2066.745 druk        | -1275.301           | 2496.096         |
| 2         | 7         | 1410.395              | -1527.086           | -876.677         |
|           | 8         | -1410.395 druk        | -1360.084           | 251.254          |
| 3         | 11        | 1410.395              | -1360.084           | -251.254         |
|           | 12        | -1410.395 druk        | -1527.086           | 876.677          |
| 4         | 4         | 2066.745              | -1275.301           | -2496.096        |
|           | 5         | -2240.896 druk        | -1495.043           | 2496.261         |
| 5         | 17        | 1767.923              | 1327.045            | -348.551         |
|           | 18        | -1767.923 druk        | 1642.532            | -698.719         |
| 6         | 13        | 1767.923              | 1642.532            | 698.719          |
|           | 14        | -1767.923 druk        | 1327.045            | 348.551          |
| 7         | 6         | 5554.062              | 0.000               | 0.000            |
|           | 3         | -5379.911 druk        | -0.000              | 0.000            |
| 8         | 2         | 1410.395              | -1893.283           | -2501.352        |
|           | 7         | -1410.395 druk        | 1527.086            | 876.677          |
| 9         | 8         | 1410.395              | 1360.084            | -251.254         |
|           | 9         | -1410.395 druk        | -1938.289           | 2725.034         |
| 10        | 9         | 1410.395              | 1938.289            | -2725.034        |
|           | 3         | -1410.395 druk        | -2689.956           | 7237.572         |
| 11        | 3         | 1410.395              | -2689.956           | -7237.572        |
|           | 10        | -1410.395 druk        | 1938.289            | 2725.034         |
| 12        | 10        | 1410.395              | -1938.289           | -2725.034        |
|           | 11        | -1410.395 druk        | 1360.084            | 251.254          |
| 13        | 12        | 1410.395              | 1527.086            | -876.677         |
|           | 4         | -1410.395 druk        | -1893.283           | 2501.352         |
| 14        | 1         | 1767.923              | 2058.209            | 2455.502         |
|           | 13        | -1767.923 druk        | -1642.532           | -698.719         |
| 15        | 14        | 1767.923              | -1327.045           | -348.551         |
|           | 15        | -1767.923 druk        | 1945.050            | -2102.456        |
| 16        | 15        | 1767.923              | -1945.050           | 2102.456         |
|           | 6         | -1767.923 druk        | 2777.031            | -6703.013        |
| 17        | 6         | 1767.923              | 2777.031            | 6703.013         |
|           | 16        | -1767.923 druk        | -1945.050           | -2102.456        |
| 18        | 16        | 1767.923              | 1945.050            | 2102.456         |
|           | 17        | -1767.923 druk        | -1327.045           | 348.551          |
| 19        | 18        | 1767.923              | -1642.532           | 698.719          |
|           | 5         | -1767.923 druk        | 2058.209            | -2455.502        |

\*\*\*\* Oplegreacties knopen met voorgeschreven verplaatsingen \*\*\*\*

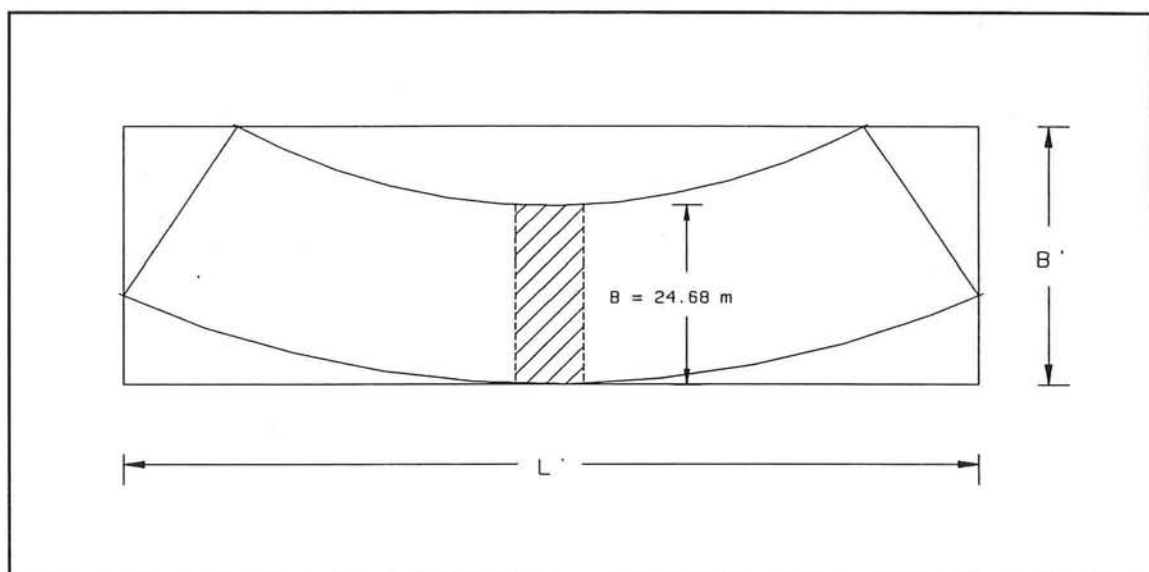
| Knoop nr. | Fx<br>[kN] | Fy<br>[kN] | M<br>[kN.m] |
|-----------|------------|------------|-------------|
| 3         | -0.000     | 0.000      | 0.000       |
| 6         | 0.000      | 0.000      | 0.000       |

## Bijlage K. Bepaling krommingsbreedte zinkelement.

De inwendige breedte van de zinksleuf is afhankelijk van de breedte van de zinkelementen en van de speling die het element tussen de kuipwanden heeft.

De lokale breedte  $B$  van een mootje van het element is 24.68 m (zie figuur K.1). Lokaal, omdat het station in een lichte bocht ligt en de elementen dus een zeer lichte kromming vertonen.

Tekenen we een rechthoek om het element heen, dan is de minimaal benodigde breedte  $B'$  iets groter dan de lokale breedte  $B$ . Overdreven getekend ziet dat er dus uit als in figuur K.1.



Figuur K.1 Extra benodigde ruimte door kromming element.

De kromming  $\kappa$  van het element is gelijk aan:

$$\kappa = \frac{1}{R}$$

De bochtstraal van de bocht waarin het station ligt is gelijk aan:  $R = 1800 \text{ m}$ . De Kromming  $\kappa$  is dus:

$$\kappa = \frac{1}{1800} = 5.55 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$$



Kijken we naar figuur K.2, dan is eenvoudig in te zien dat de hoek  $\phi$  volgt uit:

$$R \cdot \sin \phi = \frac{1}{2} \cdot L$$

$$\sin \phi = \frac{1}{2} \cdot L \cdot \frac{1}{R} = \frac{1}{2} \cdot L \cdot \kappa$$

$$\sin \phi = \frac{1}{2} \cdot 100 \cdot \frac{1}{1800} = 0.02777$$

$$\phi = 0.02778 \text{ rad} = 1.59^\circ$$

Uiteraard is  $R \sin \phi$  niet exact gelijk aan  $0.5L$ , maar deze vereenvoudiging is, gezien de geringe kromming, geoorloofd. Nu de hoek  $\phi$  bekend is, kan de breedte  $B'$  en de lengte  $L'$  op dezelfde wijze worden gevonden.

