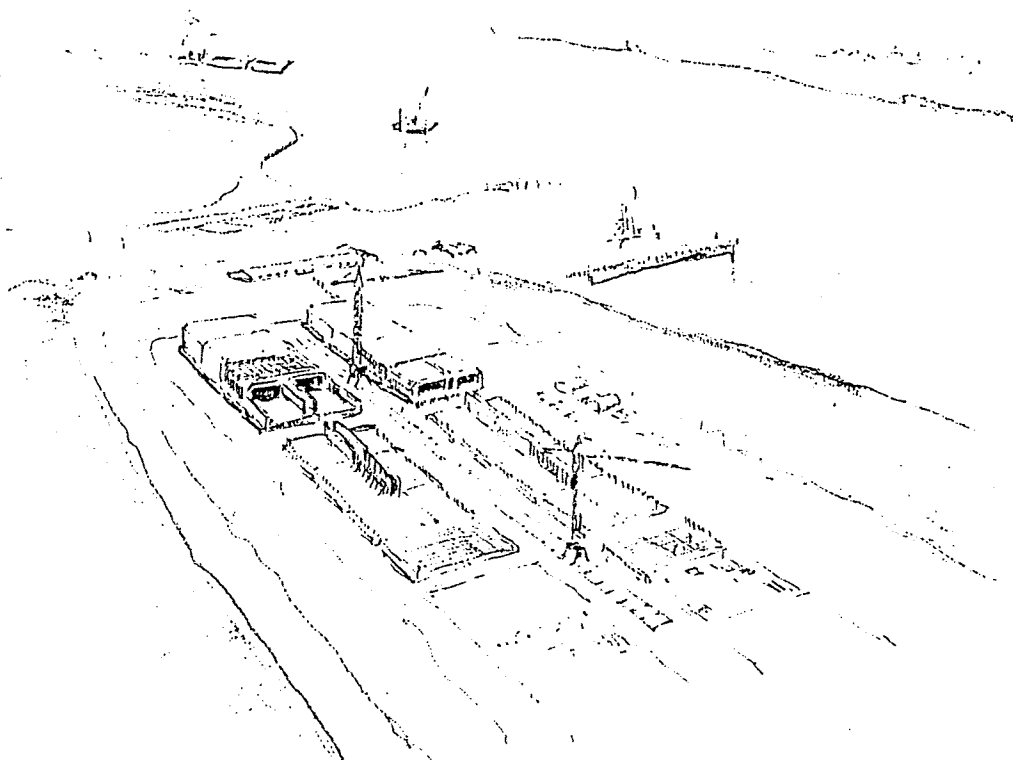


Transport van tunnelementen over zee

Afstudeerverslag

december 1996

S.W.M. Coopmann



TEC Tunnel Engineering Consultants


TU Delft
Technische Universiteit Delft

Faculteit der Civiele Techniek
Vakgroep Waterbouwkunde
Sectie Waterbouwkunde





Transport van tunnelelementen over zee

S.W.M. Coopmann
Afstudeerrapport
December 1996

Technische Universiteit Delft
Faculteit der Civiele Techniek
Vakgroep Waterbouwkunde
Sectie Constructieve Waterbouwkunde

TEC Tunnel Engineering Consultants

Afstudeercommissie

Hoogleraar :	prof. drs. ir. J.K. Vrijling
Coördinator Waterbouw :	ir. K.G. Bezuyen
Maritiem begeleider :	ir. J.M.J. Journée
Begeleider TEC :	ing. W. de Leeuw



Voorwoord

In dit afstudeerrapport beschrijf ik mijn afstudeeronderzoek 'Transport van tunnelementen over zee'. Het afstudeeronderzoek is de afronding van mijn studie Civiele Techniek aan de Technische Universiteit Delft bij de vakgroep Waterbouwkunde, sectie Constructieve Waterbouwkunde.

Het onderzoek is uitgevoerd in samenwerking met projectbureau TEC (Tunnel Engineering Consultants), een samenwerkingsverband van de ingenieursbureau's DHV, Haskoning en Witteveen en Bos, en de Bouwdienst van Rijkswaterstaat. Graag wil ik ing. Wout de Leeuw en ir. J. van Beek bedanken die mij de gelegenheid hebben geboden om bij TEC het onderzoek te verrichten.

Tevens gaat mijn dank uit naar mijn afstudeercommissie, bestaande uit Prof. drs. ir. J.K. Vrijling, ir. K.G. Bezuyen, ir. J.M.J. Journée (allen TU Delft) en ing. W. de Leeuw (TEC) voor de deskundige adviezen en begeleiding van mijn afstudeerproject.

Verder wil ik mijn vrienden, vriendin en familie bedanken voor de steun en gezelligheid tijdens mijn afstudeerperiode.

Als laatste (but not least) wil ik mijn ouders bedanken voor hun steun en toeverlaat tijdens het doorlopen van mijn studie, met name het afgelopen jaar.

Bas Coopmann
Delft, December 1996

Samenvatting

In Nederland wordt het steeds moeilijker om bouwdokken, voor het vervaardigen van afzinkelementen van een afzinktunnel, aan te leggen. Daarom wordt uitgeweken naar reeds bestaande bouwdokken, en worden de tunnelementen over langere afstanden en ook over zee vervoerd. De krachten en momenten die door de golfbelasting, tijdens transport over zee, in de elementen worden opgewekt zullen door middel van voorspanning moeten worden opgenomen. Dit afstudeeronderzoek omvat een studie naar de optredende krachten en momenten in tunnelementen als gevolg van golfbelastingen en de optimalisatie van de benodigde voorspanning alsmede de lengte van tunnelementen.

Bij het onderzoek is uitgegaan van het transport van de elementen van de Wijkertunnel, dat plaatsvindt over de Noordzee tussen de Nieuwe Waterweg en het Noordzeekanaal.

De lange-termijn verdeling van golven op de Noordzee is bepaald met behulp van 3-uurlijkse waarnemingen, van twee meetstations op de Noordzee over een periode van 13 jaar voor de zomermaanden mei tot en met augustus, van de significante golfhoogte H_s , de piekperiode T_p en de invalshoek ϕ van de golven. Uit de waarnemingen blijkt dat de piekperiode, de pieksteilheid en de hoek van inval onafhankelijk zijn van elkaar, zodat de kans op voorkomen van een karakteristieke golf wordt verkregen door vermenigvuldiging van de verdelingsfuncties van deze variabelen. De piekperiode en pieksteilheid zijn normaal verdeeld met respectievelijk $\mu = 5,326$, $\zeta = 1,034$ seconde voor de periode en $\mu = 1,9$ % , $\zeta = 0,9$ % voor de steilheid. De invalshoek is uniform verdeeld. Voor de deining is een significante hoogte van 0,5 m. met een piekperiode van 10 sec. aangehouden.

Uit de beschrijving van golven met behulp van verdelingsfuncties volgt een probabilistische aanpak van het probleem. Om de krachten en momenten in de elementen te kunnen bepalen wordt, met behulp van spectraalanalyse, een karakteristieke golf vertaald naar een golfspectrum; door middel van overdrachtsfuncties worden dan de krachten- en momentenspectra bepaald. De overdrachtsfuncties zijn bepaald met een dynamisch rekenprogramma dat gebruikt maakt van de lineaire striptheorie, en zijn gecontroleerd aan de hand van overdrachtsfuncties bepaald met modelproeven voor de Wijkertunnel. Hieruit blijkt dat de berekende overdrachtsfuncties zeer goed voldoen aan de werkelijkheid.

Met de momentenspectra zijn de significante buigende momenten bepaald, waaruit de significante benodigde voorspanning voor elke karakteristieke golf is berekend. De kans op falen van het tunnelement tijdens zeetransport als functie van de voorspanning is gelijk aan de kans op overschrijden van de significante voorspanning tijdens transport over zee (extreme Rayleigh verdeling) vermenigvuldigd met de kans op voorkomen van een karakteristieke golf (lange-termijn verdeling) gesommeerd over alle voorkomende golven.

Met behulp van deze faalkans als functie van de voorspanning en eisen ten aanzien van de faalkans voor de gebruiks- en bezwijkfase van het transport is bepaald dat de benodigde voorspanning gelijk is aan $F_p = 74000$ kN. De gebruiksfase is hierbij maatgevend.

De optimalisatie van de voorspanning is gedaan naar de kosten van bezwijken van een element tijdens transport. Het blijkt dat de optimale voorspanning lager ligt dan de toegepaste voorspanning, echter omdat de gebruiksfase maatgevend is wordt de werkbaarheid, bij een lagere 'optimale' voorspanning te klein. Kostenoptimalisatie van de voorspanning moet dus geschieden aan de hand van wachttijden voor de gebruiksfase.

Uit de lengte optimalisatie blijkt dat een zo groot mogelijke lengte het meest economisch is, omdat de meerkosten van extra voorspanning niet opwegen tegen de kostenbesparing van minder transport- en afzinkoperaties. Andere randvoorwaarden dan het zeetransport zullen maatgevend zijn voor de maximale lengte van tunnelementen. Voor de Wijkertunnel is dit de manoeuvreer-

Samenvatting

baarheid in het bouwdok, de lengte van de elementen kan hier maximaal 144 m. bedragen in plaats van de toegepaste lengte van 96 m. De kostenbesparing door het toepassen van 4 in plaats van 6 elementen zou fl 2,6 mln bedragen.

De optimalisatie is gedaan voor het opnemen van de buigende momenten tijdens transport over zee bij de voeg op de helft van de tunnellenlengte. Deze situatie is maatgevend voor de buigende momenten. Wanneer echter alleen voorspanning aanwezig is voor het opnemen van de dwarskrachten in het element tijdens zeetransport blijkt deze niet te voldoen. Het bezwijken op afschuiving van de voeg is maatgevend boven het bezwijken op buiging. Om toch voldoende dwarskrachtcapaciteit te hebben worden de voegen voorzien van een vertanding. Door het toepassen van deze vertanding zijn de buigende momenten, tijdens transport over zee, maatgevend voor de dimensionering van de voorspanning.

Inhoudsopgave

Voorwoord

Samenvatting

1 Inleiding	1
1.1 Inleiding	1
1.2 Probleemanalyse	1
1.2.1 Probleembeschrijving	1
1.2.2 Probleemstelling	2
1.2.3 Doelstelling	2
1.2.4 Randvoorwaarden en Uitgangspunten	2
1.3 Aanpak van het onderzoek	3
2 Afzinktunnels	5
2.1 Inleiding	5
2.2 Afzinktunnels	6
2.2.1 Uitvoering	6
2.2.2 Het afzinkelement	8
Het dwarsprofiel	8
Het lengteprofiel	10
2.3 De Wijkertunnel	11
2.3.1 Afmetingen Wijkertunnel	11
2.3.2 Schematisatie van de Wijkertunnel	12
2.3.3 Het transport van de tunnelementen	13
3 Theorie van golven	15
3.1 Inleiding	15
3.2 Stochastische processen	15
3.2.1 Algemeen	15
3.2.2 Golven	17
3.2.3 Stationaire processen	18
3.3 Spectraal Analyse	19
3.3.1 De Fourier-integraal	19
3.3.2 Fourier-analyse van een stationair stochastisch proces	19
3.3.3 Eigenschappen van golven	20
Kansdichtheidsfunctie	20
Golfperiode	21
Extreme waarden	22
3.4 Spectra voor golven	22
3.5 Respons van een systeem	23
3.6 Respons van tunnelementen op golfbelastingen	25
3.6.1 Inleiding	25
3.6.2 Enkelvoudige golven	25
De golfvergelijking	25
De dompbeweging	26
Absolute verticale beweging	26
3.6.3 Golfbelastingen op het element	28

Froude-Krylov kracht	29
Froude-Krylov kracht in horizontale (y) richting	30
Froude-Krylov moment	31
3.6.4 Onregelmatige golven	31
4 Golfklimaat van de Noordzee	35
4.1 Inleiding	35
4.2 Verwerken van de metingen	35
4.2.1 Inleiding	35
4.2.2 Golfhoogte	36
Zeegang	36
Deining	37
4.2.3 Golfperiode	37
4.2.4 Golfrichting	37
4.3 Lange-termijn verdeling van golven op de Noordzee.	38
4.3.1 Verdeling van de golfhoogte	38
4.3.2 Verdeling van de golfperiode	39
Verdeling van de golfsteilheid	41
4.3.3 Verdeling van de hoek van inval	42
4.3.4 Gezamenlijke kansdichtheidsfunctie	44
4.4 Deining	44
5 Probabilistische dimensionering van de golfvoorspanning	47
5.1 Inleiding	47
5.2 Het programma Seaway	47
5.2.1 Beschrijving van het programma	47
Invoer	47
Uitvoer	47
5.2.2 Vergelijking van de resultaten van seaway met modelproeven	48
Overdrachtsfuncties	48
5.3 Dimensioneren voorspanning voor de golfbelasting	49
5.4 Het programma Voorspanning	51
5.4.1 Beschrijving van het programma	51
5.4.2 De invoer	51
5.4.3 Het hoofdprogramma	52
5.4.4 Resultaten van de berekeningen	54
Verificatie van het programma	54
Faalkans als functie van de voorspanning	54
5.5 Dimensionering van de golfvoorspanning	56
5.5.1 Inleiding	56
5.5.2 Gebruiksfase	56
Golfvoorspanning	56
Totale voorspanning	57
5.5.3 Bezwijkfase	58
Golfvoorspanning	58
Totale voorspanning	59
6 Optimalisatie van de golf-voorspanning	63
6.1 Inleiding	63
6.2 Optimalisatie van de golfvoorspanning voor de Wijkertunnel	63
6.2.1 De kans op falen tijdens transport over zee	63
6.2.2 Kosten van de voorspanning	63

6.2.3 Kosten van falen	64
6.2.4 Kostenoptimalisatie	65
6.3 Optimalisatie van de tunnellingte	67
6.3.1 Inleiding	67
6.3.2 Kosten	67
6.3.3 Benodigde voorspanning als functie van de lengte	67
6.3.4 Kostenoptimalisatie	68
6.3.5 Randvoorwaarden lengte-optimalisatie	69
Voorspanning	69
Lengte	69
6.3.6 Tunnels in het algemeen	70
7 Deterministische dimensionering van de tunnelelementen	75
7.1 Inleiding	75
7.2 Voorspanning	75
7.2.1 Fasering	75
7.2.2 belastinggevallen	76
7.2.3 Resultaten	77
7.3 Wringing	77
7.3.1 Gebruiksfase	78
Dwarskracht in z-richting (wanden)	78
Dwarskracht in y-richting (vloer en dak)	79
Opneembare dwarskracht door de voorspanning bij de voeg op 1/2 L	80
7.3.2 Vertande voegconstructie	81
7.3.3 Controle bezwijkfase	82
7.4 Resumé	85
8 Conclusies en aanbevelingen	87
8.1 Conclusies	87
8.2 Aanbevelingen	88
Symbolenlijst	91
Literatuurlijst	93
Bijlagen	95
Bijlage I Schematisatie Wijkertunnel	99
Bijlage II Hydrodynamische massa en -demping	105
Bijlage III Berekening moment-overdrachtsfuncties	107
Bijlage IV Lange-termijn verdeling van de golven	113
Bijlage V Het programma Seaway	119
Bijlage VI Vergelijking van de overdrachtsfuncties bepaald met Seaway en door MARIN	129
Bijlage VII Het programma Voorspanning	147
Bijlage VIII Randvoorwaarde tunnellingte	155
Bijlage IX Belastinggevallen en fasering	157



1 Inleiding

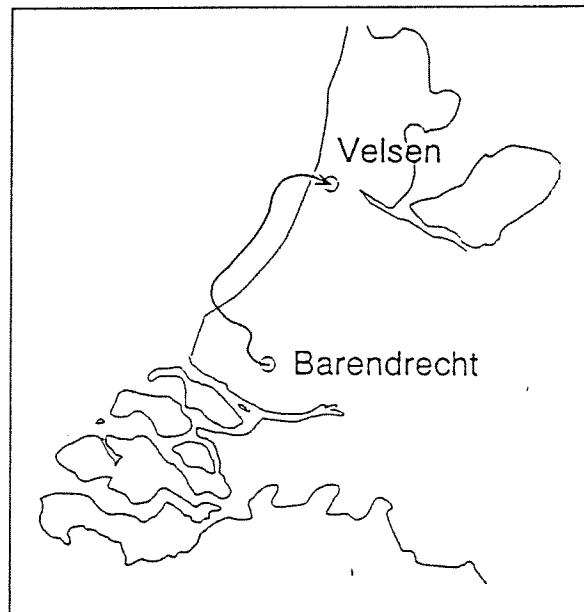
1.1 Inleiding

Dit afstudeerverslag gaat over het transport van tunnelementen over zee.

Het vervoer van elementen van een afzinktunnel over zee zal in de toekomst vaker worden toegepast omdat de extra kosten die dit met zich meebrengt opwegen tegen de kosten voor het bouwen van een nieuw bouwdok. Dit komt door strengere milieu-eisen ten aanzien van grondwaterbeheersing bij bemaling van het bouwdok. Ook is er, zeker in Nederland, vaak te weinig ruimte om een bouwdok te maken in de nabijheid van de locatie van de te realiseren tunnel.

Voor dit afstudeeronderzoek, op het zeetransport van de afzinkelementen van de Wijkertunnel, heb ik stage gelopen bij het projectbureau TEC (Tunnel Engineering Consultants).

De Wijkertunnel is de eerste tunnel in Nederland waarvan de tunnelementen over zee getransporteerd zijn. De Wijkertunnel komt onder het Noordzeekanaal te liggen in het tracé van de A9 ter hoogte van de Velsertunnel, om deze te ontlasten. Voor de bouw van de afzinkelementen is men uitgeweken naar een bestaand bouwdok in Barendrecht. De elementen worden via de Nieuwe Waterweg, De Noordzee en het Noordzeekanaal naar hun plaats van bestemming gesleept (fig. 1.1).



Figuur 1.1 Transportroute

1.2 Probleemanalyse

1.2.1 Probleembeschrijving

Drijvend transport van tunnelementen is alleen van toepassing bij de zogenaamde afzinktunnels. De aanleg van tunnels door middel van afzinken is in Nederland een veel gebruikte methode. Deze benaming heeft betrekking op de uitvoeringswijze van het bouwen van een tunnel. In de beide oevers van de waterloop worden de toeritten van de tunnel in bouwputten geconstrueerd. Het riviergedeelte van de tunnel is opgebouwd uit geprefabriceerde elementen, die tussen de toeritten in de bodem van de waterloop worden geplaatst. Deze tunnelementen worden in moten in een bouwdok vervaardigd. De moten worden voorgespannen tot elementen die drijvend getransporteerd worden naar de uiteindelijke locatie. Hier worden ze tot boven hun uiteindelijke positie gesleept en vervolgens afgezonken.

In Nederland wordt het steeds moeilijker om bouwdokken, voor het vervaardigen van de tunnelementen, aan te leggen wegens gebrek aan ruimte en omdat de grondwaterstand door bemaling niet mag worden beïnvloed. Dit is om schade ten gevolge van de benodigde grondwaterstandsverlaging te voorkomen en verontreiniging van het grondwater tegen te gaan. Daarom blijkt het noodzakelijk en/of economisch voordeliger om, voor het bouwen van nieuwe tunnelementen, uit te wijken naar reeds bestaande bouwputten of naar het buitenland.

Dit betekent dat het drijvend transport van de elementen over langere afstanden plaats moet vinden. Omdat de binnenwateren veelal niet voldoende breedte en diepgang hebben voor het transport van de tunnelementen zal vervoer over zee plaats moeten vinden. De tunnelementen worden tijdens transport over zee blootgesteld aan golfbelastingen waarop ze tot dusver niet waren gedimensioneerd.

Omdat de dwarsdoorsnede van tunnels voor het merendeel vastligt door eisen ten aanzien van profiel van vrije ruimte, sterkte in de gebruiksfase, opdrijven, transport en afzinken worden de buigende momenten, die ontstaan door de golfbelastingen, opgevangen met behulp van tijdelijke voorspanning. De tunnelementen zijn verdeeld in moten van 20 à 25 meter met daartussen dilatatievoegen. Dit in verband met verhardingskrimpen en om ongelijkmatige zettingen van de ondergrond in de uiteindelijke situatie op te kunnen vangen. De voorspanning is dus alleen nodig tijdens het transport van de elementen. De voorspanning moet ervoor zorgen dat er tijdens het transport altijd een restdruk overblijft in de voegen zodat ze niet open komen te staan waardoor de tunnelementen vollopen. Tevens moet de voorspanning ervoor zorgen dat de elementen niet bezwijken onder de golfbelasting.

De krachten die in het tunnelement optreden worden bepaald door individuele golven. Het is echter niet mogelijk om een uitspraak te doen over alle individuele golven die voor zullen komen tijdens het transport van de elementen. Aan de hand van karakteristieke golfhoogte en -periode van een golfveld kan wel een uitspraak gedaan worden over de kans op voorkomen van deze individuele golven. Door middel van probabilistische technieken kan een kansverdeling worden gemaakt van de belastingen en krachten die op het element werken. Hiermee kan een optimalisatie worden gemaakt van de benodigde voorspanning tijdens het zeetransport.

1.2.2 Probleemstelling

De afzinkelementen van een tunnel zijn primair niet ontworpen voor transport over zee. De optredende golfbelastingen, die zich niet voordoen in de eind- (gebruiks)fase van de tunnel, zullen met behulp van voorspanning moeten worden opgenomen.

1.2.3 Doelstelling

De studie omvat nader onderzoek naar de optredende krachten en momenten in tunnelementen ten gevolge van golfbelastingen. Aan de hand van deze belastingen zal worden getracht de voorspanning in de elementen te optimaliseren naar totale kosten met behulp van probabilistische technieken.

1.2.4 Randvoorwaarden en Uitgangspunten

De afzinkelementen van de Wijkertunnel, waarmee modelonderzoek naar de effecten van golfbelastingen is gedaan, worden gebruikt als concreet geval voor de toetsing van de resultaten en voor de invoer van afmetingen van tunnels in de gebruikte computerprogramma's. De transportduur en omstandigheden (zoals waterdiepte, vrijboord) die gelden voor het transport van de elementen van de Wijkertunnel gelden als uitgangspunten voor zeetransport van tunnels in het algemeen.

Golfgegevens voor de periode 1979 tot en met 1991 van meetstation IJmuiden en het platform Euro-O op de noordzee voor de zomermaanden mei t/m augustus dienen als richtlijn voor de bepaling van de golfcondities (lange-termijn verdeling) op de noordzee.

Verdere aannames die in de loop van het onderzoek gedaan worden, zoals schematisatie v/d dwarsdoorsnede en aannames ter vereenvoudiging van de theorie, worden zodra zij aan de orde komen in de tekst vermeld.

1.3 Aanpak van het onderzoek

De indeling van het rapport komt overeen met de gevolgde aanpak van het onderzoek. Allereerst wordt ingegaan op afzinktunnels en de uitvoering hiervan in het algemeen en de Wijkertunnel en het zeetransport in het bijzonder, dit geschied in hoofdstuk 2. In hoofdstuk 3 wordt de theorie van golven die voor het onderzoek van belang is beschreven. Het golfklimaat van de Noordzee wordt in hoofdstuk 4 beschreven aan de hand van verdelingen die de waarnemingen van karakteristieke golven op de Noordzee het best benaderen. Hierbij is gebruikt gemaakt van golfgegevens van het KNMI voor de zomermaanden mei tot en met augustus over een periode van 13 jaar.

Voor het berekenen van de momenten die opgenomen moeten worden door middel van voorspanning is gebruikt gemaakt van het computerprogramma Seaway. In de programmeertaal Pascal is een programma geschreven om de faalkans van een tunnelelement tijdens zeetransport te berekenen om zodoende de voorspanning te kunnen optimaliseren. In hoofdstuk 5 wordt het programma beschreven alsmede het programma Seaway waarvan gebruikt wordt gemaakt in het programma en worden de uitkomsten van het programma vergeleken met modelproeven. De benodigde golfvoorspanning wordt aan de hand van de gestelde eisen van de faalkans voor transport van de Wijkertunnel berekend.

In hoofdstuk 6 staan de resultaten van het programma en conclusies wat betreft de Wijkertunnel. Ook wordt in hoofdstuk 6 gekeken naar optimalisatie van tunnels wat betreft de voorspanning en elementlengte in het algemeen.

Hoofdstuk 7 bevat de deterministische dimensionering van de voorspanning voor elke fase die de elementen van de Wijkertunnel doorlopen.

Tenslotte worden in hoofdstuk 8 conclusies getrokken en aanbevelingen gedaan.

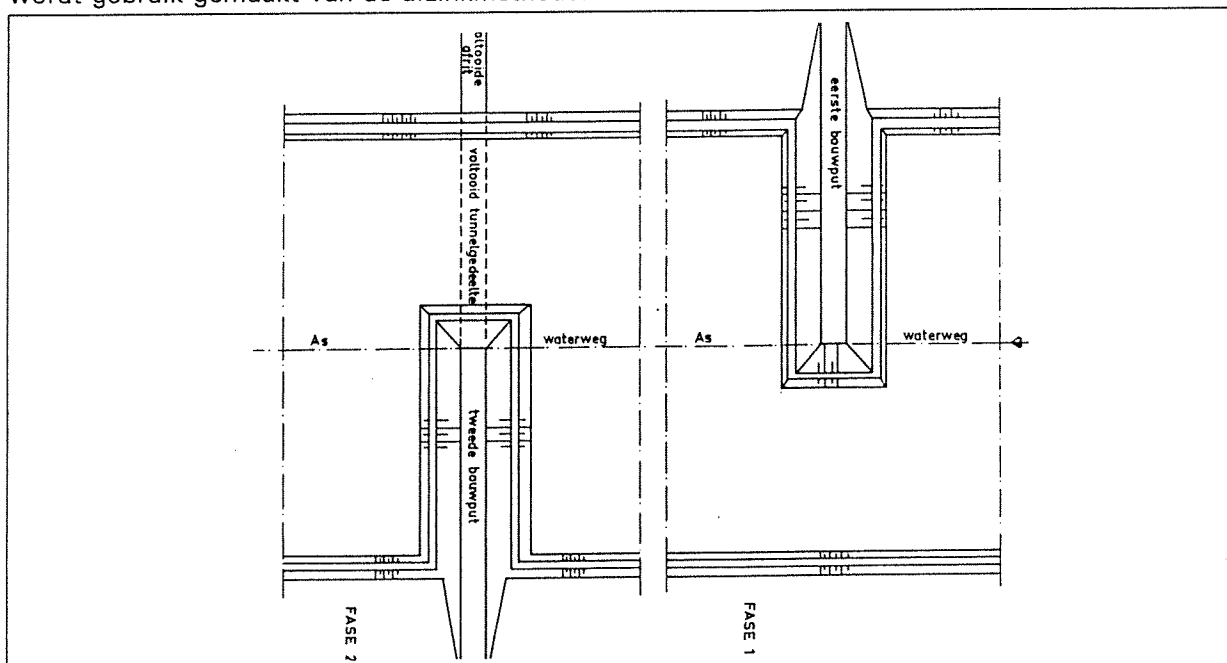
2 Afzinktunnels

2.1 Inleiding

Er zijn verschillende methoden om een tunnelverbinding voor verkeersdoeleinden onder een waterloop te realiseren. De verschillende uitvoeringsmethoden zijn geboorde tunnels, ter plaatse gebouwde tunnels en afzinktunnels.

Bij geboorde tunnels wordt een beginschacht gegraven waarna een schild wordt aangebracht met aan de voorzijde een grote boorkop die de grond afgraaft. Achter de boorkop wordt de tunnelmantel, die uit betonsegmenten is opgebouwd, aangebracht. Nadelen van de boormethode zijn dat de slappe nederlandse ondergrond zich niet goed leent voor deze methode. De lengte van tunnelkruisingen voor nederlandse kanalen en rivieren is relatief gering, waardoor de boorkosten hoog zijn vanwege onvoldoende afschrijving van de boormachine. Tevens is een gronddekking van 1,2 à 1,5 maal de diameter vereist. Dit betekent dat de tunnel dieper moet komen te liggen en dat de tunnel langer moet worden dan strikt noodzakelijk. De cilindervorm van de dwarsdoorsnede is ook niet gunstig omdat het profiel van vrije ruimte rechthoekig moet zijn. De kosten voor het boren van tunnels liggen bij nederlandse omstandigheden daardoor hoger dan bij andere uitvoeringsmethoden.

