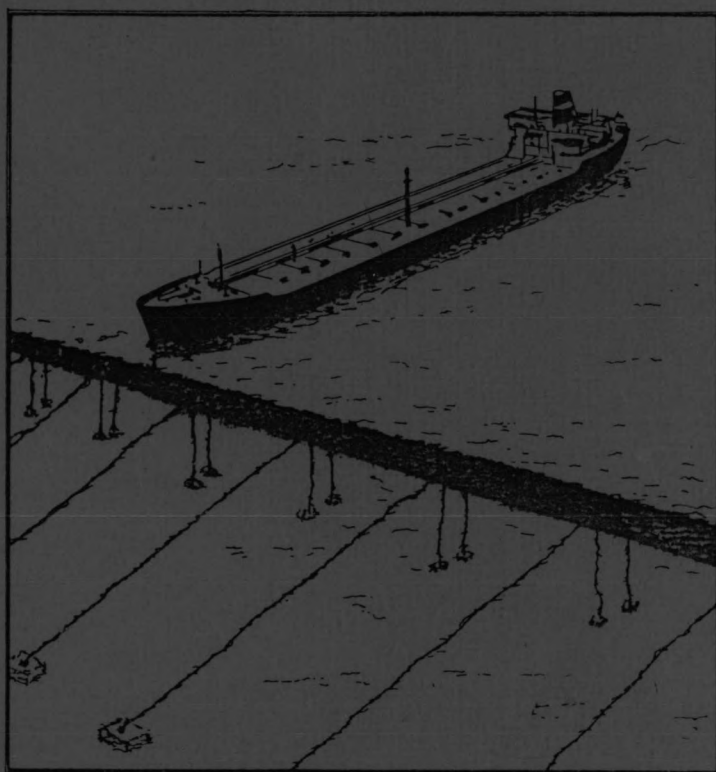


ZWEEVENDE TUNNEL in de STRAAT van MESSINA

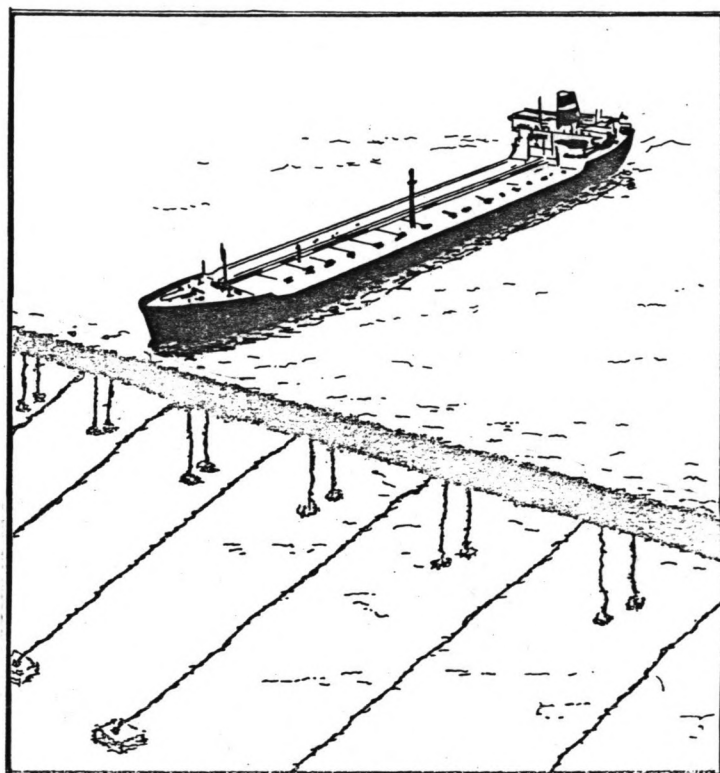
Hoofdontwerp deel I



TECHNISCHE HOGESCHOOL DELFT
AFDELING DER CIVIELE TECHNIEK
VAKGROEP WATERBOUWKUNDE

ZWEVENDE TUNNEL IN DE STRAAT VAN MESSINA.

HOOFDONTWERP:deel I.



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

Afstudeerhoogleraar: Prof. ir. A. Glerum
Afstudeerbegeleider: ir. J. Schippers

Inhoudsopgave.

	Bladzijde
1. Inleiding.	3
2. Keuze van het tunnelprofiel.	5
2.1 Factoren die vorm beïnvloeden.	5
1. Profiel van vrije ruimte.	5
2. Vluchtkoker.	10
3. Ventilatie.	11
4. Hydrostatische druk.	13
5. Geleiding van de waterstroming.	13
6. Montage en onderhoud.	15
7. Bescherming van de tunnel tegen lekkage.	15
8. Minimale wanddikte.	17
2.2 Overweging en keuze.	17
3. Keuze van het verankeringssysteem.	24
4. Krachten op de tunnel.	31
4.1 Opwaartse kracht.	31
4.2 Kracht ten gevolge van waterbeweging.	32
1. Getijbeweging.	32
2. Golfbeweging.	33
4.3 Eigen gewicht van de tunnel.	34
4.4 Verkeersbelasting.	36
4.5 Kabelkrachten van het verankeringssysteem.	38
5. Controle van de aangenomen wanddikte.	39
6. Berekening van de kabelkrachten en verplaatsingen.	46
6.1 Berekeningsmethode.	46
6.2 Stroonschema.	53
6.3 Programma + uitvoer in Algol 60.	58

Vervolg inhoudsopgave.

7. Optimaliseren van het verankeringsysteem.	59
7.1 Economische optimalisatie.	59
7.2 Minimaliseren van de verplaatsingen.	64
1. Inleiding.	64
2. Methode + stroomschema.	64
3. Resultaten.	70
4. Beschouwing van de kabelkrachten.	72
5. Conclusie.	73
6. Verschil tussen de werkelijke- en de aangenomen hoek (tussen verticale en schuine kabel).	75

Bijlagen:

Bijlage 1: Ventilatie.	80
Bijlage 2: Ideële elasticiteitsmodulus.	85
Bijlage 3: Kabelberekening.	90
Bijlage 4: Computerprogramma's in Algol 60.	

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.

Hoewel de Italiaanse overheid meerdere malen interessen heeft getoond in een vaste oeververbinding ter plaatse wordt de verbinding tussen beide oevers nog steeds onderhouden door veerdiensten. Het ziet er ook niet naar uit dat zo'n vaste oeververbinding er binnen afzienbare tijd zal komen. De extreme omstandigheden waaraan een oeververbinding ter plaatse wordt blootgesteld maken deze erg duur of zelfs technisch onuitvoerbaar.

Zelfs als we de minst diepe doorsnede nemen van de Straat van Messina dan zal de waterdiepte nog oplopen tot een maximum van 150 meter.

De waterstroming die opgewekt wordt door een dubbeldaags getij bereikt maximale waarden van 3,2 m/s in beide richtingen. De hoge stroomsnelheden zijn aanwezig over vrijwel de gehele diepte. Het stromingspatroon is ook zeer complex doordat de noord-zuid stroom en de zuid-noord stroom niet dezelfde weg volgen. Bovendien moet rekening worden gehouden met een ontwerp golf van 5 meter hoogte.

Vervolgens schuift Sicilië gemiddeld 0,02 meter per jaar van het vaste land van Italië af. Er zijn echter ook waarden gemeten van 0,1 meter per jaar. Ook wordt het gebied regelmatig getroffen door aardbevingen.

Tot slot komen er stormen voor waar de windsnelheden pieken vertonen van 180 km per uur.

Juist onder deze omstandigheden is het interessant om naast de conventionele oeververbindingen de mogelijkheid van een zwevende tunnel te onderzoeken. De levenskansen van dit alternatief stijgen doordat de conventionele oeververbindingen ook met veel problemen worden geconfronteerd.

In dit deel is vooral aandacht besteed aan het verankerings-systeem dat het mogelijk maakt om de krachten die op de tunnel werken aan de omgeving af te dragen. Bovendien moeten de verplaatsingen van de zwevende tunnel door dit verankerings-systeem binnen aanvaardbare grenzen worden gehouden.

Als eerste aanzet is in hoofdstuk 2 de vorm van de dwars-doorsnede van de tunnel bepaald. Dit stelt ons in staat in een later stadium de krachten te berekenen die op de tunnel werken.

In hoofdstuk 3 is aan de hand van een aantal eisen en op grond van economische en uitvoeringstechnische criteria uit verschillende verankeringsystemen een alternatief gekozen. Dit gekozen alternatief wordt nader uitgewerkt.

De op de tunnel werkende krachten worden overgedragen op het verankerings-systeem, dat op zijn beurt de krachten afdraagt aan de omgeving. De grootte en de variatie in de op de tunnel werkende krachten worden in hoofdstuk 4 nader onderzocht.

In hoofdstuk 5 wordt een globale controle uitgevoerd of de aangenomen wanddikte voldoet. Dit om te voorkomen dat we met een verkeerde wanddikte en dus een verkeerd eigen gewicht verder werken.

Vervolgens is in hoofdstuk 6 de berekeningsmethode besproken voor het berekenen van de kabelkrachten en de verplaatsingen. In het laatste hoofdstuk is tenslotte met behulp van de in hoofdstuk 6 afgeleide berekeningsmethode het verankerings-systeem geoptimaliseerd.

2. Keuze van het tunnelprofiel.

2.1 Factoren die de doorsnede beïnvloeden.

Onderstaande factoren bepalen in belangrijke mate de uiteindelijke vorm van het tunnelprofiel.

1. Profiel van vrije ruimte voor trein en auto.
2. Vluchtkoker.
3. Ventilatie ruimte.
4. Hydrostatische druk.
5. Geleiding van de waterstroming.
6. Montage en onderhoud.
7. Behoud van de tunnel bij lekkage.
8. Minimale wanddikte.

1. Profiel van vrije ruimte.

Het profiel van vrije ruimte is dat profiel dat nodig is voor het passeren van de voertuigen. In dit profiel mogen dus geen obstakels aanwezig zijn. Het moet zo groot zijn dat alle voertuigen waarvoor de tunnel ontworpen is hiervan gebruik kunnen maken.

a. Profiel van vrije ruimte voor de trein.

Het is de bedoeling dat de tunnel ook gebruikt gaat worden door goederentreinen. We moeten daarom het zogenaamde rode meetgebied als profiel van vrije ruimte nemen (zie figuur 1).

Omdat in een later stadium niets meer veranderd kan worden aan de tunnel wordt als hoogte 5660 mm genomen. De minimale breedte is 4500 mm.

Langs ieder spoor moet aan de rechterzijde daarvan (gezien in de normale rijrichting) een looppad aanwezig zijn. Omdat over dit spoor in twee richtingen wordt gereden nemen we twee looppaden. De looppaden moeten 50 mm boven de bovenkant van de spoorstaaf liggen en 800 mm breed zijn. Het profiel van vrije ruimte krijgt hierdoor de afmetingen die te zien

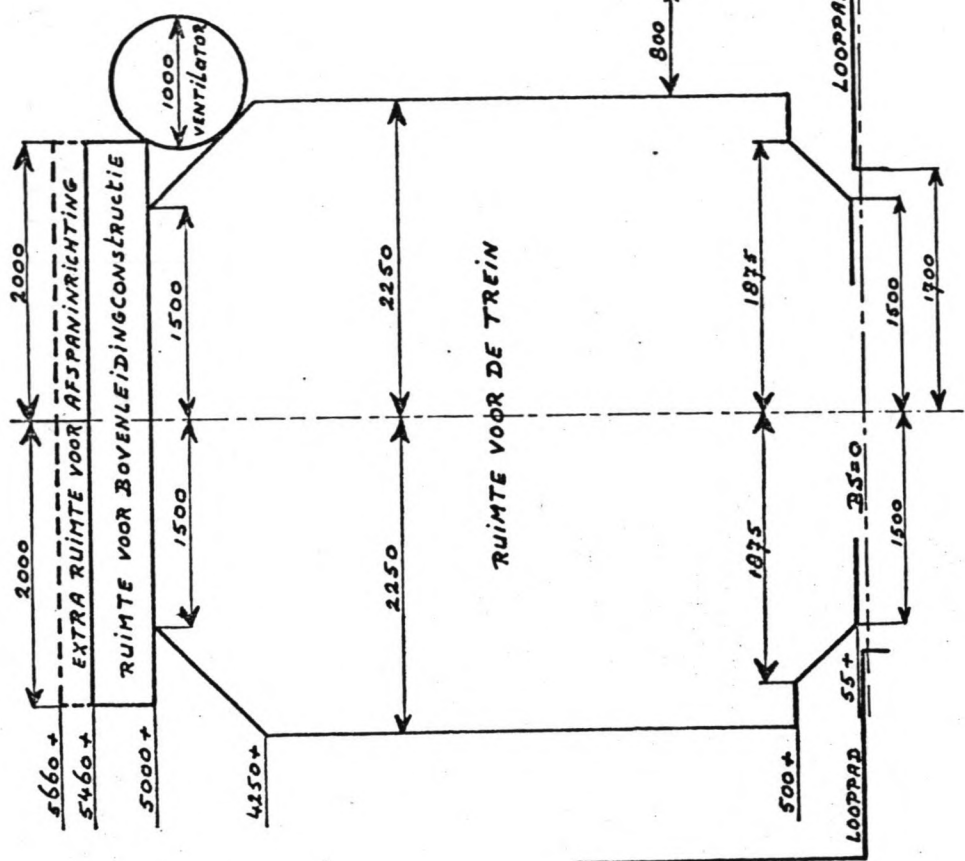


FIG2: BAANVAK IN TWEE RICHTINGEN BEREDEN
RECHTHOEKIGE TUNNELDOORSNEDEN
SPOOR ZONDER VERKANTING
BAANVAKSNELHEID V_{max} 130 KM/H
RODE MEETGEBIED VAN TOEPASSING

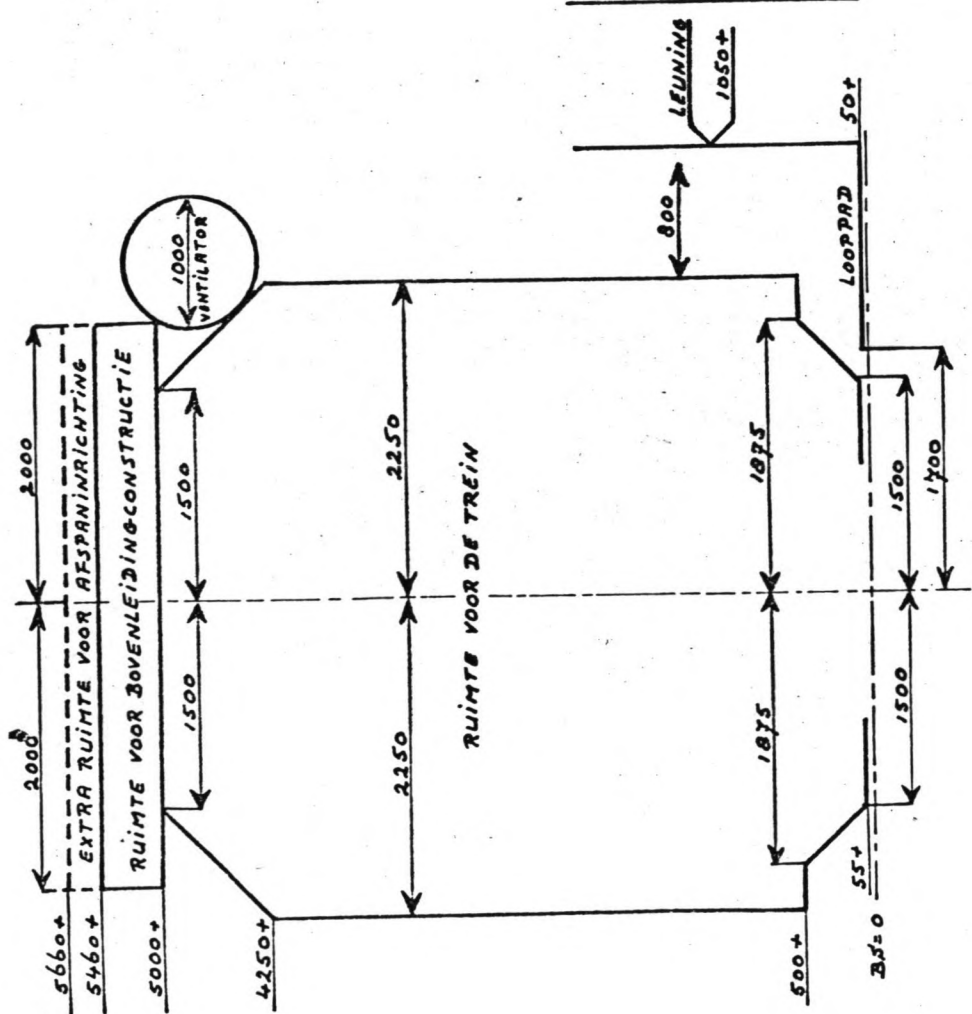


FIG 1 : BAANVAK IN EEN RICHTING BEREDEN

zijn in figuur 2.

In de tunnel hoeft geen ballastbed met dwarsliggers voor het spoor te worden toegepast mits op andere wijze is voorzien in de benodigde elasticiteit, demping en spoorbevestiging. In dit geval zal dan ook niet worden gekozen voor een ballastbed omdat de voordelen van zo'n ballastbed niet opwegen tegen de daaraan verbonden nadelen.

Als eerste nadeel wordt genoemd de constructiehoogte, die voor een ballastbed aanzienlijk hoger is dan voor een direkte bevestiging op de constructie.

Ten tweede is het gewicht van een ballastbed een aanzienlijke statische belasting waaraan men vast zit. Dit zou vooral in dit geval (van een zwevende tunnel) een belangrijk criteria kunnen zijn.

Ten derde zijn de onderhoudskosten van een ballastbed aanzienlijk hoger. Een ballastbed moet bovendien na verloop van tijd vervangen worden. Dit niet alleen omdat het is vervuild door stof, afval en het materiaal van de remblokken, maar ook omdat het ballastmateriaal zelf aan slijtage onderhevig is. Vervanging van het ballastbed zal ook de nodige problemen geven omdat we in het tunnelgedeelte slechts over een spoor beschikken.

Deze hiervoor genoemde nadelen wegen niet op tegen de voordelen van een ballastbed die hieronder worden opgesomd.

Het eerste voordeel is de lagere initiële kosten, deze worden echter terugbetaald door de hogere onderhoudskosten.

Ten tweede de korte aanlegtijd. In de rest van de tunnel zal echter ook nog het nodige werk moeten worden verricht, alvorens van de tunnel gebruik kan worden gemaakt. Bovendien kan met de aanleg van het spoor al direkt worden begonnen. Dus zo'n groot be-

zwaar is de langere bouwtijd van een direkt op de constructie bevestigd spoor niet.

Ten derde zal een spoor met een ballastbed de on-effenheden in de tunnel beter kunnen volgen en zijn er geen problemen bij de overgang kunstwerk - open baan te verwachten. Bij een direkte bevestiging zijn hier wel problemen te verwachten en moeten extra voorzieningen worden aangebracht.

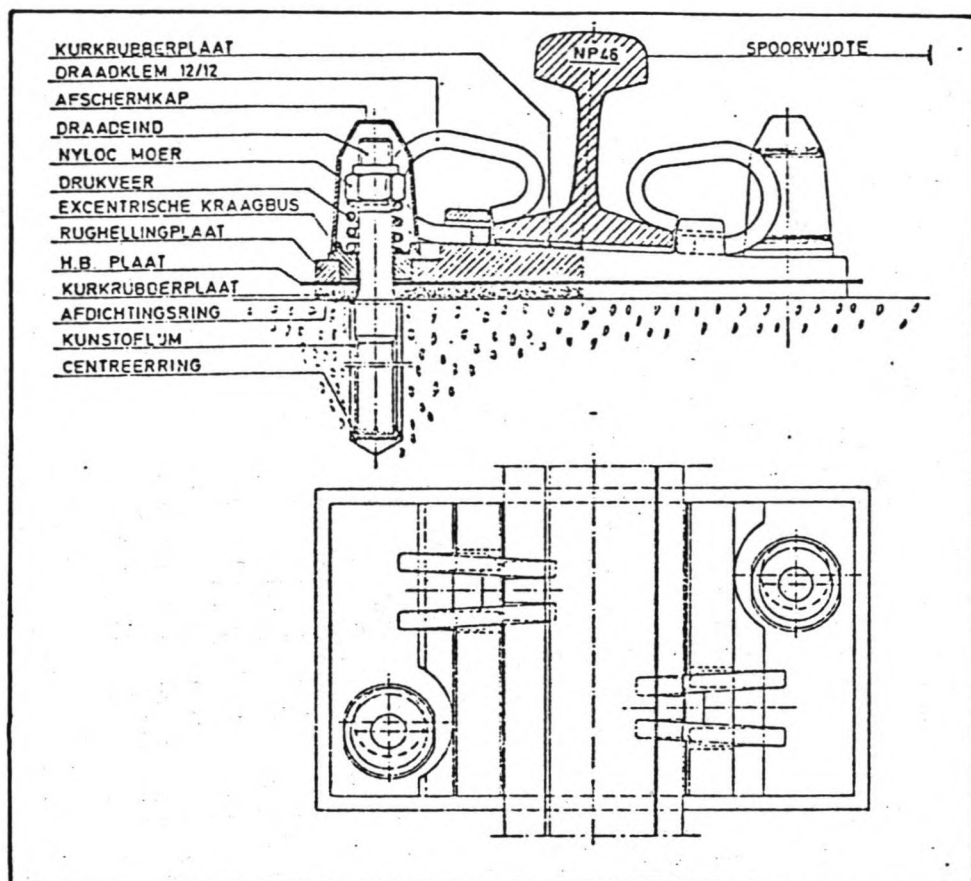
Als laatste zal een ballastbed lagere eisen stellen aan de maatvoering. Bij een direkte bevestiging daarentegen worden hier wel hoge eisen aan gesteld.

Het ligt op grond van bovenstaande overweging voor de hand te kiezen voor een direkte bevestiging op de constructie. De "Delftse" constructie is één van de mogelijkheden. Bij deze constructie op beton wordt een oplossing verkregen met behulp van de DE-bevestiging op de rughelling (zie figuur 3). De elasticiteit van een ballastbed wordt hier benaderd door toepassing van twee elastische lagen van kurkrubber en dubbele veren (DE-klemmen en schroefveren). Een verder kenmerk is de horizontale regelbaarheid van de bevestiging met behulp van excentrische kraagbussen.

b. Profiel van vrije ruimte voor de auto.

De autotunnel moet ruimte bieden aan twee rijstroken. De breedte van die stroken kan variëren van 3,00 tot 3,60 meter per strook. Maken we de breedte per strook groter als 3,60 meter dan kunnen auto's elkaar zelfs bij naderende tegenliggers gaan inhalen en in feite hierdoor een derde rijstrook gaan creëren. Om dit te voorkomen kiezen we voor bijvoorbeeld een breedte van 3,50 meter per strook. Dit is vrij groot, maar noodzakelijk omdat het verkeer in twee richtingen betreft. Het wegdek is onder een helling van 1:50 gelegd voor de afvoer van eventueel aanwezig water.

Tussen de twee rijstroken wordt een markering aange-

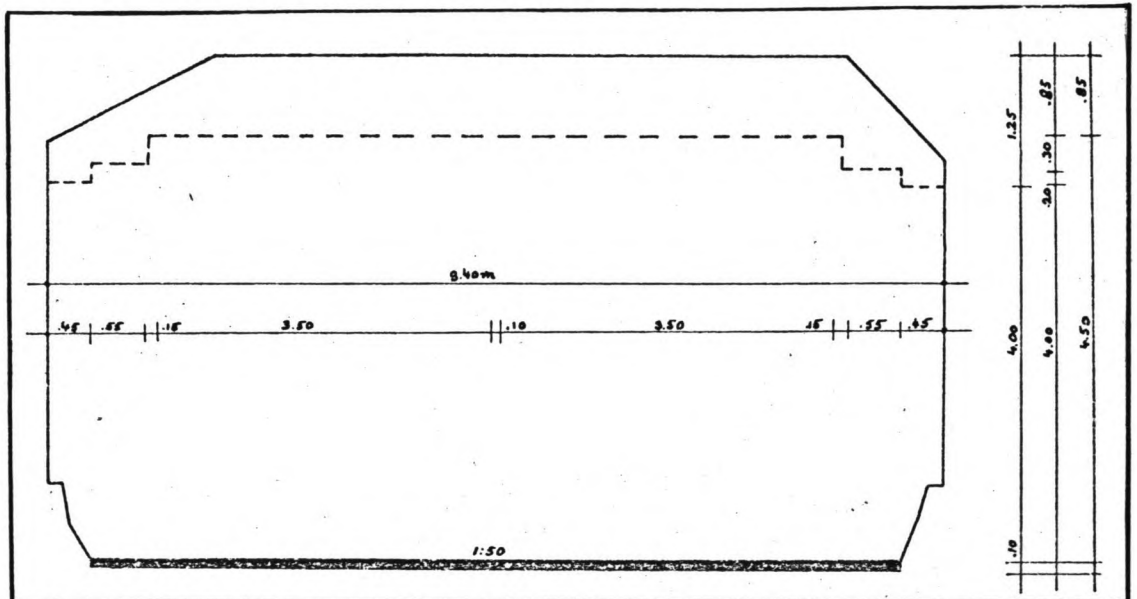


Figuur 3: Delftse constructie voor de directe bevestiging van de rail

bracht van 0,10 meter. Aan de zijkanten worden stroken aangebracht met een breedte van 0,55 meter. Deze stroken zorgen voor de "Lateral clearance" die enerzijds de bermvrees beperkt en anderzijds een loopruimte schept voor tunnelpersoneel en gestrande automobilisten. Deze stroken zijn van de rijstroken gescheiden door middel van 0,15 meter brede strepen voorzien van katteogen. Deze katteogen worden aangebracht om de automobilist te waarschuwen dat hij van de rijweg af raakt. Een tweede beveiliging voor de automobilist is de schuine

overgang van vloer naar wand. Deze moet voorkomen dat een auto of vrachtauto met zijn chassis tegen de tunnelwand botst. Eerst zullen de banden aanlopen tegen deze schuine overgang.

Als hoogte wordt 4,50 meter genomen. Hier komen we als volgt aan: de maximum afmetingen van de voertuigen zijn wettelijk vastgelegd in de wegenverkeerswet (ook internationaal). Hier is een hoogte van 4,00 meter aangenomen. We gaan er van uit dat de bovenkant 0,20 meter hoger kan komen door het veren. De resterende 0,30 meter is een veiligheid. Voor de uiteindelijke vorm van het profiel van vrije ruimte voor de auto's zie figuur 4.



Figuur 4: profiel van vrije ruimte volgens R.W.S.

2. Vluchtkoker.

Om de veiligheid van treinreizigers en automobilisten te verhogen moet er een vluchtkoker worden aangebracht. Hiervan kan gebruik worden gemaakt bij brand, hevige rookontwikkeling, ontsporing, aanrijdingen en andere calamiteiten. Deze vluchtkoker moet vanuit de treinkoker en vanuit de autokoker bereikbaar zijn. Tussen de kokers moeten scheidingswanden

worden aangebracht. Hierin moeten voldoende deuren zitten om de mensen toegang tot de vluchtkoker te verschaffen. We kunnen overwegen een tweede extra koker in het profiel op te nemen. Dit om hulpverleners snel de plaats van de ramp te laten bereiken.

3. Ventilatie.

a. Treinkoker.

Het ventilatieprobleem bij de treinkoker is veel gecompliceerder dan bij de koker voor autoverkeer. Bij deze laatste is de configuratie eenvoudig en de stroming kan als stationair beschouwd worden; is dus met elementaire methodes te behandelen. Ook de staat van eisen is eenvoudig; voldoende lage concentraties van CO, rook en stof, thermische problemen zijn niet aanwezig.

Naast de door kunstmatige ventilatie opgewekte luchtstroom is er bij spoorwegtunnels een door de trein zelf opgewekte luchtstroom. Deze luchtstroom is in wezen een niet stationaire stroming door een buis met discontinuïteiten (ingang, uitgang en eventuele zijdelings aangebrachte ventilatiekanalen). Voor de juiste berekening van de luchtstroom door de tunnel zou dus moeten worden uitgegaan van een instationaire stroming in een compressibel medium. Dit valt buiten het bestek van dit afstudeeronderwerp.

Behalve de eis van voldoende lage concentraties van CO, rook en stof speelt bij spoorwegtunnels ook een thermische eis, namelijk hoe houden we de temperatuur voldoende laag. Dit betekent dat naast de stromingsleer ook de thermodynamica een rol gaat spelen. Hoe is de door de trein, de in de tunnel aanwezige installaties en de door de reizigers geproduceerde warmte af te voeren naar de omgeving?

Onderstaand zullen enige maatregelen worden vermeld, die men kan treffen om de kunstmatige ventilatie van spoortunnels tot een minimum te beperken.

- a. De verhouding tunneldoorsnede/treindoorsnede zo klein mogelijk maken. Hierdoor wordt het zelfreinigingseffect bij het passeren van treinen bevorderd. Hoewel de weerstand die de trein ondervindt groter zal worden is de ventilatie dan optimaal.
- b. Lange en zware treinen tot een minimum beperken en zo goed mogelijk spreiden over de dag.
- c. Voorkomen dat treinen met dieseltractie (met name de zware en langzaam rijdende) in de tunnel tot stilstand komen.
- d. Snelheid van de trein hoog houden, zodat van deze snelheid bij het stijgen gebruik kan worden gemaakt.
- e. Bij het afremmen de energie aan een derde rail afgeven in de vorm van elektrische energie.

We gaan ervan uit dat wanneer bovenstaande voorzorgsmaatregelen worden getroffen, het zelfreinigend vermogen van de trein voldoende is, om de geproduceerde warmte en verbrandingsgassen af te voeren. Wel moeten er ventilatoren aanwezig zijn die ingezet kunnen worden als de concentratie van verbrandingsgassen of de temperatuur te hoog oploopt.

De voor ventilatoren benodigde ruimte is reeds aanwezig boven de vrije ruimte van het looppad doch stelt eisen aan de vormgeving van de constructieve afschuining van de hoek tussen de wand en het dek van de treinkoker.

- b. Ventilatie in de autokoker.

Om een autotunnel te ventileren staan ons drie

systemen ter beschikking:

1. Langsventilatie.
2. Dwarsventilatie.
3. Semi- dwarsventilatie.

Voor een verdere toelichting op deze systemen zie bijlage 1.

