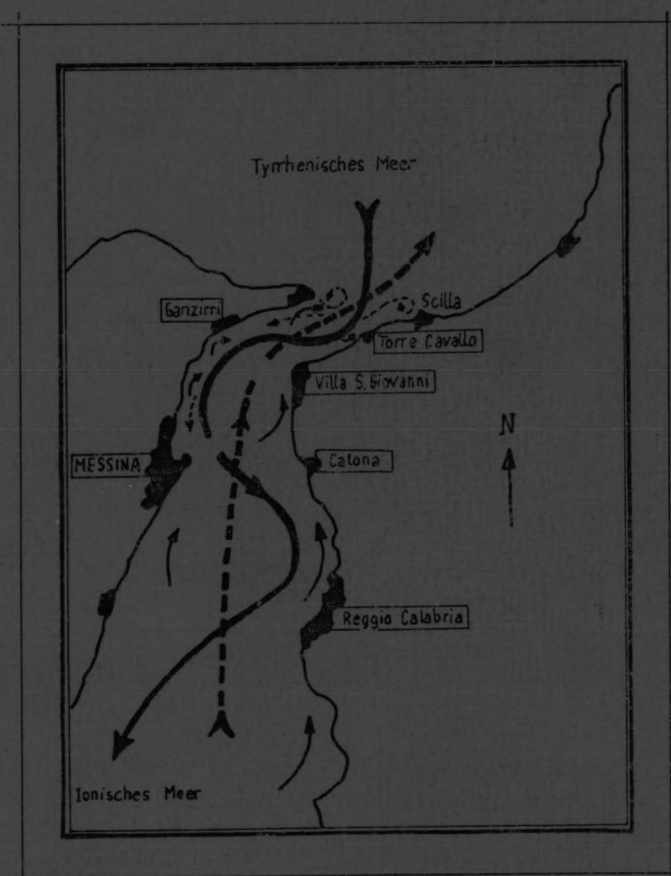


ZWEEVENDE TUNNEL

in de

STRAAT van MESSINA

Vooronderzoek



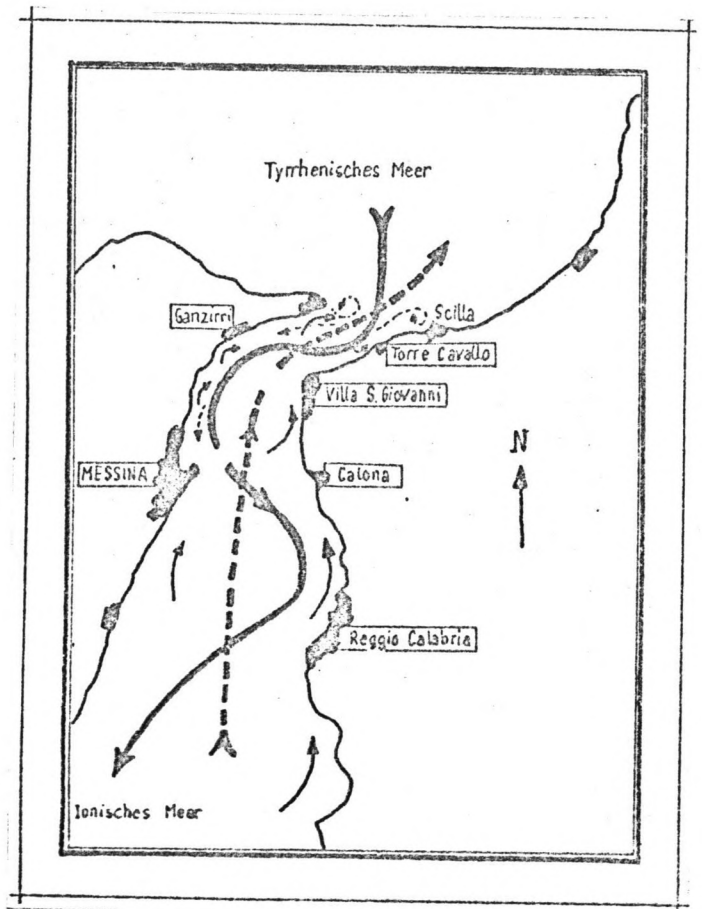
TECHNISCHE HOGESCHOOL DELFT
AFDELING DER CIVIELE TECHNIEK
VAKGROEP WATERBOUWKUNDE

Errata hoofdontwerp deel II.

- Blz. 12 regel 5 v.o.: Deze schacht moet minimaal 40 meter lang zijn en een doorsnede hebben waardoor een persoon zich naar de werkruimte kan begeven. De sleepkrachten op deze schacht zullen grote vormen aannemen. Aftuilen van de schacht kan dus noodzakelijk zijn.
- Blz. 33 regel 3 v.o.: "centimeters" moet zijn meters.
- Blz. 48 figuur 23: De nok boven het Gina-profiel is niet functioneel en kan worden weggelaten. Dit maakt de constructie goedkoper en voorkomt beschadiging in de installatiefase.
- Blz. 79 regel 3 v.o.: B 22,5 is een lage betonkwaliteit. B 30 of hoger zal beter toegepast kunnen worden.
- Blz. 81 figuur 60: Op deze spanningen moeten ook de temperatuurspanningen worden gesuperponeerd.
- Blz. 89 regel 9 v.o.: "Een plaat.....staalkwaliteit." moet zijn:
Door het lager wapeningspercentage en de geringere plaatdikte zal de plaat vermoedelijk eenvoudiger te verwijderen zijn.
- Blz. 90 laatste regel: B 17,5 is een erg lage betonkwaliteit.
- Blz. 96 bijlage 2.4: Het in de figuur geschetste kopschot is het gebruikte rekenmodel. Dit kopschot zal echter uitvoeringstechnisch onhaalbaar zijn. Daarom is het gevonden gewicht met een factor 1,2 vermenigvuldigd.

ZWEVENDE TUNNEL IN DE STRAAT VAN MESSINA.

VOORONDERZOEK.



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

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

	Bladzijde
1. Inleiding.	1
2. Omgevingscondities.	5
2.1 Situatiebeschrijving.	5
2.2 Stroomsnelheden.	6
2.3 Stromingsrichting en bodemverloop.	7
2.4 Golven.	8
2.5 Temperatuur Zoutgehalte Dichtheid.	11
3. Geofysisch- en Seismologisch milieu.	15
4. Programma van eisen.	20
5. Verkeersaanbod.	22
5.1 Huidige situatie.	22
5.2 Toekomstige situatie.	23
5.3 Conclusie.	24
6. Verschillende oeververbindingen en hun problemen.	25
7. De zwevende tunnel.	30
8. Tracé.	33
8.1 Diepteligging.	33
8.2 Ligging in horizontaal vlak.	35

1. Inleiding.

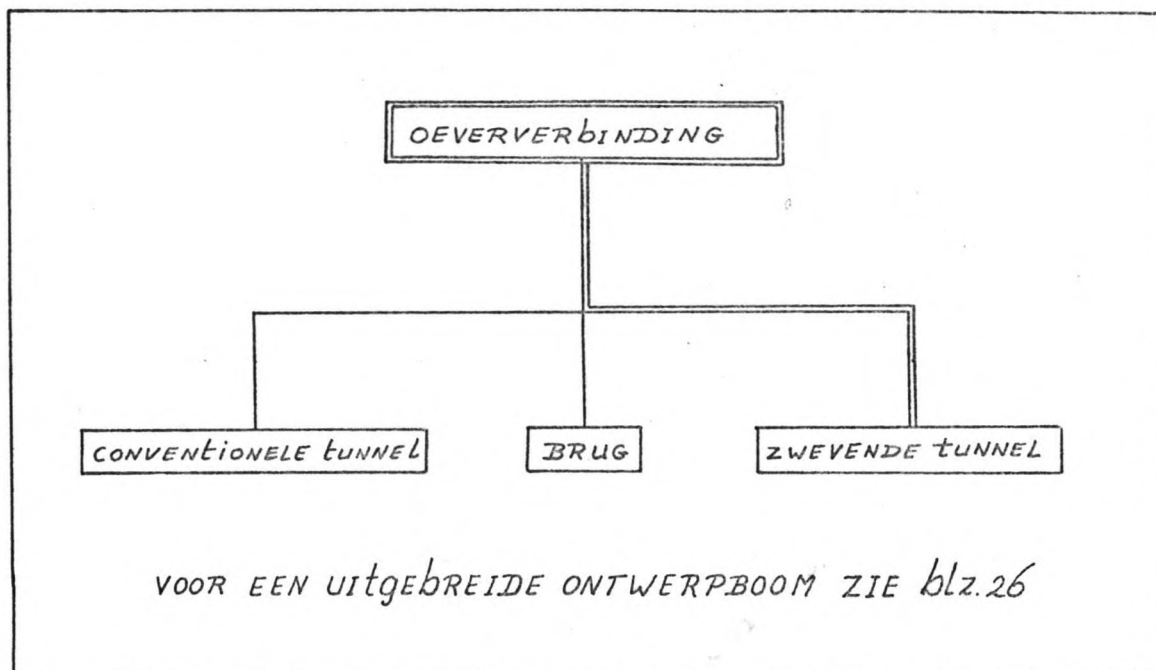
In de loop van de geschiedenis hebben we voor het oversteken van rivieren, zeearmen en meren een ontwikkeling gezien. Het vissersbootje maakte plaats voor de veerpont, die op zijn beurt plaats moest maken (en nog maakt) voor meer continue oeververbindingen zoals tunnels en bruggen.

Van een vaste oeververbinding kan gebruik worden gemaakt onder barre weersomstandigheden, wanneer de overtocht per pont al lang niet meer mogelijk zou zijn. Bovendien zijn wachttijden van de baan. Toch zijn er nog veel veerponten in gebruik, zelfs op plaatsen waar de afstand tussen de beide oevers gering is. Op die plaatsen is soms duidelijk behoefte aan een vaste oeververbinding, maar technisch en/of economisch blijkt een oeververbinding dan niet haalbaar.

Een van de plaatsen waar op technisch gebied grote moeilijkheden zijn te verwachten is tussen Sicilië en het vaste land van Italië, de Straat van Messina. Dat hier behoefte is aan een vaste oeververbinding blijkt uit het volgende: omstreeks 1970 loofde de Italiaanse regering zes prijzen uit van f100.000,- voor de goede ontwerpen van een oeververbinding tussen Sicilië en het vaste land van Italië. Enige jaren later werd de G.P.M. (Gruppo Ponti Messina) opgericht die de mogelijkheden van een brug moest onderzoeken.

Toch is de vaste oeververbinding er nog steeds niet en het ziet er ook niet naar uit dat deze er binnen afzienbare tijd zal komen. De problemen die zich namelijk voordoen zijn groot zoals later zal blijken.

Het is misschien juist in zo'n geval aanbevelenswaardig om van de traditionele ontwerpboom af te wijken door deze uit te breiden met één extra alternatief, en wel dat van de zwevende tunnel (zie figuur 1). Het is hierbij niet de bedoeling de zwevende tunnel naar voren te brengen als het enige mogelijke alternatief. Ten eerste is het de vraag of een zwevende tunnel technisch wel mogelijk is. Ten tweede zou dit alternatief,



Figuur 1: Ontwerpboom voor een oeververbinding.

indien mogelijk, niet het beste alternatief hoeven te zijn. Wat wel de bedoeling van dit afstudeerverslag is, is om juist op een moment dat een conventionele oeververbinding, zoals een brug of een conventionele tunnel, ook met problemen wordt geconfronteerd de mogelijkheden van dit nieuwe alternatief te onderzoeken. Juist op zo'n moment stijgt de kans dat voor zo'n nieuw alternatief gekozen wordt. Zijn de kinderziektes eenmaal achterhaald dan is er voor dit type oeververbindingen een breed scala van mogelijkheden. Hiervoor wordt verwezen naar hoofdstuk 6.

In het kader van een afstudeerverslag is het niet mogelijk om een volledig ontwerp van een zwevende tunnel te geven. Daarom zullen in de navolgende delen niet alle aspecten van de zwevende tunnel behandeld kunnen worden. Wel zijn er een aantal punten onderzocht die specifiek zijn voor een zwevende tunnel.

Alvorens nader in te gaan op deze aspecten kan men in dit deel, het vooronderzoek, een indruk krijgen van de ter plaatse heersende (extreme) omstandigheden.

Voor een deel is dit beschreven in hoofdstuk 2, waar eerst een situatie-beschrijving gegeven is en vervolgens dieper wordt ingegaan op het patroon en de grootte van de stroming, het bodemverloop, het golfpatroon en de eigenschappen van het zeewater.

In hoofdstuk 3 wordt het geofysisch en seismologisch milieu van de Straat van Messina besproken.

Het programma van eisen wordt in hoofdstuk 4 gegeven. Ook zal het in dit hoofdstuk nader worden toegelicht.

