

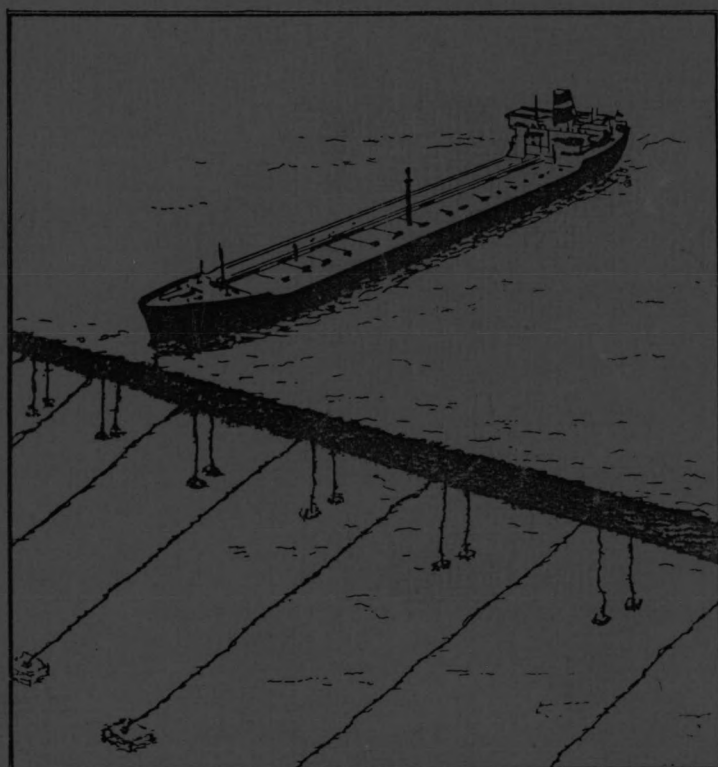
ZWEEVENDE TUNNEL

in de

STRAAT van MESSINA

Deelontwerp

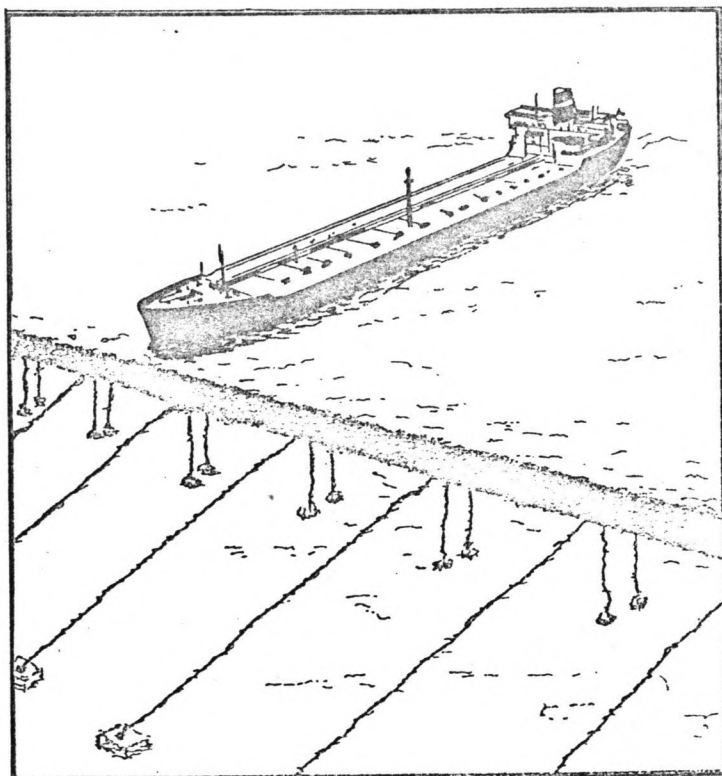
civiele-bedrijfskunde



TECHNISCHE HOGESCHOOL DELFT
AFDELING DER CIVIELE TECHNIEK
VAKGROEP WATERBOUWKUNDE

ZWEVENDE TUNNEL IN DE STRAAT VAN MESSINA.

DEELONTWERP CIVIELE BEDRIJFSKUNDE



R.P.B.C. van Groesen
Mei 1983

Afstudeerhoogleraar: Prof. ir. H.J. Wagenmaker
Afstudeerbegeleider: ir. K. Oterdoom

Inhoudsopgave.

1. Inleiding.	2
2. Werkplan.	4
2.1 Bouwactiviteiten op de oevers.	5
2.1.1 Te verrichten werkzaamheden.	5
2.1.2 Bouwtijd.	8
2.1.3 Middelen.	12
2.2 Verankeringspunten.	14
2.2.1 Te verrichten werkzaamheden.	14
2.2.2 Bouwtijd.	18
2.2.3 Middelen.	22
2.3 Zevende deel.	23
2.3.1 Te verrichten werkzaamheden.	23
2.3.2 Bouwtijd.	26
2.3.3 Middelen.	28
3. Afstemming van de drie deelprocessen op elkaar.	30
4. De bouwplaats van de tunnelsegmenten.	32
4.1 Keuze van een bouwplaats.	32
4.2 Overgang van land naar zee.	46
4.3 Keuze bouwmethode.	62
4.4 Transportsysteem op de bouwplaats.	65
5. Netwerkplanning en balkendiagram van de bouw van een tunnelsegment.	74
5.1 Bouwvolgorde van een tunnelsegment.	74
5.2 Hoofd- en deelactiviteiten met tijdsduur.	76
5.3 Toelichting op de tijdsduur deelactiviteiten.	79
5.4 Netwerkplanning van de hoofdactiviteiten.	87
5.4.1 Bouw van de omhullende ringen.	87
5.4.2 Bouw van het binnenwerk.	90
5.4.3 Assembleren van de ringen.	93
5.4.4 Afwerken van een tunnelsegment.	94
5.5 Afstemmen van de hoofdactiviteiten op elkaar.	95
5.6 Balkendiagram van de bouw van een tunnelsegment.	
6. Inrichting bouwplaats.	100
Samenvatting.	107

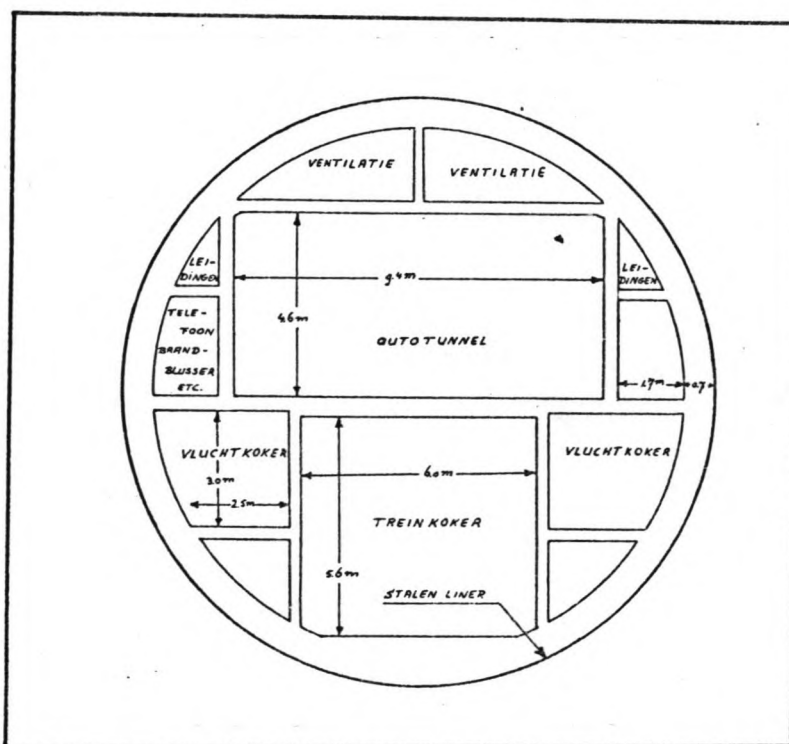
1. Inleiding.

Het eiland Sicilië wordt van het vaste land van Italië gescheiden door de Straat van Messina. De afstand tussen de oevers is op het smalste punt van de Straat van Messina slechts 3 km.

In het hoofdontwerp is onderzocht in hoeverre met een zwevende tunnel, als oeververbinding, kan worden ingespeeld op de ter plaatse heersende extreme omstandigheden. Voor deze extreme omstandigheden wordt verwezen naar het vooronderzoek.

Een zwevende tunnel is een tunnel waarvan het gewicht van de verplaatste hoeveelheid water groter is dan de som van de neerwaarts gerichte krachten van eigen gewicht, mobiele belasting, enz. Om opdrijven te verhinderen is de tunnel met kabels verankerd aan de zeebodem en "zweeft" als zodanig tussen de zeebodem en het wateroppervlak.

De oeververbinding is opgebouwd uit drie delen: een zwevend tunnelgedeelte en twee geboorde tunneldelen. De tunnel moet plaats bieden aan een éénspoorstunnel en een autoweg met twee rijstroken. De tunneldoorsnede van het zwevende tunnelgedeelte is te zien in figuur 0.



Figuur 0: Doorsnede zwevend tunnelsegment

In dit deelontwerp wordt eerst (hoofdstuk 2) een globale tijdplanning opgezet in de vorm van balkendiagrammen voor de drie deelprocessen van de bouw te weten:

- 1 Bouwactiviteiten op de oevers.
- 2 Verankeringspunten.
- 3 Zwevende tunnelgedeelte.

In hoofdstuk 3 wordt onderzocht welke relatie er tussen de drie deelprocessen bestaat. Vervolgens kunnen deze (beter) op elkaar afgestemd worden om de afstemverliezen beperkt te houden.

In hoofdstuk 4 wordt nader ingegaan op de bouw van het zwevende gedeelte van de tunnel. Waar de tunnelsegmenten van dit zwevende gedeelte gebouwd worden en hoe dit in zijn werk gaat.

Op het werk zelf wordt nader ingegaan in hoofdstuk 5. De tijdsduur van de deelactiviteiten wordt bepaald en nadat de relatie tussen de deelactiviteiten is vastgelegd kan voor de verschillende hoofdactiviteiten een netwerkplanning worden gemaakt. Door de relatie tussen de hoofdactiviteiten te bepalen kan tenslotte een balkendiagram van de gehele bouw van een tunnelsegment worden gemaakt.

In het laatste hoofdstuk (6) gaan we met behulp van dit balkendiagram werken. Zo kan dit balkendiagram helpen bij de bepaling van de grootte van de bouwplaats, het aantal productievormen, bekistingen, enz.

2. Werkplan.

Voordat met de werkelijke bouw zal worden begonnen, wordt eerst een werkplan opgesteld. Zo'n werkplan is een simulatie van het bouwproces.

Het grote voordeel van het tevoren maken van een werkplan is dat de konsequenties van genomen beslissingen zichtbaar worden. Nadelige effecten van genomen beslissingen kunnen in dit stadium nog teniet worden gedaan. Het is dus mogelijk door herziening en aanpassing van het werkplan een ideale afstemming van de verschillende bouwactiviteiten op elkaar te verkrijgen. Ook kan het bouwproces aan de randvoorwaarden worden aangepast. Enige voorbeelden van deze randvoorwaarden zijn:

- maximaal te besteden tijdsduur
- afmetingen van de bouwplaats
- budget per tijdseenheid
- aantal beschikbare mensen
- aantal beschikbare machines
- hoeveelheid materiaal

Wordt van tevoren een goed werkplan opgesteld en houden we ons daaraan tijdens de bouw dan kunnen de ter beschikking staande middelen optimaal worden gebruikt.

Voor het opstellen van een werkplan dient het bouwproces te worden geanalyseerd. Deze analyse verloopt van grof naar fijn. Het bouwproces is opgesplitst te denken in drie deelprocessen te weten:

- 1 Bouwactiviteiten op de beide oevers.

- 2 Bouw van de verankeringspunten in de zeebodem.

- 3 Bouw van het zwevende tunnelgedeelte.

Deze drie deelprocessen zullen nader worden onderzocht. Daarna zullen ze op elkaar worden afgestemd. Er zal extra aandacht worden besteed aan de werkplanning van het zwevende gedeelte van de tunnel, omdat dit deelproces in het bijzonder aansluit op de rest van dit afstudeeronderwerp.

2.1 Bouwactiviteiten op de beide oevers.

2.1.1 Te verrichten werkzaamheden.

De bouwactiviteiten op de beide oevers zijn op te splitsen in vier verschillende delen:

1. treintunnel.
2. autotunnel.
3. aansluiting op bestaande infrastructuur.
4. ventilatieschachten.

Zoals reeds in het vooronderzoek hoofdstuk 8 is vermeld volgen de trein- en autotunnel op de oevers niet hetzelfde tracé, of anders gezegd over het niet zwevende deel van de tunnel wordt de autotunnel afgesplitst van de spoortunnel. Dit wordt gedaan omdat de helling van een autotunnel steiler gemaakt kan worden als die van een spoortunnel. De langere spoortunnel hoeft (indien afsplitsing plaats vindt) geen diameter van 15 meter, maar van slechts 8 à 9 meter te hebben. Bovendien maakt dit een betere aansluiting mogelijk van zowel trein- als autotunnel op de reeds bestaande voorzieningen van respectievelijk spoor- en auto-wegennet.

Op de oevers worden de ventilatieschachten gebouwd. Deze ventilatieschachten moeten zo dicht mogelijk langs de waterlijn worden geplaatst. Hierdoor blijft de lengte tussen de twee ventilatieschachten beperkt tot 3 km.

De bouwput voor de ventilatieschacht zal groter worden gemaakt dan strikt noodzakelijk is. Vanuit deze bouwput zal eerst begonnen worden met de bouw van een schildtunnel voor zowel trein- als autoverkeer in de richting van de zee. Deze schildtunnel wordt zo ver mogelijk uitgebouwd ($\pm$ 200 meter).

Het uiteinde wordt voorzien van een kopschot, zodat geen zeewater kan binnendringen in het reeds voltooide deel van de tunnel. Daarna kan het uiteinde van de tunnel worden uitgebaggerd, zodat het eerste zwevende tunnelsegment aan het uiteinde van de schildtunnel kan worden gekoppeld.

Dit gedeelte van de bouwactiviteiten op de oevers geniet voorrang omdat niet eerder met het plaatsen van de zwevende tunnelsegmenten kan worden begonnen voordat het uiteinde van de schildtunnel uitgebaggerd en wel aanwezig is. Dit is namelijk het punt dat de plaatsvastheid van de zwevende tunnelsegmenten in langsrichting moet garanderen.

Langs de bouwput van waaruit de bouw van de schildtunnel plaatsvindt kan het materieel worden aangevoerd dat na installatie van zwevende tunnelsegmenten nodig is om de kopschotten te verwijderen. Ook materialen nodig voor de afwerking van de tunnelsegmenten kunnen hierlangs worden aangevoerd.

In de bouwput kan ook de overgang worden gebouwd van twee aparte tunnelkokers tot één gecombineerde trein-, autotunnel.

Tegelijkertijd kan met de bouw van de gescheiden auto- en treintunnel begonnen worden. Pas wanneer één van deze twee tunnels een doorgaande verbinding vormt met het bouwdok (en dus ook van buitenaf toegang verschaft tot het zwevende deel van de tunnel) mag met de bouw van de ventilatieschachten worden begonnen. Het kan echter verstandiger zijn hiermee te wachten tot het grootste deel van de bouw van het zwevende deel van de tunnel achter de rug is. De weg voor aan en afvoer van materiaal is vanaf het bouwdok korter dan vanaf de toegang van de autotunnel.

Kort samengevat bestaan de bouwactiviteiten op de oevers uit drie fases:

1. Voorbereiding.
2. De bouw zelf.
3. De afwerking.

Deze drie punten zullen puntsgewijs nader worden toegelicht.

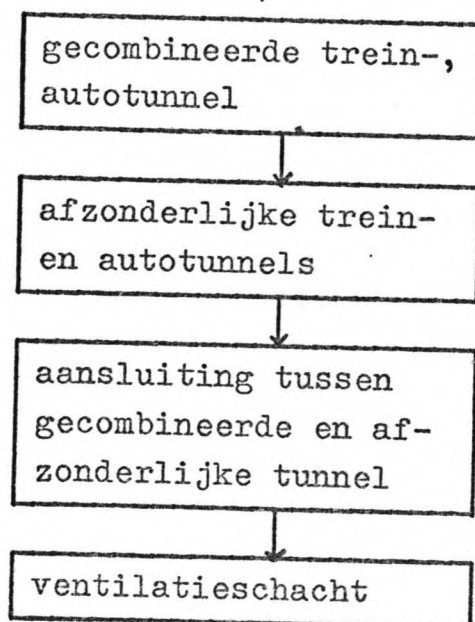
1. Voorbereiding.

De voorbereidende activiteiten zullen voor het grootste deel bestaan uit het graven van de bouwput. Tegelijkertijd kan de bouwplaats worden ingericht.

De inrichting van de bouwplaatsen voor de trein- en autotunnel kan hierna worden verzorgd omdat het minder snel tot stand komen van deze tunnels de rest van de bouw niet hindert.

2. De bouw zelf.

Hoewel de verschillende bouwactiviteiten elkaar gedeeltelijk kunnen overlappen moet in grote lijnen toch de onderstaande volgorde worden aangehouden:



3. De afwerking.

Met de afwerking kan al worden begonnen tijdens de bouwfase. Deze werkzaamheden zullen bestaan uit het asfalteren van de autotunnel, het monteren van de rails in de spoortunnel en het aanbrengen van verlichting, veiligheidsvoorzieningen, leidingen, ventilatoren, enz.

Ook het wegbaggeren van het materiaal rond het uiteinde van de schildtunnel, om de plaatsing van het eerste zwevende tunnelsegment mogelijk te maken, is te zien als afwerking.

Al deze werkzaamheden kunnen de bouw zo kort op de voet volgen dat hiervoor na voltooiing van de bouw weinig extra tijd nodig zal zijn.

2.1.2 Bouwtijd.

De bouwtijd van de werkzaamheden op beide oevers hangt voor het grootste deel af van de beslissing of vanuit één oever wordt gebouwd naar de andere oever of vanuit twee oevers gelijktijdig.

Vrijwel alle factoren die bij de beslissing een rol spelen pleiten voor het bouwen vanuit één oever. Dit zal nader worden toegelicht.

Het kritieke pad van de totale bouwtijd zal niet worden bepaald door de bouwactiviteiten op de oevers, maar zoals later zal blijken het maken van de verankeringspunten in de zeebodem en het gereedkomen van de prefab tunnelsegmenten. Op grond daarvan is het beter de bouwactiviteiten op beide oevers na elkaar uit te voeren. Er is dan minder (ongeveer de helft) aan materieel nodig. Ook de bezetting van personeel wordt hierdoor beter over de tijd uitgespreid. Verder worden kosten aan personeel en materiaal naar de eindfase van de bouw verschoven wat met het oog op de rente de bouwkosten zal drukken.

Een uitvoeringstechnisch voordeel van het bouwen vanuit één oever is dat het laatste tunnelsegment geplaatst en gekoppeld wordt in ondiep water (immers dicht bij de andere oever).

In ondiep water zijn de kabels waaraan het installatieschip verankerd ligt korter en zullen derhalve de verplaatsingen kleiner zijn. Er kan dan met een grotere nauwkeurigheid worden gewerkt en de kans dat het te plaatsen tunnelsegment tegen het reeds geplaatste deel van de tunnel stoot is geringer. Ook de afwerking van dit laatste tunnelsegment zal hierdoor gemakkelijker zijn.

De grondtabel van dit werk is hieronder gegeven.

No.	Activiteit	Tijds- duur in maanden	Opmerking
1	Bouwput graven en inrichten bouwplaats (1)	4	
2	Inrichting bouwplaats spoor- en autotunnel afzonderlijk (1)	4	
3	Bouw gecombineerde spoor- auto- tunnel (lengte 200 meter) (1)	14	Na activiteit 1
4	Bouw autotunnel (lengte 1,3 km) (1)	22	Na activiteit 2
5	Bouw spoortunnel (lengte 2 km) (1)	24	Na activiteit 2
6	Uitbaggeren gecombineerde tunnel (1)	6	Na activiteit 3
7	Bouw ventilatieschacht (1)	12	Na activiteit 4
8	Afwerking van alle bouwactivitei- ten op de oever (1)	18	Na voltooiing deel van activiteit 3
9	Doortrekken van spoor- en auto- wegen naar de verschillende tun- nels (1)	12	Voltooiing 4 maan- den na aanvangacti- viteiten 4 en 5

Tabel 1: Grondtabel bouwactiviteiten op de oevers.

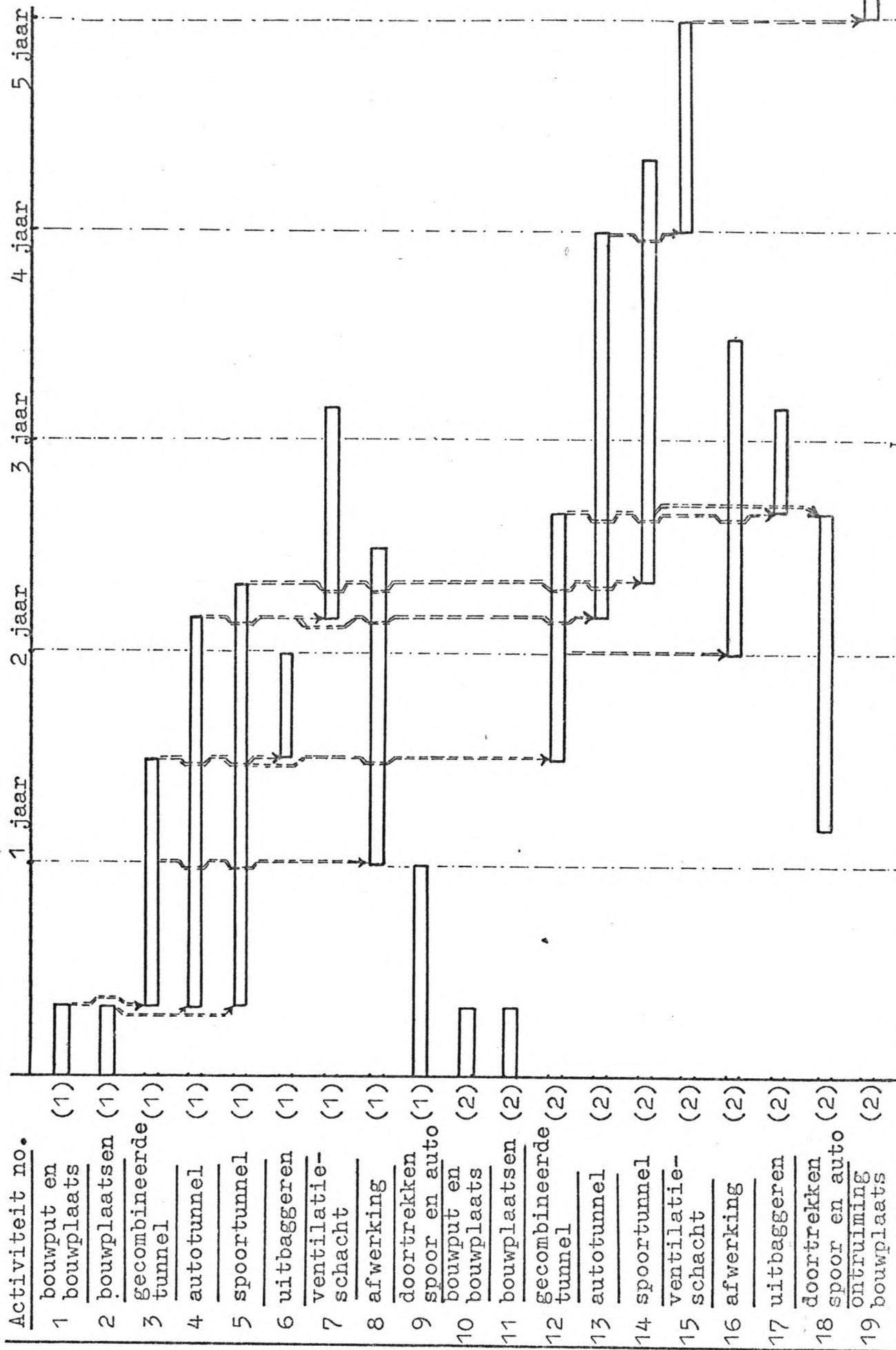
No.	Activiteit	Tijds- duur in maanden	Opmerking
10	Bouwput en inrichting bouwplaats (2)	4	
11	Inrichting gescheiden bouwplaatsen van spoor- en autotunnel (2)	4	
12	Bouw gecombineerde spoor- autotunnel (lengte 200 meter) (2)	14	Na de activiteiten 3 en 10
13	Bouw autotunnel (lengte 1,3 km) (2)	22	Na de activiteiten 4 en 11
14	Bouw spoortunnel (lengte 2 km) (2)	24	Na de activiteiten 5 en 11
15	Bouw ventilatieschacht (2)	12	Na activiteit 13 in verband met aan- en afvoer naar gecombineerde tunnel
16	Afwerking (2)	18	Na voltooiing deel van activiteit 12
17	Uitbaggeren gecombineerde tunnel (2)	6	Nadat activiteit 12 voltooid is
18	Het doortrekken van spoor- en auto- weg naar de verschillende tunnels (2)	18	Voltooiing 4 maanden na aanvang activiteiten 13 en 14
19	Ontruiming bouwplaatsen (1) en (2) en dichten bouwput	4	Na gereedkomen alle bouwactiviteiten op beide oevers.

Tabel 1: Grondtabel bouwactiviteiten op de oevers.

Het balken-diagram van de bouwactiviteiten op beide oevers is gegeven op bladzijde 10.

Balken-diagram 1.

Bouwactiviteiten op beide oevers.



2.1.3 Middelen.

1. Manschappen.

Er zal gedurende de bouw gestreefd worden naar een zo constant mogelijke personeelsbezetting. Regelmatige wijzigingen van de personeelsbezetting geven immers extra moeilijkheden bij de planning. Is het personeel op het juiste tijdstip beschikbaar? Zijn het de juiste mensen? Zowel een personeelstekort als een overschot heeft afstemverliezen tot gevolg. Bij een personeelstekort kan het afstemverlies bestaan uit verlenging van de bouwtijd van de gehele oeververbinding. Een personeelsoverschot geeft afstemverliezen in de vorm van uitbetaald salaris waarvoor geen arbeid verricht "kan" worden.

Het streven naar een constante personeelsbezetting zal ongetwijfeld leiden tot verlenging van de bouwtijd. Dit is, zoals in paragraaf 2.2 en 2.3 zal blijken, acceptabel omdat de bouwactiviteiten op de oevers niet op het kritieke pad liggen van de bouw van de gehele oeververbinding.

Zoals in de grondtabel op bladzijde 10 is te zien, zullen er een aantal activiteiten zijn die niet behoeven te worden meegenomen bij een planning van de personeelsbezetting. Deze zijn:

- uitbaggeren van het uiteinde van de gecombineerde tunnel
- afwerkingswerkzaamheden
- aansluiting op bestaande spoor- en autowegvoorzieningen.

Dit is als volgt te verklaren: het uitbaggeren en het aansluiten van spoor- en autotunnel op bestaande voorzieningen zijn werkzaamheden die

in een andere branche thuishoren respectievelijk de baggerwereld en spoor- en wegenbouw.

Het personeel van de tunnelbouw zal niet gemakkelijk op deze plaatsen inzetbaar zijn, omdat daar gewerkt wordt met specialistisch materieel dat toch de nodige opleiding of inwerktijd vereist.

De afwerkingswerkzaamheden nemen een belangrijke plaats in. Doordat deze werkzaamheden minder tijdgebonden zijn, is een lage bezettingsgraad (van personeel) voldoende. Hiermee wordt de mogelijkheid geschapen personeelstekorten en -overschotten bij andere deelactiviteiten van de bouw op te vangen.

2. Materieel.

Aan het begin van de bouw zal een vrij grote investering nodig zijn om het benodigde materieel aan te schaffen. Enige voorbeelden hiervan zijn de schilden voor de bouw van de tunnels, een investering in het eerste jaar, de hijskranen en graafwerktuigen op de bouwplaats(en) en nog veel meer minder groot maar wel noodzakelijk ander materieel.

Doordat de bouwactiviteiten op de oevers na elkaar starten is het mogelijk het materieel twee keer te gebruiken en in de tweede fase van de bouw zal dan ook weinig materieel worden aangeschaft. Wel zal er na verloop van enige tijd materieel vervangen moeten worden vanwege slijtage, maar het gaat dan vaak om kleinere bedragen. De levensduur van het groot materieel is afgestemd op de duur van de bouw.

Voor het baggeren is het niet rendabel zelf hiervoor het benodigde materieel aan te schaffen daar de duur van het baggeren maar een half jaar is. Dit is werk om te worden uitbesteed.