Als de ventilatieschachten direkt op de oevers gebouwd worden is de afstand hiertussen minimaal 3 km. Het eerst genoemde systeem van ventilatie (de langsventilatie) valt daardoor af. De luchtsnelheden zouden hier te hoog oplopen. Voor langsventilatie is de bovengrens ongeveer 2 à 2,5 km.

Aan het eind van dit hoofdstuk zal worden gekeken welke van de twee resterende systemen het best kan worden ingepast in de tunnel.

4. Hydrostatische druk.

Gezien de diepte waarop de tunnel komt te hangen zullen er grote hydrostatische krachten op de wand komen te staan. Op 40 meter diepte heerst een overdruk op de buitenwand van de tunnel van $4 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$. Bij een rechthoekig tunnelprofiel zullen er ten gevolge van deze hydrostatische druk grote dwarskrachten moeten worden opgenomen. Dit leidt tot dikwandige constructies die niet alleen duur zijn, maar ook niet meer zelfdrijvend.

Het krachtenspel bij cirkelvormige profielen is veel gunstiger. De alzijdige waterdruk veroorzaakt druk in de wand. De drukkracht die beton op kan nemen is aanzienlijk groter dan de dwarskracht.

Het ligt dus voor de hand om het uitwendige profiel in de vorm van een cirkel te kiezen.

5. Geleiding van de waterstroming.

In de Straat van Messina is de stroomsnelheid groot. Hierdoor treden grote sleepkrachten op. Hoe beter het

tunnelprofiel de stroming geleidt, hoe lager de sleepkracht zal zijn.

De formule voor de sleepkracht is:

$$\underline{F_s = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2 \cdot D \cdot C_d} \quad (1)$$

Waarin ρ = s.m. van zeewater = 1027 kg/m^3

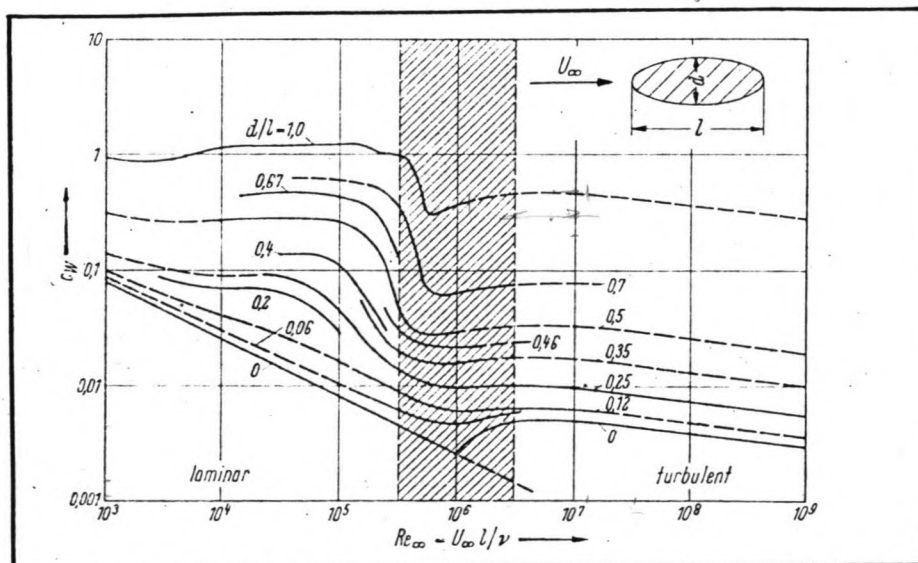
U = stroomsnelheid in m/s

D = hoogte van het tunnelprofiel in aanstroomrichting

C_d = drag coëfficiënt.

De enige factoren die we kunnen aanpassen om de grootte van de sleepkracht te beïnvloeden zijn de C_d waarde en de hoogte D .

Beschouwen we een ellips- en cirkelvormig profiel dan zien we dat een ellipsvormig profiel aanzienlijk gunstiger is. Dit komt vooral door de lage C_d waarde van ellipsvormige profielen. Een kort rekenvoorbeeld zal dat laten zien. Hierbij is gebruik gemaakt van figuur 5.



Figuur 5: Weerstandswaarde (C_d) voor elliptische profielen bij verschillende hoogte/breedte verhouding.

Bij een stroomsnelheid van 3,2 m/s en een tunnel-diameter van ruwweg 10 meter is het Reijndoldsgetal

$$Re = \frac{3,2 \cdot 10}{10^{-6}} = 3,2 \cdot 10^7. \text{ Voor een ellips met een hoogte-}$$

breedte verhouding van 0,5 scheelt de Cd waarde een factor 10 met die van een cilinder.

De invloed van een eventuele kleinere hoogte D is buiten beschouwing gelaten, maar de sleepkracht neemt ook nog eens rechtevenredig af met deze hoogte D.

Bovenstaande betoog pleit in eerste instantie voor een ellipsvormig profiel. Toch kleven er aan een ellipsvormig profiel meerdere nadelen, zoals liftkrachten, slechtere opname van hydrostatische krachten en een lager weerstandsmoment voor momenten ten gevolge van de opdrijvende kracht door afname van de hoogte D. Deze nadelen zullen op het einde van dit hoofdstuk nader worden uitgewerkt.

6. Montage en onderhoud.

De inrichting van de tunnel moet zodanig zijn dat reparatie en onderhoud snel en efficiënt kunnen plaatsvinden. Dit geldt ook voor de uitwendige vormgeving van de tunnel. De montage van elementen heeft in volle zee plaats. Het is dus zaak dit steeds terugkerende proces zo eenvoudig mogelijk te houden.

De levensduur van sommige onderdelen (bijvoorbeeld kabels) is beperkt. Beschadigde en versleten onderdelen moeten dus vervangen kunnen worden. Ook hierop moet de vormgeving worden afgestemd.

7. Bescherming van de tunnel tegen lekkage.

Lekkage zou zich in de tunnel door verschillende oorzaken kunnen voordoen. Om maar enige voorbeelden te noemen:

- Het niet goed uitvoeren van de koppeling tussen

- twee tunnelsegmenten in het montagestadium.
- Breuk van een waterleiding.
 - Slijtage van de koppeling tussen twee segmenten.
 - Het lek slaan van de koppeling of van de wand door een vallend scheepsanker.
 - Een voor de constructie te zware aardbeving.

We moeten voorkomen dat de tunnel hierdoor volloopt. Daarom wordt de tunnel voorzien van een stalen liner (een stalen omhulling van bijvoorbeeld 2 cm). Deze liner vormt dan tevens de bekisting voor het beton. Waterintreding door de wand is dan onmogelijk, maar ook aantasting van het beton en de wapening wordt hierdoor voorkomen. Belastingen door vallende scheeps-ankers of overboord geslagen lading zal minder schade aanrichten en beter geïncasseerd kunnen worden. Een ander voordeel van zo'n stalen liner is dat de koppelingen tussen tunnelsegmenten met een grotere zekerheid waterdicht kan worden uitgevoerd en dit zal blijven. Toch is het verstandig de afdichtingsschotten tussen de gekoppelde tunnelsegmenten enige tijd met een onderdruk te laten zitten om eerst zeker te zijn van een waterdichte koppeling.

Het gebied waarin de Straat van Messina ligt wordt regelmatig getroffen door aardbevingen. Door een aardbeving zou het beton kunnen scheuren. Als geen liner is toegepast kan de tunnel vollopen. Wordt wel een liner toegepast dan kan door de grote vervormingscapaciteit van het staal de waterdichtheid gegarandeerd blijven. Het staal beschikt immers over een vloeitraject.

Om het vollopen van binnenuit te voorkomen door lekkage van leidingen, moeten alle leidingen in een aparte leidingenkoker gelegd worden. Deze leidingenkoker moet van de rest van de tunnel zijn afgeschermd, maar wel bereikbaar zijn voor inspectie en onderhoud.

8. Minimale wanddikte.

Hierover kan in dit stadium nog geen uitspraak worden gedaan. Deze hangt namelijk af van verschillende factoren die nu nog onbekend zijn.

- a. De grootte van de maximaal resterende opwaartse kracht.
- b. De grootte van de stromingskracht.
- c. De afstand van de verankeringskabels.
- d. De vorm van de tunnel.

Bovendien moet een alzijdige waterdruk van $4 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ worden opgenomen. We kiezen een wanddikte van 0,7 m. In hoofdstuk 5 wordt gecontroleerd of deze voldoet. Is dit niet het geval dan wordt de aanname aangepast.

2.2 Keuze tunneldoorsnede.

Een rechthoekig tunnelprofiel valt af omdat dit bij een hydrostatische druk van $4 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ zou leiden tot een dikwandige constructie (zie punt 4 paragraaf 2.1). Een cirkel- of ellipsvormig profiel blijft over als alternatief.

Hoewel het ellipsvormig profiel de waterstroming beter geleid en hierdoor aan een lagere sleepkracht wordt blootgesteld kleven aan deze vormgeving twee bezwaren die hieronder nader zullen worden uitgewerkt namelijk:

1. Zwaardere constructie.
2. Liftkrachten.

1. Zwaardere constructie.

Een ellipsvormig profiel zal in verhouding met een cirkelvormig profiel een groter eigen gewicht hebben bij eenzelfde oppervlak van doorsnede. Dit heeft drie oorzaken.

Ten eerste de ongunstiger invloed van de hydrostatische druk op een ellipsvormig profiel. Bij een cirkelvormig profiel veroorzaakt een alzijdige waterdruk alleen een drukspanning in de tunnelwand. In een ellipsvormig pro-

fiel zullen echter ook momenten en dwarskrachten optreden. Om deze momenten en dwarskrachten op te nemen moeten de wanden dikker en dus zwaarder zijn.

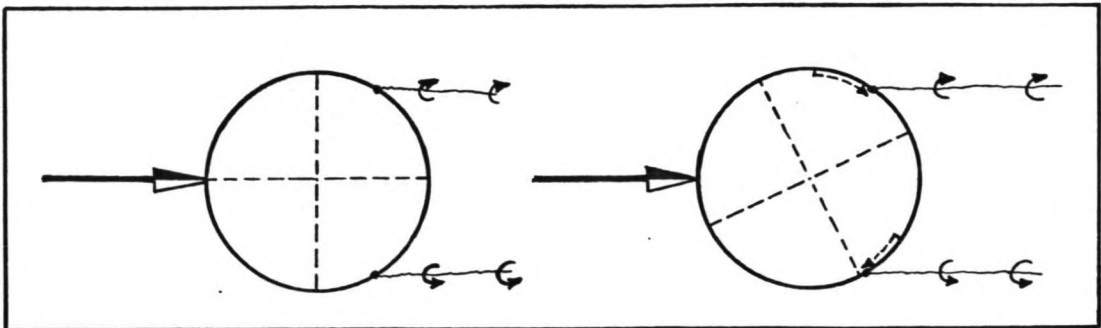
Ten tweede zal bij eenzelfde oppervlak van doorsnede het ellipsvormig profiel lager zijn. Hierdoor is het weerstandsmoment (W) van een ellipsvormig profiel lager. Dit weerstandsmoment is nodig om een moment in langsrichting op te nemen ten gevolge van de opdrijvende kracht. Om aan een even groot weerstandsmoment te komen als dat van een cirkelvormig profiel zal de wanddikte aan boven- en onderzijde ook toe moeten nemen.

De laatste factor de oppervlakte-omtrek verhouding. Deze is bij een ellipsvormig profiel kleiner dan bij een cirkelvormig profiel. Dit houdt dus in dat bij een gelijk oppervlak van doorsnede voor een ellipsvormig profiel meer omhullende wand nodig is. Het gevolg van dit zwaarder construeren kan zijn dat de resulterende kracht niet meer opwaarts gericht is of niet meer voldoende groot is om de verankeringskabels strak te trekken. In het eerste geval zou groter geconstrueerd moeten worden om aan voldoende opdrijvende kracht te komen. In het tweede geval zou door de lagere spanningen in de verankeringskabels de verplaatsing van de tunnel groter worden (zie hoofdstuk 6, berekening van de kabelkrachten en de verplaatsingen).

2. Liftkrachten.

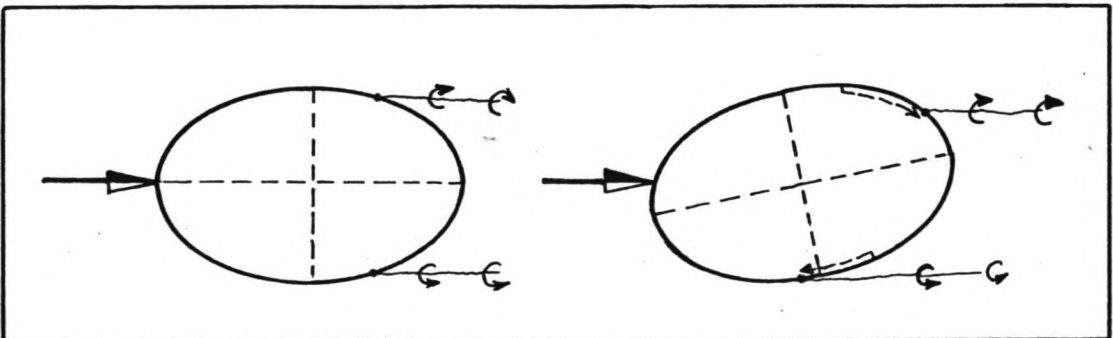
Bij een ellipsvormig profiel is de liftkracht veel groter dan bij een cirkelvormig profiel. Bij een cirkelvormig profiel is de liftkracht de kracht die op het profiel werkt ten gevolge van het ongelijktijdig loslaten van de wervels aan boven en onderzijde. Roteert het cirkelvormige profiel dan verschuiven de punten waar de wervels loslaten ten opzichte van het profiel, maar niet ten opzichte van de omgeving (zie figuur 6).

De liftkracht blijft dus gelijk.

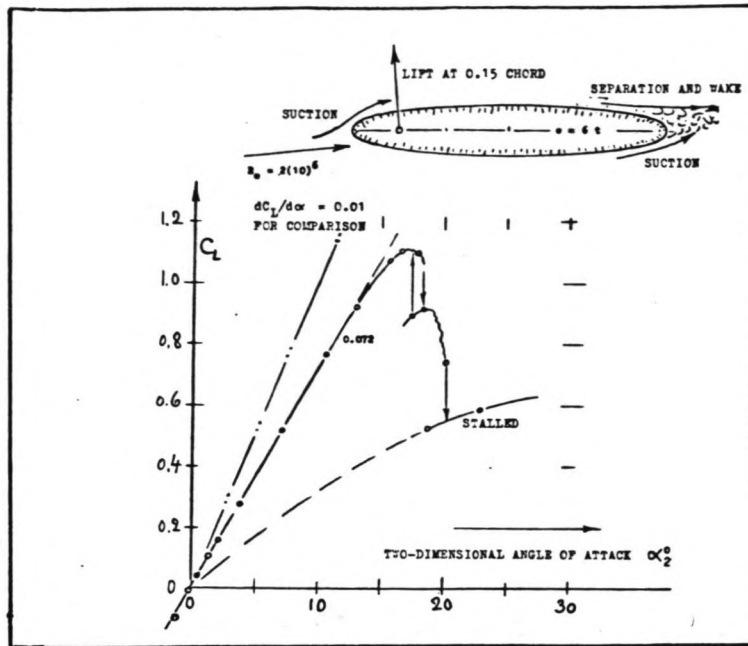


Figuur 6: Loslaatpunten van de wervels voor een cilindervormig profiel voor en na rotatie.

Dit is bij een ellipsvormig profiel anders. Loopt de lengte-as van de ellips evenwijdig met de stroomrichting dan bestaat de liftkracht ook alleen uit de krachten ten gevolge van het ongelijktijdig loslaten van de wervels aan boven- en onderzijde. Roteert het ellipsvormig profiel dan verschuiven de punten waar wervels loslaten ook. In de situatie getekend in figuur 7 leidt dit tot overdruk aan de bovenzijde en onderdruk aan de onderzijde van het profiel. Hoe groot de resultante van deze drukken is hangt onder andere af van de grootte van de rotatie (zie figuur 8, C_l is hier de liftcoëfficiënt).



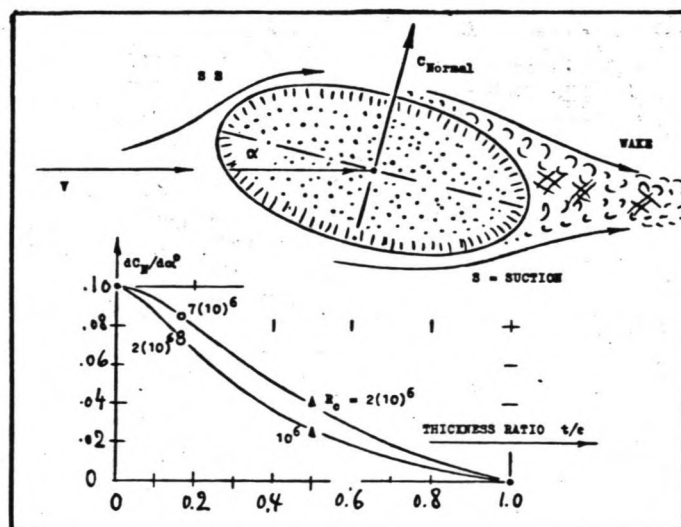
Figuur 7: Loslaatpunten van de wervels voor een ellipsvormig profiel voor en na rotatie.



Figuur 8: Liftcoëfficiënt van een elliptisch profiel als functie van de hoek van aanstroming

Voor de precieze waarde van de liftkracht zouden modelproeven gedaan moeten worden. We moeten er dan wel op letten dat we

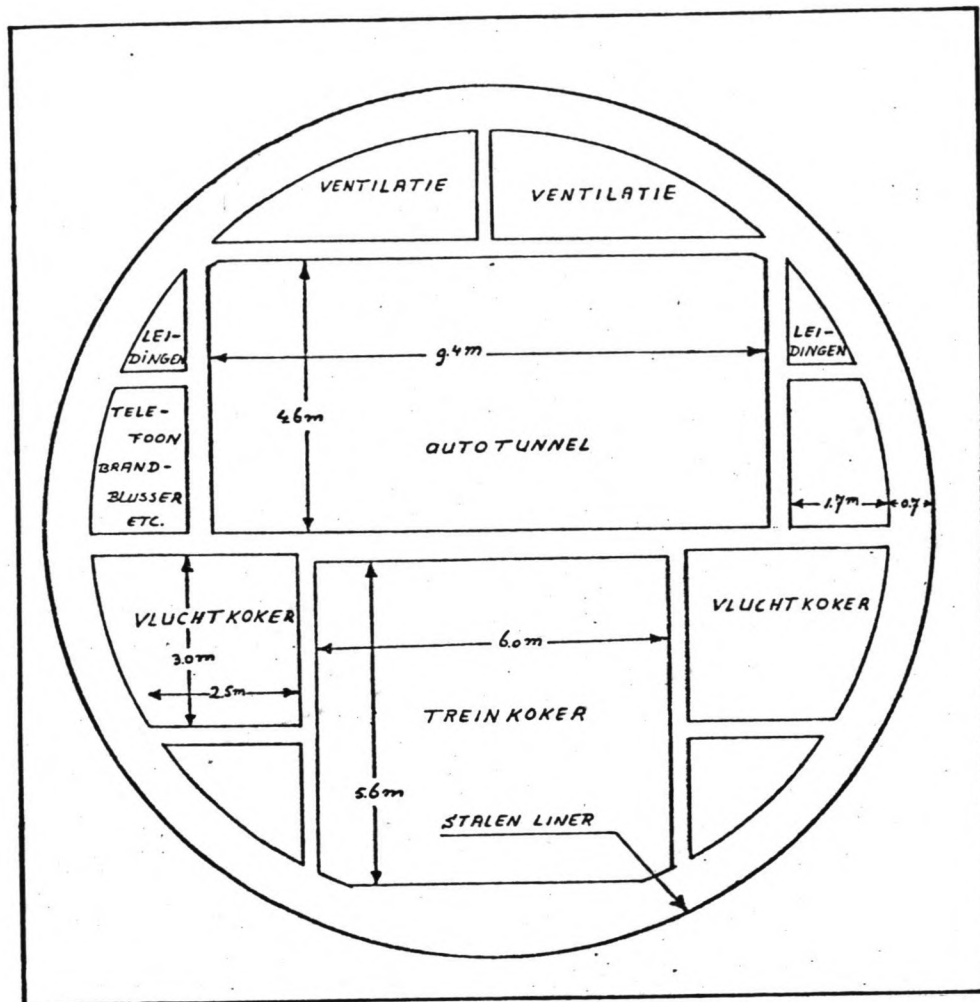
- de goede hoogte-breedte verhouding hebben (zie figuur 9).
- de goede Reynolds-waarde hebben.



Figuur 9: Liftcoëfficiënt op elliptische profielen bij gegeven Reynoldsgetallen als functie van de hoogte/dikte (t/c) verhouding.

4. Door de treinkoker onderin de tunnel te plaatsen kan de treinbelasting beter worden ingeleid in de tunnelwand.

De tunneldoorsnede ziet er dan als volgt uit:

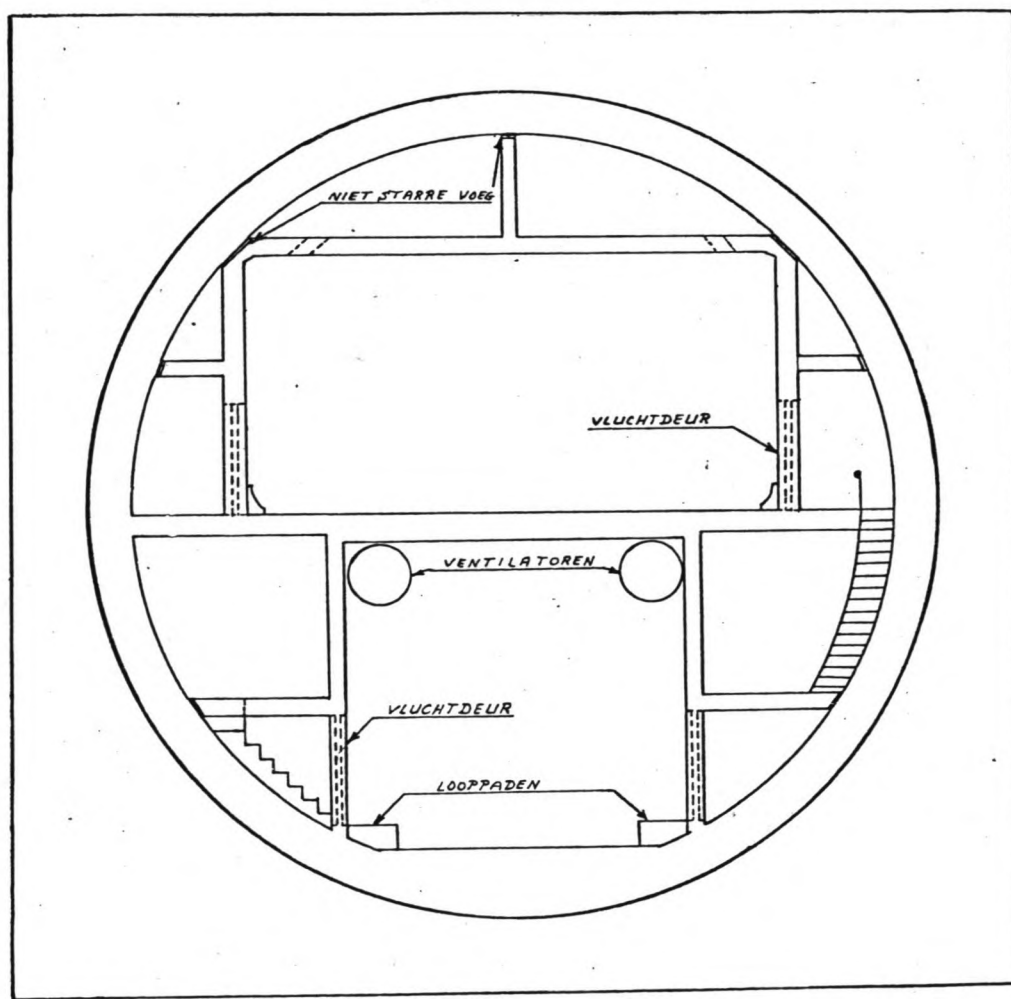


Figuur 10: Indeling van de tunneldoorsnede.

De ruimte die voor ventilatie gebruikt kan worden blijft eigenlijk beperkt tot die boven de autokoker. Het ligt dus voor de hand te kiezen voor semi-dwars-ventilatie. Immers, zou worden gekozen voor dwars-

ventilatie dan is het niet mogelijk de meest verontreinigde lucht af te zuigen. Dat is de lucht op hoogte van de uitlaten. Zowel het inbrengen als het wegzuigen van respectievelijk schone en verontreinigde lucht geschied bovenin de tunnel. Of de luchtstroom die dan ontstaat ook beneden in de autokoker de lucht zal verversen is maar de vraag.

Als bij de semi-dwarsventilatie een scheidingswand wordt aangebracht krijgen we twee afzonderlijke ventilatiekokers. Hierdoor wordt inspectie en onderhoud van de ventilatiekoker mogelijk zonder dat de ventilatie onderbroken wordt. Bovendien kan het aanjagen van de lucht gescheiden worden. Hierdoor krijgen we een ventilatiesysteem dat bedrijfszekerder is dan dat van dwarsventilatie. Dat komt doordat bij dwarsventilatie beide kokers gebruik worden. Zowel de ventilator die overdruk opbouwt in de ene koker als de ventilator die voor onderdruk zorgt in de andere koker moet werken wil het ventilatiesysteem functioneren.



Vooraf de goede Reynolds-waarde zal een probleem zijn. We zitten namelijk in de praktijk met een grote stroomsnelheid en een grote diameter van de tunnel. Het getal van Reynolds: $Re = \frac{UD}{\nu}$

Hierin is U = Stroomsnelheid

D = Diameter

ν = Kinematische viscositeit

Proeven zullen dus gedaan moeten worden met een grote stroomsnelheid en/of een groot model.

De liftkracht kan zowel op- als neerwaarts gericht zijn. Bovendien hangt de hoek van rotatie (+ of -) af van de stroomrichting. Dit maakt de liftkracht nog eens extra ongunstig.

De nadelen van het zwaarder en eventueel groter construeren en de onbekendheid van de liftkrachten leidt ertoe te kiezen voor een cirkelvormig profiel. In dit cirkelvormig profiel moeten de profielen van vrije ruimte voor trein en autoverkeer geplaatst kunnen worden.

Omdat de treinkoker smaller is dan de koker voor het autoverkeer worden de vluchtkoker en de koker voor onderhoud en eventuele hulpverlening naast de treinkoker geplaatst. Op grond van vier argumenten wordt gekozen de treinkoker onder de koker voor autoverkeer te plaatsen. Deze argumenten staan hieronder vermeld.

1. Om de vluchtkoker, die zich naast de treinkoker bevindt, te bereiken moet de automobilist dalen. Dit gaat in geval van nood sneller dan stijgen.
2. Als de treinkoker boven de autokoker zou liggen zou een dikke scheidingswand nodig zijn om het moment en de dwarskracht ten gevolge van de treinlast op te nemen.
3. Door de direkte bevestiging van de rails op het beton zou de geluidshinder in de autokoker groter zijn als de treinkoker bovenin geplaatst zou worden.

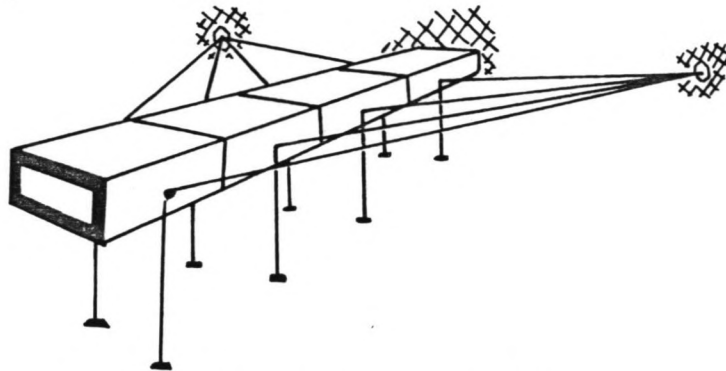
3. Keuze van het verankeringsysteem.

Het is in de Straat van Messina niet mogelijk een starre tunnelkoker toe te passen die aan de landhoofden is ingeklemd. Hiervoor zijn de lengte en de krachten die op de tunnel werken te groot. De dwarskrachten en momenten ten gevolge van de getijstroming zouden grote waarden aannemen. Om de materiaalspanning niet te hoog op te laten lopen zijn dan dikke wanden nodig. Hierdoor verliest de tunnel zijn opdrijvend vermogen en wordt technisch onuitvoerbaar.

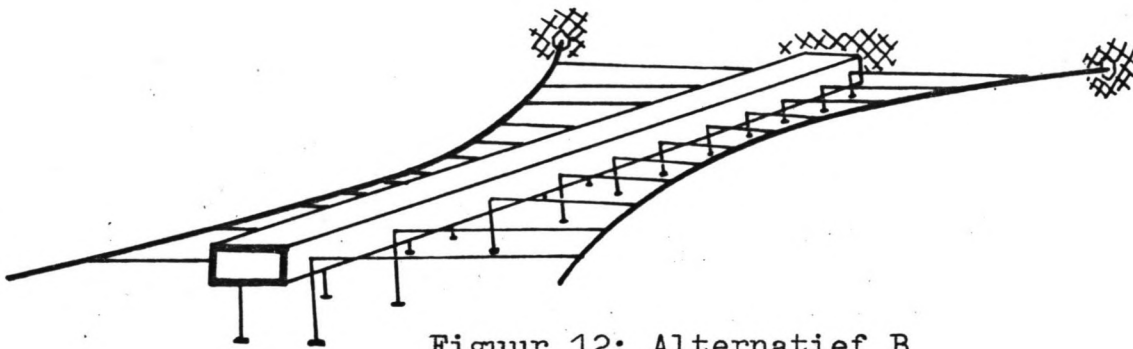
Er is een verankeringsysteem nodig om de krachten tussen de landhoofden aan de aarde (zeebodem) af te dragen. Deze krachtsafdracht moet voor zowel krachten loodrecht op de tunnel (in horizontale- en vertikale richting) als krachten in de langrichting mogelijk zijn en ook voor eventueel optredende momenten. Het verankeringsysteem dient aan de volgende eisen te voldoen:

1. Krachten die op de tunnel werken moeten via het verankeringsysteem aan de bodem afgedragen kunnen worden.
2. Het verankeringsysteem moet in zijn geheel 35 meter of meer onder het gemiddelde zeeniveau liggen om geen hinder op te leveren voor de scheepvaart.
3. Delen van het verankeringsysteem moeten vervangen kunnen worden terwijl het verankeringsysteem toch zijn functie blijft vervullen.
4. Het knappen van een kabel mag niet leiden tot het bezwijken van het hele systeem.
5. Bij een verankeringsysteem bestaande uit verschillende kabels moet het geheel onder de plaatselijke omstandigheden geïnstalleerd kunnen worden.
6. De verplaatsingen moeten door het verankeringsysteem binnen aanvaardbare grenzen worden gehouden.