In hoofdstuk 5 wordt het huidige verkeersaanbod besproken.

Aan de hand hiervan en op grond van een overweging zoals dit zich in de toekomst zal wijzigen, wordt voor een bepaalde capaciteit van de oeververbinding gekozen.

In hoofdstuk 6 gaan we nader in op de te verwachten problemen bij de verschillende oeververbindingen.

Vervolgens zal in het volgende hoofdstuk nader worden ingegaan op de zwevende tunnel, met de bedoeling hier een algemene indruk van te geven die niet alleen beperkt blijft tot een zwevende tunnel in de Straat van Messina.

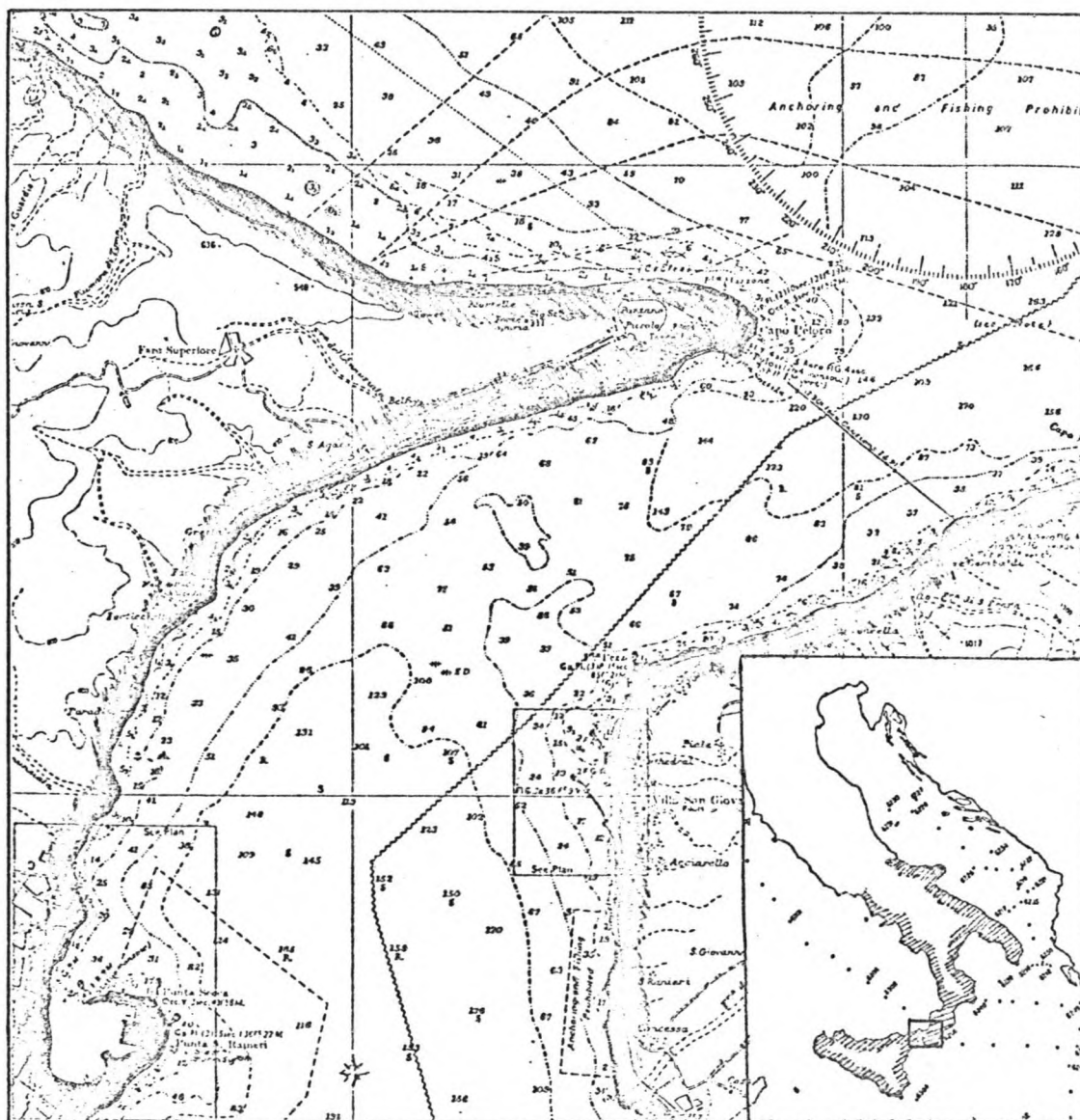
Tot slot zal in hoofdstuk 8 het tracé voor de zwevende tunnel worden bepaald.

2. Omgevingscondities.

2.1 Situatiebeschrijving van de Straat van Messina.

De Straat van Messina ligt tussen Sicilië en het vaste land van Italië. De Straat loopt van zuid naar noord en buigt in het noorden af naar het noord-oosten. Door de Straat van Messina worden de Tyrrheense zee (in het noorden) en de Ionische zee (in het zuiden) met elkaar verbonden. De geografische coördinaten van de Straat van Messina zijn: $15^{\circ} 16'$ O.L. van Greenwich
 $38^{\circ} 13'$ N.B.

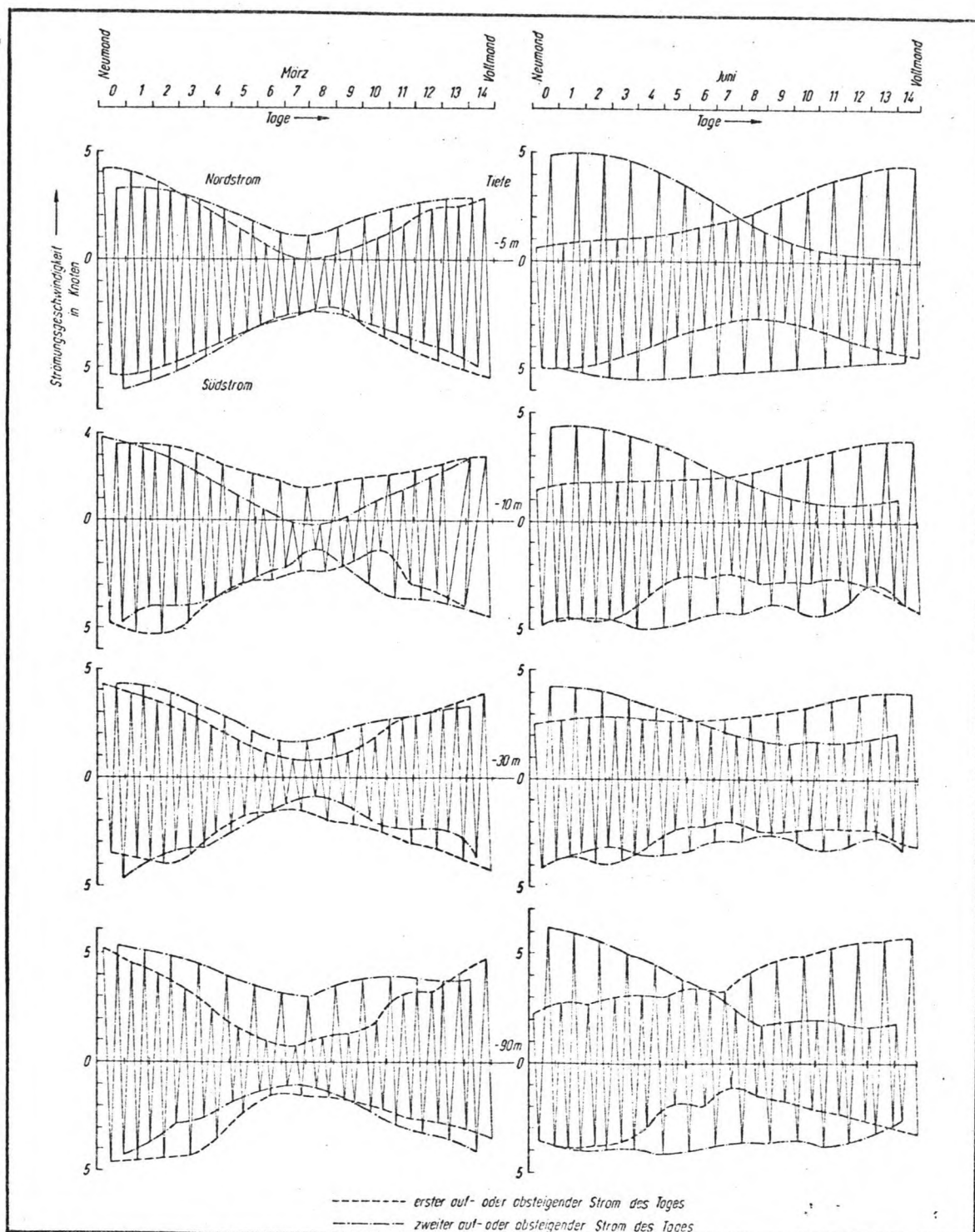
Voor een overzichtskaart van de Straat van Messina zie figuur 2.



Figuur 2: Overzichtskaart van de Straat van Messina.

2.2 Stroomsnelheden.

Bij Punta Pezzo zijn uitgebreid metingen verricht naar de stroomsnelheden op verschillende diepten. Hieruit bleek dat in de maanden maart en juni de extremen optraden. De resultaten van de metingen van deze twee maanden zijn uitgezet voor verschillende diepten in grafieken (zie figuur 3).



Figuur 3: Stroomsnelheden in twee maanden met extreme waarden voor verschillende waterdiepten. Gemeten bij Punta Pezzo.

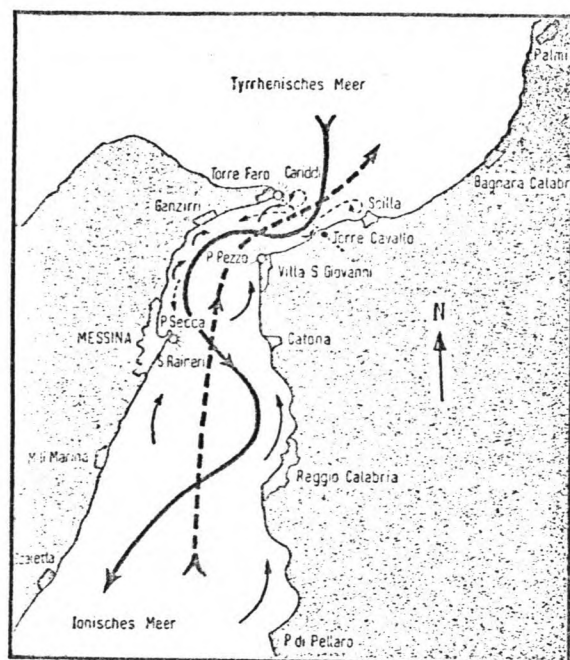
Als maatgevende grootte voor de eventueel te maken kunstwerken moeten we over de hele lengte met een maximale stroomsnelheid van 6,3 knopen ($\approx 3,2$ m/s) rekenen. Deze stroomsnelheid treedt op in beide richtingen en over de hele diepte.

Twee keer per jaar zal de snelheid drie dagen onder de drie knopen blijven, twee keer zeven dagen onder de vier knopen en twee maal elf dagen onder de vijf knopen. Er zijn dus geen wezenlijke rustperiodes, waarin we erg zwaar werk kunnen verrichten.

2.3 De stromingsrichting en bodemverloop.

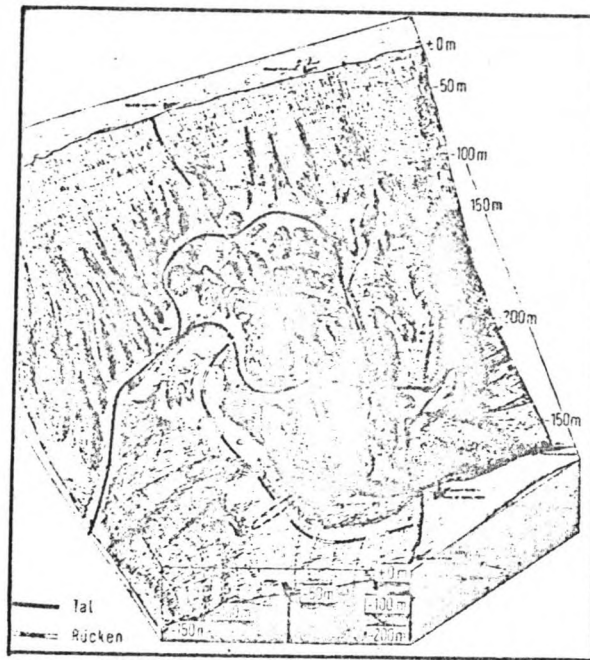
De stroming wisselt door eb en vloed iedere $6\frac{1}{4}$ uur van richting.