Bij het ter plaatse bouwen van de tunnel wordt of de waterloop tijdelijk omgelegd en de tunnel wordt dan onder de drooggelegde bedding van de waterloop gebouwd of de tunnel wordt in gedeelten in een bouwkuip gebouwd. Er zijn dan in principe twee fasen te onderscheiden (fig. 2.1). Eerst wordt de helft van de tunnel in een bouwkuip gebouwd. Daarna wordt de oorspronkelijke loop van de waterweg hersteld en wordt vanaf de andere oever een bouwkuip gemaakt waarin het tweede deel van de tunnel wordt gebouwd. Zoals uit de figuur blijkt is de hinder voor de scheepvaart erg groot bij deze uitvoeringsmethode. Op plaatsen waar in verband met scheepvaart of de waterafvoer geen bouwputten in de waterloop kunnen worden gemaakt, wordt gebruik gemaakt van de afzinkmethode.



Figuur 2.1 Ter plaatse gebouwde tunnel

2.2 Afzinktunnels

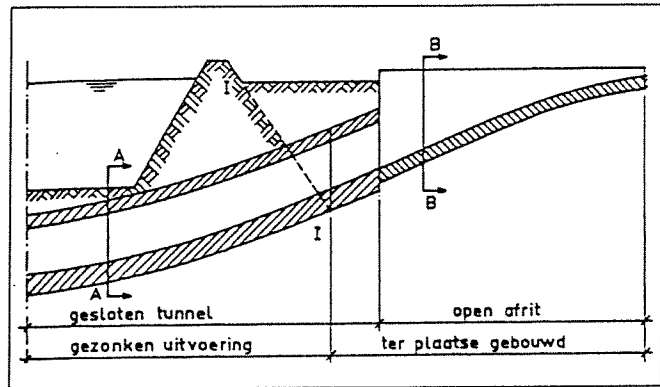
Vanwege de nadelen van de genoemde methoden wordt in Nederland, voor de kruising van verkeerswegen met waterwegen, veel gebruik gemaakt van de methode van het afzinken van tunnels. Hierdoor is er geen bouwkuip nodig voor het gedeelte van de tunnel dat onder de waterweg is gelegen, waardoor de hinder voor de scheepvaart en de waterafvoer tot een minimum beperkt kan blijven.

2.2.1 Uitvoering

Aan de oevers van de waterweg worden open putten gemaakt om hier de op- en afritten in 'den droge' te kunnen bouwen (fig. 2.2). De toeritten worden door stalen of betonnen waterdichte schotten afgesloten. De waterkering wordt om de toeritten heengelegd.

In de waterloop wordt een zinksleuf gebaggerd. De sleuf wordt tot in de oevers voortgezet aansluitend aan de ter plaatse gebouwde op- en afritten (fig. 2.2).

De afzinkelementen worden in een bouw-dok geprefabriceerd. Wanneer ze klaar zijn voor transport worden ze geballast met water, hiervoor zijn tanks in het element geplaatst, zodat ze niet direct op zullen drijven. De elementen zijn, ten behoeven van het drijfvermogen, voorzien van stalen kopschotten die voor een waterdichte afsluiting zorgen. Wanneer het bouw-dok onder water is gezet wordt een opening in de dijk van het bouw-dok gebaggerd zodat de elementen kunnen worden uitgevaren. Als het bouw-dok onder water staat worden de elementen één voor één opgedreven door water uit de ballasttanks van de afzinkelementen te pompen. Vervolgens worden ze door middel van lieren of sleepboten uitgevaren naar een afbouw-kade waar de afzinkuitrusting wordt aangebracht en de elementen transport klaar worden gemaakt. De elementen worden vervolgens naar hun plaats van bestemming gesleept.

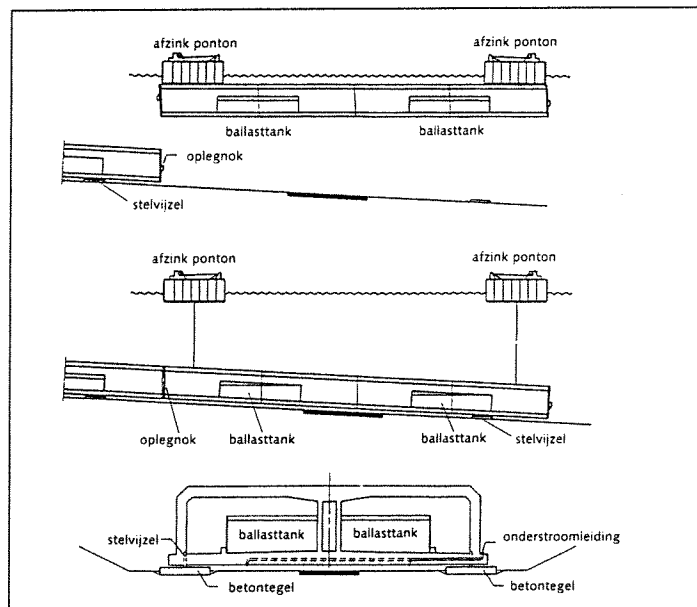


Figuur 2.2 De toeritten

Aangekomen op de uiteindelijke locatie worden de elementen boven hun positie gemaneuvreerd door middel van lieren. Ze worden nu, opgehangen aan pontons, één voor één afgezonken door het gecontroleerd inlaten van water (fig. 2.3).

De afzinkelementen worden tijdelijk op drie steunpunten geplaatst. Aan de kop is een stalen console gemaakt die op het vorige afgezonken element steunt. De consoles zijn zo gemaakt dat de elementen precies op elkaar aansluiten door middel van een zelfzoekende tapse oplegging. Aan het andere uiteinde wordt het element opgelegd op vijzelpennen die uit het element steken en op betonnen tegels steunen die op de bodem zijn geplaatst (fig. 2.3).

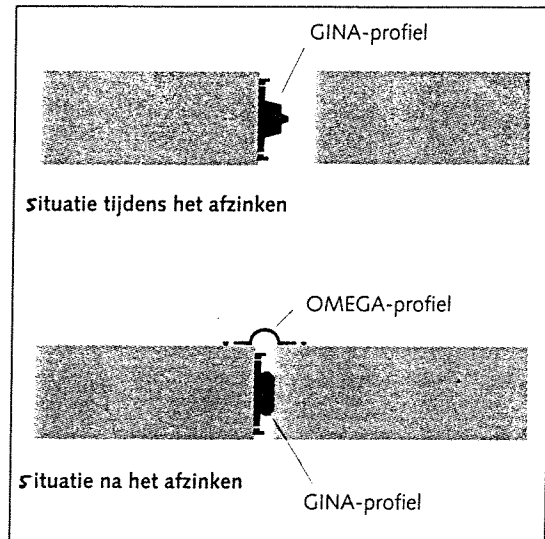
Op het kopvlak van de tunnel is langs de gehele omtrek, een rubberprofiel



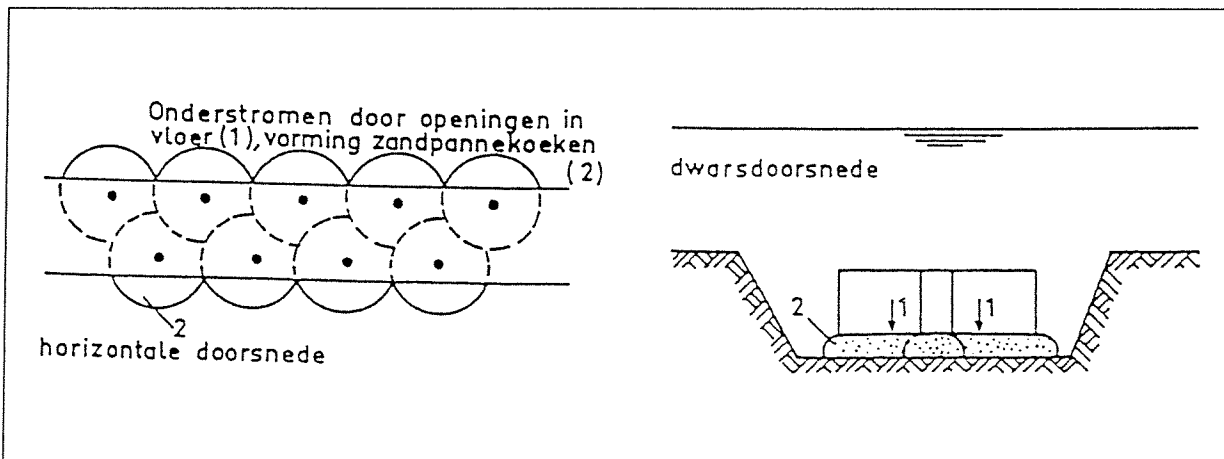
Figuur 2.3 Plaatsing elementen

aangebracht, het zogenaamde Gina-profiel, die tegen het vorige element wordt gedrukt. Zo ontstaat er tussen de kopschotten en de omtrek van de tunnel een afgesloten ruimte. Door deze ruimte nu leeg te pompen wordt het afzinkelement, door de waterdruk op de andere zijde, vast tegen het vorige element aangedrukt. Het ingedrukte Gina-profiel zorgt daarbij voor de waterafdichting (fig. 2.4).

De afzinkelementen rusten dan nog op elkaar en op de vijzelpennen. Ze worden niet gelijk op de bodem geplaatst omdat de vereiste nauwkeurigheid voor de aansluiting van de verschillende elementen niet door middel van baggeren van de sleuf gerealiseerd kan worden. De ruimte tussen de elementen en de bodem wordt nu opgevuld met zand. Dit gebeurt door uit speciaal hiervoor aangebrachte afsluitbare leidingen in de vloer van de tunnelelementen, een zand/water mengsel te spuiten (fig. 2.3). Het water ontsnapt en het zand zet zich af tussen de bodem en de vloer van de tunnel zodat een gelijkmatige ondersteuning wordt verkregen. De vijzelondersteuning kunnen nu worden weggehaald (fig. 2.5). Als alle zinkelementen zo aaneengekoppeld zijn resteert nog een laatste voeg tussen het laatst afgezonken element en de toerit die in de open bouwkuip is gebouwd, de sluitvoeg. Deze voeg heeft meestal een breedte van ongeveer een meter om genoeg speling te hebben bij het afzinken van het laatste element.



Figuur 2.4 De zinkvoeg



Figuur 2.5 Onderstromen van de elementen

Rond de voeg worden aan de buitenzijde schotten geplaatst die met rubberprofielen op de beide uiteinde van de elementen steunen. Tussen het laatst geplaatste element en de toerit worden wiggen geplaatst, zodat de druk op de Gina-profielen niet wegvalt wanneer de ruimte onder de schotten wordt leeggepompt, en kan de sluitvoeg in den droge afgebouwd worden. De tunnelsleuf wordt dan met zand aangevuld zodat de waterloop weer in zijn oude situatie is hersteld. Aan de binnenzijde van het Gina-profiel wordt een tweede waterkering aangebracht het zogenaamde omega-profiel (fig. 2.4). De tijdelijke waterballast wordt vervangen door definitieve betonballast. De betonballast wordt gelijkmatig aangebracht op de vloer van de tunnelelementen, waarna de kopschotten in de tunnel worden verwijderd zodat kan worden begonnen met de afbouw van de tunnel, zoals het aanbrengen van het wegdek en diverse elektronische apparatuur.

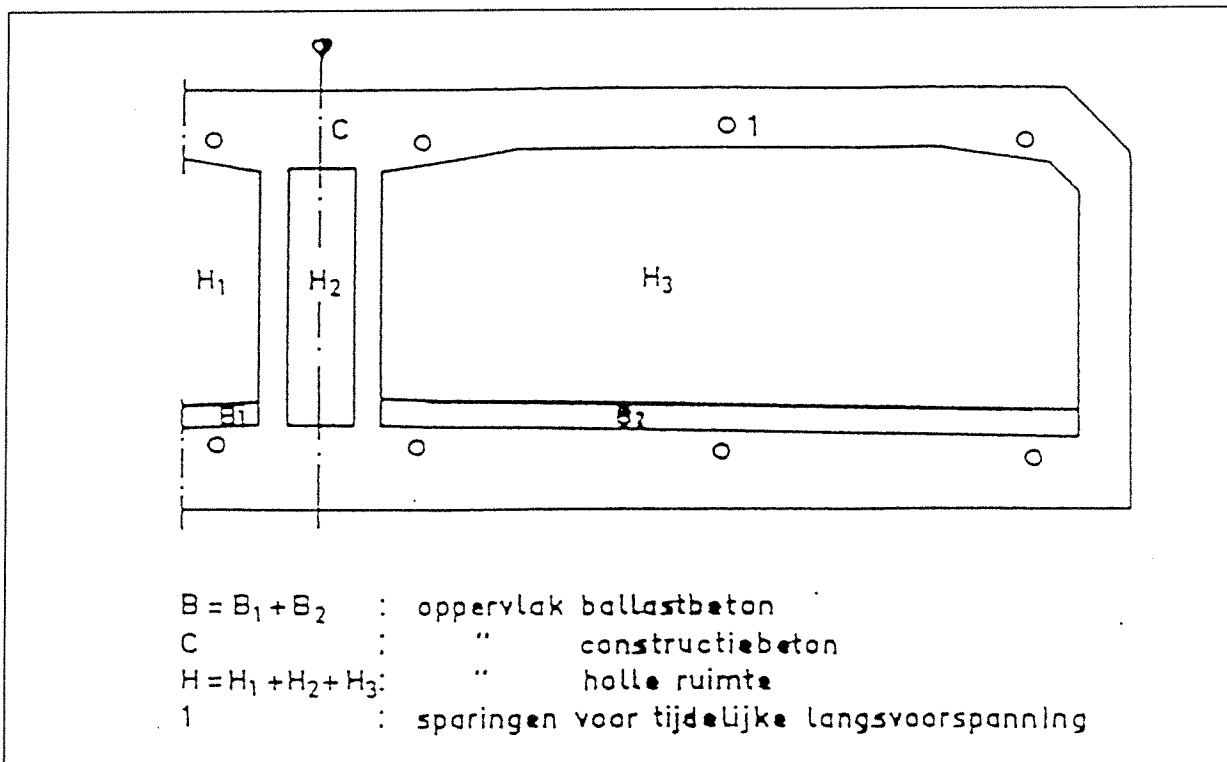
2.2.2 Het afzinkelement

Omdat de afzinkelementen veel verschillende fasen doorlopen zoals opdrijven, transport, afzinken, onderstromen en functie in de uiteindelijke situatie brengt dit veel eisen met zich mee ten aanzien van de afmetingen van de elementen.

Het dwarsprofiel

Uitgaande van een tunnel voor autosnelwegen is het mogelijk om het nodige profiel van vrije ruimte te bepalen. Het profiel van vrije ruimte wordt bepaald door de benodigde hoogte voor het verkeer, het aantal rijstroken en de 'lateral clearance' die nodig is voor loopruimte voor personeel en het vermijden van bermvrees.

Uit het profiel van vrije ruimte kan dan de benodigde hoeveelheid holle ruimte worden bepaald. Dit is het profiel van vrije ruimte vermeerderd met ruimte benodigd voor apparatuur zoals signaleringssystemen en ventilatoren en aanbrengen van het wegdek en het ballast beton. In de tunnel is in het midden nog een bedieningsgang voor personeel en leidingen aangebracht, die tevens dienst kan doen als vluchtroute voor personen (fig. 2.6).



Figuur 2.6 Dwarsprofiel afzinktunnel

De betonconstructie moet sterkte en stijfheid bezitten om de belastingen in de uiteindelijke situatie (grond- en waterdrukken) op te kunnen nemen. De dimensies van de constructie worden echter ook bepaald door andere invloeden, namelijk door voorwaarden voortvloeiende uit het transport en de afgezonken situatie.

Bij het drijvend transport wordt er naar gestreefd een zo klein mogelijke vrijboord te hebben zodat het aan te brengen ballastbeton zoveel mogelijk wordt beperkt. Tevens moet het element nadat het is afgezonken een veiligheid tegen opdrijven hebben.

Tijdens het transport moeten de elementen stabiel zijn. Voor de stabiliteit moet gelden dat het metacentrum boven het gewichtszwaartepunt van de constructie ligt, zodat bij een hoekverdraaiing van het element een stabiliserend terugwerkend moment aanwezig is (zie bijlage I).

Bij het drijvend transport wordt het gewicht van de tunnel bepaald door het constructie beton en zink- en transportuitrusting zoals kopschotten, toegangsschachten, ballasttanks enzovoort. De oprijvende kracht is het onderwater-volume maal de dichtheid van water. Voor de dichtheid van water moet de laagste waarde van 10 kN/m^3 worden aangehouden zodat bij een grotere dichtheid (in zeewater) meer vrijboord aanwezig is. Voor het constructiebeton wordt juist een relatief hoge waarde van de dichtheid aangenomen om een minimaal vrijboord te garanderen. Voor een strekkende meter wordt de vergelijking dan:

$$24,6 \times C + 35 = 0,98 \times 10 \times (B+C+H) \quad [2.1]$$

waarin,

- Volumegewicht constructiebeton : $24,6 \text{ kN/m}^3$
- Oppervlak constructiebeton : C
- Gewicht uitrusting per meter : 35 kN/m
- Volumegewicht water : 10 kN/m^3
- 98 % tunnelvolume onder water : $0,98 \times (B+C+H)$
- Oppervlak ballastbeton resp. holle ruimte : B resp. H

In de afgezonken toestand moet de veiligheid tegen opdrijven 7,5 % bedragen. Tevens mag de grondspanning niet een bepaalde waarde overschrijden. Het gewicht van het element wordt alleen nog door constructie- en ballastbeton bepaald. Voor de dichtheid wordt dan een lage waarde aangenomen om extra veiligheid tegen opdrijven te hebben. Het volumegewicht van het water is afhankelijk van de locatie van de tunnel (zoet of zout water). Voor een strekkende meter wordt de vergelijking dan :

$$24,2 \times C + 22,5 \times B = 1,075 \times 10,25 \times (B+C+H) \quad [2.2]$$

- 22,5 resp. 10,25 het volumegewicht van ballastbeton resp. zout water.

Het gewicht van constructiebeton is moeilijk te bepalen omdat het volumegewicht kan variëren, de exacte hoeveelheid beton niet bekend is en de hoeveelheid wapening niet nauwkeurig bepaald is. Daarom wordt met een hoge en lage waarde gerekend. Uit vergelijking 2.1 en 2.2 volgt dan:

$$\begin{aligned} C &= 0,744 \times H - 1,343 \\ B &= 0,106 \times H + 1,542 \end{aligned} \quad [2.3]$$

Uit het criterium voor de benodigde holle ruimte (H) volgt de vereiste hoeveelheid ballast- en constructiebeton.

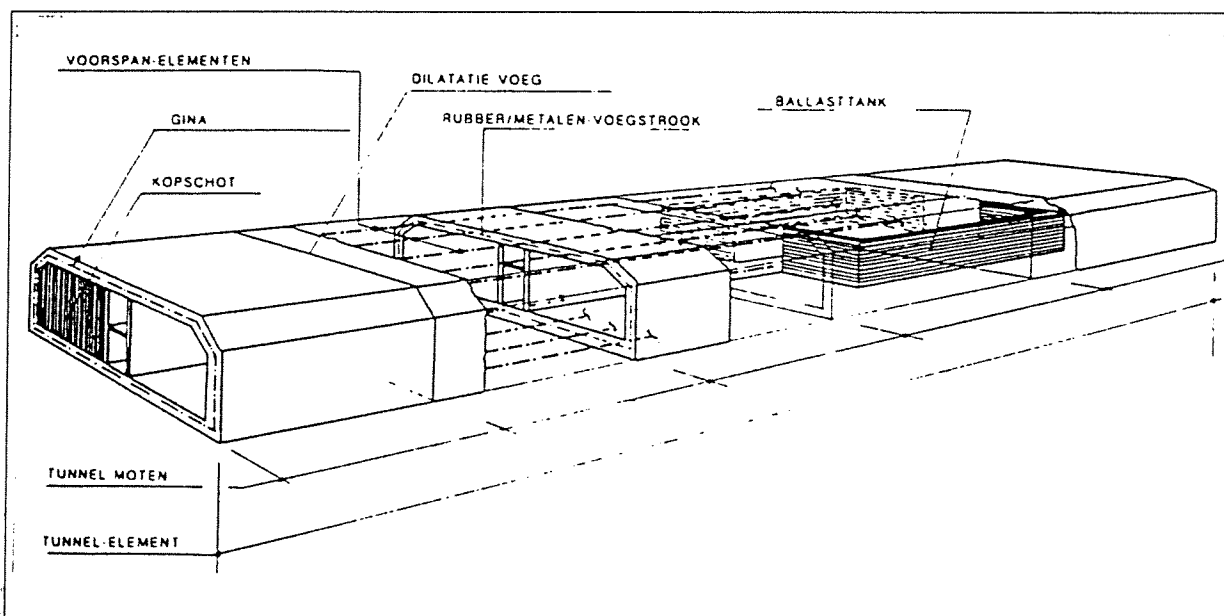
Als de hoeveelheid constructiebeton niet genoeg blijkt voor het opnemen van de belastingen kan de holle ruimte groter worden gekozen of kan men zwaardere wapening of voorspanning toepassen. Een andere mogelijkheid is om de tunnel niet meer zelfdrijvend te maken, zodat de tunnel zwaarder uitgevoerd kan worden en het drijfvermogen wordt geleverd door pontons of dergelijke. Voor het transport over zee zijn de bezwaren tegen het gebruik van drijfpontons echter te groot om dit toe te passen. Ten eerste zijn grote pontons nodig die nu niet meer op maar naast het element liggen, waardoor het transport moeilijker verloopt, zoals de doorgang bij de sluizen. Ten tweede bestaat het risico dat de verbinding van het element met de ponton breekt en dat het element naar de zeebodem zinkt.

De berekening zoals hierboven weergegeven geldt in principe voor elke tunnel, hoewel de gebruikte waarden per tunnel zullen verschillen, staat de dwarsdoorsnede van een tunnel dus vast met het criterium voor de benodigde hoeveelheid holle ruimte.

Het lengteprofiel

De lengte van een afzinkelement is afhankelijk van de totale lengte van het afgezonken gedeelte van de tunnel. Hoe kleiner de lengte van het afgezonken deel des te verder moet de open bouwput doorgetrokken worden in het dwarsprofiel van de waterweg. Een restrictie voor de lengte van het afgezonken gedeelte is dat er voldoende breedte en diepgang moet zijn om de elementen te vervoeren, in zowel het bouwdok als tijdens het transport over de binnenwateren. Als de open bouwput voor de toeritten achter de waterkering kan komen te liggen is er voor de bouwput geen dure waterkerende constructie nodig (fig 2.2). De afweging van de lengte van het afgezonken gedeelte zal van de kosten afhangen. Aan de ene kant wordt het afgezonken deel langer en zal er meer moeten worden gebaggerd, wanneer het afgezonken gedeelte korter wordt, is de doorvaartbreedte voor de scheepvaart beperkt en zal de bouwkuip groter en duurder worden vanwege de benodigde waterkerende constructie.

Het aantal afzinkelementen wordt het liefst zo klein mogelijk gehouden om zo weinig mogelijk zinkoperaties te hebben zodat hinder voor de scheepvaart zo klein mogelijk is. Tevens zijn het aantal benodigde kopschotten, Gina- en omega-profielen dan minder. Beperkende factoren voor de lengte van de elementen zijn de manoeuvreerruimte tijdens transport en in het bouwdok. De benodigde voorspankracht zal ook toenemen met toenemende lengte daar de buigende momenten evenredig zijn met het kwadraat van de lengte van de elementen. Er is ook een praktische grens aan de grootte van de voorspanning in verband met de uitsparingen hiervoor nodig, die het oppervlak van de betondoorsnede verkleinen en in verband met de toegestane betondruk in de constructie.



Figuur 2.7 Lengteprofiel van een afzinkelement

De tunnelementen zijn net als andere betonconstructies onderhevig aan verkortingen en verlengingen als gevolg van temperatuurwisselingen. Daarom worden de elementen voorzien van dilatatievoegen om de 20 à 25 meter, zodat de elementmoten ten opzichte van elkaar in lengte richting kunnen draaien, verlengen en verkorten. De dilatatievoegen zijn ook nodig om ongelijke zettingen in de uiteindelijke situatie op te vangen. Door het aanbrengen van tanden in de voegen worden ongelijke verticale verplaatsingen voorkomen. Een ingestorte rubbermetalen voegstrook zorgt voor de waterafdichting (fig. 2.8).

Tijdens het transport is het element onderworpen aan dwarskrachten, buigende momenten en torsie in langsrichting door golf- en sleepbelastingen en door puntlasten van bijvoorbeeld de

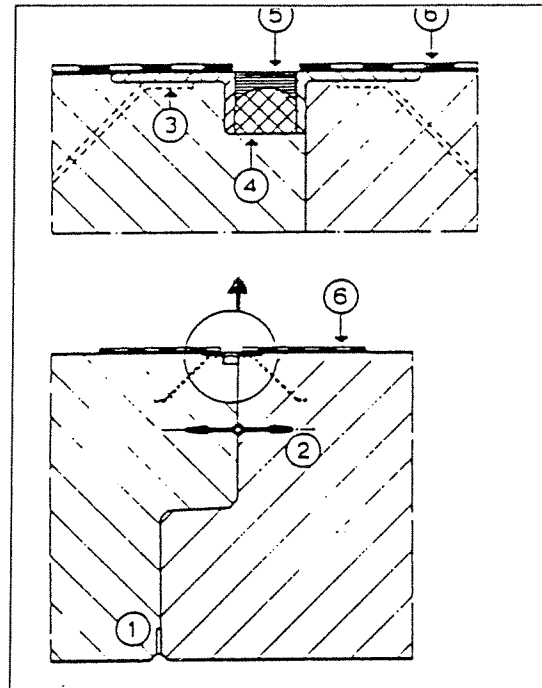
kopschotten. Als het element opgelegd is op drie steunpunten voor het onderstromen zullen er ook buigende momenten optreden in de constructie. De trekkrachten die hierdoor ontstaan kunnen niet door de rubbermetalen voegstroken worden opgenomen. Daarom worden de elementen voorzien van tijdelijke voorspanning. De voorspankracht moet zo groot zijn dat in de constructie nooit trekspanningen voorkomen. De voorspankabels zijn opgenomen in langskanalen uitgespaard in de constructie. Zodra de constructie op de definitieve ondersteuning (de zandlaag) rust worden de voorspankabels verwijderd en de kanalen volgegrout (zie fig 2.6). Figuur 2.7 geeft een voorbeeld van het lengteprofiel van een tunnelelement.

2.3 De Wijkertunnel

De afzinkelementen van de Wijkertunnel worden gebouwd in een bouwdoek bij Barendrecht. De Wijkertunnel is gesitueerd onder het Noordzeekanaal circa 1 kilometer ten oosten van de Velsertunnel. De Wijkertunnel wordt de nieuwe oeververbinding van de rijksweg A9. De bestemming van de Wijkertunnel is autosnelweg-verkeer.

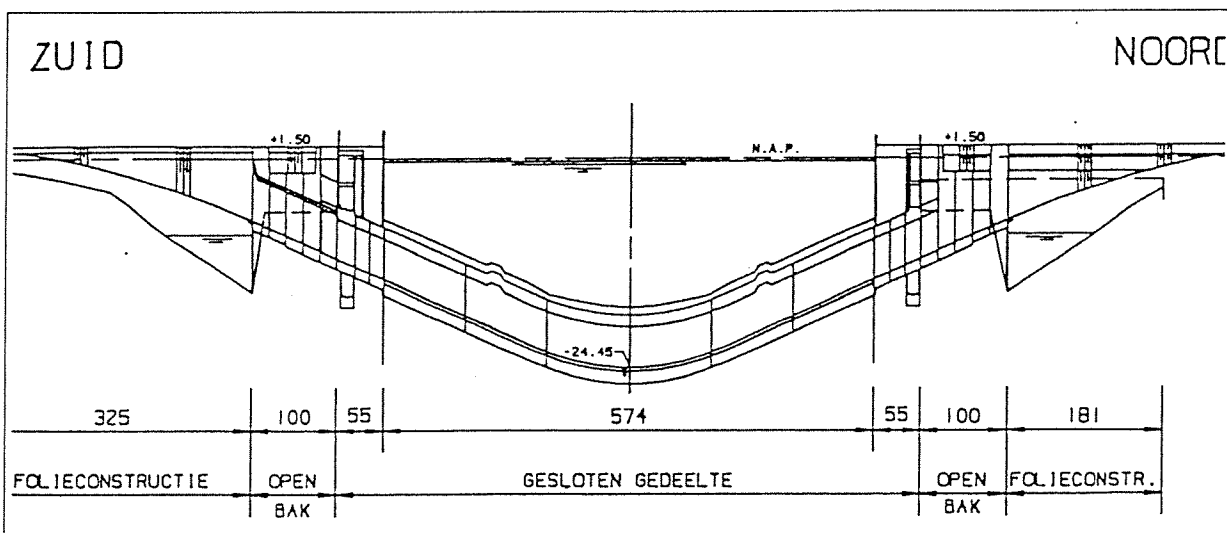
2.3.1 Afmetingen Wijkertunnel

De totale lengte van de tunnel bedraagt 1390 meter, het gesloten gedeelte bedraagt 684 meter waarvan het af te zinken gedeelte bestaat uit 6 elementen van elk 96,12 meter lang, 31,75 meter breed en 8,05 meter hoog. Aan iedere oever worden de toeritten met een lengte van 100 meter in bouwputten gemaakt. Verder is er nog een folieconstructie aangelegd met een totale lengte van 325 m. + 180 m. = 505 meter (fig 2.9).