Hoewel de tijd die nodig is voor de aanleg van de spoor- en autowegen langer zal zijn, is ook dit deel van het werk beter uit te besteden.

3. Materiaal.

Het materiaalverbruik zal over de bouwperiode een vrij regelmatig verloop vertonen. Dit komt doordat van het begin tot het eind van de bouw aan hetzelfde type constructie wordt gewerkt met een gelijkmatige personeelsbezetting.

Bovendien wordt halverwege de bouwtijd het hele proces als het ware gerepeteerd.

Het constante materiaalverbruik is gunstig voor de bevoorrading en de grootte van de bouwplaats.

4. Geld.

Door de kosten die gepaard gaan met de aanschaf van materieel en de inrichting van de bouwplaats zal aan het begin van de bouwperiode een piek in de uitgaven te zien zijn. Over de verdere bouwperiode zullen de uitgaven echter een regelmatig verloop vertonen. Dit is te danken aan het gelijkmatig materiaalverbruik en de mogelijkheid om een continue personeelsbezetting in de planning mee te nemen.

5. Ruimte.

Het gebruik van bouwruimte en ruimte nodig voor de opslag van bouw materiaal is in de loop van de tijd constant en ligt ook min of meer vast.

2.2 De verankeringspunten.

2.2.1 Te verrichten werkzaamheden.

De bouw van de verankeringspunten in de zeebodem bestaat uit drie fases:

1. Voorbereiding.
2. Eigenlijke bouw.
3. Afwerking.

De bouw van verankeringspunten in de zeebodem zal worden verricht met speciaal daarvoor ontworpen apparatuur. De gedachte gaat hierbij uit naar een schip dat is voorzien van een boorbuis. Deze boorbuis, voorzien van een geleide buis voor de sterkte en geleiding, boort een gat in de zeebodem. Dit gat wordt volgegrout en aan de trekpaal die dan is gevormd wordt de verankeringskabel bevestigd.

Gezien de grootte van de kracht is het verstandig voor een verankeringskracht over meerdere palen te spreiden. Hierdoor wordt een extra veiligheid ingebouwd, immers mocht een paal of kabel niet voldoen dan zijn er "enige" andere om tesamen de weggevallen kracht over te nemen. Bovendien worden de palen kleiner van omvang en zal de bouw hierdoor minder gecompliceerd zijn.

Tot slot is ook ter plaatse van de tunnel zelf door spreiding van de kabelkrachten over meerdere kabels een geleidelijke introductie van de kabelkrachten mogelijk.

1. Voorbereiding.

Aan de eigenlijke bouw gaan verschillende voorbereidende activiteiten vooraf te weten:

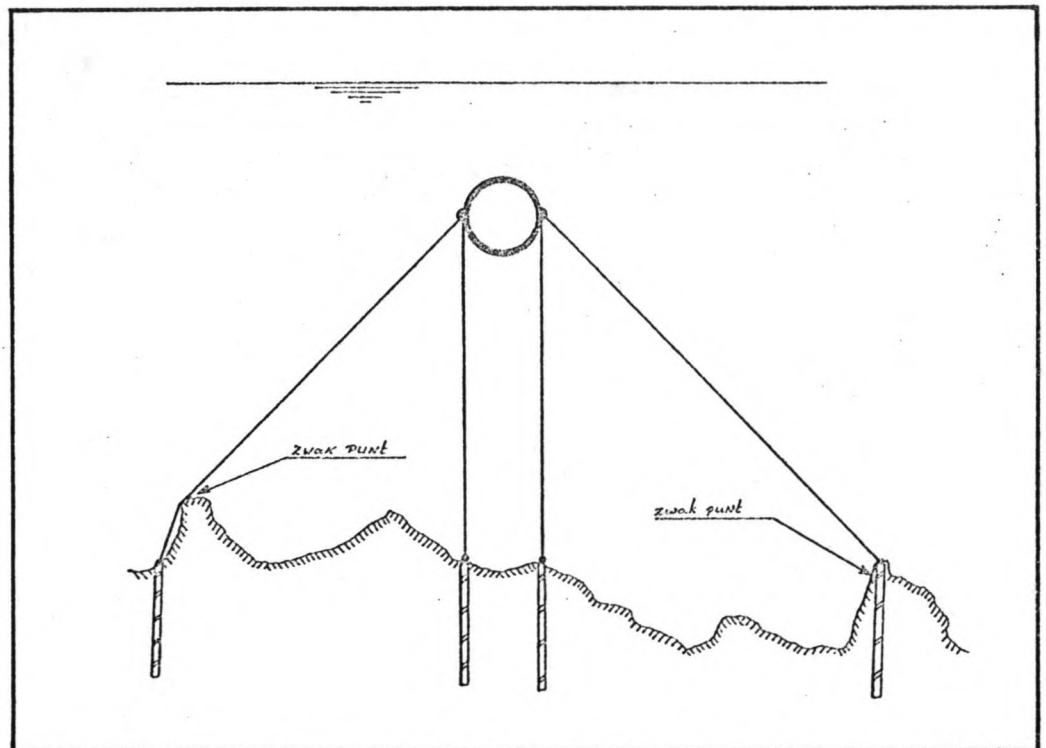
1. Het ontwerpen en bouwen van een boorschip
2. Het nauwkeurig aftasten, opmeten en in kaart brengen van de zeebodem
3. Het maken van de verankeringskabels van verschillende lengte en diameter.

Het ontwerpen en bouwen van het schip zal het meeste tijd vergen van de voorbereidende werkzaamheden. Dit komt doordat zonder dit schip met de eigenlijke werkzaamheden nog niet kan worden begonnen.

Met het nauwkeurig opmeten en in kaart brengen van de zeebodem kan in een vrij vroeg stadium worden begonnen. Voordat ergens een verankerings-

punt wordt geboord, moet dit gebied eerst in kaart zijn gebracht om te weten waar geboord moet worden, hoe lang de boorbuis moet zijn en hoe dik en lang de verankeringskabel.

Het aftasten en in kaart brengen van de zeebodem is nodig om situaties zoals geschetst in figuur 1 te voorkomen.



Figuur 1: Verankering met zwakke punten.

Bij het nauwkeurig in kaart brengen kunnen dan andere lokaties voor verankering worden gekozen waar deze problemen zich niet voordoen.

2. De eigenlijke bouw.

Met de bouw van de verankeringspunten kan worden begonnen zodra het boorschip klaar is. In feite is dit een zich vele malen herhalend proces met een relatief korte cyclusduur. Een zo'n cyclus loopt dan van het moment dat met boren wordt begonnen totdat de veranke-

ringskabels bevestigd aan een drijver te wachten ligt voor montage.

De moeilijkheidsgraad van de boringen hangt samen met de diepte. Omdat de stroming ter plaatse wordt opgewekt door een dubbeldaagsgetij, ligt het voor de hand in de periode van springtij in ondiep water en in de periode van doodtij in diep water te werken. Zie voor het gedrag van dit dubbeldaags getij het vooronderzoek.

Het aantal verankeringspunten varieert ook met de waterdiepte. Dat is als volgt te verklaren. Het verankeringsysteem is te zien als een verende ondersteuning voor de tunnelsegmenten. Zoals we in deel I gezien hebben laat deze verende ondersteuning bij de extreem optredende belastinggevallen een verplaatsing toe van 0,048 meter in horizontale- en 0,030 meter in verticale richting. Dit bij de maximale waterdiepte van 150 meter (de afstand bovenzijde tunnel tot de bodem is dan 110 meter). Deze verplaatsingen zijn acceptabel en het is dan ook zinloos de veerstijfheid nog groter te maken (ofwel de verplaatsingen nog kleiner) in minder diep water, als dit gepaard gaat met een duur verankeringsysteem.

Voor het minder diepe gedeelte van de Straat kan de tunnelconstructie worden voorzien van extra ballastmateriaal. De resulterende opdrijvende kracht daalt hierdoor en de diameter van de verankeringskabels kan afnemen. Hierdoor kunnen ook het aantal verankeringspunten, dat de kabelkracht moet opnemen, afnemen.

Bij een segmentlengte van 50 meter zijn er 60 zwevende tunnelsegmenten. Ieder tunnelsegment is verankerd met acht kabels, vier aan voor- en vier aan achterzijde. Als we aannemen dat voor het diepe deel van de tunnel per verankeringspunt twee palen in de bodem worden gemaakt en voor het ondiepe gedeelte slechts één, dan komen we op een totaal aantal palen (verankeringspunten in de bodem) van $60 \cdot 8 \cdot 1,5 = 720$.

Hierbij moet worden opgemerkt dat op de variërende kracht niet alleen voor variatie van het aantal verankeringspunten kan worden ingespeeld, maar ook door de diepte van een paal in de zeebodem en de hiermee samenhangende grootte van de op te nemen kracht.

3. De afwerking.

Als afwerking van dit deel van de bouw is te zien het plaatsen van de verankeringskabels aan de tunnelsegmenten en het op spanning brengen van deze kabels. Dit is het enige moment dat deze bouw moet aansluiten op andere bouwactiviteiten.

Het spreekt voor zich dat de bouw van de verankeringspunten in de zeebodem ruim vooruit moet lopen op de plaatsing van de segmenten om eventueel oponthoud op te kunnen vangen.

2.2.2 Bouwtijd.

De bouwtijd van de verankeringspunten in de zeebodem wordt bepaald door de bouwtijd van boorschip (schepen) en de benodigde tijdsduur voor het fabriceren van de 720 palen in de zeebodem.

In de bouwtijd die nodig is voor het maken van een boorschip zit relatief weinig speling.

Bovendien is de speling slechts éénmalig. Als de bouwtijd moet worden teruggebracht of als deze binnen een gestelde tijdslimiet moet worden gehouden, kunnen we dit het beste doen door werkzaamheden te beschouwen die zich tijdens de bouw vele malen herhalen. Voor deze bouw zijn dat de 720 palen in de zeebodem.

Stellen we de gemiddelde cyclusduur voor de fabricage van één paal op vier dagen dan zou dit voor 720 palen een bouwtijd zijn van:

$$\frac{720 \cdot 4}{360} = 8 \text{ jaar.}$$

Deze acht jaar wordt dan ongetwijfeld de "bottle neck" van de gehele bouw. Over investeringen die in deze tijdsperiode zijn gedaan moet wel rente worden betaald, maar opbrengst is er nog niet. Bovendien wordt deze 8 jaar alleen gehaald als er continu wordt doorgewerkt, dus ook in weekends en vakantiemaanden. Verder leiden alle onderhouds- en reparatiewerkzaamheden en onwerkbaar weer tot verlenging van deze tijdsduur.

Op grond van bovenstaande gegevens verdient het sterk de voorkeur te werken met twee in plaats van één boorschip. Hoewel dit een extra investering inhoudt, wordt deze ruimschoots terug verdiend doordat de tunnel eerder opgeleverd kan worden en dus in feite eerder "opbrengst" levert.

Door toevoeging van een tweede boorschip wordt het aantal benodigde werkbare dagen zover terug gebracht dat er ook ruimte zal zijn voor onderhouds- en reparatiewerkzaamheden en periodes waarin het werk kan worden stilgelegd (weekends en vakantie). Bovendien zal onwerkbaar weer niet meer leiden tot verschuiving van de datum van oplevering.

De grondtabel van deze werkzaamheden is hieronder te zien.

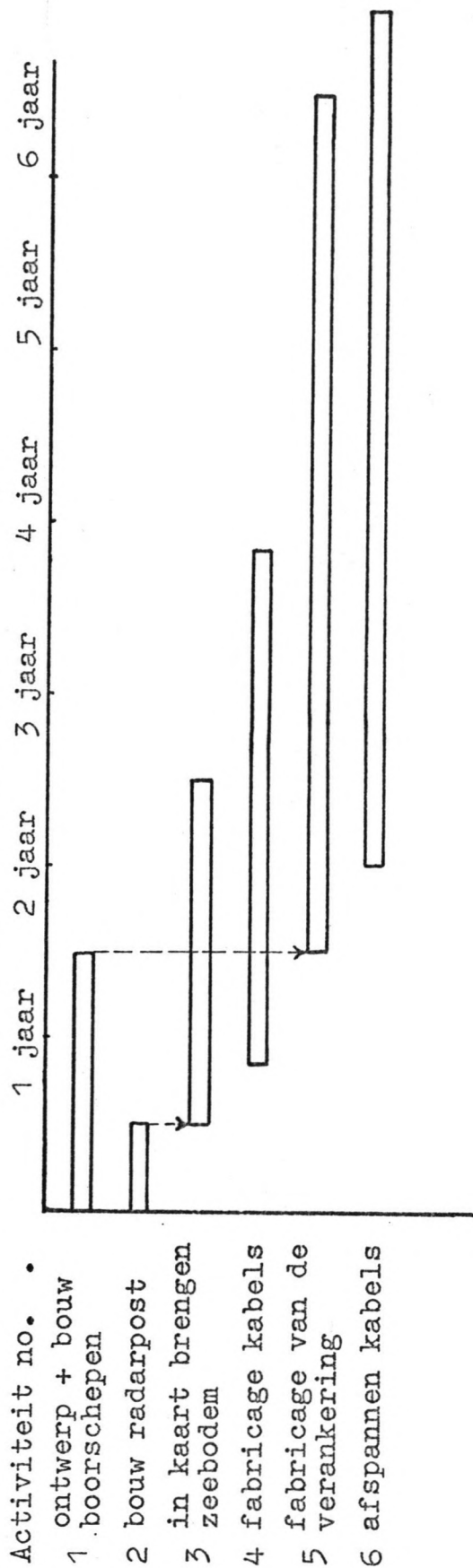
No.	Activiteit	Tijds- duur in maanden	Opmerking
1	Het ontwerpen en maken van de boorschepen	12	
2	Het inrichten van een radarpost voor aftasten zeebodem en plaatsbepaling	6	
3	Het aftasten van de zeebodem	24	Na activiteit 2
4	Het maken van de verschillende verankeringskabels	36	4 Maanden na de start van 3
5	Het boren, grouten en aanbren- gen van de verankeringskabels	60	Na activiteit 1 en 2 maanden na aan- van van 4
6	Afspannen van de kabels	<u>+60</u>	Hiermee zou wat dit werk betreft enige maanden na de aanvang van ac- tiviteit 5 kunnen worden begonnen. Het vermoeden be- staat echter dat de tunnelsegmen- ten dan nog niet gereed zijn

Tabel 2: Grondtabel voor het maken van verankeringspunten in de zeebodem.

Het balken-diagram voor de bouw van verankeringspunten in de zeebodem is te zien in diagram 2. Hierbij gaan we er van uit dat gewerkt wordt met twee boorschepen. In de bouw tijden zijn vakantie, onderhoud, reparatie en onwerkbaar weer meegenomen.

Balken-diagram 2.

Aanbrengen van de verankeringspunten in de zeebodem.



Er wordt gewerkt met twee boorschepen

2.2.3 Middelen.

1. Manschappen.

Gezien de grote verscheidenheid in werkzaamheden en de specialisaties die met deze werkzaamheden gepaard gaan, zal het werk vermoedelijk uiteenvallen in evenveel delen als er werkzaamheden zijn.

De kabelproductie, het boren en grouten van de palen en het aanbrengen van de kabels zal vanwege het cyclische verloop van deze werkzaamheden een regelmatige personeelsbezetting hebben.

Ook voor het aftasten van de zeebodem en de bemanningen van de radarposten op de oevers zal een constante hoeveelheid personeel nodig zijn.

De bouw van de boorschepen zal worden uitbesteed aan een scheepswerf en ook de bouw van een radarinstallatie is van zodanige aard, dat het als apart werk zal worden uitbesteed.

2. Materieel.

Het voor deze bouw benodigde materieel moet in een vrij vroeg stadium aanwezig zijn, maar wordt gedurende vrijwel de hele bouwperiode gebruikt.

De radarposten worden in eerste instantie gebruikt voor het nauwkeurig in kaart brengen van de zeebodem. Daarna moeten zij zorgen voor een goede plaatsbepaling van het boorschip zodat de palen op de juiste lokatie worden gemaakt.

Tot slot kunnen de radarposten in het stadium van plaatsing van de zwevende tunnelsegmenten de exacte ligging van deze segmenten bepalen.

De boorschepen worden vrijwel gedurende de gehele bouwfase gebruikt. Na voltooiing kan ten minste één schip worden aangehouden om kabels die niet blijken te voldoen of aan vervanging toe zijn te vervangen.

3. Materiaal.

Het materiaal verbruik is door het cyclische verloop van het bouwproces constant in de tijd.

4. Geld.

Hoewel in de beginfase enige grote investeringen moeten worden gedaan om het benodigde materieel aan te schaffen zullen na deze aanloopperiode de kosten gelijkmatig over de tijd zijn gespreid.

5. Ruimte.

De benodigde ruimte beperkt zich afgezien van een kleine opslagplaats op de oever tot het "bouwterrein" in de Straat van Messina. Hierbij dient te worden opgemerkt dat de hinder voor de scheepvaart beperkt moet blijven en dat scheepvaart gedurende de gehele bouwperiode mogelijk moet zijn.

2.3 Het zwevende gedeelte van de tunnel.

2.3.1 Te verrichten werkzaamheden.

Het zwevende gedeelte van de tunnel zal bestaan uit prefab tunnelsegmenten van 50 meter lengte. Voor het 3 kilometer lange zwevende gedeelte zullen dan in het totaal 60 segmenten nodig zijn.

De segmenten zullen stuk voor stuk worden afgespannen aan de zeebodem met 8 verankeringskabels. Hierbij wordt gebruik gemaakt van een speciaal voor dit werk ontworpen installatieschip. Een uitvoerigere beschrijving hoe dit installeren in zijn werk gaat is gegeven in het hoofdontwerp deel II, hoofdstuk 2.

De bouw van het zwevende deel van de tunnel kunnen we opgesplitst denken in drie delen:

1. De voorbereiding.
2. De eigenlijke bouw en installatie.
3. De afwerking.

1. De voorbereiding.

Alvorens met de bouw van de 60 tunnelsegmenten kan worden begonnen zal eerst een bouwplaats moeten worden gemaakt. Deze bouwplaats moet vervolgens worden ingericht met een betonfabriek, een staalverwerkingsbedrijf, produktievormen waarin de tunnelsegmenten worden gebouwd, enz. Pas daarna kan worden begonnen met de eigenlijke bouw van de tunnelsegmenten.

Aan de installatie van de tunnelsegmenten gaat ongetwijfeld een langere voorbereidingstijd vooraf. Het schip dat de tunnelsegmenten gaat installeren moet op het moment dat wordt besloten tot uitvoer over te gaan nog worden ontworpen en gebouwd. Op zich is dat niet bezwaarlijk omdat het na het gereed komen van de bouwplaats nog geruime tijd zal duren voor de eerste tunnelsegmenten vrij komen.

De tijdskloof tussen het gereed komen van de bouwplaats en het installatieschip mag niet te groot worden, omdat anders ruimtegebrek op de bouwplaats zou kunnen ontstaan en/of wanneer een groot aantal tunnelsegmenten drijvend ligt te wachten om geïnstalleerd te worden hergebruik van de vrij dure kopschotten niet mogelijk is.

2. De eigenlijke bouw.

De eigenlijke bouw van het zwevende tunnelgedeelte bestaat uit twee delen:

1. De bouw van de tunnelsegmenten.

2. De plaatsing van de tunnelsegmenten.

1. De bouw van de tunnelsegmenten.

Vanuit financieel oogpunt zal enerzijds gestreeft worden naar een korte bouwtijd omdat huur en onderhoud van het bouwterrein dan laag

zullen zijn, alsmede de rentederving en de huurprijzen van materieel. Anderzijds zal bij een korte bouwtijd een groter bouwterrein nodig zijn en de capaciteiten van de betonfabriek, het staalverwerkingsbedrijf, de kranen e.d. moet hoger liggen. Dit brengt een grote investering met zich mee. Tussen de korte en de lange bouwtijd zal door kostprijsberekening een optimum moeten worden gevonden.

Voor een beschrijving van de bouw van de tunnelsegmenten wordt verwezen naar hoofdstuk 4 en 5.

2. De plaatsing van de tunnelsegmenten.

Het installatieschip ligt bij het plaatsen van de tunnelsegmenten afgespannen aan de verankeringpunten op de zeebodem die in een later stadium, en voor een deel al op dat moment, de verankeringskrachten van de tunnel opnemen. Is een tunnelsegment geplaatst dan worden de verankeringskabels als het ware overgepakt en kan het installatieschip binnen korte tijd afgemeerd liggen op de plaats waar het volgende tunnelsegment moet worden geplaatst.

Sleepboten verzorgen het transport naar het installatieschip. Hierdoor wordt de, voor de installatie benodigde, tijdsduur aanzienlijk ingekort.

3. Afwerking.

Tot de afwerking van het zwevende tunnelgedeelte behoort onder andere de verwijdering van de kopschotten. Het verwijderen van de kopschotten zal vrij kort na de installatie van het tunnelsegment plaatsvinden omdat ze moeten worden hergebruikt.

Op de plaats waar de kopschotten hebben gezeten zijn discontinuïteiten van het binnenwerk van ongeveer 3 meter aanwezig. Voor een vlotte aan- en afvoer van materieel en materiaal en een gemakkelijke afvoer van de kopschotten is een snelle afwerking van deze discontinuïteiten gewenst.

Een groot deel van de afwerking kan al achter de rug zijn voordat het laatste segment wordt geïnstalleerd, want ook de rails, de rijvloer voor het autoverkeer, verlichting, leidingen, enz. kunnen in een vrij vroeg stadium worden aangebracht. De afwerking zelf werkt dan nauwelijks bouwtijdverlengend.

2.3.2 Bouwtijd.

De totale bouwtijd zal bestaan uit een voorbereidingstijd, de eigenlijke bouwtijd en de tijd die nodig is voor het laatste deel van de afwerking.

De tijd die nodig is voor de bouw en inrichting van de bouwplaats hangt sterk af van het type bouwplaats dat gekozen wordt. Hier wordt voorlopig een periode van 1 jaar voor aangehouden.

Voordat met de plaatsing van de tunnelsegmenten kan worden begonnen moet eerst het installatieschip ontworpen en gebouwd zijn. Hiervoor is een periode van 2 jaar aangenomen.

Voor de bouw van de tunnelsegmenten wordt een gemiddelde tijdsduur aangehouden van 1 segment per maand. De totale bouwtijd van 60 segmenten komt dan op 5 jaar. We moeten ons realiseren dat de tijd gedurende welke aan een tunnelsegment wordt gebouwd langer is dan 1 maand. Doordat aan meerdere tunnelsegmenten gelijktijdig wordt gebouwd, seriebouw, is dit gemiddelde te halen. Een hulpmiddel, om bij

de bouw op schema te blijven, kan aanpassing van de personeelsbezetting zijn.

De overgang van de bouwfase naar het moment dat een tunnelsegment drijvend ligt te wachten om geïnstalleerd te worden mag geen langdurige stremming opleveren voor de bouw omdat dit van de totaal-tijd van 5 jaar af gaat.

Het installatieschip wordt steeds verplaatst naar de plaats waar het volgende tunnelsegment geïnstalleerd moet worden. Worden de tunnelsegmenten met een aantal sleepboten aangevoerd dan kan de installatie soepel en vlot verlopen. De tijd die na voltooiing van de bouw van het laatste tunnelsegment nodig zal zijn voor de plaatsing hangt af van het aantal tunnelsegmenten dat op het einde vrijkomt. Bij de in paragraaf 4.1 gekozen bouwplaats komen de tunnelsegmenten stuk voor stuk vrij zonder dat dit de bouw stillegt. De benodigde periode voor installatie van het laatste tunnelsegment kan dus ruim genomen op drie maanden na voltooiing van de bouw.

Tot slot zal na plaatsing van het laatste segment nog enige tijd nodig zijn voor de afwerking van de tunnel. Zoals reeds in de vorige paragraaf ter sprake is gekomen zal het grootste deel van de afwerking op dat moment al achter de rug zijn. De resterende tijd wordt geschat op drie maanden.

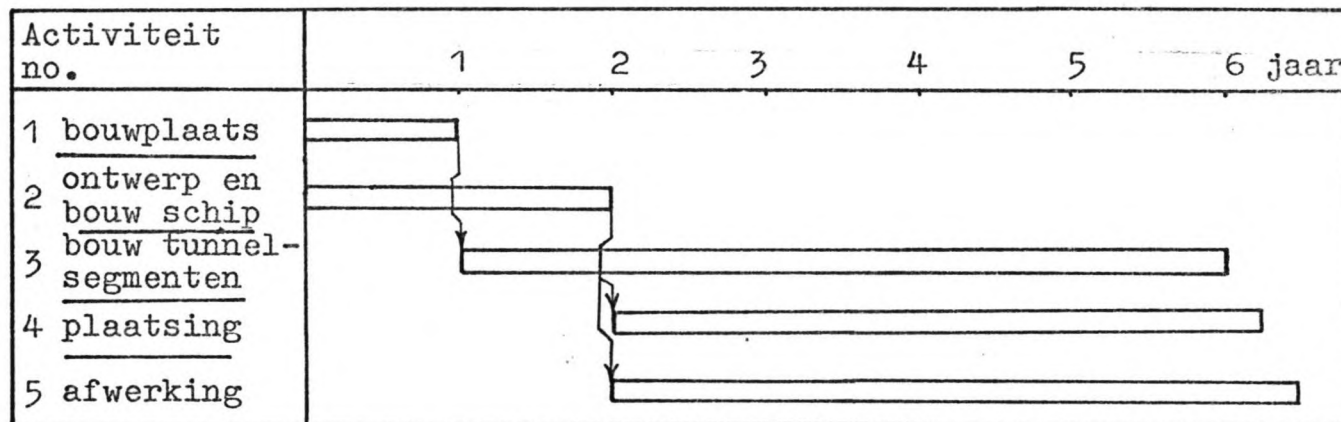
De grondtabel voor de diverse werkzaamheden is hieronder gegeven.

No.	Activiteit	Tijds- duur in maanden	Opmerking
1	Bouwen en inrichten bouwplaats	12	
2	Ontwerpen en bouwen installatieschip	24	
3	Bouw 60 tunnelsegmenten	60	Na activiteit 1
4	Plaatsing van de 60 tunnelsegmenten	51	Na activiteit 2
5	Afwerking	54	Een maand na aan- van activiteit 4

Tabel 3: Grondtabel voor de bouw van het zwevende gedeelte van de tunnel.

Het balkendiagram van de bouw van het zwevende deel van de tunnels is hieronder gegeven.

Bouwen van het zwevende gedeelte van de tunnel.



Balken-diagram 3.

2.3.3 Middelen.

1. Menschappen.

De bouw van de tunnelsegmenten is het meest arbeidsintensieve gedeelte van de bouw van de oeververbinding. Het vlechten van alle wapeningsnetten, het storten en verdichten van het beton met behulp van trilnaalden zijn activiteiten waar veel personeel voor nodig is.

Doordat de bouw van de tunnelsegmenten seriebouw is kan de personeelsbezetting tevoren

nauwkeurig worden bepaald. In de beginperiode is deze nog bij te schaven door de personeelsbezetting te vergroten of verkleinen, maar zijn de deelactiviteiten eenmaal op elkaar afgestemd en is het juiste bouwtempo bereikt dan kan dit gedurende een aantal jaren worden gehandhaafd. De personeelsbezetting is dus vrijwel constant in de tijd.

2. Materieel.

Gedurende de gehele bouw worden nagenoeg dezelfde tunnelsegmenten gemaakt en geïnstalleerd. Het tempo waarmee deze segmenten worden gemaakt is constant. Daarom zal steeds eenzelfde uitrusting aan materieel nodig zijn.

3. Materiaal.

De bouw van het zwevende gedeelte van de tunnel is materiaal intensief. Zo zal voor dit gedeelte van de oeververbinding in het totaal onder andere $180 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ beton nodig zijn. Het verbruik van materiaal is echter constant over de tijd.

4. Geld.

In de eerste twee jaar zullen enige grote investeringen nodig zijn voor het installatieschip en het op de bouwplaats benodigde materieel daarna zullen de kosten gelijkmatig zijn gespreid over de tijd. Dit komt door de regelmatige personeelsbezetting en het gelijkmatige materiaalverbruik.

5. Ruimte.

Voor de bouw van de tunnelsegmenten zal naast een behoorlijk grote bouwplaats ook de nodige ruimte gereserveerd moeten worden voor de opslag van bouw materiaal.