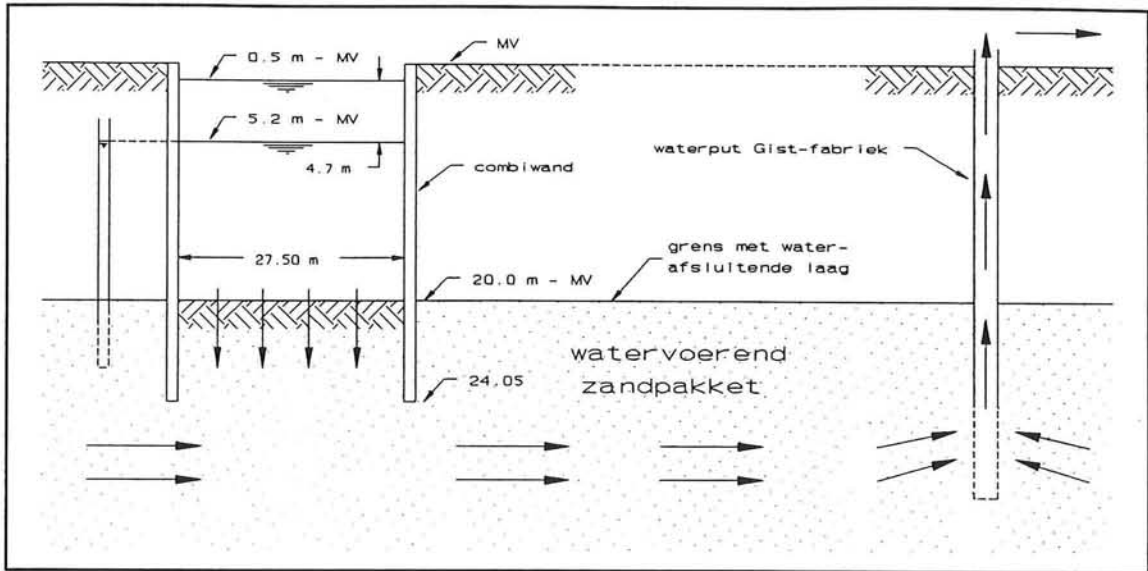
Voor de breedte  $B'$  geldt:

$$\begin{aligned} B' &= \left(R + \frac{1}{2} \cdot B\right) - \left(R - \frac{1}{2} \cdot B\right) \cdot \cos \phi \\ &= \left(1800 + \frac{1}{2} \cdot 24.68\right) - \left(1800 - \frac{1}{2} \cdot 24.68\right) \cdot \cos 0.02778 \\ &= (1812.34 - 1786.97) = 25.37 \text{ m} \end{aligned}$$

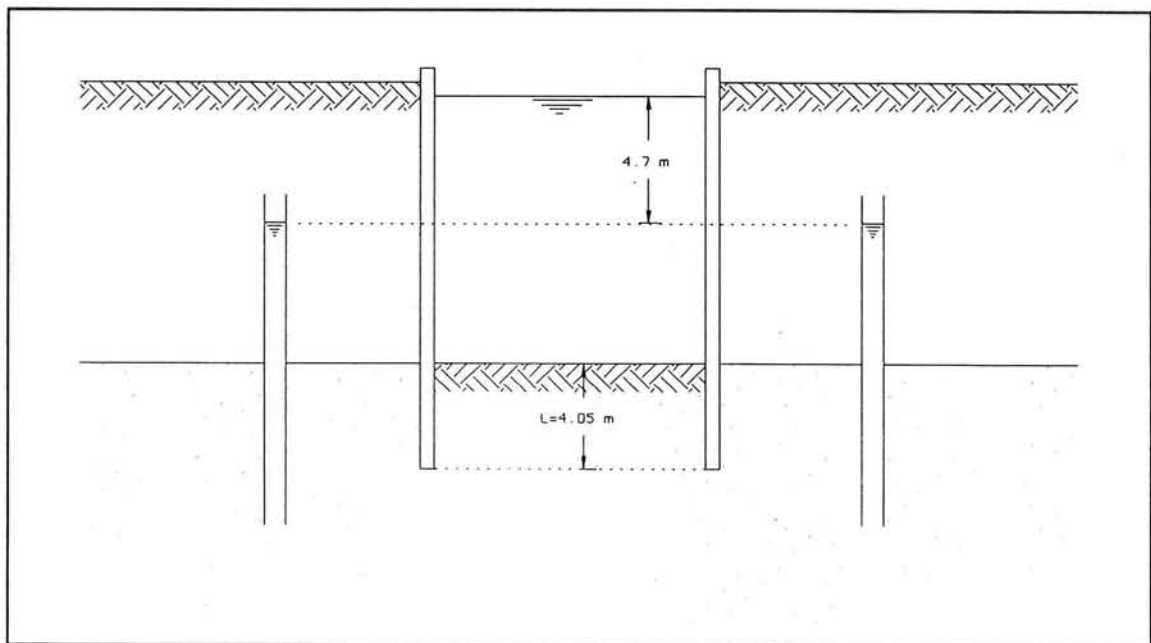
Voor de lengte  $L'$  geldt:

$$\begin{aligned} L' &= 2 \cdot \left(R + \frac{1}{2} \cdot B\right) \cdot \sin \phi \\ &= 2 \cdot \left(1800 + \frac{1}{2} \cdot 24.68\right) \cdot \sin 0.02778 \\ &= 2 \cdot 50.34 = 100.68 \text{ m} \end{aligned}$$

## Bijlage M. Berekening snelheid waterspiegeldaling zinksleuf.



Figuur M.1 Onttrekking grondwater door Gist-fabrieken.



Figuur M.2 Verhang.

Het verhang  $\Delta h$  (zie figuur M.1 en M.2) veroorzaakt een stroming van water uit de zinksleuf naar het omringend gebied.

Volgens de wet van Darcy geldt:

$$Q = k \cdot A \cdot \frac{\Delta h}{L}$$

met:

$$A = 27.5 \text{ m} \cdot 1 \text{ m}^1 = 27.5 \text{ m}^2$$

$$k \approx 1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s} \quad (=1 \text{ m/dag})$$

$$L = 4.05 \text{ m}$$

(De waarde voor  $L$  is een veilige waarde. In werkelijkheid zal deze lengte waarschijnlijk groter zijn, aangezien ook horizontale afstroming moet plaatsvinden, hetgeen ook een gunstiger waarde voor  $Q$  oplevert.)

geldt per  $\text{m}^1$  zinksleuf :

$$Q = 1 \cdot 10^{-5} \cdot 27.5 \cdot \frac{4.7}{4.05} = 3.19 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

Het waterniveau in de zinksleuf daalt dus met:

$$\frac{3.19 \cdot 10^{-4} \cdot 1 \cdot 10^5}{27.5} = 1.16 \text{ m/dag}$$

Indien we nu een laagje bentoniet van ca. 5 cm op de bodem aanbrengen, gaat het verval over dit laagje staan. De  $k$ -waarde van de bentoniet is aangenomen op:

$$k = 1 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$$

Verder geldt:

$$A = 27.5 \text{ m}^2$$

$$L = 0.05 \text{ m}$$

Voor het debiet  $Q$  geldt nu:

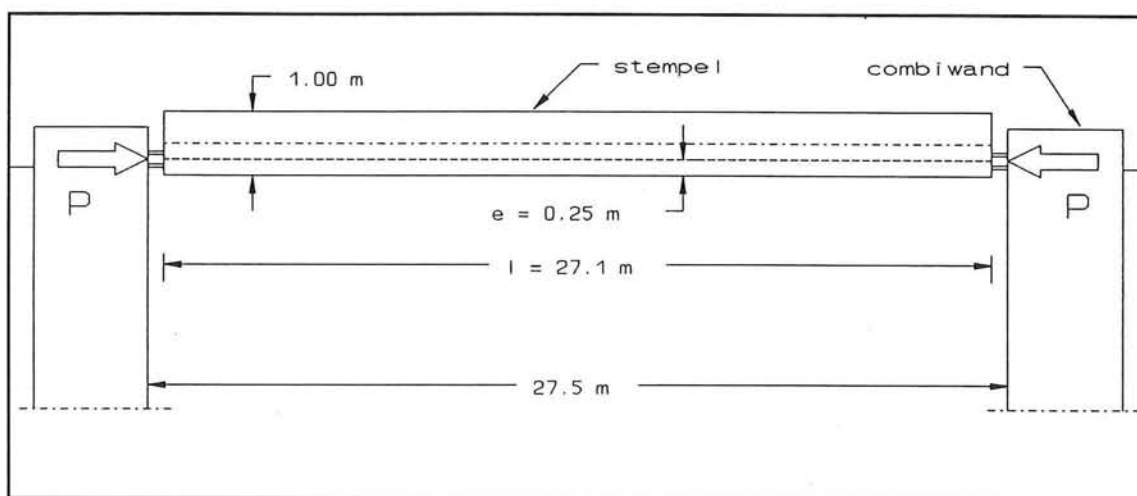
$$Q = 1 \cdot 10^{-8} \cdot 27.5 \cdot \frac{4.7}{0.05} = 2.58 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