1 airex strook 2 rubbermetalen voegstrook
3 stalen randconstructie 4 schuimvulling
5 buitenafdichting 6 butylstrook

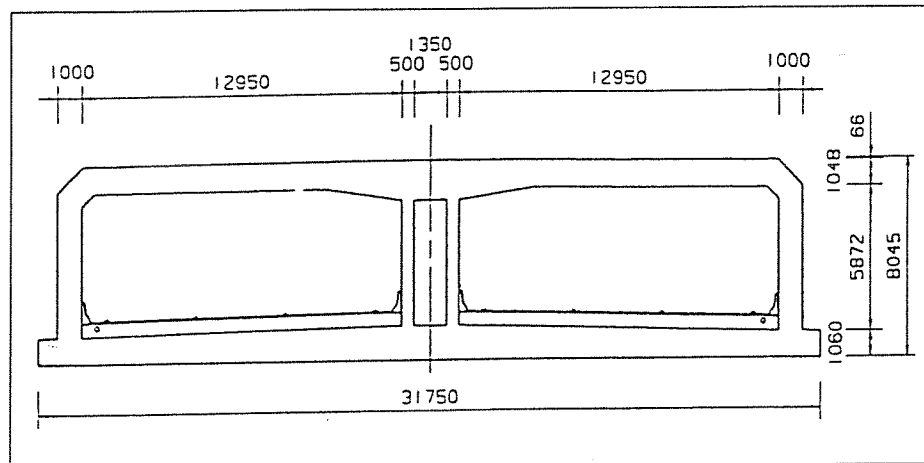
Figuur 2.8 Voorbeeld dilatatievoeg



Figuur 2.9 Lengte profiel Wijkertunnel

De tunnelementen van 96 meter lang zijn verdeeld in 4 gelijke moten door middel van dilatatievoegen.

De tunnel bestaat uit 2 tunnelbuizen van 13 meter breed met elk 2 rijstroken en een vluchtstrook. Tussen de buizen is een vluchtgang/leidingkoker geplaatst met een breedte van 1,35 meter. Het profiel van vrije ruimte heeft een hoogte van 4,5 meter, waarboven ruimte is voor signaleringsborden en verlichting. Voor de ventilatoren is het tunneldak op twee plaatsen verhoogd (fig 2.9).



Figuur 2.10 Dwarsprofiel van de Wijkertunnel

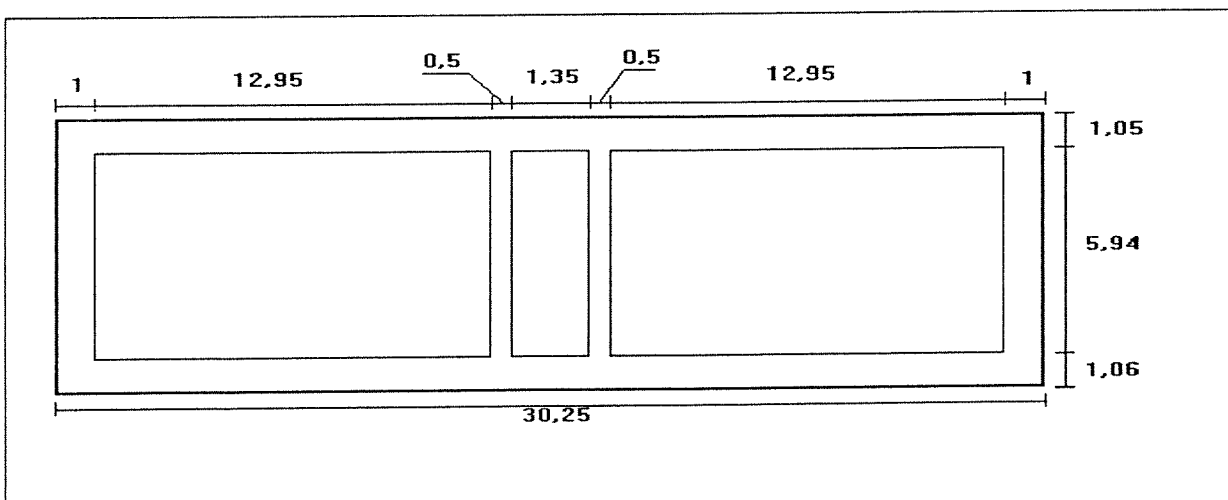
Voor de tunnel-elementen geldt dat ze een minimale respectievelijk een maximale vrijboord van 150 mm. respectievelijk 400 mm. moeten hebben. In de eindsituatie moet de minimale respectievelijk maximale gronddruk niet lager zijn dan 5 kN/m² respectievelijk niet hoger dan 40 kN/m² zijn. Dit heeft geleid tot de afmetingen uit figuur 2.10.

2.3.2 Schematisatie van de Wijkertunnel

De afzinkelementen van de Wijkertunnel zijn niet alle zes identiek. Zo wordt er in twee tunnelementen gebruikt gemaakt van een verhoging in het dak om de ventilatoren te kunnen plaatsen. Verder zijn twee elementen gekromd in de verticale richting, terwijl één element gekromd is in horizontale richting. Voor het onderzoek is een schematisatie van de werkelijke afmetingen gedaan waarmee gewerkt wordt, om de berekeningen te vereenvoudigen.

Het lengteprofiel wordt verondersteld recht te zijn met een totaallengte van 96 meter. Een element bestaat uit vier moten met elk een lengte van 24 meter.

Voor het dwarsprofiel van de elementen worden de afschuiningen en de uitstekende voeten weggelaten en de afmetingen aangenomen uit figuur 2.11.



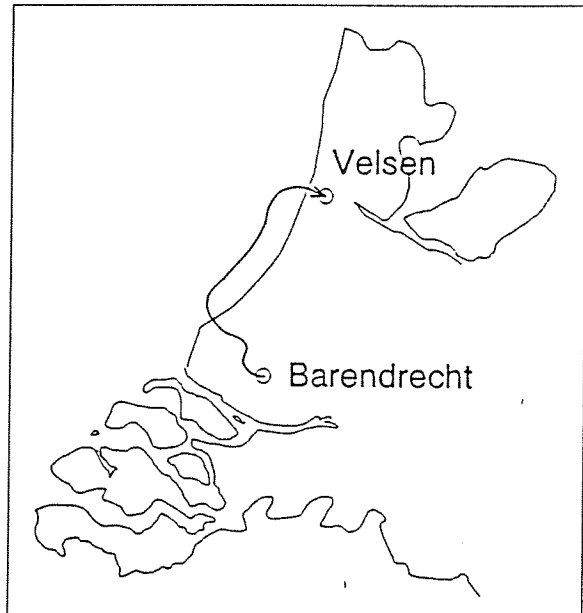
Figuur 2.11 Schematisatie dwarsprofiel

In Bijlage 1 worden de aangenomen grootheden van de dwars- en lengtedoorsnede gegeven.

2.3.3 Het transport van de tunnelementen

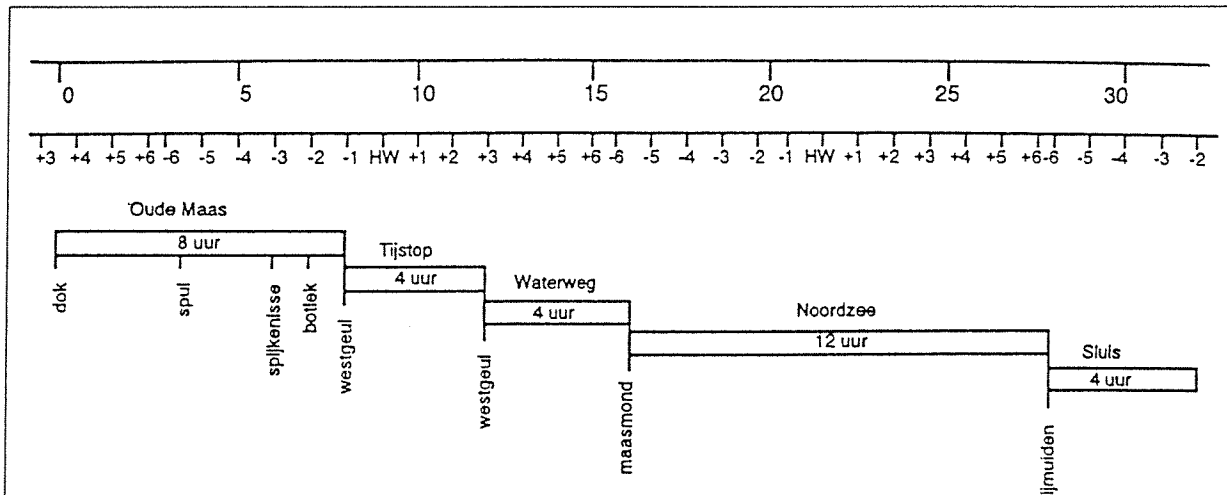
De afzinkelementen van de Wijkertunnel worden gebouwd in een bouwdok bij Barendrecht. Dit betekent dat ze drijvend getransporteerd moeten worden via de Oude Maas, de Nieuwe Waterweg en dan over de Noordzee naar het Noordzeekanaal, waar ze kunnen worden afgezonken. De totale duur van het transport bedraagt ongeveer 32 uur waarvan 12 uur transport over Noordzee is. De vaarsnelheid tijdens zeetransport bedraagt ± 2 m/s (4 knopen). Het transport is opgebouwd uit de volgende fasen:

- Oude Maas : 8 uur
 - Tijstop Westgeul : 4 uur
 - Nieuwe Waterweg : 4 uur
 - Noordzee : 12 uur
 - Passage havenmond en sluis : 4 uur
- ± 32 uur



Figuur 2.12 Transportroute Wijkertunnel

Figuur 2.13 laat de transportplanning zien met de bijbehorende waterstanden.



Figuur 2.13 Transportplanning met getijdebeweging

Voor de belastingen van golven zal het transport over de Noordzee bepalend zijn. De golfhoogten zijn afhankelijk van de waterdiepte. Voor het transport van de elementen van de Wijkertunnel over zee geldt dat de maximale waterdiepte ongeveer 25 meter bedraagt. Omdat de golfhoogten en daarmee gepaard gaande golfbelastingen het grootst zijn bij de grootste waterdiepte wordt uitgegaan van een constante waterdiepte van 25 meter voor het gehele transport van 12 uur over zee.

3 Theorie van golven

3.1 Inleiding

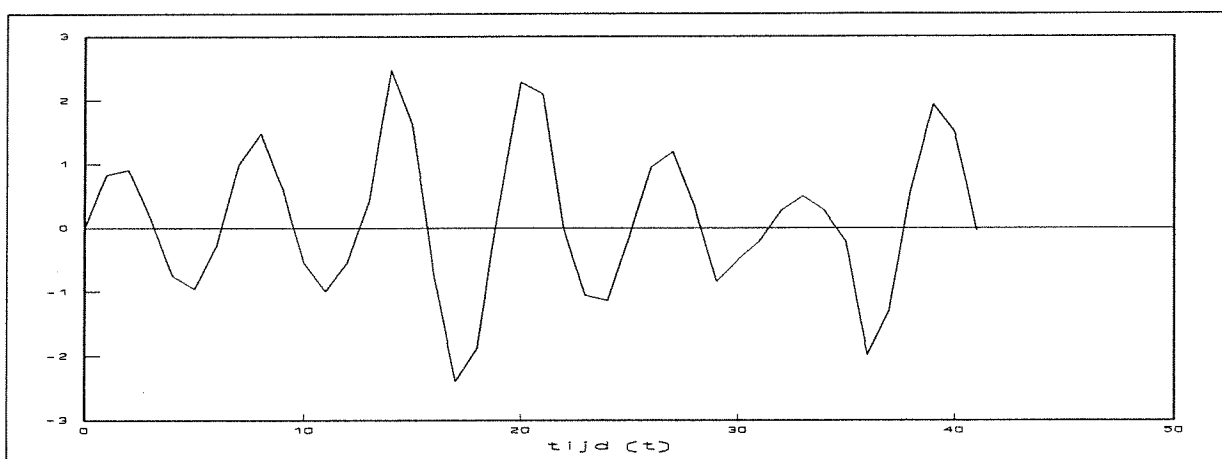
Golven zijn een natuurlijk verschijnsel en bezitten een stochastische verdeling. De krachten die in de tunnelelementen optreden worden bepaald door individuele golven. Het is echter niet mogelijk om over de afmetingen, zoals golfhoogte en golflengte, van individuele golven te zeggen of deze tijdens een transport voor zullen komen. Er kan wel een uitspraak worden gedaan over kansen van voorkomen van individuele golven met bepaalde afmetingen. Een natuurlijk golfveld bestaat uit meerdere golven met uiteenlopende hoogte en lengte. Zo'n veld wordt daarom beschreven met een karakteristieke golfhoogte en -periode. Deze karakteristieke waarden geven informatie over de mate waarin klassen van golfhoogten en -perioden in dit golfveld voorkomen. Aan de hand van de karakteristieken kan dan een uitspraak worden gedaan over de kans van voorkomen van individuele golven. Hiermee kan een kansverdeling van de krachten in het tunnelelement worden bepaald.

Voor het dimensioneren van de benodigde voorspanning is dus kennis nodig van golfcondities en de reacties van tunnelelementen op deze golfbelastingen. Daartoe zal eerst worden ingegaan op wiskundige modellen om golven te kunnen beschrijven zodat deze vertaald kunnen worden naar belastingen op de constructie.

3.2 Stochastische processen

3.2.1 Algemeen

Een grootheid X , die onregelmatig varieert in de tijd en/of plaats, noemt men een stochastische grootheid. Voor golven geldt dat ze alleen variëren in de tijd (fig. 3.1).



Figuur 3.1 Voorbeeld van een functie $x(t)$ die varieert in de tijd

Een proces dat stochastisch verdeeld is kan worden beschreven met een kansverdelingsfunctie. De verdelingsfunctie geeft aan wat de kans is dat een proces bepaalde waarde niet overtreft; de kans op optreden van gebeurtenis ($\underline{x} \leq x$).

In formulevorm wordt dit geschreven als :

De kans $P(x) = Pr(x \leq x)$ [3.1]
 De kans dat x tussen a en b ligt $= P(b) - P(a) = Pr(a \leq x \leq b)$

De kansdichtheidsfunctie van momentane waarden van $x[t]$

Het differentie quotiënt

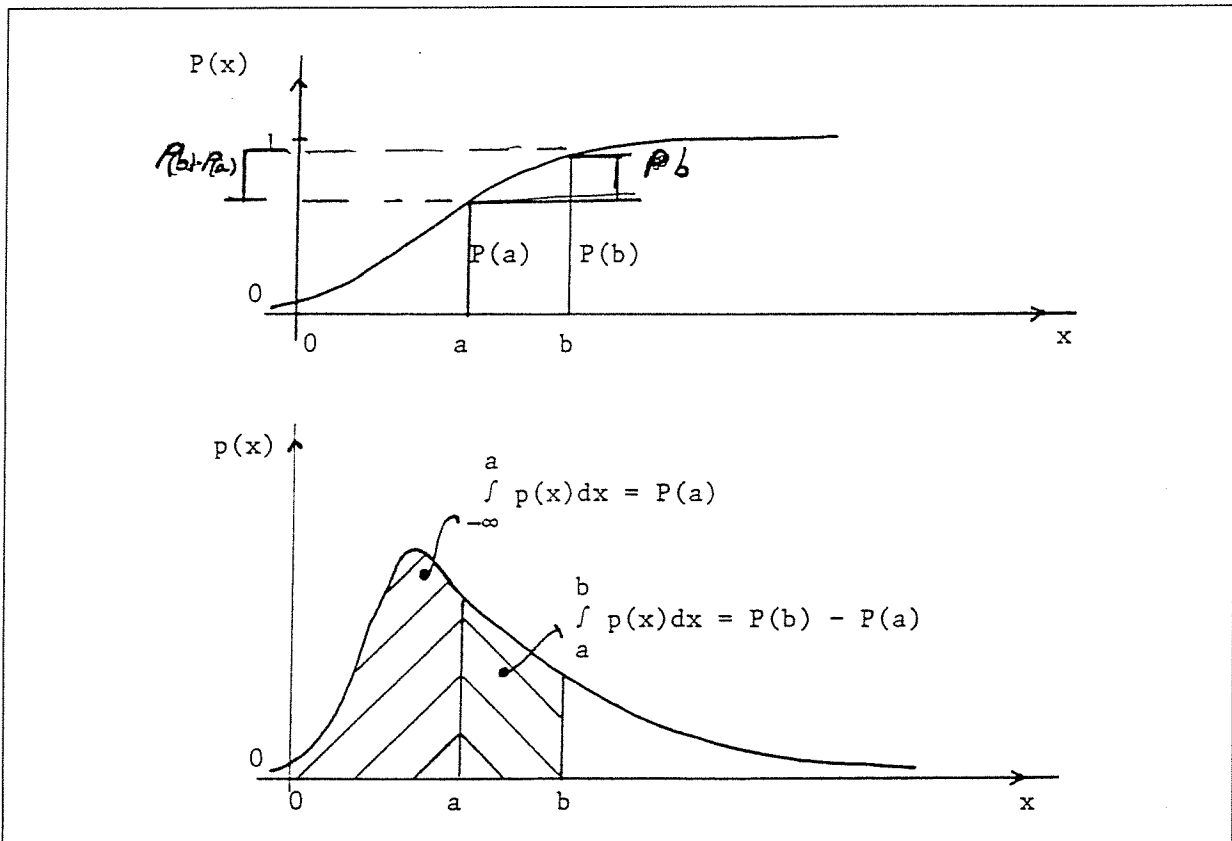
$$\frac{P(x+\Delta x) - P(x)}{\Delta x} = \frac{Pr(x < x \leq x+\Delta x)}{\Delta x} \quad [3.2]$$

stelt de kans voor dat x in het interval $(x, x+\Delta x)$ ligt, gedeeld door de lengte van dat interval. Nemen we de limiet voor Δx gaat naar nul dan wordt dit de afgeleide van $P(x)$. Deze afgeleide $p(x)$ van de verdelingsfunctie wordt de kansdichtheidsfunctie van x genoemd. Er geldt dus,

$$P(a) = Pr(x \leq a) = \int_{-\infty}^a p(x) dx \quad [3.3]$$

en

$$Pr(a \leq x \leq b) = \int_a^b p(x) dx$$



Figuur 3.2 Verdelingsfunctie en kansdichtheidsfunctie van x

figuur 3.2 geeft hiervan een voorbeeld.

Een stochastische variabele wordt geheel gekenmerkt door zijn verdelings- of kansdichtheids-

functie. Deze worden op hun beurt geheel beschreven door parameters zoals de *ligging*, *spreiding*, *scheefheid*, *gepiektheid*, enz. van \underline{x} . Om deze parameters te definiëren maken we gebruik van het begrip verwachtingswaarde. De verwachtingswaarde van een functie van \underline{x} is gedefinieerd als:

$$E[f(x)] = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \cdot p(x) dx \quad [3.4]$$

Het gemiddelde van \underline{x} is gelijk aan de verwachtingswaarde van \underline{x} :

$$\bar{x} = \mu_x = E[x] = \int_{-\infty}^{\infty} x \cdot p(x) dx \quad [3.5]$$

Het rechterlid wordt ook wel het 1^e moment van $p(x)$ genoemd. Meer in het algemeen stelt men het n^e moment van $p(x)$ t.o.v. $x=0$ als

$$M_n = \int_{-\infty}^{\infty} x^n p(x) dx \quad [3.6]$$

Als maat voor de spreiding van \underline{x} kan de standaardafwijking dienen. De standaardafwijking is gedefinieerd als de wortel van de variantie van x ,

$$\sigma_x^2 = VAR(x) = E[x - E[x]]^2 = E[x^2] - (E[x])^2 \quad [3.7]$$

Er geldt dus dat $M_n = E[x^n]$, zodat de verwachtingswaarde $E[x] = M_1$, en de standaardafwijking $\sigma = \sqrt{VAR(x)} = \sqrt{M_2 - M_1^2}$.

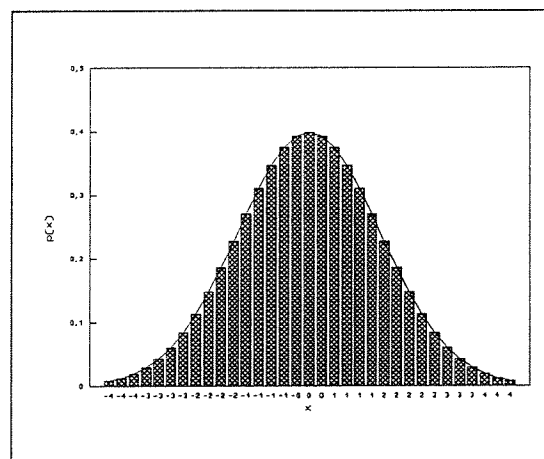
Een stochastisch proces kan dus in zijn geheel worden beschreven wanneer alle momenten bekend zijn. Zo kunnen de andere parameters, zoals de scheefheid en gepiektheid, met behulp van hogere momenten gedefinieerd worden. Voor de toepassing op golven hebben we deze parameters echter niet nodig.

3.2.2 Golven

De momentane uitwijking van de waterspiegel is normaal verdeeld (fig 3.3), hiervan is de vorm van de kansdichtheidsfunctie dus bekend. Nu is het alleen nog nodig om de parameters te schatten om de kansdichtheidsfunctie te bepalen. Voor een normale verdeling zijn slechts twee onafhankelijken, en dus momenten, die geschat moeten worden. Meestal worden hiervoor de verwachtingswaarde en de standaardafwijking genomen, zodat de kansdichtheidsfunctie geschreven wordt als

$$p(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left[-\frac{(x - \bar{x})^2}{2\sigma_x^2} \right] \quad [3.8]$$

$\bar{x} = E[x]$, de verwachtingswaarde van x , en $\sigma_x =$ de standaardafwijking van x is.



Figuur 3.3 Normale verdeling

Voor de statistische beschrijving van een normaal verdeelde variabele is het dus voldoende om

kennis te hebben van de eerste twee momenten.

De stochastische variabele kan ook beschreven worden aan de hand van de verdeling van de maxima van de variabele. Als de variabele zelf normaal verdeeld is dan is de verdeling van de maxima Rayleigh-verdeeld voor smalbandige spectra. De Rayleigh-verdeling ziet er als volgt uit:

$$\begin{aligned} Pr [x \leq x] = P(x) &= 1 - \exp\left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{x}{\mu_x}\right)^2\right] \quad \text{voor } x \geq 0 \\ &= 0 \quad \text{voor } x \leq 0 \end{aligned} \quad [3.9]$$

de bijbehorende kansdichtheidsfunctie voor $x \geq 0$ wordt dan

$$p(x) = \frac{\pi}{2} \frac{x}{\mu_x^2} \exp\left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{x}{\mu_x}\right)^2\right] \quad [3.10]$$

De Rayleigh-verdeling heeft dus maar één parameter, te weten het gemiddelde μ_x . Het is dus voldoende om het eerste moment te bepalen om de verdelingsfunctie te kennen.

3.2.3 Stationaire processen

Het is mogelijk om de gezamenlijke kansdichtheidsfunctie van twee variabelen te bepalen. Wanneer er sprake is van meerdere variabelen kan de samenhang tussen deze variabelen uitgedrukt worden in de covariantie. De covariantie van twee variabelen \underline{x} en \underline{y} is gedefinieerd als:

$$cov(x, y) = E[(x - \mu_x)(y - \mu_y)] \quad [3.11]$$

Voor de beschrijving van een stochastisch proces is het noodzakelijk om de gezamenlijke verdelingsfunctie te kennen op een willekeurig aantal tijdstippen t_1, \dots, t_n . Voor een Gaussisch, normaal verdeeld, proces is dit te beschrijven met de gemiddelden $E[\underline{x}_{t_i}]$ en de covarianties $C_{i,j} = cov(\underline{x}_{t_i}, \underline{x}_{t_j})$. Omdat $C_{i,j}$ de covariantie voorstelt van twee waarden van hetzelfde proces wordt dit de autocovariantie genoemd.

Een proces wordt stationair genoemd als de verwachtingswaarde van x , $E[x]$, onafhankelijk is van een verschuiving in de tijd, dus $E[x(t)] = E[x(t + t_1)]$. Voor de uitwijking van golven op zee geldt dat over lange perioden het proces niet stationair is, echter voor kortere perioden (3 uurlijkse metingen van de golfhoogte) kan het proces als stationair worden beschouwd.

Dit betekent dat de verwachtingswaarden van \underline{x} voor ieder tijdstip gelijk is, $E[x(t)] = \text{const.} = \mu$ en dat de autocovarianties nog slechts variëren met het tijdsverschil ($t_j - t_i$). Duiden we dit tijdsverschil aan met τ dan is de autocovariantie als volgt:

$$\begin{aligned} C_{xx}(\tau) &= cov(x_t, x_{t+\tau}) \\ &= E[x_t x_{t+\tau}] - \mu^2 \end{aligned}$$

Als τ gelijk is aan nul gaat dit over in $E[x^2] - \mu^2$, dit is gelijk aan de variantie van \underline{x} .

$$C_{xx}(0) = E[x^2] - \mu^2 = \sigma_x^2 \quad [3.12]$$

3.3 Spectraal Analyse

3.3.1 De Fourier-integraal

Een functie $x(t)$, die onregelmatig varieert in de tijd kan worden beschreven met behulp van een Fourier-reeks, dit is een som van sinus- en cosinusfuncties.

$$x(t) = x_0 + \sum_{n=0}^{\infty} x_n \cos(\omega_n t + \alpha_n) \quad (\text{Fourier-reeks})$$

x_n = amplitude van de harmonische component n [3.13]
 α_n = fase van de n -de component
 ω_n = hoekfrequentie van de n -de component
 $x_0 = \bar{x}$

Dit kan beknopt worden weergegeven in complexe vorm,

$$x(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} c_n e^{i\omega t} \quad [3.14]$$

Door hiervan de inverse te nemen komen we op de zogenaamde Fourier-integraal $X(f)$, ofwel de Fourier-transform van $x(t)$:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i2\pi ft} dt \quad [3.15]$$

$\omega = 2\pi f$

3.3.2 Fourier-analyse van een stationair stochastisch proces

Om nu met deze Fourier-transformatie te kunnen werken maken we gebruik van de autocovariantie van het proces. De Fourier-getransformeerde van de auto-covariantie $C_{xx}(\tau)$ van een stationair stochastisch proces aangeduid met $\tilde{E}_{xx}(f)$:

$$\tilde{E}_{xx}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} C_{xx}(\tau) e^{-i2\pi f\tau} d\tau \quad [3.16]$$

Omdat $C_{xx}(\tau) = -C_{xx}(\tau)$ en $\tilde{E}_{xx}(f) = -\tilde{E}_{xx}(f)$ geldt ook

$$\tilde{E}_{xx}(f) = 2 \int_0^{\infty} C_{xx}(\tau) \cos(2\pi f\tau) d\tau \quad [3.17]$$

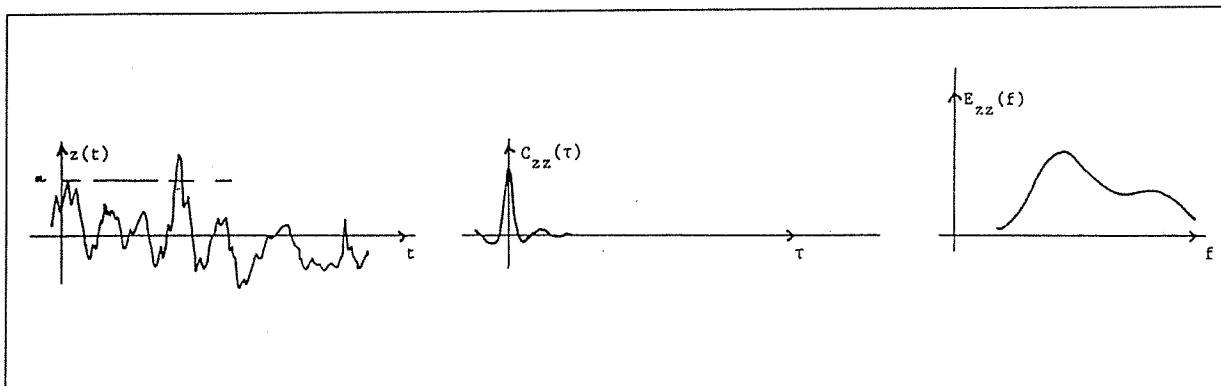
De inverse relatie hiervan is :

$$C_{xx}(\tau) = 2 \int_0^{\infty} \tilde{E}_{xx}(f) \cos(2\pi f\tau) d\tau \quad [3.18]$$

Stellen we $\tau=0$ en $E_{xx}(f) = 2\tilde{E}_{xx}(f)$ dan volgt hieruit:

$$C_{xx}(0) = \sigma_x^2 = \int_0^{\infty} E_{xx}(f) df \quad [3.19]$$

$C_{xx}(0)$ is de variantie van x_t , zodat dit betekent dat de integraal gelijk is aan de variantie. $E_{xx}(f)$ heet het variantie dichtheidsspectrum. Figuur 3.4 geeft een voorbeeld van zo'n variantiespectrum.