3. Afstemming van de drie deelprocessen op elkaar.

De bouw van de oeververbinding is opgesplitst in drie deelprocessen te weten het gedeelte op de oevers, de verankeringspunten in de zeebodem en het zwevende gedeelte van de tunnel. Als deze deelprocessen niet goed op elkaar aansluiten kan dit leiden tot verlenging van de bouwtijd. Het is daarom belangrijk te onderzoeken welke activiteiten wanneer op elkaar aan moeten sluiten. Dat is hieronder weergegeven.

Een eerste voorwaarde om met de plaatsing van de tunnelsegmenten te beginnen, is dat de gecombineerde spoor-, autotunnel op een oever is voltooid tot de gewenste lengte. Als het uiteinde van deze geboorde tunnel is uitgebaggerd, kan het eerste zwevende tunnelsegment geplaatst worden. Het uiteinde van de geboorde tunnel maakt dan afdracht van krachten in langsrichting mogelijk.

Een tweede voorwaarde is dat de verankeringspunten in de zeebodem aanwezig zijn, voorzien van verankeringskabels.

Zoals in de balkendiagrammen van beide deelprocessen is te zien, is dit goed te realiseren daar met de bouw van de verankeringspunten reeds na $1\frac{1}{2}$ jaar wordt begonnen. Het eerste tunnelsegment wordt pas na 2 jaar geïnstalleerd. Hieraan is dus ruim voldaan.

De bouw van de verankeringspunten in de zeebodem moet gedurende de gehele bouw vooruit lopen op de plaatsing van de tunnelsegmenten. Als gelijktijdig wordt gestart met de bouw van de verankeringspunten en de bouw van het zwevende gedeelte van de tunnel zal dit niet het geval zijn. De laatste tunnelsegmenten zullen eerder klaar zijn dan de verankeringspunten, wat leidt tot oponthoud. Willen we deze afstemverliezen vermijden dan staan hiervoor drie middelen ter beschikking:

1. $\frac{1}{2}$ jaar later met de bouw van de tunnelsegmenten starten.
2. Meerdere boorschepen voor de bouw van de verankeringspunten inzetten.
3. Meer productiedagen per jaar met de boorschepen werken.

Een laatste voorwaarde is dat op de oever, waar het laatste tunnelsegment wordt geplaatst, het uiteinde van de gecombineerde trein-, autotunnel is voltooid en uitgebaggerd voor- dat dit tunnelsegment geplaatst kan worden.

4. De bouwplaats van tunnelsegmenten.

4.1 Keuze van een bouwplaats.

Er zijn verschillende alternatieven te bedenken voor een bouwplaats van de tunnelsegmenten. Het is zaak hieruit het meest geschikte te kiezen.

Hieronder zijn vijf alternatieven opgesomd:

1. In een drijvend dok of op een ponton
2. Bouwdok
3. Droogzetten van weinig of niet meer gebruikte haven
4. Bouwplaats op de oever
5. Droogdok elders en dan later aanvoeren over zee.

Deze alternatieven worden hieronder verder uitgewerkt.

1. Drijvend dok of ponton.

Het grote voordeel van het bouwen in een drijvend dok of ponton is de ideale overgang van bouwfase naar de drijvende fase waarin het tunnelsegment ligt te wachten voor installatie. Om deze stap te overbruggen zijn er geen tijdrovende werkzaamheden nodig, zoals het vol laten lopen van een bouwdok en het daarna weer droogpompen. Bovendien komen de tunnelsegmenten geleidelijk ter beschikking en niet zoals dat in een bouwdok het geval is met een aantal tegelijk. Ook dit werkt in de eindfase verkortend op de bouwtijd.

Het nadeel van het bouwen op een ponton is de scheefstand van het ponton wanneer dit niet symmetrisch wordt belast.

We dienen hiermee rekening te houden of voorzorgsmaatregelen te treffen die te grote scheefstand verhinderen.

Er kunnen twee gevallen worden onderscheiden.

1. Gehele bouw vindt plaats in het drijvend dok of op het ponton.
2. Slechts de assemblage van geprefabriceerde moten gebeurt op het dok of ponton.

Ad 1.

Indien de gehele bouw plaats vindt op het ponton dan zijn hieraan enige zwaarwegende nadelen verbonden.

Als eerste nadeel is te zien de lange verblijftijd van een tunnelsegment op het ponton. Teneinde de totale bouwtijd niet te lang te laten duren wordt gestreefd naar een gemiddelde bouwtijd van één segment per maand. Wil men deze bouwsnelheid aanhouden dan zullen een groot aantal van deze "bouwplaatsen" aanwezig moeten zijn. De aanschaf van de speciaal op deze bouwactiviteiten afgestemde pontons zal een aanzienlijke investering met zich meebrengen.

Een tweede nadeel is de bouwtijd van deze pontons. Met de bouw van de tunnelsegmenten kan niet worden begonnen voordat de pontons er zijn. Dit leidt tot verlenging van de totale bouwtijd.

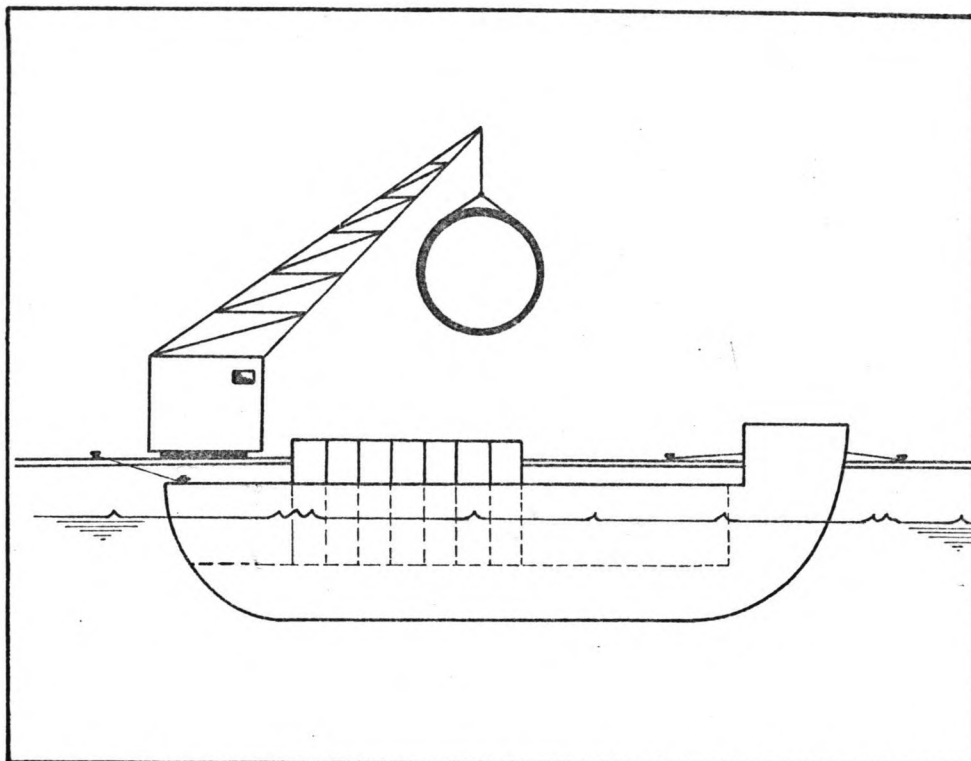
Het derde nadeel is het aanvoeren van bouwmaterialen en materieel. De ruimte op zo'n ponton is beperkt en voor het materiaal en materieel zal op het ponton geen plaats zijn om opgeslagen te worden. Aangevoerd materiaal en materieel moet dus direct worden gebruikt.

Ad 2.

Het tweede alternatief ondervangt de problemen die zich bij het eerste alternatief voordoen geheel of gedeeltelijk.

Doordat met prefab moten wordt gewerkt is de verblijftijd op een ponton aanzienlijk korter. In dit geval kan met twee à drie pontons worden volstaan. Bovendien kan met de bouw van de prefab moten reeds worden begonnen voordat het ponton klaar is. Tot slot hoeft voor de assemblage van de moten niet veel materiaal te worden gebruikt. De aanvoer beperkt zich dus voor het grootste deel tot die van de prefab moten.

Een nadeel dat vast zit aan dit alternatief is misschien het grotere bouw- en opslagterrein op de oever, maar wordt hiervoor een geschikte lokatie gezocht dan vormt ook dit geen groot probleem.



Figuur 2: Bouwen op een ponton met prefab-moten.

Conclusie.

Op grond van de nadelen die zijn verbonden aan het eerste alternatief, wordt het tweede alternatief als meest reële gezien voor deze manier van bouwen.

2. Bouwdok.

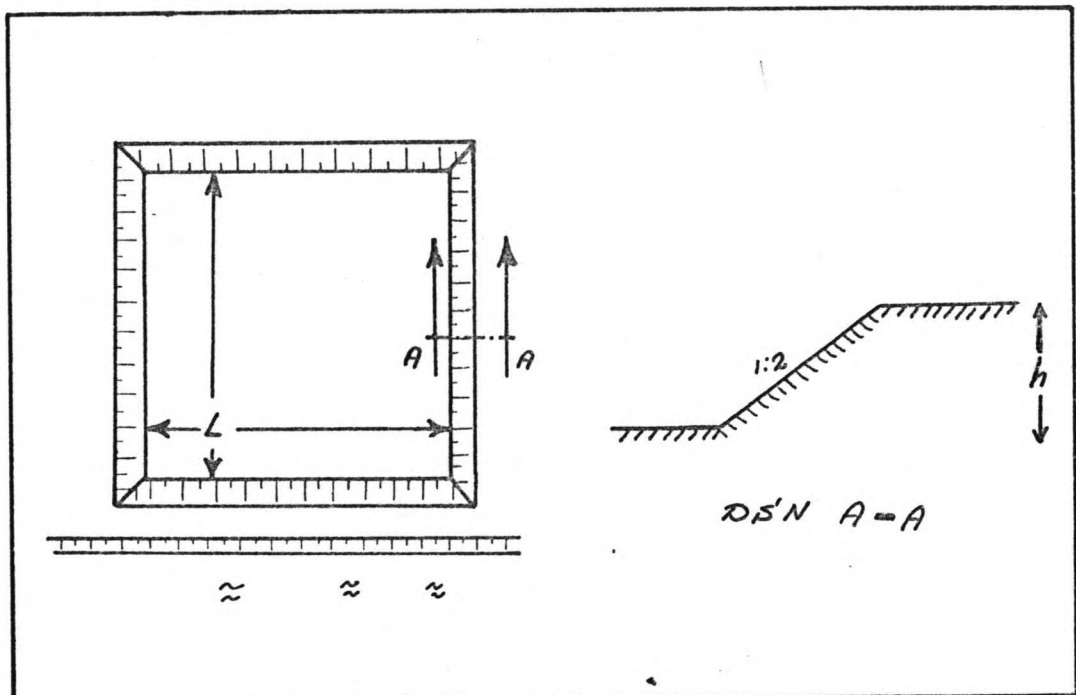
Het tweede alternatief waar de tunnelsegmenten gebouwd kunnen worden is in een bouwdok. Zo'n bouwdok kan op tweeërlei manieren worden gemaakt:

1. Aan de landzijde.
2. Aan Zeezijde.

Voor welk van deze twee alternatieven wordt gekozen is niet direct te zeggen. Dit hangt namelijk af van een aantal factoren.

Ten eerste de hoeveelheden te ontgraven respectievelijk op te spuiten grond. Deze is voor beide alternatieven afhankelijk van de diepte van het bouwdok en de oppervlakte.

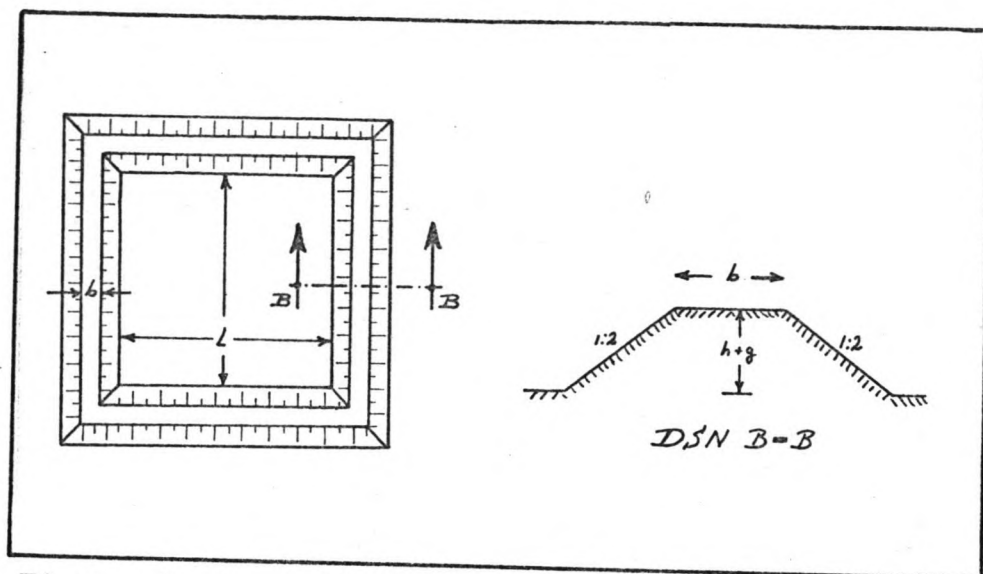
De hoeveelheid te ontgraven grond in het eerste geval, een bouwdok landinwaarts, is wanneer uitgegaan wordt van een vierkant bouwdok: $Q = l^2 * \frac{1}{2}h * 2h * 4 * 1$.



Figuur 3: Bouwdok landinwaarts.

Waarbij de helling van het talud 1 op 2 is, h de diepte van het dok en l de lengte van het bouwdok.

Bij het tweede alternatief is de hoeveelheid grond die opgespoten moet worden: $Q = 4 * l * (b + 2h) * (h + g)$.



Figuur 4: Door dijken omringd bouwdok in zee.

Waarin b is de kruinbreedte, h is de diepte ten opzichte van zeeniveau, g is de hoogte van de golfopzet tegen het talud, en l is de lengte van het vierkante bouwdok.

Als we enige getalwaarden invullen dan zien we dat bij een kruinbreedte van 5 meter, een golfoploop van 5 meter een bouwdok diepte van 13 meter een gelijk Q optreedt bij een waarde l van:

$$l^2 \cdot h + \frac{1}{2} \cdot h \cdot 2 \cdot h \cdot 4 \cdot l = 4 \cdot l \cdot (b + 2h) \cdot (h + g).$$

$$l \cdot h + h^2 \cdot 4 = 4 \cdot (b + 2h) \cdot (h + g)$$

substitutie van de waarde geeft:

$$13l + 13^2 \cdot 4 = 4 \cdot (5 + 26) \cdot (13 + 5).$$

$$l = 120 \text{ meter.}$$

Dit is een relatief klein bouwdok waarin niet meer dan 6 tot 8 tunnelsegmenten kunnen worden gemaakt. Kiezen we voor een groter bouwdok dan zal de hoeveelheid te verplaatsen grond voor een uit te graven

bouwdok sneller toenemen dan die voor een door dijken omringd bouwdok. Dit wil echter niet zeggen dat een gegraven bouwdok hierdoor economisch minder aantrekkelijk wordt. Immers het type grondverzet is verschillend bij de twee alternatieven.

In het eerste geval moet de grond alleen worden uitgegraven. Dit kan in den droge met graafmachines of in de natte met baggerschepen. Het wegbaggeren van de grond is relatief goedkoop. Anderzijds kunnen we overwegen het bouwdok met graafmachines in den droge te maken zodat vrijwel direkt met de bouw van segmenten kan worden begonnen.

In het tweede geval moet de grond worden opgespoten. Uitvoeringstechnisch gezien moet hier met een grotere nauwkeurigheid worden gewerkt. Bovendien zal er door de stroming altijd een deel van het opgespoten zand worden afgevoerd. Bekleding van het buitentalud zal daarom noodzakelijk zijn. Dit brengt grote kosten met zich mee.

Na voltooiing van het dijklichaam zal eerst het bouwdok moeten worden drooggezet. Pas daarna kan met de bouw worden begonnen.

De oppervlakte van het bouwdok moet dus aanzienlijk groter zijn wil het opspuiten van dijken aantrekkelijker zijn. De vraag is dan of er nog een geschikte lokatie langs de kust te vinden is waar de waterdiepte over een voldoende oppervlakte rond de 13 meter blijft, zodat ook voor de bodem van het bouwdok geen bagger- en/of opspuitwerkzaamheden nodig zijn. Een nadeel dat beide alternatieven treft is de continue bemaling of een waterdichte afscherming van het bouwdok die nodig zal zijn.

Drie nadelen van een aanzienlijk groter bouwdok zijn dat ten eerste de bouwtijd van het dok zelf langer is.

Vervolgens zal het langer duren voordat de eerste serie tunnelsegmenten beschikbaar komt voor plaatsing. Ten slotte zal aan het eind van de bouw nog een grotere serie tunnelsegmenten vrij komen. Doordat deze pas dan geplaatst kunnen worden werkt ook dit bouwtijdverlengend.

Voor een bouwdok dat landinwaarts gemaakt wordt, maakt het relatief weinig uit of in twee kleinere of één groot bouwdok wordt gebouwd. De extra hoeveelheid grond die ontgraven moet worden is relatief gering. Het ligt, indien deze mogelijkheid aanwezig is, voor de hand te kiezen voor twee of meer kleine bouwdokken om vier redenen:

1. Het vinden van een geschikte plaats voor deze bouwdokken is gemakkelijker door het kleinere benodigde oppervlak.
2. Omdat de bouwdokken na elkaar gebaggerd kunnen worden is de aanlooptijd korter. Een klein dok is sneller klaar en vrij snel kan met de bouw van de tunnelsegmenten worden gestart.
3. Het personeel dat vrij komt als de tunnelsegmenten uit het bouwdok worden gevaren kan bij de bouwactiviteiten een ander bouwdok worden ingezet.
4. De hoeveelheid tunnelsegmenten die aan het einde van de bouw vrijkomt is geringer en de tijd die nodig is om deze laatste segmenten te plaatsen korter.

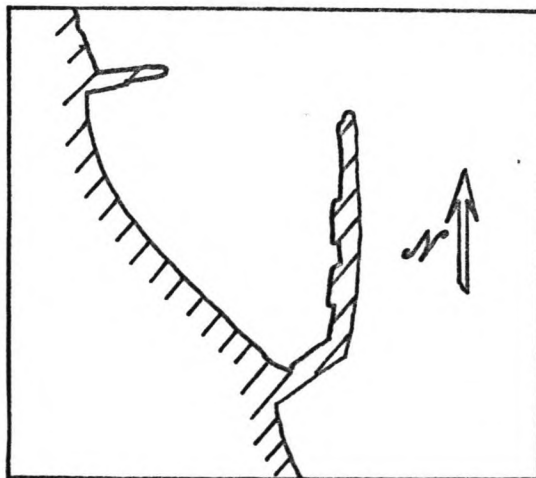
Conclusie.

Op grond van bovenstaande overwegingen verdient het alternatief van twee of meerdere bouwdokken landinwaarts gelegen de voorkeur boven een door dijken omringde bouw.

3. Bouwen in een weinig, of niet meer gebruikte haven.

Van de vier havens die in de direkte omgeving van de Straat van Messina liggen vallen er drie af. Dit zijn de haven van Messina op de Siciliaanse oever en Reggio di Calabria en Villa S. Giovanni op de oever van het vaste land van Italië. Dit omdat deze havens geopend moeten blijven zolang er nog geen oeververbinding is. De boten die momenteel treinen en schepen overzetten varen namelijk tussen Messina enerzijds en Reggio di Calabria en Villa S. Giovanni anderzijds.

De enige haven in de direkte omgeving die overblijft is Porto di Riposto een op de Siciliaanse oever gelegen haven ten zuid westen van Messina. Deze haven, met zijn gemiddelde diepte van 10 meter, kan met een vrij korte dam van 250 meter van de zee worden afgesloten. De oppervlakte van deze haven is $\pm 135.000 \text{ m}^2$. Een oppervlakte waarin alle segmenten gelijktijdig gebouwd zouden kunnen worden.



Figuur 5: De haven van Porto di Riposto.

Het in zijn geheel afsluiten van de haven zal echter problemen met zich meebrengen van sociale aard. Het deel van de bevolking van Porto di Riposto dat werk-

zaam is in de haven verliest door deze afsluiting de bron van inkomsten. Het is de vraag in hoeverre deze mensen omgeschoold kunnen en willen worden om bij de bouw van de tunnel te worden ingezet.

Een alternatief dat daarom overwogen kan worden is de haven op te splitsen in twee delen, gescheiden door een dam in langsrichting van de haven. Of voor de bouwplaats het diepe of ondiepe gedeelte van de haven wordt gekozen hangt af van een aantal factoren.

Zo zal indien wordt gekozen voor het diepe gedeelte veel minder baggerwerk nodig zijn om de haven op de gewenste diepte te krijgen teneinde drijvend uitvaren van de tunnelsegmenten mogelijk te maken. Het is echter de vraag of de strekdam, die de bouwplaats van de zee scheidt, een waterdichte kering is. Is dit niet het geval dan zal het de nodige problemen geven om deze strekdam waterdicht te maken. In dat geval gaat de voorkeur misschien uit naar het ondiepere gedeelte van de haven.

De konsequentie hiervan is dat er meer grond weggebaggerd moet worden uit de haven. Een voordeel echter van deze keuze is dat schepen die bouwmaterialen en -materieel aanvoeren in het resterende deel van de haven, beschut hun lading kunnen lossen. Dit is niet het geval indien het diepe havengedeelte als bouwplaats is gepland. Ook schepen die momenteel van de haven gebruik maken kunnen (weliswaar in mindere mate) de haven blijven gebruiken. Afsluiting van een deel van de haven zal dan ook op minder plaatselijk verzet stuiten.

Een ander voordeel van het gebruiken van slechts een deel van de haven is dat de tunnelsegmenten in kleinere series ter beschikking komen on geïnstalleerd te worden. De tijd die, na het gereed komen van de laatste serie, nodig is om de segmenten te installeren is relatief korter.

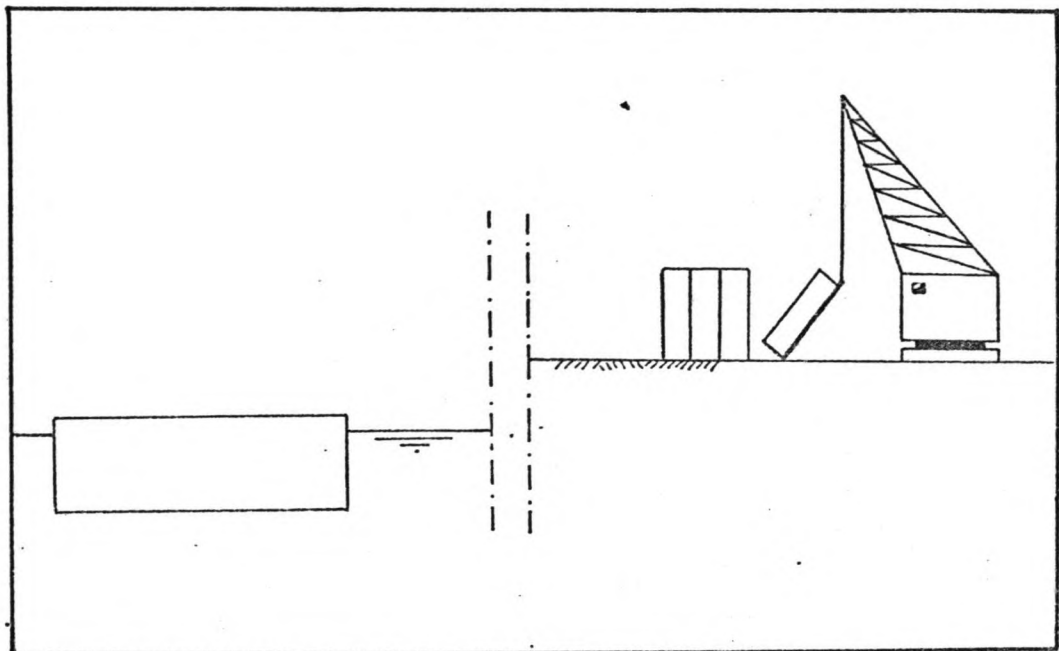
Tot slot moet worden opgemerkt dat een havenbodem in de meeste gevallen niet de ideale grondslag is om op te bouwen. Waarschijnlijk zal uitbaggeren van het havenslib noodzakelijk zijn en zal er een betonvloer van enige meters dik gestort moeten worden of een zandlaag in combinatie met bemaling.

4. Op de oever bouwen.

De bouw van tunnelsegmenten op het land is het vierde alternatief. Met deze bouw kan vrijwel direkt worden gestart omdat we niet hoeven te wachten tot de bouwplaats is voltooid. De kosten van de bouwplaats blijven laag. Het enige wat nodig is, is een vlak terrein dat niet te hoog boven het zeeniveau is gelegen.

Voor dit alternatief moet echter wel een geschikte methode worden gevonden om de tunnelsegmenten van de bouwplaats in het water te brengen zonder dat dit gepaard gaat met extreem hoge krachten.

De tunnelsegmenten komen regelmatig vrij. In de eindfase van de bouw werkt dit niet bouwtijdverlengend, zoals bij enige andere alternatieven, waar na voltooiing van het laatste segment een grote serie te plaatsen segmenten vrij komt.



Figuur 6: Bouwen op de oever.

5. Bouwen in een droogdok.

Indien we een droogdok kiezen als bouwplaats voor de tunnelsegmenten zullen we gebruik moeten maken van een bestaand droogdok. Door de tijd en investering, die met de bouw van een droogdok in de omgeving gemoeid zijn, zal de keuze namelijk direkt op een ander alternatief vallen.

Aan de bouw in een reeds bestaand droogdok zijn diverse voor- en nadelen verbonden.

Het eerste voordeel is de korte aanlooptijd. Het droogdok hoeft immers niet meer gebouwd te worden en in grote havensteden waar we deze dokken aantreffen (bijvoorbeeld Rome of Napels) zullen betoncentrales en walserijen al aanwezig zijn zodat vrijwel direkt met de bouw kan worden begonnen.

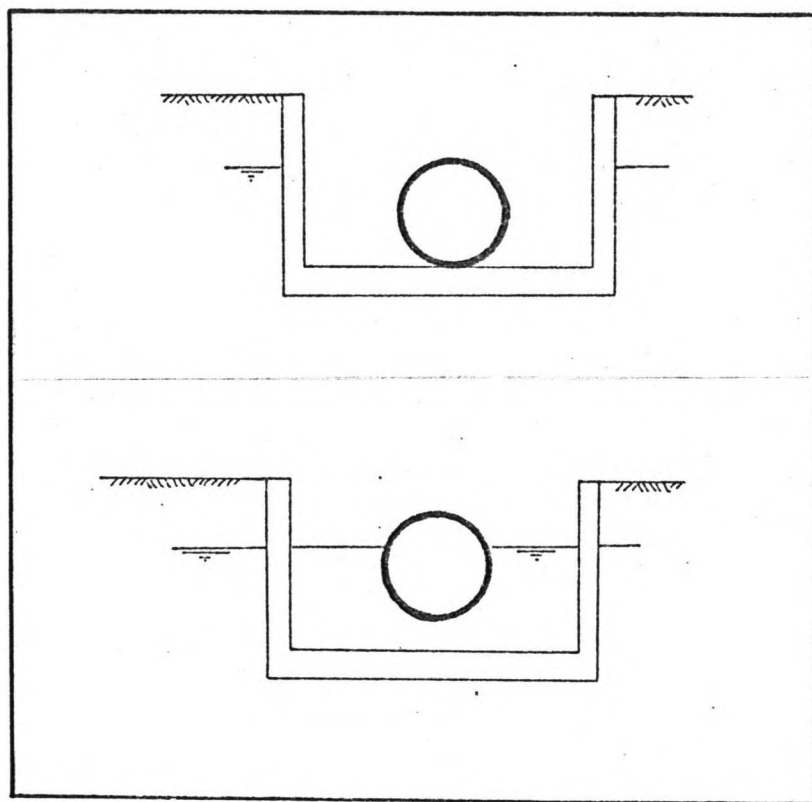
Het tweede voordeel is dat het werk naar de mensen wordt gebracht. In deze grote steden is voldoende personeel aanwezig. Inrichting van een compleet dorp waarin mensen wonen die bij de bouw betrokken zijn, is dan niet nodig.

De veronderstelling dat er sprake is van een financieel voordeel door de lagere investeringen, omdat er geen bouwplaats, staalverwerkingsbedrijf en betonfabriek gebouwd hoeft te worden, is onjuist. De leverancier van het staal en beton zal in zijn prijs ook een post opnemen voor afschrijving en winst. In feite wordt de investering op deze manier betaald per geleverde hoeveelheid produkt. Hetzelfde geldt voor de investering die gemaakt wordt bij de bouw van een bouwplaats. Deze kosten moeten voor de bouw worden betaald in de vorm van huur van het droogdok.