De daling van de waterspiegel is hiermee:

$$\frac{2.58 \cdot 10^{-5} \cdot 1 \cdot 10^5}{27.5} = 0.09 \text{ m/dag}$$

## Bijlage N. Berekening moment in stempel door eigen gewicht.

Door de stempels van de zinksleuf excentrisch aan te brengen wordt een grotere ruimte tussen waterspiegel en stempel verkregen. Ook wordt in dat geval een deel van het moment, veroorzaakt door het eigen gewicht van de stempel, door de stempelkracht vermenigvuldigd met de excentriciteit  $e$  opgeheven. Uit onderstaande berekening volgt het optredend buigend moment in de stempel als gevolg van het eigen gewicht. Ook is de maximale doorbuiging door het eigen gewicht bepaald.



Figuur N.1 Geometrie stempel tussen combiwanden.

Uitgaande van een stempel met een doorsnede  $\phi = 1000$  mm en een wanddikte  $t = 15.7$  mm volgen hiervoor de volgende doorsnedegrootheden:

■ Doorsnede-oppervlak  $A$  :  $A = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot (d^2 - d_i^2) = 48548 \text{ mm}^2 = 0.048548 \text{ m}^2$

■ Traagheidsmoment  $I_z$  :  $I_z = I_x = \frac{\pi \cdot (d^4 - d_i^4)}{64} = \frac{\pi \cdot (1000^4 - 968.6^4)}{64}$   
 $= 5.88102 \cdot 10^9 \text{ mm}^4 = 0.00588 \text{ m}^4$

Verder geldt voor het staal:

■ Elasticiteitsmodulus  $E_s$  :  $E_s = 2.1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$

■ Volumiek gewicht  $\gamma_s$  :  $\gamma_s = 78 \text{ kN/m}^3$

Voor het eigen gewicht per m<sup>1</sup> stempel geldt nu:

$$q_{e.g.} = 0.048548 \text{ m}^2 \cdot 78 \text{ kN/m}^3 = 3.79 \text{ kN/m}^1$$

Het buigend moment t.g.v. het eigen gewicht in het midden van de stempel bedraagt:

$$M_{\max} = \frac{1}{8} \cdot 3.79 \cdot 27.1^2 = 348 \text{ kNm}$$

De doorbuiging is dan gelijk aan:

$$\begin{aligned} w_{\max} &= \frac{5}{384} \cdot \frac{q \cdot l^4}{E \cdot I} \\ &= \frac{5}{384} \cdot \frac{3.79 \cdot 27100^4}{2.1 \cdot 10^5 \cdot 5.88102 \cdot 10^9} = 22 \text{ mm} \end{aligned}$$

Bij een normaaldrukkracht  $P$  en een excentriciteit  $e=0.25$  m is het netto moment in de stempel gelijk aan nul. De drukkracht  $P$  waarbij dit optreedt is gelijk aan:

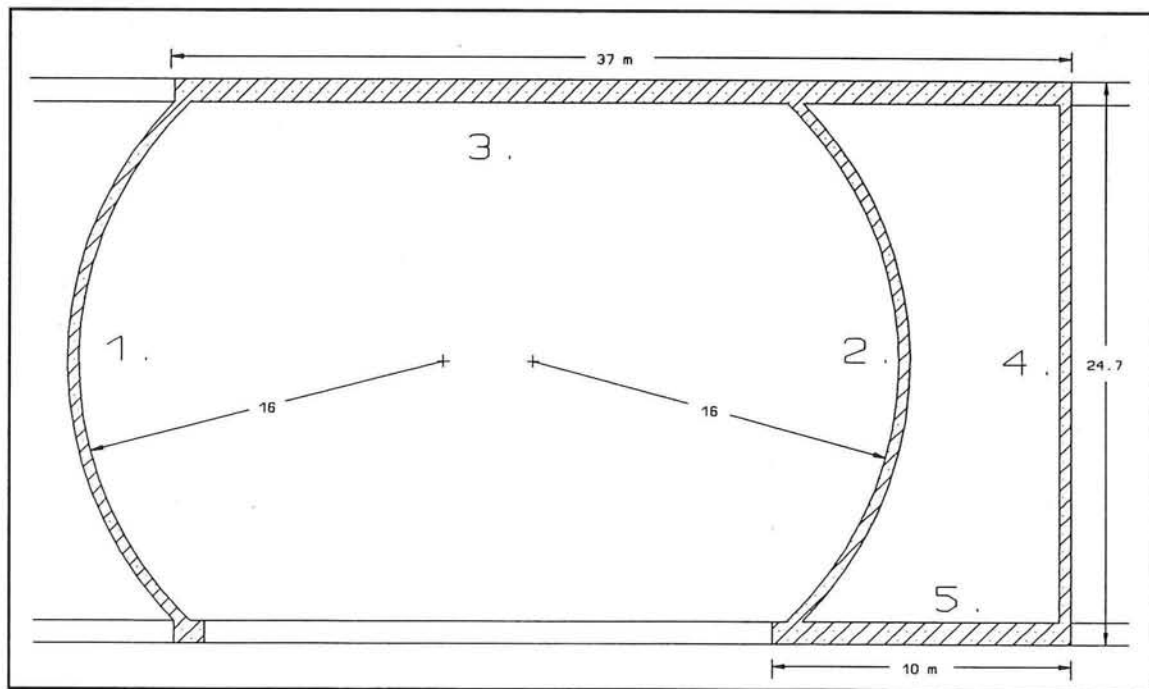
$$P = \frac{348 \text{ kNm}}{0.25 \text{ m}} = 1392 \text{ KN}$$

## Bijlage O. Hal-opbouw op middelste element.

Zoals in §10.6 reeds werd genoemd, is de consequentie van de in hoofdstuk 7 gekozen oplossing dat een onderbreking van de continuïteit van het zinkproces optreedt. Het is dus belangrijk te onderzoeken op welke wijze deze onderbreking zo minimaal mogelijk kan worden gehouden. Temeer daar een langere totale duur van de zinkoperatie, de overlast voor de omgeving automatisch ook verlengd.

In concreto komt het er dus op neer dat de hal-opbouw in een zo kort mogelijk tijdsbestek op het drijvende element moet worden gebouwd (zie figuur O.1). De gewenste snelheid kan worden gerealiseerd door een goed bekistingssysteem en een zeer goed afgestemde logistiek. De bouwtijd wordt in hoge mate bepaald door het aanbrengen en stellen van de bekisting. Ten aanzien van het bekistingssysteem kan worden gedacht aan een in het bouwdok reeds aangebrachte uitvouwbare bekisting of een geprefabriceerde bekisting die kant en klaar op het element kan worden gehesen.

Allereerst wordt de halconstructie eens nader bekeken (zie figuur O.2).



Figuur O.2 Bovenaanzicht hal-opbouw.

In het bovenaanzicht is goed te zien dat er twee ronde wanden (1 en 2) moeten worden aangebracht. Verder zijn de wanden 3, 4 en 5 gewone rechte wanden. Hier bovenop wordt het dak aangebracht.