Figuur 3.4 Voorbeeld variantiespectrum van een in de tijd variërend proces

3.3.3 Eigenschappen van golven

Kansdichtheidsfunctie

Zoals reeds eerder vastgesteld kunnen golven, en de lineaire respons hierop, opgevat worden als een stationair Gaussisch proces. Voor lineaire Gaussische processen geldt dat alle statistische eigenschappen bepaald worden door het variantie-spectrum $E_{xx}(f)$ van dat proces. Om eigenschappen uit te kunnen drukken in termen van dat spectrum wordt het begrip moment ingevoerd, gedefinieerd als:

$$m_n = \int_0^{\infty} f^n E_{xx}(f) df \quad [3.20]$$

Het eerste moment wordt dan:

$$m_0 = \int_0^{\infty} E_{xx}(f) df = var(x_t) = \sigma_x^2 \quad [3.21]$$

Het eerste moment is dus het oppervlak van het variantiedichtheidsspectrum van een stochastisch stationair proces.

De momenten van het variantiedichtheids-spectrum moeten niet verward worden met de momenten van de kansdichtheidsfunctie van \underline{x}_t . Er bestaat wel een verband tussen de soorten momenten, namelijk:

$$var(x_t) = m_0 = M_2 - M_1^2 \quad [3.22]$$

Stellen we nu het gemiddelde van \underline{x}_t nul (gebruikelijk voor golven) dan kan de normale kansdichtheidsfunctie geschreven worden als:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi m_0}} \cdot e^{-\frac{x^2}{2m_0}} \quad [3.23]$$

Golfperiode

De verdelingsfunctie geeft de kans weer dat \underline{x}_t onder cq. boven een bepaald niveau ligt, ofwel de fractie van tijd gedurende welke $x(t)$ onder of boven dat niveau ligt. Om een inzicht te krijgen in de tijdsintervallen tussen opeenvolgende doorsnijdingen van dat niveau (zie fig. 3.4) wordt gebruik gemaakt van de gemiddelde frequentie (f_x) gegeven door:

$$f_x = \sqrt{\frac{m_2}{m_0}} \cdot e^{-\frac{x^2}{2m_0}} \quad [3.24]$$

Voor doorgangen door het gemiddelde niveau (=0) geldt dus

$$f_0 = \sqrt{\frac{m_2}{m_0}} \quad [3.25]$$

De gemiddelde periode van een nuldoorgang van een golf is dan

$$T_2 = f_0^{-1} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad [3.26]$$

Als we er van uitgaan dat er per opgaande nuldoorgang één maximum is dan geldt dat

$$Pr(x_m > x) = \frac{f_x}{f_0} = e^{-\frac{x^2}{2m_0}} \quad [3.27]$$

De verdelingsfunctie van \underline{x}_m is $Pr(x_m \leq x) = 1 - Pr(x_m > x)$, de afgeleide hiervan is de kansdichtheidsfunctie ($p(x)$) van \underline{x}_m , deze is dus gelijk aan

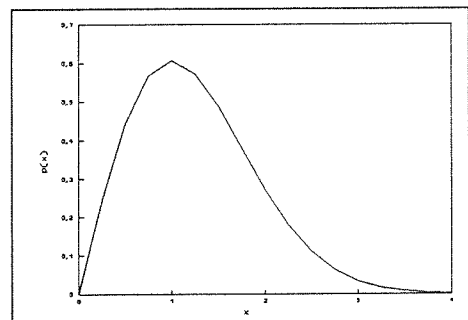
$$p_{x_m}(x) = \frac{x}{m_0} \cdot e^{-\frac{x^2}{2m_0}} \quad [3.28]$$

De hoogte van maxima zijn dus Rayleigh-verdeeld (fig. 3.5), zoals eerder al gesteld was.

De golfhogte is vrijwel gelijk aan het dubbele van het maximum boven het gemiddelde niveau, zodat geldt:

$$Pr(H > H) = Pr(2x_m > H) = Pr(x_m > \frac{1}{2}H) = e^{-\frac{H^2}{8m_0}} \quad [3.29]$$

Vaak wordt gewerkt met de significante golfhogte H_s , dit is het gemiddelde van het hoogste 1/3-deel van de golfhogten. Er kan bewezen worden dat



Figuur 3.5 Rayleigh-verdeling

$$H_s = 4\sqrt{m_0} \quad [3.30]$$

zodat geldt:

$$Pr(H > H) = e^{-2\left(\frac{H}{H_s}\right)^2} \quad [3.31]$$

Extreme waarden

Geven we de kans dat een individueel maximum hoger is dan x , korthedshalve aan met Q en het verwachte aantal maxima in de duur D , als N dan is de kans dat geen enkel maximum boven x komt gelijk aan:

$$Pr(\text{alle } \underline{x}_t \leq x) = Pr(\text{geen } \underline{x}_m > x) = (1-Q)^N \quad [3.32]$$

Omdat voor N , bij een lange tijdsduur D en dus veel maxima N , geldt $N \gg 1$ en $Q \ll 1$ kan dit geschreven worden als:

$$(1-Q)^N = \exp(-NQ) \quad [3.33]$$

Voor het aantal maxima N geldt, bij smalbandige spectra, dat dit gelijk is aan het aantal nuldoorgangen over de tijdsduur D met [3.25] en [3.27] gaat [3.33] dan over in

$$Pr(\text{geen } \underline{x}_m > x) \approx \exp\left[-\sqrt{\frac{m_2}{m_0}} \cdot D \cdot e^{-\frac{x^2}{2m_0}}\right] \quad [3.34]$$

3.4 Spectra voor golven

Voor golven op de Noordzee is empirisch bepaald dat ze een variantie-spectrum hebben dat wordt beschreven door de JONSWAP formule:

$$E(f) = \alpha g^2 (2\pi)^{-4} f^{-5} \cdot e^{-\frac{5}{4}\left(\frac{f}{f_m}\right)^4} \cdot \gamma_0 \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{f-f_m}{\sigma f_m}\right)^2\right] \quad [3.35]$$

= Pierson-Moskowitz spectrum (maal) piekversterking

waarin,

α = dimensieloze constante = 0.0081,

g = zwaartekrachtsversnelling,

f_m = piek-frequentie,

γ_0 = vormparameter = 3.3 en

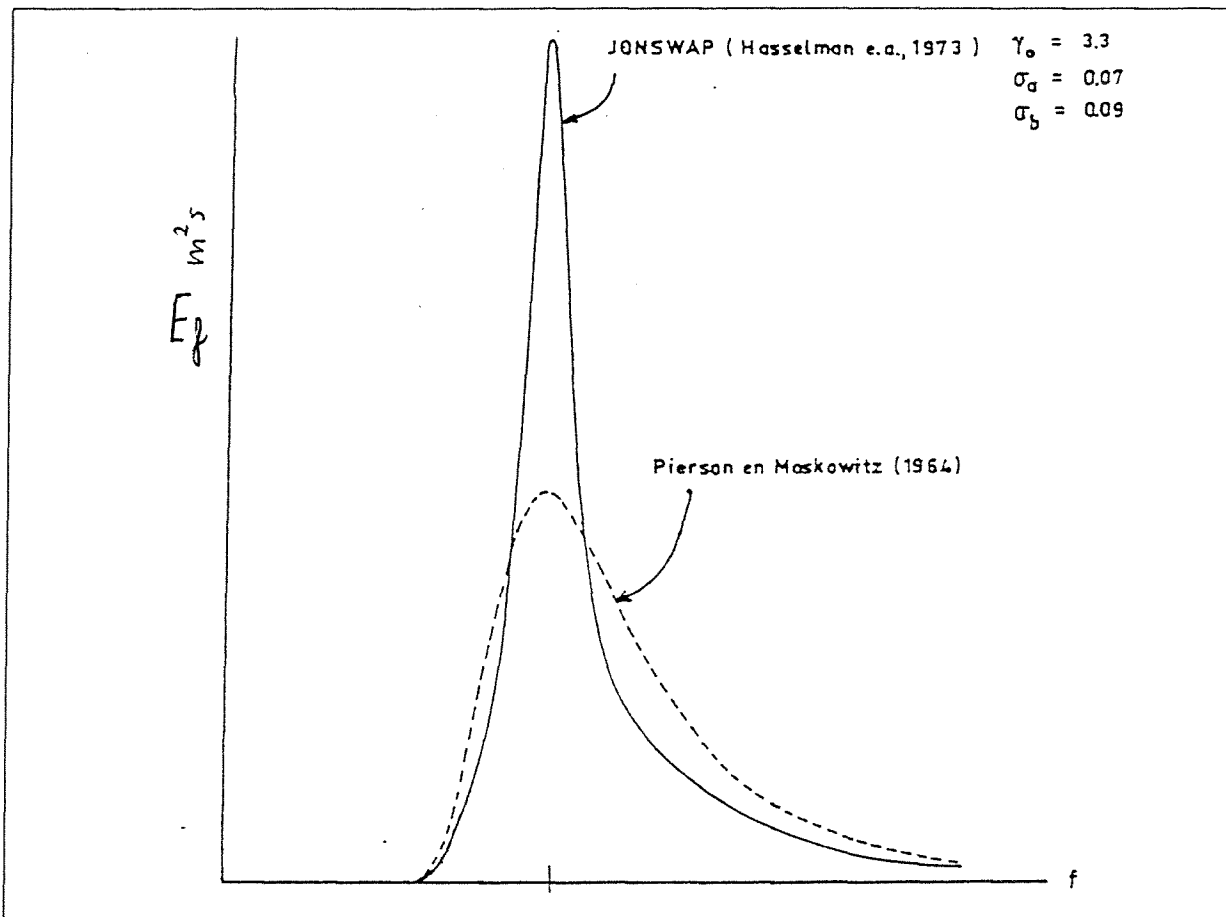
= σ_a voor $f < f_m$, $\sigma_a=0.07$

σ < = σ_b voor $f \geq f_m$, $\sigma_b=0.09$.

Het JONSWAP spectrum is niet te integreren, er blijkt echter uit numerieke berekeningen dat voor m_0 de volgende relatie (met $\sigma_a=0.07$ en $\sigma_b=0.09$) geldig is:

$$m_0 = \frac{(2\pi)^{-4}}{5} \alpha g^2 f_m^{-4} (0.78 + 0.22\gamma_0) \quad [3.36]$$

Figuur 3.6 geeft een voorbeeld van het JONSWAP en het Pierson-Moskowitz spectrum.



Figuur 3.6 Het JONSWAP-spectrum

3.5 Respons van een systeem

Voor lineaire systemen is de respons van het systeem op een stochastisch proces te bepalen met behulp van de spectraal-analyse. Een systeem wordt lineair beschouwd als de betrekkingen tussen excitatie en respons de eigenschappen van evenredigheid en superpositie bezitten. Dit betekent dat de respons, op golfhoogten met een rayleigh-verdeling, ook rayleigh-verdeeld is. Meer in het algemeen geldt dat de respons op een sinusvormige excitatie eveneens sinusvormig is, met de zelfde frequentie:

$$x_0(t) = \text{Re } \hat{x}(f_0) e^{i2\pi f_0 t} \longrightarrow y_0(t) = \text{Re } \hat{y}(f_0) e^{i2\pi f_0 t} \quad [3.37]$$

De respons kan slechts in sterkte en in fase verschillen van de excitatie. Dit kan worden uitgedrukt in de verhouding van de complexe amplituden:

$$R_{yx}(f) = \frac{\hat{y}(f)}{\hat{x}(f)} \quad [3.38]$$

De modulus hiervan stelt de verhouding van reële amplituden van respons en excitatie voor en het argument het faseverschil.

$$|R_{yx}(f)| = \frac{|\hat{y}(f)|}{|\hat{x}(f)|} \quad [3.39]$$

$$\arg R_{yx}(f) = \arg \hat{y}(f) - \arg \hat{x}(f) \quad [3.40]$$

$R_{yx}(f)$ wordt het systeem spectrum of de overdrachtsfunctie genoemd. Door middel van het systeem spectrum is een relatie te leggen tussen het variantiedichtheidsspectrum van een stochastische excitatie $x(t)$ en de stochastische respons $y(t)$. De spectrale dichtheid van de variantie is evenredig met de kwadraten van de moduli van de spectrale componenten, want er geldt

$$E_{\xi\xi}(f) \cdot df = \frac{1}{2} \xi_a^2 \text{ en}$$

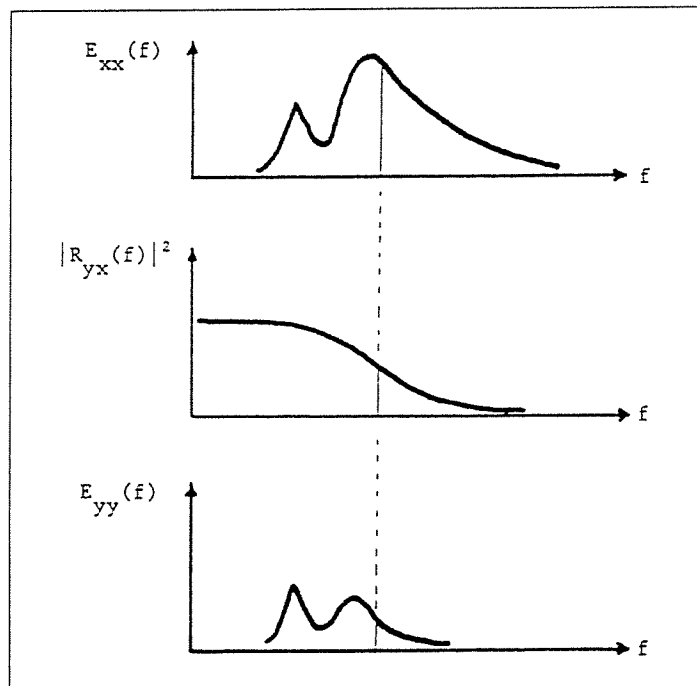
$$E_{MM}(f) \cdot df = \frac{1}{2} M_a^2 = \frac{1}{2} \left| \frac{M_a}{\xi_a} \right|^2 \cdot \xi_a^2$$

$$= \left| \frac{M_a}{\xi_a} \right|^2 \cdot E_{\xi\xi}(f) \cdot df$$

en dus

$$E_{yy}(f) = |R_{yx}(f)|^2 \cdot E_{xx}(f) \quad [3.41]$$

Als de stochastische excitatie een Gaussisch proces is dan is de respons ook een Gaussisch proces, en alle statistische eigenschappen van de respons kunnen dan beschreven worden met het variantiedichtheids-spectrum $E_{yy}(f)$ van die respons (zie fig. 3.7).



Figuur 3.7 Respons-spectrum

3.6 Respons van tunnelementen op golfbelastingen

3.6.1 Inleiding

De belasting op elementen is gerelateerd aan de hoogte en lengte van de golven. Als de golflengte groot is ten opzichte van de lengte van het element dan zal het element in zijn geheel met de golfbeweging meebewegen, en zullen de golfbelastingen klein blijven. Wanneer de golflengte erg klein is ten opzichte van de lengte van de tunnel, zullen er over kleine afstanden verschillen zijn in opwaartse druk. Dit heeft ook nauwelijks consequenties voor de belastingen op het tunnelement. Dit is anders voor golflengte die een orde van grootte hebben die gelijk is aan de lengte van het tunnelement. De uiteinden van het element kunnen dan in een golfhoogte komen terwijl het midden van het element samenvalt met een golfdal, of omgekeerd. De opwaartse kracht is dan niet meer gelijkmatig over het element verdeeld, maar geconcentreerd ter plaatse van de golfhoogten, tevens gaan door de bewegingen de versnellingskrachten een rol spelen. Zulke situaties leveren grote krachten op in het element.

Naast de lengte van de golven speelt de hoogte een rol, de krachten die optreden in de constructie zijn rechtevenredig met de optredende golfhoogte.

In het vervolg van deze paragraaf zal de theorie die ten grondslag ligt aan de overdracht van golfuitwijking naar belastingen op de tunnelementen aan de orde komen.

3.6.2 Enkelvoudige golven

De golfvergelijking

De elementen worden op zee belast door golven waarvan de harmonische beweging van het golfoppervlak ξ als volgt kan worden beschreven:

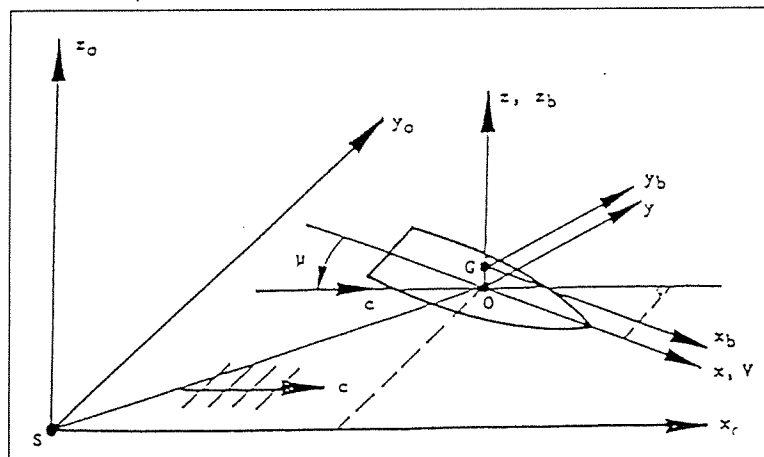
$$\xi = \xi_a \cdot \cos(\omega \cdot t - k \cdot x_0)$$

waarin:

- ξ_a : golfamplitude,
- ω : golffrequentie in radialen per seconde,
- t : tijd,
- k : golfgetal: $k = 2 \cdot \pi / \lambda$,
- λ : golflengte.

Figuur 3.8 geeft de gebruikte assenstelsels weer. De golfsnelheid c in de richting van de x_0 -as met hoek μ ten opzichte van de snelheid v is gelijk aan ω/k . Het assenstelsel beweegt met snelheid v zodat voor x_0 geldt:

$$x_0 = v \cdot t \cdot \cos \mu + x \cdot \cos \mu + y \cdot \sin \mu$$



Figuur 3.8 Assenstelsels

In een meebewegend assenstelsel wordt v gelijk aan nul zodat voor de uitwijking van het golfoppervlak geldt:

$$\xi = \xi_a \cdot \cos(\omega \cdot t - k \cdot x \cdot \cos \mu - k \cdot y \cdot \sin \mu) \tag{3.42}$$

De afleidingen die volgen gelden dus voor een tunnelement met voorwaartse snelheid nul.

De dompbeweging

De verticale beweging van een element in enkelvoudige golven kan als volgt worden weergegeven (fig. 3.9).

Er moet gelden:

$$m \cdot \ddot{z} = Z \quad [3.43]$$

m is de massa van het element dat gelijk is aan de massa van het verplaatste water en Z is de som van de verticale krachten. De kracht Z bestaat uit het gewicht van de cilinder en de som van de hydrodynamische krachten F , die ontstaan doordat het element een verticale beweging ten opzichte van het water ondergaat. Dit kan geschreven worden als

$$Z = F_1 + F_2 + F_3 - P + \rho \cdot g \cdot \nabla$$

F_1 is de golfdruk aan de onderkant van het element en F_2 en F_3 zijn hydrodynamische krachten die respectievelijk evenredig zijn met de snelheid en de versnelling van het element ten opzichte van het water, hiermee wordt

$$\begin{aligned} P &= \rho \cdot g \cdot A_w \cdot T \\ F_1 &= \rho \cdot g \cdot A_w \cdot (\xi - z) \\ F_2 &= -b \cdot (\dot{z} - \dot{\xi}) \\ F_3 &= -a \cdot (\ddot{z} - \ddot{\xi}) \end{aligned}$$

waarbij F_1 de zogenaamde Froude-Krylov-kracht is, zodat voor de vergelijking verkregen wordt:

$$m \cdot \ddot{z} = \rho \cdot g \cdot A_w (\xi - z) - b (\dot{z} - \dot{\xi}) - a (\ddot{z} - \ddot{\xi}) \quad [3.44]$$

met $c = \rho \cdot g \cdot A_w$ wordt de dompvergelijking gelijk aan:

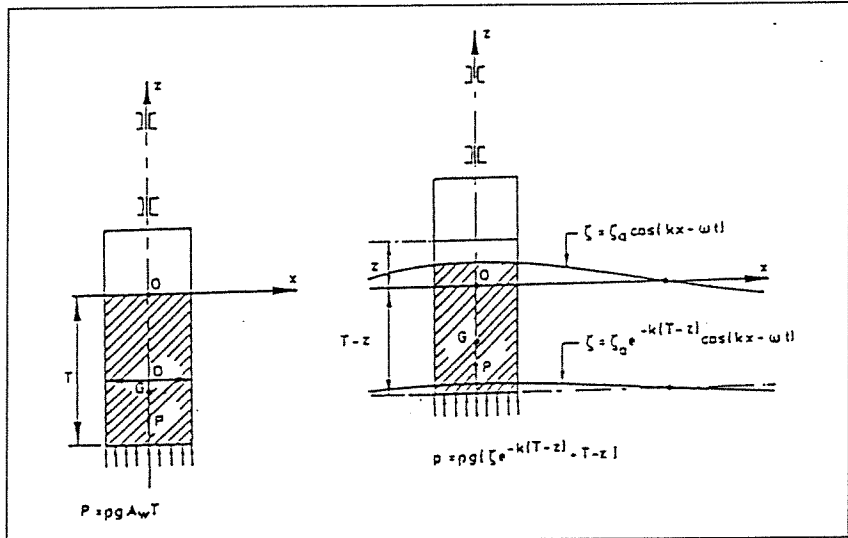
$$(m+a) \cdot \ddot{z} + b \cdot \dot{z} + c \cdot z = a \cdot \ddot{\xi} + b \cdot \dot{\xi} + c \cdot \xi \quad [3.45]$$

Hierin $c \cdot \xi$ de dynamische kracht in de ongestoorde golf, de zogenaamde Froude-Krylov kracht en a en b respectievelijk de hydrodynamische massa en de hydrodynamische demping.

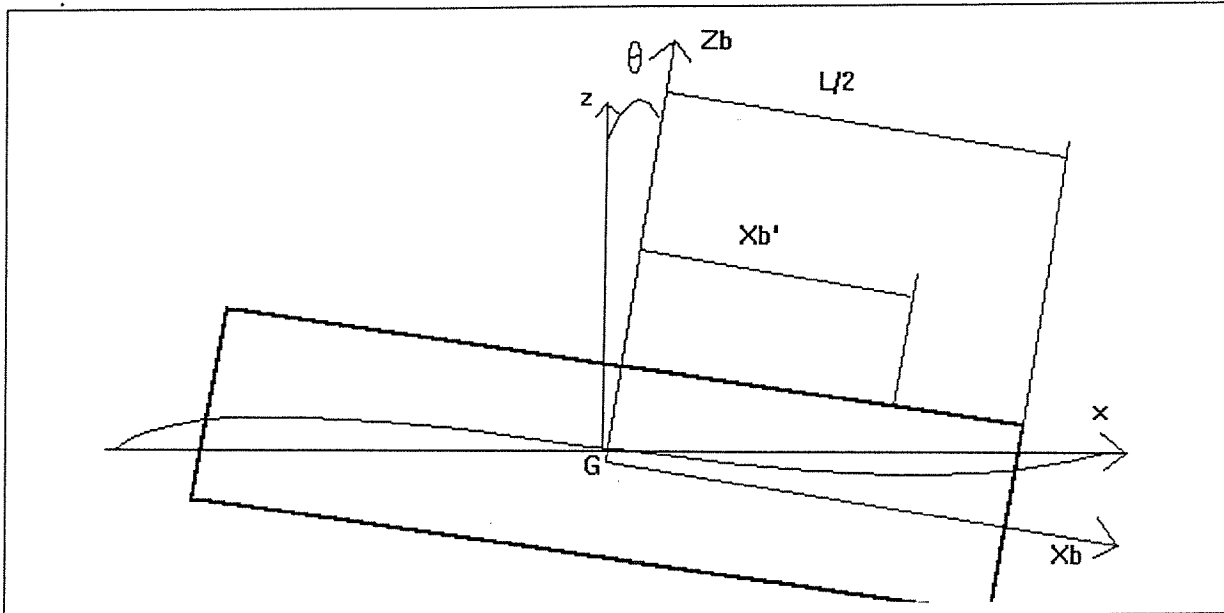
Absolute verticale beweging

De schrikbeweging blijkt voor de verticale beweging nauwelijks van invloed, zodat uit de domp- en stampbeweging de verticale beweging kan worden berekend zie figuur 3.10.

Voor de stampbeweging geldt een analoge vergelijking als voor de dompbeweging waarbij de massa m moet worden vervangen door het traagheidsmoment I_{yy} . De stampbeweging kan dus geschreven worden als :



Figuur 3.9 Dompbeweging element in enkelvoudige golven



Figuur 3.10 Verticale beweging element

$$(I_{yy}+a)\ddot{\theta} + b\dot{\theta} + c\theta = a\ddot{\xi} + b\dot{\xi} + c\xi \quad [3.46]$$

De absolute verticale verplaatsing h ter plaatse van $(x_b, 0, z_b)$ is gelijk aan :

$$h = z - x_b \cdot \theta \quad [3.47]$$

De hydrodynamische massa, traagheidsmomenten en demping worden ook wel geschreven als

$$- a = m_{zz'}, m_{\theta\theta}$$

$$- b = N_{zz'}, N_{\theta\theta}$$

In bijlage 2 worden de hydrodynamische coëfficiënten, aangegeven met een accent, afgeleid per strekkende meter. Voor deze coëfficiënten geldt:

$$m_{zz} = \int_{-L/2}^{L/2} m'_{zz} dx_b, \quad m_{\theta\theta} = \int_{-L/2}^{L/2} m'_{zz} x_b^2 dx_b$$

$$N_{zz} = \int_{-L/2}^{L/2} N'_{zz} dx_b, \quad N_{\theta\theta} = \int_{-L/2}^{L/2} N'_{zz} x_b^2 dx_b$$

zie bijlage 2.