Het is bovendien de vraag of de eigenaar van een droogdok bereid is dit dok voor een periode van vijf jaar te verhuren. Als een dok vijf jaar niet beschikbaar is

voor schepen zal naar een uitwijkplaats worden gezocht, wat in de toekomst kan leiden tot klantenverlies. Bovendien zal slechts een deel van het personeel kunnen worden ingezet bij de bouw van de tunnelsegmenten.

Een ander nadeel dat aan dit alternatief is verbonden is het transport van de tunnelsegmenten. Hiermee gaan hoge sleep- en verzekeringskosten gemoeid. Bij de andere alternatieven was daarvan geen sprake.



Figuur 7: Bouwen in een droogdok.

6. Toetsing en keuze.

De vijf alternatieven, hieronder voor de volledigheid nogmaals opgesomd, worden nu getoetst aan criteria. Na toetsing aan een criterium krijgt ieder alternatief een cijfer toegediend dat varieert van 0 tot 3. 0 als een criterium pleit voor toepassing van het alternatief, 3 als een criterium juist niet pleit voor toepassing van het alternatief.

Alternatieven:

1. Op een ponton bouwen met prefab moten.
2. In twee of meer gegraven bouwdokken bouwen.
3. In een deel van een haven met een gestorte zandbodem en bemaling.
4. Op de oever bouwen.
5. In een droogdok elders bouwen.

De verschillende toetsingcriteria zijn:

- a. Bouwtijd bouwplaats.
- b. Eisen aan de lokatie van een bouwplaats.
- c. Aantal tunnelsegmenten dat gelijktijdig beschikbaar komt.
- d. Voortgang van de bouw tijdens de tewaterlating van de tunnelsegmenten.
- e. Visuele inbreuk op de omgeving.
- f. Sociale inbreuk op de omgeving.
- g. Aanvoermogelijkheid van bouw materiaal en -materieel.
- h. Instabiliteit in de bouw fase.
- i. Transportkosten tunnelsegmenten.
- j. Kosten bouwplaats.
- k. Onderhoudskosten bouwplaats.
- l. Restwaarde bouwplaats.

Korte toelichting op de toetsingscriteria:

- a. Hiervoor wordt de tijd aangehouden dat met de bouw van de tunnelsegmenten kan worden begonnen, ook al is de bouwplaats nog niet volledig klaar.
- b. gewenste gesteldheid ondergrond, hoogte ten opzichte van zeeniveau, oppervlakte, enz.
- c. Is dit aantal groot dan moeten deze op het einde van de bouw nog geïnstalleerd worden. Dit werkt bouwtijd verlengend.
- d. Wordt een bouwplaats gebouwd die voor de tewaterlating van de tunnelsegmenten onder water moet worden gezet dan zal de bouwplaats op de tunnelsegmenten na

ontruimd moeten worden. Bovendien kunnen manschappen en materieel op dat moment niet gebruikt worden.

De punten e en f spreken voor zich.

De punten g en h hebben vooral betrekking op een ponton als bouwplaats.

- i. Zijn de transportkosten van de bouwplaats naar de Straat van Messina.
- j. Kunnen zowel de bouwkosten zijn als de huurprijs over de bouwperiode.
- k. Kosten voor bemaling, schoonmaken na een tewaterlating enz.
- l. Deze restwaarde kan ook negatief zijn als de bouwplaats weer in zijn oorspronkelijke staat moet worden teruggebracht (bij een haven of bouwdok).

Aan de toetsingscriteria wordt een gewicht toegekend in de vorm van een cijfer. Dit cijfer is hoger naarmate een toetsingscriterium belangrijker is. Het alternatief met het laagste totaalcijfers geniet de voorkeur.

Alternatief	1	2	3	4	5	gewicht
Criterium a	3	2	3	1	1	1
b	0	2	0	1	0	2
c	0	2	3	0	3	3
d	1	1	3	0	3	3
e	2	1	3	2	0	1
f	0	0	3	0	1	1
g	3	1	0	0	0	1
h	3	0	0	0	0	1
i	1	1	1	1	3	2
j	1	2	3	0	3	3
k	0	3	3	0	1	2
l	1	3	3	1	0	1
Totaal	20	34	47	8	37	

Tabel 4: Keuze bouwplaats

Het alternatief van bouwen op de oever verdient dus de voorkeur. In het volgende hoofdstuk zal nader worden ingegaan op de alternatieven die ons ter beschikking staan om de tunnelsegmenten te water te laten.

4.2 Overgang van land naar zee.

Nu eenmaal is gekozen voor de bouw van tunnelsegmenten op de oever die in een later stadium te water worden gelaten, staan ons verschillende alternatieven ter beschikking om deze tewaterlating te realiseren:

1. Dwarshelling met balken en vet.
2. Dwarshelling met karren.
3. Langshelling met balken en vet.
4. Langshelling met wagen.
5. Diverse soorten liften.
6. Op een ponton plaatsen en af laten zinken.

Hieronder zullen de verschillende alternatieven in het kort toegelicht worden.

1. Dwarshelling met balken en vet.

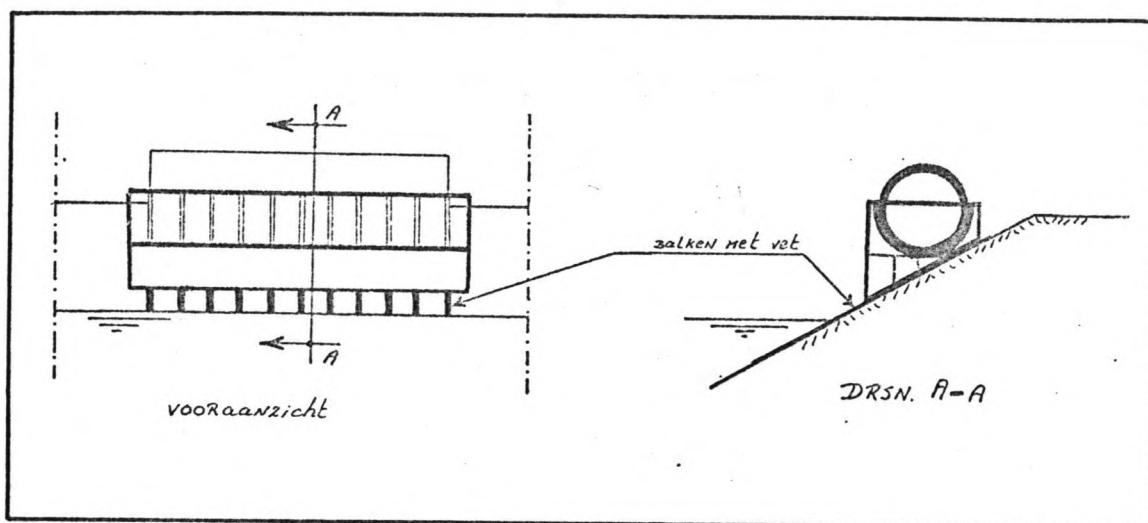
Het tunnelsegment wordt gebouwd op een helling. Aan de onderzijde zijn wiggen aangebracht om te voorkomen dat het tunnelsegment voortijdig van de helling kan glijden. Is de bouw eenmaal voltooid dan worden deze wiggen weggeslagen en glijdt het tunnelsegment over de balken naar beneden. Deze balken zijn ingesmeerd met vet om de wrijvingsweerstand te verlagen.

Doordat het tunnelsegment tijdens het te water laten dwars op de verplaatsingsrichting ligt zal er een "boeggolf" worden opgewekt op het moment dat het water wordt geraakt. Dit remt het tunnelsegment vrijwel direkt af.

Door de ronde vorm van het tunnelsegment zijn we genoodzaakt dit te ondersteunen in een soort produktievorm (zie figuur 8) die reeds de vorm van het tunnel-

segment heeft aan de binnenzijde. Dit heeft twee oorzaken. Ten eerste zou een rond tunnelsegment geneigd zijn de helling af te rollen in plaats van te schuiven. De tweede oorzaak is dat het tunnelsegment slechts door een lijnlast zou zijn ondersteund. Gezien het grote eigen gewicht is dit bijzonder af te raden.

Voor een overzichtstekening zie figuur 8.



Figuur 8: Tewaterlating van dwarshelling met balken en vet.

2. Dwarshelling met karren.

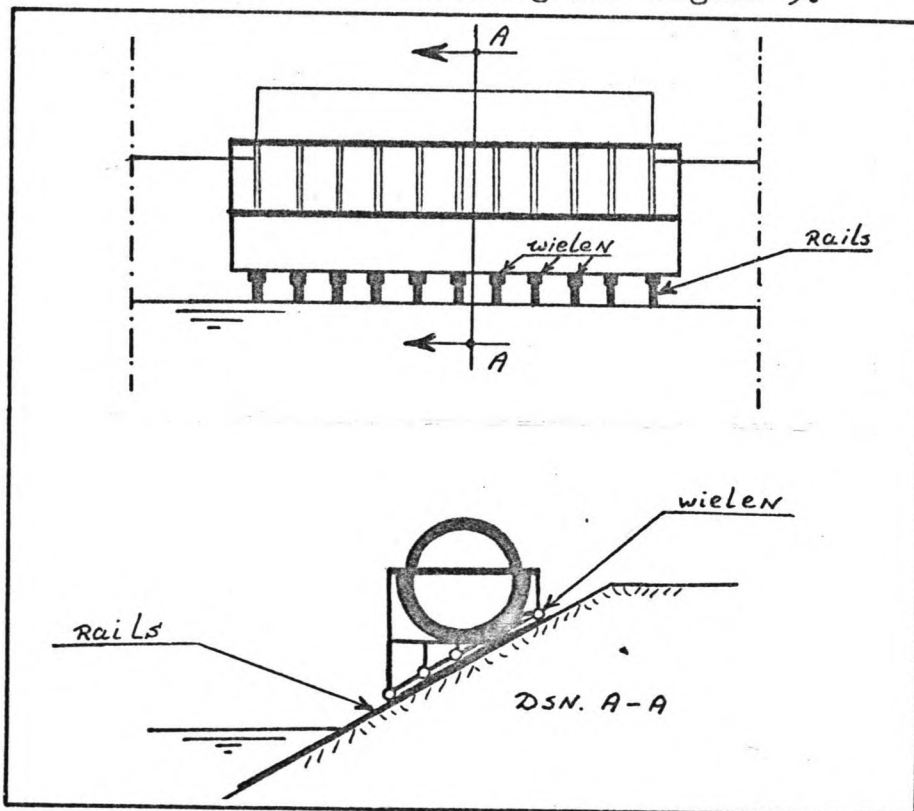
Het tunnelsegment wordt ook hier gebouwd met z'n langsrichting evenwijdig aan de waterlijn. Het tunnelsegment wordt regelmatig ondersteund door karren die met kabels verbonden zijn aan lieren op de oever. Als de bouw klaar is kan door het vieren van deze kabels het tunnelsegment te water worden gelaten. Dit kan met iedere gewenste snelheid.

Door de karren de vorm van het tunnelprofiel te geven, vermijden we zware lijnlasten. Worden de karren onderling verbonden door zware staal-profielen dan zijn ook momenten en dwarskrachten in langsrichting vermeden.

Door de wielen van de karren draaibaar te maken (zie figuur 22) kunnen meerdere tunnelsegmenten gelijktijdig worden gemaakt. Er moet dan wel een groter hellingoppervlak beschikbaar zijn.

Nadat de bouw is voltooid kan een tunnelsegment naar de dwarshelling worden gereden. De wielen worden gedraaid en het segment kan te water worden gelaten.

Voor een overzichtstekening zie figuur 9.



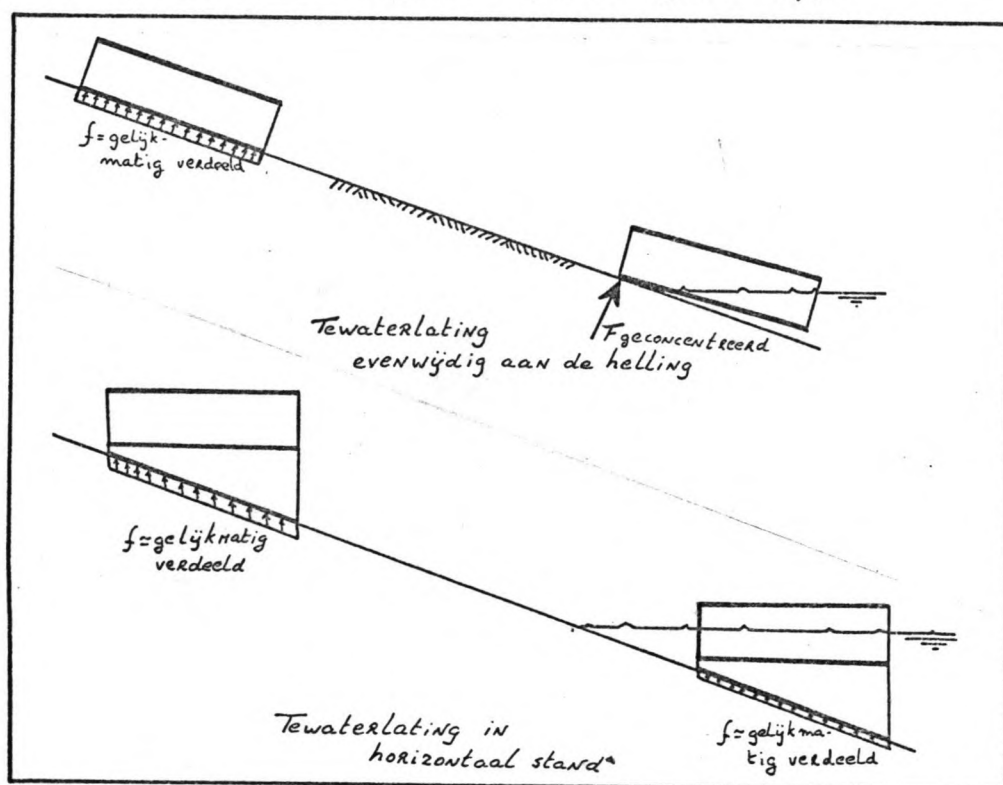
Figuur 9: Dwarshelling met karren.

3. Langshelling met balken en vet.

Het tunnelsegment schuift bij deze manier van te water laten in zijn langsrichting de helling af. Doordat het tunnelsegment als het ware doorschiet in de richting van de helling moet het water voor de helling voldoende diep zijn.

De verplaatste hoeveelheid water (boeggolf) is geringer dan bij het te water laten in dwarsrichting. De oppervlakte van het kopschot is namelijk kleiner dan dat van de langsdoorsnede. Hierdoor zal het tunnelsegment ook minder snel door het water worden afgeremd.

Zouden we het tunnelsegment in een helling evenwijdig aan de langshelling bouwen dan geeft dit tijdens het te water laten grote puntlasten op zowel scheepshelling als tunnelsegment (zie figuur 10).



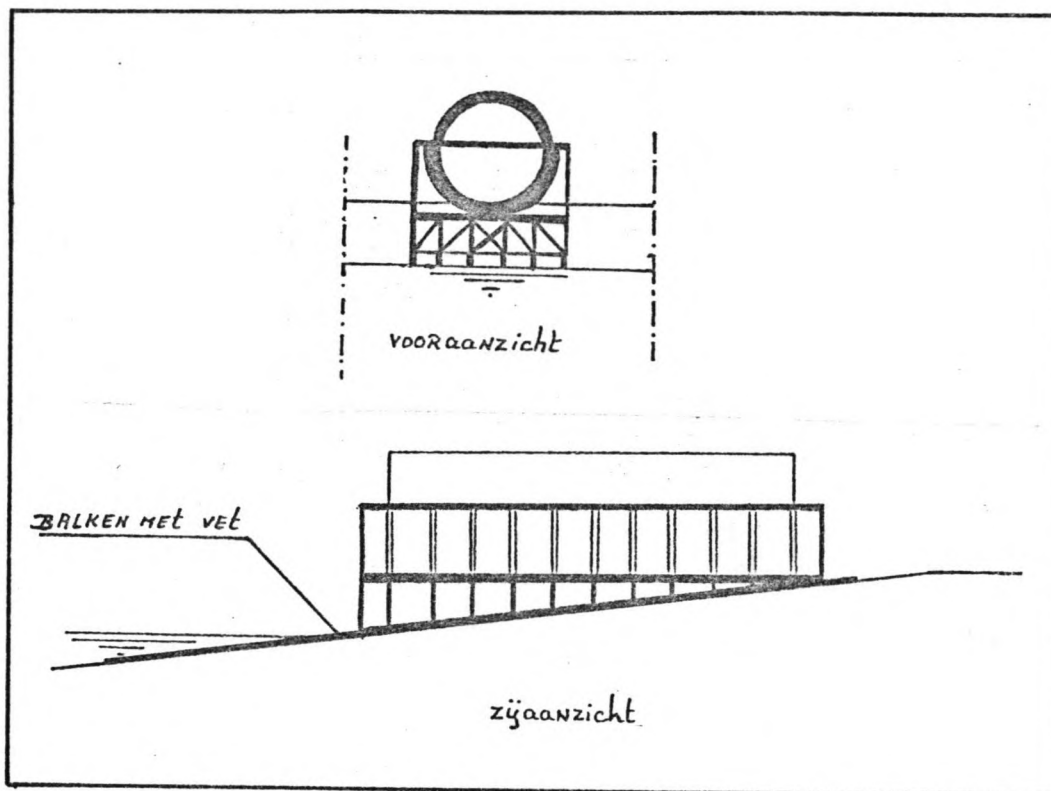
Figuur 10: Puntlast op scheepshelling en tunnelsegment.

Behalve deze puntlasten zou het bouwen in scheefstand ook uitvoeringstechnisch voor de nodige problemen zorgen. Op grond hiervan zal bouwen in rechtstand de voorkeur verdienen. De produktievorm die moet voorkomen dat het tunnelsegment wordt blootgesteld aan een lijnbelasting moet hierop worden aangepast.

Hebben we te maken met een flauwe helling dan zal deze lang en dus duur zijn. Is de helling steil dan zal de

produktievorm vrij duur worden.

Voor een overzichtstekening zie figuur 11.

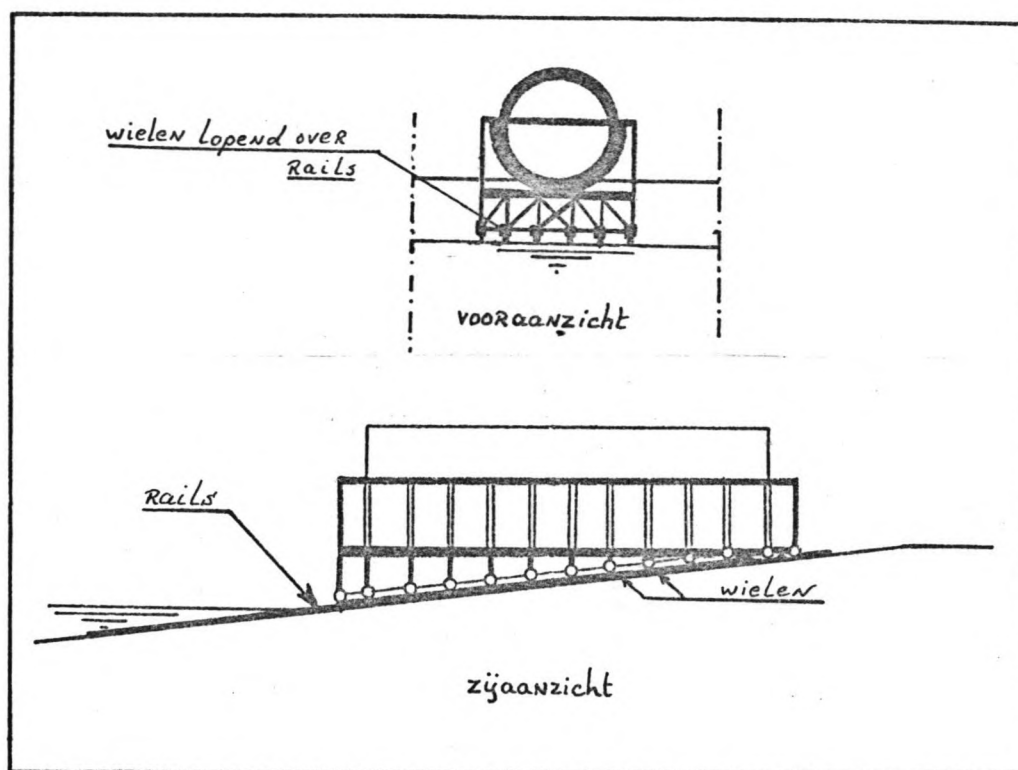


Figuur 11: Langshelling met balken en vet.

4. Langshelling met een wagen.

Het alternatief van de langshelling waarover zich een wagen beweegt is vrijwel gelijk aan dat van een dwarshelling met karren. Toch is dit alternatief minder aantrekkelijk omdat het tunnelsegment in langsrichting te water wordt gelaten. Het hoogteverschil van de helling aan voor en achterzijde van het tunnelsegment is namelijk groter. Dit maakt de wagen die het tunnelsegment ondersteund duur. Hieraan kan men slechts gedeeltelijk tegemoet komen door een flauwere helling te maken. Deze is echter weer langer en dus ook duurder.

Voor een overzichtsschets zie figuur 12.



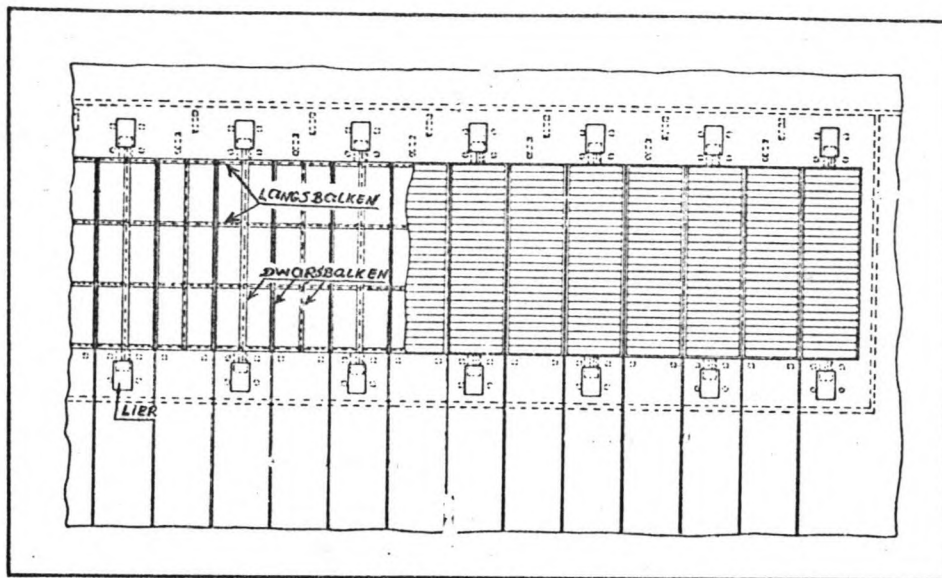
Figuur 12: Langshelling met een wagen.

5. Diverse soorten liften.

Een volgend alternatief om de tunnelsegmenten te water te laten is met een lift. In combinatie met een transportsysteem kan dan op de oever aan meerdere tunnelsegmenten gelijktijdig worden gewerkt.

Als de bouw van een tunnelsegment is voltooid kan het naar de lift worden getransporteerd. Voor dit transport staan ons verschillende mogelijkheden ter beschikking maar hierover meer in paragraaf 4.4

De vloerplaat van de lift bestaat uit twee of meerdere zware stalen balken in langsrichting. Deze verbinden de dwarsbalken. Aan de uiteinden van de dwarsbalken kan de belasting die op de vloerplaat werkt worden afgedragen aan de liftinstallatie (Zie figuur 13).



Figuur 13: Opbouw van de vloerplaat van een (scheeps-) lift.

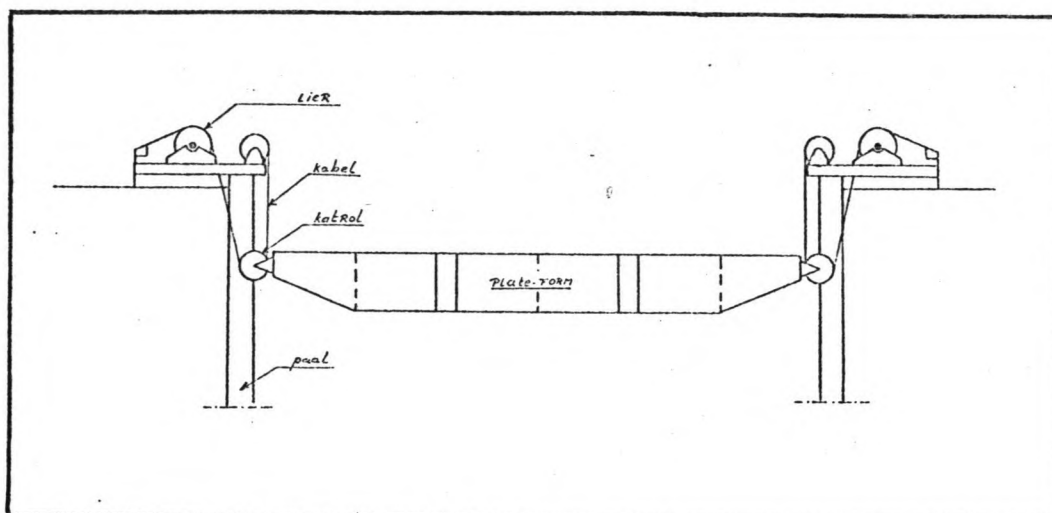
Het is bij het te water laten belangrijk dat alle dwarsbalken gelijkmatig naar beneden zakken (synchroon). Op deze manier zullen geen extreme dwarskrachten of momenten in het tunnelsegment optreden.

Er zijn verschillende type liften denkbaar. Hieronder zullen drie alternatieven worden besproken, die veel worden toegepast in de scheepsbouw.

1. Lift met lieren.

Bij een liftinstallatie waarbij we gebruik maken van lieren kunnen de dwarsbalken (van de vloerplaat) aan de uiteinden worden voorzien van katrollen. Door over deze katrollen een staalkabel te laten lopen die enerzijds z'n kracht afgeeft aan een vast punt op de kade en anderzijds aan de lier, is de kracht op de lier gereduceerd tot de helft. Door de kabels te vieren kan het tunnelsegment te water worden gelaten.

Voor een tekening van dit systeem zie figuur 14.



Figuur 14: Lift met lieren.

2. Lift met vijzels.

Aan het uiteinde van de dwarsdragers zijn kabels bevestigd. Via deze kabels kan het gewicht van de tunnelsegmenten worden afgedragen naar de vijzels.

Als het tunnelsegment op de vloerplaat wordt gebracht staan de vijzels in de hoogste stand. Door de vijzels van een katrol te voorzien kan men de kniklengte van deze vijzels tot de helft reduceren. Wel moeten we ons realiseren dat de kracht op de vijzel twee maal zo groot wordt.

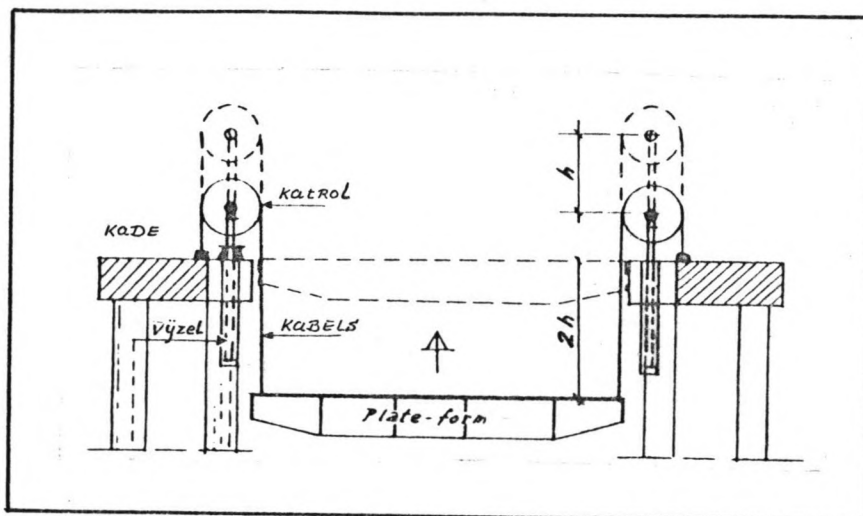
Voor een tekening zie figuur 15.