Het totale (bekistings-)oppervlak per wanddeel is in onderstaande tabel weergegeven:

| Nr. | Vorm        | Oppervlak buiten<br>[m <sup>2</sup> ] |       | Oppervlak binnen<br>[m <sup>2</sup> ] |       | Gem. opp.<br>[m <sup>2</sup> ] |
|-----|-------------|---------------------------------------|-------|---------------------------------------|-------|--------------------------------|
|     |             |                                       |       |                                       |       |                                |
| 1.  | ronde wand  | 29.1x5                                | 145.5 | 27.3x5                                | 136.5 | 141                            |
| 2.  | ronde wand  | 26.8x5                                | 134   | 25.3x5                                | 126.5 | 130.25                         |
| 3.  | rechte wand | 37x5                                  | 185   | 36x5                                  | 180   | 182.5                          |
| 4.  | rechte wand | 24.7x5                                | 123.5 | 22.9x5                                | 114.5 | 119                            |
| 5.  | rechte wand | 10x5                                  | 50    | 9x5                                   | 45    | 47.5                           |
|     |             | Totaal: 638                           |       | Totaal: 602.5                         |       | 620.25                         |

#### ■ Uitvoering (in 't kort).

Voor het snel kunnen bouwen van de halconstructie is een goed en snel te plaatsen bekistings-systeem benodigd. Immers, het plaatsen van de bekisting voor de hal-opbouw neemt van de gehele operatie de meeste tijd in beslag.

Er zijn diverse bekistingssystemen voorhanden (te huur), waarbij met behulp van losse elementen van diverse afmetingen en vorm de gewenste bekistingsconstructie kan worden gemaakt (bijvoorbeeld *DOKA*). Ook voor de wanden met ronde vorm is het geen enkel probleem met behulp van deze elementen een bekisting te maken. Het is zonder meer oneconomisch om voor het bekisten van de diverse onderdelen van de hal-opbouw, die in feite relatief standaard vormen bezitten, een speciaal vervaardigde en eenmalige bekisting toe te passen.

Bij de keuze van het type en fabrikaat bekisting is het van belang dat de bekisting deels geprefabriceerd klaar staat. Zodra het tunnelement is ingevaren en op de afzinkplaats is afgemeerd, kunnen de voorbereidingen voor de fabricage van de hal-opbouw beginnen. Als eerste worden aan de zijkanten van het element, ter plaatse van de te bouwen opbouw, consoles aangebracht. Dit om een goede werkruimte te creëren (zie figuur O.3).

De wapeningsstaven, die uit de wanden van het zinkelement omhoog lopen, zijn even boven het betonoppervlak voorzien van een schroefkoppeling (zie figuur O.4), daar anders de stekeinden erg ver uitsteken. Dit om de benodigde doorvaarthoogte onder de stempels te beperken.

Eventueel zouden de stekeinden ook kunnen worden omgebogen, maar dit valt bij staven van  $\phi 32$  bepaald niet mee. Bovendien is dit niet altijd even bevorderlijk voor het staal (haarscheurtjes).

Als eerste worden nu deze wapeningsstaven met behulp van inschroefbare stekeinden verlengd

tot de benodigde verankeringslengte. Vervolgens wordt de wapening voor de wanden op z'n plaats gehesen. Deze wapening is vooraf reeds in z'n geheel per wanddeel gemaakt, waarbij de staven met puntlassen aan elkaar zijn verbonden, teneinde een voldoende stijf en transportabel geheel te krijgen.

Hierna worden de bekistingsdelen, die reeds per wand zijn geprefabriceerd en klaar staan, op het element gehesen. De afzonderlijke delen worden vervolgens aan elkaar gekoppeld en het geheel wordt gesteld.

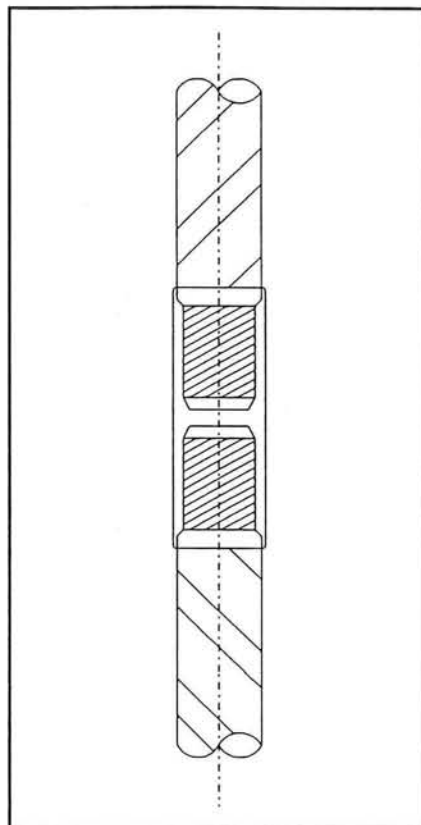
Wanneer wapening en bekisting voor de wanden compleet zijn, kan het storten van het beton plaatsvinden. Dit storten voor de wanden neemt ca.1 dag in beslag. Ondertussen kan de bekisting en de wapening van het dak reeds worden aangebracht. Hiervoor zijn een groot aantal ondersteuningen benodigd, waarbij het plaatsen ervan redelijk veel tijd kost. Het is hierbij dus belangrijk om van de dakbekisting wederom zoveel mogelijk geprefabriceerd klaar te hebben staan. De dakbekisting kan, bij toepassing van een goed systeem, weer gekoppeld worden met de wandbekisting.

Zodra het beton van de wanden voldoende is verhard (ca.3 dagen) kan het beton voor het dak worden gestort. Het dak moet in verhouding tot de wanden langer uitharden, voordat kan worden ontlast. Dit neemt circa 10 dagen in beslag.

Zodra het dak voldoende verhard is, kan de bekisting aan de buitenzijde van de hal worden verwijderd. Het verwijderen van de bekisting aan de binnenzijde van de constructie is niet direct noodzakelijk en kan ook in een later stadium plaatsvinden (bijv. na het afzinken). In het geval de bekisting gehuurd is, is het natuurlijk wel slimmer de binnen-bekisting er alvast uit te halen, aangezien de teller doorloopt.

De opening aan de zijkant (west-zijde), die later de aansluiting vormt met het hal-element, kan tijdelijk worden afgedicht met behulp van een stalen constructie.

Wanneer het zinkelement gereed is kan het worden afgezonken tegen zijn voorganger.