De stroming van zuid naar noord is door de Ionische "kusttrechter" gekanaliseerd en heeft een bij benadering axiaal verloop. In de andere richting stoot de stroom eerst tegen de Calabrische kust, vanwaar deze langs de Siciliaanse kust geleid wordt en weer terug. Deze heeft geen axiaal verloop (zie figuur 4).



Figuur 4: Vloed- en ebstroom door de Straat van Messina.

Vanuit Punta Pezzo loopt een ondiepe zadelvormige rug de zee in, richting Ganzirri (zie figuur 5). Deze zadelvormige rug waar de stroomsnelheden het grootst zijn, is dus aan twee erosie oorzaken onderworpen. Dit verklaart de axiale vorm van de Ionische glooiing en de sinusvormige afloop van de Thyrreense glooiing.



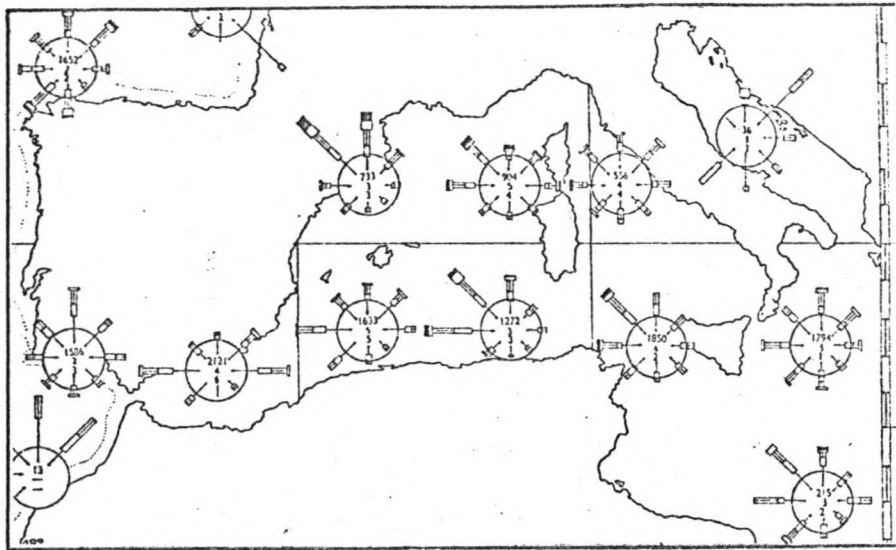
Figuur 5: Zadelvormige rug.

Bij nauwkeurige opmeting van de rug blijkt dat op iedere glooiing van de rug het dal in de richting van de aankomende stroom verloopt. Daarbij staat de top van de rug rechthoekig op beide stromen. Het sinusvormige verloop van de rug beïnvloedt niet het axiaal verloop van de zuid-noord stroming.

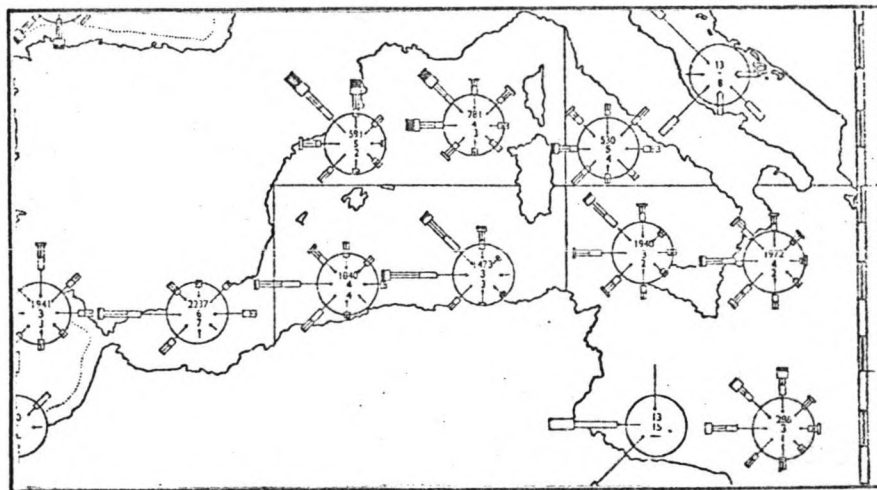
Voor een beter overzicht van de diepten en dieptelijnen kunnen we kijken naar kaart 177 van de Britse Marine.

2.4 Golven.

Voor het golfpatroon in de Straat van Messina kan niet zonder meer het golfpatroon van de Middellandse zee worden gebruikt. In de figuren 6 en 7 zijn de extreme windrozen te zien voor de omgeving van de Straat van Messina.



Figuur 6: Windrozen van de Middellandse Zee.



Figuur 7: Windrozen van de Middellandse Zee.

Door de wrijving tussen de lucht en het water worden golven opgewekt. De hoogte die de golven bereiken zal bij een bepaalde windsnelheid enerzijds beperkt worden door de tijdsduur dat de wind over het wateroppervlak waait, anderzijds vormt de lengte waarover de wind waait een beperking.

Om de windroos voor de Straat van Messina te bepalen zouden de maximale waarden genomen kunnen worden van de windrozen ten oosten en ten westen van Sicilië. Hieruit volgt dat uit het westen en noord-westen de windsnelheid het grootst is. Op een gedetailleerde kaart is te zien dat de uitloper van het eiland Sicilië de Straat van Messina behoedt tegen een golfaanval uit die richting (zie figuur 1). De golven zullen pas na diffractie om de noord-oostelijke punt van het eiland, Capo Peloro, de Straat binnenkomen. Een aanzienlijk deel van de golfenergie is dan al verspreid over een groter oppervlak. Vervolgens breken de golven op de Calabrische kust en pas daarna kan dat deel van de golven dat door de kust wordt weerkaatst verder in de Straat doordringen. In de Straat van Messina zelf zal de strijklengte de beperkende factor vormen voor de golfopzet. De afstand tussen de beide oevers is maar 3 km. Ook voor een golffront uit noordelijke richting zal eerst diffractie op moeten treden wil het golffront in de Straat van Messina doordringen. De enige richting waaruit een golffront ongehinderd kan doordringen is vanuit het zuiden. Uit deze richting vormt noch de strijklengte, noch diffractie, noch breking een beperking. De windsnelheid is vanuit deze richting echter aanzienlijk lager.

Door bovenvermelde oorzaken blijft de golfhoogte in de Straat van Messina beperkt. Om de exacte golfhoogte en de kans van optreden te berekenen zou een ingewikkeld numeriek model nodig zijn of een groot aantal meetresultaten. Omdat we hier niet over beschikken blijven de gegevens over de golfhoogte beperkt tot het volgende:

"Golven treden vaak op, maar ze bereiken geen grote hoogtes; slechts zelden bereiken ze in het midden van de Straat een hoogte van 3,5 meter bij een golflengte van 40 meter".

Op grond hiervan wordt een ontwerp-golf genomen van 5 meter hoogte met een golflengte van 40 meter.

Bovendien moet bij het onderzoek naar het dynamisch gedrag

van een constructie ook de invloed van een golf worden bekeken met een grotere golf lengte en een lagere maximale hoogte, waarin ongeveer een gelijke hoeveelheid energie aanwezig is. De energie in de ontwerpgolf met een hoogte van 5 meter en een lengte van 40 meter heeft een energie van

$$E = 1/8 * \rho * g * H^2 * l \quad \text{waarin } \rho = 1028 \text{ kg/m}^3 \\ g = 9,813 \text{ m/s}^2 \\ H = \text{golfhoogte in m} \\ l = \text{golflengte in m}$$
$$E = 1/8 * 1028 * 9,813 * 5^2 * 40 = 1,26 * 10^6 \text{ N}$$

Nemen we als lengte voor de langere golf een maximale waarde van 200 meter dan is de golfhoogte dus maximaal

$$H = \sqrt{\frac{1,26 * 10^6 * 8}{1028 * 200 * 9,813}} = 2,24 \text{ meter.}$$

2.5 Temperatuur, zoutgehalte en dichtheid.

In de Straat van Messina zijn geen officiële metingen gedaan naar temperatuur, zoutgehalte en dichtheid. De gegevens voor de Straat kunnen echter wel worden samengesteld door de metingen van twee andere meetstations te combineren. Het betreft hier twee meetstations waarvan er een 25 km ten noorden van de Straat van Messina ligt (meetstation nr. 6306) de ander ligt ongeveer 25 km ten zuiden (meetstation nr. 6305). Voor exacte ligging zie overzichtskaartje figuur 8 en de tabellen 1 en 2.

Uit de hiervoor genoemde tabellen zijn tevens de resultaten van de twee meetstations te halen.

1. Temperatuur.

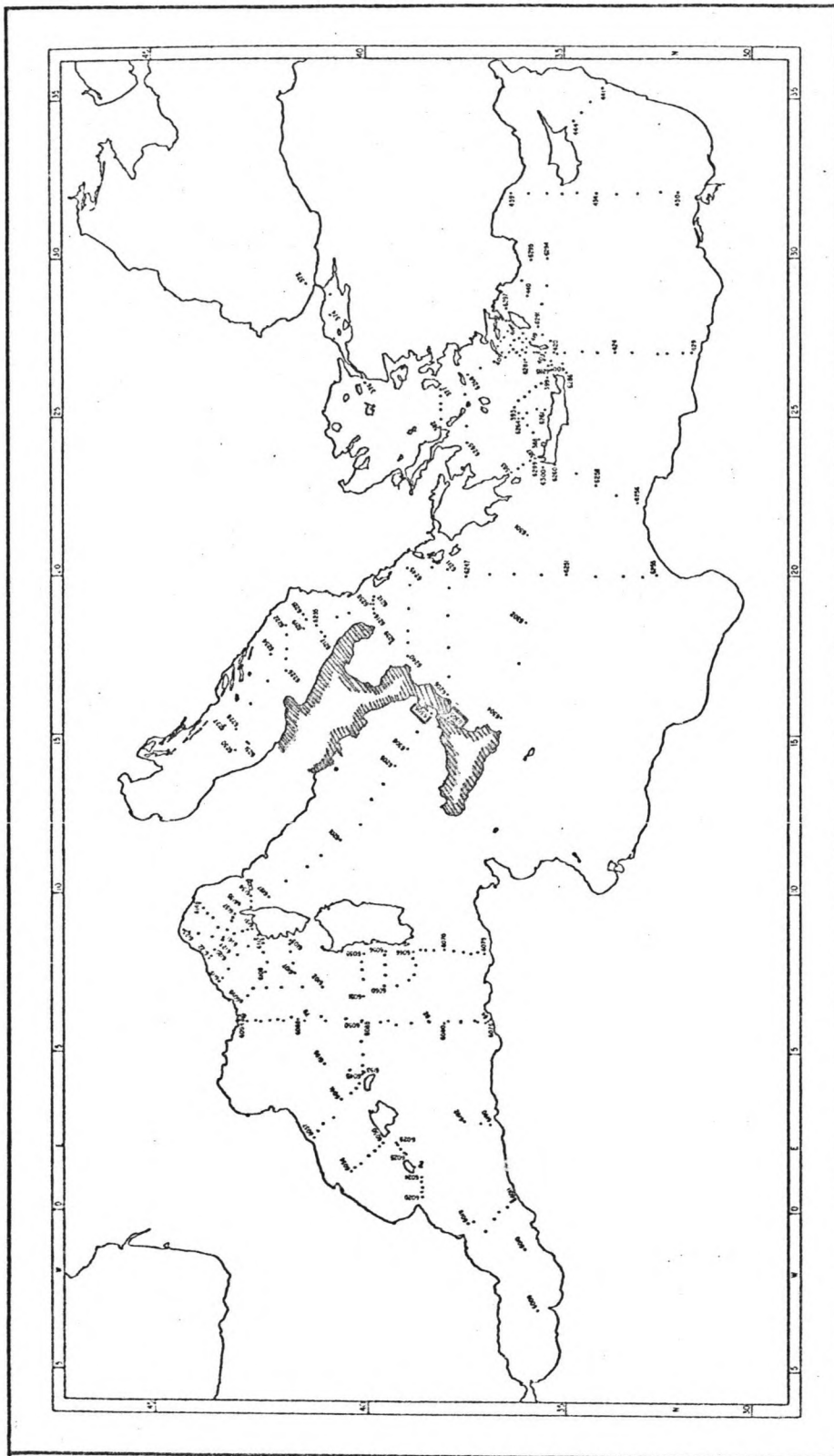
De temperatuur schommelt tussen de 13,66°C en de 14,53°C. Hierbij moet opgemerkt worden dat de metingen zijn verricht op 24 maart. Dit is vrij vroeg in het jaar. In het zomerseizoen zal vooral aan de oppervlakte de temperatuur hoger liggen als het hier genoemde maximum van 14,53°C. Voor de temperatuur op grotere diepte is dit in mindere mate het geval.