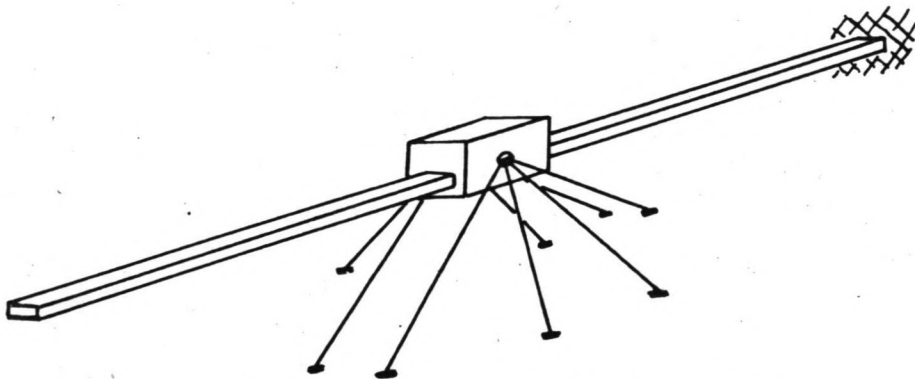
Er zijn meerdere systemen te bedenken om de tunnel te verankeren. In de figuren 11 tot en met 14 zijn enige alternatieven geschetst.



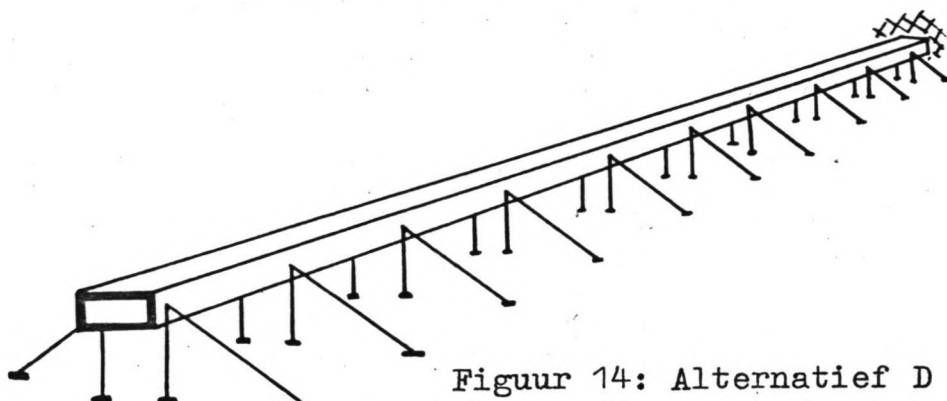
Figuur 11: Alternatief A



Figuur 12: Alternatief B



Figuur 13: Alternatief C



Figuur 14: Alternatief D

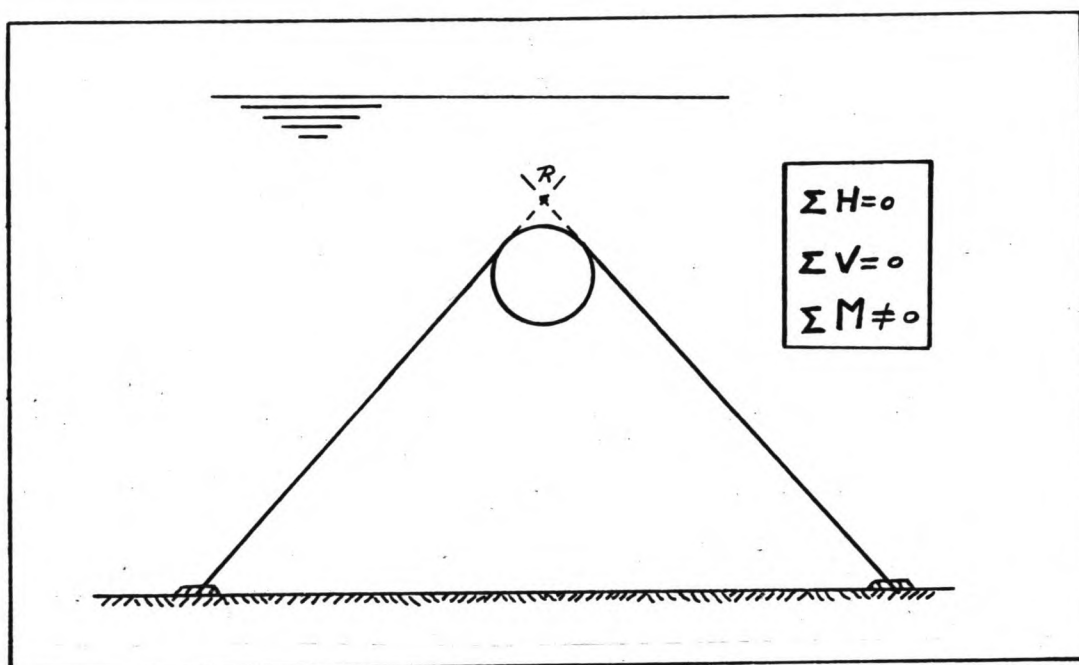
Op grond van uitvoerbaarheid, vanuit economisch oogpunt en de eerder gestelde eisen zullen we een keuze maken tussen de vier alternatieven.

- A. Vanuit vier vaste punten op de oevers wordt de tunnel in het horizontale vlak getuid. In verticale richting lopen kabels om de tunnel een voorspankracht in verticale richting te geven. Het gevolg van tuien in het horizontale vlak is dat er ter plaatse van de landhoofden grote drukkrachten in de tunneldoorsnede optreden of in het midden grote trekkrachten. Ieder tunnelsegment zal weer opnieuw moeten worden getuid zodat er een groot aantal kabels nodig zijn waarvan sommige een lengte van 1500 meter of meer hebben.
 - B. Hier worden tussen de twee oevers twee hoofdkabels gespannen op ongeveer gelijke hoogte met de tunnel. Vanuit deze hoofdkabels lopen secundaire kabels naar de tunnel die de verplaatsingen in verticale richting te beperken.
 - C. De tunnel is hier voorzien van een of meerdere pontons met een groot drijfvermogen. Deze pontons worden in strak gespannen kabels aan de bodem verankerd in alle richtingen. Door deze geconcentreerde afdracht van de krachten zijn lange tunnelsegmenten of een groot aantal pontons nodig.
 - D. Op regelmatige afstand wordt de tunnel verankerd door een stelsel van kabels, die de verplaatsingen in alle richtingen beperken.
- Ad. A. Bij alternatief A zullen veel lange kabels voor de verankering en een dikke tunnelwand voor het opnemen van de hoge normaal-spanningen nodig zijn. Dit maakt het alternatief economisch onaantrekkelijk.
- Ad. B. Alternatief B zal qua uitvoering veel problemen met zich meebrengen. Bovendien is het vervangen van de hoofdkabels onmogelijk.
- Ad. C. Bij alternatief C bestaat de keuze tussen veel pontons en korte tunnelsegmenten, wat economisch onaantrekkelijk is of weinig pontons en lange tunnelsegmenten wat door

de locale stroomsnelheden uitvoeringsproblemen zal geven.

Ad. D. Alternatief D dat op het eerste gezicht deze problemen niet kent zal hieronder verder worden uitgewerkt.

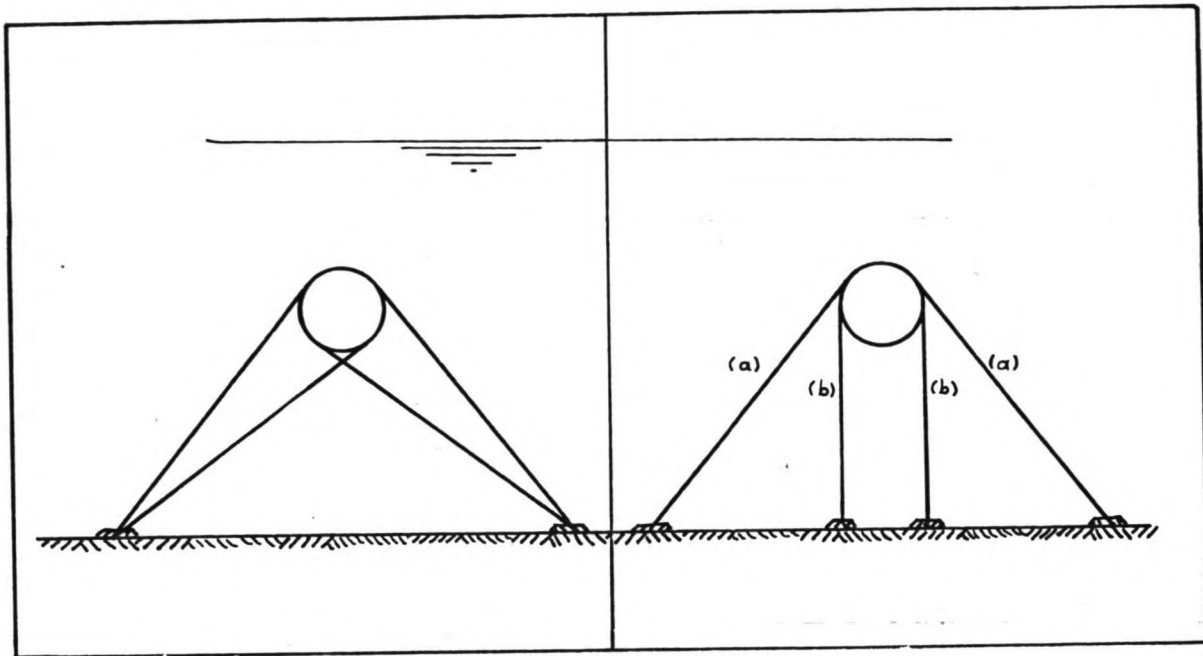
Voor een verankeringsstelsel zoals dat van alternatief D zijn er in ieder geval twee kabels nodig zoals in figuur 15 getekend, om de krachten in het horizontale vlak, loodrecht op de lengte richting van de tunnel op te kunnen nemen. De bevestiging van de kabels moet aan de zij- of bovenkant zijn om de montage en eventuele vervanging te vergemakkelijken.



Figuur 15: Verankerings voor horizontale en verticale kracht

Ook verticale krachten kunnen door deze kabels worden opgenomen. Momenten ten gevolge van niet centrische belastingen kunnen echter niet worden opgenomen. Er treedt dan een rotatie op om het punt R. Minimaal één maar beter twee kabels (in verband met symmetrie) zijn nodig waarvan de werklijn niet door punt R gaat. Twee alternatieven hiervoor zijn getekend in de figuren 16 en 17. Het eerste alternatief heeft het voordeel dat er geen extra verankeringspunten nodig zijn, maar de kabels zijn lang en de stijfheid/doorsnede verhouding is kleiner. De montage van de kabels zal moeilijker zijn omdat deze onder de tunnelkoker door moeten. Het tweede alternatief heeft korte kabels met een grotere stijf-

heid en de vervormingen zijn dus klein.



Figuur 16: Alternatief 1

Figuur 17: Alternatief 2

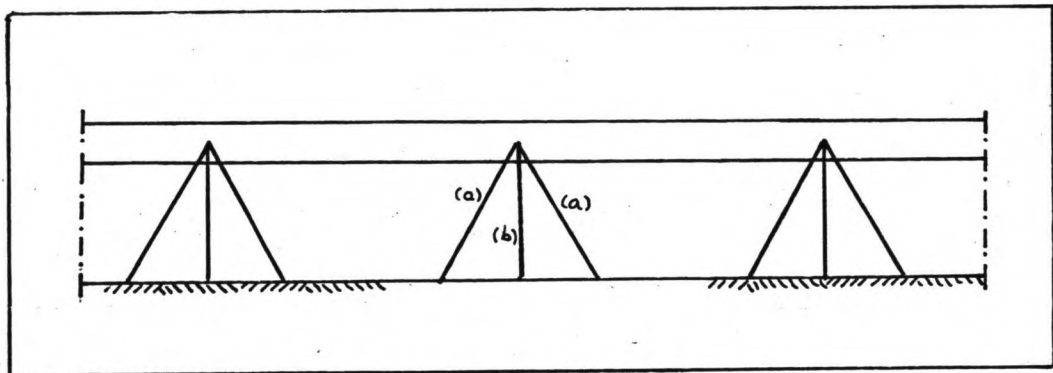
Op grond van bovenstaande argumenten wordt gekozen voor het tweede alternatief. Nu kan voor de schuinlopende kabels een andere kwaliteit en doorsnede worden gekozen als voor de verticale kabels. Kabels met een hoge maximaal toelaatbare spanning voor de schuine kabels zodat deze strak kunnen worden gespannen en de horizontale component optimaal wordt gebruikt. Kabels met een lage maximaal toelaatbare trekspanning en een grotere diameter, zodat vervormingen in verticale richting ten gevolgen van belastingsvariaties klein blijven.

Voor afdracht van de krachten in de lengterichting van de tunnel moeten ook voorzieningen worden getroffen. Dit omdat de landhoofden niet vast met de tunnel verbonden kunnen worden vanwege de verschuivingen van Sicilië ten opzichte van het vaste land van Italië (ze schuiven gemiddeld 2 cm per jaar van elkaar af).

Om dit probleem gedeeltelijk te ondervangen kan de tunnel over een groot oppervlak op het landhoofd opgelegd worden. Tussen

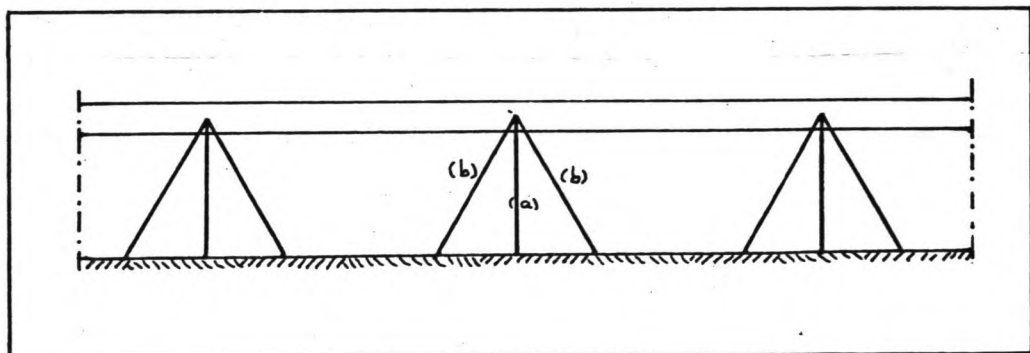
het landhoofd en de tunnel moet voor de oplegging een chemische stof (soort asfalt) worden aangebracht die op kortstondige belastingen reageert als onvervormbaar en dus in staat is grote krachten over te brengen en op langdurige belastingen reageert als een smeerlaag. (Deze chemische stof wordt gebruikt bij paalfunderingen, waar negatieve kleef wordt verwacht. Kortstondige belastingen worden door wrijving aan de omringende grond afgegeven terwijl een langdurige belasting als negatieve kleef door de chemische stof, die dan als smeerlaag werkt, teniet wordt gedaan).

Behalve de afdracht van langskrachten aan de landhoofden kan tussentijdse afdracht plaatsvinden door de schuine kabels dubbel uit te voeren zodat ook componenten in de langsrichting van de tunnel ontstaan (zie figuur 18).

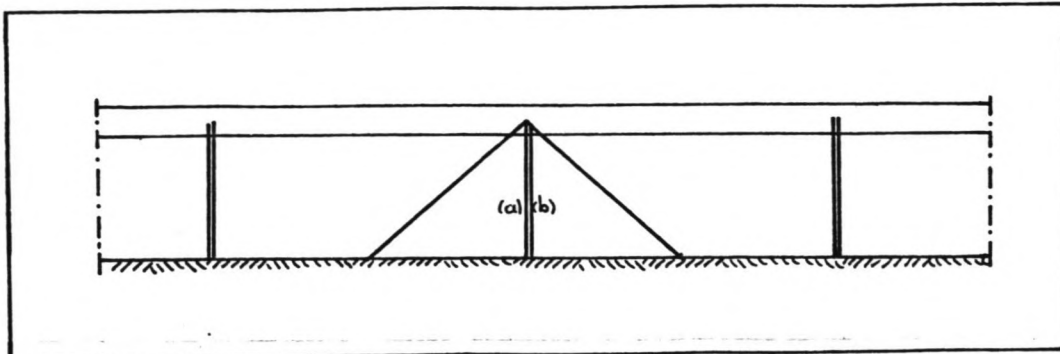


Figuur 18: Alternatief voor verankering in langsrichting.

De kabels recht onder de tunnel kunnen dubbel worden uitgevoerd (zie figuur 19) en als laatste alternatief kunnen enige schuine kabels onder de tunnel worden gespannen speciaal voor de krachten in de lengterichting (zie figuur 20).



Figuur 19: Alternatief voor de verankering in langsrichting.



Figuur 20: Alternatief voor de verankering in langsrichting.

Deze kabels die voor de krachtsafdracht in de lengterichting zorgen moeten regelmatig worden bijgesteld omdat door de verschuiving van de ondergrond de krachten in de kabels veranderen.

Kiezen we voor het eerste alternatief dan moeten een groot aantal kabels bijgesteld worden. Bij het tweede alternatief idem, maar hier komt nog bij dat de kabels door het doorhangen een kleinere stijfheid krijgen en dus grotere vervormingen. Bij alternatief drie moeten slechts die kabels worden bijgesteld die hiervoor zijn aangebracht. De keuze van type drie ligt dus voor de hand.

4. Krachten op de tunnel.

Hieronder volgt een opsomming van de op de tunnel werkende krachten:

1. Opwaartse kracht.
2. Kracht ten gevolge van de waterbeweging.
 1. Getijbeweging.
 2. Golfbeweging.
3. Eigen gewicht van de tunnel.
4. Verkeersbelasting.
5. Kabelkrachten van het verankeringsysteem.

In de volgende paragrafen worden de verschillende krachten nader bekeken en de grootte ervan bepaald.

4.1 De opwaartse kracht.

Op de tunnelwand werk een hydrostatische druk. Deze druk is niet overal even groot, maar neemt toe bij toenemende diepte. Als we de druk, vermenigvuldigd met het oppervlak, integreren over de hele tunnelwand dan blijft er een resultante over in opwaartse richting, de opwaartse kracht. In formule

$$\begin{aligned} dF_{\text{opw.}} &= p_{\text{onder}} \cdot dx \cdot dy - p_{\text{boven}} \cdot dx \cdot dy \\ &= \rho \cdot g \cdot (z_{\text{onder}} - z_{\text{boven}}) \cdot dx \cdot dy \end{aligned}$$

$$F_{\text{opw.}} = \rho \cdot g \iint (z_{\text{onder}} - z_{\text{boven}}) \cdot dx \cdot dy$$

$$F_{\text{opw.}} = \rho \cdot g \cdot \text{Volume}$$

Waarin: $F_{\text{opw.}}$ = opwaartse kracht in N.

p = waterdruk in N/m^2 .

z = as in vertikale richting.

x = as in horizontale vlak.

y = as in horizontale vlak loodrecht op x-as.

ρ = soortelijke massa van zeewater (1027 kg/m^3)

g = versnelling ten gevolge van zwaartekracht $9,813 \text{ m/s}^2$.

Voor de cilindervormige koker is dit per strekkende meter:

$$\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2 \cdot \rho \cdot g$$

Waarin: D = diameter van de tunnel (15 meter).

De grootte van de opwaartse kracht is:

$$F_{\text{opw.}} = \frac{\pi \cdot 15^2 \cdot 1027 \cdot 9,813}{4} = 1781 \text{ kN/m}^1$$

4.2 Krachten ten gevolge van waterbeweging.

De waterbeweging is te splitsen in twee delen:

1. Getijstroming.
2. Golfbeweging.

Ter plaatse is een dubbeldaags getij. De stroming verandert hierdoor iedere $6\frac{1}{4}$ uur van richting. De golven met hun periodes van enige seconden veroorzaken een stroming die cirkel of ellipsvormig is. Hieronder worden beide stromingen verder uitgewerkt.

1. Getijstroming.

De kracht die de getijstroom op de tunnel uitoefend is te splitsen in een sleepkracht en een liftkracht. De eerste is in formulevorm te schrijven als:

$$F_{\text{drag.}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2 \cdot D \cdot C_d$$

Waarin: ρ = soortelijke massa van zeewater 1027 kg/m^3 .

U = stroomsnelheid in m/s.

D = diameter in m.

C_d = dragcoëfficiënt.

F_{drag} is dan de sleepkracht per strekkende meter. De waarde van de C_d coëfficiënt hangt af van het Reynoldsgetal ($Re = \frac{UD}{\nu}$, waarin ν is kinematische viscositeit) en de vormgeving van de tunnel.

Bij de overgang van laminaire naar turbulente stroming daalt de C_d coëfficiënt met een sprong. Hier is sprake van een turbulente stroom. Doordat de stroming turbulent is blijft deze langer aan de tunnelkoker aanliggen. Het

zog achter de tunnel wordt hierdoor kleiner. In het zog heerst onderdruk. De zuigkracht achter de tunnel wordt door de kleinere zog dus kleiner. Was misschien de Cd waarde voor de laminaire stroming te berekenen, voor de turbulente stroming wordt dit erg moeilijk of zelfs onmogelijk. Daarom gaan we van een empirisch bepaalde Cd coëfficiënt uit. Deze is te vinden in figuur 5. Bij een d/l verhouding van 1 en een Re van ongeveer $1,5 \cdot 10^7$ vinden we voor Cd de waarde: $Cd = 0,5$.

De grootte van de sleepkracht wordt hierdoor:

$$\frac{1}{2} \cdot 1027 \cdot 3,2^2 \cdot 15 \cdot 0,5 = 39,5 \text{ kN}$$

Liftkrachten op een cirkelvormig profiel worden veroorzaakt door het om beurten loslaten van wervels aan boven- en onderzijde van de cilinder. Bij dit loslaten wordt er een kracht op de cilinder uitgeoefend. Door het niet gelijktijdig loslaten ontstaat er een resulterende kracht die na iedere wervel van teken wisselt. Hoe zit dat nu bij dit tunnelprofiel? Bij een Reynolds getal $Re > 2 \cdot 10^5$ gaat de laminaire grenslaag stroming over in een turbulente. Hierdoor zullen de wervels niet meer aangroeien tot een grootte zoals het geval is bij een laminaire stroming. De wervels die bij deze turbulente stroming loslaten zijn aanzienlijk kleiner en de frequentie waarmee ze loslaten is hoger. De grootte van de liftkracht is dan maar een fractie meer van de sleepkracht in dit Re-interval en als zodanig te verwaarlozen.

2. De golfbeweging.

De krachten die op de tunnel werken ten gevolge van de golfbeweging zijn verwaarloosbaar. Dat komt doordat de tunnel op 40 meter diepte ligt. Hier is de waterbeweging door de golven aan de oppervlakte al ver uitgedempt. Tussen de diepte en de waterbeweging bestaat de volgende relatie:

$$V_x = \omega * a * \frac{\cosh k * (d+z)}{\sinh k * d} \sin (\omega * t - k * x)$$

$$V_y = \omega * a * \frac{\sinh k * (d+z)}{\sinh k * d} \cos (\omega * t - k * x)$$

Voor zogenaamd diep water kunnen we gebruik maken van het feit dat: $\cosh x = \frac{1}{2} * (e^x + e^{-x}) \rightarrow \frac{1}{2} * e^x$ voor x
 $\sinh x = \frac{1}{2} * (e^x - e^{-x}) \rightarrow \frac{1}{2} * e^x$ voor x

De relatieve fout die hierbij wordt gemaakt is e^{-2x} en x hoeft niet veel groter te zijn dan 1 om deze fout al verwaarloosbaar te doen zijn. Voor voldoende grote waarden van kd (dat wil zeggen: diep water) en van $k(d+z)$ (dat wil zeggen: voldoende hoog boven de bodem) zijn de snelheidsamplituden dus bij benadering gegeven door:

$$V_x = \omega * a * e^{k * z}$$

$$V_y = \omega * a * e^{k * z}$$

Vullen we onze waarden in dan krijgen we met

$$\omega = \frac{2 * \pi}{7}$$

$$a = 2,5$$

$$k = \frac{2 * \pi}{40}$$

$$z = -40$$

$$\hat{V}_x = \hat{V}_y = 4 \text{ mm/s}$$

Deze waarde is erg klein ten opzichte van de snelheid van de getijstrooming. Ook de maximale versnelling is $\omega * \hat{V}_x \simeq 4 \text{ mm/s}^2$ is erg klein.

4.3 Eigen gewicht van de tunnel.

Er zijn drie factoren die bijdragen aan het eigen gewicht van de tunnel: 1. betonconstructie.

2. stalen liner.

3. ballastmateriaal.

1. Betonconstructie.

In hoofdstuk 2.1.8. hebben we een dikte aangenomen voor de omhullende wand van 0,7 meter. Bij een uitwendige diameter van 15 meter levert deze wand een gewichts-

bijdrage van:

$$G_{\text{wand}} = \frac{\pi}{4} * (D_u^2 - D_i^2) * \rho_{\text{beton}} * g$$

$$= \frac{\pi}{4} * 40 * 2500 * 9,81 = 771,5 \text{ kN/m}^1$$

Tussen de verschillende compartimenten van de tunnel zijn scheidingswanden aangebracht. Als hier een gemiddelde dikte voor genomen wordt van 0,3 m en de totale lengte aan scheidingswanden ongeveer 4 maal de tunneldiameter is, dan is de gewichtsbijdrage van de scheidingswanden:

$$G_{\text{scheidingswand}} = 0,3 * 4 * D_u * \rho_{\text{beton}} * g$$

$$= 0,3 * 4 * 15 * 2,5 * 10^3 * 9,81 = 441,6 \text{ kN/m}^1$$

Om de spanningen in de omhullende wand laag te houden worden de treinlasten over een groot oppervlak in de tunnelwand ingeleid. Hiervoor en voor de rijplaat waarop de rails bevestigd worden, gebruiken we 2 m^3 beton. Dit levert een gewichtsbijdrage van:

$$2 * \rho_{\text{beton}} * g = 2 * 2,5 * 10^3 * 9,81 = 49,1 \text{ kN/m}^1$$

Voor de verdere afbouw van de tunnel wordt ook 2 m^3 beton gebruikt.

$$2 * 2,5 * 10^3 * 9,81 = 49,1 \text{ kN/m}^1$$

Het totale gewicht van de betonconstructie komt hierdoor op:

$$771,5 + 441,6 + 49,1 + 49,1 = 1311,3 \text{ kN/m}^1$$

2. Stalen liner.

Aan de buitenzijde van de omhullende wand wordt een stalen liner aangebracht met een wanddikte van 2 cm. De gewichtsbijdrage van zo'n stalen liner is:

$$2 * \pi * r * d * \rho_{\text{staal}} * g =$$

$$\pi * 15 * 0,02 * 7850 * 9,81 = 72,6 \text{ kN/m}^1$$

3. Ballastmateriaal.

In de tunnel zal 75 kN/m^1 aan ballastmateriaal worden aangebracht. Dit wordt aangebracht om in het eindstadium de gewenste resulterende opdrijvende kracht te krijgen. Is er te zwaar geconstrueerd (bijvoorbeeld een iets te dikke omhullende wand waar 1 cm al 10 kN scheelt) of worden er in de toekomst extra voorzieningen aangebracht met een belangrijke gewichtsbijdrage dan kan er ballastmateriaal worden afgevoerd.

Is er te licht geconstrueerd dan kan meer ballastmateriaal worden aangebracht om de berekende maximale kabelkrachten niet te overschrijden.

Het totale eigen gewicht van de tunnel wordt nu:

$$1311 + 73 + 75 = 1459 \text{ kN/m}^1.$$

4.4 Verkeersbelasting.

Deze is onder te verdelen in vier belastingen:

Ten eerste een vertikaal gerichte belasting ten gevolge van het eigen gewicht van het verkeer. Deze zal hierna verder worden uitgewerkt.

Ten tweede de centrifugaalkracht in het horizontale vlak. Deze is te elimineren door geen bochten in het zwevende gedeelte van de tunnel aan te brengen.

Ten derde de centrifugaal kracht in het vertikale vlak. Deze is zo klein te maken als gewenst door de kromtestraal tussen het dalende (of stijgende) en horizontale gedeelte van de tunnel zeer groot te maken.

Ten vierde de remkrachten van de trein in de tunnel. Deze moet worden opgenomen door schuin naar de bodem afgespannen kabels in het vertikale vlak evenwijdig aan de tunnel en door de opleggingen bij de landhoofden.

Op de vertikaal gerichte krachten ten gevolge van het eigen gewicht van het verkeer wordt nu nader ingegaan.

Hierbij maken we onderscheid tussen het auto- en vrachtwagenverkeer enerzijds en het treinverkeer anderzijds.

Auto- en vrachtwagenverkeer.

We gaan uit van twee rijstroken voor verkeer van klasse 60. De breedte van de rijstroken is 3,50 meter. Dat betekent dat behalve een vertikaal gerichte kracht door dit verkeer ook een moment kan worden veroorzaakt.

De maximale vertikaal gerichte kracht is $2 \cdot 12 \text{ kN/m}^1 = 24 \text{ kN/m}^1$. Ook is de combinatie mogelijk van 12 kN/m^1 met een moment van $2,50 \cdot 12 = 30 \text{ kNm/m}^1$. Hierbij is er vanuit gegaan dat de twee rijstroken naast elkaar liggen en dat hun scheidingslijn in het midden van de tunnel ligt.

Treinverkeer.

Om grote momenten te vermijden is het verstandig de spoortunnel op de hartlijn van de tunnel te leggen. Met het oog op de toekomstige ontwikkelingen moet er van worden uitgegaan dat de tunnel ook door de nog in ontwikkeling zijnde 6000 kW-E-lok gebruikt kan gaan worden. Deze ongeveer 20 meter lange lokomotief die 1,8 MN weegt kan een trein van 17 MN trekken. Dit totaal gewicht van 18,8 MN kan op vier verschillende manieren worden samengesteld, te weten:

1. Een militaire trein met een wagongewicht van 80 kN/m^1 en een gemiddeld gewicht van 81 kN/m^1 . De lengte hiervan is 232 meter.
2. Een zwaar beladen goederentrein met een wagongewicht van 40 kN/m^1 en een gemiddeld gewicht van $42,2 \text{ kN/m}^1$. De lengte hiervan is 445 meter.
3. Overeenkomstig de internationale stationsmodulen een 650 meter lange trein met een gemiddeld gewicht van $28,9 \text{ kN/m}^1$.
4. De lichtst mogelijke trein met een lengte van 650 meter en een gemiddeld gewicht van $14,3 \text{ kN/m}^1$. Bij deze trein zitten we dus niet aan ons maximale gewicht van 18,8 MN.