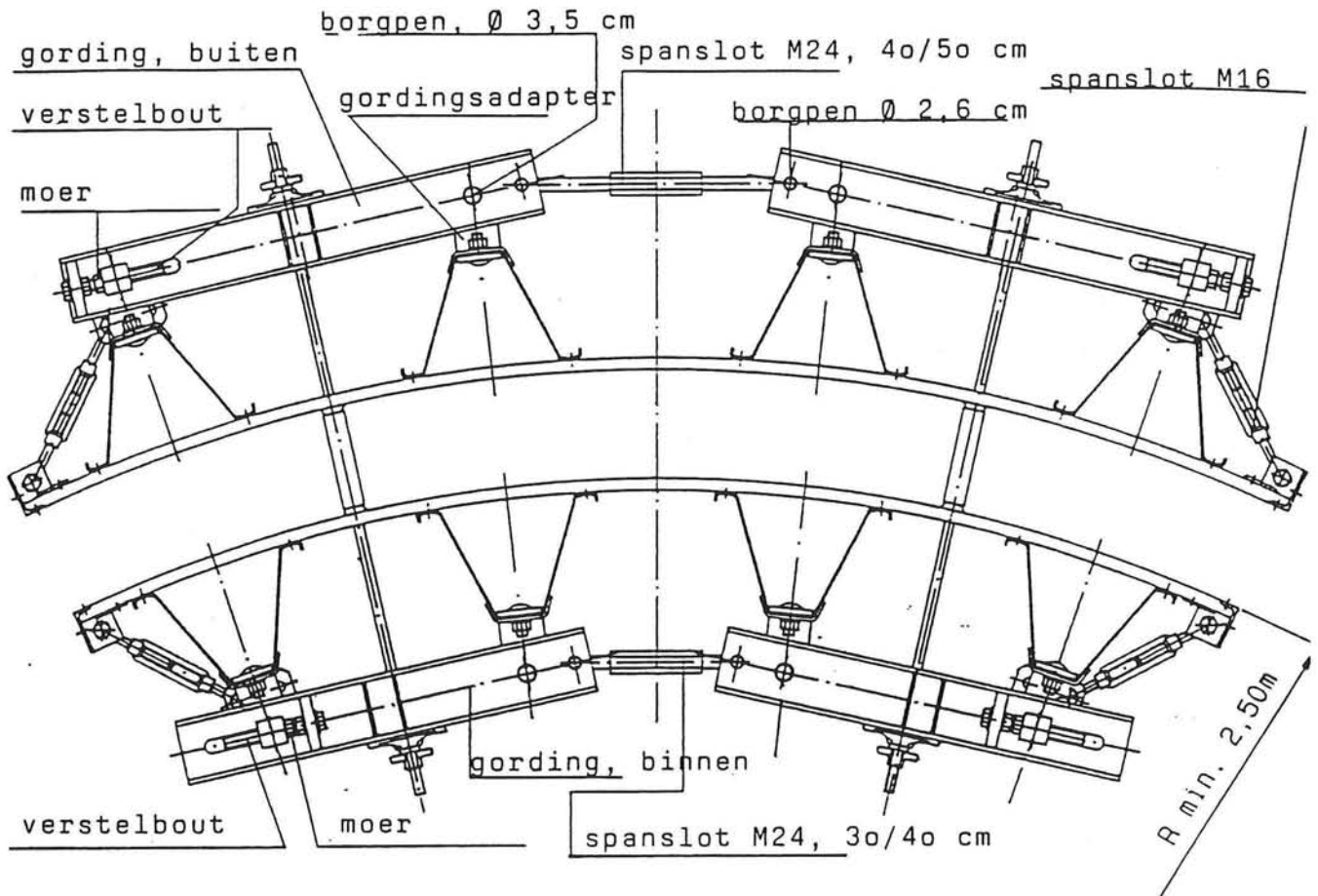


Figuur O.4 Schroefkoppeling.



### ■ Bekisting ronde wanden.

De bekisting voor de ronde wanden (zie figuur O.5 en O.6) bestaat uit bekistingsplaten van 21 mm met hierop een kunststof coating.



Figuur O.6 Bekisting voor ronde wand: doorsnede.

De platen zijn in langsrichting voorzien van stalen troggen. Deze troggen zijn twee om twee met elkaar verbonden met stalen gordingen. De gordingen zijn onderling verbonden met een spanslot. Door middel van de spansloten wordt nu de plaat kromgetrokken. Op die manier kan iedere gewenste kromming worden verkregen. Met dit bekistingssysteem kan goed van tevoren een compleet wanddeel worden geprefabriceerd en kan dit met een kraan op het zinkelement worden gehesen.

### ■ Bekisting rechte wanden.

Voor de rechte wanden wordt een complete wandbekisting geprefabriceerd met behulp van losse elementen. In dit rapport is het Alu Framax-systeem van de Oostenrijkse firma *DOKA*

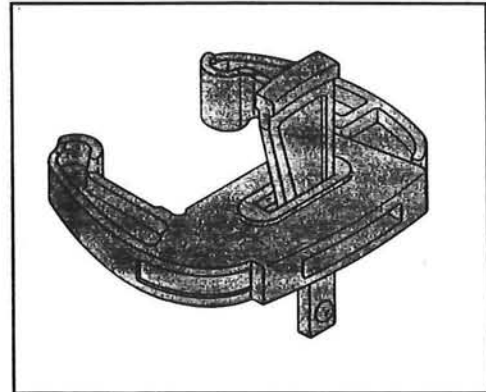
(bij HBW veelal toegepast) bekeken. Maar er zijn uiteraard ook andere firma's die soortgelijke systemen kunnen leveren. Deze elementen zijn in een groot aantal variaties aan vormen en afmetingen verkrijgbaar. De bekistingselementen bestaan uit een bekistingsplaat, die verstijfd is met behulp van een aluminium frame (☞ figuur O.7). Het voordeel van de toepassing van aluminium is dat de losse basis-elementen, variërend van 0.30x0.90 (10 kg) tot 0.75x2.70 (49 kg), zonder veel moeite door één à twee personen kunnen worden getild, hetgeen de montage-tijd verkort. Door het grote aantal mogelijke afmeting-configuraties van de elementen is bijna iedere gewenste afmeting van de totale wandbekisting samen te stellen. De losse elementen worden met behulp van een snelkoppeling aan elkaar gekoppeld (☞ figuur O.8).

Voor ieder wanddeel van de hal-opbouw (binnen- en buitenkant) kan de bekisting in elkaar worden gezet. Zodra het zinkelement is gearriveerd en de nodige voorbereidingen plaats hebben gevonden, kunnen de panelen op het element worden gehesen. Zelfs voor het hijsen van de complete panelen kent het systeem speciale bijpassende koppelingen. De afzonderlijke wandpanelen kunnen vervolgens met speciale hoekstukken en snelkoppelingen aan elkaar worden bevestigd. De gemonteerde wandpanelen worden met behulp van schoorstangen (☞ figuur O.9) afgesteund op het zinkelement.

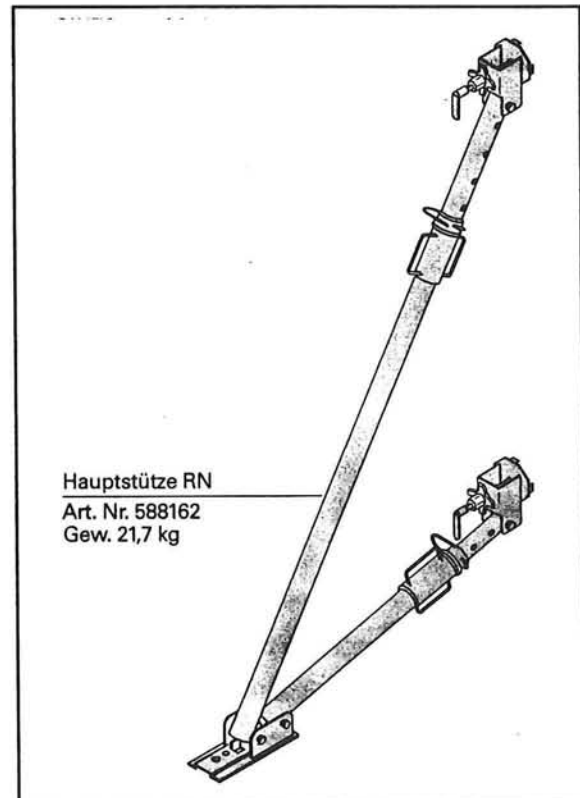
#### ■ Tijdsaspect.

Een kenmerk van de gehele operatie is dat de opbouw *snel* moet worden gerealiseerd. Nu is *snel* een relatief begrip.

Bij dit project wordt uitgegaan van een benodigde bouwtijd voor de hal-opbouw van ca. 1.5 maand (6 weken). Een oponthoud in het afzinkproces van ca. 1.5 maand wordt aanvaardbaar geacht, indien dit wordt gezien in verhouding tot de totale bouwtijd van het project.



Figuur O.8 Snelkoppeling.



Figuur O.9 Schoorstangen.

De snelheid van het plaatsen en stellen van de bekisting wordt in feite bepaald door het aantal mensen dat bij de operatie wordt ingezet. Immers, iedere m<sup>2</sup> bekisting die wordt aangebracht staat voor een aantal manuren. Voor de diverse bekistingsoorten gelden de volgende normen voor het plaatsen op het element, indien de afzonderlijke wandpanelen reeds van tevoren zijn gemonteerd.

|                | Bekisten              | Ontkisten             |
|----------------|-----------------------|-----------------------|
| Wandkist rond  | 0.6 mu/m <sup>2</sup> | 0.4 mu/m <sup>2</sup> |
| Wandkist recht | 0.5 mu/m <sup>2</sup> | 0.4 mu/m <sup>2</sup> |
| Dakkist        | 1.5 mu/m <sup>2</sup> | 1 mu/m <sup>2</sup>   |

Het monteren van de losse elementen tot een wandpaneel (prefabricage), dat van tevoren is geschiedt, is hierbij dus niet inbegrepen, aangezien dit onafhankelijk is van de hal-opbouw operatie.