CON SHP	LATIT	LONGIT	MSQ	DATE	GMT	CRS	S-TATION	DPTH	MXDP	NL	MATR	WAVE	WIND	BAR	DRY	NET	HW	CL	V	S.OBS	REF	CNSEC	
31	AT	38 00.	N	015	32. E	143	620324	03.9	275	6305	1269	1200	19	1	1608	15.0	12.3	X2			0210	0116	
6305																							
GMT	DEPTH	TEMP	SALIN	SIGMAT	SOUND	O2	P04-P	TOT-P	N02-N	N03-N	S103	PH											
03.8	0001	14.10	38.213	28.67	1508.5	5.61	.	.	.	.	.	.											
03.8	0010	14.11	38.219	28.67	1508.7	5.62	.	.	.	.	.	.											
03.8	0020	14.13	38.244	28.66	1509.0	5.55	.	.	.	.	.	.											
03.8	0030	14.17	38.276	28.70	1509.3	5.49	.	.	.	.	.	.											
03.8	0050	14.19	38.296	28.71	1509.7	5.46	.	.	.	.	.	.											
03.8	0075	14.22	38.317	28.72	1510.2	5.43	.	.	.	.	.	.											
03.9	0100	14.24	38.361	28.75	1510.6	5.37	.	.	.	.	.	.											
03.9	0150	14.06	38.458	28.86	1511.1	5.97	.	.	.	.	.	.											
03.9	0200	14.19	38.494	28.86	1512.4	5.58	.	.	.	.	.	.											
03.9	0250	14.40	38.564	28.97	1514.0	5.64	.	.	.	.	.	.											
03.9	0300	14.35	38.624	28.97	1514.7	5.33	.	.	.	.	.	.											
03.9	0357	14.53	38.826	29.05	1517.2	4.80	.	.	.	.	.	.											
03.9	0494	14.30	38.815	29.09	1518.0	4.68	.	.	.	.	.	.											
03.9	0593	14.16	38.802	29.11	1519.2	4.58	.	.	.	.	.	.											
04.8	0704	14.03	38.772	29.11	1520.6	4.72	.	.	.	.	.	.											
04.8	0900	13.85	38.732	29.12	1523.2	4.65	.	.	.	.	.	.											
04.9	1097	13.72	38.735	29.15	1526.0	4.52	.	.	.	.	.	.											
04.9	1194	13.68	38.700	29.13	1527.5	4.34	.	.	.	.	.	.											
04.9	1243	13.66	38.690	29.13	1528.2	4.39	.	.	.	.	.	.											

Tabel 1: Gegevens van meetstation 6305 ten zuiden van de Straat van Messina.

CON SHIP	LATIT	LONGIT	MSO	DATE	GMT	CRS	STATION	DPTH	MXDP	NL	MATR	WAVE	WIND	BAR	DRY	NET	HW	CL	V	S.OBS	REF	CNSEC
31	AT	38 26.	N	015 39.	E	143	620324	08.6	275	6306	0618	0500	14	.	.	.	.	.	.	.	0210	0117
6306																						
GMT	DEPTH	TEMP	SALIN	SIGMAT	SOUND	O2	P04-P	TOT-P	N02-N	N03-N	S103	PH										
08.4	0001	13.90	37.607	28.26	1506.8	5.80	.	.	.	.	.	.										
08.4	0009	13.79	37.611	28.27	1506.9	5.81	.	.	.	.	.	.										
08.4	0017	13.79	37.628	28.28	1507.1	6.20	.	.	.	.	.	.										
08.4	0026	13.79	37.607	28.26	1507.2	5.72	.	.	.	.	.	.										
08.4	0042	13.81	37.638	28.28	1507.5	5.97	.	.	.	.	.	.										
08.4	0063	13.88	37.736	28.34	1508.2	5.91	.	.	.	.	.	.										
08.4	0083	13.88	37.776	28.37	1508.6	.	.	.	.	.	.	.										
08.4	0123	13.96	37.900	28.45	1509.7	.	.	.	.	.	.	.										
08.4	0164	14.17	38.081	28.55	1511.2	5.00	.	.	.	.	.	.										
08.4	0205	14.36	38.314	28.68	1512.9	5.04	.	.	.	.	.	.										
08.4	0248	14.33	38.506	28.84	1513.7	4.87	.	.	.	.	.	.										
08.5	0308	14.26	38.627	28.95	1515.1	4.59	.	.	.	.	.	.										
08.5	0433	14.21	38.667	28.99	1516.5	4.48	.	.	.	.	.	.										
08.5	0628	14.15	38.688	29.02	1517.9	4.51	.	.	.	.	.	.										

Tabel 2: Gegevens van meetstation 6306 ten noorden van de Straat van Messina.



Figuur 8: Overzichtskaart van de Middellandse Zee.
Hierin zijn de meetstations aangegeven.
De meetstations waarvan de waarden zijn gebruikt voor de
Straat van Messina zijn onlijnd.

2. Zoutgehalte.

Het zoutgehalte varieert van 37,607 ‰ tot 38,826 ‰ (gewichtspromillage). Ook dit zoutgehalte zou aan het einde van de zomer hoger kunnen zijn aan de oppervlakte doordat daar verdamping optreedt.

3. Dichtheid.

In de tabel is ook een kolom opgenomen waarin de waarde voor de sigmat (σ_t) gegeven wordt. Deze σ_t stelt ons in staat de dichtheid te berekenen.

Het verband tussen de σ_t en de dichtheid ρ is als volgt:

$$\rho = \sigma_t + 1000 \text{ (kg/m}^3\text{)}.$$

Met behulp van deze formule zien we dat de dichtheid varieert van 1028,26 kg/m³ aan de oppervlakte tot 1029,15 kg/m³ op grotere diepte.

Doordat de eerder genoemde factoren temperatuur en zoutgehalte met de seizoenen kunnen variëren is het mogelijk dat ook de dichtheid varieert met de seizoenen. Deze variatie zal echter niet zo groot zijn omdat door de stroming het water gemengd wordt. Bovendien zijn temperatuursstijgingen van het zeewater en toename van het zoutgehalte twee factoren die elkaar opheffen als het gaat om de dichtheid.

De variatie in dichtheid is bijzonder klein en het lijkt daarom reëel een gemiddelde waarde van deze twee waarden te nemen van 1028,7 kg/m³. De hierbij gemaakte fout kan maximaal 0,5 ‰ bedragen.

3. Geofysisch- en Seismologisch milieu.

Als een in het water liggende constructie in beweging wordt gebracht moet met de traagheidsreactie van het water rekening worden gehouden. Deze traagheidsreactie oefent een druk op de constructie uit over de gehele breedte in de richting van de relatieve beweging. Omdat deze richting onzeker is moet de maximale breedte genomen worden.

Het is niet zeker dat lege in het water liggende betonconstructies leeg blijven. Ook wanneer ze tot aan de eerste aardbeving keurig waterdicht blijven. Door de aardbeving ontstaan scheuren in de betonconstructie. Hierdoor kan in de navolgende nabevingen de constructie volstromen.

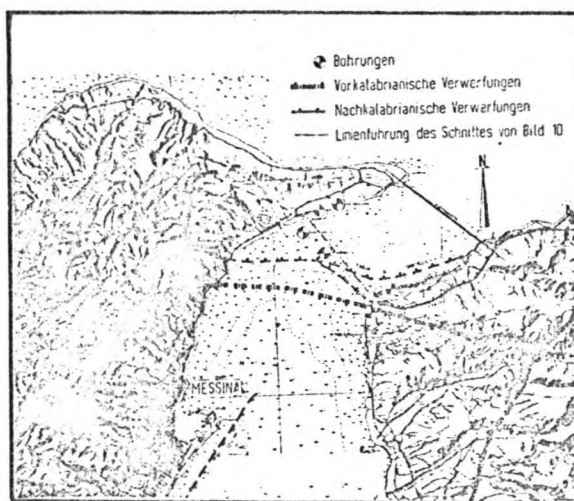
Alvorens iets gezegd kan worden over te treffen voorzorgsmaatregelen tegen calamiteiten door deze aardbevingen moeten we eerst het geofysisch en seismologisch milieu ter plaatse nader onderzoeken.

Voor belastingen van seismologische aard zijn geen aparte ontwerpvoorschriften. Men maakt meestal gebruik van door de praktijk vastgestelde normen. De uitwendige kracht van vulkanische herkomst is onbelangrijk, omdat de vulkanen van de Eolische eilanden en de vulkaan de Etna meer als 20 km van de ^{dan} Straat van Messina verwijderd liggen. Op een afstand van meer dan 20 km van deze kraters bespeuren we geen noemenswaardige seismische invloed meer. De aardbevingen die in de Straat van Messina schade aan kunnen richten zijn van tektonische herkomst.

Om de door het geoseismologisch milieu veroorzaakte uitwendige krachten te analyseren, is eerst de voorhanden zijnde geologische dokumentatie onderzocht. Deze bleek echter onvoldoende en niet gecoördineerd. Er waren meerdere geofysische onderzoeken en enige diepe boringen beschikbaar die van verschillende projecten stammen uit verschillende tijden. Van de zeebodem zelf waren geen boringen beschikbaar. Door deze dokumentatie aan te vullen met twee boringen en het nauwlettend volgen van onderzeebevingen is men in staat geweest zich een beeld te

vormen over de gesteldheid van de zeebodem.

Alle boringen zijn in figuur 9 te zien. Op deze figuur zien we ook de breukvlakken.



Figuur 9: Lokaties van de boringen en breukvlakken.

Op de oevers zijn twee overeenstemmende gestempelde breuken aan te wijzen die het vermoeden wekken dat zij onder water een enkele breuk vormen. Deze breuken kunnen samen met de voor-calabrische breuk een naar de Ionische zee gerichte zeeboezem gevormd hebben. Het dieper worden van de Thyrrheense zee heeft 700.000 jaar geleden de na-calabrische breuk veroorzaakt. Het vermoeden bestaat dat door de vorming van de voor- en na-calabrische breuk en een reeks andere, tektonische verschijnselen de twee zeeën met elkaar in verbinding zijn komen te staan.

Door de eb en vloed beweging van de zee is deze verbinding verder uitgediept.

Bovenstaande ontwikkeling heeft samengespeeld met andere gebeurtenissen, bijvoorbeeld de beweging tussen Sicilië en het vaste land van Italië. De grootte van de beweging is gemiddeld 0,02 meter per jaar van elkaar af. Er zijn echter maxima gemeten van 0,1 meter. Zoals reeds bij de beschrijving van de stroming en stromingsrichting ter sprake is gekomen (hoofdstuk 2), wijst de morfologie van het zadel op een overwegend erosieve oorsprong.

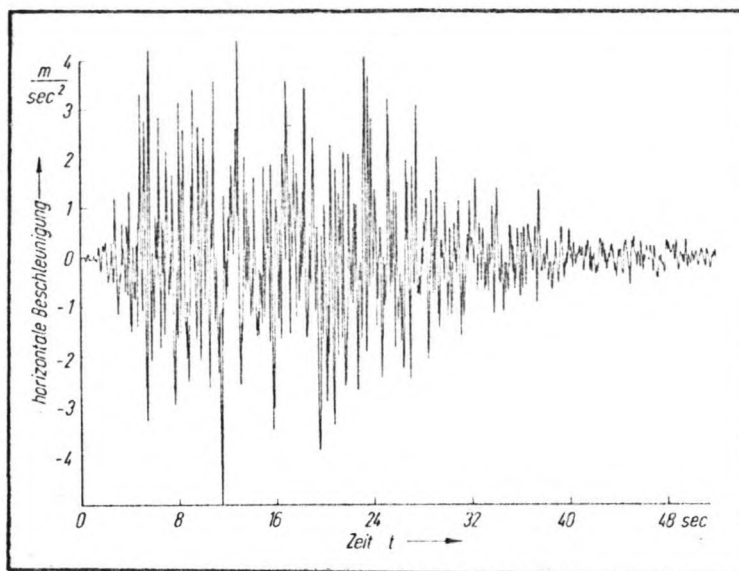
De vastgestempelde voor-calabrische breuken zijn zeker meer ~~als~~ 500.000 jaar oud en als zodanig niet meer ~~als~~ actief te beschouwen. De na-calabrische breuken zijn ook meer ~~als~~ 500.000 jaar oud. Ze zijn echter niet vastgestempeld. Deze breuken doorkruisen straten, spoorwegen en dorpen. Bij de aardbeving van 1908 zijn geen verplaatsingen geconstateerd van deze breuken. Als zodanig moeten ook deze als niet meer actief gezien worden.