De militaire trein 1, een trein uit de categorie A van de Italiaanse Normen⁽¹⁾, heeft het grootste eigen gewicht per eenheid van lengte.

De Italiaanse normen zijn vrijwel gelijk aan de in de V.O.S.B. voorgeschreven belastingen.

- (1) Ministero dei Lavori Pubblici, Roma: Norme tecniche riguardanti le opere metalliche che interessano le ferrovie pubbliche. Decreto del 6.5.1916.
Ministero dei Trasporti, Roma. Direzione Generale FS, Serv. Lavori e Costruzioni Ufficio 6^o Nuovi sovraccarichi per il calcolo dei ponti met allici. Circolare no. 54 del. 15.7.1945.

4.5 Kabelkrachten van het verankeringsysteem.

Alleen de kabelkrachten kunnen zich aan de andere krachten aanpassen. Deze zorgen ervoor dat de op de tunnel werkende krachten in evenwicht zijn.

De resulterende opdrijvende kracht is de totale opdrijvende kracht verminderd met het eigen gewicht van de tunnel:

$$F_{res} = F_{opw.} - F_{e.g.} = 1780 - 1460 = 320 \text{ kN/m}^1.$$

Door de getijstrooming kan een sleepkracht optreden in beide richtingen van $39,5 \text{ kN/m}^1$.

Door de totale verkeersbelasting (van zowel trein- als auto-verkeer) kunnen de volgende belastingskombinaties op de tunnel worden uitgeoefend:

Vertikale kracht in kN/m^1	0	-12	-12	-92	-92	-104
Moment in kNm/m^1	0	+30	-30	-30	30	0

Tabel 1: Krachten door verkeersbelasting

Er zijn meerdere kombinaties van krachten mogelijk. Een paar kombintaties zullen maatgevend zijn. Het verankeringsysteem moet zodanig zijn gedimensioneerd dat het de maatgevende kombinaties van krachten in evenwicht kan brengen. De vervormingen mogen hierbij niet te groot zijn. Voor de dimensionering van het verankeringsysteem zie hoofdstuk 7.

5. Controle van de aangenomen wanddikte.

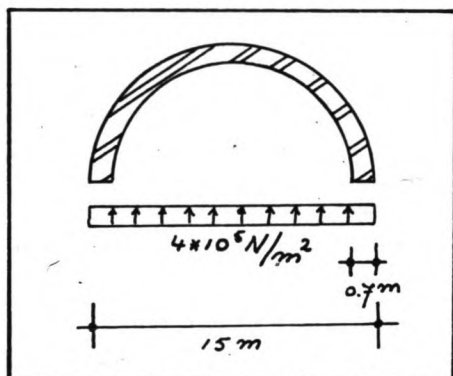
De benodigde wanddikte hangt af van de volgende factoren:

- alzijdige waterdruk
- de resulterende opdrijvende kracht
- de sleepkracht
- afstand verankeringskabels
- toegepaste hoeveelheid wapening en voorspanning
- soort koppeling tussen de tunnelsegmenten.

We zullen nu controleren of de aangenomen wanddikte de belastingen kan opnemen bij een normaal wapeningspercentage en een normale kabelafstand.

Alzijdige waterdruk.

De alzijdige waterdruk van $4 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ veroorzaakt in de wand een drukspanning. De grootte van deze drukspanning is met behulp van de ketelformule te berekenen.



Figuur 21: Halve tunnelwand

$$D \cdot p = \sigma_{b'} \cdot 2 \cdot d$$

D = tunneldiameter
 p = waterdruk
 $\sigma_{b'}$ = drukspanning
 d = wanddikte

Substitutie van de waarden geeft:

$$15 \cdot 4 \cdot 10^5 = \sigma_{b'} \cdot 2 \cdot 0,7$$

$$\sigma_{b'} = 4,3 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 = 4,3 \text{ N/mm}^2$$

Uitgaande van betonkwaliteit B22,5 mag worden toegelaten $0,75 f_{bk}^1 = 13,5 \text{ N/mm}^2$. We blijven dus ruim onder de rekenwaarde voor de betondruksterkte.

De resulterende opdrijvende kracht, de sleepkracht en de afstand van de verankeringskabels mogen niet los van elkaar worden gezien. Dit omdat deze drie factoren alle drie de grootte van het

moment en de dwarskracht in lengterichting beïnvloeden.

Substitueren we de waarden dan krijgen we voor de sleepkracht

$$F_s = \frac{1}{2} \rho \cdot U^2 \cdot D_u \cdot C_d = \frac{1}{2} \cdot 1027 \cdot 3,2^2 \cdot 15 \cdot 0,5 = 39,4 \text{ kN/m}^1$$

voor de resulterende opdrijvende kracht

$$F_r = F_{opw.} - F_{e.g.} - F_{balast}$$

$$F_{opw.} = \frac{\pi}{4} \cdot D_u^2 \cdot g \cdot \rho = 1781 \text{ kN/m}^1$$

$$F_{e.g.} = \rho \cdot \beta \cdot g \cdot (2 + 1,6 D_u + \frac{\pi}{4} (D_u^2 - D_i^2)) = 1409 \text{ kN/m}^1$$

$$F_{balast} = 50 \text{ kN/m}^1$$

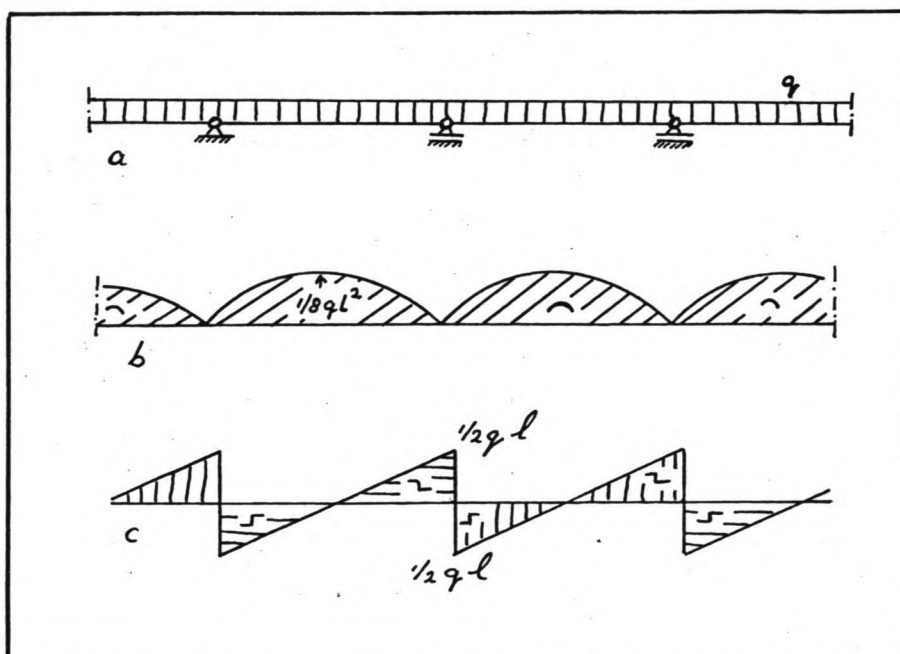
$$F_r = 1781 - 1409 - 50 = 322 \text{ kN/m}^1.$$

De sleepkracht werkt in het horizontale vlak, de resulterende kracht in het vertikale.

We gaan uit van de meest ongunstige situatie. Deze zou optreden als de verankeringskabels zich bevinden ter plaatse van de koppelingen van twee tunnelsegmenten en als deze tunnelsegmenten scharnierend met elkaar zijn verbonden. Het mechanisch model ziet er dan uit als figuur 22 a.

Het maximaal optredende moment is dan $1/8 q l^2$ (zie figuur 22 b).

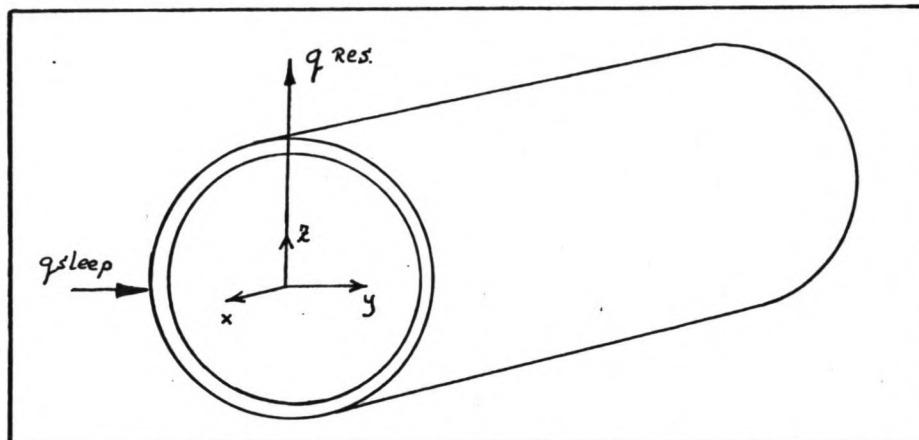
De maximale dwarskracht $1/2 q l$ (zie figuur 22 c). Hier is geen gelijkmatig verdeelde belasting van de sleepkracht of van de resulterende opdrijvende kracht.



Figuur 22 a,b,c: respectievelijk mechanisch model, momenten- en dwarskrachtenverdeling.

1. Moment.

Het moment veroorzaakt een normaal-spanning in de wand. Het verloop van de spanning over de tunnelwand is te splitsen in een spanning ten gevolge van de sleepkracht en een spanning ten gevolge van de resulterende opwaartse kracht (zie figuur 23).



Figuur 23: Werkrichting sleep- en opwaartse kracht

Spanning ten gevolge van sleepkracht:

$$\sigma_{xx} = \frac{M \cdot y}{I_{yy}} \quad \text{met } M = 1/8 q_{sleep} l^2$$

$$y = \text{afstand tot n.l.} = 7,5$$

$$I_{yy} = \frac{\pi \cdot (d_u^4 - d_i^4)}{64}$$

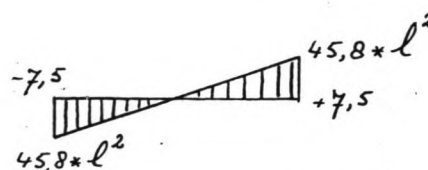
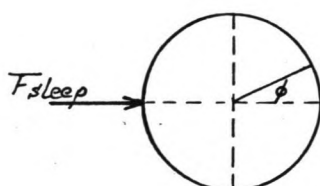
$$\sigma_{xx} = \frac{q_{sleep} \cdot l^2 \cdot 64 \cdot y}{8\pi \cdot (d_u^4 - d_i^4)} = 6,1 \cdot l^2 \cdot y \text{ N/m}^2$$

De maximale waarden voor σ_{xx} ten gevolge van de sleepkracht treden op voor $y = +\frac{1}{2}d_u$ en $y = -\frac{1}{2}d_u$ resp. +7,5 m en -7,5 m.

$$\sigma_{xx} \text{ max.} = \pm 45,8 \cdot l^2 \text{ N/m}^2$$

Het verloop van T_{xx} over de tunnelwand is:

$$\sigma_{xx}(\phi) = 45,8 \cdot l^2 \cdot \cos \phi$$



Spanningen ten gevolge van de resulterende opwaartse kracht.

$$\sigma_{xx} = \frac{M \cdot z}{I_{zz}} \quad \text{met } M = 1/8 q_{\text{res}} l^2$$

$$I_{zz} = \frac{\pi (d_u^4 - d_i^4)}{64}$$

z = afstand tot n.l. bij belasting door q_{res}

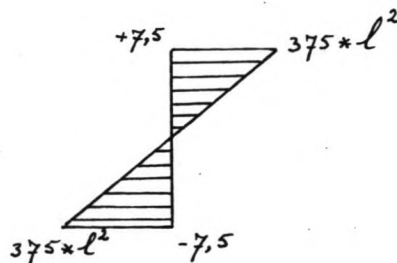
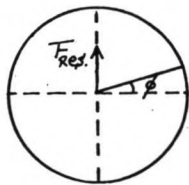
$$\sigma_{xx} = \frac{q_{\text{res}} \cdot l^2 \cdot 64 \cdot z}{8\pi (d_u^4 - d_i^4)} = 49,9 \cdot l^2 \cdot z$$

De maximale waarden voor σ_{xx} ten gevolge van de resulterende opwaartse kracht treden op voor $z = +\frac{1}{2}d_u$ en $z = -\frac{1}{2}d_u$ respectievelijk +7,5 m en -7,5 m.

$$\sigma_{xx} \text{ max.} = \pm 375 \cdot l^2$$

Het verloop van σ_{xx} over de omtrek is:

$$\sigma_{xx}(\varnothing) = 375 \cdot l^2 \cdot \sin \varnothing$$



De maximale spanning teedt op daar waar de som van de spanningen van sleepkracht en resulterende opdrijvende kracht maximaal is:

$$\sigma_{xx}(\varnothing) = 45,8 \cdot l^2 \cdot \cos \varnothing + 375 \cdot l^2 \cdot \sin \varnothing$$

$$\text{Extreem als } \frac{d \sigma_{xx}(\varnothing)}{d(\varnothing)} = 0$$

$$45,8 \cdot l^2 \cdot \sin \varnothing = 375 \cdot l^2 \cdot \cos \varnothing$$

$$\varnothing = \arctan \frac{375}{45,8}$$

$$\text{voor } \varnothing = 83^\circ, 173^\circ$$

$$\sigma_{xx} \text{ max.} = \pm 378 \cdot l^2 \text{ N/m}^2$$

Als we de lengte van een tunnelelement 50 meter nemen dan is $\sigma_{xx} \text{ max.} = 0,945 \text{ N/mm}^2$. Vermenigvuldigen we dit met de veiligheidsfactor $\gamma (=1,7)$ dan wordt $\sigma_{xx} = 1,6 \text{ N/mm}^2$. Bij toepassing van betonkwaliteit B22,5 (met een $\sigma_{\text{toel.}} = 1,3 \text{ N/mm}^2$) is een gering wapeningspercentage nodig om de spanning op te nemen.

2. Dwarskracht.

De dwarskracht veroorzaakt een schuifspanning in de wand. We splitsen de dwarskracht weer op in een dwarskracht ten gevolge van de sleepkracht en een dwarskracht ten gevolge van de resulterende opdrijvende kracht.

Schuifspanning ten gevolge van sleepkracht.

$$\sigma_{yx} = \frac{Q \cdot S}{b \cdot I} \quad \text{waarin } Q = \frac{1}{2} \cdot q_{\text{sleep}} \cdot l$$

$$S = 2Rd \sqrt{R^2 - y^2}$$

$$b = 2d$$

$$I = \pi \cdot R^3 \cdot d$$

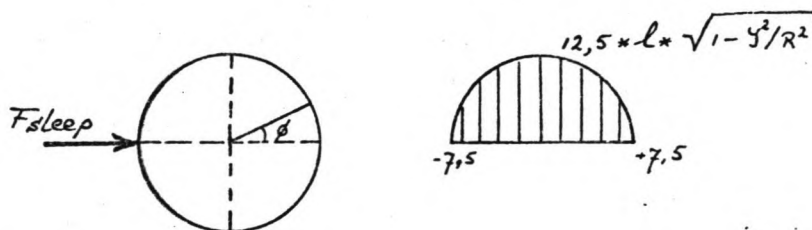
$$d = \text{wanddikte}$$

$$R = \frac{1}{2}(d_u + d_i) = 7,15$$

$$\sigma_{yx} = \frac{q_{\text{sleep}} \cdot l \cdot 2 \cdot R \cdot d}{2 \cdot 2 \cdot d \cdot \pi \cdot R^3 \cdot d} \cdot \sqrt{R^2 - y^2}$$

$$= \frac{q_{\text{sleep}} \cdot l}{2 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot d} \cdot \sqrt{R^2 - y^2}$$

$$\sigma_{yx} = \frac{39,2 \cdot 1}{2 \cdot \pi \cdot 7,15 \cdot 0,7} \cdot \sqrt{1 - \frac{y^2}{R^2}} = 12,5 \cdot 1 \cdot \sqrt{1 - \frac{y^2}{R^2}}$$



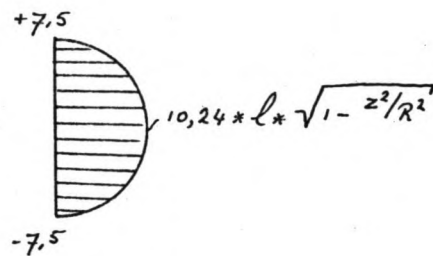
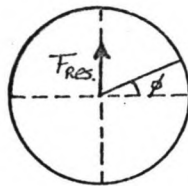
Het verloop van σ_{yx} over de tunnelwand is:

$$\sigma_{yx}(\theta) = 1,25 \cdot 1 \cdot \sin \theta$$

Schuifspanningen ten gevolge van de resulterende opwaartse kracht.

$$\tau_{zx} = \frac{q_{res} \cdot l}{2 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot d} \cdot \sqrt{R^2 - z^2}$$

$$\tau_{zx} = \frac{322 \cdot 1}{2 \cdot \pi \cdot 7,15^2 \cdot 0,7} \cdot \sqrt{1 - \frac{z^2}{R^2}} = 10,24 \cdot 1 \cdot \sqrt{1 - \frac{z^2}{R^2}} \text{ kN/m}^2$$



Het verloop van de schuifspanning over de tunnelwand is:

$$\tau_{zx} = 1024 \cdot 1 \cdot \cos \phi$$

De maximale T_{zx} treedt op daar waar de som van de T_{zx} van sleepkracht en die van de resulterende opwaartse kracht maximaal is.

$$\tau_{\phi x} = 1,25 \cdot 1 \cdot \sin \phi + 10,24 \cdot 1 \cdot \cos \phi$$

$$\text{Dit is als } \frac{d \tau_{\phi x}(\phi)}{d \phi} = 0$$

$$1,25 \cdot 1 \cdot \cos \phi = 10,24 \cdot 1 \cdot \sin \phi$$

$$\phi = \arctan \frac{1,25}{10,24}$$

$$\phi = 7^\circ$$

$$\tau_{\phi x}(7^\circ) = 10,32 \cdot 1 \text{ kN/m}^2$$

Bij een 50 meter lang tunnelelement is $\tau_{\phi x} \text{ max.} = 0,516 \text{ N/mm}^2$. Vermenigvuldigen we dit met $\gamma = 1,7$ dan wordt $\tau_{\phi x} = 0,877 \text{ N/mm}^2$. Voor B22,5 is een τ van $0,65 \text{ N/mm}^2$ toelaatbaar. Een gering wapeningspercentage is dus ook hier voldoende.

Conclusie: De wanddikte van 0,7 meter lijkt in eerste instantie te voldoen. De druk in de tunnelwand ten gevolge van de alzijdige waterdruk is $4,3 \text{ N/mm}^2$

(toelaatbaar $13,5 \text{ N/mm}^2$).

De trekspanning ten gevolge van een moment in langsrichting is $1,6 \text{ N/mm}^2$ bij een lengte van 50 meter (toelaatbaar $1,3 \text{ N/mm}^2$).

De schuifspanning ten gevolge van de dwarskracht in langsrichting is $0,877 \text{ N/mm}^2$ (toelaatbaar $0,65 \text{ N/mm}^2$).

Voor opname van het moment en de dwarskracht moet een gering wapeningspercentage worden aangebracht. Wel moet in een later stadium worden onderzocht hoe de situatie verandert door introductie van de kabelkrachten en de verkeersbelasting.

6. Berekening van de kabelkrachten en de verplaatsingen.

6.1 Berekeningsmethode.

Na plaatsing van een tunnelelement hebben de kabels waarmee dit tunnelelement verankerd is allen een bepaalde afspankracht gekregen. Er is hierdoor evenwicht van verticale- en horizontale krachten en er is momentenevenwicht.

De kracht die de tunnel op het verankeringsysteem uitoefent kan echter veranderen door bijvoorbeeld verkeer door- en stromingskrachten op de tunnel. Als gevolg hiervan veranderen ook de krachten in de kabels.

De schuine doorhangende kabels hebben een ideële elasticiteitsmodulus die varieert met de in de kabel aanwezige spanning en wel als volgt:

$$E_i = \frac{E_e}{1 + \frac{(\gamma \cdot g \cdot a)^2}{12 \cdot \sigma^3} \cdot E_e} \quad (1)$$

waarin E_e = elasticiteitsmodulus van rechte kabel

γ = specifiek volume gewicht kabel

a = hor. proj. lengte van de kabel

σ = optredende kabelspanning

g = versnelling ten gevolge van de zwaartekracht.

Ieder stukje kabel heeft een andere ideële elasticiteitsmodulus omdat de, in de lengterichting van de kabel, ontbondene van het eigen gewicht de spanning in de kabel doet toenemen van beneden naar boven.

De ideële elasticiteitsmodulus voor de hele kabel kan dan worden geschreven als:

$$E_i = \frac{E_e}{1 + \frac{(\gamma \cdot g \cdot a)^2}{12 \sigma_m^3} \cdot \frac{(1 + \mu)^4}{16 \mu^2} \cdot E_e} \quad (2)$$

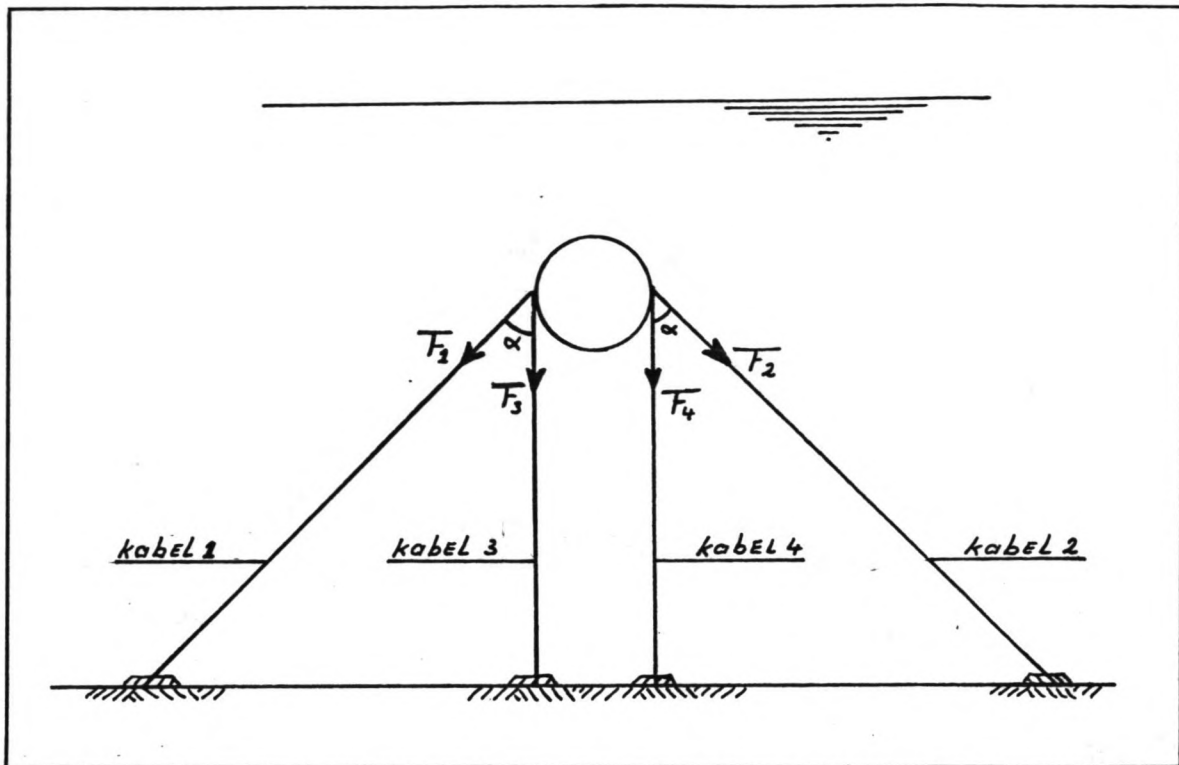
waarin $\sigma_m = \frac{a + b}{2}$

$\mu = \sigma_a / \sigma_b$

σ_a = kabelspanning bij de bodem

σ_b = kabelspanning bij de tunnel

Voor de afleiding van de formules (1) en (2) zie bijlage 2.



Figuur 24: Overzichtstekening van het verankeringsysteem

De verlenging van een kabel is te schrijven als:

$$\Delta = \frac{dF \cdot l}{E \cdot A}$$

Voor de rechte kabels 3 en 4 wordt dit $\Delta_m = \frac{dF_m \cdot l_m}{E_e \cdot A_m}$

A = kabeldoorsnede, l = kabellengte, Δ = verlenging, m = 3,4.

Voor de schuine kabels 1 en 2 mag niet zonder meer dF worden aangenomen om de verlenging te bepalen, maar moet de kracht worden geïntegreerd van F tot F + dF.

De reden hiervoor is dat de Ei varieert (ideële elasticiteitsmodulus) met de in de kabel aanwezige kracht. De formule wordt dus:

$$\Delta_n = \int_{F_n}^{F_n + dF_n} \frac{dF \cdot l_n}{E_{in} \cdot A_n}$$

Substitueren we voor Ei formule 2 en schrijven we de integraal uit dan krijgen we:

$$\Delta n = \frac{dF_n \cdot \ln}{E_e \cdot A_n} \left\{ 1 + \frac{(g \cdot \gamma \cdot a)^2 \cdot A_n^3 \cdot (1 + \mu_n)^4 \cdot E_e \cdot (2F_n + dF_n)}{24 \cdot (F_n + dF_n)^2 \cdot F_n^2 \cdot 16 \cdot \mu_n^2} \right\}$$

$n = 1, 2$

De krachtsverandering dF in een kabel hangt af van de verhouding van de verlengingen van de verschillende kabels. In de formules van de verlengingen is de nog te bepalen waarde van dF al aanwezig. De waarde voor dF moet dus op iteratieve wijze bepaald worden.

Voor de bepaling van de uiteindelijke kabelkrachten gaan we als volgt te werk. Eerst wordt de verticale kracht op de tunnel bekeken. Op iteratieve wijze worden de lengteveranderingen en de krachtsveranderingen van de kabels bepaald.

Vervolgens wordt de horizontale kracht op de tunnel bekeken. De kabelkrachten zijn op dat moment de afspankrachten vermeerderd met de krachtsveranderingen in de kabel ten gevolge van de verticale kracht. Dit omdat we voor de juiste bepaling van de lengte- en krachtsveranderingen over het goede interval F tot $dF + F$ moeten integreren. De iteratief bepaalde lengte- en krachtsveranderingen ten gevolge van de horizontale kracht worden opgeteld bij de lengteveranderingen en kabelkrachten die de kabels hadden voordat de horizontale kracht werd aangebracht.

Tenslotte worden bij de dan in de kabel aanwezige spanningen en opgetreden lengteveranderingen de krachtsveranderingen en lengteveranderingen opgeteld ten gevolge van het moment van een excentrische verkeerslast. Dit geeft de uiteindelijke kabelkrachten en lengteveranderingen. Met de lengteveranderingen kan ook de verplaatsing van de tunnel berekend worden.

Zoals hiervoor is vermeld worden de horizontale kracht, de horizontale kracht en het moment na elkaar ingevoerd. Dit is gedaan omdat een combinatie van de krachten met

elkaar of met het moment een krachtstoename van ongeveer 0 in een kabel tot gevolg zou kunnen hebben. Bij het iteratief oplossen wordt gebruik gemaakt van de verhoudingen van de lengteveranderingen van de verschillende kabels. Een krachtstoename van 0 betekent een lengteverandering van 0 en een getal gedeeld door 0 is oneindig. We krijgen dan de indruk dat een kabel met een verlenging 0 niet meewerkt terwijl de dF van de andere kabel ∞ zou worden.

Om de iteratie te starten gaan we uit van beginwaarden. Als we de iteratie snel willen laten verlopen is het zaak de beginwaarde dicht bij de eindwaarden te kiezen. Bij de bepaling van de beginwaarden gaan we daarom uit van het mechanisch model van de tunnel maar als E_i voor de schuine kabels nemen we dezelfde waarde als de E_e van de rechte kabels.

In de bijlage 3 zijn de beginwaarden voor de ten gevolge van krachtsveranderingen vertikale kracht dV , de horizontale dH en het moment M bepaald.

Ze zijn hieronder in tabelvorm aangegeven.

	dV	dH	M
$dF1$	$\frac{dV \cdot \cos^2 \alpha}{2(\cos^3 \alpha + A4/A2)}$	$+dH/2 \cdot \sin \alpha$	0
$dF2$	$\frac{dV \cdot \cos^2 \alpha}{2(\cos^3 \alpha + A4/A2)}$	$-dH/2 \cdot \sin \alpha$	0
$dF3$	$dV/2 \left(\frac{A2}{A4} \cos^3 \alpha + 1 \right)$	$-dH/2 \cdot \tan \alpha$	$-M/B$
$dF4$	$dV/2 \left(\frac{A2}{A4} \cos^3 \alpha + 1 \right)$	$+dH/2 \cdot \tan \alpha$	M/B

Tabel 2: Beginwaarden voor de toename van de kabelkrachten bij een vertikale kracht dV , een horizontale kracht dH en een moment M .