De samengestelde bewegingsvergelijking voor dompen en stampen worden nu:

$$m \cdot \ddot{z} = \int_{-L/2}^{L/2} (F'_1 + F'_2 + F'_3) dx_b \text{ en}$$

$$I_{yy} \ddot{\theta} = \int_{-L/2}^{L/2} (F'_1 + F'_2 + F'_3) \cdot x_b dx_b \quad [3.48]$$

met

$$F'_1 = -2 \cdot \rho \cdot g \cdot y_w \cdot (z - x_b \cdot \theta - \xi')$$

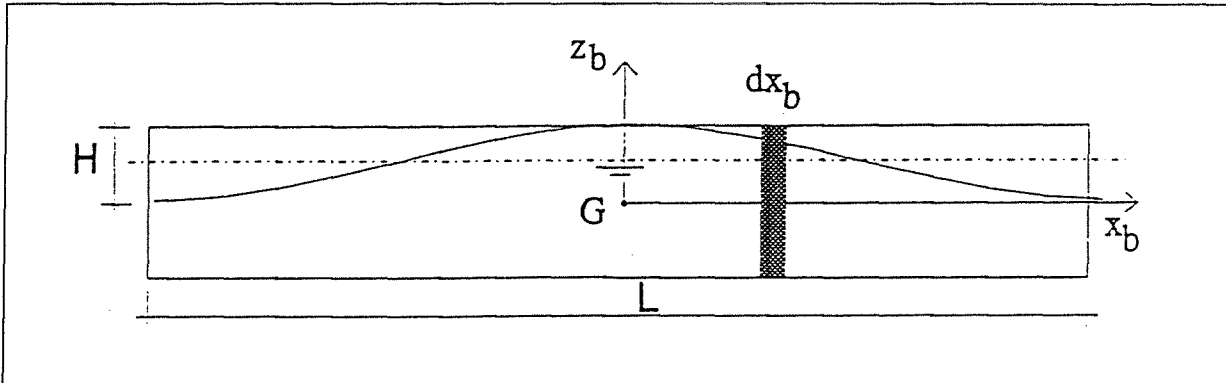
$$F'_2 = -N'_{zz} \cdot (\dot{z} - x_b \cdot \dot{\theta} - \dot{\xi}')$$

$$F'_3 = -m'_{zz} \cdot (\ddot{z} - x_b \cdot \ddot{\theta} - \ddot{\xi}')$$

In bijlage 3 worden de twee vergelijkingen helemaal uitgeschreven.

3.6.3 Golfbelastingen op het element

Met de samengestelde bewegingsvergelijkingen is het nu mogelijk om de golfbelasting op de tunnelelementen te bepalen zie figuur 3.11.



Figuur 3.11 Golfbelasting op het element

Beschouwen we het evenwicht van een schijf uit het element (zie fig. 3.12), met tekenafpraak q in z -richting en opbuigend moment positief dan geldt:

$$q \cdot dx_b = -dQ$$

$$Q \cdot dx_b = dM_b$$

De verticale belasting q per eenheid van lengte wordt veroorzaakt door de traagheidskrachten, de hydromechanische krachten en het gewicht van de schijf, er geldt, zie [3.48]:

$$q(x) = -\frac{w'}{g} \cdot (\ddot{z} - x_b \cdot \ddot{\theta}) + F' + (\rho \cdot g \cdot A_x - w')$$

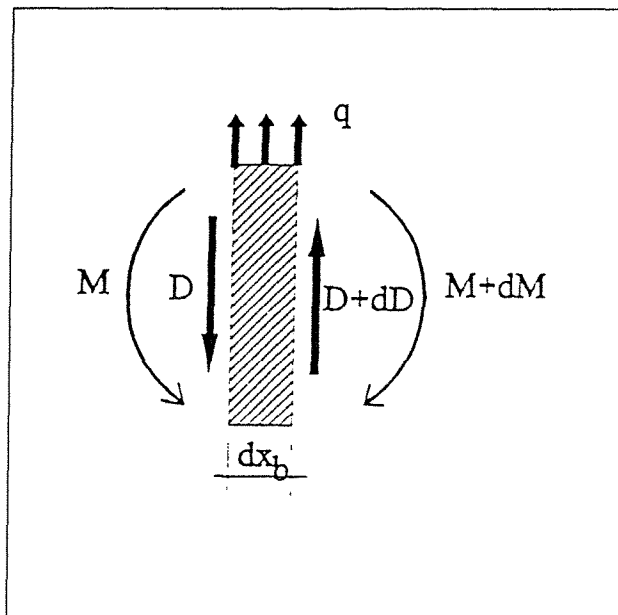
met w' is het gewicht van het element per meter, veroorzaakt $(\rho \cdot g \cdot A_x - w')$ de stilwater belasting, en de rest is de golfbelasting. De dwarskracht Q in een doorsnede x' ten gevolge van de golfbelasting is dan gelijk aan:

$$Q(x') = -\int_{x'}^{L/2} q(x_b) \cdot dx_b = \int \left[\frac{w'}{g} \cdot (\ddot{z} - x_b \cdot \ddot{\theta}) - F' \right] dx_b \quad [3.49]$$

Het golfbuigend moment is de integraal van de dwarskracht. Deze is ook te schrijven als

$$M_b(x') = \int_{x'}^{L/2} Q(x_b) \cdot dx_b = \int_{x'}^{L/2} dQ(x_b - x') = \int q(x_b) \cdot (x_b - x') \cdot dx_b$$

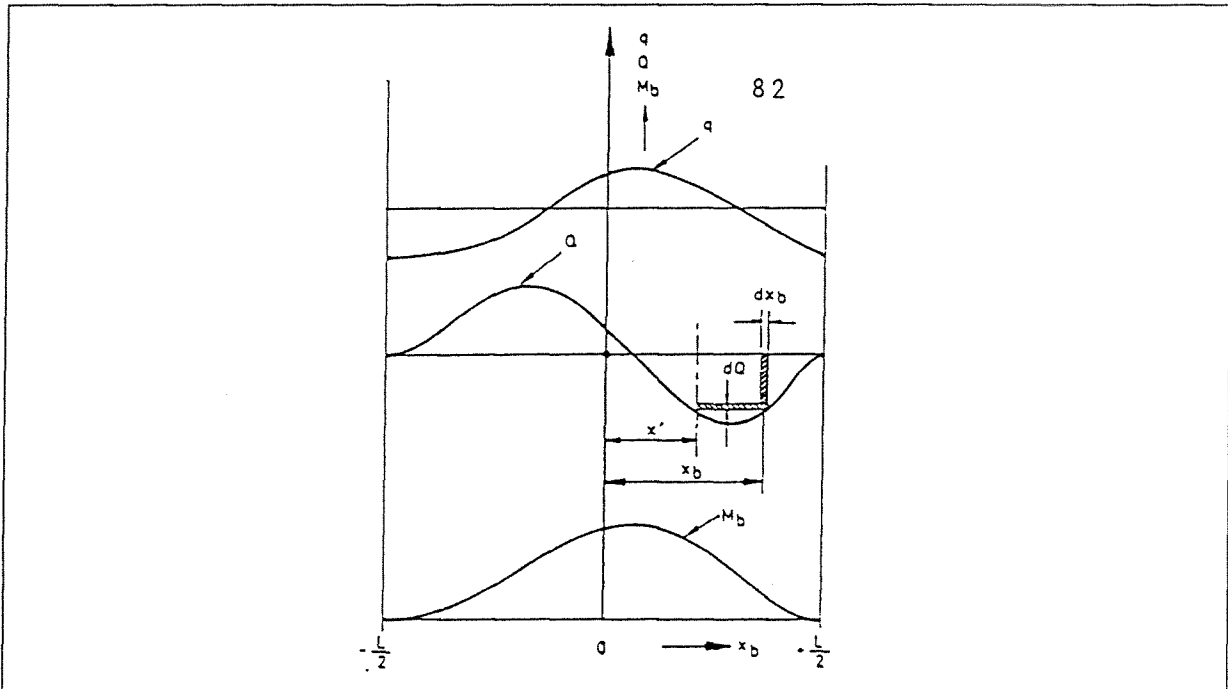
zodat voor het buigend moment geldt :



Figuur 3.12 Krachten op doorsnede dx_b

$$M_b(x') = \int_{x'}^{L/2} \left[\frac{w'}{g} (\ddot{z} - x_b \ddot{\theta}) - F' \right] (x_b - x') dx_b \quad [3.50]$$

zie figuur 3.13.



Figuur 3.13 Belasting, dwarskracht en buigend moment

Froude-Krylov kracht

Als de gewichtsverdeling en de frequentiekaracteristieken van de domp en stampbeweging bekend is en de verdeling van de hydrodynamische krachten over de lengte, kunnen de dwarskracht en het moment berekend worden. De hydrodynamische massa, traagheid en demping zijn bepaald in bijlage 2. In de hierbovenstaande vergelijkingen werd de Froude-Krylov kracht (F_1') weergegeven als $2\rho g y_w \xi^*$. De Froude-Krylov kracht is het gevolg van de waterdruk over het element in de ongestoorde golf. Volgens Bernouilli is de druk dan gelijk aan:

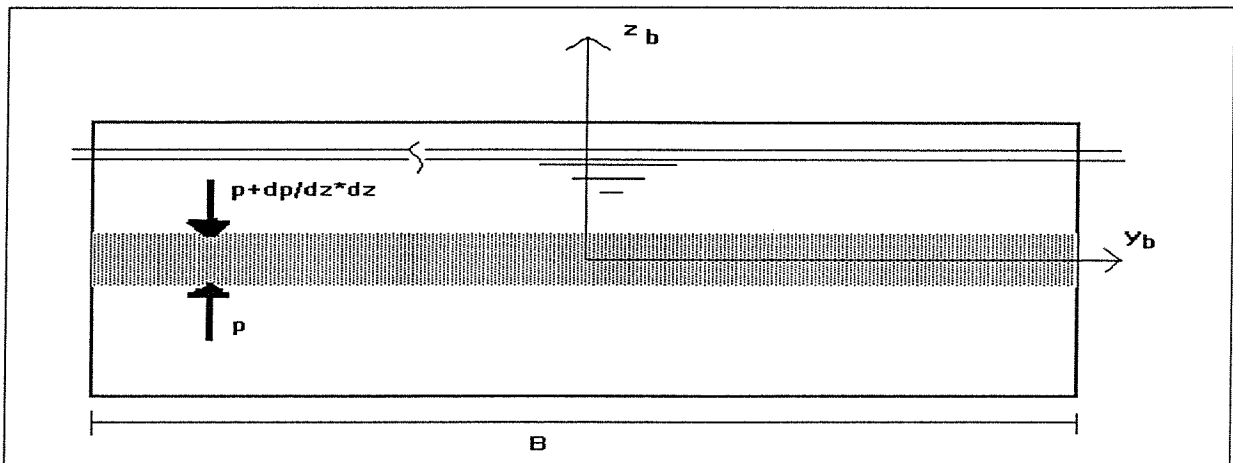
$$p = -\rho \cdot g \cdot z + \rho \cdot g \cdot \frac{\cosh k \cdot (h+z)}{\cosh kh} \cdot \xi$$

De kracht op een doorsnede dx als gevolg van de druk p wordt nu als volgt berekend; de verticale kracht in langsrichting is het verticale drukverschil geïntegreerd over de hoogte en de breedte van het element (fig. 3.14).

De Froude-Krylov kracht is dan dus gelijk aan:

$$FK_z = - \int_{-T}^{\xi} \int_{-y_b}^{y_b} \frac{\partial p}{\partial z} \cdot dy \cdot dz \quad [3.51]$$

uitwerking van deze formule levert voor evenwijdig invallende golven, $\mu = 0$ (zie bijlage 3) :



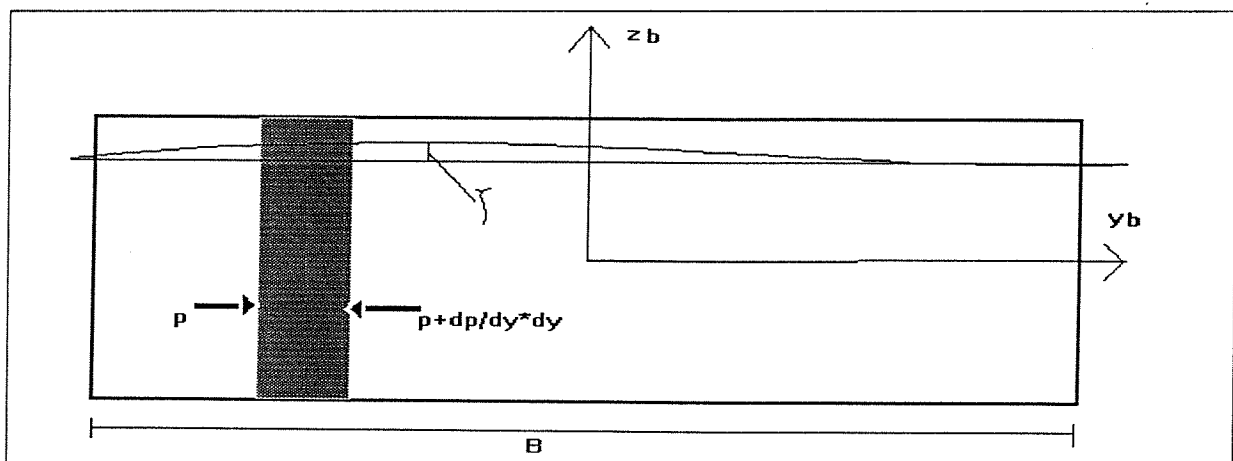
Figuur 3.14 Druk in verticale richting

$$\begin{aligned}
 FK_z &= B \cdot \rho \cdot g \frac{\cosh k(h-T)}{\cosh kh} \cdot \xi_a \cdot \cos(\omega \cdot t - k \cdot x \cdot \cos \mu) \\
 &= B \cdot \rho \cdot g \frac{\cosh k(h-T)}{\cosh kh} \cdot \xi \\
 &= B \cdot \rho \cdot g \cdot \xi^*
 \end{aligned}
 \tag{3.52}$$

De verticale kracht is dus inderdaad gelijk aan $2\rho g y_w \xi^*$.

Froude-Krylov kracht in horizontale (y) richting

Voor de afleiding van de horizontale Froude-Krylov kracht geldt hetzelfde als voor de verticale kracht maar hier gaat het dan om het horizontale drukverschil zie figuur 3.15.



Figuur 3.15 Druk in horizontale richting

Voor de Froude-Krylov kracht geldt nu:

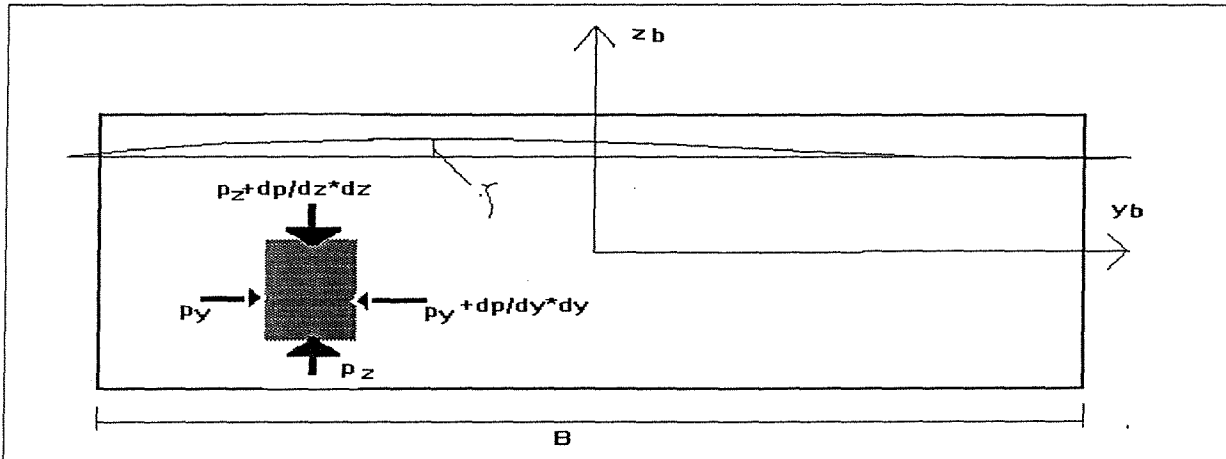
$$FK_y = - \int_{-T-y_b}^{\xi} \int_{y_b} \frac{\partial p}{\partial y} \cdot dy \cdot dz
 \tag{3.53}$$

uitwerking van deze formule, zie hiervoor weer bijlage 3, levert:

$$FK_y = -2 \cdot \rho \cdot g \cdot \frac{\sin(k \cdot y_b \cdot \sin \mu)}{k} \cdot \left[\frac{\sinh kh - \sinh k(h-T)}{\cosh kh} \right] \cdot \xi \quad [3.54]$$

Froude-Krylov moment

Door het drukverschil ontstaat ook een wringend moment zie figuur 3.16



Figuur 3.16 Wringmoment als gevolg van de druk

Voor het Froude-Krylov wringmoment geldt nu:

$$FK_\phi = - \int_{-T}^{\xi} \int_{-y_b}^{y_b} \left(-\frac{\partial p}{\partial y} \cdot z_b + \frac{\partial p}{\partial y} \cdot y_b \right) \cdot dy \cdot dz \quad [3.55]$$

Na uitwerking (bijlage 3) wordt voor het moment gevonden:

$$FK_\phi = 2 \cdot \rho \cdot g \cdot \xi \cdot \frac{\sin(k \cdot y_b \cdot \sin \mu)}{k} \cdot \left(-\frac{1}{k} + \frac{T \cdot k \cdot \sinh k(h-T) + \cosh k(h-T)}{k \cdot \cosh kh} \right) + 2 \cdot \rho \cdot g \cdot \xi \cdot \left(\frac{\sin(k \cdot y_b \cdot \sin \mu)}{k^2 \cdot \sin^2 \mu} - \frac{y_b \cdot \cos(k \cdot y_b \cdot \sin \mu)}{k \cdot \sin \mu} \right) \cdot \frac{\cosh k(h-T)}{\cosh kh} \quad [3.56]$$

Behalve dit moment levert de horizontale Froude-Krylov kracht ook een bijdrage aan het wringend moment. Dit komt doordat de werklijn van de horizontale belasting op het stilwaterniveau werkt en niet op de wringingsas. Hierdoor ontstaat een extra moment. De arm is gelijk aan:

diepgang-wringingsas vanaf de onderkant = $7.65 - 4.05 = 3.6$ m
zodat het totale moment gelijk is aan : $FK_\phi + FK_y \cdot 3.6$

De buigende en wringende momenten in de tunnelelementen worden nu bepaald door integratie van de golfbelasting ([3.50]), in bijlage 3 is hiervan een voorbeeld uitgeschreven.

3.6.4 Onregelmatige golven

De respons in onregelmatige golven kunnen met het superpositie beginsel berekend worden als de frequentie karakteristiek van het drijvende element en het spectrum van de golven bekend zijn, mits het systeem als lineair beschouwd kan worden wat hier het geval is. De zeegang wordt verondersteld te bestaan uit meerdere enkelvoudige golfcomponenten, elk met

een eigen amplitude, frequentie en voortplantingsrichting.

De verdeling van de energie per oppervlakte eenheid als functie van de golffrequentie en de voortplantingsrichting wordt gegeven door het golfspectrum.

De respons van het drijvende element in onregelmatige zee wordt nu bepaald door de respons van het element op iedere enkelvoudige golfkomponent lineair te superponeren.

Wanneer we de golfuitwijking schrijven als

$$\xi = \xi_a \cdot \cos(\omega \cdot t + \epsilon) = \xi_a \cdot e^{i(\omega \cdot t + \epsilon)} \quad [3.57]$$

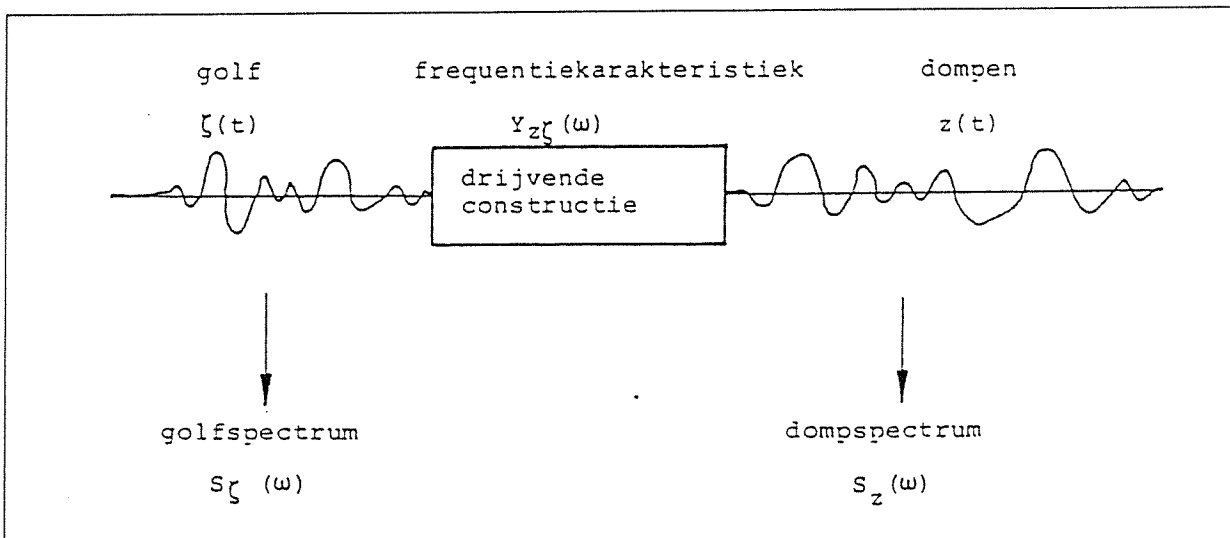
en de respons als

$$M = M_a \cdot e^{i(\omega \cdot t + \epsilon_{M\xi})} \quad [3.58]$$

Dan kan de respons op een enkelvoudige golf geschreven worden als

$$M = \xi \cdot R_{M\xi} = \xi_a \cdot e^{i(\omega \cdot t + \epsilon)} * \frac{M_a}{\xi_a} \cdot e^{i\epsilon_{M\xi}}$$

zie figuur 3.17.



Figuur 3.17 Schematisatie onregelmatige golven

De frequentie karakteristiek kan dus geschreven worden als:

$$R_{M\xi} = \frac{M_a}{\xi_a}(\omega) \cdot e^{i\epsilon_{M\xi}(\omega)} \quad [3.59]$$

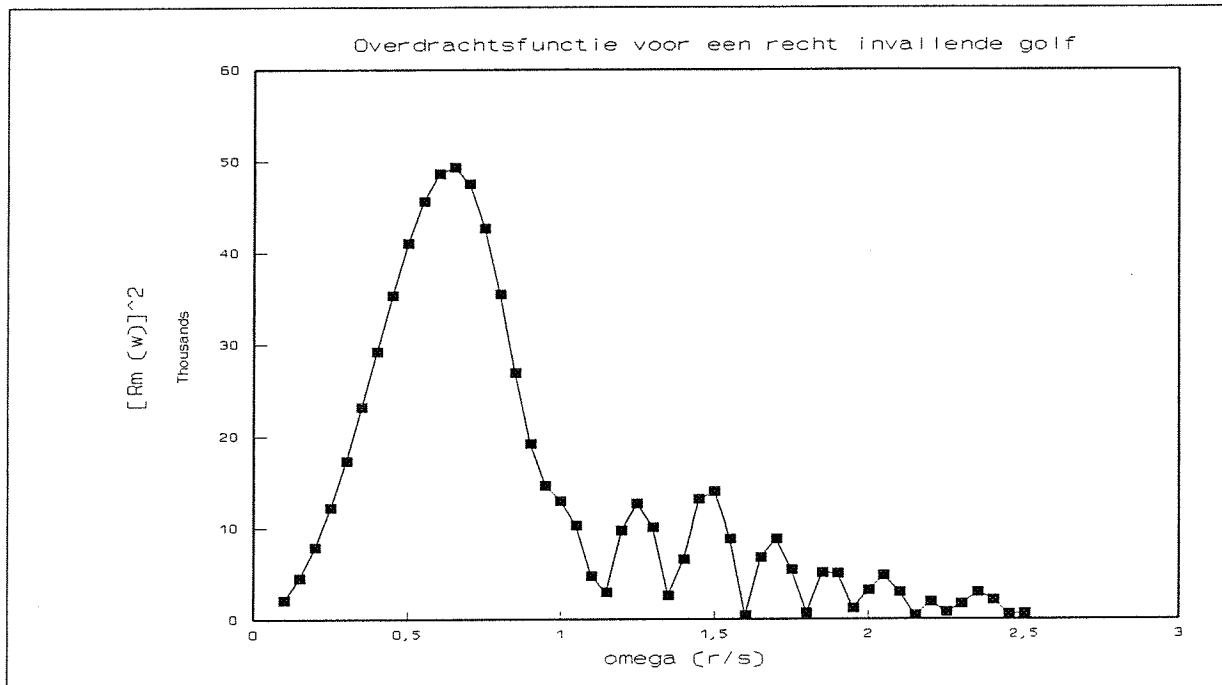
Door superpositie van alle respons op de enkelvoudige samenstellende golfkomponenten vindt men tenslotte:

$$M_t = \sum_{n=1}^{\infty} [|R_{M\xi}(\omega)| \cdot \xi_{a_n} \cdot \cos(\omega_n \cdot t + \epsilon_n + \epsilon_{M\xi_n})]$$

De spectrale dichtheid van de momenten is dan gelijk aan (formule [3.41]):

$$E_{M\zeta}(\omega) = |R_{M\zeta}(\omega)|^2 * E_{\zeta}(\omega) \quad [3.60]$$

In bijlage 3 is een voorbeeld gegeven van de berekening van de overdrachtsfunctie, $R_{M\zeta}(\omega)$. Doordat het systeem lineair is, is de respons op golfhoogte met een Rayleigh-verdeling ook weer Rayleigh-verdeeld. Dit betekent dat de eigenschappen van golven gesteld in § 3.3.3 ook gelden voor de momenten.



Figuur 3.18 Overdrachtsfunctie van het verticale moment voor de middendoorsnede van een tunnel met lengte 96 m

Met de overdrachtsfunctie en de golfspectra zijn nu de momentspectra te bepalen (fig. 3.7). Uit dit spectrum kan dan het eerste moment bepaald worden door integratie van het momentenspectrum [3.21]. De significante amplitude van het moment is dan gelijk aan:

$$M_s = 2 \cdot \sqrt{m_0} \quad [3.61]$$

Aan de hand van M_s kan de kans van voorkomen van een bepaald moment tijdens zeetransport worden bepaald. Met deze kansen voor optreden van momenten en de kosten van voorspanning kan dan de voorspanning economisch worden geoptimaliseerd. Hiervoor is het echter ook nodig om de verdeling van de significante golven voor de Noordzee te weten, hierop wordt in het volgende hoofdstuk ingegaan.

De hier beschreven theorie voor de bepaling van de overdrachtsfunctie is vrij ingewikkeld, voor de bepaling van de overdrachtsfuncties wordt daarom gebruikt gemaakt van het programma Seaway, dat van de hier beschreven lineaire striptheorie gebruik maakt. De beschrijving en uitkomsten van het programma komen in hoofdstuk 5 aan de orde.

4 Golfklimaat van de Noordzee

4.1 Inleiding

Met de theorie uit hoofdstuk 3 is het mogelijk om bij gegeven golfkarakteristieken, de golfhoogte en -periode, de belastingen op een element en de kans van optreden van deze belastingen te bepalen door middel van de overdrachtsfunctie. De kansverdeling van de krachten in het element zijn bekend voor iedere significante golfhoogte (H_s) met bijbehorende piekperiode (T_p). Deze karakteristieke grootheden geven een beschrijving van een natuurlijk golfveld. Zoals reeds in hoofdstuk 3 is vermeld, geldt dit alleen wanneer het proces als stationair kan worden beschouwd. In het algemeen wordt gesteld dat zeecondities voor een periode van 3 uur als stationair kunnen worden beschouwd, en dus beschreven aan de hand van karakteristieken. Voor het beschrijven van de zeecondities over langere perioden is een lange-termijn verdeling van de karakteristieken nodig. In dit hoofdstuk zal de lange-termijn verdeling van de karakteristieke golfhoogte, -periode en -richting voor de Noordzee worden bepaald aan de hand van 3-uurlijkse metingen van deze karakteristieken over een periode van 13 jaar.

4.2 Verwerken van de metingen

4.2.1 Inleiding

Het transport van de Wijkertunnel vindt plaats over de Noordzee tussen de Nieuwe Waterweg en het Noordzeekanaal. Voor gegevens over de golfcondities op de Noordzee is gebruik gemaakt van 2 meetstation op de Noordzee, te weten het meetstation bij IJmuiden en het platform Euro-O. Bij het meetstation IJmuiden is de waterdiepte 21 m, bij het platform euro-O bedraagt de waterdiepte 32 m. De golfgegevens van deze stations bestaan uit 3-uurlijkse metingen over een periode van 13 jaar (1979-1991). Bij de metingen worden de volgende grootheden geregistreerd:

- golfhoogte H_{m0}
- golfhoogte $H_{1/3}$ (H_s)
- laagfrequente golfhoogte H_{e10} (deining)
- golfperiode T_{m02} (nuldoorgangsperiode)
- golfperiode T_{Hs}
- gemiddelde hoofdgolfrichting
- laagfrequente golfrichting
- gemiddelde richtings spreiding $s0$.