De breuken waarin de oorsprong van alle huidige aardbevingen ligt, bevinden zich onder water. Door een onderzoek van alle accelerogrammen van de aardbeving van 1908 die door de Universiteit van Stuttgart zijn verricht, zijn de gegevens voor de reconstructie van de dynamiek van het bijzondere gebeuren en zijn seismische parameters geleverd. Behalve dat werd er een historische statistische analyse uitgevoerd van de seismische katalogus van het jaar 0 tot 1971 en er werd een Neumannsche-korrelatie tussen de Mercalli intensiteit en de versnellingen uitgevoerd.

Het blijkt dat de versnellingen van 0,5 g (waarbij g de zwaartekrachtsversnelling is) de jaarlijkse waarschijnlijkheid met betrekking tot optreden heeft van 1 op 1.000. Dat betekent echter niet dat na de aardbeving van 1908, 1.000 jaar gewacht moet worden voordat er weer een aardbeving van gelijke aard optreedt. Er moet van worden uitgegaan dat tijdens of kort na de bouw van een constructie al een beving van dezelfde sterkte als die van 1908 op kan treden.

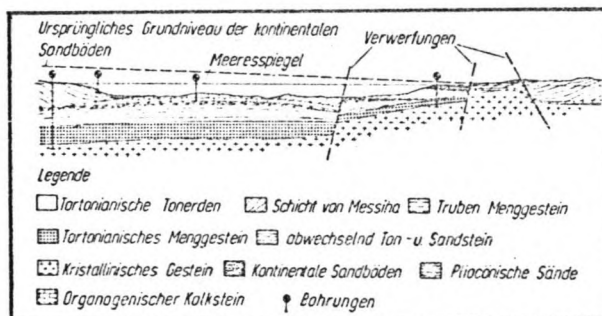
Op grond van de aardbeving van 1908 is het mogelijk een ontwerpbeving in de vorm van een synthetisch accelerogram op te stellen. Met de uitdrukking synthetisch wordt bedoeld dat deze niet van een in werkelijkheid plaatsgevonden registratie stamt, maar van een geanalyseerde verwerking. Voor het samenstellen van deze ontwerpbeving is gebruik gemaakt van wezenlijke parameters. Figuur 10 stelt het accelerogram van de ontwerpbeving voor. De op deze manier geconstrueerde aardbeving moet door een constructie met de normale gebruiksspanningen door-

staan worden. Daaruit volgt dat een ^{iets} zwaardere aardbeving het
 bouwwerk niet verwoesten maar alleen beschadigen zal.



Figuur 10: Accelerogram van de ontwerpbeving.

Figuur 11 toont een geologische doorsnede van het zadel (vergelijk figuur 9). Hier zijn ook de voor handen zijnde boringen op de oevers en beide boringen onder water te zien.



Figuur 11: Geologische doorsnede van het zadel in de Straat van Messina.

De bovenste laag van het verweerde en aan de oppervlakte gekomen gesteente wordt aan het ontwerp-accelerogram blootgesteld. Het ontwerp-accelerogram moet daarbij de volgende eigenschappen bezitten:

- Het moet met de als ontwerpparameters aangenomen oorsprongsparameters van de aardbeving van 1908 overeenstemmen.
- De maximale versnellingen van het synthetische accelerogram moet 0,5 g zijn. Deze waarde moet als versnellingswaarde gezien worden die naar alle waarschijnlijkheid overschreden

wordt. Daaronder verstaan we dat werkelijke bevingen versnellingspieken boven 0,5 g kunnen hebben. De pieken hiervan worden echter niet als maximale waarde van de versnelling aangenomen. Dit omdat de energie die deze pieken bezitten erg klein is ten opzichte van de totaalenergie.

- c. Het accelerogram moet rekening houden met de lage frequenties die de breuken tot gevolg hebben. Bovendien moeten de hoge frequenties bekeken worden, waaruit de pieken van het accelerogram afgeleid worden.

Een constructie moet de ontwerpbeving onbeschadigd doorkomen. Ze moet ook de ontwerpverschuiving van 1,5 meter opnemen zonder dat daardoor het bouwwerk onbruikbaar wordt. Dat een landhoofd door een verschuiving bezwijkt is hoogstonswaarschijnlijk, omdat het met de modernste middelen mogelijk is de actieve breukvlakken nauwkeurig te lokaliseren.

4. Programma van eisen.

Om zijn doel niet te missen moet een oeververbinding aan de volgende eisen voldoen-

1. Zowel auto als treinverkeer moet van de oeververbinding gebruik kunnen maken.
2. De scheepvaart mag na de bouw niet gehinderd worden.
3. De oeververbinding moet bruikbaar blijven op momenten dat deze wordt blootgesteld aan de frequent optredende extreme omstandigheden in dit gebied.

Voor een toelichting van de eerste eis wordt verwezen naar hoofdstuk 5.

De tweede eis is gesteld omdat de stroomsnelheden in de Straat van Messina erg groot zijn (3,2 m/s in beide richtingen). Een stuurloos geraakt schip zal, meegenomen door de stroming, een obstakel met grote snelheid raken. Dit heeft voor zowel het schip als het obstakel waarmee de botsing plaats vindt rampzalige gevolgen. Niet alleen stuurloos geraakte schepen hebben problemen met de stroming. Zelfs schepen die onder normale omstandigheden goed manoeuvreerbaar zijn, krijgen in de Straat van Messina met moeilijkheden te kampen. Dit komt doordat de noordwaarts gerichte stroming niet dezelfde richting heeft als de zuidwaarts gerichte stroming (zie figuur 4). Deze stroming wordt opgewekt door een dubbeldaags getij. Het schijnt voor te komen dat de stroming in zuidwaartse richting al op gang komt terwijl de noordwaarts gerichte stroming door de traagheid van het water nog gaande is. Er ontstaat dan een complexe waterstroming en er zijn gevallen bekend dat schepen die gegrepen werden door deze twee stromingen om hun as werden gedraaid. Vandaar de misschien wat zware tweede eis.

Tot slot de derde eis. In de Straat van Messina komen de eerder genoemde hoge stroomsnelheden vrij frequent voor. Vervolgens komen er windsnelheden voor waarbij maxima van 180 km/uur gehaald worden. Ook verschuiven Sicilië en Italië ten opzichte van elkaar, met gemiddeld 2 cm per jaar. Er zijn echter ook verschuivingen van 10 cm per jaar geconstateerd.

Omdat bovenstaande gebeurtenissen vrij regelmatig voorkomen mag dit niet lijden tot het onbruikbaar worden van de oeververbinding.

Voor een aardbeving is dit iets anders. Dit omdat een aardbeving van betekenis minder vaak voorkomt. In dit geval zouden we kunnen stellen dat een aardbeving kan leiden tot ontsporen van een trein. Dit kan zich namelijk op het land ook voordoen. Een aardbeving met een optredingskans van eens in de 1000 jaar, mag echter niet leiden tot het voorgoed onbruikbaar worden van de oeververbinding.

5. Verkeersaanbod.

5.1 Huidige situatie.

Momenteel rijden er per dag 6 treinen van Palermo de hoofdstad van het eiland Sicilië naar Rome en vice versa. Ook loopt er een autoweg van Palermo naar Rome die bij de Straat van Messina wordt onderbroken. Zowel treinen als auto's worden hier met de boot overgezet, om op de andere oever hun reis voort te zetten. Dit is een tijdrovende aangelegenheid die, vooral in de vakantieperiodes, voor grote wachttijden zorgt.

Alleen een autotunnel biedt de treinreizigers geen enkel voordeel. De verbinding tussen de stations op beide oevers zou dan onderhouden moeten worden met busdiensten. Dat betekent voor de treinreizigers twee maal overstappen. Omdat het hier reizigers betreft die reizen voor meerdere dagen zullen ze vrij veel bagage bij zich hebben die bij het overstappen moet worden meegenomen. Dit maakt het reizen aanzienlijk onaangenameer.

Een ander nadeel van alleen een autotunnel is dat Sicilië dan moet beschikken over een eigen treinenarsenaal. Dit is gezien het relatief korte spoorwegnet op het eiland een dure aangelegenheid. Bovendien moeten er voldoende bussen zijn die de verbinding tussen de stations op beide oevers onderhouden, zodat alle treinreizigers in één keer kunnen worden overgezet, want al is de kortste afstand tussen de stations 10 km via de tunnel is dit toch nog 25 km.

Alleen een treintunnel zou voor de auto's nauwelijks een voordeel bieden. De auto's moeten dan op treinstellen worden gereden om de Straat van Messina over te steken. De automobilist ruilt zo zijn wachttijd voor de boot in voor de wachttijd van de trein. Het is ook de vraag of het verkeersaanbod van auto's, vooral in de

vakantieperiodes, op deze manier verwerkt kan worden. In ieder geval moeten de stations op beide oevers uitgebreid worden om de wachtende treinstellen waarop de auto's vervoerd worden op te stellen.

Zelfs als we aannemen dat een enkelspoorstunnel voldoende is om het verkeersaanbod te verwerken dan zou de diameter van zo'n spoortunnel niet veel kleiner zijn dan die van een gekombineerde trein- autotunnel. Dit komt doordat tunnels van zo'n lengte een vlucht- koker moeten hebben en een koker waarlangs hulpverle- ning, service en onderhoud mogelijk is. Kiezen voor een enkelspoorstunnel wil bovendien zeggen dat de ver- binding tussen Sicilië en het vaste land rust op de schouders van dit ene spoor. Kleine storingen zoals bijvoorbeeld het knappen van een bovenleiding zou al leiden tot opstoppen, terwijl een ontsporing het treinverkeer voor vele dagen stil zou leggen.

Het meest voor de hand liggende alternatief lijkt op grond van het bovenstaande een combinatie van een spoor- en autotunnel.

5.2 Toekomstige situatie.

Als de zwevende tunnel er eenmaal ligt zal het aantal treinen ongetwijfeld toenemen. Vervoer van goederen per trein wordt sneller en kan qua tijd gaan concurreren met het vliegtuig. Het ligt dus voor de hand dat er goe- derentreinen gaan rijden op dit traject. Het aantal treinreizigers over kleine afstanden zal ook toenemen door de verkorting van de reistijd. Hiervoor zullen extra treinen moeten worden ingezet.

Het auto- en vrachtverkeer zal ook toenemen in de toe- komst. De barrière die het water vormde is dan immers weggenomen. Dit geldt voor vakantiegangers, maar vooral voor het verkeer dat uit de nabije omgeving van de Straat van Messina komt, omdat voor dit verkeer het verlies in reistijd relatief het grootst was.

5.3 Conclusie.

Hoewel de verkeersstroom groter zal worden in de toekomst blijft de toename toch beperkt. Immers, noch Sicilië, noch Zuid-Italië zijn economisch sterk ontwikkelde gebieden. Een grote forenzenstroom of een grote toename van goederenvervoer is niet te verwachten.

Gezien de huidige behoefte en de te verwachte ontwikkelingen lijkt een éénspoorstunnel voldoende mits deze wordt toegepast in combinatie met een autoweg.

Dit omdat de verblijftijd van de trein in het tunnelgedeelte van het tracé slechts enkele minuten bedraagt en direct daarna kan worden overgegaan op meerdere sporen. Een aangepaste dienstregeling zou het mogelijk maken meerdere treinen achter elkaar te laten rijden in dezelfde richting. Er kunnen dan op een moment meerdere treinen in de tunnel aanwezig zijn die in dezelfde richting rijden. De capaciteit is met zo'n aangepaste dienstregeling tot hoge waarden op te voeren. Het ziet er echter niet naar uit dat zo'n dienstregeling in de nabije toekomst nodig is.

Voor de verwerking van het autoverkeer lijkt een tweestrooksweg waarop in twee richtingen wordt gereden te voldoen. Deze weg heeft een capaciteit van 2000 personenauto's per uur voor de twee rijstroken samen, een waarde die in de verre toekomst niet bereikt zal worden.

6. Verschillende oververbindingen en hun problemen.

In figuur 12 is een ontwerpboom getekend waaruit de verschillende alternatieve oeververbindingen naar voren komen. In hoofdstuk 1 is vermeld dat ook de conventionele oeververbindingen met grote problemen geconfronteerd zullen worden. Daarop gaan we nu verder in. De verschillende alternatieven worden getoetst aan het programma van eisen en op hun gedrag dat ze vertonen bij belastingen die de omgeving op de oeververbinding uitoefenen.