Het iteratieproces verloopt als volgt:

1. Vertikale kracht:

Een verticale kracht dV wordt als volgt over de vier kabels verdeeld.

$$dF1 = \frac{dV}{2(\cos \alpha + 1/B2)}$$

$$dF2 = \frac{dV}{2(\cos \alpha + 1/B2)}$$

$$dF3 = \frac{dV}{2(\cos \alpha * B2 + 1)}$$

$$dF4 = \frac{dV}{2(\cos \alpha * B2 + 1)}$$

$$\text{Waarin: } B2 = \frac{dF1 * 1}{\Delta 1 * Ee * A4} \left(2 \cos \alpha - \frac{1}{24} \right)$$

$$\beta 24 = \Delta 4 / \Delta 2 \text{ ofwel uitgeschreven}$$

$$\beta 24 = \frac{dF4 * \cos \alpha * A2}{A4 * dF2 \left\{ 1 + \frac{(g * \gamma * a)^2 * A2^3 * (1 + \mu_2)^4 * Ee * (2F2 + dF2)}{24 * (F2 + dF2)^2 * F2^2 * 16 * \mu_2^2} \right\}}$$

$$\Delta 1 = \frac{dF1 * 1}{Ee * A1 * \cos \alpha} \left\{ 1 + \frac{(\gamma * g * a)^2 * A1^3 * (1 + \mu_1)^4 * Ee * (2F1 + dF1)}{24 * (F1 + dF1)^2 * F1^2 * 16 * \mu_1^2} \right\}$$

De beginwaarden van $dF1$ tot en met $dF4$ worden ingevuld om $\Delta 1$ en $\beta 24$ te bepalen. Hieruit is dan de waarden voor $B2$ te berekenen. Met deze waarde voor $B2$ is een verbeterde waarde voor $dF1$ tot en met $dF4$ te berekenen. Deze verbeterde waarden van $dF1$ tot en met $dF4$ kunnen ingevuld worden om $\Delta 1$ en $\beta 24$ opnieuw te bepalen. Hieruit is de verbeterde waarde van $B2$ te berekenen. Met deze verbeterde waarde voor $B2$ kunnen opnieuw de waarden voor $dF1$ tot en met $dF4$ worden berekend. Dit proces kan worden herhaald tot de vereiste nauwkeurigheid is bereikt.

Is de vereiste nauwkeurigheid bereikt dan kunnen de lengteveranderingen van de verschillende kabels worden bepaald en ook de hierbij behorende krachtsveranderingen. De afspankrachten vermeerderd met de krachtsveranderingen zijn

de nieuwe kabelkrachten die gebruik worden als uitgangswaarden voordat de horizontale kracht wordt aangebracht.

2. Horizontale kracht:

Een horizontale kracht dH wordt als volgt over de vier kabels verdeeld.

$$dF1 = \frac{dH}{\sin \alpha (1 + 1/B3)}$$

$$dF2 = \frac{-dH}{\sin \alpha (B3 + 1)}$$

$$dF3 = \frac{-dH}{\tan \alpha (1 + 1/B3)}$$

$$dF4 = \frac{dH}{\tan \alpha (B3 + 1)}$$

$$\text{Waarin: } B3 = \frac{(\cos \alpha - 1/\beta_{24})}{(\cos \alpha - 1/\beta_{13})}$$

$$\beta_{24} = \frac{\Delta 4}{\Delta 2} \text{ ofwel}$$

$$\beta_{24} = \frac{dF4 \cdot \cos \alpha \cdot A2}{A4 \cdot dF2} * \frac{1}{\left\{ 1 + \frac{(\gamma \cdot g \cdot a)^2 \cdot A2^3 \cdot (1 + \mu_2)^4 \cdot Ee \cdot (2F2 + dF2)}{24 \cdot (F2 + dF2)^2 \cdot F2^2 \cdot 16 \cdot \mu_2^2} \right\}}$$

$$\beta_{13} = \frac{\Delta 3}{\Delta 1} = \frac{dF3 \cdot \cos \alpha \cdot A1}{A3 \cdot dF1} * \frac{1}{\left\{ 1 + \frac{(\gamma \cdot g \cdot a)^2 \cdot A1^3 \cdot (1 + \mu_1)^4 \cdot Ee \cdot (2F1 + dF1)}{24 \cdot (F1 + dF1)^2 \cdot F1^2 \cdot 16 \cdot \mu_1^2} \right\}}$$

De in tabel vermelde beginwaarden voor dF1 tot en met dF4 ten gevolge van horizontale kracht dH worden ingevuld om β_{13} en β_{24} te bepalen. Hieruit is dan de waarde voor B3 te berekenen. Met deze waarde voor B3 is een verbeterde waarden van dF1 tot en met dF4 worden gebruikt om β_{13} en β_{24} opnieuw te bepalen. Hieruit is de verbeterde waarde van B3 te berekenen. Met deze verbeterde waarde voor B3

kunnen opnieuw de waarden voor dF_1 tot en met dF_4 worden berekend. Dit proces kan worden herhaald tot de vereiste nauwkeurigheid is bereikt.

Is de vereiste nauwkeurigheid bereikt dan kunnen de lengteveranderingen van de verschillende kabels worden bepaald en ook de hierbij behorende krachtsveranderingen ten gevolge van de horizontale kracht. De nieuwe kabelkrachten zijn de kabelkrachten na het aanbrengen van de vertikale krachten vermeerderd met de krachtveranderingen ten gevolge van de horizontale kracht.

De lengteveranderingen op dat moment zijn de lengteveranderingen ten gevolge van de vertikale kracht plus die ten gevolge van de horizontale kracht.

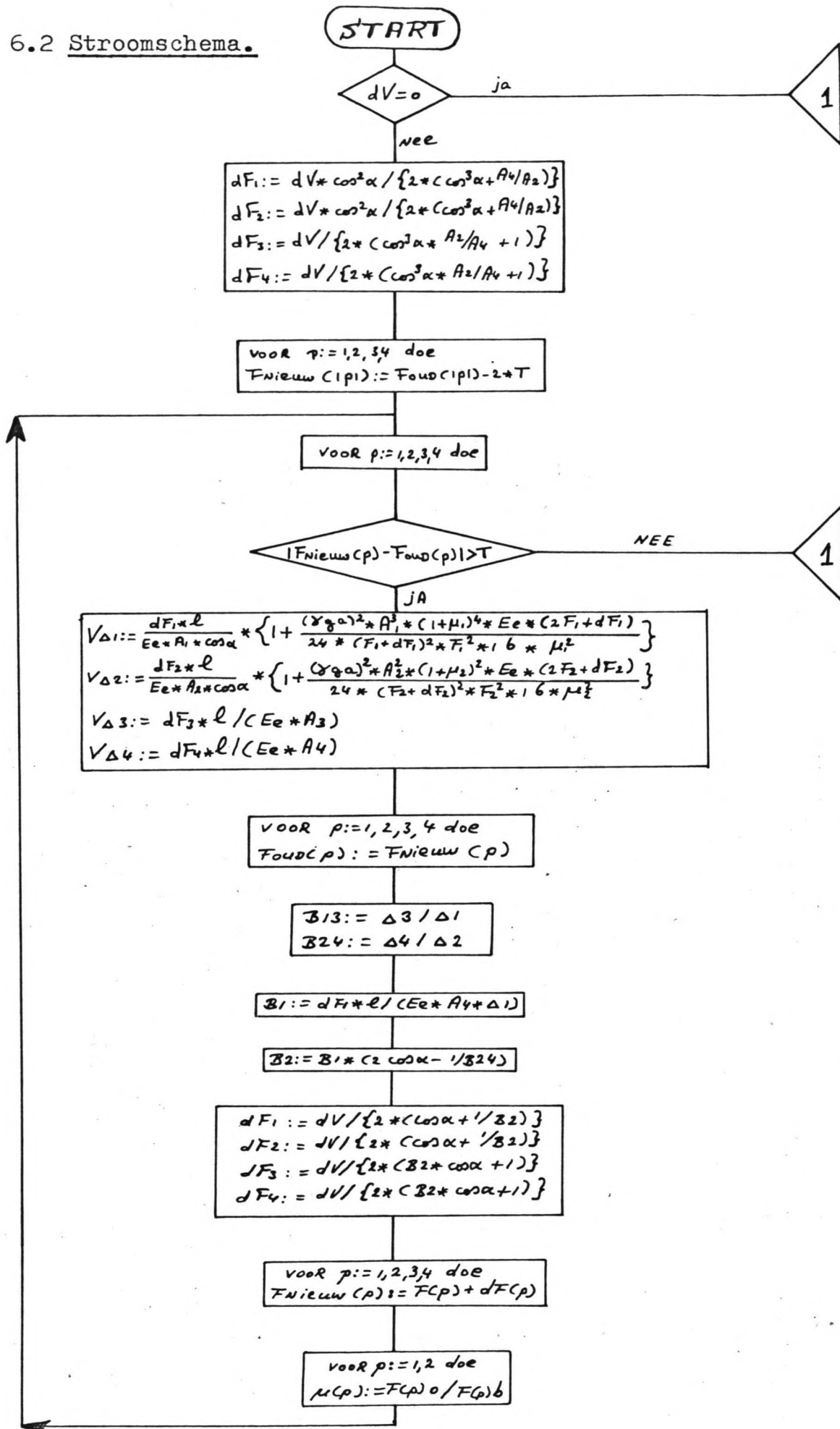
3. Het moment (ten gevolge van de excentrische verkeerslast).

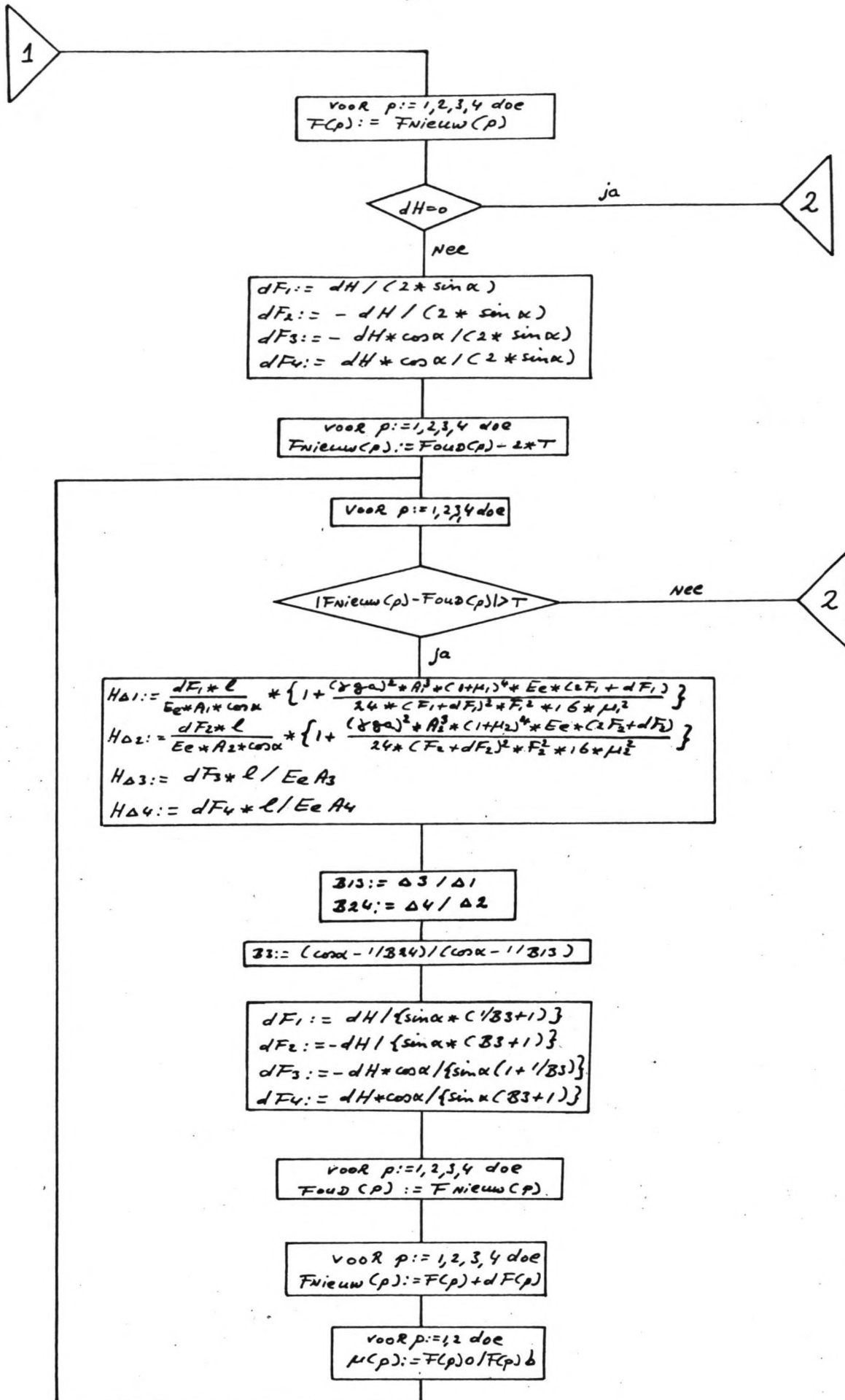
Voor het moment ligt het een stuk eenvoudiger omdat dit alleen door de vertikale kabels 3 en 4 wordt opgenomen.

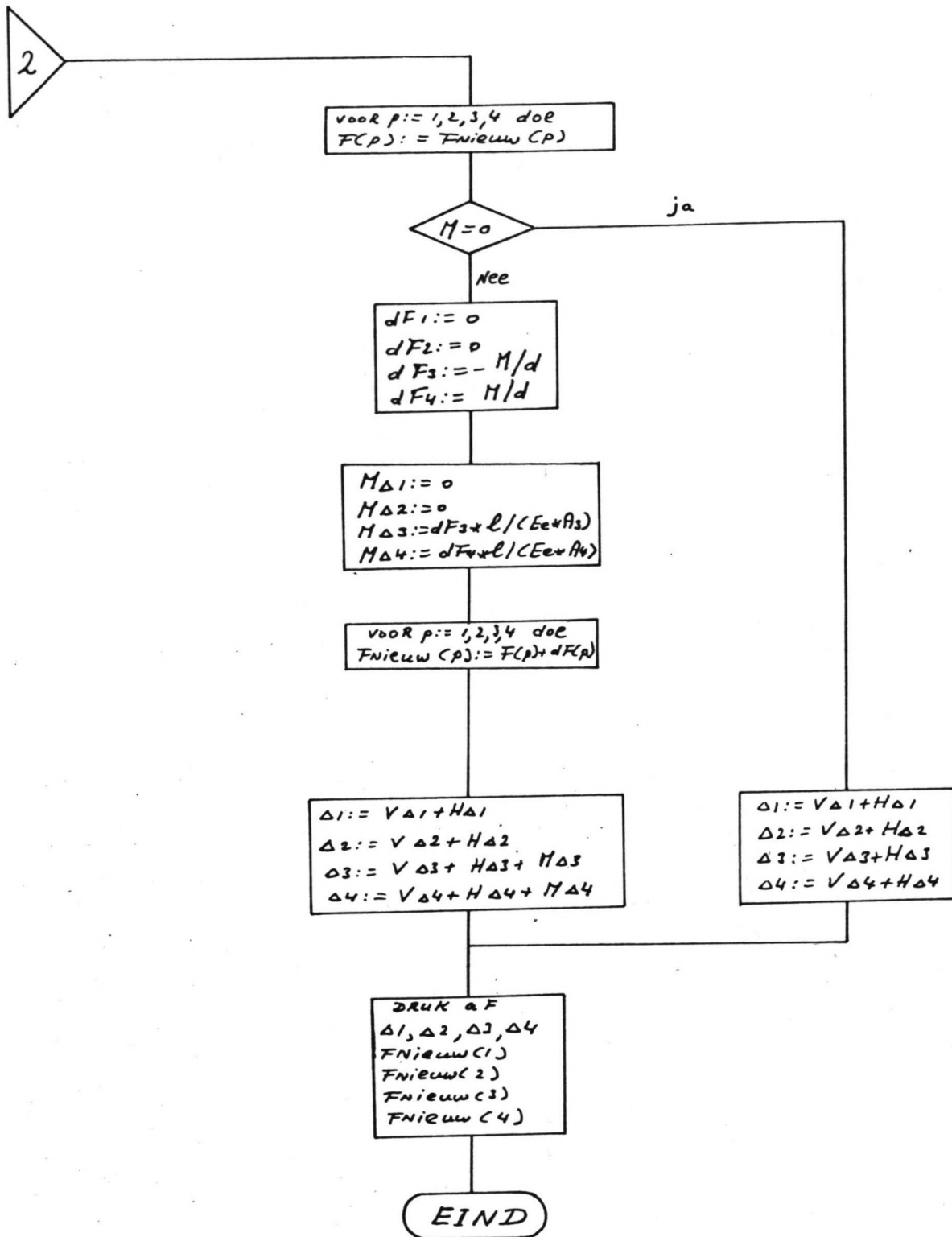
$$\begin{array}{ll} dF_1 = 0 & \Delta 1 = 0 \\ dF_2 = 0 & \Delta 2 = 0 \\ dF_3 = -M/B & \Delta 3 = -\frac{M \cdot l}{B \cdot Ee \cdot A_3} \\ dF_4 = M/B & \Delta 4 = \frac{M \cdot l}{B \cdot Ee \cdot A_4} \end{array}$$

De uiteindelijke kabelkrachten zijn die kabelkrachten nadat de horizontale kracht was aangebracht plus die ten gevolge van het moment. De kabelkrachten 1 en 2 veranderen dus niet ten gevolge van het moment. Ditzelfde geldt voor de lengteveranderingen van de kabels 1 en 2. Bij de lengteveranderingen die de kabels 3 en 4 hebben nadat de horizontale kracht is aangebracht moeten nog de lengteveranderingen ten gevolge van het moment worden opgeteld.

6.2 Stroomschema.







Lijst van symbolen in alfabetische volgorde.

- a = hoek tussen schuine en verticale kabels.
- a tot = totaal gebruikte hoeveelheid kabel/afstand van
tunnel tot bodem.
- a1 min = kabeldoorsnede kabel 1.
- a2 min = kabeldoorsnede kabel 2.
- a3 min = kabeldoorsnede kabel 3.
- a4 min = kabeldoorsnede kabel 4.
- B = kabelgewicht onder water van kabels 1 en 2.
- B1 = $DF1 \cdot l / (EE \cdot A4 \text{ min} \cdot \text{del } 1)$.
- B13 = kabelverlenging kabel 3/kabelverlenging kabel 1.
- B2 = $B1 \cdot (2 \cos a - 1/B24)$.
- B24 = kabelverlenging kabel 4/kabelverlenging kabel 2.
- B3 = $(\cos a - 1/B24 / \cos a - 1/B13)$.
- c = kabelgewicht onder water van kabels 3 en 4.
- d = afstand tussen bevestigingspunten van de ankerkabels
links en rechts.
- delm 3 = kabelverlenging van kabel 3 ten gevolge van moment M.
- delm 4 = kabelverlenging van kabel 4 ten gevolge van moment M.
- delt 1 = kabelverlenging van kabel 1 ten gevolge van horizon-
tale kracht dH.
- delt 2 = kabelverlenging van kabel 2 ten gevolge van horizon-
tale kracht dH.
- delt 3 = kabelverlenging van kabel 3 ten gevolge van horizon-
tale kracht dH.
- delt 4 = kabelverlenging van kabel 4 ten gevolge van horizon-
tale kracht dH.
- del 1 = kabelverlenging van kabel 1 ten gevolge van verticale
kracht dV.
- del 2 = kabelverlenging van kabel 2 ten gevolge van verticale
kracht dV.
- del 3 = kabelverlenging van kabel 3 ten gevolge van verticale
kracht dV.
- del 4 = kabelverlenging van kabel 4 ten gevolge van verticale
kracht dV.

DF1	= toename van kabelkracht 1 ten gevolge van belasting.
DF2	= toename van kabelkracht 2 ten gevolge van belasting.
DF3	= toename van kabelkracht 3 ten gevolge van belasting.
DF4	= toename van kabelkracht 4 ten gevolge van belasting.
DGV	= gemiddelde vertikale zakking (gemiddelde van zakking links en rechts).
DH	= toename horizontale kracht.
DI	= inwendige tunneldiameter.
DLH	= verplaatsing links in horizontale richting.
DLV	= verplaatsing links in verticale richting.
DRH	= verplaatsing rechts in horizontale richting.
DRV	= verplaatsing rechts in verticale richting.
DU	= uitwendige tunneldiameter.
DV	= toename verticale kracht.
EE	= elasticiteitsmodulus staal.
F	= specifiek volume gewicht van staal onder water.
FEG	= zwaartekracht op tunnel.
F nieuw	= de nieuwe
F opw.	= opwaartse kracht op tunnel.
F oud	= de kabelkracht voordat de interactie wordt doorlopen.
FR	= resulterende opwaartse kracht.
FV1	= verticale component van kabelkracht 1.
FV2	= verticale component van kablekracht 2.
F1B	= kabelkracht kabel 1 bij de tunnel.
F1G	= $(F1B + F10)/2$ ofwel gemiddelde kabelkracht 1.
F1H	= horizontale component van kabelkracht 1.
F10	= kabelkracht kabel 1 onder bij de bodem.
F2B	= kabelkracht kabel 2 boven bij de tunnel.
F2G	= $(F2B + F20)/2$ ofwel gemiddelde kabelkracht 2.
F2H	= horizontale component van kabelkracht 2.
F20	= kabelkracht kabel 2 onder bij de bodem.
F3	= kabelkracht kabel 3 boven bij de tunnel.
F30	= kablekracht kabel 3 onder bij de bodem.
F4	= kabelkracht kabel 4 boven bij de tunnel.
F40	= kabelkracht kabel 4 onder bij de bodem.
G	= zwaartekrachtsversnelling $9,813 \text{ m/s}^2$.

HDF1	= hulpwaarde voor toename van kabelkracht 1.
HDF2	= hulpwaarde voor toename van kabelkracht 2.
HDF3	= hulpwaarde voor toename van kabelkracht 3.
HDF4	= hulpwaarde voor toename van kabelkracht 4.
I	= constante.
l	= lengte van bevestigingspunt kabels aan de tunnel tot bodem.
L1	= label 1.
L2	= label 2.
M	= moment ten gevolge van verkeersbelasting.
M1	= verhouding kabelkracht 1 onder/kabelkracht 1 boven.
M2	= verhouding kabelkracht 2 onder/kabelkracht 2 boven.
P	= integer getal lopend van 1 tot en met 4 (aantal kabels).
R Bet	= soortelijke massa beton 2500 kg/m^3 .
R Z	= soortelijke massa zeewater 1027 kg/m^3 .
T	= nauwkeurigheid waarmee kabelkrachten moeten worden berekend.
Z	= verhouding afspankrachten, verticale komponent kabels 1 of 2/kabelkracht kabel 3 en 4.

6.3 Programma + uitvoer in Algol 60.

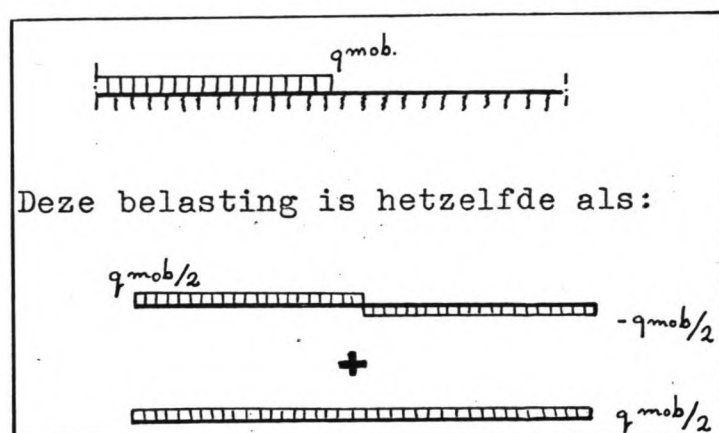
Voor het computerprogramma in de programmeertaal Algol 60 en de uitvoer zie bijlage 4 nummer 1.

7. Optimaliseren van het verankeringsysteem.

7.1 Economische optimalisatie.

Het is onmogelijk te kiezen voor het economisch meest aantrekkelijke verankeringsysteem zonder de rest van de constructie in de beschouwing mee te nemen.

Bij het passeren van verkeer door- en stromingskrachten op de tunnel worden dwarskrachten en momenten geïntroduceerd. De grootte van deze dwarskrachten en momenten wordt beïnvloed door de grootte van de verplaatsingen die het verankerings-systeem toelaat (ofwel de veerconstante van het verankerings-systeem). Dit is als volgt in te zien. We beschouwen de tunnel met verankeringsysteem als een verend ondersteunde ligger, die oneindig lang is. Als deze voor de helft met verkeer belast is, is de belasting als volgt:



mobile belasting op verend ondersteunde ligger.

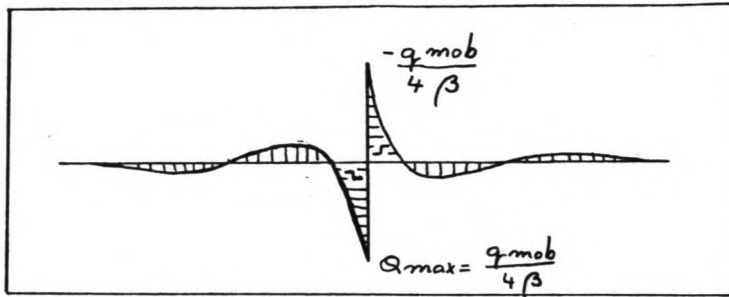
Figuur 25: Mobile belasting op verend ondersteunde ligger.

Ten gevolge van gelijkmatig verdeelde belasting $q^{mob./2}$ treedt een zakking van de tunnel op over de hele lengte. Door de belasting die bij $x = 0$ van teken wisselt worden behalve verplaatsingen ook dwarskrachten en momenten veroorzaakt.

Het verloop van de dwarskracht is

$$Q = \frac{q^{mob}}{4\beta} * e^{-\beta x} \{ \cos \beta x - \sin \beta x \} \quad \text{voor } x > 0$$

$$Q = - \frac{q^{mob}}{4\beta} * e^{-\beta x} \cos \beta x - \sin \beta x \quad \text{voor } x < 0$$

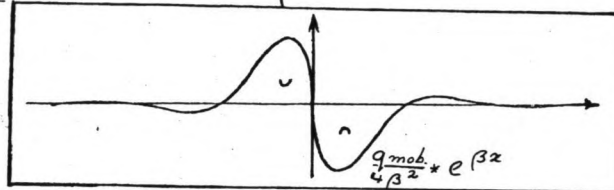


Figuur 26a: dwarskrachtenverloop.

Het verloop van het moment is

$$M = \frac{q_{mob}}{4\beta^2} e^{-\beta x} \sin \beta x \quad \text{voor } x > 0$$

$$M = \frac{q_{mob}}{4\beta^2} e^{\beta x} \sin \beta x \quad \text{voor } x < 0$$



Figuur 26b: momentenverloop.

Hier is $\beta = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}}$, k de veerstijfheid van de verankering, EI de buigstijfheid van de tunnelkoker

Om een uitspraak te doen over de grootte van het moment en de dwarskracht, moet voor het verankeringssysteem de veerconstante (k) bekend zijn. We berekenen de veerconstante voor het verankeringssysteem met de minimale horizontale verplaatsing (zie 7.2.2).

Dit verankeringssysteem heeft schuine kabels met een doorsnede van $1000 \text{ mm}^2/\text{m}^1$, rechte kabels met een doorsnede van $875 \text{ mm}^2/\text{m}^1$. De hoek tussen de schuine en verticale kabels is 1,44 radialen. De verhouding tussen de verticale component van de schuine kabels en die van de verticale kabels is 1,1.

Veerstijfheid:

in verticale richting

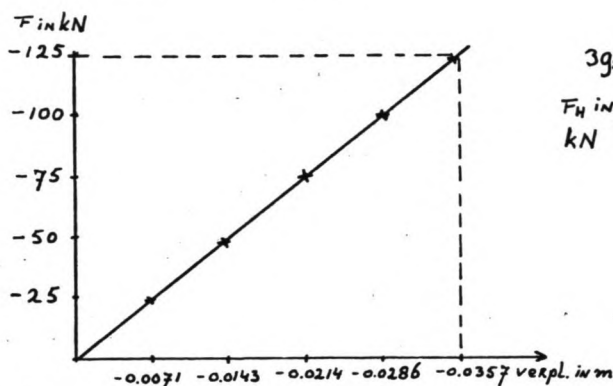
D Vert.	verpl. vert. (m)
0	0
- 25kN	-.0071
- 50kN	-.0143
- 75kN	-.0214
-100kN	-.0286
-125kN	-.0357

in horizontale richting

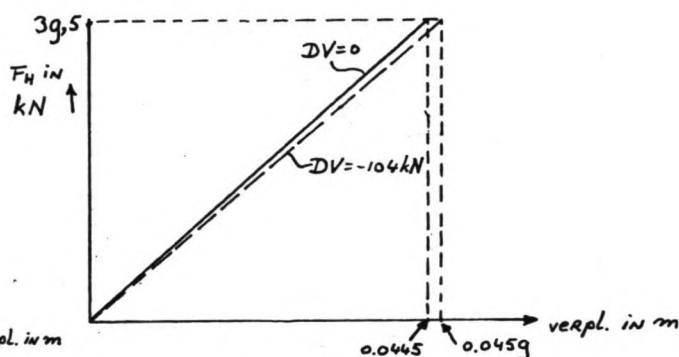
D Hor.	verpl. hor.	verpl. hor.
0	0	0
20kN	0,0225m	0,0232m
39,5kN	0,0445m	0,0459m
	DV = 0	DV = -104kN

M = 0

D Hor. = M = 0



$$k_v = \frac{F}{w} = \frac{-125 \times 10^3}{-0.0357} = 3,5 \times 10^6 \text{ N/m}$$



$$k_H \text{ zonder } DV = \frac{39,5 \times 10^3}{0.0445} = 0,89 \times 10^6 \text{ N/m}$$

$$k_H \text{ met } DV = 0,86 \times 10^6 \text{ N/m}$$

De elasticiteitsmodulus van beton $E_b = 28 \times 10^9 \text{ N/m}^2$.

Als traagheidsmoment wordt genomen $I = \frac{\pi \cdot (d_u^4 - d_i^4)}{64} = 806 \text{ m}^4$

De bijdrage van de wanden in de tunnel en de stalen liner zijn dus even buiten beschouwing gelaten.

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{kh}{4EI}} = 0,014$$

$$M = \frac{q_{mob}}{2\beta^2} \cdot 0,161 = 42,7 \times 10^6 \text{ Nm (op 56 meter afstand van de plaats waar de verkeerslast is).}$$

$$Q = \frac{q_{mob}}{4\beta} = 1,86 \times 10^6 \text{ N}$$

Dit zijn niet te verwaarlozen waarden als we ze vergelijken

met de maximaal optredende dwarskracht en moment ten gevolge van de opdrijvende kracht, bij een kabelafstand van 50 m.

$$M \text{ max.} = 1/8 q_R \cdot l^2 = 100,6 \cdot 10^6 \text{ Nm}$$

$$Q \text{ max.} = 1/2 q_R \cdot l^1 = 8,05 \cdot 10^6 \text{ N}$$

Doordat dit moment en deze dwarskracht veroorzaakt worden door de mobiele belasting kunnen zij in ieder deel van de tunnel optreden.