De gegevens van de twee meetstations worden samengevoegd, dit is geoorloofd omdat de waterdiepte tijdens transport, gesteld op 25 meter, tussen die van de meetstations inligt. Door het samenvoegen beschrijven de golfgegevens beter de condities bij een waterdiepte van 25 m. Dit geldt met name voor de golfrichting omdat door refractie een verschil aanwezig kan zijn voor de twee meetstations dat dan weggemiddeld wordt.

Om de krachten die door de golfbelastingen op de elementen worden uitgeoefend tijdens transport zoveel mogelijk te beperken worden tunnelelementen alleen tijdens de zomermaanden over zee vervoerd. Bij het bepalen van het golfklimaat voor de Noordzee gaat het dus alleen om de gegevens van de maanden mei tot en met augustus.

Voor het bepalen van de belastingen veroorzaakt door golven op de tunnelelementen zijn de golfhoogte, golflengte en de hoek van inval van de golven van belang. Van de bovengenoemde grootheden is de registratie van de golfhoogte H_{m0} , de golfperiode T_{m02} en de gemiddelde hoofd-

golfrichting het best. Gegevens over de significante golfhoogte en de laagfrequente golfhoogte en de bijbehorende perioden en richtingen vallen vaak weg. Daarom wordt voor het verwerken van de gegevens uitgegaan van H_{m0} , T_{m02} en de hoofdgolfrichting.

4.2.2 Golfhoogte

Zeegang

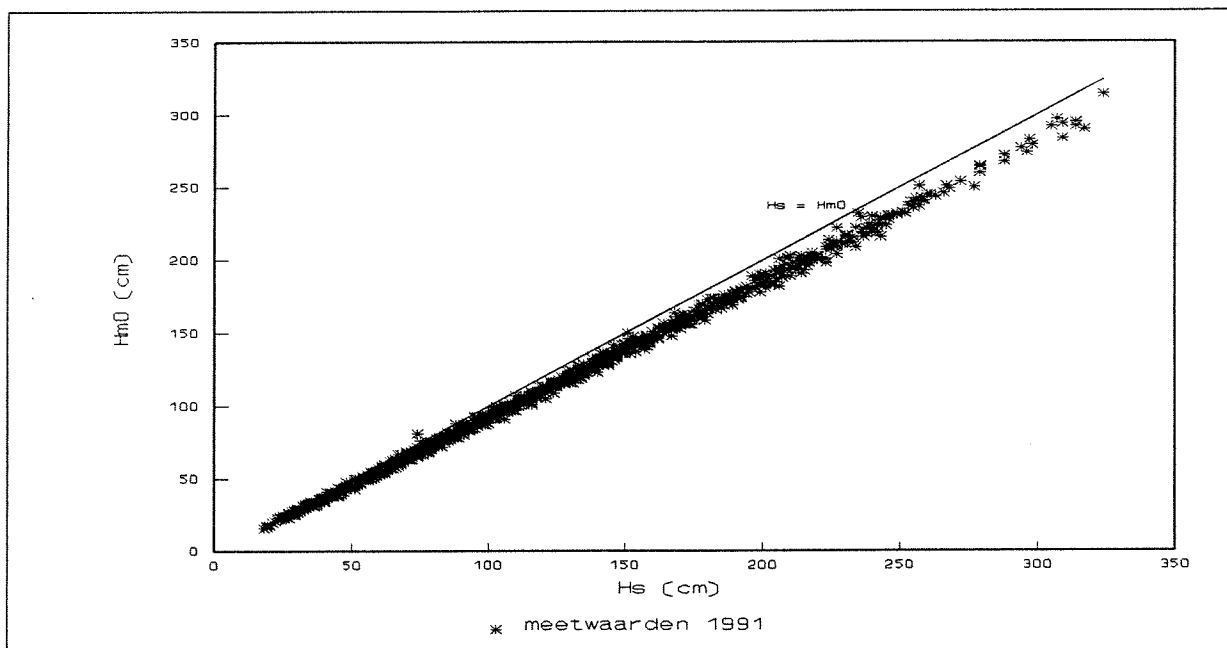
Bij de metingen wordt onderscheid gemaakt tussen drie soorten golfhoogten. De golfhoogte is opgebouwd uit zeegang en deining. De zeegang ontstaat door lokale windvelden terwijl de deining wordt veroorzaakt door veraf gelegen windvelden. Deining en zeegang zijn daarom onafhankelijk van elkaar (fig 4.2). Deining wordt gekenmerkt door een lage frequentie. Hier wordt als definitie voor deining gesteld, de golfhoogte met een piekperiode van 10 seconden of meer (H_{e10}).

H_{m0} is de spectrale golfhoogte en $H_{1/3}$ is de significante golfhoogte voor zeegang. Omdat deining en zeegang onafhankelijk zijn, kunnen de spectra voor zeegang en deining gesuperponeerd worden. Het golfspectrum is evenredig met het kwadraat van de golfhoogte. Omdat de laagfrequente golfhoogte klein is ten opzichte van de significante golfhoogte kan de significante golfhoogte gelijk worden gesteld aan de spectrale golfhoogte,

$$H_{m0} = \sqrt{H_s^2 + H_{e10}^2}, \text{ met } H_{e10} < H_s \quad [4.1]$$

$$H_{m0} \approx H_s$$

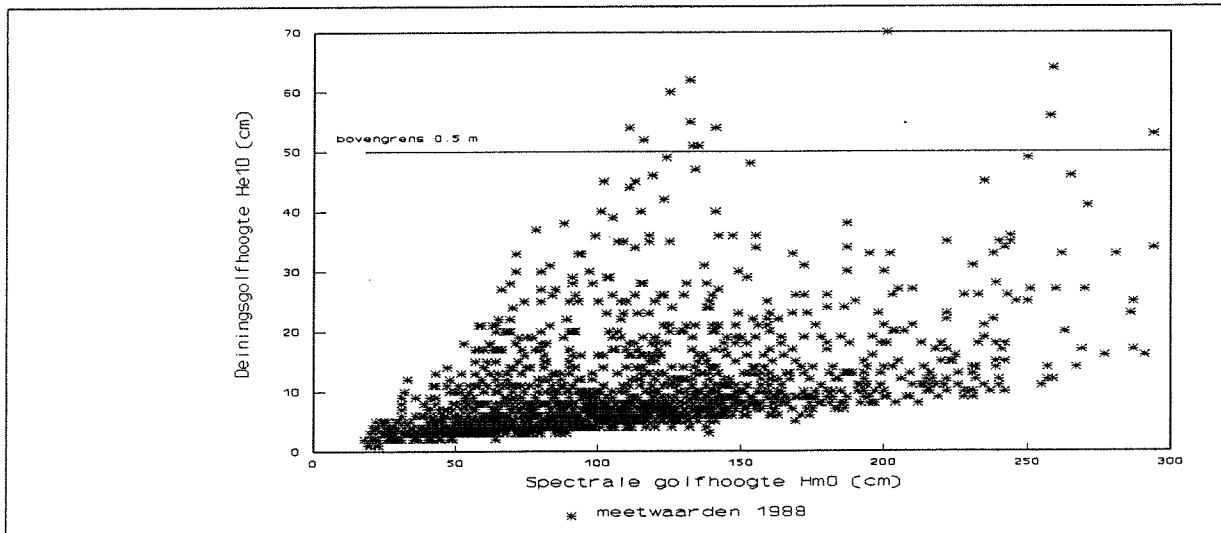
er kan dus gebruik worden gemaakt van de spectrale golfhoogte H_{m0} als waarde voor de significante golfhoogte voor zeegang, zie figuur 4.1. Hiervan wordt gebruik gemaakt omdat de waarnemingen van de spectrale golfhoogte H_{m0} vollediger zijn dan die van de significante golfhoogte H_s .



Figuur 4.1 Relatie tussen significante- en spectrale golfhoogte (H_s - H_{m0})

Deining

De deiningsgolfhoogte is laag omdat deining wordt veroorzaakt door veraf gelegen windvelden. Uit figuur 4.2 blijkt dat op enkele uitschieters na de deining een bovengrens heeft van 0,5 m. Juist de deining is van grote invloed op de momenten omdat de lengte van deininggolven ongeveer overeenkomt met de lengte van de elementen ($L = gT^2/2\pi \approx 95$). Daarom wordt voor de deining hier voorlopig verder gewerkt met de bovengrens van 0,5 meter.



Figuur 4.2 Deiningsgolfhoogte

4.2.3 Golfperiode

De periode die gemeten wordt bij de golfhoogte H_{m0} is T_{m02} , de zogenaamde nuldoorgangperiode. Deze geeft de tijd aan tussen twee op- of neergaande doorgangen door het stilwater niveau. Voor dit onderzoek is aangehouden dat voor golven op de Noordzee die met een JONSWAP-spectrum zijn te beschrijven de volgende relatie geldt tussen de nuldoorgangperiode en de piekperiode :

$$\frac{T_p}{T_{02}} = 1.285 \quad [4.2]$$

4.2.4 Golfrichting

De golfrichtingen in de metingen zijn verdeeld over 360° , waarbij nul graden overeenkomt met een golf die zich voortplant in noordelijke richting. De spreiding in de gemeten richtingen is nogal groot, daarom wordt hier verder gegaan met een verdeling van de invalshoek van golven om de 10° . Het transport over zee vindt plaats tussen NNO- en NO-richting zodat 157° overeenkomt met evenwijdig invallende golf. Omdat de elementen symmetrisch zijn is een onderverdeling in 360° niet nodig. De hoek van inval van een golf van 45° is dan gelijk aan de hoek van inval van een golf van 135° (en 225° en 315°). De hoek van inval loopt dus van 0° tot 90° met een stapgrootte van 10° .

4.3 Lange-termijn verdeling van golven op de Noordzee.

4.3.1 Verdeling van de golfhoogte

Met behulp van een programma dat de 'best fit' verdeling maakt door de waarnemingen van de significante golfhoogte, blijkt dat de lange-termijn verdeling van de golfhoogte op de Noordzee het best wordt weergegeven door een extreme waarde verdeling type I, een zogenaamde Gumbel-verdeling. De Gumbel-verdeling ziet er als volgt uit:

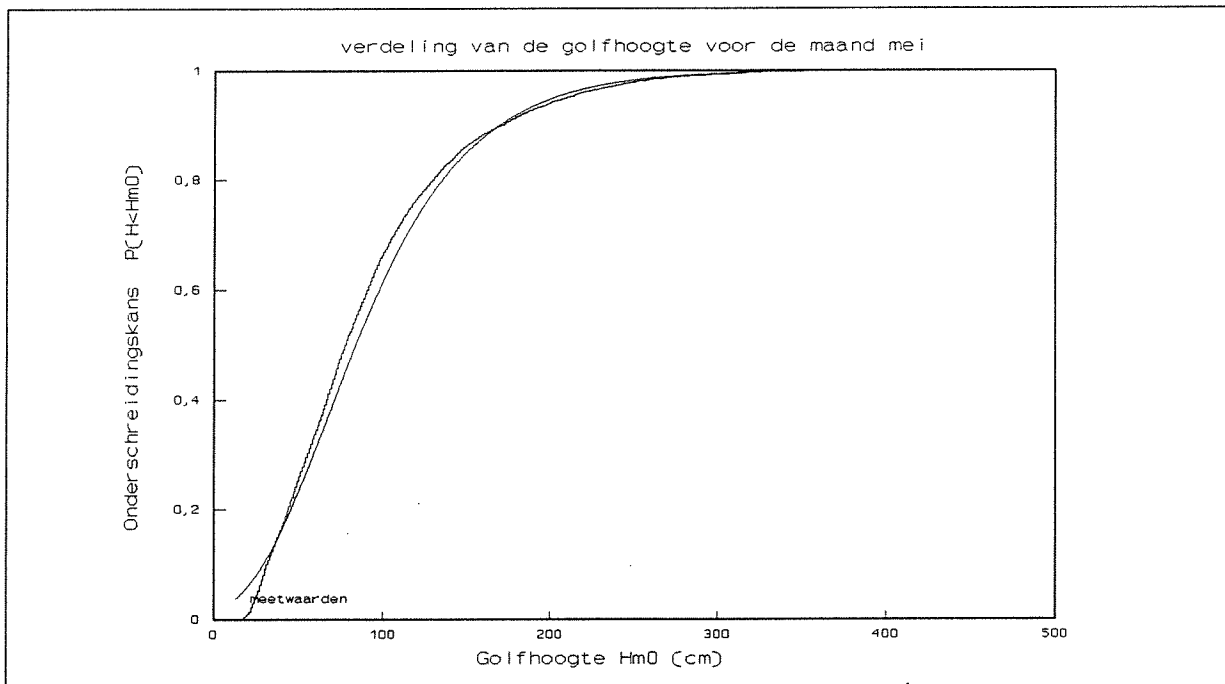
$$F_H(H_{m0}) = \exp^{-e^{-\frac{H-A}{B}}} \quad [4.3]$$

Voor de parameters A (modale waarde) en B (schaalparameter) gelden de volgende gemiddelden (in cm) berekend voor de maanden mei, juni, juli en augustus (tabel 4.1).

	mei	juni	juli	augustus
A	67,00	74,28	70,77	74,95
B	45,36	43,41	42,38	52,63

Tabel 4.1 Waarde van de parameters van de Gumbelverdeling voor H_{m0} in cm

In figuur 4.3 is de aangenomen Gumbelverdeling uitgezet tegen de verdeling van de meetwaarden die geldt voor de maand mei. Zoals te zien is in de figuur beschrijft de aangenomen verdeling de werkelijke verdeling van de meetwaarden goed.



Figuur 4.3 Fit van de Gumbelverdeling met de werkelijke verdeling van de meetwaarden

In bijlage 4 staan de fits van de maanden juni, juli en augustus waarvan de waarde van de parameters voor de Gumbelverdeling vermeld staan in tabel 4.1.

4.3.2 Verdeling van de golfperiode

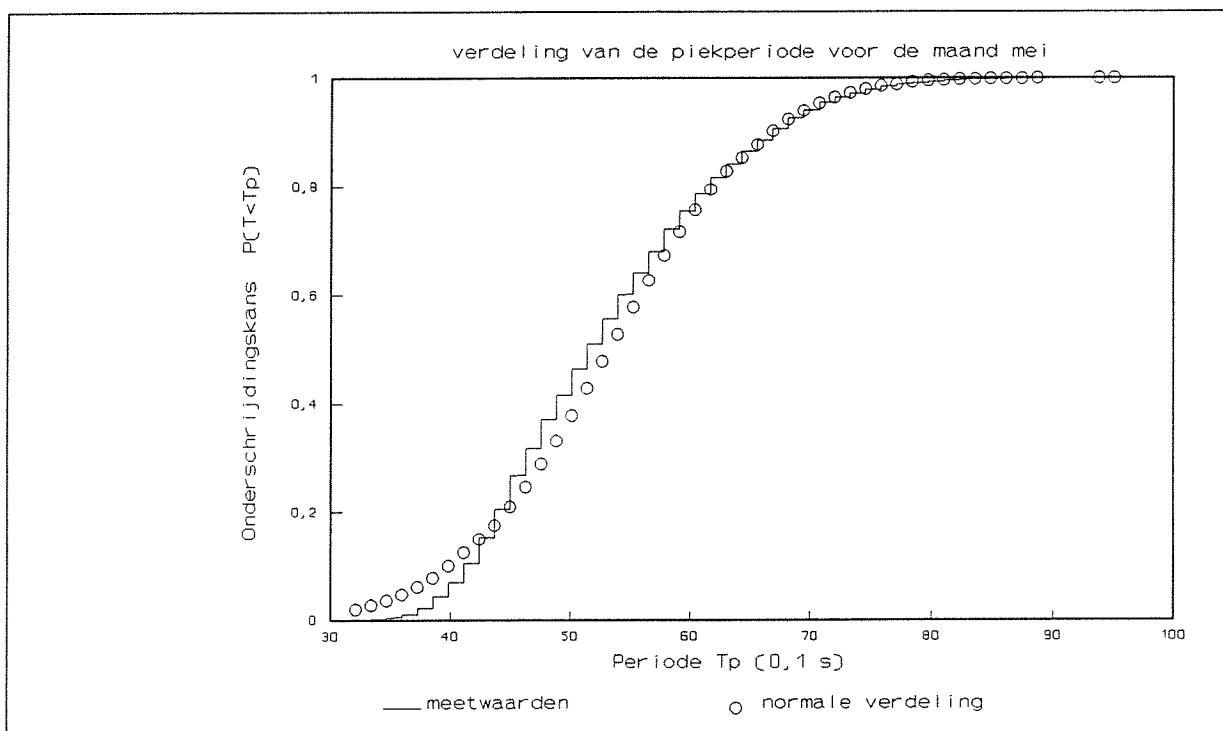
Net zoals voor de golfhoogte kan er voor de verdeling van de golfperiode ook een verdelingsfunctie worden bepaald die de waarnemingen het best benaderd. Het blijkt dat de verdelingsfunctie van T_p het best wordt benaderd door een normale verdeling met

$$\begin{aligned}\mu &= 5,326 \text{ sec en} \\ \sigma &= 1,034 \text{ sec.}\end{aligned}$$

De verdelingsfunctie van de normale verdeling is niet in analytische vorm bekend, de normale verdeling wordt beschreven door de dichtheidsfunctie:

$$f_T(T_p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{1}{\sigma} \cdot e^{-\frac{(T_p - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad [4.4]$$

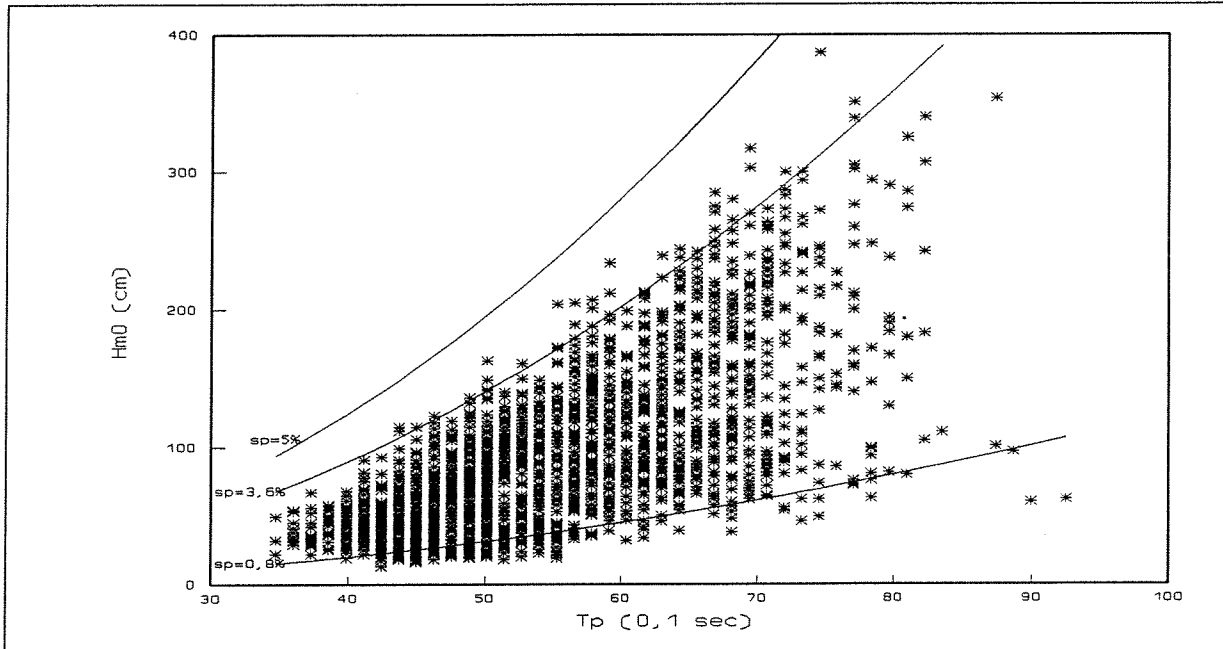
In figuur 4.4 is de normale verdeling uitgezet tegen de werkelijke verdeling van de meetwaarden die geldt voor de maand mei (in bijlage 4 staan de fits van de andere maanden).



Figuur 4.4 Fit van de normale verdeling voor T_p met de werkelijke verdeling van de meetwaarden

Zoals te zien is in de figuur voldoet de benadering goed aan de werkelijke verdeling van de meetwaarden.

Als de golfperiode onafhankelijk zou zijn van de golfhoogte zouden de verschillende kansdichtheidsfunctie met elkaar vermenigvuldigd kunnen worden om de kansdichtheidsfunctie van een specifieke golf met significante hoogte H_s en piekperiode T_p te verkrijgen. Uit figuur 4.5 blijkt echter dat H_s en T_p niet onafhankelijk zijn. Het blijkt dat des te groter de golfhoogte des te groter de golfperiode (fig 4.5).

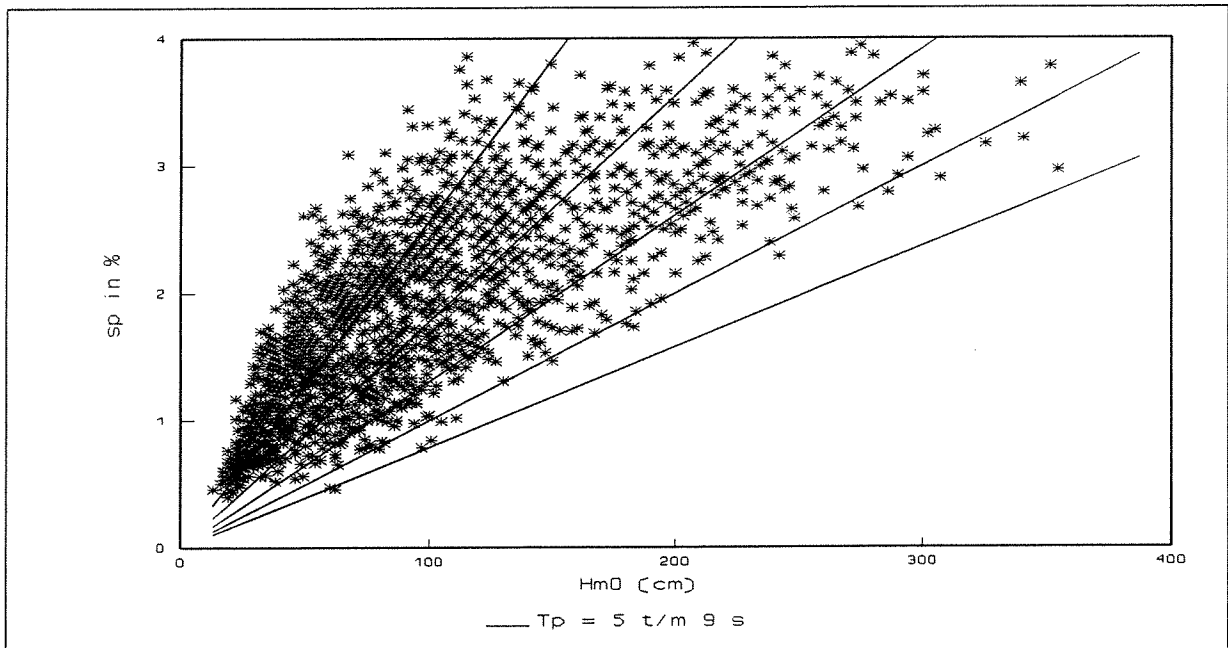


Figuur 4.5 Scatterdiagram golfhoogte-golfperiode met de golfsteilheid

Het verband tussen H_s en T_p kan worden weergegeven met de golfsteilheid s_p gedefinieerd als

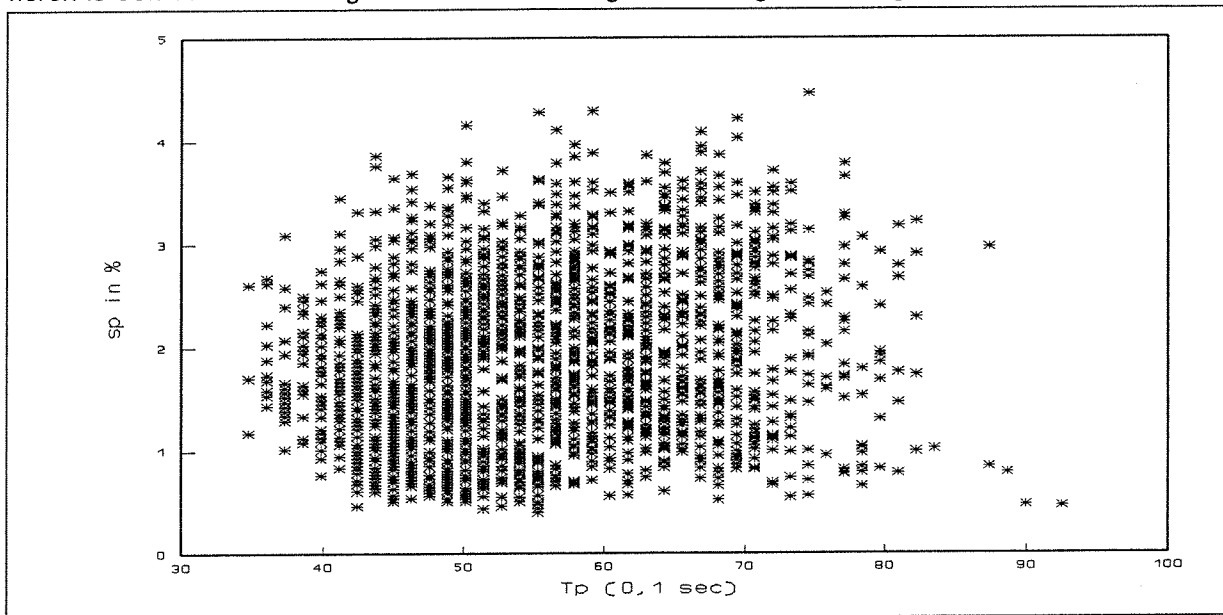
$$s_p = \frac{H_s}{L_p} = \frac{H_s}{\frac{gT_p^2}{2\pi}} = \frac{H_s \cdot 2\pi}{g \cdot T_p^2} \quad [4.5]$$

Om te zien of de golfsteilheid onafhankelijk is van de significante golfhoogte is hier een scatterdiagram van gemaakt, figuur 4.6. Uit de figuur blijkt dat H_s en s_p niet onafhankelijk zijn, des te groter H_s des te groter s_p .



Figuur 4.6 Scatterdiagram golfhoogte-golfsteilheid met de piekperiode

Uit de figuur lijkt echter naar voren te komen dat s_p en T_p wel onafhankelijk zijn, om dit te verifiëren is ook een scatterdiagram van deze twee grootheden gemaakt, figuur 4.7.

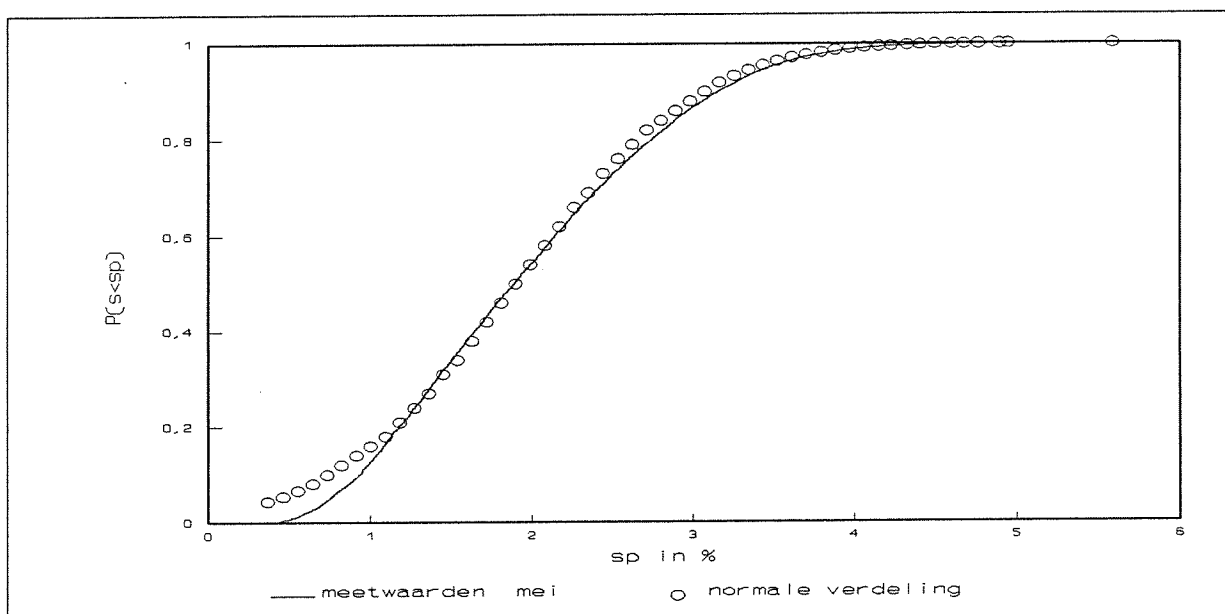


Figuur 4.7 Scatterdiagram golfperiode-golfsteilheid

Uit figuur 4.7 blijkt dat de golfsteilheid en -periode inderdaad onafhankelijk zijn. Dit betekent dat de verdelingsfunctie van s_p gelijk is voor elke voorkomende periode T_p .