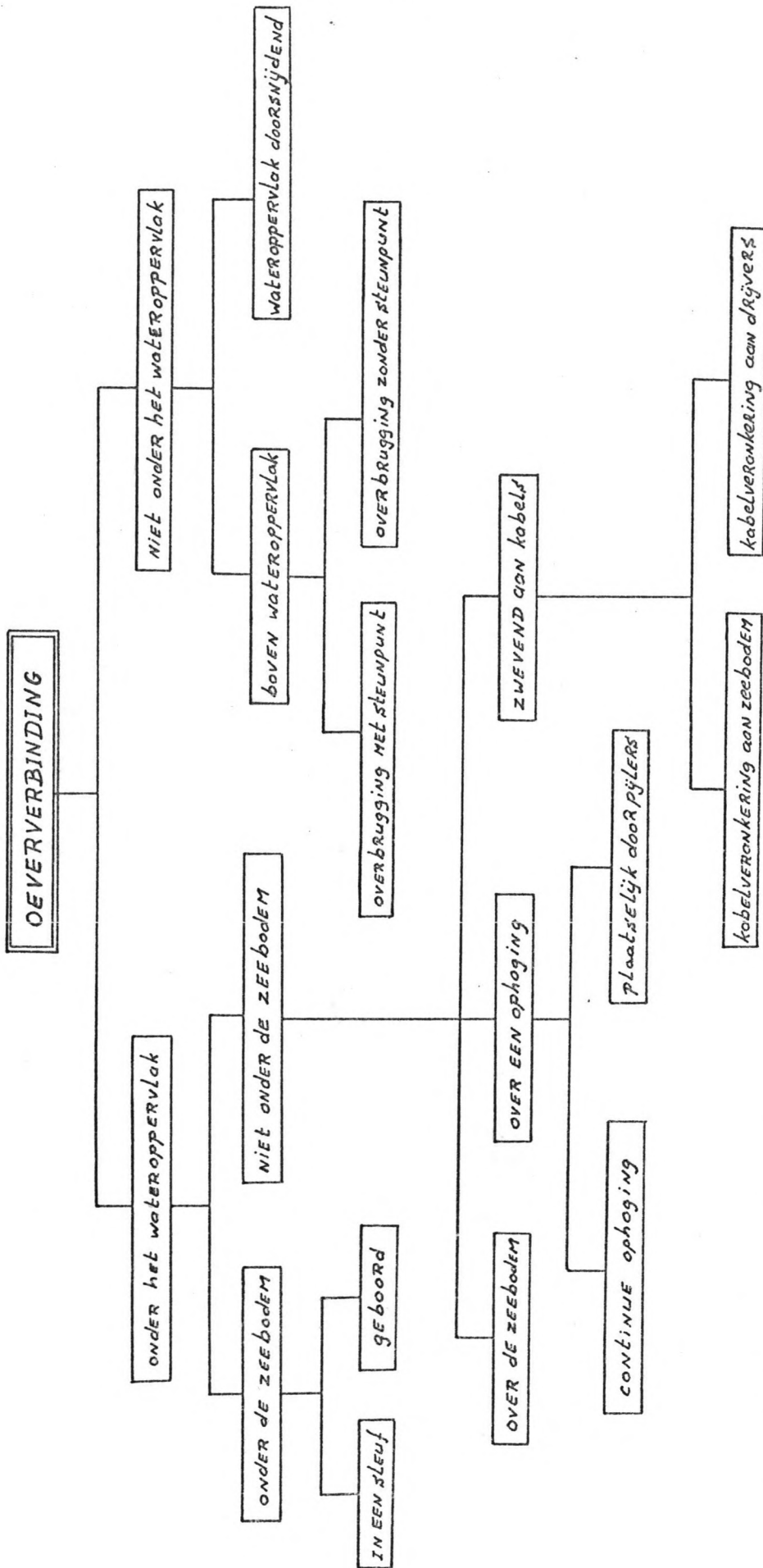
Als eerste wordt die tak van de ontwerpboom behandeld waarbij gedacht wordt aan een oeververbinding die niet onder de waterpiegel ligt. Dat kan een constructie zijn die het wateroppervlak doorsnijdt, bijv. een drijvende bakconstructie of een bakconstructie op pijlers. Deze constructie valt af op grond van eis 2. Behalve dat zou zo'n constructie erg zwaar belast worden. Zowel wind als stromingskrachten hebben grip op deze constructie. Bovendien moet de constructie golfaanvallen kunnen doorstaan en de eb en vloed beweging mee kunnen maken.

Tot slot moet ook de verschuiving van Sicilië ten opzichte van het vaste land van Italië kunnen worden meegemaakt door deze bakconstructie.

Een andere, meer voor de hand liggende, oeververbinding die niet onder het wateroppervlak ligt is een brug. Dat kan een brug zijn die de gehele afstand tussen de beide oevers in een keer overbrugt of een brug die tussen beide oevers op één of meerdere plaatsen is ondersteund door pijlers.

Eerst iets over een brug zonder steunpunten. De overspanning bedraagt hiervoor minimaal 3 km. Op grond van eis 2, geen hinder voor de scheepvaart, zal de onderkant van de brug al hoog boven het wateroppervlak moeten liggen. De pijlers waaraan de brug opgehangen wordt komen hierdoor op een lengte van enige honderden meters. Om de windkrachten, de treinlasten en krachten die optreden tijdens aardbevingen op te kunnen nemen moeten die pijlers zwaar zijn en over een goede fundering beschikken.

Ondanks de zware pijlers zullen de vervormingen van de brug



Figuur 12: Ontwerpboom voor oeververbindingen.

door de grote lengte aanzienlijk zijn. Deze grote lengte zal de brug ook extra gevoelig maken voor aardbevingen. Over de verschuiving van Scicilië ten opzichte van Italië is nog niet gesproken, maar dat zal ook voor de nodige problemen zorgen. Met deze informatie is niet bedoeld te zeggen dat dit alternatief onmogelijk is, maar een deel van de problemen wordt hier aangesneden. De problemen zullen ongetwijfeld leiden tot een dure constructie.

Een brug die op één of meerdere plaatsen extra steunpunten heeft is min of meer in strijd met eis 2. Als toch één of twee pijlers worden toegestaan, dan zouden deze pijlers zo zwaar geconstrueerd moeten worden dat zij een scheepsstoot kunnen incasseren. Om een pijler in zee te construeren is erg moeilijk omdat de fundering ongeveer 100 meter onder de zeespiegel komt. De stroomsnelheid van 3,2 m/s zal bij de bouw van zo'n pijler tot grote problemen leiden. Het alternatief van een brug zonder extra pijlers ligt dus eigenlijk meer voor de hand.

Vervolgens wordt nu de tak van de ontwerpboom besproken waarbij de gedachten uitgaan naar een tunnel.

Een tunnel onder de zeebodem valt zonder meer af. Dit omdat zo'n tunnel de verschuiving van Sicilië ten opzichte van het vaste land van Italië niet kan volgen. Een gemiddelde van 2 cm/jaar verschuiving van elkaar af lijkt misschien niet zo veel maar bij een levensduur van 100 jaar is zo'n verschuiving toch 2 meter. Deze verschuiving heeft over het traject enige pieken en wel ter plaatse van de breukvlakken (hoofdstuk 3). Hier moet dus rekening worden gehouden met grotere verplaatsing dan $2/3000 = 0,7 \text{ mm/m}$. Bij een constructie die los van de zeebodem ligt of hier vrij overheen kan schuiven, kunnen op één plaats voorzieningen worden getroffen om deze verplaatsingen op te nemen.

Een tunnel over de zeebodem is eveneens een niet erg voor de hand liggend alternatief. De maximale diepte voor de tunnel

wordt dan 150 meter. Dit heeft drie problemen tot gevolg. Ten eerste zorgt de 150 meter water voor een enorme hydrostatische druk. Dit is niet alleen nadelig voor de tunnelwand, maar we dienen ons ook te realiseren dat op deze diepte werkzaamheden verricht moeten worden.

Ten tweede blijkt uit het programma van eisen (hoofdstuk 4) dat zowel auto als treinverkeer van de tunnel gebruik moet kunnen maken. De helling die een trein kan nemen is beperkt, ongeveer $24^{\circ}/\text{oo}$. Dat wil zeggen dat de tunnel van het diepste punt af minimaal $150/0,024 = 6250$ meter moet stijgen voordat deze op zeeniveau is. De totale lengte komt hierdoor op $2 \cdot 6250 = 12.500$ meter. Afgezien van de uitvoeringstechnische problemen van een 12,5 km lange spoortunnel zal dit ook ventilatieproblemen geven voor de autokoker.

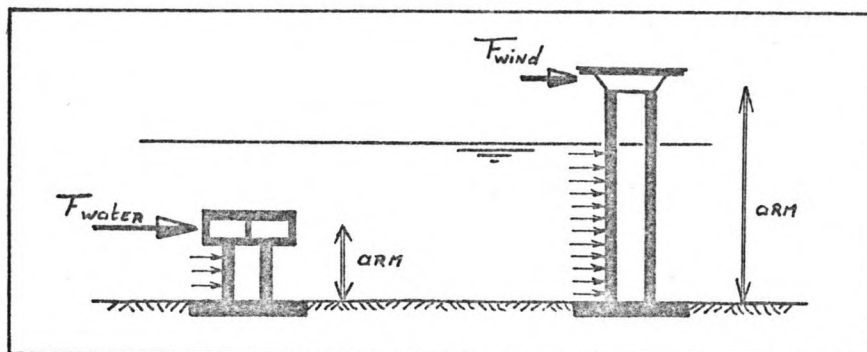
Het derde probleem dat zich voordoet is de onregelmatigheid van de zeebodem. De bodem zal eerst bouwrijp gemaakt moeten worden. Hierbij moet gedacht worden aan doorboringen van de zeebodem en ophogingen over het tracé. Omdat dit tot een diepte van 150 meter moet gebeuren is dit alternatief nauwelijks reëel te noemen.

Bevindt de tunnel zich tussen de zeebodem en de waterspiegel dan moeten de krachten die op de tunnel werken regelmatig aan de omgeving worden afgedragen. Dit om te hoge dwarskrachten en momenten op de constructie te voorkomen. De krachtsafdracht aan de omgeving kan op drie manieren geschieden.

Ten eerste door een continue ondersteuning in de vorm van een ophoging van de zeebodem ter plaatse. Voor zo'n ophoging tot bijvoorbeeld 50 meter onder de waterspiegel is een grote hoeveelheid rotsblokken nodig. Gebruiken we geen rotsblokken dan zou het gebruikte materiaal door de stroming van het eerstvolgende getij worden meegenomen. Zo'n ophoging van de bodem zou het stroomgedrag in de Straat van Messina kunnen veranderen. De snelheid van het water zal hierdoor nog hoger worden.

De tweede mogelijkheid om de krachten die op de tunnel werken aan de omgeving af te geven is door de tunnel regelmatig met pijlers te ondersteunen. Dit leidt tot veel lichte pijlers

of een minder groot aantal stevige pijlers die op de zeebodem gebouwd moeten worden. De stromingskrachten die op de tunnel werken moeten namelijk via die pijlers naar de fundering worden overgebracht. De bouw van deze pijlers zal dezelfde problemen met zich meebrengen als de bouw van pijlers voor een brug: De arm van de kracht is wel kleiner maar de kracht op de tunnel is groter dan die op een brug (zie figuur 13).



Figuur 13: Vergelijking tunnel op pijlers met brug op pijlers. Tot slot is het mogelijk een tunnel te maken waarvan de op-drijvende kracht die op de tunnel werkt groter is ~~als~~ het eigen gewicht van de tunnel. Om het opdrijven van de tunnel tegen te gaan, kan deze met verankeringskabels aan de bodem worden verankerd. Ook dit alternatief is beslist niet vrij van problemen. Deze problemen zijn vooral de uitvoeringstechnische aard. In het volgende hoofdstuk wordt uitvoeriger ingegaan op de zwevende tunnel.

7. De zwevende tunnel.

Een zwevende tunnel is een tunnel waarvan de opdrijvende kracht ~~ten~~ allen tijde groter is ~~als~~ de som van alle neerwaarts gerichte krachten, zoals eigen gewicht, mobiele belasting en stromingskrachten. Om het opdrijven van de tunnel te voorkomen wordt een verankeringssysteem aangebracht. Via dit verankeringssysteem wordt de resulterende opwaartse kracht (opwaartse kracht - neerwaartse kracht) aan de omgeving (de bodem) afgegeven.

De uiteindelijke vormgeving van een zwevende tunnel hangt in sterke mate af van de omgevingscondities. Enige voorbeelden van omgevingscondities die de vormgeving sterk bepalen zijn: de waterdiepte, de stroomsnelheid van het water door getij of golfbeweging, het seismologisch milieu, de steilheid van de oevers ter plaatse van de landhoofden, de bodemsamenstelling enz.