3. Lift met dubbele vijzels.

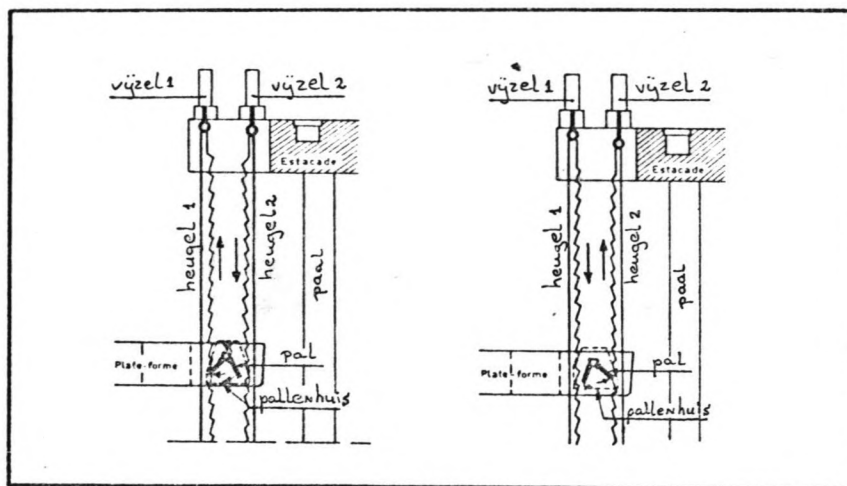
Het systeem van de dubbele vijzels is eigenlijk een variant op het tweede systeem. Het grote voordeel van dit systeem is de reductie van de kniklengte van de vijzels tot nul.

De dwarsbalken zijn voorzien van een pal aan de uiteinden (zie figuur 16). Deze pal valt ombeurten in de heugel van vijzel 1 en vijzel 2. Als de pal zich in de heugel van een vijzel bevindt beweegt de vij-

zel zich neerwaarts terwijl de andere vijzel zich opwaarts beweegt. Is het einde van de slaglengte van de vijzel bijna bereikt dan valt de pal in de andere heugel die zich inmiddels weer in de hoogste stand bevindt. Het proces begint dan opnieuw tot het tunnelsegment te water is gelaten.



Figuur 15: Lift met vijzels.



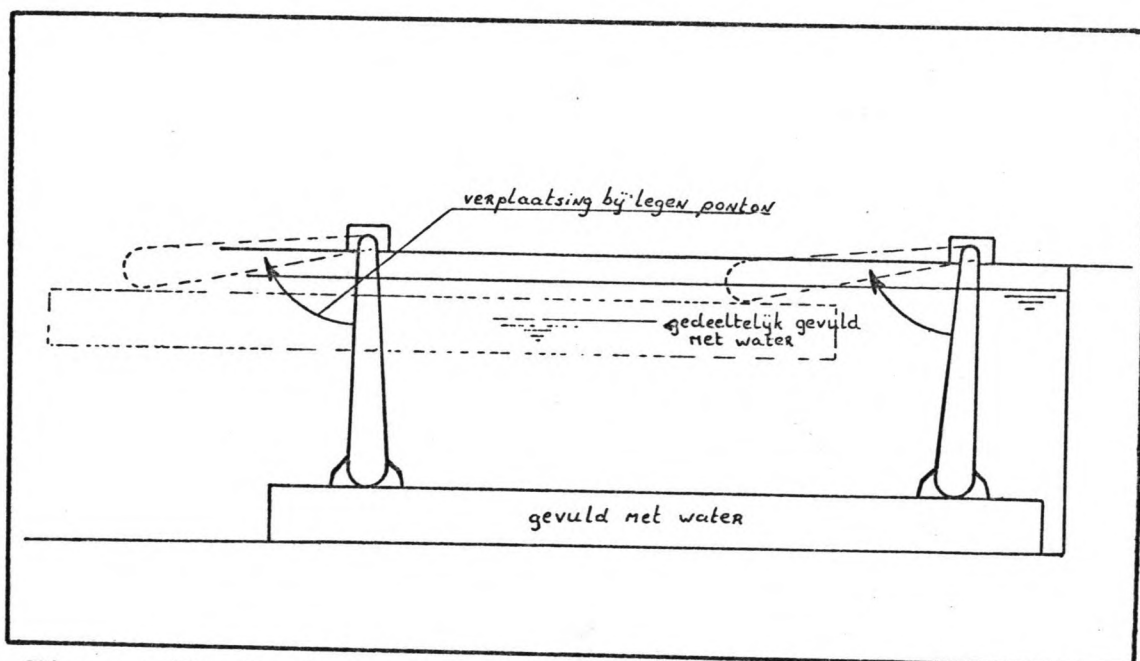
Figuur 16: Lift met dubbele vijzels.

6. Op een ponton plaatsen en afzinken.

Het laatste alternatief is om het tunnelsegment te water te laten door het op een ponton te plaatsen en dit af te zinken.

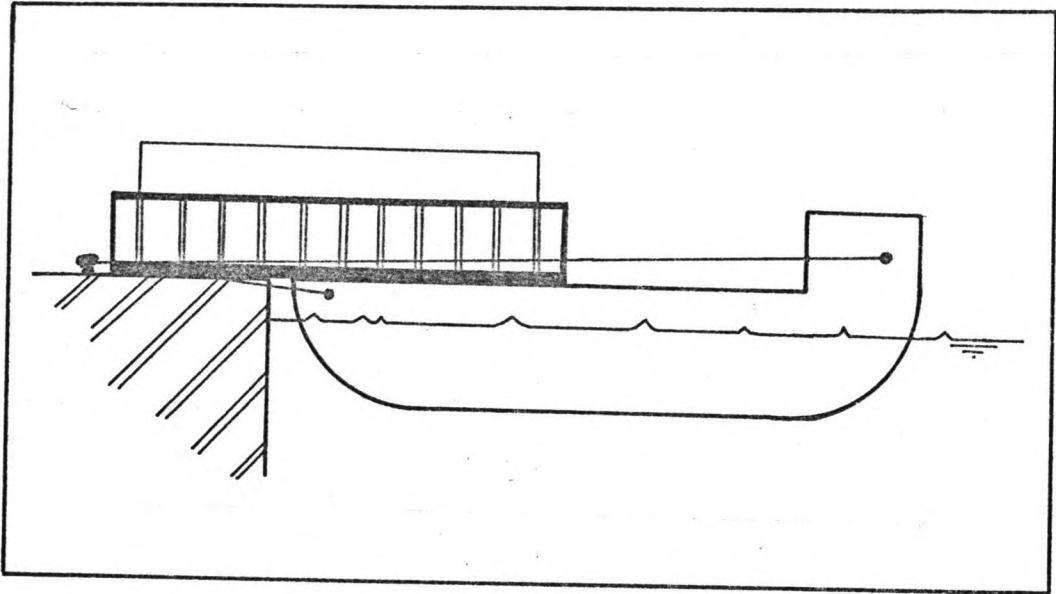
In combinatie met een transportsysteem kan op de oever aan meerdere tunnelsegmenten tegelijk gebouwd worden. Een voltooid tunnelsegment wordt op een ponton geplaatst dat ter plaatse of elders kan worden afgezonken.

Het ponton ter plaatse afzinken (zie figuur 17) kan alleen als de situatie dit toelaat. De omvang van het ponton zal namelijk aanzienlijk zijn, gezien de grote deklast die moet worden gedragen. In de afgezonken toestand moet onder het drijvende tunnelsegment nog voldoende ruimte aanwezig zijn voor dit ponton.



Figuur 17: Ponton voor ter plaatse afzinken van een tunnelsegment.

Is de waterdiepte ter plaatse niet voldoende voor dit alternatief van afzinken dan nemen we hiervoor een ponton dat naar dieper water kan worden gesleept. Daar kan dan het afzinken plaats vinden. Zie figuur 18.



Figuur 18: Tewaterlating met een ponton in dieper water.

7. De keuze van alternatief 5 of 6, respectievelijk het te water laten met een lift of een ponton ligt het meest voor de hand. Dit om de volgende redenen.
 1. De tewaterlating is van het begin tot het eind een beheerst proces dat op ieder moment kan worden stilgezet en waarbij geen extreme belastingsgevallen optreden. Bovendien kan een tunnelsegment terug naar de bouwplaats worden gebracht als het mankementen vertoont (bijvoorbeeld een lekkend kopschot). Dit alles in tegenstelling tot de alternatieven 1 en 3: een helling met balken en vet.

2. Het aantal tunnelsegmenten waaraan gelijktijdig wordt gewerkt kan zonder al te veel kosten en onbeperkt worden uitgebreid. Bij de alternatieven 1 tot en met 4 zullen de kosten van de helling(en) aanzienlijk toenemen als aan meerdere tunnelsegmenten tegelijk wordt gewerkt. Voor de alternatieven 2 en 4 neemt bovendien het aantal benodigde loopwagens toe.
3. Er wordt niet op een helling gebouwd. Allerlei hulpapparatuur ondervindt hiervan dus ook geen hinder. Bij de eerste vier alternatieven is daarvan wel sprake.
4. Er worden weinig eisen gesteld aan de bouwplaats. Slechts een vlak bouwterrein is voldoende. Bovendien kan vrijwel direkt met de bouw worden begonnen. Voor de alternatieven 1 tot en met 4 is een helling nodig waarvan de ondergrond draagkrachtig is of waarvan de baan die het tunnelsegment maakt onderheid moet worden. Pas na het gereedkomen van de helling kan met de bouw worden begonnen.

Het getijverschil in de Middellandse zee ter plaatse van de Straat van Messina is gemiddeld 0,4 meter bij springtij. Als de tunnelsegmenten te water worden gelaten met een lift (alternatief 5) is dit niet van belang. Wordt echter gekozen voor een ponton (alternatief 6) dan zou dit kunnen leiden tot problemen als de waterstand veel verandert in de tijd dat het tunnelsegment op het ponton wordt gebracht.

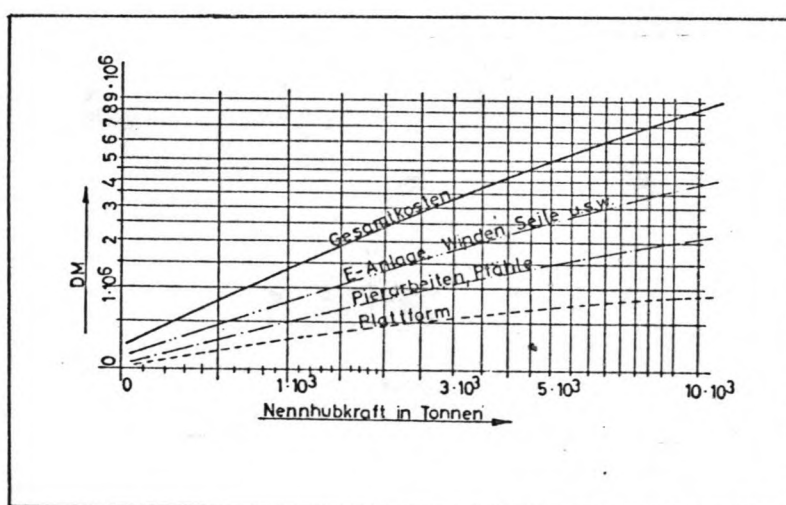
Deze grote waterstandsverandering treedt op als het getijverschil groot is en wanneer het proces lange tijd in beslag neemt. Van het eerste punt is geen sprake (slechts 0,4 meter) en het tweede punt kan worden ondervangen door een geschikt transport-systeem te kiezen.

De diepgang van het tunnelsegment tijdens het transport is 11,8 meter. Als gekozen wordt voor een lift of een ter plaatse afgezonken ponton moet de vaarroute naar open zee dus een minimale diepte hebben van ± 13 meter ($11,8 + \text{golfinvloeden}$).

Deze voorwaarde is niet van kracht indien voor een versleepbaar ponton wordt gekozen dat bij een grotere waterdiepte wordt afgezonken.

Tot slot zijn er ook nog de kosten van de alternatieven die vergeleken moeten worden.

Voor de liften zijn in grafiek 1 voor verschillende hefkrachten de kosten weergegeven. In ons geval komen we uit op een totaal gewicht van ongeveer 8500 ton. De kosten van de lift inclusief vloerplaat, pieraanleg, palen, elektrische installatie, enz. zijn 7,5 miljoen Duitse marken $\simeq 8,5$ miljoen gulden.



Grafiek 1: Kosten van een scheepslift bij verschillende netto hefkrachten.

De prijs van een ponton is minder eenvoudig te bepalen. Als we uitgaan van het ponton "Giant 1" van Smit International dan zien we dat dit ponton een totale deklast kan dragen van 17.000 ton en een

maximale deklast van 15 ton/m^2 . Dit voldoet dus ruimschoots aan de benodigde 8.500 ton. Plaatsing van twee tunnelsegmenten tegelijk zou zelfs mogelijk zijn. We hebben hier echter weinig belang bij.

De kleinere "Giant 22", die op de "Giant 1" volgt, is te klein om een tunnelsegment te dragen (totale deklast 7960 ton). Als tot uitvoering wordt overgegaan zou een tussenvorm tussen deze twee pontons gemaakt kunnen worden, die qua vorm en draagvermogen afgestemd is op het vervoeren van deze tunnelsegmenten. Voor de prijsbepaling wordt verder uitgegaan van de "Giant 1".

Het gewicht van de "Giant 1" is 4.500 ton. De kosten van verwerkt staal zijn ongeveer 4 à 5 gulden per kg. De kostprijs van dit ponton zou dus $f4,5 \cdot 4,5 \cdot 10^6 \text{ kg} \approx 20$ miljoen gulden zijn.

De prijs van 4 à 5 gulden per kg is echter sterk vertekend om twee redenen. Ten eerste worden pontons vaak gemaakt uit slooptankers. De kostprijs van het staal inclusief verwerking ligt dan aanzienlijk lager omdat grote stukken worden hergebruikt zonder dat hieraan arbeid wordt verricht. Ten tweede zal het benodigde staal dat wordt gebruikt voor het aanpassen en ombouwen van de tanker vermoedelijk lager liggen omdat veelal met grote platen wordt gewerkt (in tegenstelling tot bijvoorbeeld bruggenbouw).

De veronderstelling dat de kostprijs van een ponton voor het afzinken van de tunnelsegmenten in dezelfde orde van grootte ligt als de prijs van een scheepslift (8,5 miljoen) lijkt me op grond van bovenstaande reëel. Het ponton en dus ook het eigen gewicht daarvan, zal liggen tussen de "Giant 1" en "Giant 22". Bovendien zal de kostprijs per kg ponton lager zijn.

Een andere mogelijkheid is een ponton te huren. De "Giant 1" kost f5.000,= per dag. Inclusief bemanning en huur van materieel aan boord van het ponton afgerond op f50.000,= per week. Bij een continue aanwezigheid gedurende de 5 jaar die de bouw van de tunnelsegmenten in beslag zal nemen is dit $50 \times 50.000 \times 5 =$ f12.500.000,=. De huurprijs per dag zal over zo'n lange huurperiode vermoedelijk lager liggen als f5.000,=.

We kunnen ook overwegen het ponton eens per jaar naar de bouwplaats te halen om dan twaalf of meer segmenten achter elkaar af te zinken. Er komen dan echter vier keer versleepkosten bij. Ook zullen er twaalf of meer produktievormen nodig zijn waarin de tunnelsegmenten worden gebouwd.

Omdat de prijs van het te water laten met een ponton en een lift globaal in dezelfde orde van grootte ligt, wordt gekozen voor een ponton. Hiervoor is namelijk geen toegangsgeul naar open water nodig. Dit bespaart de kosten die nodig zijn om de geul gedurende vijf jaar op diepte te houden.

De keuze van het ponton om het tunnelsegmenten te water te laten is hieronder in matrixvorm aangegeven. De toetsingscriteria zijn:

- a. Controle op de beweging bij het te water laten.
- b. Mogelijkheid om het tunnelsegment uit het water te halen bij mankementen.
- c. Extra kosten om aan meer tunnelsegmenten gelijktijdig te werken.
- d. Hinder van scheve helling voor materieel (kranen e.d.).
- e. Eisen aan de lokatie om geschikt te zijn als bouwplaats.
- f. Invloed van het getijverschil tijdens het water laten.

g. Eisen met betrekking tot de benodigde waterdiepte (eventuele toegangsgeul naar dieper

h. Kosten.

Alle 6 de alternatieven die in deze paragraaf besproken zijn worden aan deze criteria getoetst en krijgen een cijfer variërend van 0 tot 3 toegewezen. 0 in geval geen sprake is van hinder of wanneer het juist gunstig is. 3 wanneer het veel hinder geeft of niet gunstig is.

Tenslotte wordt aan de verschillende criteria een gewicht toegekend dat hoger is, naarmate de belangrijkheid van een criteria. Het alternatief met het laagste aantal punten zal dus de voorkeur verdienen.

Alternatief	1	2	3	4	5	6	Gewicht
Criterium a	3	0	3	0	0	0	2
b	3	1	3	1	0	0	5
c	3	2	3	2	1	1	3
d	2	2	3	3	0	0	2
e	2	2	3	3	1	1	2
f	0	0	0	0	0	1	1
g	3	3	3	3	3	0	2
h	0	1	1	2	3	3	4
Totaal	44	29	52	37	23	18	

Tabel 5: Keuze voor de tewaterlating.

De keuze van een ponton komt ook hier als beste alternatief naar voren.

4.3 Bouwmethode.

Om de tunnelsegmenten te bouwen onderscheiden we twee methodes: 1. Bouwen van een tunnelsegment op één plaats.
2. Bouwen van prefab ringen die later worden geassembleerd.

Beide methodes hebben hun voor- en nadelen die na onderstaand overzicht nader worden toegelicht.

Methode 1

Methode 2

- | | |
|---|--|
| a. <u>centralisatie</u> van de bouw | <u>decentralisatie</u> van de bouw |
| b. <u>lange</u> verblijftijd in productievorm | <u>korte</u> verblijftijd in productievorm |
| c. <u>geen</u> voegen en epoxyhars | <u>wel</u> voegen van epoxyhars |
| d. <u>temperatuurseffecten</u> | vrijwel <u>geen</u> temperatuurseffecten |
| e. <u>stortvoegen</u> | <u>geen</u> stortvoegen |
| f. <u>geen</u> kantelinstallatie | <u>kantelinstallatie</u> |
| g. deelprocessen <u>afhankelijk</u> | deelprocessen <u>niet</u> afhankelijk |
- a. De- of centralisatie van de bouw.

Het voordeel van decentralisatie van de bouw is dat de verschillende activiteiten kunnen worden verricht op de daarvoor meest geschikte plaats en tijd. De activiteiten kunnen de ringen langs gaan waarbij een soort lopende-band effect wordt verkregen. Als de diverse voorbereidende activiteiten zijn verricht kan het beton worden gestort in de nabijheid waar na verharding assemblage plaatsvindt.

Deze manier van bouwen maakt het mogelijk dat op één tijdstip op een plaats slechts één activiteit wordt verricht. Dit in tegenstelling tot het bouwen op één vast punt.

Door het uitvoeren van meerdere activiteiten ontstaat een drukke bouwplaats (iedere activiteit heeft immers zijn eigen hulpapparatuur en personeel nodig). Boven-

dien kunnen situaties optreden waarin de ene bouwactiviteit het gelijktijdig uitvoeren van de andere bouwactiviteit onmogelijk maakt.

Een nadeel van het gedecentraliseerd bouwen is dat de steeds zwaarder wordende ringen tenslotte verplaatst moeten worden. Hiervoor kan echter hetzelfde transportsysteem gebruikt worden dat na voltooiing van een tunnelsegment het transport verzorgd naar het ponton.

b. Verblijftijd in de productievorm.

De productievorm dient ook als ondersteuning voor het tunnelsegment als dit op het ponton wordt geschoven. Daarom moet de productievorm vrij stijf zijn. Vooral de bodemplaat zal daardoor een zware constructie worden. Dit maakt de productievorm duur.

Als de verblijftijd in de productievorm lang is zullen er meer nodig zijn dan wanneer de ringen alleen in deze productievorm geassembleerd worden. Dit pleit wederom voor de bouw in prefab ringen.

c. Epoxyhars voegen.

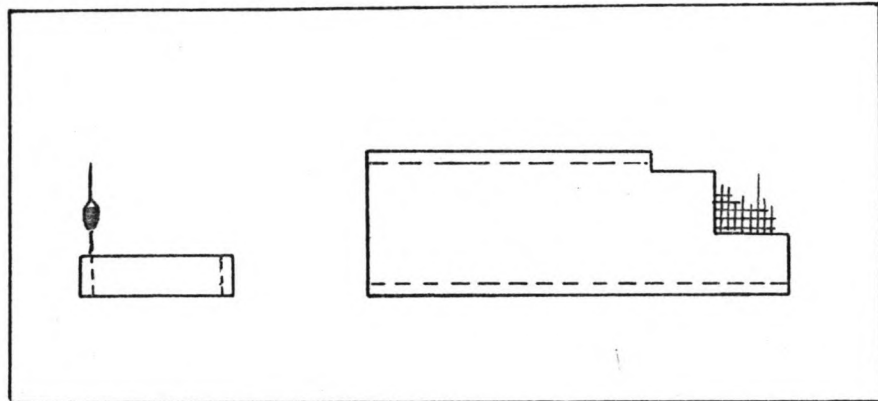
Wanneer in prefab ringen wordt gebouwd moet deze bij de assemblage aan elkaar worden gelijmd. Dit wordt gedaan met epoxyhars. Epoxyhars is een vrij duur materiaal en om het verbruik hiervan te beperken moeten de te lijmen vlakken nauwkeurig worden afgewerkt.

Zowel de nauwkeurige afwerking als het verbruik van de epoxyhars zijn nadelig. Dit pleit dus in het voordeel van het bouwen van een tunnelsegment op één vaste plaats.

d. Temperatuurseffecten.

Bij het storten van de prefab ringen is het mogelijk de ringen liggend vol te storten en na verharding terug te kantelen (zie figuur 19). Hierdoor is zo'n ring in een stort te maken. Dit is bij het bouwen van een tunnel "uit een stuk" niet mogelijk. Zouden

boven en onderzijde van de tunnel tegelijk worden gestort dan zou de binnenbekisting opdrijven.



Figuur 19: Positie tijdens de betonstort.

Als we met het storten van het bovenste deel wachten tot de onderste laag is verhard dan treden temperatuurspanningen op. Het laatst gestorte deel zal een hogere temperatuur hebben dan de omgeving terwijl het eerder gestorte deel de omgevingstemperatuur reeds heeft aangenomen. Bij het verder afkoelen van het laatst gestorte deel zal de verkorting ten gevolge van deze temperatuursverlaging door het reeds afgekoelde deel worden tegengegaan. Hierdoor kunnen scheuren ontstaan in de grensvlakken. Dit effect werkt niet alleen over de hoogte, maar ook in langsrichting. Van deze temperatuurseffecten hebben we bij de opbouw uit ringen geen last.

e. Stortvoegen.

Een probleem dat aansluit op dat van de temperatuurseffecten is dat van de stortvoegen. Als het werk wordt onderbroken om de volgende dag te worden hervat ontstaan er stortvoegen. Deze stortvoegen vormen toch een soort discontinuïteit in het beton en zijn als zodanig ongunstig.

Stortvoegen zullen bij een tunnelsegment uit één geheel aanwezig zijn. Omdat bij de ringen de stort kleiner is kan deze in één keer worden afgemaakt. Daardoor zijn er in de ringen ook geen stortvoegen aanwezig.

f. Kantelinstallatie.

Nadat de ringen zijn gestort moeten deze worden gekanteld alvorens tot assemblage kan worden overgegaan. Hiervoor is een kantelinstallatie nodig. Gezien de grootte van het gewicht zal dit een niet te verwaarlozen investering zijn.

g. Afhankelijkheid deelprocessen.

Als de bouw van een ring wordt opgehouden kan de bouw van de andere ringen gewoon doorgaan. De ring waarvan de bouw is opgehouden, kan dan in een later stadium in versneld tempo worden afgebouwd. Dit is niet het geval bij de bouw van een tunnelsegment uit één deel. Stagnatie van een deelproces zou de gehele bouw stil kunnen leggen.

Conclusie.

De enige nadelen die zijn verbonden aan de opbouw van een tunnelsegment uit ringen zijn de voegen van epoxyhars en de kantelinstallatie. Gezien de voordelen die deze bouwmethode heeft ten opzichte van de bouw van het tunnelsegment op een plaats uit één deel ligt de keuze voor de opbouw uit ringen voor de hand.

4.4 Transportsysteem.

Voor het vervoeren van de verharde ringen naar de plaats waar assemblage plaatsvindt en voor het vervoer van de gehele geassembleerde tunnel naar het ponton is een transportsysteem nodig. Dit systeem moet zijn afgestemd op de grote gewichten van de ringen en de gehele tunnelsegmenten (8.500 ton) waarmee we hier te maken hebben.

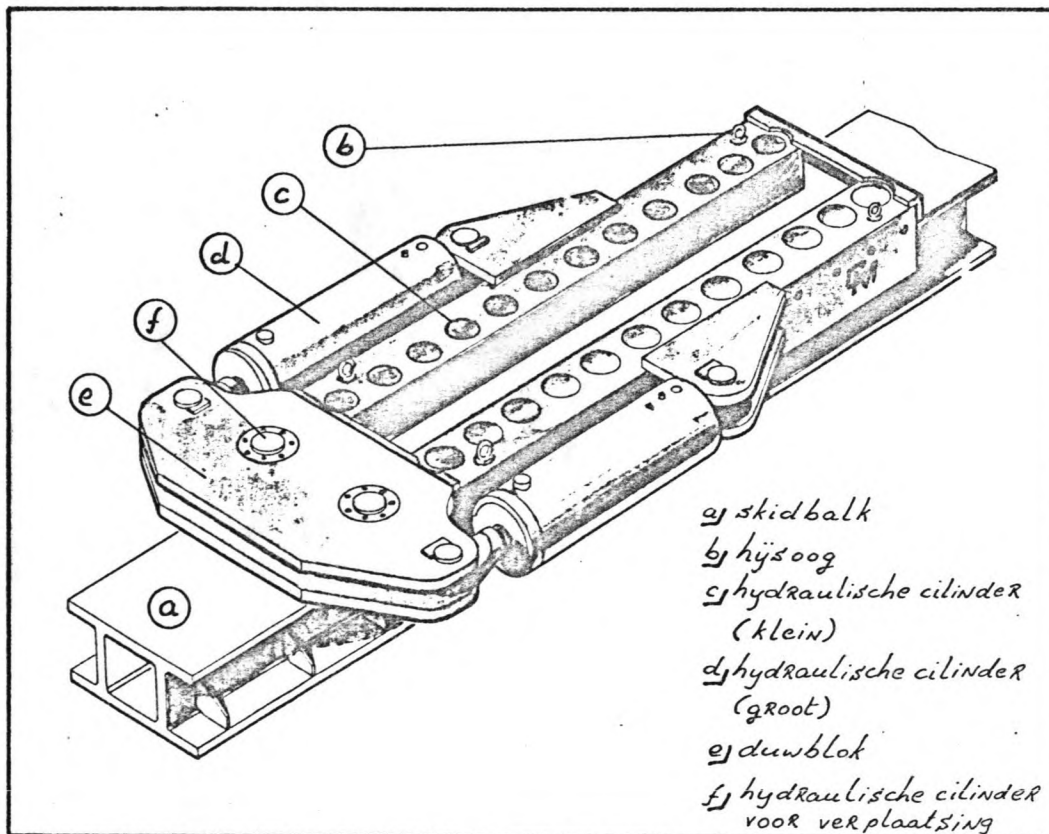
Er staan ons diverse systemen ter beschikking:

1. Skidunit.
2. Railnet.
3. Kussens gevuld met water of lucht.

1. Skidunit.

Een skidunit (zie figuur 20) bestaat uit een of meerdere hydraulische werktuigen, skidbalken en een hydraulische krachtbron. Het systeem werkt kort samengevat als volgt:

De skidbalken (a) worden op de plaats gelegd waarlangs het transport gaat plaatsvinden. Met een lichte kraan van maximaal 10 ton kunnen de hydraulische werktuigen worden aangebracht over de skidbalken. Voor het vervoer per kraan zijn vier hijsogen (b) op het hydraulisch werktuig gemonteerd. Nu kan het transport beginnen.



Figuur 20: Skidunit.

De kleine hydraulische cilinders (c) worden onder druk gezet. Hiermee grijpt het hydraulische werktuig zich als het ware vast op de skidbalk. Daarna kunnen de grote cilinders (d) uitgedrukt worden en de, tegen het duwblok (e) aanliggende, productievorm of ondersteuningsplaat wordt verschoven.

Als de maximale slaglengte is bereikt kan de druk van de kleine hydraulische cilinders worden afgehaald. Door vervolgens de grote hydraulische cilinders weer in te trekken zijn we weer in de uitgangspositie.