Verdeling van de golfsteilheid

De verdeling van de golfsteilheid wordt ook het best beschreven door een normale verdeling met $\mu = 1,9 \%$ en $\sigma = 0,9 \%$ zoals te zien is in figuur 4.8.



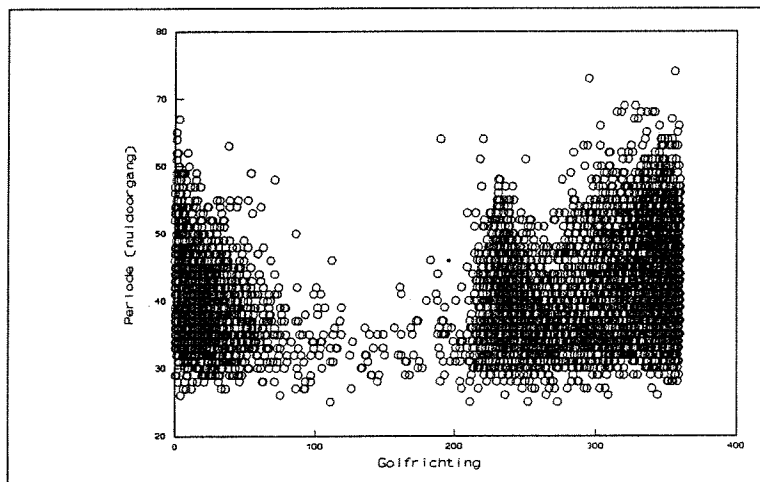
Figuur 4.8 Fit van de normale verdeling voor s_p en de meetwaarden voor de maand mei

In bijlage 4 is de normale verdeling ook gefit met de werkelijke verdelingen voor de maanden juni, juli en augustus. De gebruikte verdeling blijkt voor alle maanden geldig.

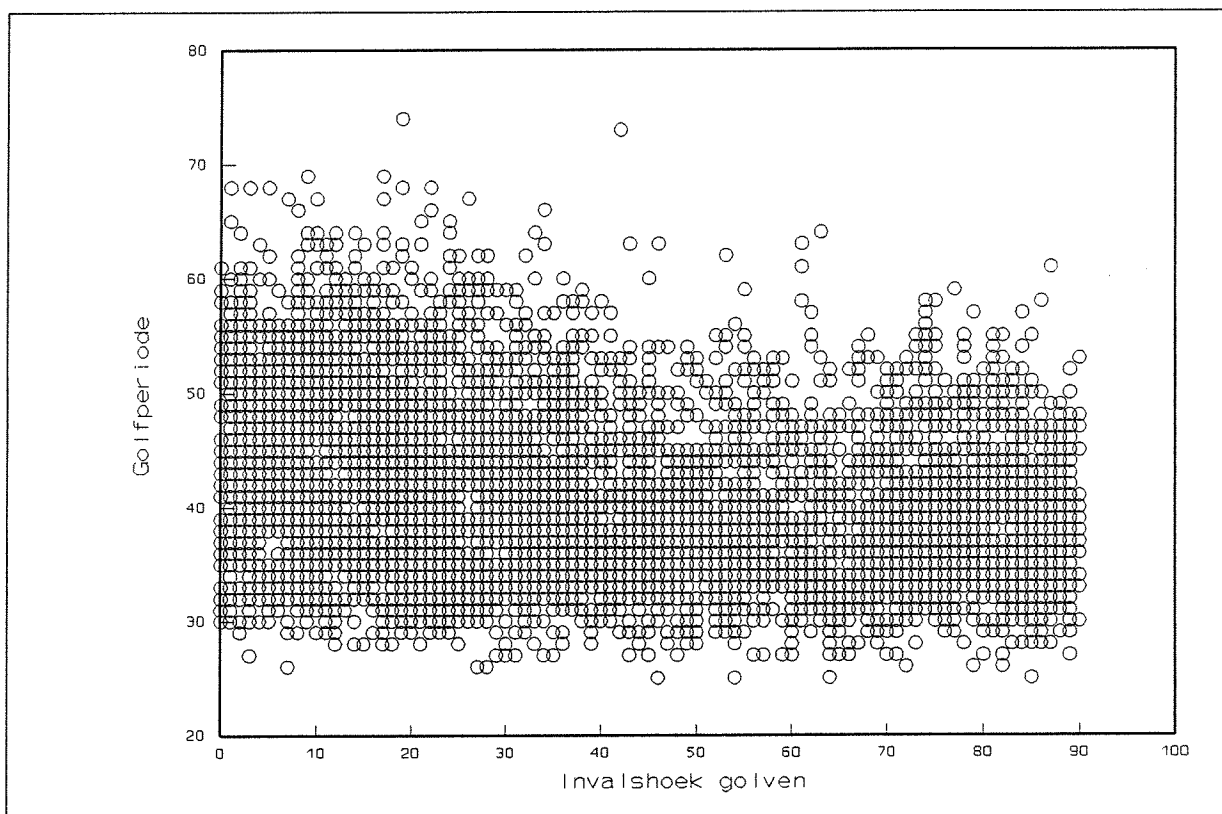
4.3.3 Verdeling van de hoek van inval

Naast de golfhoogte en de golflengte is ook de hoek van inval van belang voor de krachten in de tunnelelementen. Vanwege symmetrie ligt de invalshoek van de golven tussen 0 en 90 graden. Hoewel de golfrichting niet onafhankelijk van de golfperiode is (fig 4.9), blijkt dit wel te gelden voor de invalshoek van de golven (fig 4.10). Uit figuur 4.10 lijkt tevens naar voren te komen dat de invalshoek van golven uniform verdeeld is.

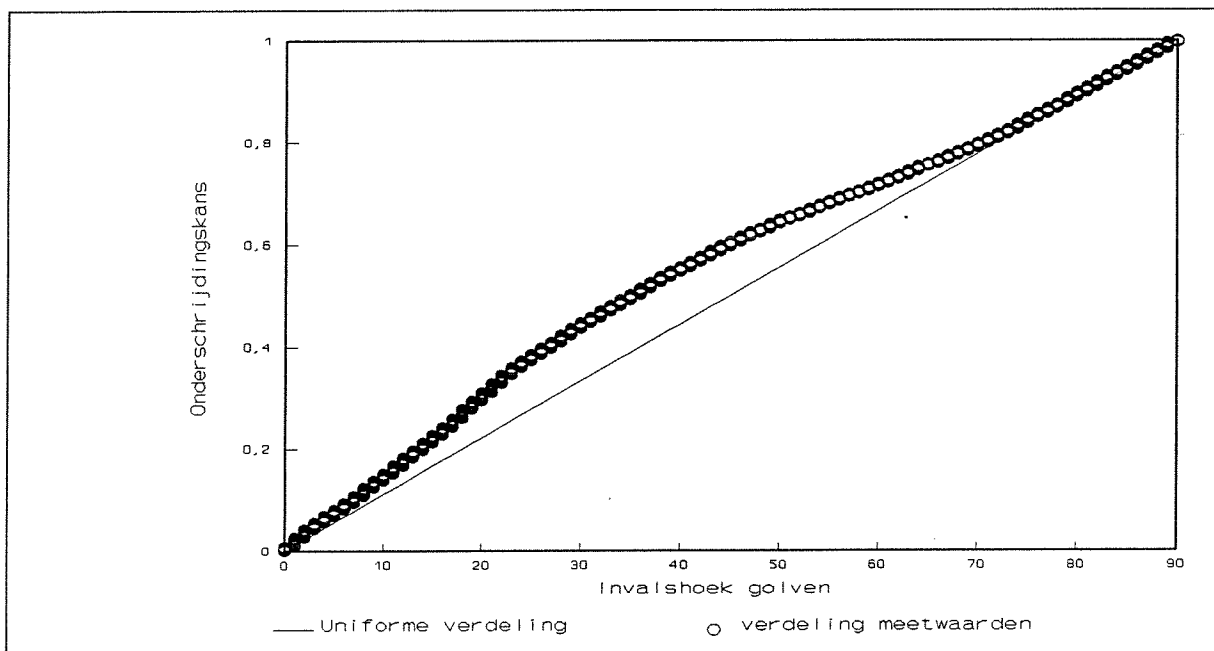
In figuur 4.11 is dit duidelijker te zien, hier is het verschil tussen de uniforme- en werkelijke verdeling voor de hoek van inval weergegeven.



Figuur 4.9 Scatterdiagram golfrichting-golfperiode mei



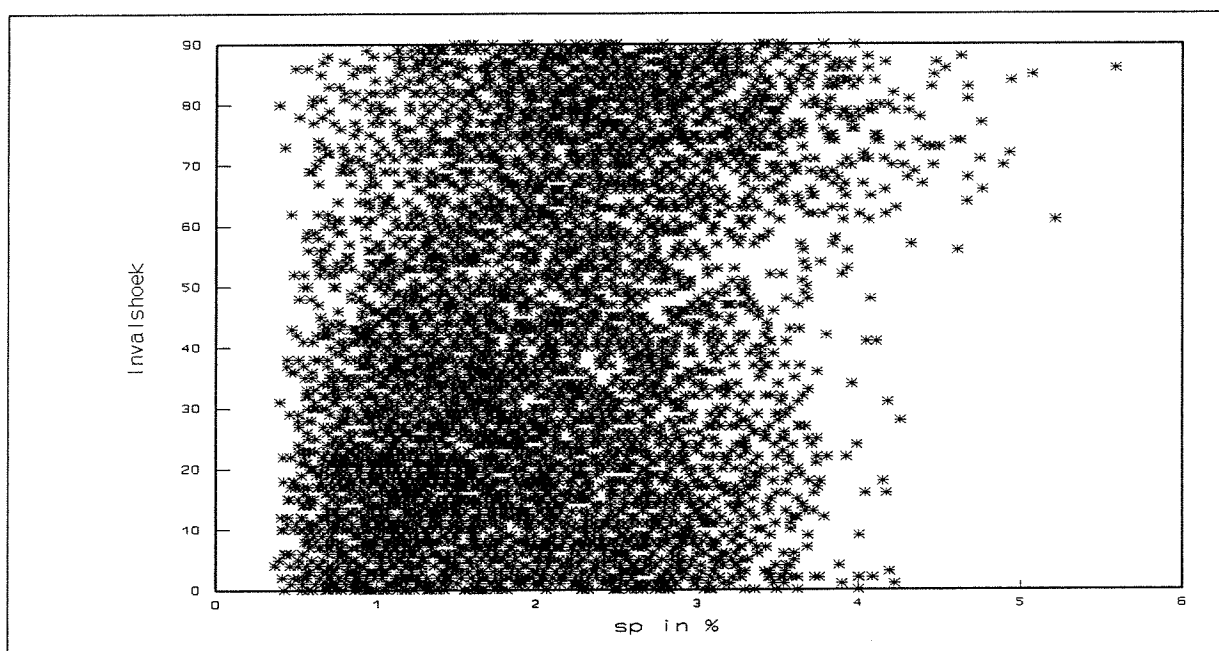
Figuur 4.10 Scatterdiagram hoek van inval-golfperiode mei



Figuur 4.11 Fit van de uniforme verdeling voor de invalshoek met de werkelijke verdeling van de meetwaarden

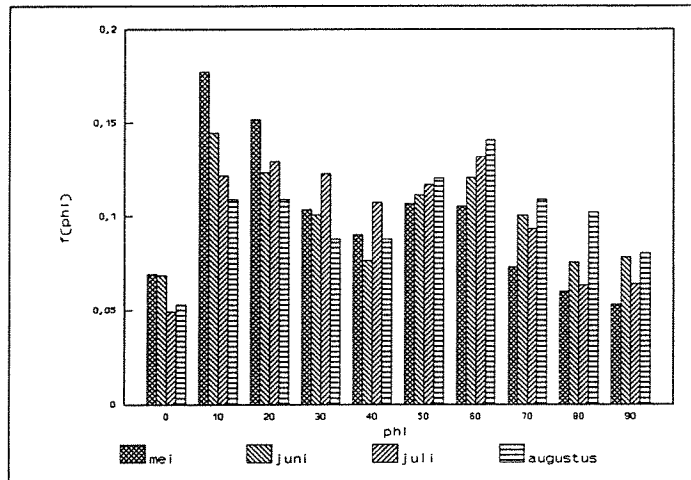
Het blijkt dat de uniforme verdeling goed de werkelijke beschrijft. Dit geldt ook voor de maanden juni, juli en augustus, zie bijlage 4.

Om bij de gezamenlijke kansdichtheidsfunctie de verschillende kansdichtheidsfuncties te kunnen vermenigvuldigen moet ook nog gelden dat de invalshoek en de golfsteilheid onafhankelijk zijn van elkaar zijn. Uit figuur 4.12 blijkt dat dit inderdaad het geval is.



Figuur 4.12 Scatterdiagram van golfsteilheid-invalshoek van de golven

In § 4.2.4 is gesteld dat de verdeling voor de invalshoek wordt onderverdeeld in intervallen van 10° omdat de spreiding van de golfrichting nogal groot is en het element tijdens transport op en neer dweilt door de golfslag. De kansdichtheidsfunctie verandert daardoor in een kansmassafunctie, zie figuur 4.13. De kans voor ieder interval van de invalshoek is, door de uniforme verdeling gelijk aan 1 gedeeld door het aantal intervallen, in dit geval 10 %. Uit de figuur lijkt na voren te komen dat de hoek van inval niet uniform verdeeld is, de afwijking ten opzichte van een uniforme verdeling is echter niet groot. Daarom wordt ook gezien de onnauwkeurigheid van de metingen de hoek van inval als uniform verdeeld beschouwd.



Figuur 4.13 Kansmassafunctie van de invalshoek

4.3.4 Gezamenlijke kansdichtheidsfunctie

Omdat de verschillende variabelen T_p , s_p en de invalshoek onafhankelijk zijn, kunnen de verdelingsfuncties met elkaar vermenigvuldigd worden om de gezamenlijke verdelingsfunctie te verkrijgen, want er geldt:

$$\text{wegens onafhankelijkheid : } Pr(A|B) = Pr(A) \text{ dus} \quad [4.6]$$

$$Pr(A \cap B) = Pr(A|B) \cdot Pr(B) = Pr(A) \cdot Pr(B)$$

De kans van voorkomen van een bepaalde golf met golfhogte H_s , golfperiode T_p en invalshoek ϕ wordt weergegeven door de gezamenlijke kansdichtheidsfunctie. Voor de lange-termijn verdeling van de golven blijken H_s en T_p echter niet onafhankelijk. Dit is wel het geval voor de variabelen T_p en s_p zodat de gezamenlijke kansdichtheidsfunctie kan worden geschreven als :

$$f_{HT\phi}(H_s, T_p, \phi) = f_{sT\phi}(s_p, T_p, \phi) = f_s(s_p) \cdot f_T(T_p) \cdot f_\phi(\phi) \quad [4.7]$$

$$= \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(s-\mu_s)^2}{2\sigma_s^2}} \cdot \frac{1}{\sigma_T \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(T-\mu_T)^2}{2\sigma_T^2}} \cdot \frac{1}{n_\phi}$$

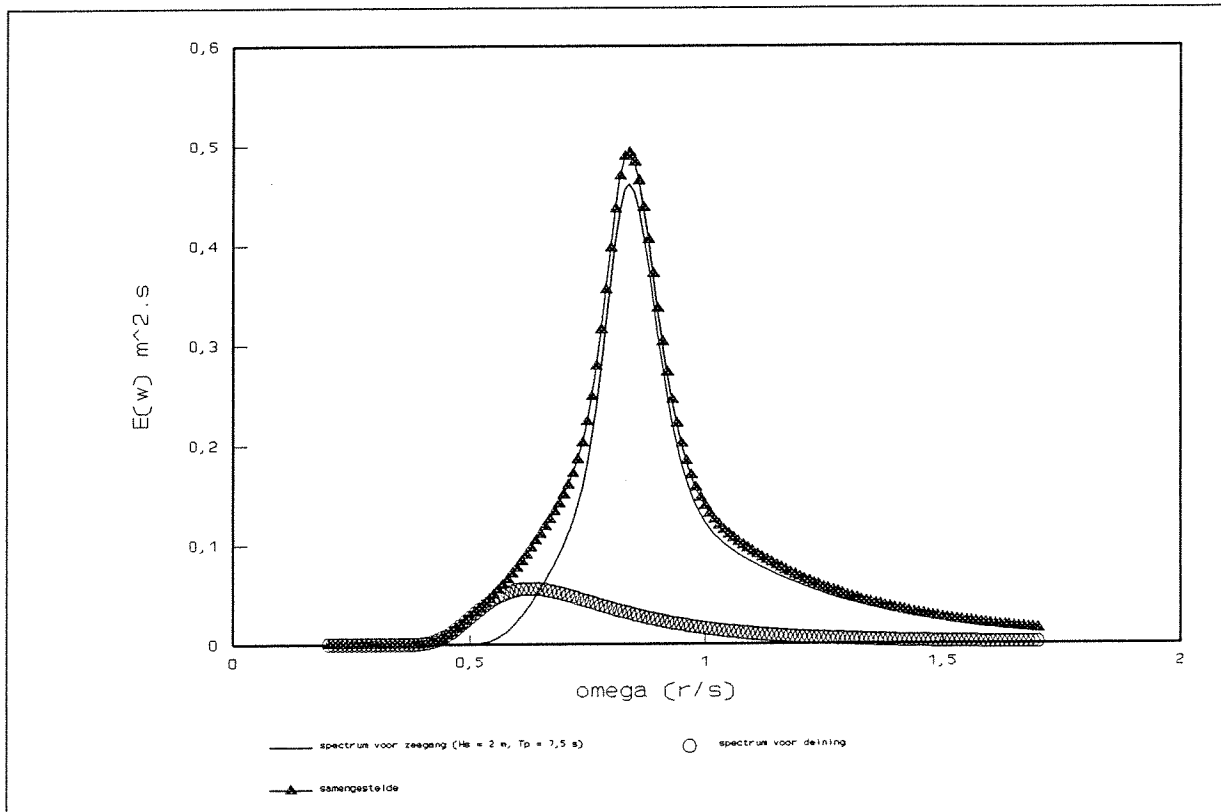
- voor s_p geldt $\mu = 1,9\%$ en $\sigma = 0,9\%$,
- voor T_p geldt $\mu = 5,326$ sec. en $\sigma = 1,034$ sec. en
- $n_\phi = 10$, de invalshoek loopt van 0° tot en met 90° met een stapgrootte van 10° .

4.4 Deining

Zoals de kansdichtheidsfunctie voor zegang is bepaald zou dit ook kunnen geschieden voor de deining. Deining en zegang zijn onafhankelijk van elkaar, omdat ze door verschillende windvelden worden opgewekt, zodat de invalshoek van een deiningsgolf niet gelijk is aan de invalshoek van de significante golf. Omdat de overdrachtsfunctie afhankelijk is van de invalshoek van de golven zouden de spectra voor deining en zegang niet gesuperponeerd kunnen worden om met behulp van één overdrachtsfunctie de krachten en momenten in het element te kunnen bepalen. Ter vereenvoudiging wordt hier daarom vanuit gegaan dat de invalshoeken voor deining en

zeegang aan elkaar gelijk zijn. De deining wordt dan weergegeven door een standaard deiningsgolf met golfhoogte $H_s = 0,5$ m., piekperiode $T_p = 10$ sec. en invalshoek gelijk aan de invalshoek voor zeegang, zodat met één standaard spectrum voor deining verder kan worden gewerkt.

Het spectrum voor deining verschilt met dat voor zeegang, omdat het bij deining gaat om volgroeide golven in plaats van de niet-volgroeide zeegang. Het deiningsspectrum wordt beschreven door het Pierson-Moskowitz spectrum. Het verschil met het JONSWAP-spectrum voor zeegang is de 'piek-versterking' die voor zeegang optreedt, zie § 3.3, figuur 3.6. Het samengestelde golfspectrum voor deining en zeegang ziet er dan als volgt uit, fig. 4.14.



Figuur 4.14 Samengestelde spectrum voor deining en zeegang

5 Probabilistische dimensionering van de golfvoorspanning

5.1 Inleiding

Met de theorie uit de voorgaande hoofdstukken is het nu mogelijk om bij iedere karakteristieke golf de kans te bepalen op het voorkomen van een bepaald moment (hoofdstuk 3) en de kans te bepalen op het voorkomen van deze karakteristieke golf (hoofdstuk 4). De momenten moeten worden opgevangen met behulp van voorspanning. Het is dus bekend wat de kans is op het voorkomen van een bepaald moment. De kans dat een tunnelement bezwijkt is dan gelijk aan de kans van voorkomen van een golf waarvoor geldt dat het hiermee gepaard gaande moment groter is dan het maximaal op te nemen moment door de voorspanning. Voor de berekening van de significante momenten uit een gegeven significante golfhoogte en piekperiode is het pascal-programma 'Voorspanning' geschreven. Om de significante momenten te kunnen berekenen moet de overdrachtsfunctie bekend zijn. Voor het bepalen van de overdrachtsfunctie is gebruik gemaakt van het rekenprogramma Seaway. Hierna zal eerst op de gebruikte programma's worden in gegaan alvorens verder te gaan met de berekeningen van de voorspanning.

5.2 Het programma Seaway

5.2.1 Beschrijving van het programma

Het dynamische rekenprogramma Seaway is bedoeld voor schepen maar is ook toepasbaar voor drijvende tunnelementen. Het programma gaat uit van oneindig hoge wanden, of zeer lage uitwijkingamplituden, wat bij het afzinkelement niet het geval is. Modelproeven hebben aangetoond dat het resultaat toch betrouwbaar is wanneer er golven over het dak gaan lopen mits de golfhoogte niet te groot wordt. Het programma is gebaseerd op de golftheorie van § 3.6 en bijlage 2 en 3 (zie User Manual of release 4.00 of Seaway by ir. J.M.J. Journée voor een gedetailleerde omschrijving van seaway) en berekent de overdrachtsfunctie van golfuitwijking naar moment alsmede de significante momenten voor een karakteristieke golf.

Invoer

De invoer van seaway bestaat uit invoer van het element zoals lengte, dwarsdoorsnedegrootheden en diepgang en gegevens over de zeecondities zoals waterdiepte, ρ_{zee} en invalshoeken van de golven alsmede de significante hoogte en nuldoorgangperiode van de karakteristieke golven. In bijlage 5 wordt een uitdraai gegeven van Seaway waarin de ingevoerde parameters met hun waarde staan vermeld.

Uitvoer

Het programma seaway berekent de bewegingen van en krachten in een doorsnede van het tunnelement. Bij de invoer kan opgegeven worden welke uitvoer gewenst wordt. Voor de tunnelementen zijn alleen de berekening van de overdrachtsfuncties en de significante momenten van belang. Een voorbeeld van de uitvoer van de significante momenten staat in bijlage 5.

Om in het programma 'Voorspanning' gebruik te kunnen maken van de berekende overdrachtsfuncties uit seaway wordt een extra uitvoerfile aangemaakt door seaway. Deze file bevat de overdrachtsfuncties van zowel de verticale dwarskracht en het moment als de horizontale dwarskracht en het moment en het wringmoment als functie van de golffrequentie ω . Omdat de

overdrachtsfuncties afhankelijk zijn van de invalshoek en de plaats in de doorsnede worden deze ook in de file vermeld. Een voorbeeld van de aangemaakte uitvoerfile staat in bijlage 5.

5.2.2 Vergelijking van de resultaten van seaway met modelproeven

Door MARIN zijn modelproeven gedaan naar de overdrachtsfuncties en significante momenten bij het transport van elementen van de Wijkertunnel over zee. Het dynamische rekenprogramma Seaway is gebaseerd op de theorie uit § 3.6. De hydrodynamische massa en demping worden bepaald aan de hand van lineaire striptheorie volgens de potentiaalstroming. Een verdere vereenvoudiging van de werkelijkheid is dat wordt uitgegaan van lage amplituden. Dit is voor schepen, waarvoor het programma wordt gebruikt, een geoorloofde vereenvoudiging. Bij de tunnelelementen is er echter een gering vrijboord aanwezig zodat, zeker bij hoge golven, overslag van de golven op het dak van het element zal ontstaan. Om te bepalen of de resultaten toch een goede benadering geven van de werkelijkheid worden de uitkomsten van Seaway vergeleken met de resultaten van de modelproeven.

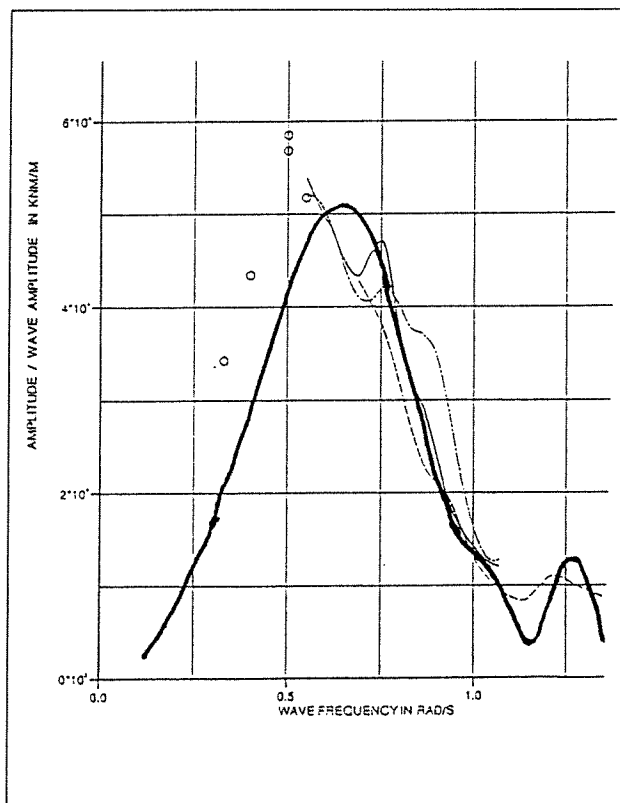
Bij de modelproeven zijn de overdrachtsfuncties bepaald voor invalshoeken van de golven van respectievelijk 180°, 150°, 120° en 90° en een voorwaartse snelheid van 0,0 kn. De significante momenten zijn bepaald voor vier significante golven met respectievelijk een significante golfhoogte en piekperiode van:

H_s en	T_p
2,0 m	6,0 sec
2,0 m	7,5 sec
2,0 m	9,5 sec
3,5 m	9,5 sec

Overdrachtsfuncties

De overdrachtsfunctie zijn door MARIN weergegeven in grafiekvorm. De frequentie loopt van 0.0 tot 1.5 rad/s en op de y-as wordt de amplitude van de momenten gegeven bij een golfuitwijking van 1 m, gelijk aan de uitvoerfile FORT20 van Seaway. Om de uitkomsten te kunnen vergelijken zijn de waarden uit Seaway in de figuren van MARIN ingetekend zie figuur 5.1.