Passen we de hierboven vermelde normen toe op de berekende hoeveelheden m<sup>2</sup> bekisting per wand, dan volgt het totaal aantal benodigde manuren.

| Deel | Oppervlak<br>[m <sup>2</sup> ] | Bekisten          |      | Ontkisten         |      |
|------|--------------------------------|-------------------|------|-------------------|------|
|      |                                | mu/m <sup>2</sup> | mu   | mu/m <sup>2</sup> | mu   |
| 1.   | 141                            | 0.6               | 85   | 0.4               | 56   |
| 2.   | 130.25                         | 0.6               | 78   | 0.4               | 52   |
| 3.   | 182.5                          | 0.5               | 91   | 0.4               | 73   |
| 4.   | 119                            | 0.5               | 60   | 0.4               | 47   |
| 5.   | 47.5                           | 0.5               | 24   | 0.4               | 19   |
|      |                                |                   | 338  |                   | 247  |
|      |                                | bi + bu           | 676  | bi + bu           | 494  |
| 6.   | ca.925                         | 1.5               | 1388 | 1                 | 925  |
|      |                                |                   | 2064 |                   | 1419 |

Het totaal aantal manuren dat binnen de periode van 6 weken moet worden gerekend is gelijk aan het totaal dat moet worden bekist (2064 mu) plus het totaal van het verwijderen van de buitenbekisting (247 mu). Zoals hiervoor op pagina 32 reeds is vermeld, wordt het verwijderen van de bekisting aan de binnenzijde niet meegerekend, daar dit na het afzinken in een later

stadium plaats kan vinden.

Het totaal aantal benodigde manuren is dus:  $2064 + 247 = 2311$  manuur. Dit komt weer neer op  $2311/40 = 58$  manweek. Hieruit is weer te berekenen hoeveel man ingezet moet worden om de operatie binnen de gestelde 6 weken te volbrengen.

Naast het aantal in te passen manuren is verder nog wat tijd benodigd:

- storten wanden : 1 werkdag
- storten dak : 1 werkdag
- harden wanden : 1 werkdag (3 dagen minus een weekend)
- harden dak : 4 werkdag (10 dagen minus twee weekeinden en deels parallel lopen met ontkisten buitenzijde)

Dit is dus een totaal van 7 werkdagen (= 1.4 werkweek).

Over blijft dus voor het inpassen van de bepaalde 58 manweken:

$$6 - 1.4 = 4.6 \text{ werkweken}$$

Het aantal benodigde mensen is dan:

$$58 / 4.6 = 13 \text{ mensen}$$

De eindconclusie is dus dat de operatie met circa 13 mensen binnen de gestelde termijn van zes weken is te voltooien. Dit aantal is, gezien de complexiteit van het geheel, heel redelijk.

Overigens zij nogmaals opgemerkt dat het prefabriceren van de complete wandbekistingspanelen, vóórdat de hal-opbouw operatie begint, niet in bovenstaande berekening is meegenomen. De 6 weken bouwtijd heeft dus betrekking op het moment dat het zinkelement ligt afgemeerd tot en met het moment dat het element klaar is om afgezonken te worden.

Bij de uitvoering van de gehele operatie ligt de nadruk op de **prefabricage** van de wandbekistingspanelen in combinatie met een zeer strak geregelde **logistiek**. Alleen bij juiste toepassing van deze aspecten is de voor de bouwtijd gestelde tijdlimiet van 6 weken te halen.

## Bijlage P. Omrekeningstabel diverse eenheden.

|          |   |  |
|----------|---|--|
| 0.1 MPa  | = | 10 m waterkolom                              |
| 0.01 MPa | = | 1 m waterkolom                               |
| 1 MPa    | = | 1 MN/m <sup>2</sup> = 1000 kN/m <sup>2</sup> |
| 1 Pa     | = | 1 N/m <sup>2</sup> = 1E-6 N/mm <sup>2</sup>  |

## **Bijlage Q. Tekeningen.**

Bij deze studie zijn een aantal tekeningen van het spoortracé gebruikt. Volledigheidshalve worden hieronder de nummers van deze tekeningen weergegeven.

### **■ Tekeningen van BTC/NS-IB:**

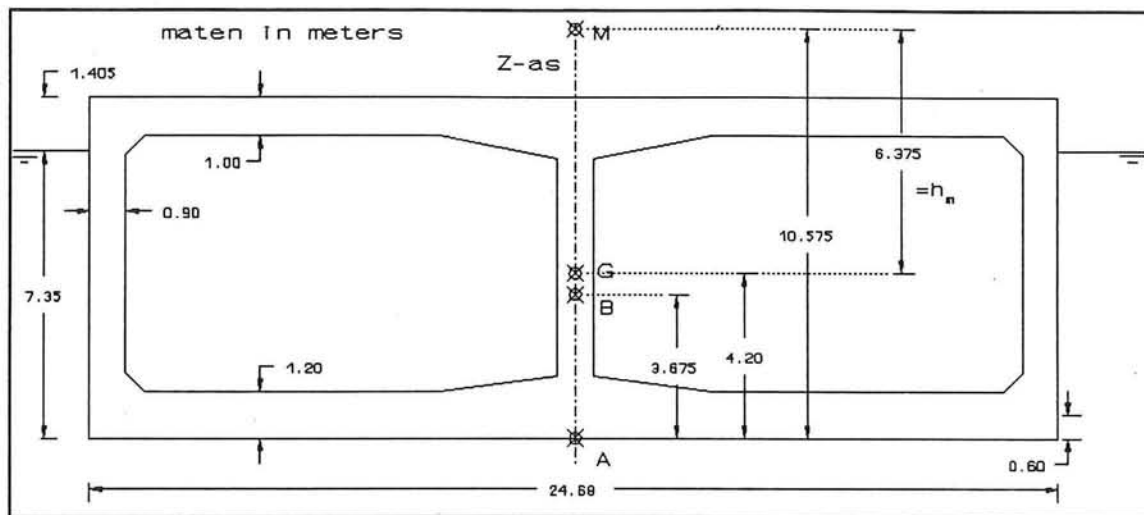
Teknr: 191112 / 096 / 05

Teknr: 191112 / 096 / 06

Teknr: 191112 / 096 / 07

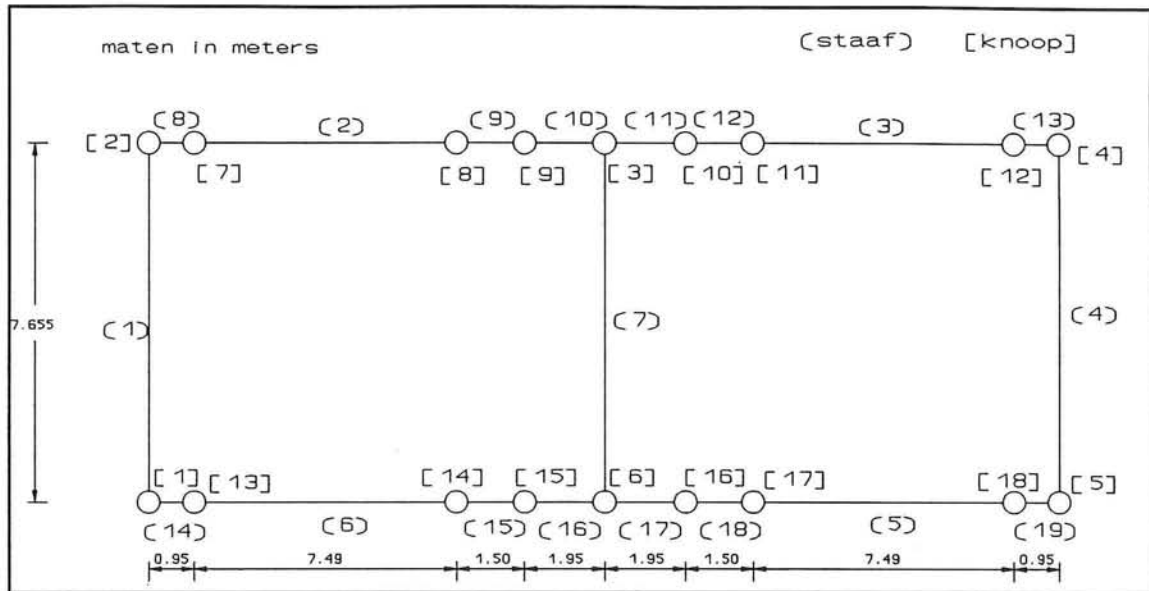
## **Bijlage R. Lijst van afkortingen.**