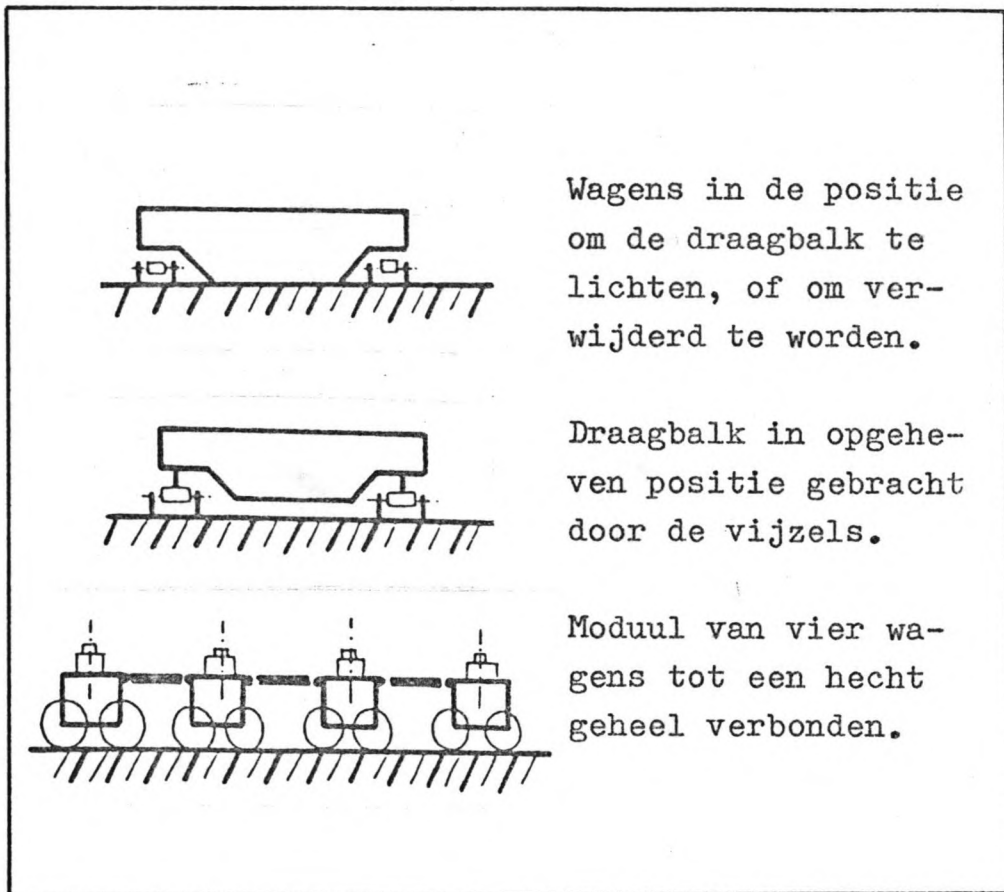
Het transport van het hydraulische werktuig zelf kan met behulp van een kraan wat erg omslachtig is. De producent heeft echter ook varianten, waarbij twee extra kleine hydraulische cilinders (f) in het duwblok zijn opgenomen. Deze worden uitgedrukt en klampen zich aan de balk vast op het moment dat de druk van de andere kleine cilinders afgehaald. Door nu de grote hydraulische cilinders in te trekken wordt het geheel in de richting van het duwblok getrokken.

Er zijn ook varianten waarbij in het duwblok een trekdrukstang is opgenomen. Daarbij kan deze stang functioneren als vast punt bij het intrekken van de grote hydraulische cilinders.

Meer informatie is opgenomen in de bijlage.

2. Railnet.

Een andere methode om de ringen en het gehele tunnelsegment te vervoeren is over een railnet. Over dit railnet kunnen wagens rijden die onderling zijn verbonden met zware balken (zie figuur 21). Hierop rust dan de te vervoeren last.

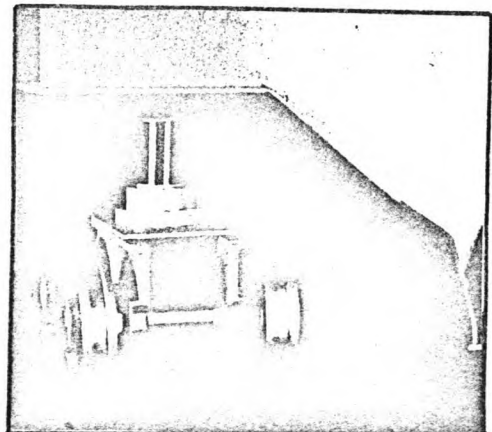
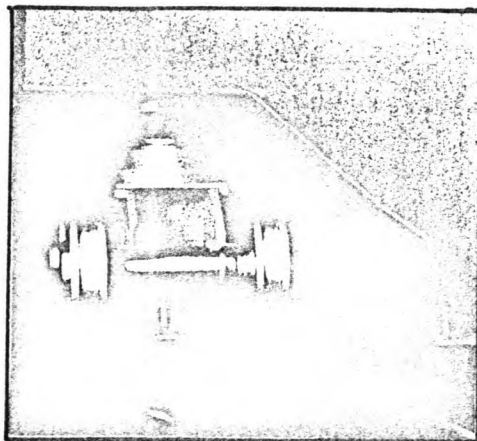
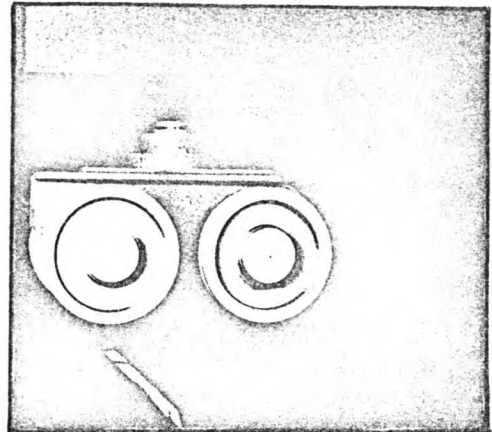
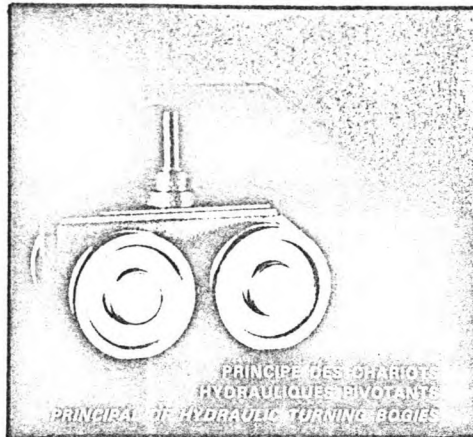


Figuur 21: Transportsysteem met balken op wagens die zich verplaatsen over rails.

Het ensemble van twee wagens en een balk worden door Delattre - Levivier gemaakt en is gestandaardiseerd voor lasten van 100 tot 500 ton. Dat betekent voor het tunnelsegment minimaal 17 ondersteuningsbalken en 34 wagens van het zwaarste gestandaardiseerde type.

Iedere ring en ieder tunnelsegment moet worden gebouwd op deze balken. Zouden de ringen en tunnelsegmenten pas in een later stadium op deze balken worden geplaatst met bijvoorbeeld een kraan dan is door de aanwezigheid van deze kraan dit hele transportsysteem overbodig.

Het aantal benodigde wagens is slechts 34 omdat deze demontabel zijn. Ze kunnen dus onder alle balken worden ingezet. Het is bovendien mogelijk haakse bochten te maken met deze wagens als ter plaatse een rail-systeem aanwezig is dat dit toelaat. De wagens zijn namelijk draaibaar (zie figuur 22).



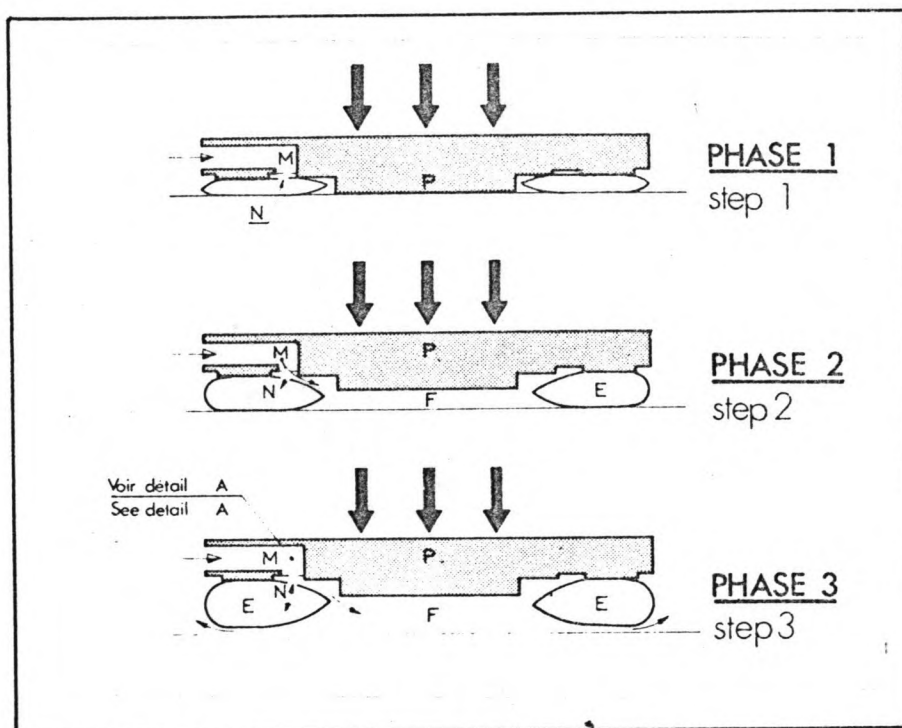
Figuur 22: Principe van draaibare wagens.

De aandrijving kan zowel in de wagens zelf als van buiten af geschieden. De keuze hiervan zal afhangen van de prijs enerzijds en het gemak (dat niet bij ieder klein transport een uitwendige aandrijving nodig is) anderzijds.

3. Kussens gevuld met water of lucht.

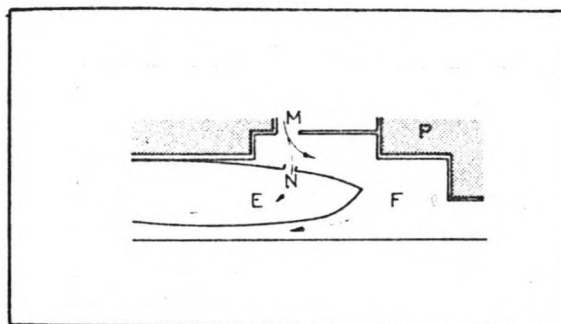
Het laatste hier behandelde alternatief om de ringen en tunnelsegmenten te transporteren is dat van kussens gevuld met water of lucht.

De werking van dit systeem is als volgt (zie ook figuur 23): Na voltooiing van de bouw van een ring of tunnelsegment (fase 1) wordt ter plaats van M water onder hoge druk ingesloten. Dit water zal eerst het kussen, dat geheel rond loopt, vullen.



Figuur 23: Transportsysteem met kussens gevuld met water.

Als het kussen zover gevuld is dat er overdruk (ten opzichte van de omgeving) ontstaat zal ook de tussen het kussen gelegen ruimte worden gevuld met water. Dit omdat vrije drukuitwisseling tussen het kussen en de hierdoor ingesloten ruimte mogelijk is (zie detail figuur 24).



Figuur 24: Detail van waterinvoer.

Tot dit moment is het kussen nog volledig in contact met de ondergrond en ontsnapt er nog geen water. Wel is de vloerplaat door de overdruk van de grond losgekomen (fase 2).

Pas wanneer de overdruk in het kussen en de hierdoor omsloten ruimte nog verder wordt opgevoerd zal tussen het kussen en de ondergrond een waterfilmpje van 0,1 à 0,2 mm ontsnappen. Dit maakt het mogelijk het geheel met een geringe horizontale kracht te verplaatsen, omdat de wrijving tussen kussen en ondergrond vrijwel nul wordt (fase 3).

Hoewel, in tegenstelling tot de andere transportsystemen, weinig eisen worden gesteld aan de draagkracht van de ondergrond, moet de toplaag goed zijn afgewerkt. De toplaag moet glad en niet poreus zijn.

Iedere ring moet op een eigen transporteenheid worden gebouwd. Voor het transport van de tunnelsegmenten zouden meerdere transporteenheden, die voor het vervoeren van de ringen worden gebruikt, gekoppeld kunnen worden.

4. Toetsing en keuze.

Deze drie transportsystemen zullen getoetst worden op hun bruikbaarheid aan de hand van onderstaande toetsingscriteria.

- a. Eisen die het systeem stelt aan de draagkracht van de ondergrond.
- b. Eisen die het systeem stelt aan de toplaag van de grond.
- c. Plaatsgebondenheid waarlangs transport plaats vindt.
- d. Inzetbaarheid bij kantelsysteem ringen.
- e. Inzetbaarheid bij het op de juiste plaats brengen van gekantelde ringen.
- f. Kans op beschadiging van systeem.
- g. Kans op beschadiging van de baan waarover het transport plaats vindt.
- h. Hinder tijdens het transport voor de omgeving.
- i. Hinder voor en na het transport voor de omgeving (door de aanwezigheid van bijv. skidbalken).
- j. Aansluitproblemen tussen ponton en oever.
- k. Onderhoudsbehoefte van het transportsysteem.
- l. Kosten van het transportsysteem (zie opmerking).
- m. Extra kosten als aan meer tunnelsegmenten gelijktijdig wordt gewerkt.

Opmerking.

Alleen voor het skidsysteem zijn de kosten bekend. Vier hydraulische werktuigen met een schuifkracht van 450 ton per stuk met een hydraulische krachtbron zijn voldoende om de zwaarste last, een tunnelsegment van 8.500 ton, te verschuiven. Immers de wrijvingscoëfficiënt van staal op staal is 0,2.

$$\frac{4 \cdot 450}{0,2} = 9.000 \text{ ton} \geq 8.500$$

De kosten exclusief skidbalken zijn 1,5 miljoen gulden.

De verschillende alternatieven worden aan de toetsingscriteria getoetst en krijgen een cijfer 0, 1, 2 of 3 toegekend. 0 als een toetsingscriterium pleit

voor het beschouwde systeem, 3 als een toetsingscriterium niet pleit voor dit systeem. Vervolgens worden aan de diverse toetsingscriteria gewichten toegekend. Het alternatief met het laagste aantal punten verdient de voorkeur.

Criterium	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m
Alternatief													
1	1	0	2	0	0	1	0	0	3	0	1		1
2	3	1	3	0	1	2	0	0	1	3	2	?	2
3	0	3	1	3	3	3	3	3	0	3	3	?	2
Gewicht	3	2	2	2	2	2	1	1	2	1	1	-	2

Tabel 6: Keuze transportsysteem.

Het punten totaal is als volgt:

skidsysteem 18 punten

railnet 34 punten

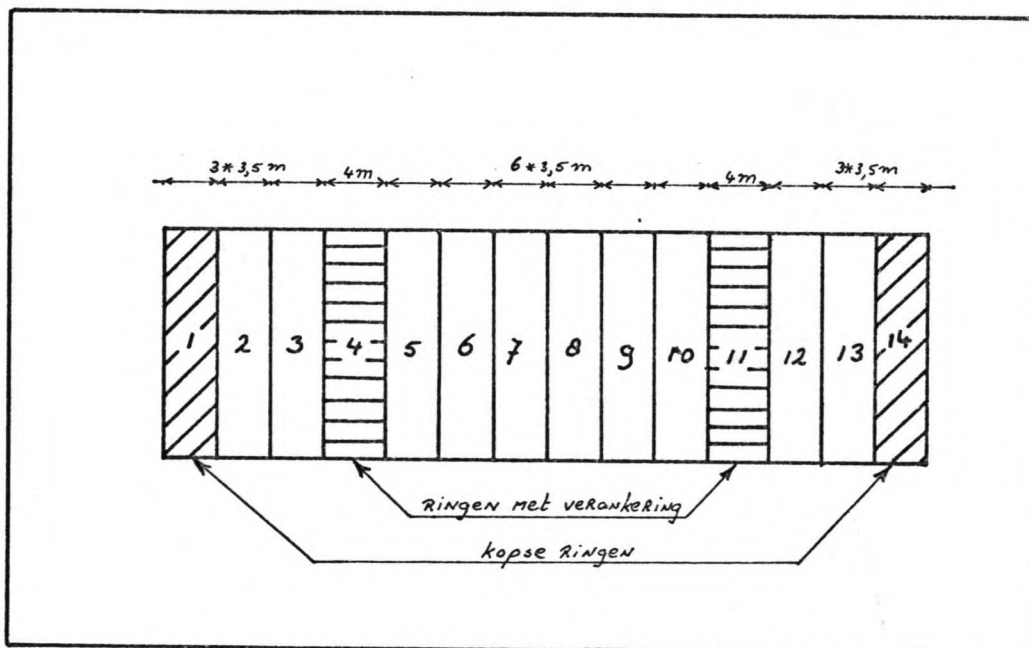
kussens 44 punten

Het transport met een skidunit geniet dus de voorkeur.

5. Netwerkplanning voor de bouw van één tunnelsegment.

5.1 De bouwvolgorde van één tunnelsegment.

Een tunnelsegment wordt opgebouwd uit 14 ringen. We onderscheiden daarbij drie verschillende types. Ten eerste de kopse ringen. De lengte hiervan is 3,5 meter en het aantal exemplaren per segment is 2. Vervolgens zijn er 10 ringen met een lengte van 3,5 meter. Tot slot zijn er nog 2 ringen waaraan de verankeringskabels worden bevestigd. De lengte van deze ringen is 4 meter. Deze is iets langer genomen omdat dan een betere spreiding op kan treden van de geïntroduceerde kabelkrachten alvorens de gelijkijnde (epoxyhars)voeg wordt bereikt. Een nog grotere lengte wordt beperkt door de kantelinstallatie, die dan speciaal voor deze twee ringen zwaarder moet worden ontworpen. In figuur 26 is de opbouw in een schets weergegeven.



Figuur 26: Schema van de opbouw van een tunnelsegment.

De ringen worden liggend gemaakt, zodat continu doorstorten mogelijk is. Aan dit storten gaan de volgende activiteiten vooraf:

- plaatsen van het prefab wapeningsnet.
- aanbrengen van de stalen stiften in de linerdelen.
- aan elkaar lassen van de linderdelen.
- aanbrengen van de herwinbare binnenbekisting van de ring.

Het wapeningsnet kan worden gevlochten in een speciaal daarvoor ingerichte ruimte. Dit bespaart tijd omdat het constant verplaatsen en opstellen van de bank voor de betonstaalvlechters niet meer nodig is.

Als het wapeningsnet uit twee delen bestaat van de halve ringlengte (dus $\frac{3,5}{2} = 1,75$) dan zijn geen steigers nodig om dit vlechtwerk te verrichten. Na voltooiing van de twee helften kan het ene deel met een kraan boven het andere worden gebracht. De twee halve wapeningsnetten kunnen dan aan elkaar worden gelast. Vervolgens kan het wapeningsnet naar de plaats worden gebracht waar de stort plaatsvindt. Voor de ringen met een lengte van 4 meter kunnen de wapeningsnetten uit drie delen worden opgebouwd.

De linerdelen bestaan uit derde delen van cilinders. Dit is om twee redenen gedaan. Ten eerste zal de benodigde ruimte tijdens het transport naar de bouwplaats en voor de opslag op de bouwplaats aanzienlijk afnemen als met linerdelen van halve cirkels of kleiner wordt gewerkt. De linerdelen kunnen dan in elkaar worden geplaatst. De tweede reden waarom de voorkeur uitgaat naar derde delen van cilinders is van uitvoeringstechnische aard. Zijn de stiften eenmaal aangebracht dan zouden halve cilinders niet meer om de wapening kunnen worden aangebracht. Werken we met derden van cilinders dan is dit wel mogelijk.

Na het storten en verharden van het beton kunnen de ringen worden gekanteld. Staat een ring eenmaal in rechtstand dan kan het prefab binnenwerk worden aangebracht.

Het prefab binnenwerk wordt ook gebouwd met een aantal prefab wapeningsnetten en een herwinbare bekisting. Als een ring in de productievorm is geplaatst kan op de voegen epoxyhars worden aangebracht. Met de skidunit kunnen de ringen tegen elkaar worden gedrukt zodat we een hecht geheel krijgen.

Als de laatste ring aan de rest is vastgelijnd kunnen de voorspankabels worden aangebracht. Daarna kunnen de voorspankanalen worden geïnjecteerd.

Nadat tenslotte de kopschotten zijn aangebracht kan het tunnelsegment te water worden gelaten.

5.2 Hoofd- en deelactiviteiten met tijdsduur.

De bouwactiviteiten zijn op te splitsen in vier min of meer afgeronde hoofdactiviteiten:

- A. Bouwen van omhullende ringen.
- B. Bouwen binnenwerk.
- C. Assembleren.
- D. Afwerken.

We kunnen bij hoofdactiviteit A drie verschillende type ringen onderscheiden:

- A1. Ringen 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12 en 13.
- A2. Ringen 1 en 14.
- A3. Ringen 4 en 11.

Ditzelfde kunnen we doen voor hoofdactiviteit B:

- B1. Binnenwerk 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12 en 13.
- B2. Binnenwerk 1 en 14.
- B3. Binnenwerk 4 en 11.

Deze acht hoofdactiviteiten kunnen we opsplitsen in verschillende deelactiviteiten. Deze deelactiviteiten zijn

hieronder opgesomd met vermelding van de benodigde tijdsduur in mandagen (mndgn) of netto productiedagen (npdgn). Na deze opsomming is een toelichting gegeven op de gevonden mndgn en npdgn.

A1	a. vlechten twee halve wapeningsnetten	27,5 mndgn
	b. aan elkaar lassen halve wapeningsnetten	0,5 npdg
	c. plaatsen wapeningsnet met voorspankanalen	0,5 npdg
	d. aanbrengen stiften in linerdelen	1 mndg
	e. plaatsen en aan elkaar lassen linerdelen	0,5 npdg
	f. stellen binnenbekisting	1 npdg
	g. storten beton	1 npdg
	h. verharden tot ontkisting	6 npdgn
	i. resterende verhardingstijd	22 npdgn
	j. verwijderen bekisting en schoonmaken	1 npdg
	k. aanbrengen bescherm laag op liner	3 npdgn
A2	a. vlechten twee halve wapeningsnetten	27,5 mndgn
	b. aan elkaar lassen halve wapeningsnetten	0,5 npdg
	c. plaatsen wapeningsnet met voorspankanalen	0,5 npdg
	d. aanbrengen stiften in linerdelen	1 mndg
	e. plaatsen en aan elkaar lassen linerdelen	0,5 npdg
	f. stellen binnenbekisting	1 npdg
	g. storten beton	1 npdg
	h. verharden tot ontkisting	6 npdgn
	i. resterende verhardingstijd	22 npdgn
	j. verwijderen en schoonmaken bekisting	1 npdg
	k. aanbrengen bescherm laag op liner op kopplaat	3 npdgn
	l. lassen kopse afdekplaat	3,5 npdgn
A3	a. vlechten van de drie stukken wapeningsnet	31,5 mndgn
	b. aan elkaar lassen delen wapeningsnet	1 npdg
	c. plaatsen wapeningsnet met voorspankanalen	0,5 npdg

	d. aanbrengen stiften in linerdelen	1	mndg
	e. plaatsen en aan elkaar lassen linerdelen	0,5	npdg
	f. stellen binnenbekisting	1	npdg
	g. storten beton	1	npdg
	h. verharden tot ontkisting	6	npdgn
	i. resterende verhardingstijd	22	npdgn
	j. verwijderen en schoonmaken bekisting	1	npdg
	k. aanbrengen bescherm laag op liner en kop- plaat	3	npdgn
	l. lassen bevestigingspunten verankerings- kabels	6	npdgn
B1	a. vlechten twee halve wapeningsnetten	5	mndgn
	b. aan elkaar lassen twee halve wapenings- netten	0,5	npdg
	c. plaatsen wapeningsnet	0,5	npdg
	d. stellen bekisting	2	npdgn
	e. storten beton	1	npdg
	f. verharden tot ontkisting	6	npdgn
	g. resterende verhardingstijd	22	npdgn
	h. verwijderen en schoonmaken bekisting	1	npdg
B2	a. vlechten wapeningsnet	3	mndgn
	b. plaatsen wapeningsnet	0,5	npdg
	c. stellen bekisting	1,5	npdg
	d. storten beton	0,5	npdg
	e. verharden tot ontkisting	6	npdgn
	f. resterende verhardingstijd	22	npdgn
	g. verwijderen en schoonmaken bekisting	1	npdg
B3	a. vlechten drie wapeningsnetten	6	mndgn
	b. aan elkaar lassen drie wapeningsnetten	1	npdg
	c. plaatsen wapeningsnet	0,5	npdg
	d. stellen bekisting	2	npdgn
	e. storten beton	1	npdg
	f. verharden tot ontkisting	6	npdgn
	g. resterende verhardingstijd	22	npdgn
	h. verwijderen en schoonmaken bekisting	1	npdg

C	a. vervoeren en kantelen ring	0,5	npdg
	b. vervoeren en kantelen binnenwerk	0,5	npdg
	c. plaatsen binnenwerk	0,5	npdg
	d. aanbrengen epoxyhars op de voegen en aandrukken	0,5	npdg
	e. aan elkaar lassen stalen liner	1,5	mndgn
	f. vastklemmen binnenwerk	0,5	mndg
D	a. aanbrengen voorspankracht	2	npdgn
	b. volgrouten voorspankanalen	1	npdg
	c. aanbrengen ballasttanks	2	npdgn
	d. monteren kopschotten	3	npdgn
	e. beschermende laag op lasnaden	3	npdgn
	f. aanbrengen Ginaprofiel	2	npdgn
	g. op het ponton skidden, varen, afzinken, terug brengen en schoonmaken productievorm	3	npdgn

5.3 Toelichting op tijdsduur deelactiviteiten.

Waar nodig zal een toelichting op de deelactiviteiten worden gegeven.

A1 a.

Uit een zeer globale berekening van de wapening volgt dat voor een ring van 3,5 meter lengte 8,75 ton wapeningsstaal nodig is. Stel dat de gemiddelde staaldiameter 16 mm is. Verwerkingstijd 1000 kg wapeningsstaal $\varnothing$ 16 = 25 manuren. Voor de ring is dat $8,75 \cdot 25 = 220$ manuren
 $= 27,5$ mndgn.

Een globale benadering is in deze fase acceptabel omdat de tijdsduur van dit vlechten kan variëren met het aantal vlechters dat wordt ingezet. De totale hoeveelheid vlechtwerk voor een tunnelsegment is dan: $\frac{50}{3,5} \cdot 220 = 3143$ manuren ≈ 390 mndgn.

Omdat gestreefd wordt naar één tunnelsegment per maand ligt hiermee het aantal mensen vast. Er is hierbij uitgegaan van 200 werkbare werkdagen per jaar.

$390 \cdot 12 / 200 = 23,4$ dus 24 man.

Dit zijn 6 ploegen van 4 man. Wordt door een ploeg aan een half wapeningsnet gevlochten dan is de tijdsduur

$$\frac{27,5}{4} \cdot \frac{1}{2} = 3,5 \text{ npdgn.}$$

Dit is de tijd die bij het bepalen van het kritiek pad gebruikt gaat worden.

A1 b.

Hijzen, stellen op juiste plaats en lassen tesamen
0,5 npdg

A1 c.

Hijzen, afsluiten voorspankanalen, plaatsen 0,5 npdg.

A1 d.

Aantal stiften per m^2 lineroppervlak is 16.

Aantal m^2 per linerdeel van 3,5 meter = $55 m^2$.

Aantal stiften per hele liner $3 \cdot 55 \cdot 16 = 2640$.

Aantal stiften per man per uur = 300

per dag = $300 \cdot 8 = 2400$.

Aantal mndgn $2640 : 2400 \simeq 1$ mndg.

A1 e.

Stel de tijdsduur voor het plaatsen van de linerdelen is
2 uur.

Totale laslengte voor de twee naden als de las in vijf
lagen wordt gelegd: $3,5 \cdot 3 \cdot 5 = 52,5$ meter.

Er kan op drie plaatsen gelijktijdig worden gelast.

Tijdsduur per meter middellange las, 300 tot 4000 mm
is 0,12 manuur.

De tijdsduur voor het lassen wordt dan $52,5 \cdot 0,12 = 2,1$ uur.

Tijdsduur plaatsen en lassen is $2 + 2,1 \simeq 0,5$ npgd.

A1 f.