Uit de formule voor het moment is te zien dat, wanneer de verplaatsing twee maal zo groot is het moment met een factor 2 toeneemt. De invloed van de grootte van de verplaatsingen op de dwarskracht is kleiner, namelijk $\sqrt[4]{2}$ (zie de formule voor de dwarskracht).

Grotere dwarskrachten en momenten leiden tot een zwaardere en dus duurder tunnelconstructie. Dit kan in het bijzonder gelden voor die plaatsen waar de tunnelelementen aan elkaar gekoppeld worden.

Een ander probleem dat zich voordoet bij passerende treinen is dat deze als het ware in een dal komen te rijden. Dit wordt veroorzaakt door de verplaatsing van de tunnel door het eigen gewicht van de trein. De locomotieven moeten de wagons dan tegen een helling voorttrekken. Zware goederentreinen met dieseltractie produceren daardoor meer verbrandingsgassen. Worden grote verplaatsingen van de tunnel geaccepteerd dan zou het kunnen zijn dat hierdoor grotere ventilatoren nodig zijn om de verbrandingsgassen af te voeren.

Bovenstaande factoren pleiten voor zo klein mogelijke verplaatsingen van de tunnel. Kleine verplaatsingen gaan echter gepaard met grote voorspankrachten in vooral de schuine kabels. Dit leidt niet alleen tot grotere kabeldiameter, maar ook de introductiekrachten in zowel bodem als tunnelconstructie zullen groter zijn. De bevestiging in de bodem zal hierdoor erg duur worden.

Bij de tunnel zullen voorzieningen moeten worden getroffen waar de kabelkrachten worden geïntroduceerd. Deze zullen zwaarder zijn naarmate de kabelkrachten groter zijn. Het kan vanuit dit oogpunt verstandiger zijn de tunnel extra te ballasten zodat kleinere kabeldiameters gebruikt kunnen worden, lichtere funderingsconstructies en lichtere voorzieningen om de kabelkrachten in de tunnelconstructie te introduceren. Het gevolg van extra ballasten is wel dat de verplaatsingen toenemen, wat eerder genoemde nadelen met zich mee zal brengen.

Inspectie van de kabels en vervanging hiervan, omdat ze door het agressief milieu zijn aangetast, zou bij zwaardere kabels minder vaak nodig zijn dan bij lichtere. Inspectie en vervanging van de kabels is een dure aangelegenheid. Ook dit aspect moet dus worden meegenomen bij het optimaliseren van het verankeringsstelsel.

Zouden we kiezen voor het goedkoopste verankeringsstelsel dan zou dit net voldoen aan de veiligheidseisen of er zouden maximaal toelaatbare verplaatsingen optreden. Vanuit economisch oogpunt zou het verstandiger kunnen zijn te kiezen voor een iets zwaarder verankeringsstelsel of een verankeringsstelsel waarbij de schuine verankeringskabels onder een andere hoek met de vertikaal staan. Wordt hierdoor de veiligheidscoëfficiënt groter dan zou inspectie minder vaak nodig zijn en de kabels zouden ook niet zo snel aan vervanging toe zijn. Zijn de verplaatsingen kleiner dan zijn de momenten en dwarskrachten kleiner en het zware goederenvervoer zou met minder moeite door de tunnel rijden en daarbij minder verbrandingsgassen produceren.

Het vinden van het economisch meest aantrekkelijke verankeringsstelsel is, door het groot aantal factoren dat hierbij een rol speelt, een erg moeilijke zaak.

7.2 Minimaliseren van de verplaatsingen.

1. Inleiding.

Het is belangrijk te weten hoe groot de verplaatsingen zijn. Een passerende trein zou (zoals reeds eerder vermeld) bij te grote verplaatsingen in verticale richting in een dal komen te rijden, waar hij zichzelf uit moet trekken.

Bij te grote verplaatsingen in horizontale richting door de stroming zouden er problemen ontstaan bij de overgang van de tunnel van zwevend naar vast op of in de bodem liggend. Tussen het ingeklemde of op de bodem liggende tunnelelement en het eerste zwevende zal er een hoek ontstaan. De vast op de betonconstructie bevestigde rail moet deze hoek volgen over een relatief korte afstand. Treinen zouden de rail hierdoor stootsgewijs kunnen belasten in horizontale richting. Door de wisselende stroming kunnen deze stoten in beide richtingen optreden.

Hetzelfde treedt eigenlijk op tussen het eerste en tweede zwevende tunnelelement.

Zijn de verplaatsingen in horizontale en verticale richting groot dan zijn er problemen te verwachten bij de koppelingen. Het is erg moeilijk hier een verbinding van te maken die even sterk en stijf is als de rest van de tunnel. Bij grote verplaatsingen in wisselende richting kan vermoeiing optreden met breuk en lekkage als gevolg.

In de volgende paragraaf zal worden bekeken wat de kleinste verplaatsingen zijn, die we met dit type verankeringsstelsel kunnen bereiken.

2. Methode en stroomschema.

Bij het minimaliseren van de verplaatsingen kunnen we het beste naar de minimale verplaatsing in horizontale richting werken. Het is namelijk mogelijk de verplaat-

sing in vertikale richting erg klein te maken maar dat gaat ten koste van de verplaatsing in horizontale richting. Die wordt dan erg groot. Minimaliseren van de horizontale verplaatsing levert zoals we later zullen zien een waarde voor de vertikale verplaatsing die kleiner is dan die in horizontale richting.

Het is belangrijk om van het maatgevende belastingsgeval uit te gaan bij het optimaliseren. Een andere belasting door verkeer of stroming mag geen grotere verplaatsingen geven. We zullen daarom controleren of het belastingsgeval dat we kiezen werkelijk de grootste verplaatsingen geeft bij het uiteindelijk gekozen verankeringsysteem.

We kiezen voor een maximale verkeersbelasting van 104 kN/m^1 en een maximale stromingskracht van $39,5 \text{ kN/m}^1$.

Er zijn drie waarden die kunnen variëren:

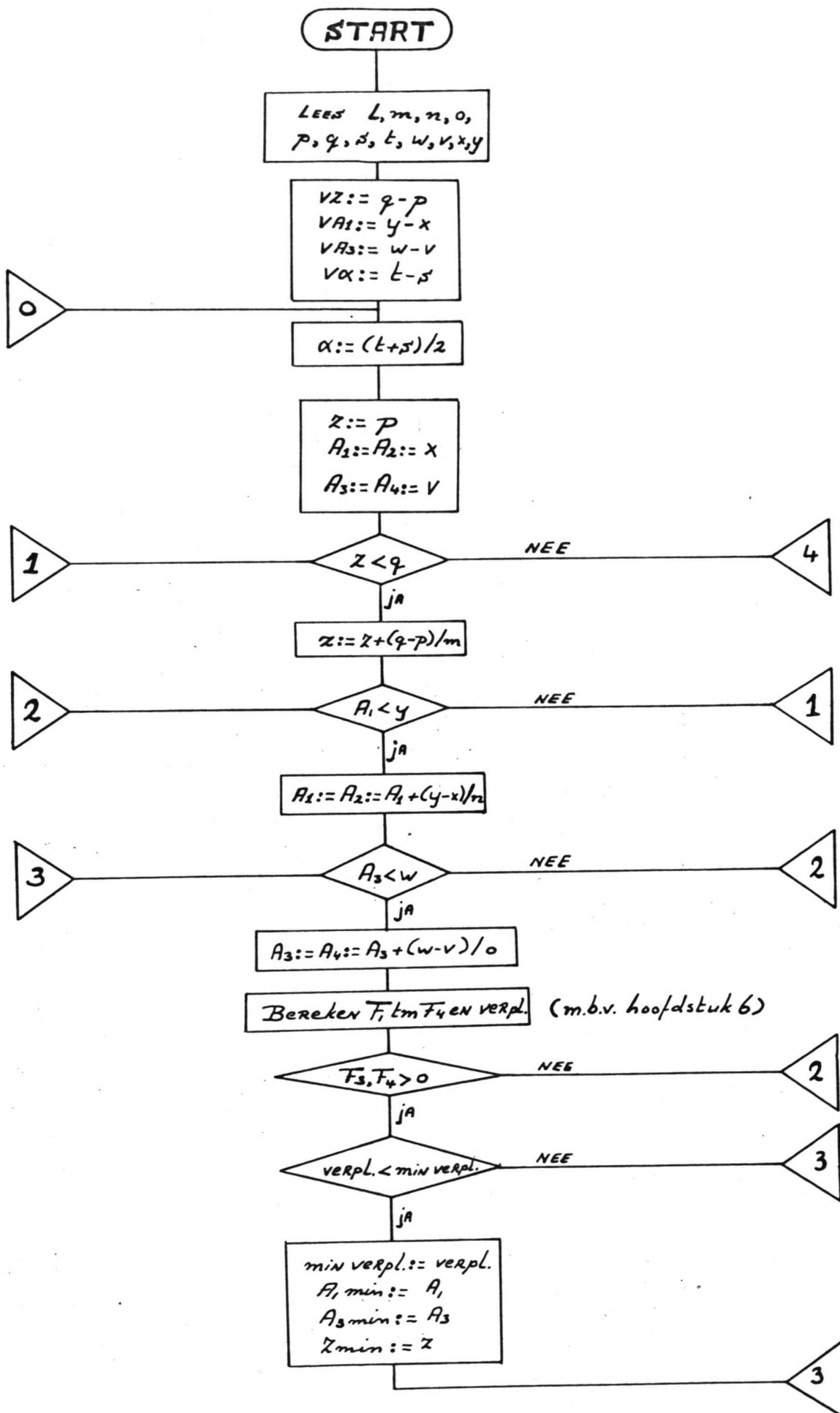
1. kabeldiameters
2. de hoek tussen de schuine en vertikale kabels
3. verhouding afspankracht tussen de schuine en vertikale kabel (Z).

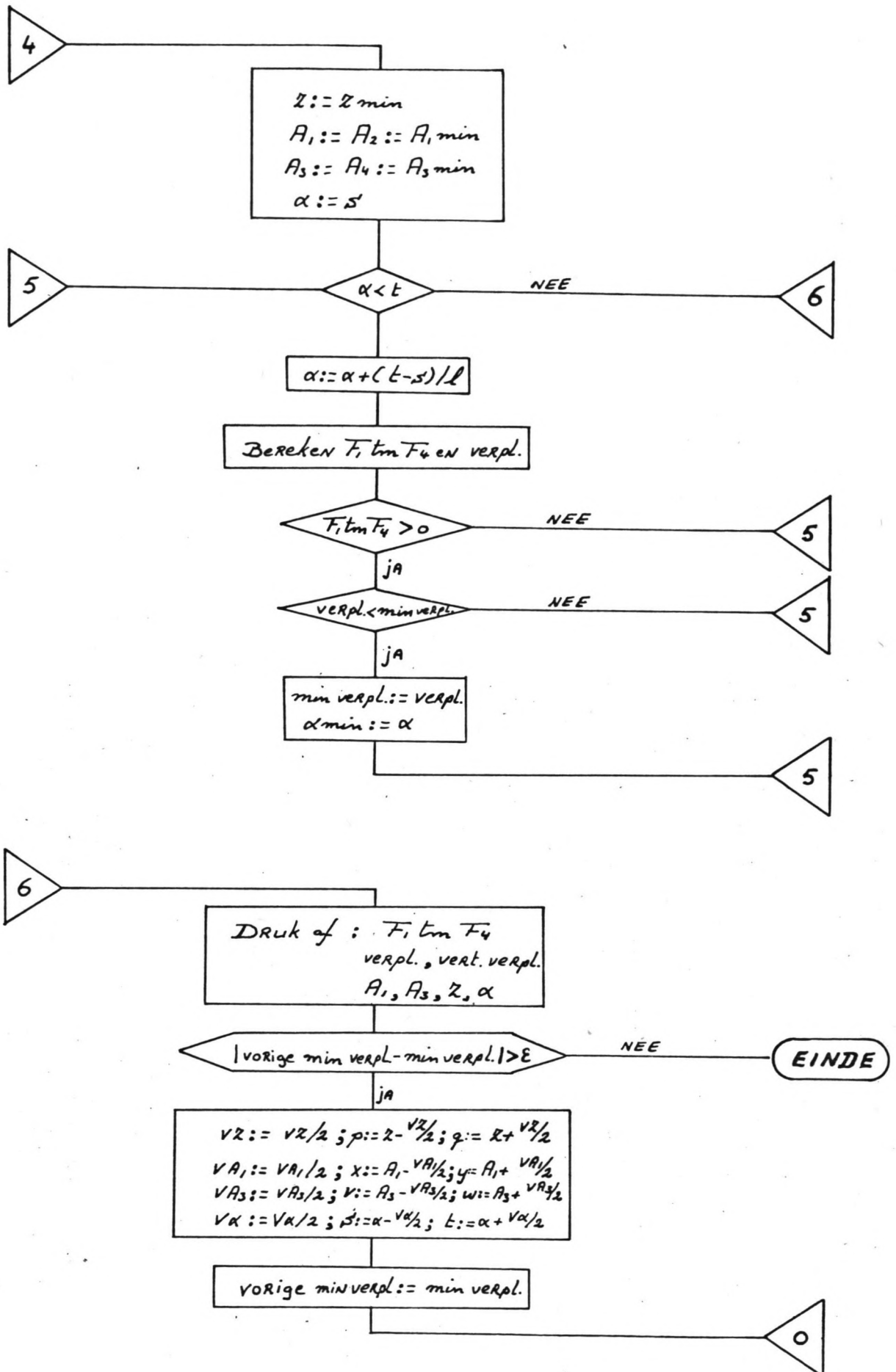
Aangenomen wordt een hoek α (bijv. 45°). Bij deze hoek α gaan we zowel de kabeldiameters als de verhouding (Z) van de afspankracht tussen de vertikale komponent van de schuine kabel en de rechte kabel variëren. Die combinatie van Z en kabeldiameters die de kleinste verplaatsing geeft, wordt genomen voor de volgende stap. Hierbij zijn de kabeldiameters en Z vaste waarden en variëren we de hoek α . Die hoek α die de kleinste verplaatsingen geeft wordt de nieuwe waarde voor α .

We zijn nu weer bij het begin aangeland, namelijk het variëren van de kabeldiameters en Z. Het interval waarover de kabeldiameters en Z gevarieerd worden, wordt wel steeds kleiner, evenals de stappen tussen de verschillende waarden van Z en de kabeldiameters. De gunstigste

waarden voor Z en de kabeldiameters worden genomen en hiermee variëren we α . Ook α wordt met kleinere stappen over een kleiner interval gevarieerd. Dit proces wordt herhaald tot het verplaatsingsverschil tussen twee opeenvolgende malen dat dit proces doorlopen wordt, voldoende klein is.

Hierna volgt een stroomschema van de berekening. Zoals daarin te zien is worden de kabelkrachten in het programma getest of ze positief zijn. Is dit niet het geval dan wordt de berekening afgebroken. Dat wordt gedaan omdat kabels geen druk op kunnen nemen. Verder rekenen zou dan verspilling van rekentijd zijn.





Verklaring van de symbolen.

z	= verhouding vert. component schuine kabelkracht/vertikale kabelkracht.
p	= ondergrens Z.
q	= bovengrens Z.
m	= aantal delen waarin interval van Z wordt opgedeeld.
A1, A2, A3, A4	= kabeldiameters van resp. kabel 1 tot en met 4.
x	= ondergrens kabels 1 en 2.
y	= bovengrens kabels 1 en 2.
n	= aantal delen waarin interval van A1 en A2 wordt opgedeeld.
v	= ondergrens kabels 3 en 4.
w	= bovengrens kabels 3 en 4.
o	= aantal delen waarin interval van A3 en A4 wordt opgedeeld.
α	= hoek tussen schuine en verticale kabel.
s	= ondergrens hoek α .
t	= bovengrens hoek α .
l	= aantal delen waarin interval van α wordt opgedeeld.
VZ	= grootte interval Z.
VA1	= grootte interval van A1 en A2.
VA3	= grootte interval van A3 en A4.
V	= grootte interval α .
F1, F2, F3, F4	= kabelkrachten van resp. kabel 1 tot en met 4.
verpl.	= horizontale verplaatsing.
vert. verpl.	= verticale verplaatsing.
min. verpl.	= minimaal berekende verplaatsing.
vorige min. verpl.	= minimale verplaatsing in vorige loop.
A1 min.	= kabeldiameter voor kabels 1 en 2 bij kleinste verplaatsing.
A3 min.	= kabeldiameter voor kabels 3 en 4 bij minimale verplaatsing.

Z min. = Z waarbij verplaatsing minimaal is.
 α min. = hoek waarbij verplaatsing minimaal is.

Het programma hebben we opgesplitst in twee losse programma's. Het eerste deel loopt van blok 0 tot 4. De resultaten van het variëren van Z en A1 en A3 worden dan afgedrukt. Met het beste resultaat gaan we verder naar het tweede blok van 4 tot 6. Ook deze resultaten worden afgedrukt. Is de vereiste nauwkeurigheid bereikt dan wordt het proces beëindigd. Is dit niet het geval dan gaan we van hieruit terug naar blok 0.

Hierdoor is een snellere iteratie mogelijk naar de minimale verplaatsingen, omdat de grenzen waartussen de variabelen variëren iedere keer opnieuw vastgelegd kunnen worden.

Deze twee afzonderlijke programma's zijn te zien in bijlage 4.2 en 4.3

De hiermee verkregen resultaten zijn te zien in de volgende paragraaf.

3. Resultaten.

In tabel 3 zijn de resultaten van de computerberekeningen weergegeven, voor een horizontale belasting van $39,5 \text{ kN/m}^1$ en een verticale verkeersbelasting van -104 kN/m^1 .

De verticale verplaatsing is bij een $\alpha = 1,10 \text{ rad.}$, een Z van 1,44 en een kabeldoorsnede van de kabels 1 en 3 van respectievelijk 1000 en 875 mm^2 slechts $0,0300 \text{ m}$ en de rotatie is $\arctan(0,0062/7) = 0,05^\circ \simeq 0$.

variatie van	waarde α in rad.	waarde Z	waarde A1, A2 in mm^2	waarde A3, A4 in mm^2	nieuwe	nieuwe Z	nieuwe A1, A2	nieuwe A3, A4	verpl. hor. (m)
Z; A1; A3	0,785	-	-	-	-	1,1	900	1200	0,0612
	-	1,1	900	1200	1,050	-	-	-	0,0498
Z; A1; A3	1,050	-	-	-	-	1,4	1000	900	0,0464
	-	1,4	1000	900	1,10	-	-	-	0,0462
Z; A1; A3	1,10	-	-	-	-	1,44	1000	875	0,0459

Tabel 3: Resultaten computer berekeningen.

Nu moet worden gecontroleerd of deze belasting de maatgevende belastingscombinatie is. Alle belastingscombinaties worden daarom in tabel 4 gegeven met de daarbij horende verplaatsingen.

DH in kN/m ¹	DV in kN/m ¹	M in kNm/m ¹	DLH in mm	DLV in mm	DGV in mm	Ø in °
0	0	0	0,0	0,0	0,0	0
0	-12	30	0,6	-4,7	-3,4	0
0	-92	30	0,6	-27,5	-26,3	0
0	-104	0	0,0	-29,7	-29,7	0
39,5	0	0	44,5	-6,4	-0,3	0
20	-104	0	23,2	-32,9	-29,8	0
39,5	-104	0	45,9	-36,2	-30,0	0
39,5	-92	-30	45,1	-31,5	-26,6	0
39,5	-92	30	46,4	-34,0	-26,6	0
39,5	-12	-30	44,0	-8,6	-3,7	0
39,5	-12	30	45,3	-11,1	-3,7	0

Tabel 4: Resultaten computer berekeningen waarin DLH, DLV, DGV resp. verplaatsingen links horizontaal, links vertikaal, gemiddeld vertikaal zijn en ϕ de rotatie is.

Ook moet worden gecontroleerd of de kabelkrachten niet negatief worden, dit zou immers druk in de kabels betekenen. Dit is samengevat in tabel 5..

Zoals uit de tabel 4 blijkt is er een belastingscombinatie waarvoor de vervormingen in horizontale richting groter zijn. Het is de belastingscombinatie $DV = -92 \text{ kN/m}^1$, $DH = 39,5 \text{ kN/m}^1$ en $M = 30 \text{ kNm/m}^1$. De verplaatsing is dan $0,0464 \text{ m}$ in horizontale richting. Dat is $4 \cdot 10^{-4} \text{ m}$ meer als de belastingscombinatie waarmee het verankeringsysteem geoptimaliseerd is. Dit verschil is zo klein dat we dit verankeringsysteem niet opnieuw gaan optimaliseren met de maatgevende belastingscombinatie. Hierbij wordt nog opgemerkt dat wanneer de α , Z, A1 en A2 aangepast worden aan de maatgevende belastingscombinatie, hierdoor de verplaatsing in horizontale richting ten gevolge van de belastingscombinatie $DV = -104 \text{ kN}$, $DH = 39,5 \text{ kN}$ weer groter zal worden.

DH in kN/m ¹	DV in kN/m ¹	M in kNm/m ¹	F1 in kN/m ¹	F2 in kN/m ¹	F3 in kN/m ¹	F4 in kN/m ¹
0	0	0	207,8	207,8	65,4	65,4
0	-12	30	206,8	206,8	51,3	55,5
0	-92	30	200,8	200,8	14,1	18,2
0	-104	0	200,0	200,0	10,5	10,5
39,5	0	0	230,9	186,6	48,5	68,6
20	-104	0	211,4	189,0	5,3	15,5
39,5	-104	0	223,1	178,8	0	20,1
39,5	-92	-30	224,0	179,7	7,7	23,6
39,5	-92	30	224,0	179,7	3,5	27,8
39,5	-12	-30	230,0	185,6	45,0	60,9
39,5	-12	30	230,0	185,6	40,8	65,1

Tabel 5: Extreme kabelkrachten.

4. Beschouwing kabelkrachten.

Bij geen enkele belastingscombinatie wordt de kabelkracht in kabel 3 of 4 negatief. Wel zien we dat bij een belasting van DV = -104 kN en DH 39,5 kN de kabelkracht in kabel 3 tot 0 nadert. De kracht in de kabel is dan slechts die ten gevolge van het eigen gewicht. De verplaatsing door de werking van de getijstrooming op de kabel zelf die tot dusver buiten beschouwing is gelaten zou bij zo'n lage kabelspanning een rol kunnen gaan spelen.

De maximale kracht die in de kabels 3 en 4 op kan treden is 68,6 kN + kabelgewicht = 68,6 + 6,5 = 75,1 kN. Dat is een spanning van $75,1 \cdot 10^3 / 875 = 86 \text{ N/mm}^2$.

De variatie in de kabelkrachten van de kabels 1 en 2 is niet zo groot, maar de spanning is hoger. De maximale kabelkracht in de kabels 1 en 2 is 230,9 kN, de minimale 178,8 kN. De spanningen variëren dus van 178 N/mm² tot 231 N/mm².

5. Conclusie.

Bij het berekenen van de minimale verplaatsingen onder de extreme belastingssituatie zien we de kabeldoorsnedes, de afspanverhouding Z en de hoek α veranderen. De kabeldoorsnede van de kabels 1 en 2 nemen toe. De verlenging van een kabels is immers

$$\Delta = \frac{dF \cdot l}{EA}$$

Als de kabeldoorsnede groter wordt, wordt de kabelverlenging kleiner. Dit geldt echter maar tot een zekere waarde omdat de ideële elasticiteitsmodulus van de kabel ook afhankelijk is van de kabeldoorsnede. Dit verband is als volgt:

$$E_i = \frac{E_e}{1 + \frac{(\gamma \cdot a)^2 \cdot A^3}{12 F^3}} \cdot E_e$$

De kabeldoorsnede komt tot de derde macht in de formule van de ideële elasticiteitsmodulus voor. Hij gaat echter pas een rol spelen als de factor $\frac{(\gamma \cdot a)^2 \cdot A^3}{12 F^3} \cdot E_e$ de waarde

1 gaat naderen. De toename van de kabeldoorsnede zal dan op een gegeven moment procentueel kleiner zijn dan de afname van de ideële elasticiteitsmodulus. Dit heeft tot gevolg dat de verlenging van de kabel weer groter wordt.

De afspanverhouding tussen de verticale komponent van de kabelkrachten 1 en 2 en de kabelkrachten 3 en 4 (verhouding Z) zal zo groot mogelijk zijn. Dit om de kabels 1 en 2 een zo groot mogelijke voorspanning te geven. De ideële elasticiteitsmodulus die voorkomt in de formule voor de verlenging van de kabels 1 en 2 hangt immers af van de spanning die in de kabels aanwezig is. Dit blijkt uit de hierbovenstaande formule.

De afspanverhouding is echter wel aan een maximum gebonden. Als we deze te groot maken treedt er druk op in de

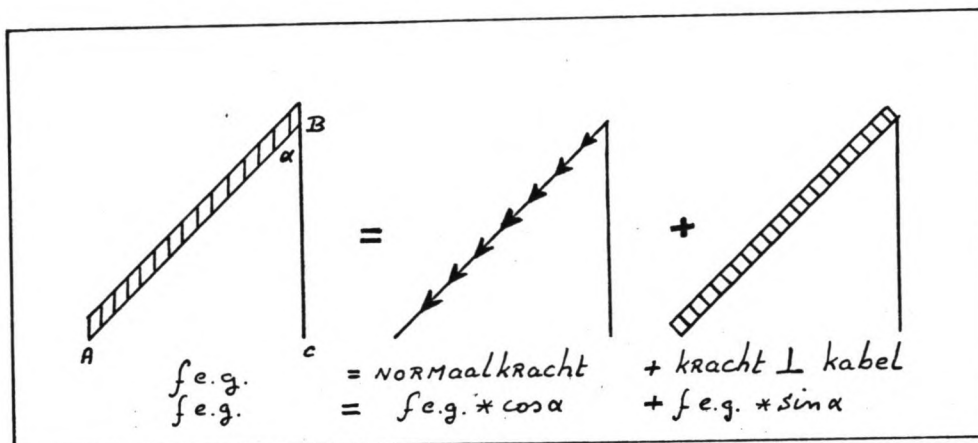
kabels 3 en 4. Een kabel kan geen druk opnemen, dus moeten we dit voorkomen.

De kabeldoorsnede van de kabels 3 en 4 neemt af. Dat is als volgt te verklaren. Als de kabeldiameter van deze kabels klein is zal het deel dat deze kabels naar zich toe trekken van de verkeersbelasting ook klein zijn. Hoe kleiner dat deel is hoe kleiner de kracht in de kabels mag zijn bij het afspannen. Dit levert voor de kabels 1 en 2 een grotere afspankracht en dus een kleinere vervorming. We zijn echter aan een minimum gebonden voor de kabeldoorsnedes 3 en 4. Zouden we namelijk de verticale (verkeers) belasting voor een nog groter deel op laten nemen door de kabels 1 en 2 dan neemt bij een volle verkeersbelasting de spanning zover af dat wederom de ideële elasticiteitsmodulus een rol gaat spelen, die op zijn beurt de verlenging van de kabel beïnvloedt.

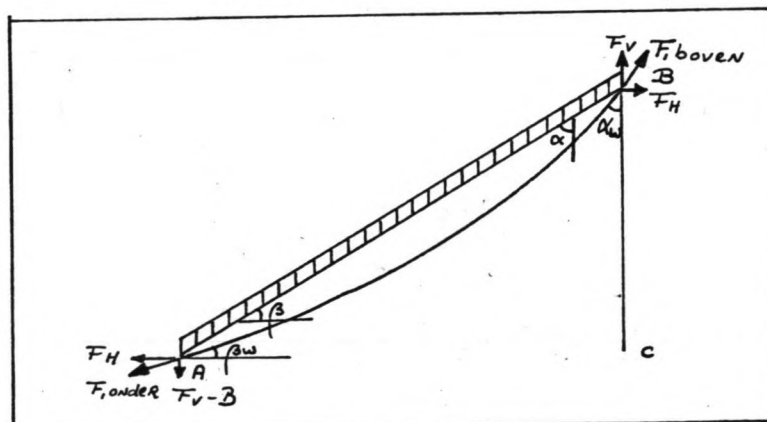
Tot slot de variatie in de hoek α . Door de hoek tussen de verticale en schuine kabels groter te maken wordt de komponent in horizontale richting groter. Een kracht in horizontale richting ten gevolge van de stroming zal dan beter opgenomen kunnen worden en met kleinere vervormingen. Ook hier zijn we weer aan een maximale hoek gebonden. Wordt deze hoek te groot dan zal de verkeersbelasting in verticale richting een grote spanningsvariatie in de schuine kabel veroorzaken. Dit omdat de verticale komponent van een erg schuine kabel klein is en de horizontale komponent groot. De grote spanningsvariatie geeft dan een grote variatie in de ideële elasticiteitsmodulus. Bovendien gaat bij een grote hoek de doorhang van de kabel een rol spelen. De hoek die de kabel werkelijk maakt met de bodem en de tunnel wijkt dan steeds meer af van de in de berekening aangenomen hoek. Hierover meer in de volgende paragraaf.

6. Verschil tussen de werkelijke en de aangenomen hoek.

We hebben bij de berekening als hoek voor de schuine kabels de hoek aangenomen tussen de punten A, B en C (zie figuur 28). In werkelijkheid zal de hoek die de schuine kabel met de vertikaal maakt, kleiner zijn. Dit komt doordat de kabel zal doorhangen ten gevolge van zijn eigen gewicht (zie figuur 27). Hoe groot dit verschil is in graden zullen we oplossen door op iteratieve wijze de werkelijke hoek te bepalen.



Figuur 27: Krachten in de kabel ten gevolge van eigen gewicht.