|      |  |
|------|--|
| BS   | Bovenkant Spoor                                  |
| BTC  | BoorTunnelCombinatie                             |
| GWS  | Grondwaterstand                                  |
| MV   | Maaiveld   |
| NAP  | Normaal Amsterdams Peil                          |
| NATM | New Austrian Tunneling Method                    |
| NS   | Nederlandse Spoorwegen                           |
| pvr  | profiel van vrije ruimte                         |
| TBM  | Tunnel Boor Machine                              |
| VTG  | Verzameling Technische Gegevens (NS-richtlijnen) |
| VMA  | Voorspanning met aanhechting                     |
| VZA  | Voorspanning zonder aanhechting                  |



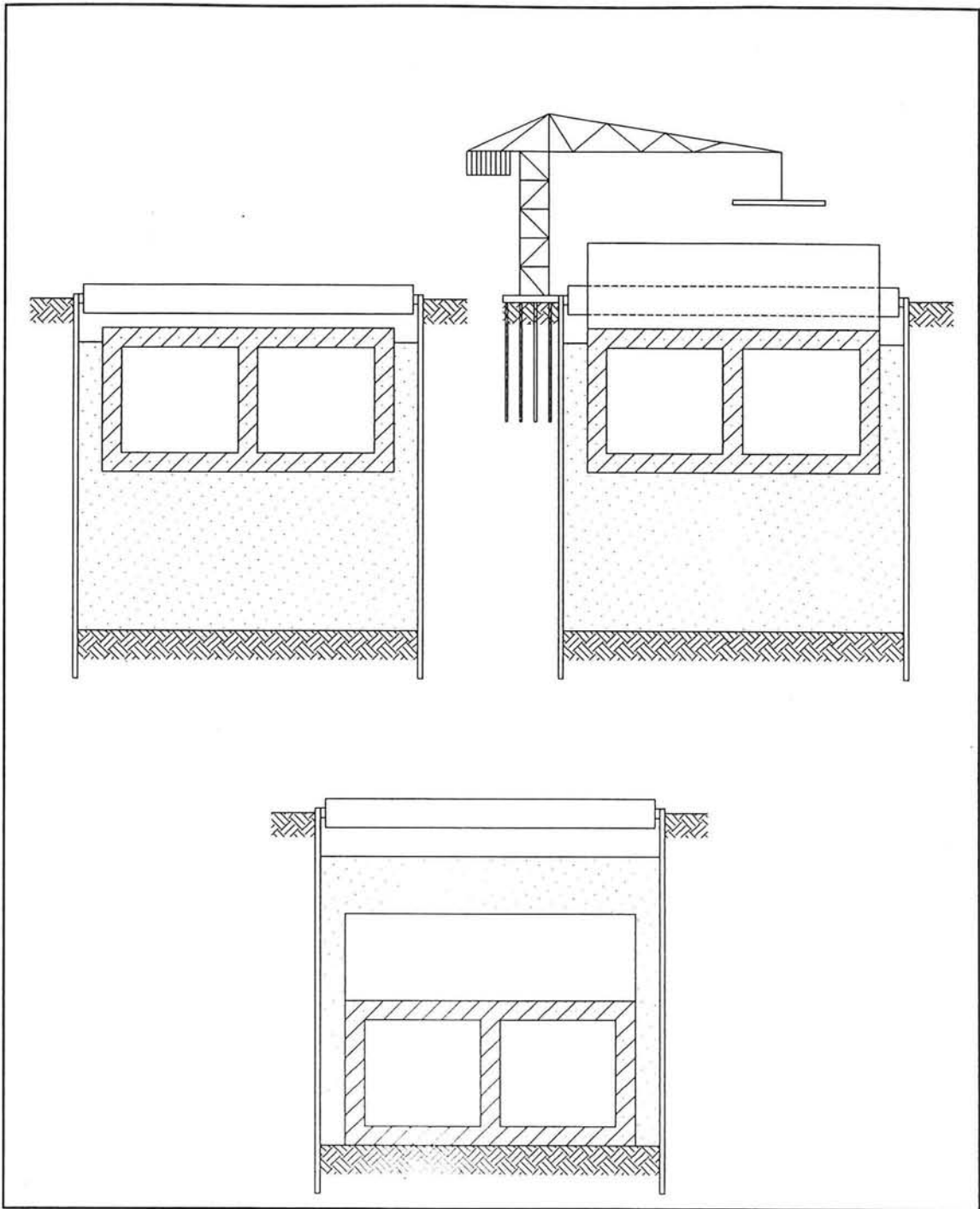
Figuur F.2 Ligging karakteristieke punten in doorsnede.





Figuur G.1 Overzicht geometrie voor berekening met PC-Frame : staafnummers ( ), knoopnummers [ ].

1991



Figuur O.1 In situ maken opbouw op drijvend element.