Er wordt gebruik gemaakt van prefab bekistingswanden.

Deze moeten echter wel nauwkeurig gesteld worden. Geschatte tijdsduur 1 npgd.

A1 g.

Aantal m^3 beton is 110 m^3 . Aangenomen wordt dat de capaciteit van de fabriek ruimschoots toereikend is. Met een gemiddelde verwerkingssnelheid van $17,5 \text{ m}^3/\text{uur}$ is dit werk gemakkelijk in één npdg te voltooien. Dit komt goed uit omdat de stort niet onderbroken mag worden.

A1 h.

Bij het bepalen van het ontkistingstijdstip is gebruik gemaakt van de V.B. 1974 deel B 813.4. Deze tijdsduur is echter alleen van belang voor het aantal benodigde prefab bekistingen.

A1 i.

Totale verhardingstijd is 28 dagen. Op het tijdstip dat ontkist kan worden zijn hiervan 6 dagen verstreken. Resterende verhardingstijd $28 - 6 = 22 \text{ npdgn}$.

A1 j.

Het verwijderen van de bekisting is een activiteit waarvoor relatief weinig tijd nodig is. Alvorens hergebruik mogelijk is zal de bekisting echter grondig gereinigd moeten worden.

A1 k.

Dit gebeurt in drie lagen. De uiteinden van de ringen worden in dit stadium niet behandeld omdat daar bij het koppelen van de ringen nog gelast moet worden.

Omdat de verschillende lagen droog moeten zijn alvorens de volgende wordt aangebracht is voor het gehele proces drie npdgn in rekening gebracht. Het aanbrengen van deze lagen gaat echter sneller, omdat deze er op gespoten kunnen worden.

De deelactiviteiten van A2 stemmen voor het grootste deel overeen met de activiteiten van A1. Voor de toelichting wordt dan ook verwezen naar A1. Een deelactiviteit die bij A1 niet voorkwam is A2 l.

Deze zal hieronder behandeld worden.

A2 1.

Aangenomen wordt dat het benodigde plaatstaal in de juiste vorm van de walserij wordt aangevoerd. Het aan elkaar lassen kan dan op de bouwplaats machinaal geschieden. Er moeten $2 * 5$ lagen van 45 meter (tunnel-omtrek) worden gelegd. De benodigde tijdsduur is 0,06 manuur per meter'. Totale tijdsduur $2*45*5*0,06 = 27$ manuren. Dit is tevens de productietijd of er moeten meer machines worden ingezet $27 : 8 \approx 3,5$ npdgn.

De deelactiviteiten van A3 stemmen voor een groot deel overeen met die van A2. Door de grotere lengte van deze ringen zullen sommige activiteiten echter meer (ongeveer $8/7$) tijd in beslag nemen. Bovendien is aan de deelactiviteiten een activiteit veranderd, namelijk 1, het lassen van de bevestigingspunten voor de verankeringskabels. De deelactiviteiten c, d, e, f, g, h, i, j en k van activiteit A3 zijn qua tijd ongeveer gelijk aan die van A2.

A3 1.

Aangenomen wordt dat het benodigde plaatstaal in de juiste vorm van de walserij wordt aangevoerd. Omdat dit laswerk voor een groot deel met de hand zal worden gedaan, kan aan twee linerdelen gelijktijdig worden gewerkt. De geschatte lengte lasnaad per bevestigingspunt is 40 meter. Gelast wordt in 5 lagen en het aantal lasuren per m^2 is 0,12. Totaal aantal manuren: $40*5*0,12 = 24$. Dit is 3 mndgn. Deze tijd is ook aangehouden voor het aantal npdgn maar kan indien gewenst worden verkort door de inzet van meer lassers.

A3 a.

Omdat dit wapeningsnet in drie delen wordt gemaakt kunnen drie ploegen van vier man worden ingezet. De lengte van $1/3$ wapeningsnet is $4/3$ meter. Over een

half wapeningsnet van 1,75 meter werd door een ploeg van 4 man 3,5 dagen gevlochten. Over $1/3$ wapeningsnet van 4 meter dus $4/3 * 3,5 / 1,75 = 2,7 \simeq 3$ dagen.

A3 b.

In feite moet hier dezelfde handeling 2 keer worden verricht in plaats van één keer. De benodigde tijdsduur verdubbelt hierdoor globaal, dus wordt 1 npdg.

A3 g.

Het storten kan in één npdg ook worden voltooid voor een ring van 4 meter als $17,5 \text{ m}^3$ per uur kan worden verwerkt.

B1 a.

Uit een zeer globale berekening volgt dat voor 3,5 meter binnenwerk 1,5 ton wapeningsstaal nodig is. Stel de gemiddelde diameter op 16 mm dan is de verwerkings-tijd per ton staal 25 manuren. Dit wordt dus $1,5 * 25 = 37,5$ manuren.

Per tunnelsegment is dat $\frac{48}{3,5} * 37,5 = 514$ manuren = 64,25 mndgn en per jaar $12 * 64,25 = 770$ mndgn. De ploeg vlechters moet bij 200 werkbare werkdagen per jaar bestaan uit $770 : 200 = 3,85$ is 4 man. Dat zijn twee ploegen van twee man. Deze kunnen beide aan een half wapeningsnet werken.

De benodigde tijdsduur is dan $\frac{37,5}{8 * 4} = 1,2$ npdgn $\simeq 1,5$ npdgn.

B1 b.

Hijzen, op juiste plaats brengen en lassen tesamen 0,5 npdg.

B1 d.

Het totale oppervlak aan prefab bekisting is groter dan dat voor de binnenzijde van de ring vandaar de langere duur. Deze duur varieert echter niet rechtevenredig met het oppervlak, maar ook met de vorm en de voorbereidings-tijd. Genomen is 2 npdgn.

B1 e.

Hoewel het hier slechts 63 m^3 beton betreft zal voor het storten toch één npdg in rekening worden gebracht omdat de wanden relatief dun zijn.

Omdat bij de hoofdactiviteit B2 de ruimte voor de kop-schotten in mindering moeten worden gebracht, wordt hier slechts twee meter binnenwerk voor gemaakt.

De activiteiten b, e, f en g blijven ongewijzigd.

B2 a.

Voor het vlechtwerk van 2 meter is nodig $\frac{2}{3,5} * 5 \text{ mndgn}$ = $2,9 \text{ mndgn} \approx 3 \text{ mndgn}$. Met een ploeg van twee vlechters $1,5 \text{ npdg}$.

B2 c.

Hier wordt met een kleinere en dus beter te hanteren bekisting gewerkt, de tijdsduur zal dus iets afnemen tot $1,5 \text{ npdg}$.

B2 d.

Omdat er slechts $\frac{2}{3,5} * 63 \text{ m}^3$ beton hoeft te worden gestort gaan we ervan uit dat dit werk in $0,5 \text{ npdg}$ kan worden voltooid.

Bij de hoofdactiviteit B3 moet 4 meter binnenwerk worden gemaakt. Sommige activiteiten zullen daarom wat meer tijd in beslag nemen.

De deelactiviteiten c, d, e, f, g en h zijn nagenoeg ongewijzigd.

B3 a.

Er moeten 3 wapeningsnetten van $4/3$ meter gevlochten worden. De vlechtijd aan één net is $\frac{4}{3,5} * 37,5 * 1/3 = 14,3 \text{ manuren}$. Er wordt gevlecht in ploegen van twee mensen. Met één net is één ploeg $0,9 \approx 1 \text{ mndg bezig}$. Een van de ploegen (er zijn immers twee ploegen) moet twee netten vlechten. Dit betekent dus $2 \text{ mndgn} = 2 \text{ npdgn}$.

B3 b.

Het aan elkaar lassen moet twee keer gebeuren en duurt globaal dus $2 * \text{zo lang is } 1 \text{ npdg.}$

C a + b.

Dit is inclusief het transport van de plaats waar de verharding plaatsvindt naar de kantelinstallatie, het kantelen zelf en het uit de kantelinstallatie schuiven.

C c.

Hierbij hoort het opvijzelen van het binnenwerk wat nodig is om het binnenwerk op de gewenste hoogte te krijgen vóór de ring.

C d.

Het totale oppervlak van de ringdoorsnede (het binnenwerk wordt niet gelijmd) is 31 m^2 . Er zijn twee in te smeren vlakken dus in het totaal moet er $2 * 31 = 62 \text{ m}^2$ worden ingesmeerd. Stel dat de snelheid $0,2$ manuren per m^2 is dan duurt deze activiteit $62 * 0,2 = 6,2$ manuren. Omdat de epoxyhars direct gaat verharden worden hiervoor drie mensen ingezet zodat deze activiteit in 2 uur is voltooid. Daarna kunnen de ringen met een lichte kracht tegen elkaar worden gedrukt ($0,2 \text{ N/mm}^2$).

C e.

De omtrek van de tunnel is 45 meter, worden de liners in vijf lagen aan elkaar gelast dan is dit $45 * 5 = 225$ meter las. Met de machine duurt dit $225 * 0,06 = 13,5$ manuren. Per segment moeten er 13 naden aan elkaar worden gelast. Per jaar 12 segmenten. Dit geeft $12 * 13 * 13,5 / 8 = 263 \text{ mndgn} = \text{lasdagen voor de machine}$. Dit betekent dat er meer dan 8 uren per dag gelast moet worden of er moet een extra lasmachine worden ingezet. Het aantal npdgn bedraagt immers maar 200 .

Het aantal mndgn per las mag dus maar $\frac{200}{13 * 12} = 1,3 \text{ npdgn}$ bedragen afgerond $1,5 \text{ npdg.}$

C f.

In een later stadium kan het binnenwerk van de verschillende ringen aan elkaar worden gestort. Daar dit in deze fase te veel tijd in beslag zou nemen (verhardingsduur etc.) wordt het binnenwerk alleen plaatsvast gemaakt om tijdens het transport niet te verschuiven.

D a.

Dit is inclusief het opstellen van de apparatuur. Het gaat om niet al te hoge krachten en niet veel strengen. Het aantal kanalen bedraagt 12. Een tijdsduur van 2 npdgn is hiervoor genomen.

D c.

Deze balasttanks hoeven alleen maar bevestigd te worden. Gezien de grote doorsnede per m' tunnel (28 m^2) is hier toch 2 npdgn voor uitgetrokken.

D d.

De kopschotten worden opgebouwd uit elementen. Omdat aan twee zijden gelijktijdig kan worden gewerkt is hiervoor drie npdgn uitgetrokken. Dit is inclusief het dichtkitten van de naden.

D e.

De beschermende laag op de liner ter plaatse van de lasnaden moet nog worden aangebracht. Deze beschermende laag is opgebouwd uit drie lagen. Met het oog op de tijd die nodig is voor drogen is hiervoor 3 npdgn genomen.

D f.

Per tunnelsegment moet een Gina-profiel worden aangebracht. De lengte hiervan is ongeveer 45 meter. Inclusief het boren van de gaten in de flenzen van het Gina-profiel is hiervoor een tijd van 2 npdgn gereserveerd.

D g.

Deze tijd is nodig om te bepalen met hoeveel productievormen er gewerkt moet worden. Voor het geheel is 3 npdgn genomen.

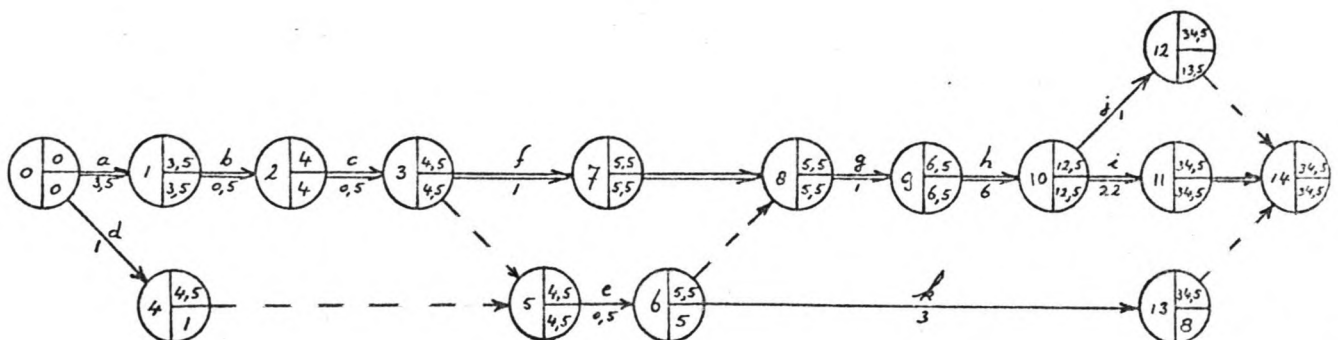
5.4 Netwerkplanning van de hoofdactiviteiten.

Van de deelactiviteiten die in paragraaf 5.2 voor iedere hoofdactiviteit zijn opgesomd zal in deze paragraaf een netwerkplanning worden gegeven. Alvorens hiertoe over te gaan zullen eerst de deelactiviteiten in tabelvorm worden weergegeven met vermelding van de relatie tot andere deelactiviteiten.

5.4.1. Bouw van de omhullende ringen.

A1: Bouwen van de omhullende standaard ring.

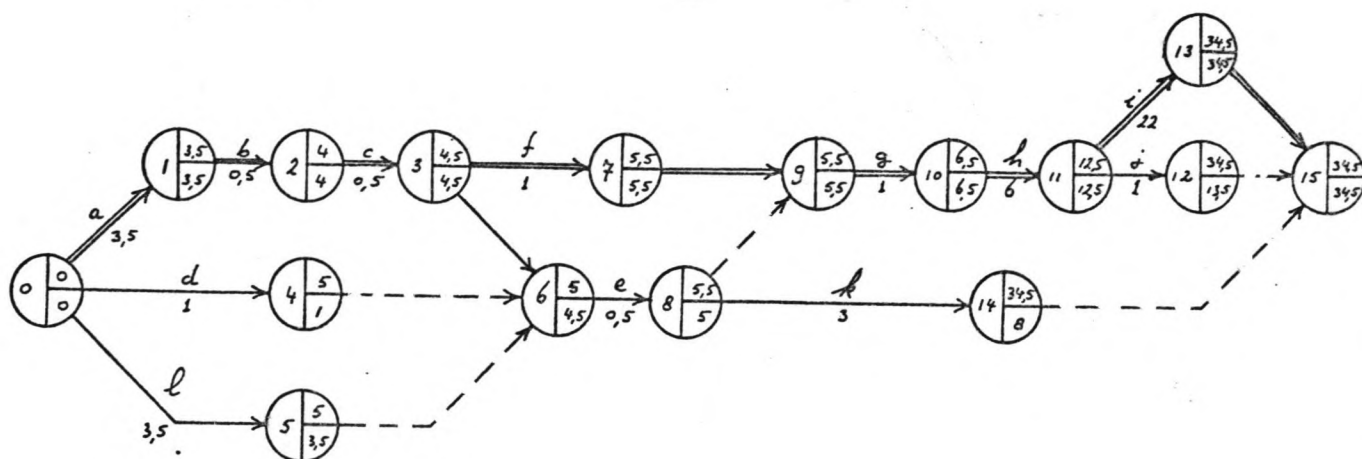
Activiteit	Tijd in npdgn.	relatie tot andere activiteiten	
		voor	na
a Vlechten wapeningsnetten	3,5	b	
b Aan elkaar lassen netten	0,5	c	a
c Plaatsen wapeningsnetten	0,5	e,f	b
d Stiften in linerdelen	1	e	e
e Plaatsen en lassen liner	0,5	k,g	c,d
f Stellen binnenbekisting	1	g	c
g Storten beton	1	h	f,e
h Verharden tot ontkisting	6	i,j	g
i Resterende verharding	22		h
j Verwijderen bekisting	1		h
k Aanbrengen bescherm laag	3		e



A2: Bouwen van de omhullende kopse ring.

Activiteit	Tijd in npdgn.	relatie tot an- dere activiteiten	
		voor	na
a Vlechten wapeningsnetten	3,5	b	
b Aan elkaar lassen netten	0,5	c	a
c Plaatsen wapeningsnetten	0,5	e,f	b
d Stiften in linerdelen	1	e	
e Plaatsen en lassen liner	0,5	k,g	c,d,l
f Stellen binnenbekisting	1	g	c
g Storten beton	1	h	e,f
h Verharden tot ontkisting	6	i,j	g
i Resterende verharding	22		h
j Verwijderen bekisting	1		h
k Aanbrengen beschermlaag	3		e
l Lassen kopse plaat liner	3,5	e	

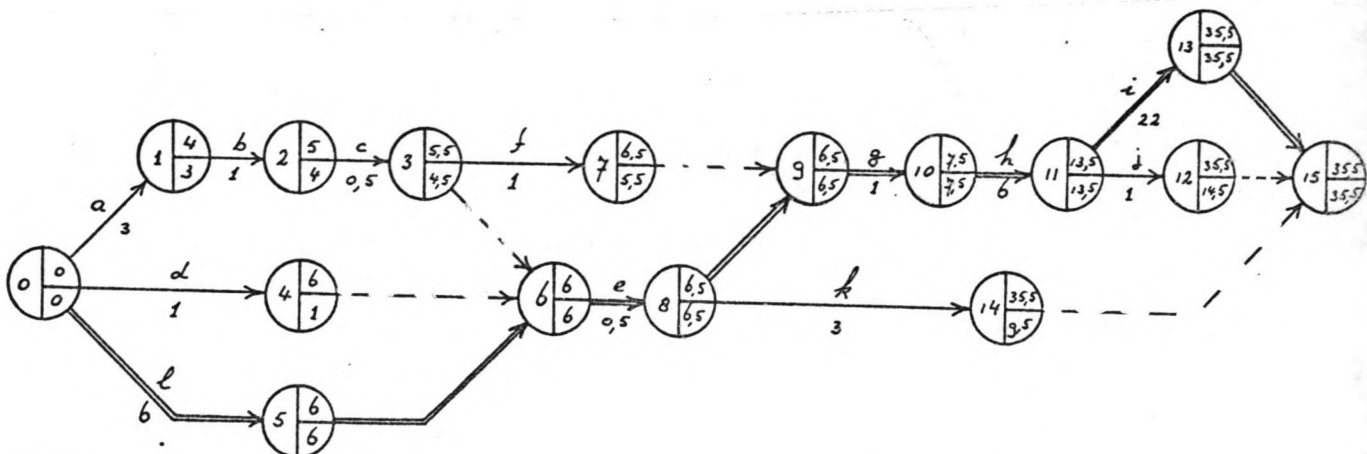
Aan de activiteiten is er één toegevoegd ten opzichte van A1, namelijk het lassen van de kopse plaat op de liner. De tijdsduur van alle andere activiteiten is ongewijzigd.



A3: Bouwen van de omhullende verankeringsring.

Activiteit	Tijd in npdgn.	relatie tot an- dere activiteiten	
		voor	na
a Vlechten wapeningsnetten	3	b	
b Aan elkaar lassen netten	1	c	a
c Plaatsen wapeningsnetten	0,5	e,f	b
d Stiften in linerdelen	1	e	
e Plaatsen en lassen liner	0,5	g,k	c,d,l
f Stellen binnenbekisting	1	g	c
g Storten beton	1	h	e,f
h Verharden tot ontkisting	6	i,j	g
i Resterende verharding	22		h
j Verwijderen bekisting	1		h
k Aanbrengen bescherm laag	3		e
l Lassen constructie voor bevestiging ankerkabels	6	e	

Naast één extra activiteit ten opzichte van A1 zijn hier ook een aantal veranderingen te zien in de tijden.



5.4.2. Bouwen van het binnenwerk.

B1: Bouwen binnenwerk standaard ring

Activiteit	Tijd in npdgn.	relatie tot an- dere activiteiten	
		voor	na
a Vlechten wapeningsnetten	1,5	b	
b Aan elkaar lassen netten	0,5	c	a
c Plaatsen wapeningsnetten	0,5	d	b
d Stellen bekisting	2	e	c
e Storten beton	1	f	d
f Verharden tot ontkisting	6	g,h	e
g Resterende verharding	22		f
h Verwijderen bekisting	1		f

B2: Bouwen binnenwerk kopse ring.

Activiteit	Tijd in npdgn.	relatie tot an- dere activiteiten	
		voor	na
a Vlechten wapeningsnetten	1,5	b	
b Plaatsen wapeningsnetten	0,5	c	a
c Stellen bekisting	1,5	d	b
d Storten beton	0,5	e	c
e Verharden tot ontkisting	6	f,g	d
f Resterende verharding	22		e
g Verwijderen bekisting	1		e

Doordat we bij B2 één wapeningsnet van slechts 1 meter behoeven te vlechten valt hier de activiteit waarin de wapeningsnetten aan elkaar worden gelast uit.

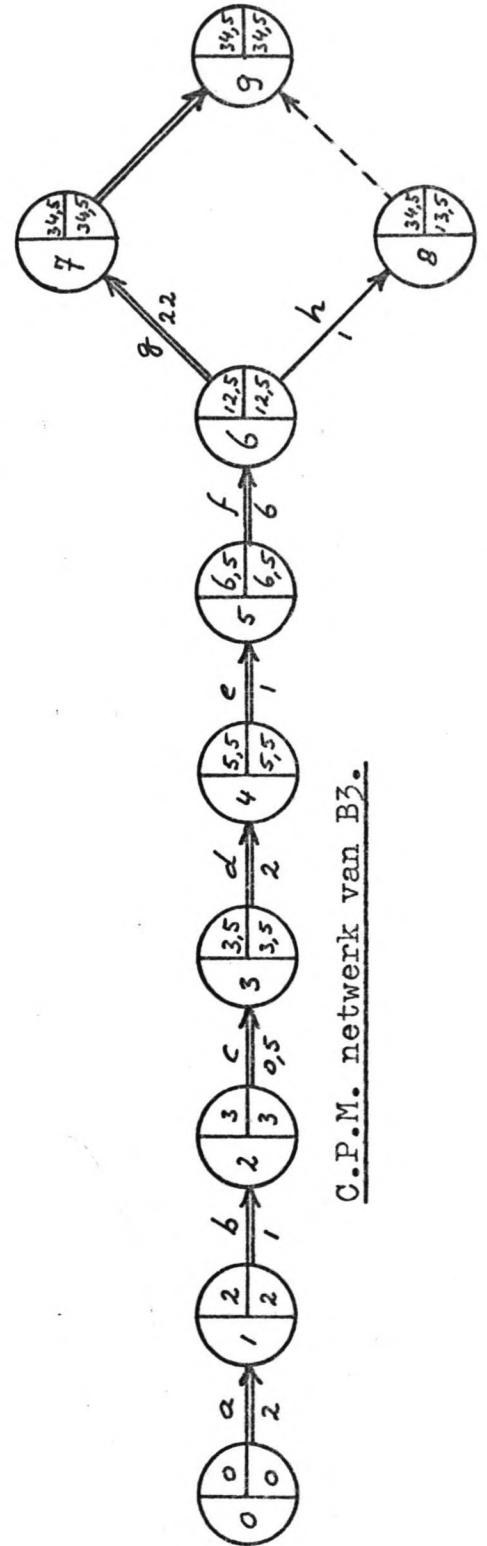
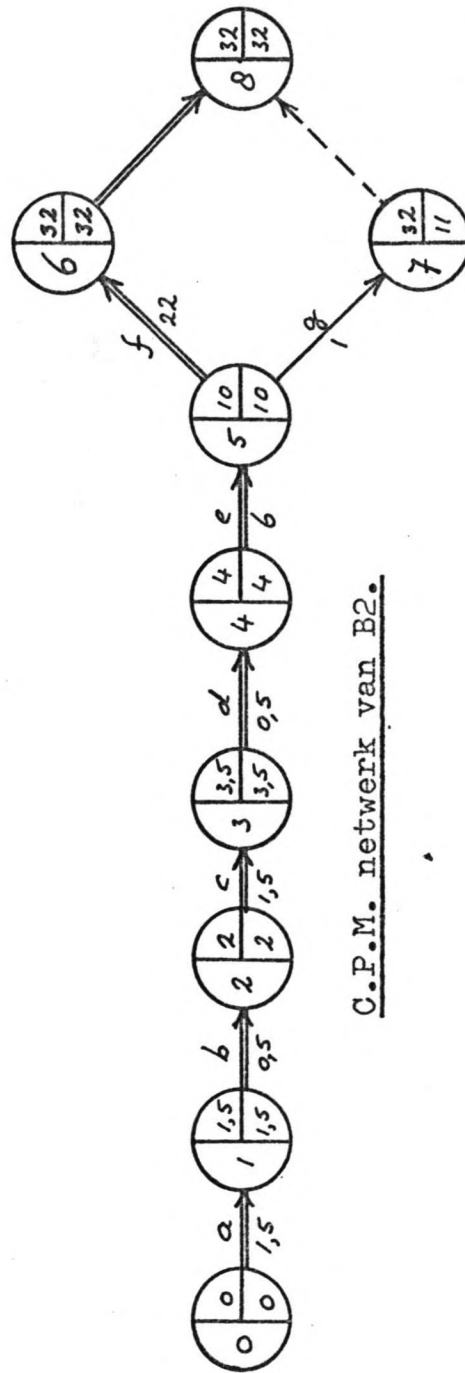
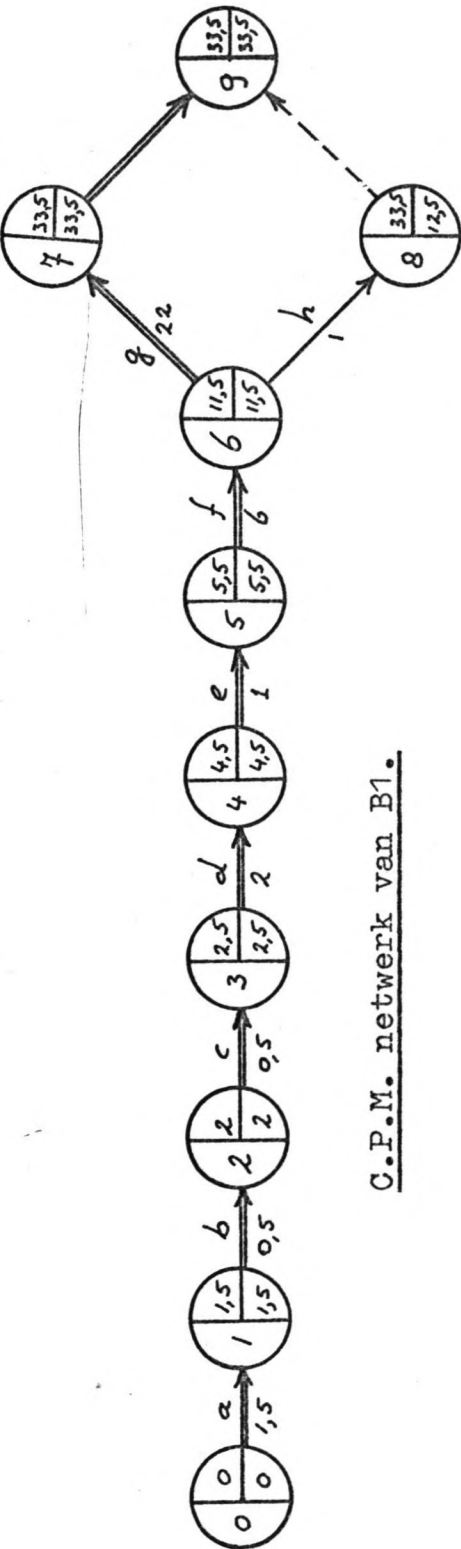
Door de kleinere lengte van het binnenwerk zullen een aantal tijden voor dezelfde activiteit ook be-
duidend korter zijn.

B3: Bouwen binnenwerk verankeringsring

Activiteit	Tijd in npdgn.	relatie tot an- dere activiteiten	
		voor	na
a Vlechten wapeningsnetten	2	b	
b Aan elkaar lassen netten	1	c	a
c Plaatsen wapeningsnetten	0,5	d	b
d Stellen bekisting	2	e	c
e Storten beton	1	f	d
f Verharden tot ontkisting	6	g,h	e
g Resterende verharding	22		f
h Verwijderen bekisting	1		f

In B3 worden weer dezelfde deelactiviteiten verricht als in B1. Door de iets grotere lengte van de veran-
keringsringen zal het wapeningsnet echter opgebouwd
zijn uit drie delen in plaats van twee. Het vlechten
en aan elkaar lassen van de netten zal dus iets meer
tijd in beslag nemen.

Op de volgende bladzijde zijn de C.P.M.netwerken van
de activiteiten B1, B2 en B3 gegeven.