Figuur 28: Kabellijn ten gevolge van eigen gewicht.

$$\sum H = 0 \text{ dus } F_H \text{ in A} = F_H \text{ in B}$$

$$\sum V = 0 \text{ dus } F_v - B - (F_v - B) = 0 \text{ waarin B is kabelgewicht onder water.}$$

$$\text{er geldt: } \alpha + \beta = \pi/2 \Leftrightarrow \beta = \pi/2 - \alpha \quad (\text{a})$$

$$\text{verder geldt: } \alpha - \alpha_w = \beta - \beta_w \quad (\text{b})$$

$$(\text{b}) \text{ in } (\text{a}) \text{ geeft } \alpha - \alpha_w = \pi/2 - \alpha - \beta_w \quad (\text{c})$$

$$\tan \alpha_w = \frac{FH}{FV} \quad FH = FV \cdot \tan \alpha_w \quad (\text{d})$$

$$\beta_w = \arctan \frac{FV-B}{FH} \quad (\text{e})$$

(d) substitueren in (e) geeft:

$$\beta_w = \arctan \frac{(FV-B)}{FV \cdot \tan \alpha_w} \quad (\text{f})$$

(f) in (e) geeft:

$$\alpha_w = 2\alpha - \pi/2 + \arctan \frac{(FV-B)}{FV \cdot \tan \alpha_w} \quad (\text{g})$$

Als eindwaarde vonden we in de vorige paragraaf voor α :

$$\alpha = 1,1 \text{ rad. ofwel } \alpha = 63,0^\circ.$$

Vullen we dit in, in g en nemen we als uitgangswaarde voor α_w ook 63° dan wordt de berekende α_w direkt na het afspannen van een tunnelsegment:

$$\alpha_w = 2 \cdot 63,0 - 90 + \arctan \left\{ \frac{94,24 - 16,29}{94,24 \cdot \tan 63} \right\}$$

$$\alpha_w = 58,85.$$

Als nieuwe waarde voor α_w wordt de gemiddelde tussen de berekende en de voor de berekening ingevulde α_w . Dit om de iteratie te versnellen.

$$\alpha_w = \frac{(63 + 58,85)}{2} = 60,93.$$

Met $\alpha_w = 60,93$ in formule g vinden we een $\alpha_w = 60,69$.

$$\alpha_w = \frac{(60,93 + 60,69)}{2} = 60,8$$

Tijdens het minimaliseren van de verplaatsingen in de vorige paragraaf is het verschil tussen de werkelijke en de aangenomen hoek verwaarloosd. Dit is bij de uitgangswaarde waarmee we begonnen ook wel veroorloofd. Deze uitgangswaarde was 45° ofwel $0,785$ rad. De werkelijke hoek is dan bij een kabeldoorsnede van 900 mm^2 :

$B = 9,4 \text{ kN}$ (kabelgewicht onder water).

$$F_{v1} = \frac{320}{(2 \cdot 1 + 2 \cdot 1,1)} \cdot 1,1 = 83,8 \text{ kN (bij een } Z = 1,1)$$

$$\alpha_w = 2 \cdot 45 - 90 + \arctan \frac{83,8 - 9,4}{83,8 \tan \alpha_w}$$

Dit geeft uiteindelijk een α_w van:

$$\alpha_w = 43,3$$

De relatieve fout in cosinus en sinus tussen de werkelijke en aangenomen hoek is dan

$$\frac{\cos 45 - \cos 43,3}{\cos 45} \quad \frac{\sin 45 - \sin 43,3}{\sin 45} \quad 0,03 \text{ ofwel } 3\%$$

Het verschil tussen de aangenomen en werkelijke hoek is bij de in het vorige hoofdstuk gevonden hoek, waar- bij de verplaatsing minimaal is, niet veel groter in absolute zin. Slechts $2,2^\circ$ als $\alpha = 63^\circ$ tegenover $1,7^\circ$ bij een α van 45° .

Dat dit verschil groter is heeft drie oorzaken.

Ten eerste doordat de hoek zelf is toegenomen. Hierdoor is de ontbondene van het kabelgewicht die loodrecht op de kabel staat toegenomen van $f \cdot e.g. \cdot \sin 45^\circ$ tot $f \cdot e.g. \cdot \sin 63^\circ$.

Vervolgens is ook de totale lengte van de kabel groter geworden en daarmee ook het totale eigen gewicht. De toename van de lengte is van $110/\cos 45^\circ$ tot $110/\cos 63^\circ$.

Tenslotte is ook de kabeldoorsnede met 100 mm^2 toegenomen van 900 mm^2 tot 1000 mm^2 .

De grootte van de absolute fout wordt verkleind doordat de afspanverhouding is toegenomen van 1,1 tot 1,44. Deze zorgt ervoor dat de kabel strakker wordt getrokken.

Alhoewel de absolute fout beperkt blijkt is dit niet het geval voor de relatieve fout. Immers $\cos 60,8$ en $\cos 63$ schelen meer als $\cos 43,3$ en $\cos 45$.

$$\frac{\cos 63 - \cos 60,8}{\cos 63} = -0,075 \text{ ofwel } -7,5\%$$

$$\frac{\sin 63 - \sin 60,8}{\sin 63} = 0,02 \text{ ofwel } 2\%$$

Daarom controleren we de kabelkrachten en verplaatsingen, maar dan uitgaande van de werkelijke hoek α_w . Hoe dit in het programma is verwerkt is te zien in bijlage 4.3.

In sommige gevallen is de hoek tussen de rechte lijnen AB en BC aangehouden. Dit is het geval bij de verlengingen van de kabels 1 en 2:

$$\Delta n = \frac{dF_n \cdot l_n}{E_n \cdot A_n} \quad \text{waarbij } n = 1, 2$$

hierin is $l_n = \frac{1}{\cos 63^\circ}$ en niet $\frac{1}{\cos 60,8^\circ}$

Ook waar de invloed van de kabelverlenging op de verplaatsingen wordt berekend moet als hoek 63° in plaats van $60,8$ gebruikt worden.

De kabelkrachten en verplaatsingen worden nu berekend bij het maatgevende belastingsgeval.

Dit is een sleepkracht in horizontale richting van $39,5 \text{ kN/m}^1$ en een mobiele belasting in verticale richting van -104 kN/m^1 . Verdere gegevens zijn:

De afspanverhouding Z is $1,44$.

De hoek ABC is 63° .

De hoek tussen kabel 1 en kabel 3 is $60,8^\circ$.

De kabeldoorsnedes van de kabels 1 en 2 zijn 1000 mm^2 .

De kabeldoorsnedes van de kabels 3 en 4 zijn 875 mm^2 .

F1	= 209,5 kN	was	223,1 kN
F2	= 164,2 kN		178,8 kN
F3	= -0,3 kN		0 kN
F4	= 21,8 kN		20,1 kN
DLH	= 0,047 m		0,046 m
DGV	= -0,030 m		-0,030 m

We zien dat de kabelkracht in kabel 3 negatief wordt. Omdat kabels geen druk op kunnen nemen voldoet dit verankeringsysteem dus niet meer. Een kleine aanpassing van het verankeringsysteem is echter al voldoende om geen druk meer op in de verticale kabels te krijgen.

Als we de afspanverhouding 1,42 in plaats van 1,44 maken treedt zelfs bij het maatgevende belastingsgeval geen druk meer op in de verticale kabels. De maximale verplaatsing is dan echter wel toegenomen van 0,046 tot 0,048 meter. De kabelkrachten zijn voor de kabels 1 tot en met 4 respectievelijk 208,9 kN; 163,7 kN; 0,2 kN; 22,2 kN. Dit bij gelijkblijvende kabeldiameters en een gelijk gebleven hoek.

Tot slot moet nog worden opgemerkt dat de werkelijke hoek die kabel 1 en kabel 2 met de vertikaal maken verschillend zijn in geval van horizontale belasting sprake is. Dit verschil is echter een stuk kleiner dan het eerder genoemde verschil tussen de werkelijke en de aangenomen hoek.

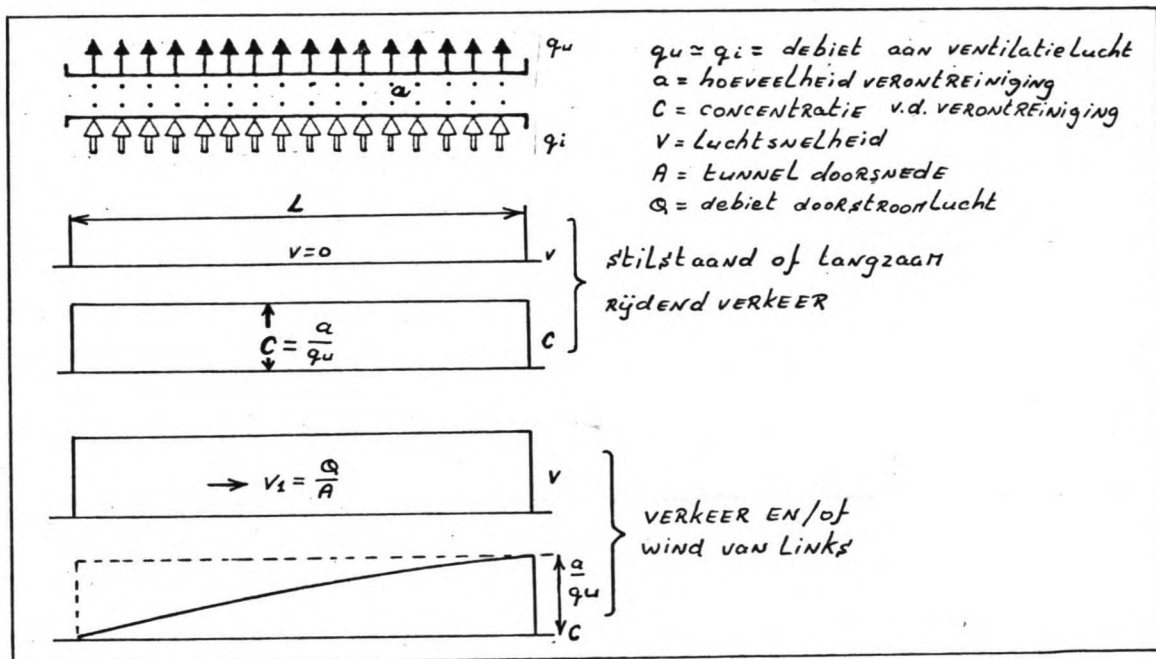
Bij bovenstaand maatgevend belastingsgeval is de werkelijke hoek van kabel 1 $0,2^{\circ}$ groter als de berekende $60,8$ en de hoek van kabel 2 is $0,4^{\circ}$ kleiner als de berekende $60,8^{\circ}$.

Bijlage 1.

Ventilatie.

In principe zijn drie ventilatiesystemen mogelijk:

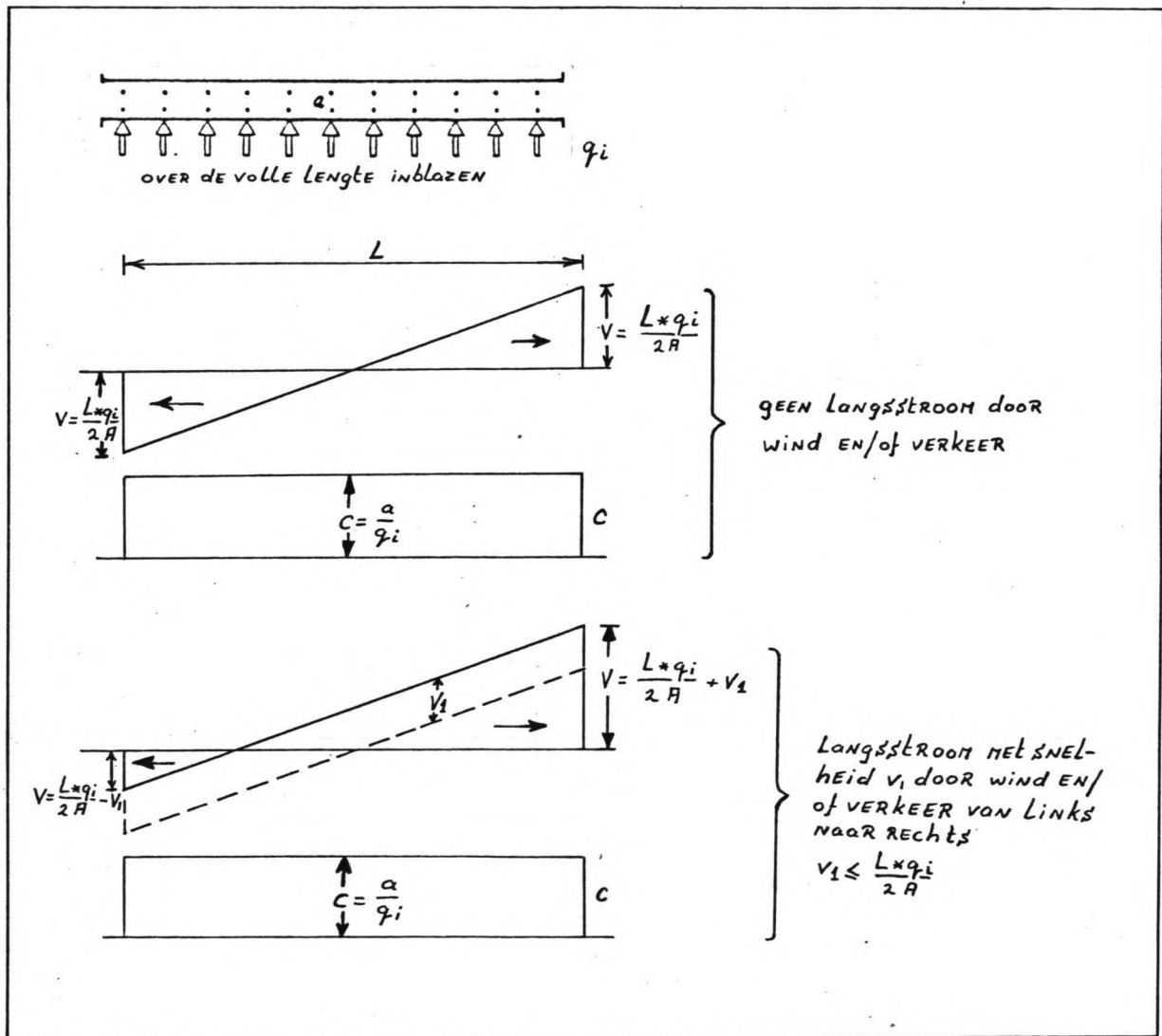
1. Dwarsventilatie, waarbij zich buiten de verkeersbuizen aparte kokers bevinden voor de aanvoer van frisse lucht resp. de afvoer van verontreinigde lucht. In de wanden tussen de verkeersbuis en de luchtkokers bevinden zich op regelmatige afstanden openingen, via welke de luchtstroom de verkeersbuis dwars oversteekt. De luchtkokers gaan op de oevers over in verticale schachten (meestal ter plaatse van het in de oever gebouwde gesloten gedeelte), waarin ventilatoren zijn opgehangen. Boven in de schacht bevinden zich roosters via welke frisse lucht wordt aangezogen en bij de andere verontreinigde lucht wordt uitgestoten. Teneinde "kortsluiting" te voorkomen moeten deze roosters zich voldoende ver uit elkaar bevinden (de uitlaatroosters bijvoorbeeld in hoge torens, de inlaat in lagere). Hieronder is dit ventilatiesysteem schematisch weergegeven.

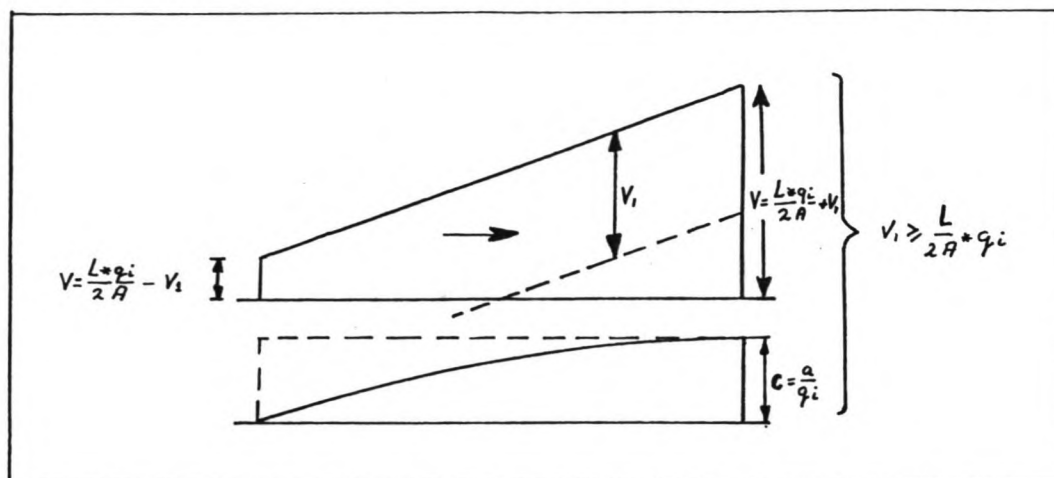


Conclusie:

De maximum concentratie van de schadelijke stoffen treedt op bij stilstand van de lucht in lengterichting van de tunnel.

2. Semi-dwarsventilatie, waarbij frisse lucht wordt aangevoerd door afzonderlijke kokers en via op regelmatige afstanden in de scheidingswand aangebrachte openingen de verkeersbuis binnenstroomt. Op deze manier bouwt zich een overdruk op in de rijbuis, waardoor de lucht (met verontreinigingen) afvloeit naar de beide uiteinden van de rijbuis en daar de tunnel verlaat. De rijbuis doet dus zelf dienst voor de afvoer van lucht, waardoor hiervoor geen extra kokers nodig zijn zoals bij systeem 1. Op de oevers behoeven dus alleen schachten, ventilatoren en aanzuigroosters voor frisse lucht te worden gebouwd. Hieronder is het systeem van de semi-dwarsventilatie schematisch weergegeven.

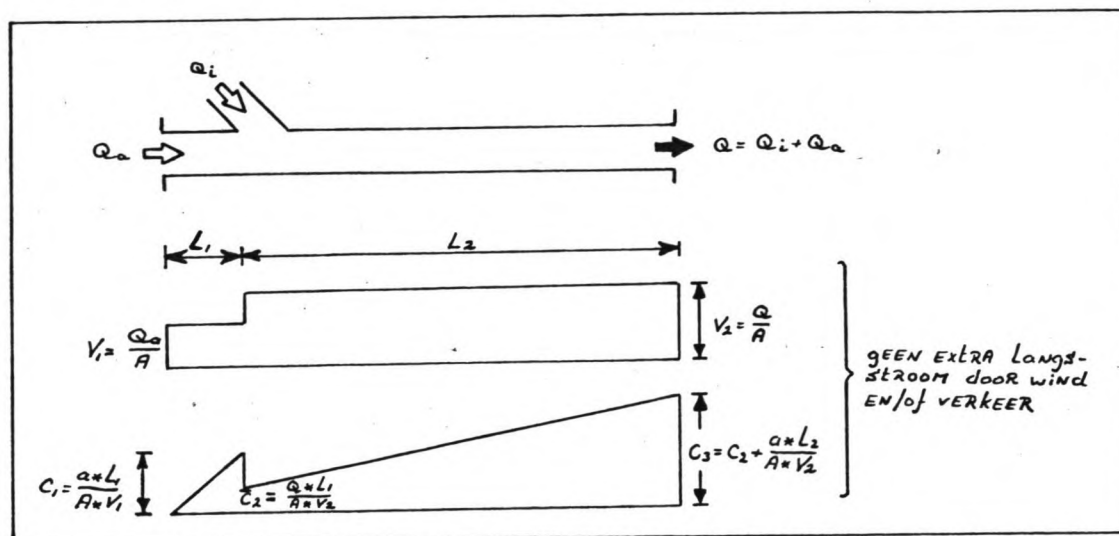


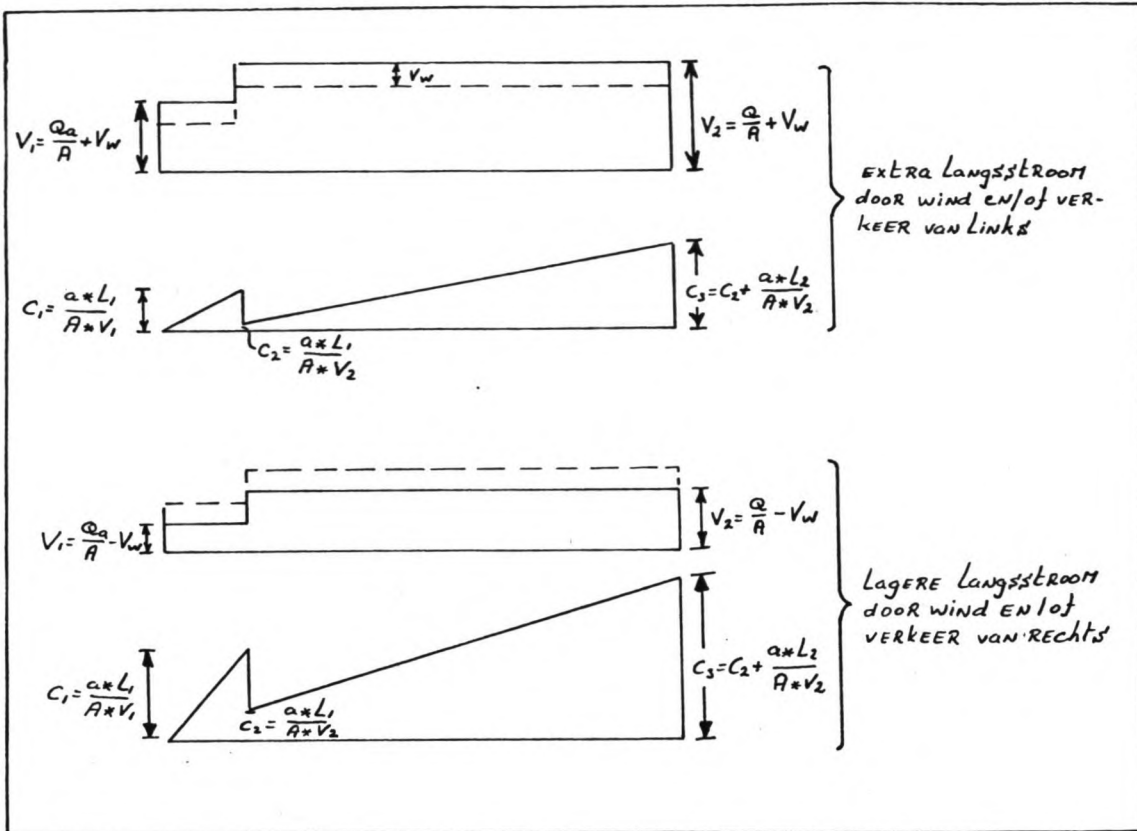


Conclusie:

De maximum concentratie van de schadelijke stoffen treedt op bij stilstand van het verkeer en windstilte.

3. Langsventilatie, waarbij in de verkeersbuis buiten het profiel van vrije ruimte aanjaagventilatoren worden opgehangen. De ventilatoren geven een impuls aan de luchtmasa, waardoor een luchtstroming in langsrichting van de buis ontstaat. Door deze stroming zal frisse lucht aan het ene einde van de buis naar binnen komen en zal de verontreinigde lucht aan het andere uiteinde de buis verlaten. Onder normale omstandigheden wordt deze langsluchtstroom in stand gehouden door de impulsen van het rijdende verkeer. Bij intensief of langzaam rijdend verkeer versterkt de kunstmatige ventilatie de impuls van het verkeer. Bij stagnatie (stilstand) van het verkeer zullen de ventilatoren het alleen moeten doen. Er zijn nu geen aparte luchtkokers en ventilatiegebouwen meer nodig, daarentegen moet het dwarsprofiel van de verkeersbuis worden vergroot om de ventilatoren te kunnen onderbrengen.





Conclusie:

De maximum concentratie van de schadelijke stoffen treedt op bij tegenverkeer of tegenwind.

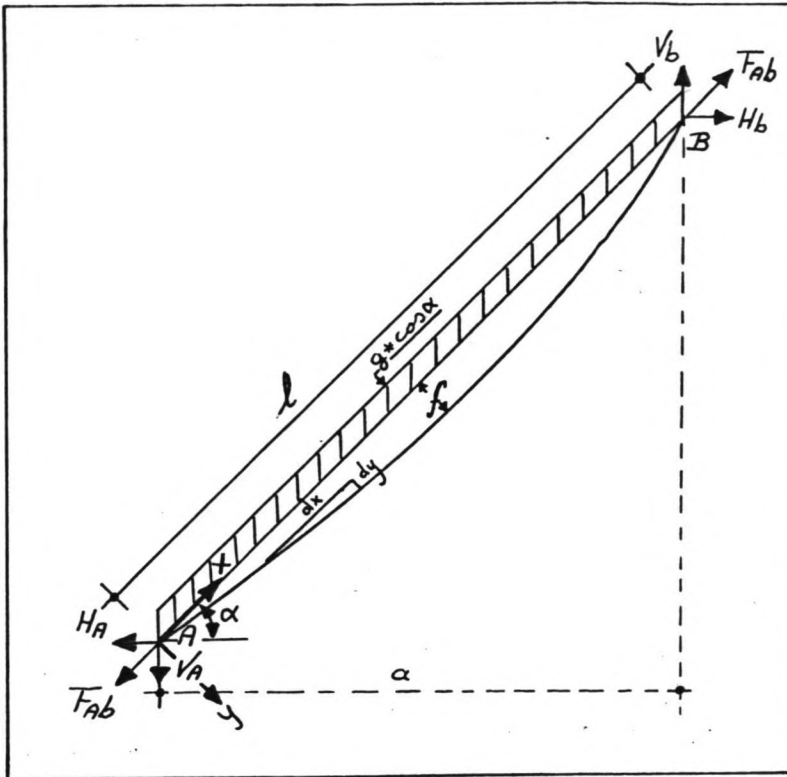
De invloed van de tegenwind of het verkeer kan het noodzakelijk maken om het systeem omkeerbaar te maken, dan wel andere maatregelen te treffen, zoals doseren van het tegenverkeer of stoppen van de ventilatie.

De keuze tussen de systemen wordt bepaald door fysieke mogelijkheden en kosten. Ten aanzien van dit eerste zij opgemerkt, dat langsventilatie minder geschikt is voor buizen met tweerichtingverkeer (de verkeersimpuls kan tegen die van de ventilatoren inwerken), terwijl zij niet voor zeer lange tunnels kan worden gebruikt. Bij grote lengten kunnen zich namelijk veel auto's gelijktijdig in de tunnel bevinden. Om de uitlaatgassen voldoende te verdunnen is dan veel frisse lucht nodig per tijdseenheid, hetgeen gepaard gaat met hoge lichtsnelheden, die hinderlijk zijn voor het verkeer. Alhoewel één en ander per geval berekend moet worden, ligt de praktische bovengrens voor langsventilatie bij

lengten van 2 à 2½ km. Bij semi-dwarsventilatoren kan men tot grotere tunnellenlengten gaan, daar de lucht naar beide uiteinden stroomt en dus -bij een zelfde tunnellenlengte- kleinere snelheden in het eindportaal zullen optreden dan bij langsventilatie, waar alle lucht in één richting beweegt. Bij dwarsventilatie spelen deze begrenzingen niet (zij wordt bijvoorbeeld toegepast in de 16.285 m lange St. Gothard-tunnel met tweerichtingen-verkeer).

Bijlage 2

Bepaling van de fictieve E modulus ten gevolge van de doorhang van een kabel met een grote voorspanning.



kabelgewicht = $g \text{ N/m}^1$
 kabeldoorsnede = $A \text{ m}^2$
 kabellengte = $L \text{ m}$
 lengte AB = $l \text{ m}$
 spankracht in
 de kabel = FN (is gem.
 spankracht).

Als $f/l < 1/10$, dan is de doorbuigingslijn AB op te vatten als een parabool en is de spankracht F vrijwel gelijk aan de ontbondenen van F langs de recht $AB = F_{ab}$.

Als de doorbuigingslijn AB een parabool is dan geldt:

$$y = \frac{4fx(l-x)}{l^2}$$

is de vergelijking van de kromme AB in het x-y-assenstelsel.

$$\frac{dy}{dx} = \frac{4f}{l^2} (l-2x)$$

$$\left(\frac{dy}{dx}\right)^2 = \frac{16f^2}{l^4} * (l^2 - 4lx + 4x^2)$$

$$ds = \sqrt{(dx)^2 + (dy)^2} = dx \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}$$

Verder geldt: $\sqrt{1+\rho^2} = \{1 + \frac{1}{2}\rho^2 - \frac{1}{8}\rho^4 + \dots\}$ (reeksontwikkeling).

$$L = \int_0^l ds = \int_0^l \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx = \int_0^l \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{dy}{dx}\right)^2 \right\} dx$$

Als F_{ab} naar ∞ , dan is de kabel recht. De lengte verandering, die is te wijten aan het wegzakken van de doorbuiging f , is $\Delta l = L - l$

$$\begin{aligned} \text{Dus } \Delta l &= \int_0^l \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{dy}{dx}\right)^2 \right\} dx - l \\ &= \int_0^l dx + \frac{1}{2} \int_0^l \left(\frac{dy}{dx}\right)^2 dx - l \\ &= \frac{1}{2} \int_0^l \left(\frac{dy}{dx}\right)^2 dx \end{aligned}$$

Substitutie van $\left(\frac{dy}{dx}\right)^2$ levert: $\Delta l = \frac{1}{2} \int_0^{l, 6f^2} \frac{1}{l^4} (l^2 - 4lx + 4x^2) dx = \frac{8}{3} * \frac{f^2}{l}$

$$\text{Dus: } \Delta l = \frac{8f^2}{3l} \text{ als } f/l < 1/10$$

De kabel is buigslap, dus voor ieder punt van de kabel geldt: buigend moment = 0

$$\begin{aligned} \text{Voor } x = \frac{1}{2}l : -F_{ab} * l + \frac{1}{8}(g * \cos \alpha) l^2 &= 0 \\ \text{of } f &= \frac{g * \cos \alpha * l^2}{8 F_{ab}} \end{aligned}$$

Daar bij benadering geldt, dat $F_{ab} = F$ = gemiddelde voorspankracht in de kromme AB, is:

$$\begin{aligned} f &= \frac{g * \cos \alpha * l^2}{8 F} \\ \text{Dus: } \Delta l &= \frac{g^2 * \cos^2 \alpha * l^3}{24 * F^2} \text{ als } f/l < 1/10 \end{aligned}$$

Hoe kan dit gegeven gebruikt worden in de vertaling van de kromme kabel AB met elasticiteitsmodulus E , spankracht F , dwarsdoorsnede A en lengte L , naar een rechte kabel AB met een fictieve elasticiteitsmodulus E_f , spankracht F , dwarsdoorsnede A en lengte l ?

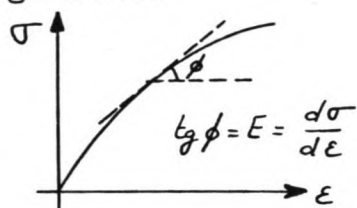
De rekeneigenschappen van echte kabel en fictieve kabel moeten gelijk zijn.

$$\text{Bij de kromme kabel geldt: } \Delta l_f = \frac{F * l}{E_f * A}$$

Δl_f = lengteverandering door de kabeldoorhang.