17/02/11

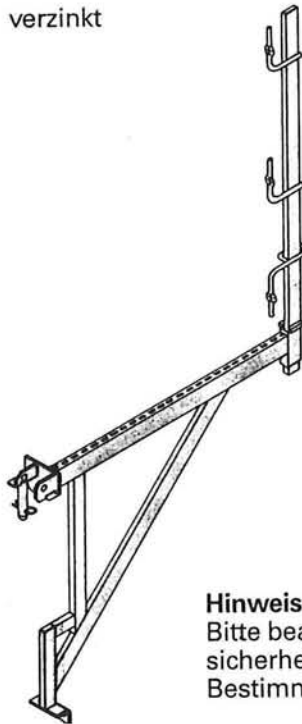
# Framaxkonsole 90

Framax bracket 90 / console de bétonnage 90 Framax

Art. Nr. 588167

12,5 kg

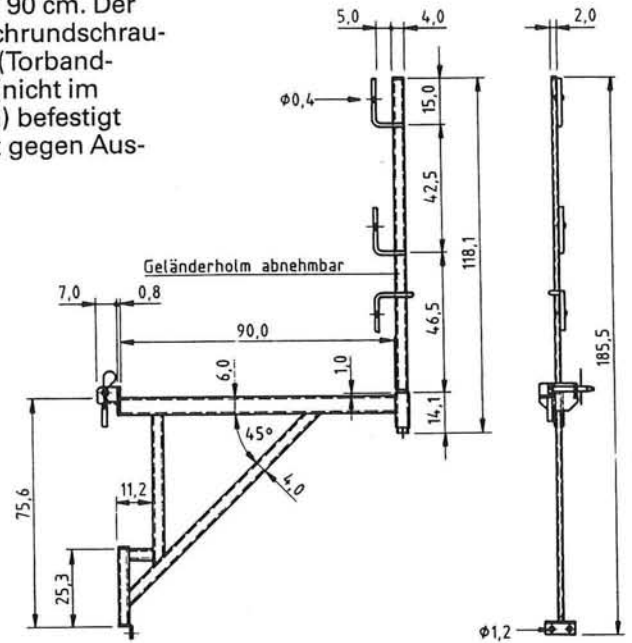
verzinkt



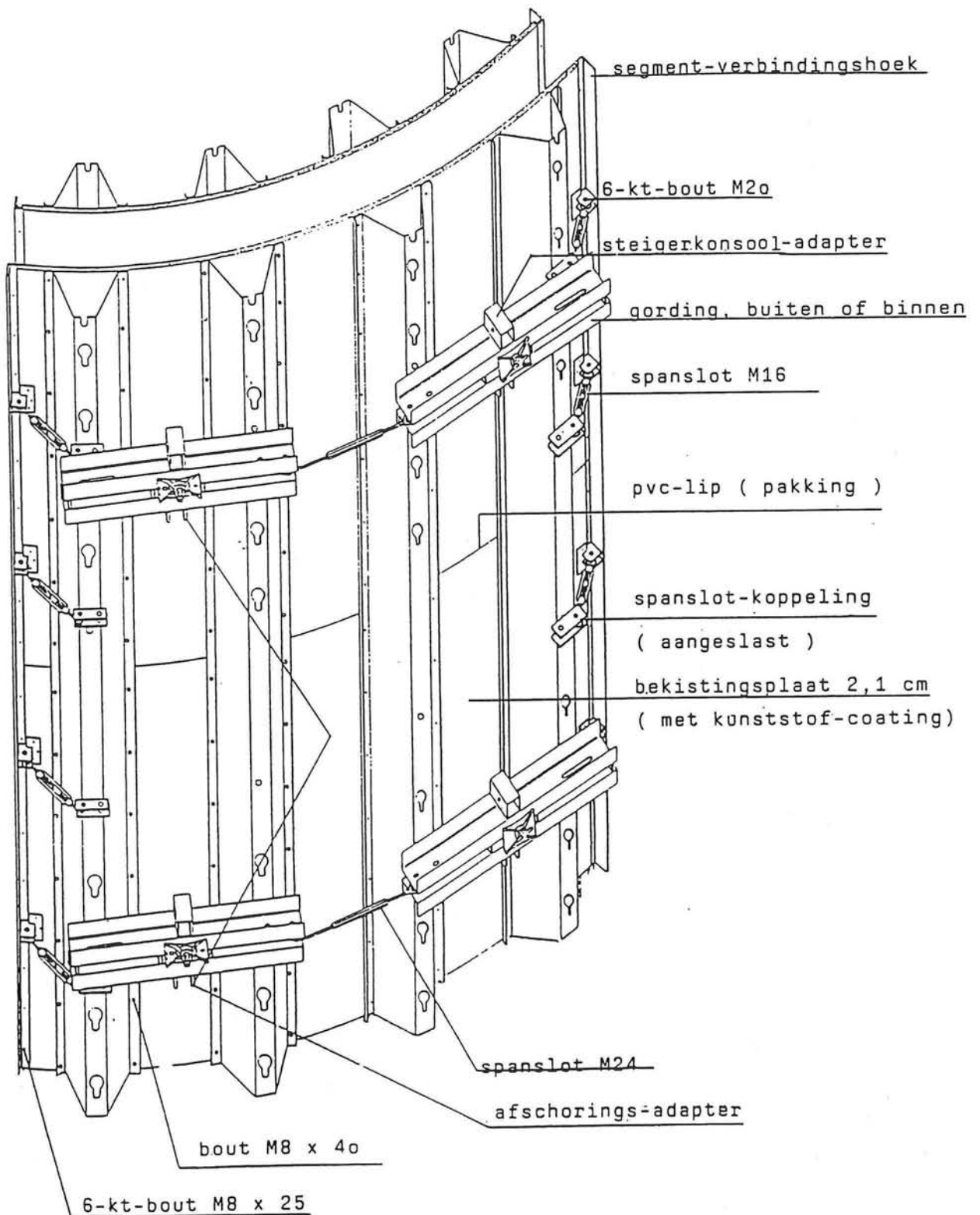
Universell einsetzbare Konsole zur Ausbildung von Arbeitsbühnen mit einer Bühnenbreite von 90 cm. Der Laufbelag kann mit Flachrundschrauben mit Vierkantansatz (Torbandschrauben) M 10 × 120 (nicht im Lieferumfang enthalten) befestigt werden. Die Konsole ist gegen Ausheben zu sichern.

Pro laufenden Meter Gerüst werden 1,5 m<sup>2</sup> Bohlenbelag benötigt.

**Hinweis:**  
Bitte beachten Sie die geltenden sicherheitstechnischen Bestimmungen.



Figuur O.3 Console.

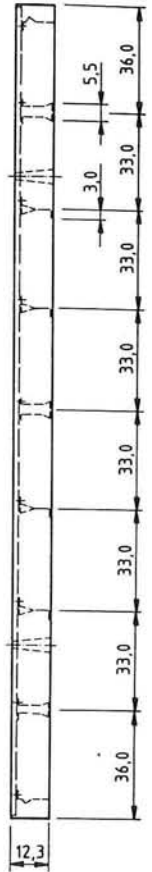
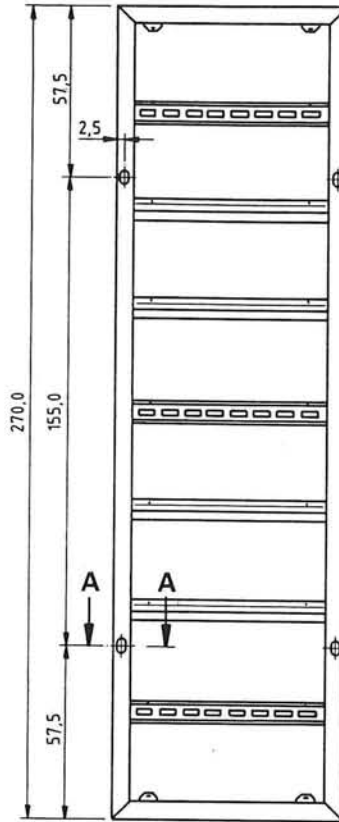
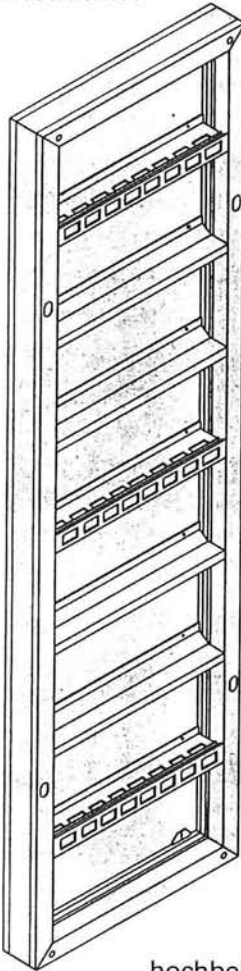


Figuur O.5 Trapezium-drager bekisting voor ronde wand.

**Alu-Framax Elemente 2,70 m**  
 Alu-Framax panels 2,70 m / panneaux Alu-Framax 2,70 m

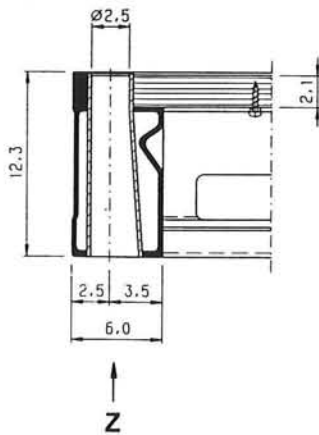
pulverbeschichtet

M 1:25/1:5

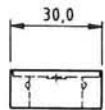


Handliche, hochbelastbare Elemente mit pulverbeschichtetem Aluminiumrahmen. Von hinten verschraubte, hochwertige, filmbeschichtete Schalhaut 21 mm (Framaxplatte), eingebautes Riegel-system, innen rundum laufende Vertiefung zum Anbringen des Schnellspanners RU.

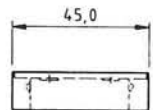
**Schnitt A-A**



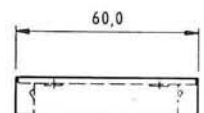
**Alu-Framax Element 0,30 x 2,70 m**  
 Art. Nr. 588308 28,0 kg



**Alu-Framax Element 0,45 x 2,70 m**  
 Art. Nr. 588306 35,0 kg



**Alu-Framax Element 0,60 x 2,70 m**  
 Art. Nr. 588304 42,0 kg



Figuur O.7 Alu Framax-systeem van DOKA.