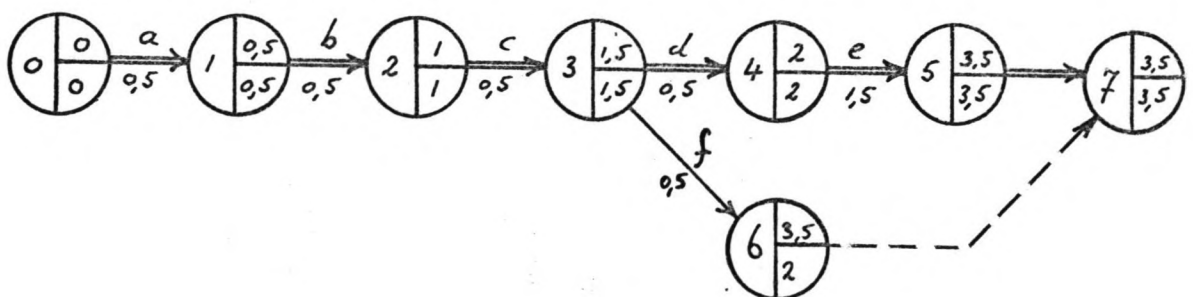


5.4.3. Assembleren van de ringen.

Activiteit	Tijd in npdgn.	relatie tot an- dere activiteiten	
		voor	na
a Vervoer, kantelen, draaien omhullende ring	0,5	b	
b Vervoer, kantelen binnenwerk	0,5	c	a
c Plaatsen binnenwerk in ring	0,5	d,f	b
d Aanbrengen epoxyhars op voe- gen en aandrukken	0,5	e	c
e Aan elkaar lassen liners	1,5		d
f Vastklemmen binnenwerk	0,5		c

Het aantal malen dat een omhullende ring of het bin-
nenwerk gekanteld wordt is 14 per tunnelsegment. Het
lijmen en vastlassen gebeurt slechts 13 maal.

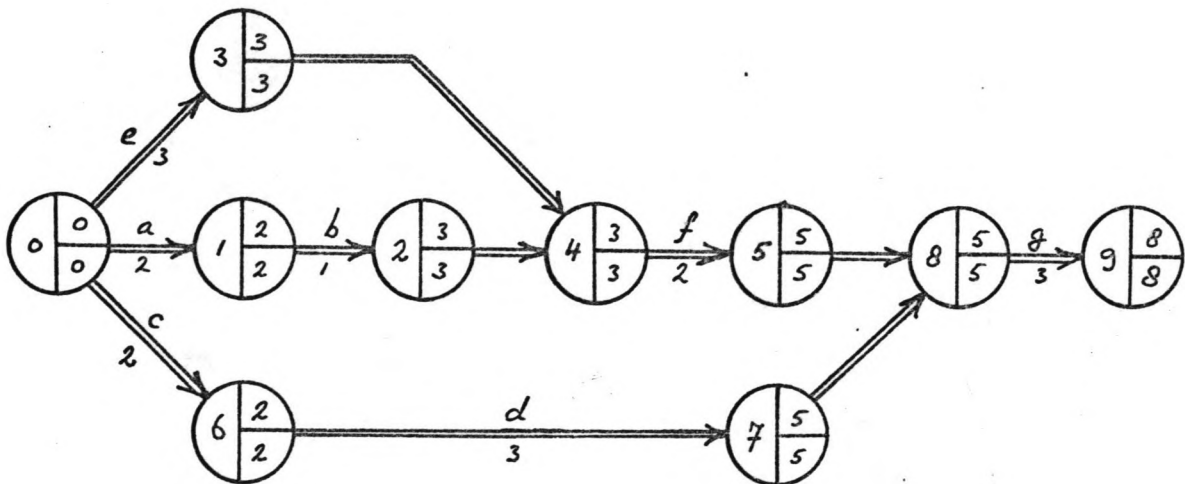
Het C.P.M. netwerk is hieronder gegeven.



5.4.4. Het afwerken van een segment.

Activiteit	Tijd in npdgn.	relatie tot an- dere activiteiten	
		voor	na
a Richten en voorspannen	2	b	
b Volgrouten kanalen	1	f	a
c Aanbrengen ballasttanks	2	d	
d Monteren kopschotten	3	g	c
e Beschermklaag op lasnaden	3	f	
f Aanbrengen Gina-profiel	2	g	e, b
g Skidden, varen, afzinken tunnelsegment	3		d, f

Het C.P.M. netwerk is hieronder gegeven.



5.5 Afstemming van de hoofdactiviteiten op elkaar.

Bij de bouw van de ringen hebben we in feite te maken met seriebouw. De ringen zijn weliswaar niet allen identiek, maar de activiteiten die verricht moeten worden zijn op een enkele na dezelfde.

We onderscheiden zoals reeds in paragraaf 5.1 ter sprake is gekomen drie type ringen. De kopse ring, de ring waarvan de verankeringskabels bevestigd moeten worden en tot slot de standaardring.

Voor de bouw van het binnenwerk is er slechts een verschil in lengte tussen de drie typen. Bij de bouw van de omhullende ring zijn er behalve dit lengteverschil ook nog laswerkzaamheden te verrichten. Zo moet aan de kopse kanten van een tunnelsegment een staalplaat worden gelast die het mogelijk maakt in combinatie met een Gina-profiel een waterdichte afsluiting te vormen. Bij de ringen waarvan de verankeringskabels worden bevestigd moeten bevestigingsconstructies worden gelast.

Een goede afstemming van de bouw is bereikt als de complete ringen (dus zowel omhullende ring als binnenwerk) in de goede volgorde beschikbaar komen. Deze juiste volgorde is:

- 1 kopse ring
- 2 standaardringen
- 1 verankeringsring
- 6 standaardringen
- 1 verankeringsring
- 2 standaardringen
- 1 kopse ring

Willen we dit bereiken dan moet aan drie punten zijn voldaan:

- 1 Goede afstemming van de bouw van de omhullende ringen onderling.

- 2 Goede afstemming van de bouw van de binnenwerken onderling.

- 3 Goede afstemming van het gereedkomen van de omhullende ring en het erbij horende binnenwerk.

Als deze afstemming is bereikt kan direct worden doorge-
werkt. Hierop aansluitend kan met het kantelen, draaien en
aan elkaar lijmen en lassen van de ringen worden begonnen.
Nadat de laatste ring is vastgelijmd en gelast kan met de
afwerking worden begonnen. De laatste stap is het te water
laten van het tunnelsegment.

In de onderstaande tabellen zijn de deelactiviteiten nog-
maals weergegeven. Nu zijn echter de totaaltijden gegeven
voor de diverse type ringen. Deze tabellen kunnen worden
gebruikt bij het maken van een balkendiagram van de
bouw van één tunnelsegment.

Voor de relatie tussen de verschillende deelactiviteiten
wordt verwezen naar de tabellen van paragraaf 5.4.

A Bouwen van de omhullende ringen.

- 1 standaardring
- 2 kopse ring
- 3 verankeringsring

Code	Soort activiteit	1	2	3	totaaltijd
1	Vlechten wapeningsnetten ring	1,15	1,15	1,3	16,4 npdgn.
2	Aan elkaar lassen netten	0,5	0,5	1	8 npdgn.
3	Plaatsen wapeningsnetten	0,5	0,5	0,5	7 npdgn.
4	Aanbrengen stiften in liner	1	1	1	14 npdgn.
5	Plaatsen en lassen linerdelen	0,5	0,5	0,5	7 npdgn.
6	Stellen binnenbekisting	1	1	1	14 npdgn.
7	Storten beton	1	1	1	14 npdgn.
8	Verharden tot ontkisting	6	6	6	-
9	Verwijderen bekisting	1	1	1	14 npdgn.
10	Resterende verharding	22	22	22	-
11	Aanbrengen beschermlaag liner	3	3	3	-
12	Lassen kopse afdekplaat	-	3,5	-	7 npdgn.
13	Lassen verankeringsbevestiging	-	-	6	12 npdgn.

B Bouwen van de binnenwerken.

1 standaardring

2 kopse ring

3 verankeringsring

Code	Soort activiteit	1	2	3	totaaltijd
14	Vlechten wapening binnenwerk	1,17	0,84	1,34	16,1 npdgn.
15	Aan elkaar lassen binnenwerk	0,5	-	1	7 npdgn.
16	Plaatsen wapeningsnetten	0,5	0,5	0,5	7 npdgn.
17	Stellen bekisting	1,5	1,5	2	22 npdgn.
18	Storten beton	1	0,5	1	13 npdgn.
19	Verharden tot ontkisting	6	6	6	-
20	Verwijderen bekisting	1	1	1	14 npdgn.
21	Resterende verharding	22	22	22	-

C Assembleren van de ringen.

Code	Soort activiteit	Per stuk	aantal	totaaltijd
22	Vervoeren, kantelen, draaien omhullende ring.	0,5	14	7 npdgn.
23	Vervoeren, kantelen binnenwerk	0,5	14	7 npdgn.
24	Plaatsen binnenwerk	0,5	14	7 npdgn.
25	Aanbrengen epoxyhars en aandrukken	0,5	13	6,5 npdgn.
26	Aan elkaar lassen liners	1,5	13	19,5 npdgn.
27	Vastklemmen binnenwerk	0,5	14	7 npdgn.

D Het afwerken van een tunnelsegment.

Code	Soort activiteit	Tijdsduur
28	Aanbrengen voorspankabels	2 npdgn.
29	Volgrouten voorspankanalen	1 npdg.
30	Aanbrengen ballasttanks	2 npdgn.
31	Monteren kopschotten	3 npdgn.
32	Beschermlaag op lasnaden	3 npdgn.
33	Aanbrengen Gina-profiel	2 npdgn.
34	Skidden, varen en afzinken tunnelsegment	3 npdgn.

Opmerkingen bij de tabellen.

Bij het verharden van het beton zijn geen totaaltijden gegeven. Dit omdat voor het normaal verharden geen arbeid nodig is. Er kunnen dus meerdere constructie-elementen gelijktijdig verharden zonder dat hiervoor de personeelsbezetting moet veranderen. De totaaltijd is dus niet het aantal*de verhardingstijd. De totaaltijd hangt af van de tijd tussen de stort van het eerste en laatste constructie-element.

Hetzelfde verschijnsel treedt op bij het aanbrengen van de bescherm laag. Hiervoor is drie dagen nodig omdat deze bescherm laag uit drie lagen bestaat te weten:

- 1 Grondlaag
- 2 Tussenlaag
- 3 Toplaag

Iedere laag zal nadat hij is aangebracht één dag moeten drogen. Er kunnen echter per dag meerdere liners met één laag bespoten worden. De totaaltijd kan daardoor aanzienlijk korter zijn dan het aantal*3 dagen.

Tot slot moet nog worden opgemerkt dat de gewenste productiesnelheid één tunnelsegment per maand was. Het vlechten van de wapeningsnetten is afgestemd op deze productiesnelheid. We zien dat hiervoor (met 200 werkbare dagen in één jaar) 16,5 npdgn. worden besteed per tunnelsegment. Totaaltijden die hoger liggen dan 16,5 npdgn. halen de gewenste productiesnelheid van één tunnelsegment per maand dus niet. Brengen we de productietijden van deze activiteiten niet terug tot 16,5 dagen dan zullen deze de bouwsnelheid gaan bepalen en leiden tot grote afstemverliezen.

De activiteiten 17 (het stellen van de bekisting van het binnenwerk) en 26 (het aan elkaar lassen van de liners) zijn twee activiteiten waarvoor meer dan 16,5 npdgn. nodig zijn. De middelen die ons ter beschikking staan om de productietijd terug te brengen tot 16,5 npdgn. zijn Het inzetten van meer personeel en extra materieel, zodat aan meerdere constructie-elementen gelijktijdig gewerkt kan worden.

In het balkendiagram van de bouw van een tunnelsegment is voor de activiteiten 17 en 26 de netto productietijd op 16,5 npdgn. gesteld, hierbij ervan uit gaande dat de productietijden zijn teruggebracht tot het gewenste aantal dagen.

Voor het balkendiagram wordt verwezen naar bijgevoegde tekening.

6. Inrichting bouwplaats.

Op de bouwplaats moet ruimte gereserveerd worden voor de volgende doeleinden en activiteiten:

- 1 Opslag van materiaal.
- 2 Fabricage van beton.
- 3 Voorbereiding van de linerdelen.
- 4 Vlechten van de wapeningsnetten.
- 5 Storten en verharderen van het beton.
- 6 Assembleren van de constructie-elementen.
- 7 Ruimte voor vervoer en transport.

1 Opslag van materiaal.

De beste plaats waar bouwmaterialen kunnen worden opgeslagen is in de nabijheid van de plaats waar ze gebruikt worden. Dit onder voorbehoud dat de opslag daar geen belemmering is voor een goed verloop van het bouwproces.

De hoeveelheid bouwmaterialen die we in voorraad moeten hebben hangt af van verschillende factoren, zoals de beschikbare grootte van het opslagterrein, de gewenste buffercapaciteit (bijvoorbeeld bij het uitvallen van een transport), de economisch meest aantrekkelijke hoeveelheid te transporteren materiaal, de kosten die gemaakt moeten worden voor de opslag, enzovoorts. Een maximale voorraad aan bouwmaterialen van twee maanden en een minimale van één maand lijkt daarbij in zoverre aantrekkelijk dat het benodigde opslagterrein niet al te groot wordt, een minimale buffer aanwezig is van één maand en de aangevoerde hoeveelheden per transport kunnen oplopen tot het verbruik van één maand.

Beton:

Hoeveelheid verwerkt beton in 2 maanden: 6000 m^3

Benodigde opslagruimte $\simeq 6000 \text{ m}^3$.

Oppervlakte: $100 * 50$ meter.

Stalen linerdelen:

Aantal derde linerdelen in 2 maanden bij tunnelsegment opgebouwd uit 14 ringen: $3*2*14 = 84$

Deze worden opgeslagen in 4 rijen van 21 linerdelen.

De afstand tussen de linerdelen is 1 meter.

Lengte rijen linerdelen is 20 meter.

Breedte linerdelen is 13 meter.

Oppervlakte: $60 * 30$ meter.

Wapeningsstaal:

Hoeveelheid wapeningsstaal/m' = $2,5 + 0,43 = 2,93$ ton.

Dit is ongeveer 300 ton per 2 maanden.

Aantal m³ staal $\simeq 40$ m³.

Lengte staven tot 20 meter.

Oppervlakte: $15 * 20$ meter.

2 Fabricage beton.

De betonfabriek kan zich in de nabijheid van het opgeslagen materiaal bevinden. Zowel betonfabriek als het opgeslagen materiaal behoeven echter niet op de bouwplaats te staan, maar kunnen zich ook in de directe omgeving bevinden. Het transport van de betonmortel over enkele honderden meters levert namelijk weinig problemen op.

3 Voorbereiding van de linerdelen.

Voordat de linerdelen gebruikt worden, moeten er verschillende laswerkzaamheden aan worden verricht. Zo zullen alle linerdelen van stiften moeten worden voorzien. Aan de linerdelen die aan de kopse kanten van een tunnelsegment komen te zitten moeten platen worden gelast en aan de verankeringsliners moeten bevestigingspunten voor de kabels worden gelast.

De benodigde tijdsduur is:

Lassen stiften	14 npdgn.
Lassen verankeringspunten	12 npdgn.
Lassen kopse platen	7 npdgn.
Totaal	33 npdgn.

Het aantal beschikbare npdgn. per tunnelsegment is 16,5.

Dat betekend dat er $33/16,5 = 2$ ruimtes voor de werkzaamheden aan de linerdelen moeten worden gereserveerd. Als oppervlakte

daarvoor wordt genomen $25 * 25$ meter per stuk. Dus $50 * 25$ in het totaal.

4 Vlechten wapeningsnetten.

Aangenomen wordt dat iedere vlechtploeg zijn eigen werkbanken en werkruimte heeft.

a Omhullende ring.

Aantal ploegen: 6

Oppervlakte per ploeg van 4 man: $20 * 20$ meter.

Totaal benodigde oppervlakte: $6 * 20 * 20 = 2400 \text{ m}^2$.

Dit oppervlak is eventueel te verkleinen door 4 ploegen van 6 man of 3 van 8 toe te passen.

b Binnenwerk.

Aantal ploegen: 2

Oppervlakte per ploeg: $20 * 20$ meter.

c Ruimte voor het aan elkaar lassen van wapeningsnetten.

De hiervoor benodigde ruimte is $20 * 20$ meter. Hier kan zowel het wapeningsnet van het binnenwerk als dat van de omhullende ring aan elkaar worden gelast.

5 Storten en verharden van het beton.

Vanaf het moment dat de wapeningsnetten op hun plaats worden neergezet, waar in een later stadium het storten, verharden en dergelijke plaats vindt, tot het moment dat het constructie-element naar de productievorm gaat neemt dit ruimte in op de bouwplaats.

De verblijftijd van zo'n constructie-element is uit het balkendiagram af te lezen.

Voor een omhullende ring is dit $34 - 3 = 31$ npdgn.

Voor het binnenwerk $34,5 - 2 = 32,5$ npdgn.

Iedere 16,5 npdgn. moeten er 14 omhullende ringen en 14 binnenwerken vrijkomen. Dit betekent dat op een moment minimaal $31 * 14 / 16,5 = 27$ omhullende ringen en $32,5 * 14 / 16,5 = 29$ binnenwerken aanwezig moeten zijn in verschillende

stadia van de bouw. Dit zijn in het totaal $27 + 29 = 56$ constructie-elementen.

Het is aanbevelenswaardig de ruimte voor het aantal constructie-elementen groter te nemen dan 56. Alle constructie-elementen van één tunnelsegment kunnen dan bij elkaar worden geplaatst. Na de bouw en assemblage van de constructie-elementen bestaat dan de mogelijkheid om de bouwplaats eerst schoon te maken en pas dan met de bouw van nieuwe constructie-elementen te starten.

6 Assembleren van de constructie-elementen.

De verblijftijd van het eerste gekantelde constructie-element in de productievorm is $61,5 - 34,5 = 27$ npdgn. De gemiddelde bouwtijd van één tunnelsegment is slechts 16,5 npdgn. Dit betekent dat er met $27/16,5$ is afgerond 2 productievormen gewerkt moet worden.

De benodigde ruimte voor een productievorm is minimaal het geprojecteerde vloeroppervlak van een tunnelsegment. We zullen echter een iets groter oppervlak nemen, van $60 * 25$ meter.

Voor de kantelinstallatie wordt een oppervlakte van $17 * 25$ meter genomen, direct achter de productievorm.

7 Ruimte voor vervoer en transport.

Voor het transport en vervoer van bouwmaterialen en materieel zal ook de nodige oppervlakte uitgespaard moeten worden. De grootte hiervan hangt echter af van de indeling van de bouwplaats.

Bovenstaande oppervlakten kunnen, nu de minimale grootte ervan vast ligt, worden gerangschikt over de bouwplaats. Een mogelijke rangschikking is hieronder gegeven. Hierbij is aangenomen dat er zich op de bouwplaats of de directe omgeving geen obstakels (zoals rotsen en dergelijke) bevinden die de indeling kunnen beïnvloeden.

We beginnen met de plaatsing van de twee productievormen. De plaats hiervan ligt in zoverre vast dat deze zich in de directe omgeving van de oever moeten bevinden. De afstand tussen de

plaats van assemblage en het ponton blijft dan beperkt. Vindt de assemblage plaats met de productievorm loodrecht op de kustlijn dan behoeft de kadeconstructie, die nodig is om de productievorm op het ponton te skidden, slechts 25 meter breed te zijn. Komt de productievorm evenwijdig aan de kustlijn te liggen dan moet de kadeconstructie wel 60 meter breed zijn. Het ligt dus voor de hand te kiezen voor een assemblage waarbij de productievorm loodrecht op de kustlijn staat.

Direct in het verlengde van de productievorm staat de kantelinstallatie. De afstand tussen de kantelinstallatie en de productievorm moet voldoende zijn om ook de laatste omhullende ringen en binnenwerken nog te kunnen kantelen en het binnenwerk in de omhullende ring te brengen.

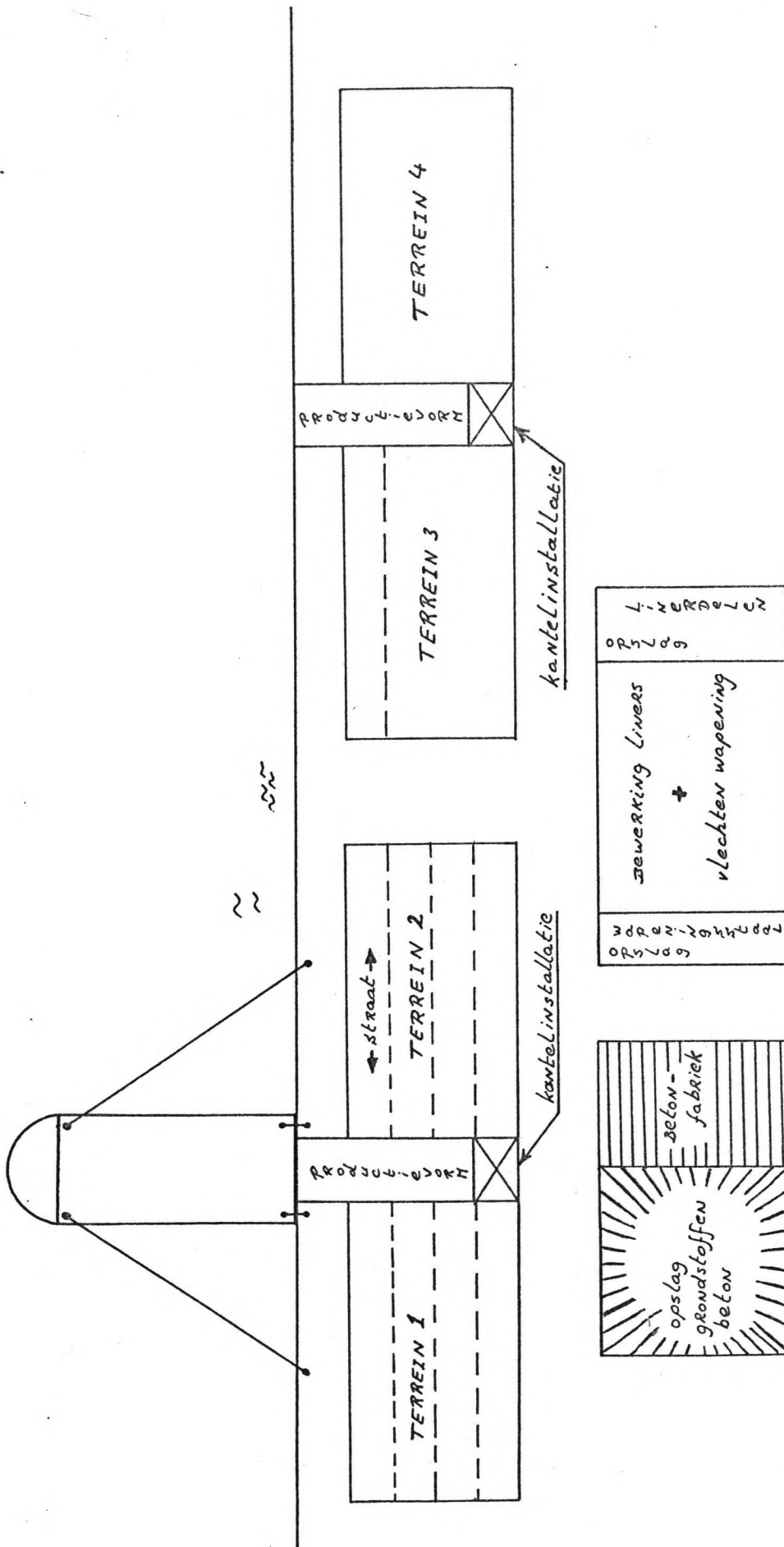
De omhullende ringen en binnenwerken kunnen we aan beide zijde van de productievorm in "straten" bouwen, storten en laten verharderen. Door de kantelinstallatie verplaatsbaar te maken in de richting loodrecht op de straten behoeft een te kantelen constructie-element slechts in een rechte lijn verplaatst te worden.

Over de lengte van de straten en het aantal straten naast elkaar bestaat een zekere mate van vrijheid. Bij de in figuur 27 getekende bouwplaats is gekozen voor 4 straten naast elkaar. In deze straten zijn alle omhullende ringen en binnenwerken van één tunnelsegment ondergebracht. Dit betekent dat zich in één straat 7 constructie-elementen bevinden. De lengte van een straat komt hierdoor op $7 \cdot 17 = 119$ meter te liggen.

Er is gekozen aan iedere zijde van de productievorm een serie straten te leggen. We krijgen dan in het totaal 4 series straten. Iedere serie bevindt zich in een ander stadium van de bouw. Zo kan zich de volgende situatie voordoen:

Op terrein 1 zijn we bezig constructie-elementen te bouwen.

Op terrein 2 worden de constructie-elementen naar de productievorm gebracht en geassembleerd.



Figuur 27: Mogelijke inrichting van de bouwplaats van tunnelsegmenten.

Terrein 3 ligt vol met constructie-elementen die liggen te verharden.

Terrein 4 is leeg en wordt schoongemaakt en voorbereid op de bouw van een nieuwe serie constructie-elementen.

De laswerkzaamheden en het vlechten kunnen het beste in het centrum van de bouwplaats plaats vinden. De weg die wapenings netten en linerdelen dan moeten afleggen naar hun plaats van bestemming blijft beperkt. De opgeslagen linerdelen en de wapeningsstaven bevinden zich in de nabijheid van de plaats waar de verwerking plaats vindt.

Samenvatting.

De Straat van Messina is gelegen tussen Sicilië en het vaste land van Italië. Door de extreme omgevingscondities is de bouw van een conventionele tunnel ter plaatse onmogelijk, terwijl de bouw van een brug op veel problemen zal stuiten. Daarom is in mijn afstudeerverslag de mogelijkheid van een zwevende tunnel ter plaatse onderzocht. Dit is een tunnel die tussen het wateroppervlak en de zeebodem is afgespannen aan een verankeringsstelsel.

De bouw van zo'n zwevende tunnel is opgesplitst te denken uit drie delen. In de eerste plaats zijn er de bouwactiviteiten op de oevers. Hieronder vallen de ventilatieschachten, maar ook de verbinding van het zwevende tunnelgedeelte met het bestaande auto- en spoorwegennet. Deze verbindingen zullen voor een deel uit tunnels bestaan en een deel bovengronds. Vervolgens moeten er in zee verankeringspunten worden gebouwd, waaraan later de verankeringskabels worden bevestigd die de tunnel verankeren. Het derde en laatste deel van de bouwactiviteiten is de bouw van de tunnelelementen voor het zwevende deel van de tunnel.

Het is verstandig alvorens met de bouw wordt begonnen een werkplan op te stellen voor de drie bouwactiviteiten. De gevolgen van genomen beslissingen worden dan zichtbaar. Vervolgens kunnen we deze drie bouwactiviteiten op elkaar afstemmen, zodat er geen verliezen in tijd en geld zijn, waar ze op elkaar moeten aansluiten.

Als de drie bouwactiviteiten globaal op elkaar zijn afgestemd kan nader worden ingegaan op de drie bouwactiviteiten afzonderlijk. Dat is alleen gedaan voor de bouw van de tunnelelementen voor het zwevende gedeelte van de tunnel. Eerst moet echter een bouwplaats voor de bouw van de tunnelelementen worden gevonden.

Na overweging van een vijftal alternatieven is besloten op de oever een bouwplaats in te richten. De voltooide tunnelelementen kunnen met behulp van hydraulische werktuigen (skidunit) op een ponton worden geschoven, dat het transport naar dieper water verzorgt. Daar kan het afzinken plaats vinden.

Een tunnelelement wordt opgebouwd uit 14 ringen. Iedere ring bestaat uit 2 delen: een omhullende ring en een binnenwerk. We onderscheiden 3 type ringen, namelijk de kopse-, de standaard- en de verankeringsringen. Voor ieder type ring is voor zowel het omhullende deel als het binnenwerk, na bepaling van de diverse deelactiviteiten, een netwerkplanning opgesteld. Dit is eveneens gedaan voor het assembleren van de constructie-elementen tot een tunnelelement en voor de afwerking van een tunnelelement.

Door de bouw van de constructie-elementen, de assemblage en de afwerking goed op elkaar af te stemmen, kunnen de afstemverliezen minimaal worden gehouden terwijl de benodigde ruimte op de bouwplaats beperkt blijft. Met dit en een gemiddelde productiesnelheid van één tunnelelement per maand als voorwaarden is een balkendiagram gemaakt voor de bouw van tunnelelementen. Van dit balkendiagram is gebruik gemaakt, omdat veel af te lezen is. Enige voorbeelden zijn:

- het aantal assemblage plaatsen
- het aantal productievormen
- de hoeveelheid bekisting
- het aantal constructie-elementen dat op de bouwplaats ligt te verharden