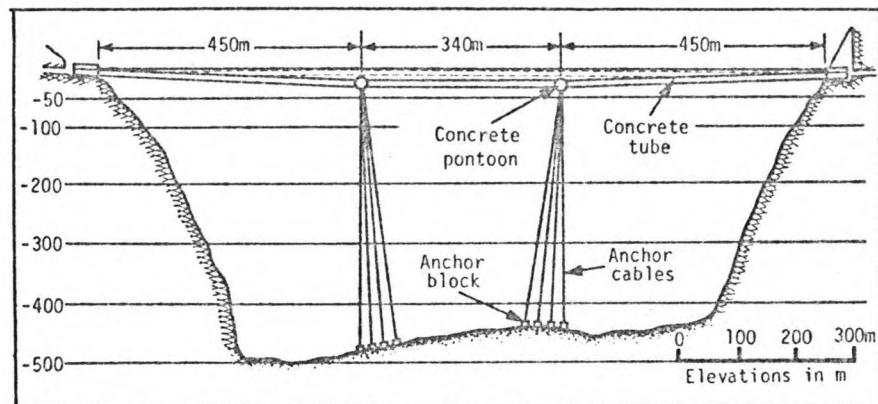
Twee lokaties die in aanmerking zouden komen voor de bouw van een zwevende tunnel zijn de Straat van Messina in Italië en het Eidfjord ter plaatse van Vallavik-Bu in Noorwegen.

We zien echter dat de omgevingscondities van deze twee lokaties sterk verschillen. Zo is de waterdiepte ter plaatse van Vallavik-Bu over een lengte van ongeveer 800 meter tussen de 450 en 500 meter diep. De stroomsnelheid in het fjord is laag. De afstand tussen beide oevers is ongeveer 1200 meter en het talud op de overgang water - land is bijzonder steil. Dit staat lijnrecht tegenover de gegevens van de Straat van Messina, waar de waterdiepte slechts 150 meter is. De stroomsnelheid is erg hoog en het talud is aanzienlijk minder steil bij de oevers, waartussen de afstand 3 km is.

Op grond van deze verschillen zal de uiteindelijke vorm van een zwevende tunnel in de Straat van Messina sterk verschillen van die van een zwevende tunnel in het Eidfjord.

In het Eidfjord zal de opdrijvende kracht in speciaal daarvoor aangebrachte pontons geconcentreerd moeten worden (zie

figuur 14). Dit komt door de grote diepte. Door de in het ponton geconcentreerde oprijvende kracht kunnen de verankeringskabels strak getrokken worden. Gebeurt dit niet dan zullen de verankeringskabels slap gaan hangen en ter plaatse van de tunnel geen horizontale komponent meer kunnen leveren tegen de weliswaar lage maar toch aanwezige stromingskrachten. Omdat deze stromingskrachten laag zijn hoeft de hoek tussen de vertikaal en de verankeringskabels niet erg groot te zijn. De afstand tussen de pontons kan ook vrij groot zijn omdat de moment opbouw door de stromingskrachten vrij gering is.



Figuur 14: Schets van een zwevende tunnel in een fjord in Noorwegen.

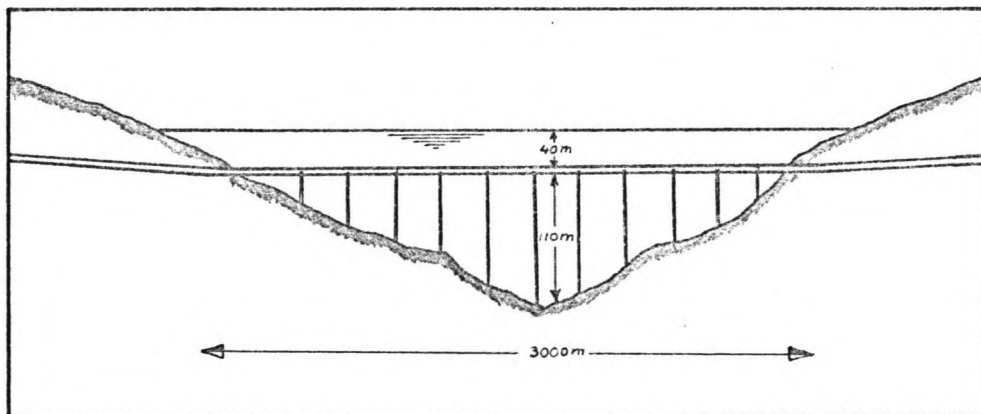
Om ook de momenten ten gevolge van de resulterende opwaartse kracht gering te houden kan de tunnelkoker zodanig geballast worden dat de maximale oprijvende kracht $\frac{1}{2} \cdot$ de mobiele belasting is en de minimale oprijvende kracht $-\frac{1}{2} \cdot$ de mobiele belasting. Ook de dwarskrachten lopen hierdoor niet erg hoog op. Niet alleen de afstanden tussen de pontons, maar ook de afstanden tussen een ponton en de oevers kan groot zijn. Twee tunnelsegmenten van 225 meter kunnen de oever met een ponton verbinden. Hierdoor bestaat de gehele zwevende oeververbinding uit slechts 2 pontons en 5 tunnelsegmenten.

In de Straat van Messina zijn een veel groter aantal tunnelsegmenten nodig. Dit komt ten eerste doordat de afstand tussen beide oevers groter is. De lengte van een tunnelsegment is echter ook kleiner. Dit komt doordat in de Straat van Messina de stroomsnelheid zo hoog is. Zelfs segmenten van 225

meter zijn bij deze stroomsnelheid volkomen onhandelbaar.

De segmenten van deze lengte worden niet door pontons gekoppeld omdat dan teveel pontons nodig zouden zijn. Het opdrijvend vermogen moet daarom uit de tunnelbuis zelf worden gehaald. Dit opdrijvend vermogen moet beduidend groter zijn dan de mobiele belasting. Het verankeringssysteem moet namelijk een aanzienlijke horizontale komponent loodrecht op de tunnellenlengte hebben. Met deze horizontale komponent kunnen de krachten ten gevolge van de stroming aan de grond worden afgedragen. Hiervoor zijn schuine kabels nodig die een veel grotere hoek maken met de vertikaal dan bij de tunnel in een fjord het geval is. Om deze kabels onder alle omstandigheden strak te houden, zodat de horizontale komponent blijft bestaan, moet zelfs onder volbelasting nog een redelijke opwaartse kracht overblijven.

Om de momenten door de aanzienlijk grotere opwaartse kracht niet te hoog te laten oplopen moeten deze krachten en ook de stromingskrachten regelmatig aan de bodem worden afgedragen (zie figuur 15).



Figuur 15: Schets van een zwevende tunnel in de Straat van Messina.

8. Tracé.

Bij het bepalen van het tracé spelen een groot aantal factoren een rol. Om hierin meer overzicht te brengen wordt allereerst een onderscheid gemaakt tussen de diepteligging van de tunnel en de ligging in het horizontale vlak.

8.1 Diepteligging.

Factoren die een rol spelen bij de diepte waarop de tunnel moet komen zijn hieronder opgesomd.

- a. Toenemende hydrostatische druk bij grotere diepte.
- b. Diepgang van schepen.
- c. Keel clearance.
- d. Laagste laagwaterstand.
- e. Verloop van golfinvloed over de diepte.
- f. Verloop van de stroomsnelheid over de diepte.

Hoe groter de diepte hoe hoger de hydrostatische druk. Dit heeft tot gevolg dat de omhullende wand van de tunnel dikker moet worden om deze krachten op te nemen. Hierdoor neemt het opdrijvend vermogen af. Om toch voldoende opdrijvend vermogen te kunnen leveren zal het ingesloten profiel van vrije ruimte groter moeten worden. Kort gezegd, een grotere diepte leidt tot een zwaardere en grotere constructie. Hierdoor zullen de kosten toenemen. Ook het uitwendig onderhoud aan de tunnel van met name kabels met bevestiging zal toenemen. Op grond hiervan zal er naar gestreefd worden de tunnel zo ondiep mogelijk te leggen.

De minimale diepte wordt bepaald door de factoren b tot en met f.

Ten eerste is er de diepgang van de schepen. De twee grootste schepen ter wereld wegen 540.000 en 477.000 D.W.T. en de lengte, breedte en diepgang van deze twee schepen zijn respectievelijk 414*63*28 meter en 365*79*30,5 meter. Het ziet er niet naar uit dat in de toekomst nog schepen van deze afmetingen gebouwd zullen worden.

De risico's van dergelijke transporten zijn te groot en de gevolgen bij eventuele calamiteiten zijn niet te overzien. Schepen van deze omvang zijn in de Straat van Messina niet te verwachten, maar zullen we eerder aantreffen op routes tussen de oliewin-gebieden en de grote wereldhavens met hun raffinaderijen waar zij dan buitengaats aan Single Point Moorings gelost zullen worden.

Als we op schepen rekenen met een maximale diepgang van 20 meter (dat is ongeveer de maximale diepgang in Europa) dan is 20 meter keel clearance genoeg om de toename van de stroomsnelheid op de tunnel binnen aanvaardbare grootte te houden. Dit omdat het water dat langs het schip moet stromen over een veel groter oppervlak kan worden gespreid dan de doorsnede van het schip zelf. Bovendien is het onwaarschijnlijk dat een schip met maximale getijstrooming in tegengestelde richting van de vaarrichting zal proberen de Straat door te varen. De stroomsnelheid is dan namelijk 3,2 m/sec en het schip zal maar zeer langzaam vooruit komen.

Met 20 meter diepgang en 20 meter keel clearance zal de bovenkant van de tunnel op 40 meter diepte komen te liggen. De waterbeweging veroorzaakt door golven zal theoretisch tot op grote diepte merkbaar zijn. Op een diepte van 40 meter zal de waterbeweging echter zo ver zijn afgenomen dat deze te verwaarlozen is ten opzichte van de stroomsnelheid ten gevolge van de getijstrooming. Voor de berekening van de stroomsnelheid ten gevolge van de golven zie deel 2 hoofdstuk 4. In hoofdstuk 2.2 blijkt dat de stroomsnelheid op grotere diepte niet noemenswaardig kleiner is dan aan de oppervlakte. Er is dus geen reden om de tunnel op grotere diepte te leggen omdat hier de krachten op de tunnel ten gevolge van deze getijstrooming kleiner zouden zijn.

Tot slot wordt nog opgemerkt dat het verschil tussen eb en vloed in de Straat van Messina (zoals vrijwel overal

in de Middellandse zee) klein is (gemiddeld verschil bij springtij is 0,4 meter). Als dit eb en vloed verschil wordt meegenomen in de beschouwing voldoet een diepte van 40 meter onder de zeespiegel voor de bovenkant van de tunnel. Deze diepte moet worden gehandhaaft tot een paar honderd meter uit de oevers, omdat ook daar een aanvaring kan plaatsvinden. Pas wanneer de tunnel hiertegen voldoende beschermd kan worden mag de diepte afnemen. Als gesproken wordt over een bescherming kunnen de gedachten uitgaan naar remmingwerken of naar een dam over de tunnel. Ook twee dammen die de tunnel over het ondiepe gedeelten flankeren is een oplossing.

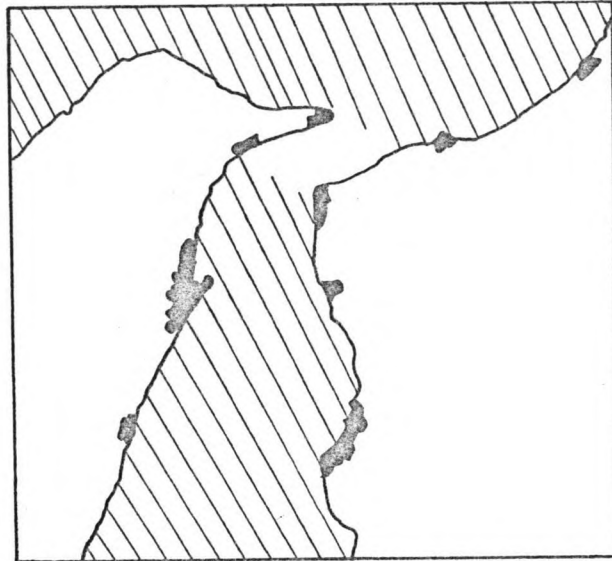
8.2 De ligging in het horizontale vlak.

Factoren die een rol spelen bij de ligging van de tunnel in het horizontale vlak zijn hieronder opgesomd.

- a. De lengte van de tunnel.
- b. Aansluiting op bestaande spoorwegvoorzieningen en autowegen op het land.
- c. Bruikbaarheid van die bestaande spoor- en autowegvoorzieningen.
- d. De mogelijkheid om verbindingen naar bestaande verkeers- en spoorwegvoorzieningen te maken.
- e. Het verloop van de diepte over het tracé.
- f. Samenstelling van de bodem zowel op het land als in zee.
- g. Stroomsnelheden die bij een bepaald tracé gelden.