E_f = fictieve E-modulus ten gevolge van kabeldoorhang.

Voor de kromme lijn wordt de volgende spanning - rek relatie gesteld:



$$E_f = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \frac{dF}{A} * \frac{l}{d(\Delta l)} = \frac{l * dF}{A * d(\Delta l_f)}$$

Hoe groot is $\frac{d(\Delta l_f)}{dF}$? Voor de kromme lijn geldt: $\Delta l_f = \frac{g^2 \cos^2 \alpha l^3}{24 F^2}$

$$\text{Dus } E_f = \frac{l}{A} * \frac{12 F^3}{g^2 * l^3 * \cos^2 \alpha}$$

$$\text{dus } \frac{d\Delta l_f}{dF} = - \frac{g^2 l^3 \cos^2 \alpha}{12 F^3}$$

Verder is $a = l * \cos \alpha$ en $g/A = \gamma$ = specifiek volumegewicht

$$\text{Dus } E_f = \frac{12}{\gamma^2 * a^2} * \frac{F^3}{A^3} = \frac{12 \sigma^3}{(\gamma * a)^2}$$

waarin E_f = fictieve elasticiteitsmodulus ten gevolge van de kabeldoorhang.

σ = optredende kabelspanning.

γ = specifiek volumegewicht van de kabel.

a = horizontaal geprojecteerde lengte van de kabel.

Als nu: E_e = elasticiteitsmodulus van de kabel op zich.

E_i = ideële elasticiteitsmodulus ten gevolge van kabelrek en kabeldoorhang.

dan geldt het volgende: $E_i = \sigma * E_i$

$$E_i = E_e + E_f \text{ met } E_e = \frac{\sigma}{E_e} \text{ en } E_f = \frac{\sigma}{E_f}$$

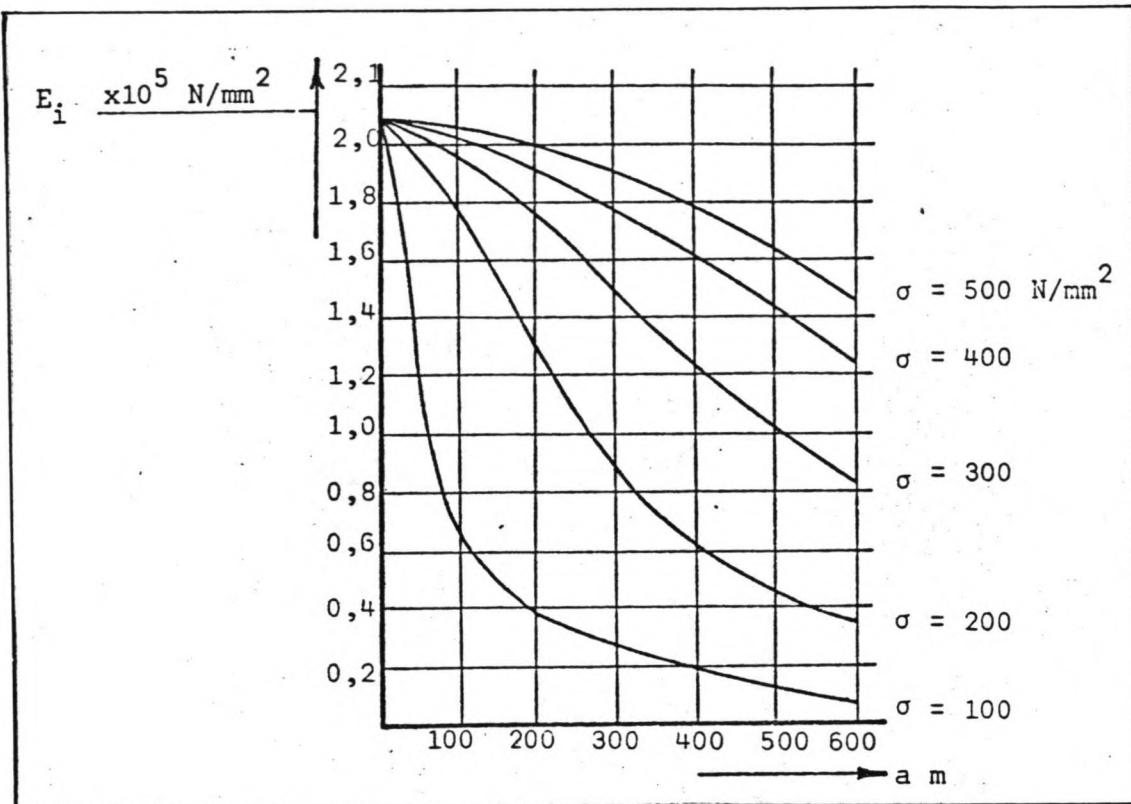
$$E_i = \frac{\sigma}{E_f + E_e} = \frac{\frac{\sigma}{E_e} + \frac{\sigma}{E_f}}{\frac{\sigma}{E_e} + \frac{\sigma}{E_f}} = \frac{E_e * E_f}{E_e + E_f}$$

Na substitutie van $E_f = \frac{12 * \sigma^3}{(\gamma * a)^2}$ volgt voor E_i :

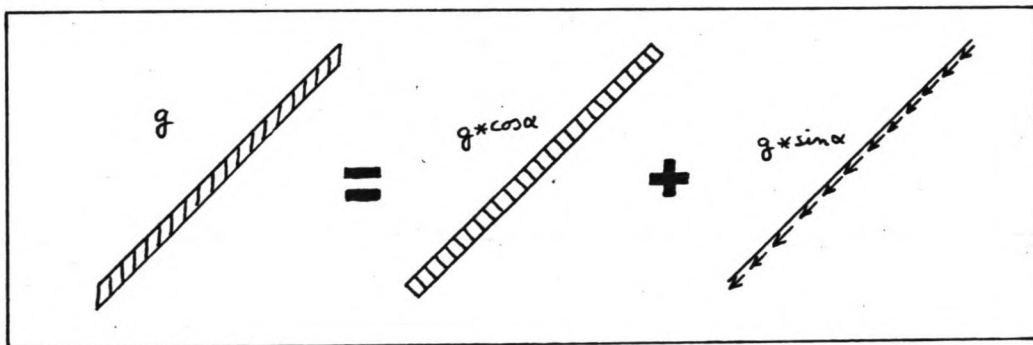
$$E_i = \frac{E_e}{1 + \frac{(\gamma * a)^2}{12 * \sigma^3} * E_e}$$

Zoals uit bovenstaande formule van E_i blijkt, hangt deze af van de in de kabel aanwezige spanning σ .

In de onderstaande grafiek is E_i uitgezet als funktie van a voor verschillende staalspanningen en een $E_e = 2,05 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$.



Het eigen gewicht van de kabel is te ontbinden in een kracht loodrecht op verbindingslijn AB en een kracht evenwijdig aan de kabel.



Door de gelijkmatig verdeelde kracht $g \sin \alpha$ loopt de spanning in de kabel lineair op van beneden naar boven. Dit betekent dat de E_i boven niet gelijk is aan de E_i onder.

Om hiermee rekening te houden wordt de formule

$$\Delta l = \frac{g^2 * \cos^2 \alpha * l^3}{24 * F^2} \quad \text{verder uitgebreid.}$$

$$\Delta l_a = \frac{g^2 * \cos^2 \alpha * l^3}{24 * F_a^2} \quad \text{en} \quad \Delta l_b = \frac{g^2 * \cos^2 \alpha * l^3}{24 * F_b^2}$$

Uit $\Delta \Delta l = \Delta l_a - \Delta l_b$ volgt na substitutie van bovenstaande

$$\Delta \Delta l = c * \left(\frac{1}{F_a^2} - \frac{1}{F_b^2} \right) \quad \text{met} \quad c = \frac{g^2 * \cos^2 \alpha * l^3}{24}$$

$$\Delta \Delta l = c * \frac{(F_b^2 - F_a^2)}{F_b^2 * F_a^2} = c * \frac{(F_a + F_b)(F_b - F_a)}{F_b^2 * F_a^2}$$

$$\Delta \Delta l = c * \frac{(F_b + F_a) \Delta F}{F_b^2 * F_a^2} \quad \text{met} \quad \Delta F = F_b - F_a$$

$$E_f = \frac{\Delta \sigma}{\epsilon_f} \quad \text{is te schrijven als} \quad E_f = \frac{\Delta F}{\Delta \Delta l} * \frac{l}{A}$$

Substitueren we in E_f bovenstaande formule voor $\Delta \Delta l$ dan volgt hieruit voor E_f :

$$E_f = \frac{l * F_a^2 * F_b^2}{A * c * (F_b + F_a)} \quad \text{of voluit} \quad E_f = \frac{24}{(\gamma * a)^2} * \frac{F_a^2 * F_b^2}{A^4} * \frac{A}{(F_a + F_b)}$$

Stel $\mu = \frac{\sigma_a}{\sigma_b}$ en $\sigma_m = \frac{\sigma_a + \sigma_b}{2}$ dan is

$$E_f = \frac{12}{(\gamma * a)^2} * \frac{\sigma_a^2 * \sigma_b^2}{\sigma_m} = \frac{12 \sigma_m^3}{(\gamma * a)^2} * \frac{\sigma_a^2 * \sigma_b^2}{\sigma_m^4} \quad \text{als volgt te schrijven}$$

$$E_f = \frac{12 \sigma_m^2}{(\gamma * a)^2} * \frac{16 \mu^2}{(1 + \mu)^4}$$

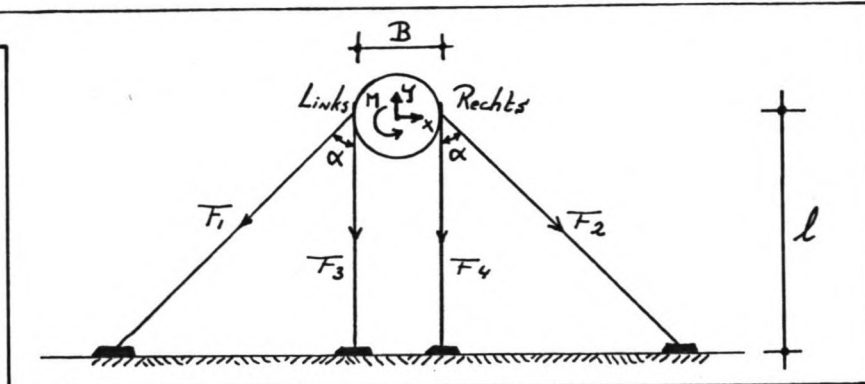
Hieruit volgt voor E_i :

$$E_i = \frac{E_e}{1 + \frac{(\gamma * a)^2}{12 \sigma_m^3} * \frac{(1 + \mu)^4}{16 \mu^2} * E_e}$$

Bijlage 3.

Afleiding van de formules voor ankerkrachten.

Situatieschets.



Kabel 1 $E_1 = E_1$

$A_1 = A_1$

$l_1 = l / \cos \alpha$

$F_1 = F_1$

Kabel 3 $E_3 = E_e$

$A_3 = A_3$

$l_3 = l$

$F_3 = F_3$

Kabel 2 $E_2 = E_2$

$A_2 = A_2$

$l_2 = l / \cos \alpha$

$F_2 = F_2$

Kabel 4 $E_4 = E_e$

$A_4 = A_4$

$l_4 = l$

$F_4 = F_4$

Op grond van symmetrie van het verankeringsysteem en een horizontale belasting die in beide richtingen even groot is nemen we $A_1 = A_2$ en $A_3 = A_4$.

Toename van de verticale kracht.

Als na plaatsing van een tunnelsegment de kracht in verticale richting toeneemt met dV dan zal het tunnelsegment toch in evenwicht moeten blijven.

De evenwichtsvergelijkingen blijven gelden:

$$\sum H = 0 \quad dF_1 * \sin \alpha = dF_2 * \sin \alpha \quad (a)$$

$$\sum V = 0 \quad dV = dF_1 * \cos \alpha + dF_2 * \cos \alpha + dF_3 + dF_4 \quad (b)$$

$$\sum M = 0 \quad dV * \frac{B}{2} = dF_2 * \cos \alpha * B + dF_4 * B \quad (c)$$

Door c met $2/3$ te vermenigvuldigen en daarna van b af te trekken krijgen we:

$$dF_3 + dF_4 - 2 * dF_4 = 0$$

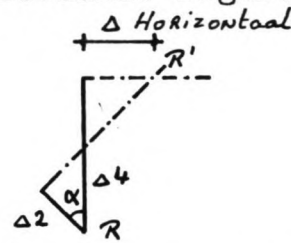
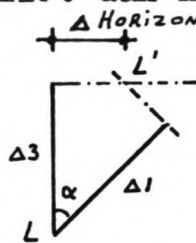
ofwel: $dF_3 = dF_4$

$$dF_3 = \frac{\Delta_3 * E_3 * A_3}{l_3} = \frac{\Delta_3 * E_e * A_3}{l}$$

$$dF_4 = \frac{\Delta_4 * E_4 * A_4}{l_4} = \frac{\Delta_4 * E_e * A_4}{l}$$

Omdat $dF_3 = dF_4$ en $A_3 = A_4$ volgt hieruit: $\Delta_3 = \Delta_4$

Tekenen we de verplaatsingen links en rechts van het tunnelsegment in een Williot dan krijgen we onderstaande figuren.



Hoewel dF_1 en dF_2 aan elkaar gelijk zijn hoeven de verlengingen Δ_1 en Δ_2 niet aan elkaar gelijk te zijn, omdat de E_1 en E_2 verschillende waarden kunnen hebben.

Als we er van uit gaan dat het tunnelsegment onvervormbaar is moet de Δ Horizontaal links gelijk zijn aan Δ Horizontaal rechts. Of uitgedrukt in Δ_1 , Δ_2 , Δ_3 , Δ_4 en α .

$$\frac{\Delta_3}{\cos \alpha} * \sin \alpha - \left(\frac{\Delta_3}{\cos \alpha} - \Delta_1 \right) \frac{1}{\sin \alpha} = \left(\Delta_4 - \frac{\Delta_2}{\cos \alpha} \right) * \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} \quad (d)$$

$$\text{ofwel} \quad -\Delta_3 * \cos \alpha + \Delta_1 = \Delta_4 * \cos \alpha - \Delta_2$$

$$\text{Met } \Delta_3 = \Delta_4 \text{ wordt dit: } \Delta_1 + \Delta_2 = 2 * \Delta_4 * \cos \alpha \quad (e)$$

Stel $\frac{\Delta_4}{\Delta_2} = \beta_{24}$. Vergelijking (e) gaat dan over in

$$\Delta_1 = (2 * \cos \alpha - 1/\beta_{24}) * \Delta_4$$

$$\frac{\Delta_4}{\Delta_1} = \frac{dF_4 * E_1 * A_1 * \cos \alpha * l}{dF_1 * E_4 * A_4 * l} = \frac{dF_4}{dF_1} * B_1$$

met $B_1 = \frac{E_1 * A_1 * \cos \alpha}{E_4 * A_4}$

g gesubstitueerd in f geeft:

$$\Delta_4 * dF_1 = (2 * \cos \alpha - 1/\beta_{24}) * \Delta_4 * dF_4 * B_1 \quad \text{ofwel}$$

$$dF_1 = B_2 * dF_4 \quad \text{met} \quad B_2 = B_1 * (2 * \cos \alpha - 1/\beta_{24})$$

Substitutie van $dF_1 = B_2 * dF_4$ in de drie evenwichtsvergelijkingen levert:

$$dF_1 = \frac{dV}{2 * (\cos \alpha + 1/B_2)}$$

$$dF_2 = \frac{dV}{2 * (\cos \alpha + 1/B_2)}$$

$$dF_3 = \frac{dV}{2 * (\cos \alpha * B_2 + 1)}$$

$$dF_4 = \frac{dV}{2 * (\cos \alpha * B_2 + 1)}$$

Opmerkingen: We hebben gesteld dat $\frac{\Delta^4}{\Delta^2} = \beta_{24}$

Voor $\Delta 2$ geldt: $\Delta 2 = \frac{dF_2 * l}{\cos \alpha * E_2 * A_2}$

Zoals we in de vorige bijlage al hebben gezien hangt E_2 af van de in de kabel aanwezige spanning. We moeten om de verlenging $\Delta 2$ te bepalen E_2 dus integreren van F_2 tot $F_2 + dF_2$.

$$E_2 = \frac{E_e}{1 + \frac{(\gamma * a)^2}{12 * F_m^3} * \frac{(1 + \mu)^4}{16 * \mu^2} * E_e} = \frac{E_e}{1 + \frac{(\gamma * a)^2 * A_2^3}{12 * F_m^3} * \frac{(1 + \mu)^4}{16 * \mu^2} * E_e}$$

$$\Delta 2 = \int_{F_2}^{F_2 + dF_2} \frac{dF_m * l}{\cos \alpha * A_2 * E_e} * \left\{ 1 + \frac{(\gamma * a)^2 * A_2^3}{12 * F_m^3} * \frac{(1 + \mu)^4}{16 * \mu^2} * E_e \right\}$$

$$\Delta 2 = \int_{F_2}^{F_2 + dF_2} \frac{dF_m * l}{\cos \alpha * E_e * A_2} + \int_{F_2}^{F_2 + dF_2} \frac{dF_m * l}{\cos \alpha * E_e * A_2} * \left\{ \frac{(\gamma * a)^2 * A_2^3}{12 * F_m^3} * \frac{(1 + \mu)^4}{16 * \mu^2} * E_e \right\}$$

Het eerste deel van deze integraal heeft als oplossing:

$$\frac{dF_2 * l}{\cos \alpha * E_e * A_2}$$

Het tweede deel wordt:

$$\left[\frac{l * (\gamma * a)^2 * A_2^3 * (1 + \mu)^4 * E_e}{\cos \alpha * E_e * A_2 * 24 * F_m^2 * 16 * \mu^2} \right]_{F_2}^{F_2 + dF_2}$$

is:

$$\underbrace{\frac{l * (\gamma * a)^2 * A_2^3 * (1 + \mu)^4 * E_e}{\cos \alpha * E_e * A_2 * 24 * 16 * \mu^2}}_C * \left\{ -\frac{1}{(F_2 + dF_2)^2} + \frac{1}{F_2^2} \right\}$$

is
$$C * \left\{ \frac{-F_2^2 + (F_2 + dF_2)^2}{(F_2 + dF_2)^2 * F_2^2} \right\}$$

is
$$C * \left\{ \frac{2F_2 * dF_2 + dF_2^2}{(F_2 + dF_2)^2 * F_2^2} \right\}$$

Dus voor 2 vinden we:

$$\Delta 2 = \frac{dF_2 * l}{\cos \alpha * E_e * A_2} \left\{ 1 + \frac{(\gamma * a)^2 * A_2^3 * (1 + \mu)^4 * E_e * (2F_2 + dF_2)}{24(F_2 + dF_2)^2 * F_2^2 * 16 * \mu^2} \right\}$$

$$\Delta 4 = \frac{dF_4 * l}{E_e * A_4}$$

$$\beta_{24} = \frac{\Delta 4}{\Delta 2} = \frac{dF_4 * \cos \alpha * A_2}{A_4 * dF_2} * \frac{1}{\left\{ 1 + \frac{(\gamma * a)^2 * A_2^3 * (1 + \mu)^4 * E_e * (2F_2 + dF_2)}{24 * (F_2 + dF_2)^2 * F_2^2 * 16 * \mu^2} \right\}}$$

We zien dus dat de te bepalen factor dF2 al in β_{24} zit.

β_{24} wordt gebruikt om dF2 te bepalen.

Voor $\Delta 1$ geldt in feite hetzelfde als voor $\Delta 2$

$$\Delta 1 = \frac{dF_1 * l}{E_e * A_1 * \cos \alpha} * \left\{ 1 + \frac{(\gamma * a)^2 * A_1^3 * (1 + \mu)^4 * E_e * (2F_1 + dF_1)}{24 * (F_1 + dF_1)^2 * F_1^2 * 16 * \mu^2} \right\}$$

$$E_1 = \frac{dF_1 * l}{\cos \alpha * \Delta 1 * A_1}$$

$$B_1 = \frac{E_1 * A_1 * \cos \alpha}{E_4 * A_4} = \frac{dF_1 * l * A_1 * \cos \alpha}{\cos \alpha * \Delta 1 * A_1 * E_4 * A_4} = \frac{dF_1 * l}{\Delta 1 * E_e * A_4}$$

We zien dat ook de waarde dF1 al in de constante B1 voorkomt.

$B_2 = B_1 (2 \cos \alpha - 1/\beta_{24})$. De waarde B2 wordt gebruikt voor het vinden van de waarden dF1, dF2, dF3 en dF4. Omdat in de waarde B2 de dF1 en dF2 al aanwezig zijn moeten dF1 tot en met dF4 iteratief worden opgelost.

Eerste benadering dF1, dF2, dF3 en dF4 ten gevolge van dV.

Als eerste benadering voor de krachtstoenames in de kabels zouden we ervan uit kunnen gaan dat $E_1 = E_2 = E_e$. Dit is een redelijke benadering als de spanningen in de kabels 1 en 2 hoog zijn.

($\geq 200 \text{ N/mm}^2$).

$$\left. \begin{aligned} \Delta 1 &= \frac{dF_1 * l}{\cos \alpha * E_1 * A_1} \\ \Delta 2 &= \frac{dF_2 * l}{\cos \alpha * E_2 * A_2} \end{aligned} \right\}$$

omdat $dF_1 = dF_2$ en $A_1 = A_2$
geldt dan:

$$\Delta 1 = \Delta 2.$$

Dit in vergelijking e geeft:

$$\Delta 2 = \Delta 4 * \cos \alpha$$

$$\text{ofwel } \frac{dF_2 * l}{\cos \alpha * E_e * A_2} = \frac{dF_4 * l}{E_e * A_4} * \cos \alpha$$

$$dF_2 = dF_4 * \cos^2 \alpha * \frac{A_2}{A_4}$$

Dit in de evenwichtsvergelijkingen a, b en c geeft:

$$dF_1 = \frac{dV * \cos^2 \alpha}{2 * (\cos^3 \alpha + A_4/A_2)}$$

$$dF_2 = \frac{dV * \cos^2 \alpha}{2 * (\cos^3 \alpha + A_4/A_2)}$$

$$dF_3 = \frac{dV}{2 * (\frac{A_2}{A_4} * \cos^3 \alpha + 1)}$$

$$dF_4 = \frac{dV}{2 * (\frac{A_2}{A_4} * \cos^3 \alpha + 1)}$$

Deze waarden worden ingevuld om β 24, B1 en B2 te bepalen. We vinden dan voor dF_1 , dF_2 , dF_3 en dF_4 nieuwe waarden, die we dF_1 nieuw, dF_2 nieuwe, dF_3 nieuw en dF_4 nieuw noemen. De iteratie verloopt snel, zo zal later blijken, als we voor de nieuw in te vullen waarden de gemiddelde nemen van de daarvoor ingevulde waarden en de nieuwe verkregen waarden, ofwel:

$$dF_1 \Rightarrow \frac{(dF_1 + dF_{1 \text{ nieuw}})}{2}$$

$$dF_2 \Rightarrow \frac{(dF_2 + dF_{2 \text{ nieuw}})}{2}$$

$$dF_3 \Rightarrow \frac{(dF_3 + dF_{3 \text{ nieuw}})}{2}$$

$$dF_4 \Rightarrow \frac{(dF_4 + dF_{4 \text{ nieuw}})}{2}$$

Dit herhalen we tot de gewenste nauwkeurigheid is bereikt.

Toename van de horizontale kracht.

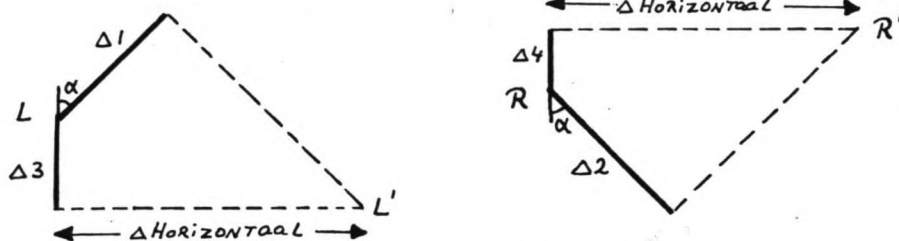
We stellen weer de evenwichtsvergelijkingen op:

$$\sum H = 0 \quad d F_1 * \sin \alpha - d F_2 * \sin \alpha = d H \quad (a')$$

$$\sum V = 0 \quad d F_1 * \cos \alpha + d F_2 * \cos \alpha + d F_3 + d F_4 = 0 \quad (b')$$

$$\sum M = 0 \quad d F_1 * \cos \alpha * B + d F_3 * B = 0 \quad (c')$$

De williots van de verplaatsingen zien er als volgt uit:



Gaan we weer uit van een onvervormbare tunnel dan zou exact gelden:

$$d = \sqrt{(d + \Delta_{HOR.L} - \Delta_{HOR.R})^2 + (\Delta_3 + \Delta_4)^2}$$

Omdat $\Delta 1$ en $\Delta 2$ in dezelfde orde van groote liggen als $\Delta 3$ en $\Delta 4$ en d vele malen groter is kunnen we bovenstaande formule schrijven als:

$$d \approx \sqrt{(d + \Delta_{HOR.L} - \Delta_{HOR.R})^2}$$

ofwel

$$d \approx d + \Delta_{HOR.L} - \Delta_{HOR.R.} \iff \Delta_{HOR.L} \approx \Delta_{HOR.R.}$$

Uitgedrukt in $\Delta 1, \Delta 2, \Delta 3, \Delta 4$ en α geeft dit

$$(\Delta 1 - \Delta 3 * \cos \alpha) \frac{1}{\sin \alpha} = (-\Delta 2 + \Delta 4 * \cos \alpha) * \frac{1}{\sin \alpha} \quad (d')$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\Delta 3}{\Delta 1} &= \beta_{13} \\ \frac{\Delta 4}{\Delta 2} &= \beta_{24} \end{aligned} \right\}$$

substitueren in d^1 geeft:

$$\Delta 3 * (\frac{1}{\beta_{13}} - \cos \alpha) = \Delta 4 * (\cos \alpha - \frac{1}{\beta_{24}}) \quad (e')$$

$$\frac{\Delta 3}{\Delta 4} = \frac{d F_4 * l}{E_4 * A_4} * \frac{E_3 * A_3}{l * d F_3} = \frac{d F_4}{d F_3} \quad \text{substitutie in } e^1$$

geeft : $dF_3 * (1/\beta_{13} - \cos \alpha) = dF_4 * (\cos \alpha - 1/\beta_{24})$

ofwel $dF_3 = -dF_4 * B_3$ waarin $B_3 = \frac{(\cos \alpha - 1/\beta_{24})}{(\cos \alpha - 1/\beta_{13})}$

Substitutie van $dF_3 = -B_3 dF_4$ in de evenwichtsvergelijkingen geeft:

$$dF_1 = \frac{dH}{\sin \alpha * (1 + 1/\beta_3)}$$

$$dF_2 = - \frac{dH}{\sin \alpha * (\beta_3 + 1)}$$

$$dF_3 = - \frac{dH * \cos \alpha}{\sin \alpha * (1 + 1/\beta_3)}$$

$$dF_4 = \frac{dH * \cos \alpha}{\sin \alpha * (\beta_3 + 1)}$$

Ook nu zien we weer dat in B_3 de termen dF_1 , dF_2 , dF_3 en dF_4 voorkomen. We moeten dus wederom iteratief te werk gaan.

Eerste benadering van dF_1 , dF_2 , dF_3 en dF_4 ten gevolge van dH .

Als eerste benadering zouden we er weer van uit kunnen gaan dat $E_1 = E_2 = E_e$. De waarden β_{13} en β_{24} zijn dan aan elkaar gelijk en B_3 wordt 1.

$$dF_1 = \frac{dH}{2 * \sin \alpha}$$

$$dF_2 = - \frac{dH}{2 * \sin \alpha}$$

$$dF_3 = - \frac{dH * \cos \alpha}{2 * \sin \alpha}$$

$$dF_4 = \frac{dH * \cos \alpha}{2 * \sin \alpha}$$

Deze eerste benadering ingevuld in $\Delta 1$, $\Delta 2$, $\Delta 3$ en $\Delta 4$ levert ons de nieuwe waarden van dF_1 tot en met dF_4 . De gemiddelde waarden van de ingevulde en verkregen dF_1 tot en met dF_4 kan weer als volgende benadering worden ingevuld tot de vereiste nauwkeurigheid is verkregen.

Moment op het tunnelsegment.

Evenwichtvergelijkingen: $\sum H = 0 \quad dF_1 * \sin \alpha + dF_2 * \sin \alpha = 0 \quad (a'')$
 $\sum V = 0 \quad (dF_1 + dF_2) * \cos \alpha + dF_3 + dF_4 = 0 \quad (b'')$
 $\sum M = 0 \quad M + dF_3 * B/2 - dF_4 * B/2 = 0 \quad (c'')$

Uit a'' en b'' volgt dat $dF_1 = -dF_2$ en $dF_3 = -dF_4$.

Substitutie hiervan in c'' geeft $dF_3 = -M/B$

$$dF_4 = M/B$$

$$dF_1 = 0$$

$$dF_2 = 0$$

Opmerking: Bij $\sum M = 0$ is de som van de momenten om punt R genomen. Dit is het punt waar de krachten F_1 en F_2 elkaar kruisen.

Literatuurlijst.

- Ernst, Der E-modul von Seilen unter Berücksichtigung des Durchhanges, Der Bauingenieur 40, 1965, H2, blz. 52-55.
- Glerum, A., e.a., Het ontwerpen van waterbouwkundige constructies, Delft, 1981.
- Glerum, A., e.a., Ventilatie van autotunnels, KIVI sectie tunneltechniek, Rapport van de studiegroep ventilatie van autotunnels, 1975.
- Glerum, A., e.a., Ventilatie van railtunnels, KIVI sectie tunneltechniek, Rapport van studiegroep IV, Amsterdam, 1973.
- Glerum, A., e.a., Waterbouwkundige Constructies b.o. I, Delft, 1982.
- Hoërner, S.F., Fluid-dynamic lift, Brick Town, 1975.
- Railbouwtechniek, Deel A: basiselementen, Delft, 1982.
- Truckenbrodt, E., Strömungsmechanik, Grundlagen und Technische Anwendungen, Berlin, 1968.
- Verzameling van Technische Gegevens en eisen, Deel VI, Nederlandse Spoorwegen.
- Voorschriften voor het Ontwerpen van Stalen Bruggen (V.O.S.B.) 1^{ste} druk, 1963.