Er zijn erg veel mogelijkheden om de verbinding tussen Sicilië en het vaste land van Italië tot stand te brengen. Aan de verbinding die het kortst is zal echter de voorkeur worden gegeven. Zelfs als zo'n korte oververbinding minder goed zal aansluiten op de bestaande voorzieningen van auto- en spoorverkeer. Dit omdat de kosten van het tunnelgedeelte (en vooral van het zwevende tunnelgedeelte) aanzienlijk hoger zijn per eenheid van lengte als de kosten van een gewone autoweg en spoorverbinding over land. Het ligt dus voor de hand dat het tracé zal liggen tussen het als zodanig

gearceerde gebied dat te zien is op figuur 16. De vraag of de bestaande rail- en autowegvoorzieningen aansluiten op het nieuw te leggen tunneltracé en in hoeverre deze in de toekomst bruikbaar zullen zijn speelt dus een minder belangrijke rol.



Figuur 16: Gearceerde gebied dat een te grote oeverafstand heeft.

Het volgende punt dat een rol speelt is het verloop van de diepte over het tracé. Hiermee wordt niet de tunneldiepte maar de waterdiepte bedoeld. Omdat door de tunnel ook treinverkeer rijdt zal de verplaatsing van de tunnel onder deze treinlast niet te groot mogen zijn. De trein komt anders in een soort dal te rijden waar hij zich uit moet trekken. We geven dus de voorkeur aan kleine verplaatsingen. Deze kleine verplaatsingen treden op in ondiep water. Dit is als volgt in te zien:

De verlenging van een kabel is te schrijven als

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

waarbij

Δ = verlenging

dF = krachtstoename

l = kabellengte

E = elasticiteitsmodulus

A = kabeldoorsnede

De krachtsvariatiën in verticale richting worden behalve door de treinlast veroorzaakt door het autoverkeer. De grootte van de krachtstoename is dus niet afhankelijk van de waterdiepte. Ook de elasticiteitsmodulus en de kabeldoorsnede worden door de waterdiepte niet beïnvloed. De enige waarde die met de waterdiepte varieert is de kabel-lengte. De verlenging van de verankeringskabels varieert rechtevenredig met de kabellengte. Op grond hiervan verdient ondiep water dus de voorkeur.

Bij ondiep water neemt de stroomsnelheid (v) echter toe. Als we namelijk uitgaan van een constante oeverafstand dan is bij ondiep water het doorstroomprofiel (A) kleiner. Bij een constant debiet (Q) geldt immers $Q = v \cdot A$. Door de grotere stroomsnelheid is ook de horizontaal op de tunnel staande stromingskracht groter. Dit zou in bovenstaande formule tot grotere verlengingen leiden, ware het niet dat de kabeldiamter aan de stromingskracht wordt aangepast. Immers, op grond van de veiligheid moet de spanning in de kabel voor diep en ondiep water gelijk zijn. Een tweemaal zo grote sleepkracht wordt door een kabel opgenomen met een tweemaal zo grote doorsnede. Omdat de horizontale kracht op de tunnel door een schuin naar de bodem afgespannen kabel wordt opgenomen (zo blijkt later) zal bij een gelijkblijvende hoek tussen deze schuine kabel en de vertikaal de kabellengte bij kleinere waterdiepte kleiner zijn. Dit pleit wederom voor ondiep water. Bovendien is het installeren van de verankering in de zeebodem bij ondiep water minder moeilijk.

Op grond hiervan ligt het tracé voor het zwevende gedeelte van de tunnel vrijwel vast, namelijk het tracé met de kleinste waterdiepte.

Pas wanneer de tunnel niet zwevend meer is kunnen boogstralen en bochten in het tracé worden opgenomen. Hierdoor vermijden we dat autoverkeer, maar vooral treinen grote middelpuntvliënde krachten op de tunnel uitoefenen.

De maximale helling waarmee vanuit de diepte van 40 meter onder de zeespiegel gestegen kan worden wordt bepaald door het treinverkeer. De gemiddelde waarde voor de helling van een spoor in een tunnel is lager dan die voor een spoor op een open baan. Dit heeft twee oorzaken.

Ten eerste is in een tunnel de atmosfeer vochtiger. Hierdoor is de wrijvingscoëfficiënt tussen wiel en trein lager. Ten tweede treedt in lange enkelsporige tunnels waarmee we hier te maken hebben (zie hoofdstuk 5) een verhoging van de weerstand op als gevolg van de grotere luchtweerstand. De gemiddelde helling is maximaal $24 \text{ }^{\circ}/\text{oo}$. Bij hellingsveranderingen moeten vertikale afrondingsbogen met een voldoende grote straal worden toegepast. Dit om wielrailcontact te houden, aan de comfort eisen te voldoen, een goede spoorligging te handhaven en een naderende trein op tijd te zien aankomen.

Voor de topboog wordt een afrondingsboogstraal van 20.000 meter toegepast voor de dalboog een afrondingsboogstraal van 10.000 meter. Behalve het zwevende tunnelgedeelte zal er een hellend gedeelte zijn en een deel waar boogstralen de overgang vormen tussen het horizontale en hellende gedeelte.

Als we stellen dat de tunnel op 3 meter boven gemiddeld zeeniveau boven de grond komt kunnen we de lengte van de tunnel berekenen.

Het zwevende deel heeft een lengte van 3 km.

Lengte van de afrondingsboogstralen:

- a. De dalboog brengt het tracé van horizontaal naar $24 \text{ }^{\circ}/\text{oo}$ helling. De hoek die daarbij wordt gemaakt is $\arctan 0,024$ is $1,37^{\circ}$. Dat is bij een afrondingsboogstraal een lengte van $\sin 1,37 \cdot 10.000 = 240$ meter.
De stijging over deze lengte is $(1 - \cos 1,37) \cdot 10.000 = 2,85$ meter.
- b. De topboog heeft een lengte van $\sin 1,37 \cdot 20.000 = 480$ meter.
De stijging over deze lengte is $(1 - \cos 1,37) \cdot 20.000 = 5,7$ meter.

Door de top- en dalboog is er een hoogteverschil van $5,7 + 2,85 = 8,55$ meter overbrugd. Er resteren dan nog $58 - 8,55 = 49,45$ meter waarover gestegen moet worden. De lengte die hiervoor nodig is bij de maximale helling van $24 \text{ }^{\circ}/_{\text{oo}}$ is $49,45 : 0,024 = 2600$ meter. De totale lengte om van 55 meter onder gemiddeld zeeniveau te komen op 3 meter boven gemiddeld zeeniveau is $240 + 480 + 2060 = 2780$ meter. De totale tunnellengete wordt dus $2780 \cdot 2 + 3000 = 8560$ meter.

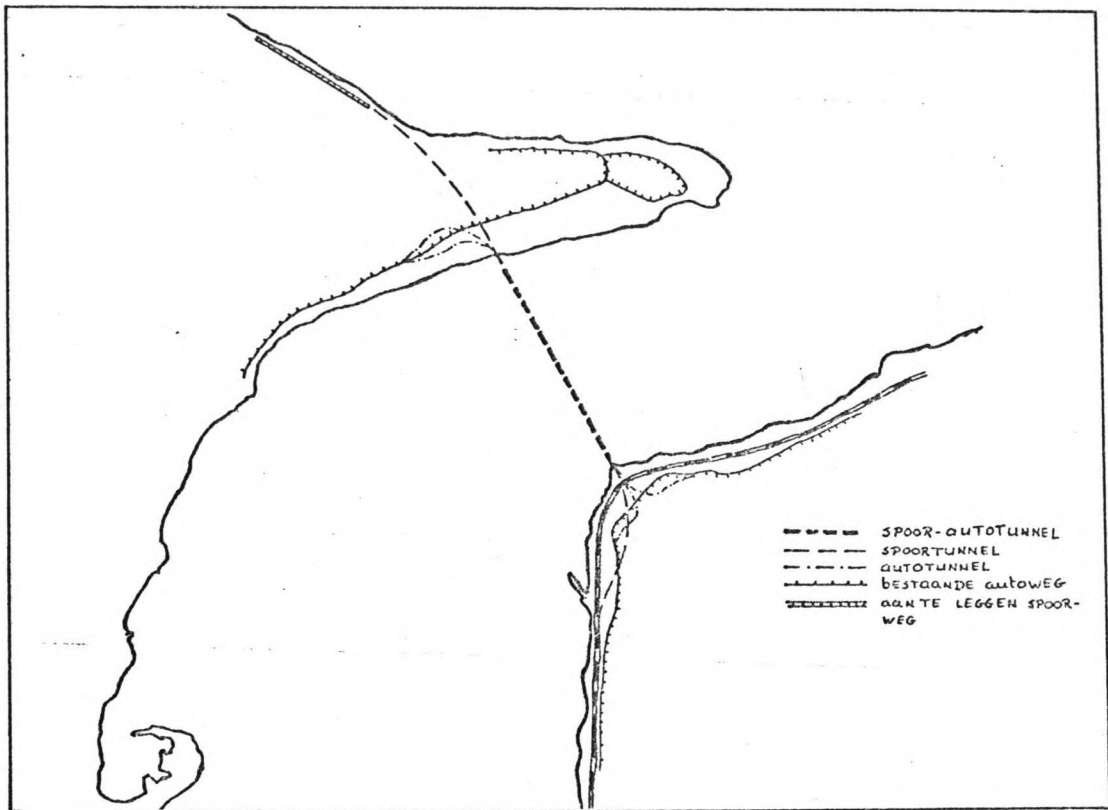
Ventilatie

We kunnen overwegen de autokoker van de treinkoker af te splitsen zodra de tunnel zich in vaste grondslag bevindt. Het autoverkeer kan immers met een grotere helling stijgen. De doorsnede van de aanzienlijk langere treinkoker kan hierdoor sterk worden gereduceerd, namelijk van 177 m^2 tot ongeveer 50 m^2 .

Het zwevende deel van de tunnel staat nagenoeg loodrecht op de kustlijn. Aan de Siciliaanse zijde kan door een zeer geringe bocht in het tracé op te nemen het spoor evenwijdig aan de noord-kust van het eiland gelegd worden. Na verloop van enige kilometers kan dan bovengronds een aansluiting gemaakt worden op het traject Messina - Palermo.

Aan de kant van het vaste land van Italië zal het echter onvermijdelijk zijn een vrij scherpe bocht in het tracé op te nemen. Zou het tracé hier 2780 landinwaarts gaan dan zijn op de kaart hoogtelijnen te zien van 400 feet wat overeenstemd met ongeveer 120 meter. Wordt verkanting (het hoger leggen van 1 rail in een bocht) toegepast dan kunnen erg scherpe bochten aangelegd worden tot bochten met een minimale bochtstraal van 500 meter. *richtlengte.* Zulke bochten hoeven in dit tracé echter niet te worden opgenomen. Als de spoortunnel na 2780 meter evenwijdig aan en vrij kort langs de kustlijn loopt is dit voldoende omdat dan de tunnel pas overgaat in een open baan. Liget de spoortunnel al eerder evenwijdig aan de kustlijn dus

is een scherpere bocht toegepast dan noodzakelijk was dan is dit alleen maar nadelig. De slijtage van het spoor is groter als niet met die snelheid wordt gereden waar de verkanting op is afgestemd. Bovendien zal de trein bij stilstand op dit tracé door de grotere verkanting schever staan.



Figuur 17: Het tracé.

Eventueel kan nog overwogen worden een tweede toegangs-tracé naar de tunnel te leggen dat naar het noord-oosten afzwenkt. Dit maakt het, het treinverkeer mogelijk de Straat over te steken zonder het zuidelijker gelegen Reggio di Calabria aan te doen.

Het autoverkeer is minder plaatsgebonden niet alleen de stralen van de bochten kunnen kleiner zijn ook de helling mag stijler zijn dan de 24 ‰ van een spoortunnel.

(boegstraal ook klein van auto.)

- -

Literatuurlijst.

- Andrew, C.E., Floating tunnel for long water crossings, Transactions of the American Society of Civil Engineers, vol. 116, 1951, blz. 708-728.
- Brandtzaeg, A, Concrete underwater floating tunnels, Samenvatting van een rapport uit 1971 van een studiegroep van Noorse ingenieurs.
- Lacroix, R, Les franchissements par tunnels flottants, Travaux, oktober 1980, blz. 46-55.
- Miller, A.R., Mediterranean Sea Atlas volume 3, Massachusetts, 1970.
- Monthly meteorological charts of the Atlantic Ocean, 1^{ste} herdruk, Londen, 1959.
- Proposta di un ponte subacqueo per i Ministero Lavori Pubblici, l'attraversamento dello Stretto di Messina.
- Submarine bridge plan for the Messina Strait, The Dock and Harbour Authority, januari 1971.
- Toscana, A.M., Postulate für die Kreuzung der Meerenge von Messina, der Stahlbau, 49, 1980, blz. 33-41.
- Volmuller, J., Beginselen Verkeerstechniek, herdruk, Delft, 1978.

tektonisch