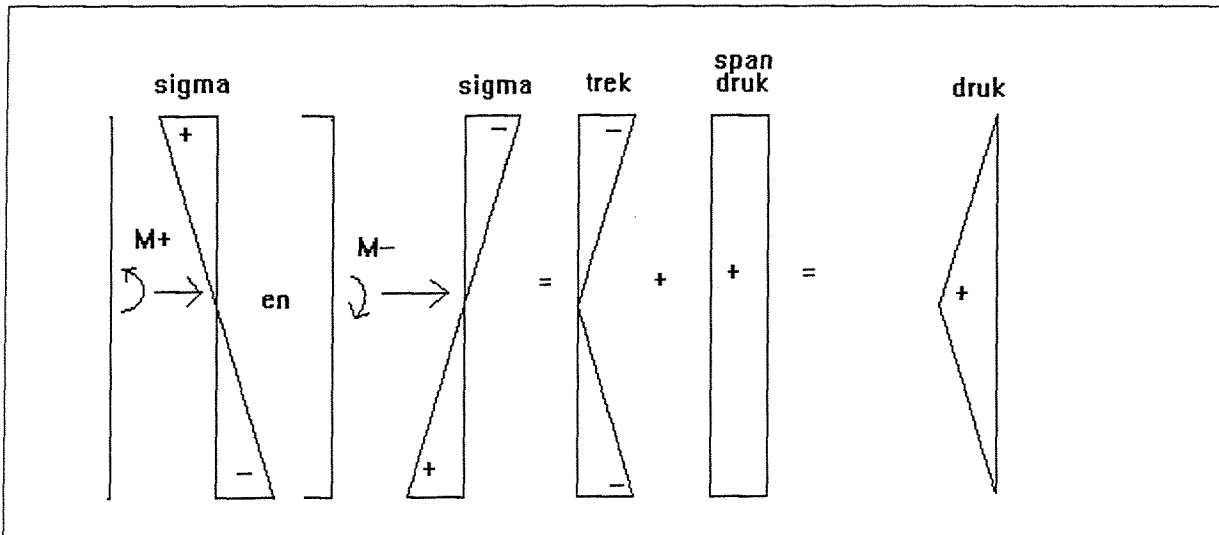
In bijlage 6 staan de figuren voor alle overdrachtsfuncties. Uit de figuren blijkt dat de overdrachtsfuncties berekend met Seaway niet exact maar toch zeer goed de overdrachtsfuncties uit de modelproeven benaderd. Ondanks de vereenvoudigingen in het programma Seaway beschrijven de resultaten de werkelijkheid goed. Voor het berekenen van de significante momenten is het dus geoorloofd om de overdrachtsfuncties berekend met Seaway te gebruiken als invoer voor het programma, omdat deze goed voldoen aan de overdrachtsfuncties bepaald met de modelproeven, fig 5.1.



Figuur 5.1 Vergelijking overdrachtsfuncties van Seaway en MARIN

5.3 Dimensioneren voorspanning voor de golfbelasting

De voorspanning moet ervoor zorgen dat nergens in het tunnelement trekspanningen optreden. De golfbelasting is sinusvormig, dit betekent dat de significante momenten zowel positief als negatief kunnen zijn en dat de trekspanningen veroorzaakt door de golfbelasting zowel aan de onderkant als aan de bovenkant kan voorkomen, fig 5.2.



Figuur 5.2 Trekspanningen veroorzaakt door golfbelasting

De trekspanningen in de elementen door de golfbelastingen wordt beschreven door

$$\sigma_{bo} = \frac{M_z \cdot z_o}{I_{zz}} + \frac{M_{yy} \cdot y}{I_{yy}} \quad \text{en} \quad \sigma_{bb} = \frac{M_z \cdot z_b}{I_{zz}} + \frac{M_{yy} \cdot y}{I_{yy}} \quad [5.1]$$

Omdat het zwaartepunt van de doorsnede, voor de verticale as niet in het midden van de elementhoogte ligt, zullen de spanningen onder en boven in het element niet gelijk zijn. De drukspanningen ten gevolge van de voorspanning F_p wordt beschreven door

$$\sigma_{po} = \frac{F_p}{A_x} - \frac{F_p \cdot e}{W_o} \quad \text{en} \quad \sigma_{pb} = \frac{F_p}{A_x} + \frac{F_p \cdot e}{W_b} \quad [5.2]$$

De benodigde voorspanning wordt berekend door het gelijkstellen van de spanningen, hieruit volgt

$$\begin{aligned} \sigma_{po} = \sigma_{bo} &\rightarrow \frac{F_p}{A_x} - \frac{F_p \cdot e}{W_o} = \frac{M_z}{W_o} + \frac{M_y}{W_y} \quad \text{en} \\ \sigma_{pb} = \sigma_{bb} &\rightarrow \frac{F_p}{A_x} + \frac{F_p \cdot e}{W_b} = \frac{M_z}{W_b} + \frac{M_y}{W_y} \end{aligned} \quad [5.3]$$

Om nu de benodigde voorspanning F_p uit te kunnen rekenen wordt gebruik gemaakt van een fictief weerstandsmoment voor de beide vergelijkingen zodat de twee vergelijkingen voor de spanningen onder en boven gelijk zijn. Formule [5.3] wordt geschreven als

$$\frac{Fp}{A} = \frac{M_z}{W_o} + \frac{M_y}{W_y} + \frac{Fp \cdot e}{W_o} \quad \text{en} \quad \frac{Fp}{A} = \frac{M_z}{W_b} + \frac{M_y}{W_y} - \frac{Fp \cdot e}{W_b}$$

$$\frac{M_z - Fp \cdot e}{W_b} = \frac{M_z + Fp \cdot e}{W_o} \rightarrow e = \frac{M_z}{Fp} \cdot \frac{1 - \frac{W_b}{W_o}}{1 + \frac{W_b}{W_o}} = 0,0807 \cdot \frac{M_z}{Fp}$$

Zodat voor W_{fic} geldt:

$$W_{fic} = W_o \cdot \left(1 - \frac{1 - \frac{W_b}{W_o}}{1 + \frac{W_b}{W_o}}\right) = W_b \cdot \left(1 + \frac{1 - \frac{W_b}{W_o}}{1 + \frac{W_b}{W_o}}\right) \quad [5.4]$$

Door invullen van de waarden van W_{fic} en W_y gaat formule [5.3] dan over in:

$$\frac{Fp}{A} = \frac{M_z}{W_{fic}} + \frac{M_y}{W_y} \quad [5.5]$$

Het horizontale moment verandert de waarde van de excentriciteit niet, omdat het onder en boven in het element een gelijke spanning veroorzaakt. Uit de vergelijking voor de excentriciteit e die hierboven staat kan dus voor Fp worden ingevuld: $M_z \cdot A / W_{fic}$. Zodat voor de excentriciteit van de golfvoorspanning geldt:

$$e = 0,0807 \cdot \frac{M_z}{Fp} \quad \text{en} \quad Fp = \frac{M_z \cdot A}{W_{fic}} \rightarrow e = 0,0807 \cdot \frac{A}{W_{fic}}$$

De excentriciteit van de golfvoorspanning e_p is dus gelijk aan 0,2 meter. M_z en M_y zijn Rayleigh-verdeeld dus is de voorspankracht ook Rayleigh-verdeeld, er geldt namelijk:

$$m_o(Fp) = \text{var}(Fp) = \left(\frac{A_x}{W_y}\right)^2 \cdot \text{var}(M_y) + \left(\frac{A_x}{W_z}\right)^2 \cdot \text{var}(M_z)$$

met $Fp_s = 2 \cdot \sqrt{m_o}$ gaat de vergelijking voor de voorspankracht over in

$$\begin{aligned} F_{p_s} &= 2 \cdot \sqrt{\left[\left(\frac{y \cdot A_x}{I_{yy}}\right)^2 \cdot m_{o_y} + \left(\frac{z \cdot A_x}{I_{zz}}\right)^2 \cdot m_{o_z}\right]} \\ &= \frac{y \cdot A_x}{I_{yy}} \cdot M_s(y) + \frac{z \cdot A_x}{I_{zz}} \cdot M_s(z) \end{aligned} \quad [5.6]$$

met de waarden voor A_b , W_y en W_z uit bijlage 1 geldt dan voor Fp_s :

- $Fp_s = 0,1704 \cdot M_s(y) + 0,4074 \cdot M_s(z)$
- $e_p = 0,2 \text{ m.}$

5.4 Het programma Voorspanning

5.4.1 Beschrijving van het programma

In het programma wordt aan de hand van de invoer van H_s en T_p het bijbehorende golfspectrum bepaald. Tevens wordt met de kansverdelingen die gelden voor de Noordzee in de zomermaanden, bepaald wat de kans is dat zo'n golfveld voorkomt. Door middel van de overdrachtsfuncties wordt vervolgens bepaald wat de significante momenten in het tunnelement zijn. Met behulp van de Rayleigh-verdeling voor M_s en de normale-verdeling voor het voorkomen van M_s is dan met de bovenstaande formule te bepalen wat de kans op bezwijken is bij verschillende waarde van de voorspanning. Deze bezwijkkans wordt verkregen door de bezwijkkansen voor elke voorkomende golf vermenigvuldigd met de kans op die golf te sommeren.

5.4.2 De invoer

Voor de berekening van de faalkans zijn de gegevens nodig van het golfklimaat op de Noordzee alsmede de overdrachtsfuncties van de golfuitwijking naar de momenten in de doorsnede. Voor de berekening van de momenten in de tunnelementen wordt de uitvoerfile 'Fort20' berekend met het programma Seaway als invoer gebruikt (§ 5.2.1). De file bevat de overdrachtsfuncties bij verschillende invalshoeken van de golven. Omdat voor de buigende momenten geldt dat deze in het midden van de doorsnede het grootst zijn, wordt alleen naar de doorsnede op $X = 1/2 L$ gekeken.

De verwerking van de gegevens over het golfklimaat van de Noordzee wordt gedaan door middel van het JONSWAP-spectrum van de karakteristieke golven. De verdelingsfunctie van de golven wordt beschreven door een normale-verdeling voor T_p en een normale verdeling voor s_p . Om de kans op een bepaalde karakteristieke golf te bepalen worden T_p en s_p onderverdeeld in intervallen. Met de verdelingsfuncties kan dan de kans worden bepaald dat een karakteristieke golf zich in een bepaald interval bevindt. Voor de normale verdeling bestaat geen analytische oplossing van de verdelingsfunctie, deze wordt bepaald aan de hand van een tabel (zie dictaat b3 'Probabilistisch ontwerpen'). In tabel 5.1 staan de gehanteerde intervallen voor s_p en de kansverdeling hiervan. In tabel 5.2 is het zelfde voor T_p weergegeven. De figuren 5.3 respectievelijk 5.4 tonen het verschil tussen de werkelijke verdeling en die van de intervallen, gebruikt voor het programma.

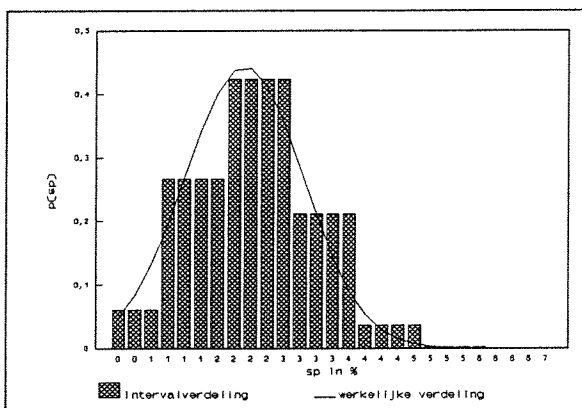
Golfsteilheid s_p (procenten)	Onderschrijdingskans $P(s < s_p)$	Kans op voorkomen $P(s_p < s < s_p + \delta)$
< 1	$P(s_p < 0,5) = 0,0603$	$P(0,0 < s_p < 0,5) = 0,06030$
1	$P(s_p < 1,5) = 0,32666$	$P(0,5 < s_p < 1,5) = 0,26637$
2	$P(s_p < 2,5) = 0,75$	$P(1,5 < s_p < 2,5) = 0,42333$
3	$P(s_p < 3,5) = 0,962$	$P(2,5 < s_p < 3,5) = 0,21200$
4	$P(s_p < 4,5) = 0,99802$	$P(3,5 < s_p < 4,5) = 0,03602$
5	$P(s_p < 5,5) = 0,999997$	$P(4,5 < s_p < 5,5) = 0,00198$
6	$P(s_p < 6,5) = 1$	$P(5,5 < s_p < 6,5) = 0,000003$

Tabel 5.1 Onderverdeling in intervallen van de pieksteilheid met de kans op voorkomen

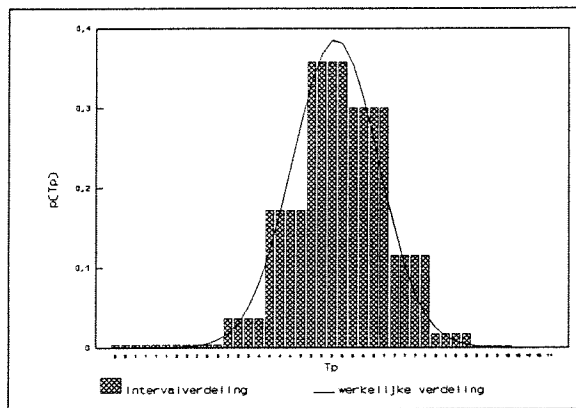
Voor elke combinatie van T_p , s_p en μ kunnen dan de significante momenten, en dus de benodigde significante voorspanning, en hun kans op voorkomen worden bepaald. Sommatie van de bezwijkkansen bij een gegeven waarde voor de voorspanning van alle combinaties geeft dan de totale bezwijkkans bij een opgegeven aanwezige voorspanning F_p .

Golfperiode T_p (seconden)	Onderschrijdingskans $P(T < T_p)$	Kans op voorkomen $P(T_p < T < T_p + \delta)$
< 3	$P(T_p < 2,5) = 0,0032$	$P(0,0 < T_p < 2,5) = 0,00320$
3	$P(T_p < 3,5) = 0,03906$	$P(2,5 < T_p < 3,5) = 0,03586$
4	$P(T_p < 4,5) = 0,21035$	$P(3,5 < T_p < 4,5) = 0,17129$
5	$P(T_p < 5,5) = 0,56731$	$P(4,5 < T_p < 5,5) = 0,35696$
6	$P(T_p < 6,5) = 0,86722$	$P(5,5 < T_p < 6,5) = 0,29991$
7	$P(T_p < 7,5) = 0,9821$	$P(6,5 < T_p < 7,5) = 0,11488$
8	$P(T_p < 8,5) = 0,99893$	$P(7,5 < T_p < 8,5) = 0,01683$
9	$P(T_p < 9,5) = 0,99997$	$P(8,5 < T_p < 9,5) = 0,00104$
≥ 10	$P(T_p < 10,5) = 1$	$P(9,5 < T_p < 10,5) = 0,00003$

Tabel 5.2 Onderverdeling in intervallen van de piekperiode met de kans op voorkomen



Figuur 5.3 Aangename verdeling voor s_p



Figuur 5.4 Aangename verdeling voor T_p

5.4.3 Het hoofdprogramma

Het globale stroomschema van het hoofdprogramma ziet er als volgt uit; zie de figuur op de volgende pagina :

- (1) Met de significante golfhoogte en de piekperiode wordt het JONSWAP-spectrum voor zeeegang bepaald (§ 3.4). Sommatie met het standaardspectrum voor deining (§ 4.4) geeft het golfspectrum. De kansdichtheid van elke karakteristieke golf wordt bepaald door vermenigvuldiging van de kans op voorkomen (tabel 5.1 en 5.2) van T_p en s_p die gelden voor die golf (§ 4.3.4).

VOOR ELKE COMBINATIE VAN Hs EN Tp BEREKEN	
	Voor golffrequentie van 0,1 tot 2,5 stapgrootte 0,05 bereken :
	Deiningsspectrum
	Spectrum voor zeegang
	Kans op voorkomen combinatie
	Golfspectrum = deiningsspectrum + zeegangsspectrum
	Overdrachtsfuncties voor de verschillende invalshoeken
	Momentenspectrum bij iedere invalshoek
	Het significante moment voor de verschillende invalshoeken
	De significante benodigde voorspanning voor elke invalshoek
	De bezwijkkans bij gegeven waarde van de voorspanning
	De faalkans = bezwijkkans*kans op voorkomen combinatie
	Sommeer de faalkansen voor elke invalshoek
	Sommeer de faalkans voor elke combinatie van Hs en Tp
	Uitvoer totale kans op falen bij gegeven aanwezige voorspanning

Stroomschema hoofdprogramma

- (2) De overdrachtsfuncties zijn invoer die uit een file, FORT20.dat aangemaakt door het programma Seaway, wordt ingelezen. De overdrachtsfunctie zijn afhankelijk van de invalshoek van de golven en de doorsnede waar de momenten berekend moeten worden. Hier wordt alleen voor de doorsnede in het midden van de elementlengte de overdrachtsfuncties bepaald, omdat daar de buigende momenten het grootst zijn voor zowel de verticale als de horizontale momenten. Een voorbeeld van de invoerfile werd reeds gegeven in bijlage 5.
- (3) Het momentenspectrum wordt bepaald door vermenigvuldigen van het golfspectrum, afhankelijk van T_p en H_s (of s_p), met het kwadraat van de overdrachtsfunctie, afhankelijk van de invalshoek (§ 3.5).
- (4) Het significante moment is gelijk aan twee maal de wortel uit het oppervlak van het momentenspectrum (§ 3.6.2). De kans op voorkomen van dit moment is gelijk aan de kans op voorkomen van de karakteristieke golf, bij gegeven H_s en T_p is dit gelijk aan de kansdichtheidsfunctie van T_p (normaal verdeeld) maal de kansdichtheidsfunctie van s_p (normaal verdeeld), waarbij s_p volgt uit [4.6] vermenigvuldigd met de kans op voorkomen van de invalshoek, waarbij μ uniform verdeeld is (§ 4.3.4).
- (5) De significante benodigde voorspanning wordt nu berekend met behulp van formule [5.3]
- (6) Bij een gegeven waarde van de aanwezige voorspanning (F_p) wordt de bezwijkkans bepaald door de extreme Rayleigh-verdeling voor F_{p_s} , formule [3.34] te schrijven als

$$P(F_p < F_{p_s}) = 1 - \exp\left[-N \cdot e^{-2\left(\frac{F_p}{F_{p_s}}\right)^2}\right] \quad [5.7]$$

N is het aantal golven dat zich tijdens de duur van het zeetransport voordoet. Omdat het zeetransport twaalf uur in beslag neemt is dit gelijk aan: $12 \cdot 3600 / T_{gem}$. T_{gem} is de gemiddelde golfperiode, gelijk aan $T_p / 1,2$, zodat voor N geldt

$$N = D / T_{gem} = 12 \cdot 3600 / (T_p / 1,2) = 51840 / T_p$$

- (7) De faalkans is de bezwijkkans voor een bepaalde karakteristieke golf en invalshoek vermenigvuldigd met de kansdichtheid (= kans op voorkomen) van die specifieke karakteristieke golf.
- (8) Sommeren van de faalkansen voor alle karakteristieke golven en invalshoeken die tijdens zeetransport voor kunnen komen geeft dan de totale kans op falen van het tunnelelement tijdens zeetransport bij een vooraf ingevoerde aanwezige voorspanning F_p .
- (9) Wanneer het programma voor verschillende waarden van de voorspanning F_p wordt gerund kan een grafiek voor de kans op falen als functie van de grootte van de voorspanning worden gemaakt.

In bijlage 7 wordt de listing van het programma 'Voorspanning' gegeven.

5.4.4 Resultaten van de berekeningen

Verificatie van het programma

Het programma wordt gecontroleerd door de significante momenten, berekend uit de golfspectra en de overdrachtsfuncties, van het programma te vergelijken met de significante momenten berekend met Seaway. In bijlage 7 zijn van enkele karakteristieke golven de uitkomsten voor de significante momenten, berekend met de verschillende programma's, met elkaar vergeleken. Voor enkele karakteristieke golven zijn de bezwijkkans en de kansdichtheid (= kans op voorkomen) van deze golven handmatig uitgerekend en vergeleken met de uitkomsten hiervan berekend door het programma Voorspanning.

Uit de controle blijkt dat het programma 'Voorspanning' de significante momenten en faalkansen goed berekend.

Faalkans als functie van de voorspanning

Om een grafiek te krijgen van de faalkans als functie van de aanwezige voorspanning is de faalkans berekend voor oplopende waarden van de voorspanning F_p .

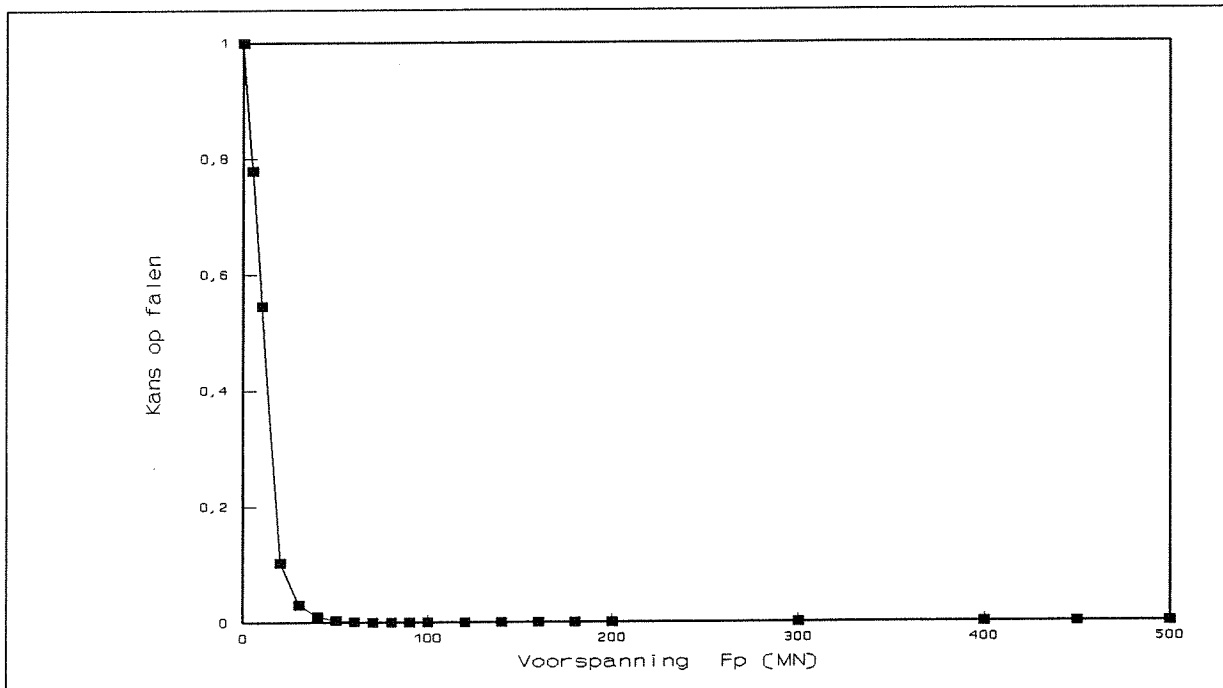
Tabel 5.3 geeft de uitkomsten van deze berekeningen van het programma 'Voorspanning'.

Voorspanning F_p	Faalkans	Voorspanning F_p	Faalkans	Voorspanning F_p	Faalkans
0 kN	1	60.000 kN	$1,137 \cdot 10^{-03}$	160.000 kN	$2,669 \cdot 10^{-08}$
5.000 kN	$7,792 \cdot 10^{-01}$	70.000 kN	$4,228 \cdot 10^{-04}$	180.000 kN	$2,805 \cdot 10^{-09}$
10.000 kN	$5,457 \cdot 10^{-01}$	80.000 kN	$1,603 \cdot 10^{-04}$	200.000 kN	$2,308 \cdot 10^{-10}$
20.000 kN	$1,032 \cdot 10^{-01}$	90.000 kN	$4,648 \cdot 10^{-05}$	300.000 kN	$2,273 \cdot 10^{-16}$
30.000 kN	$3,078 \cdot 10^{-02}$	100.000 kN	$1,943 \cdot 10^{-05}$	400.000 kN	$3,465 \cdot 10^{-23}$
40.000 kN	$1,043 \cdot 10^{-02}$	120.000 kN	$2,073 \cdot 10^{-06}$	450.000 kN	$2,863 \cdot 10^{-27}$
50.000 kN	$3,640 \cdot 10^{-03}$	140.000 kN	$2,680 \cdot 10^{-07}$	500.000 kN	0

Tabel 5.3 Berekende waarden van de faalkans uit het programma 'Voorspanning'

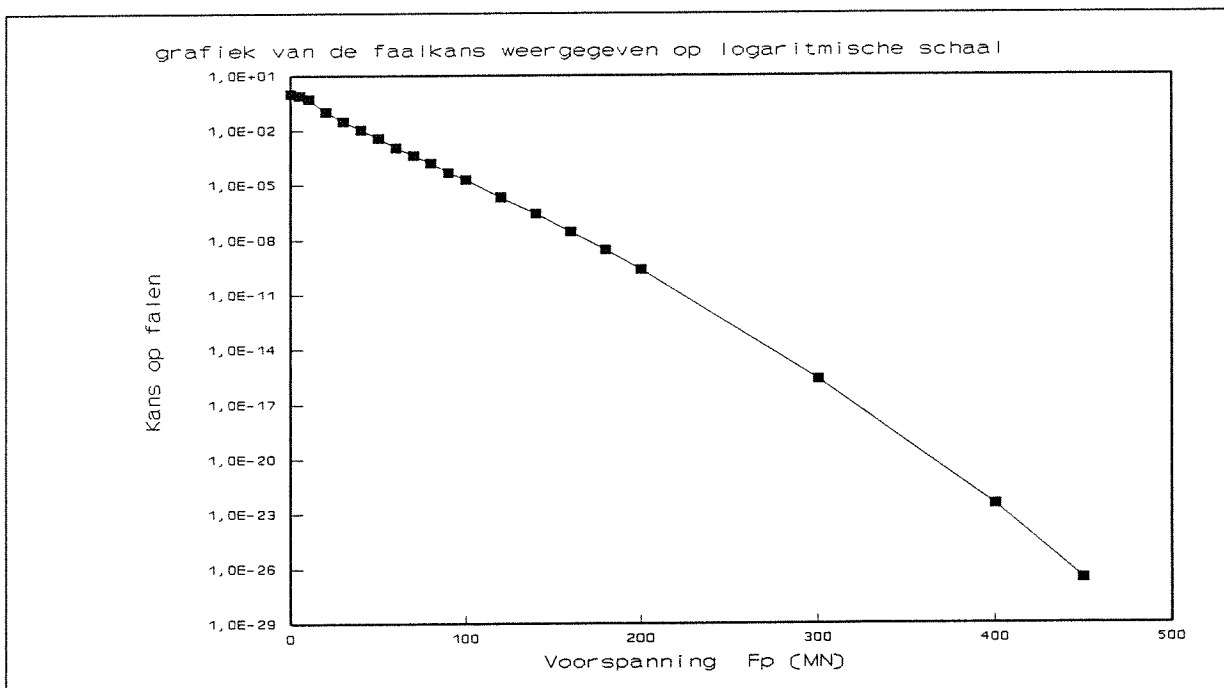
Wanneer de punten uit tabel 5.3 worden uitgezet in een grafiek met op de x-as de waarde van

de voorspanning F_p en op de y-as de kans op falen ontstaat de volgende grafiek, zie figuur 5.5.



Figuur 5.5 Kans op falen per transport als functie van de voorspanning

Uit de grafiek is, omdat daar waar het interessant is de kansen op falen erg klein zijn, niet goed de verdeling van de faalkans op te maken. Daarom wordt de kans op falen op een logaritmische schaal uitgezet tegen de aanwezige voorspanning F_p . Door de logaritmische y-as kan nu voor een willekeurige voorspanning de faalkans worden afgelezen, zie figuur 5.6.



Figuur 5.6 Kans op falen per transport als functie van de voorspanning

5.5 Dimensionering van de golfvoorspanning

5.5.1 Inleiding

Om te voorkomen dat een element tijdens transport vol met water loopt, moet ervoor worden gezorgd dat de voegen tussen de moten van het tunnelelement niet zover en/of zo vaak open staan dat ongewenst grote hoeveelheden water het element binnen kunnen dringen. Voor de Wijkertunnel is daarom als eis in de gebruiksfase gesteld dat een drukspanning van $0,3 \text{ N/mm}^2$ altijd aanwezig moet zijn in de voegen en in het beton. De hiermee gepaard gaande overschrijdingskans van de golfmomenten is voor de gebruiksfase vastgesteld op 1 %.

Een tweede eis is dat de kans op bezwijken van de constructie tijdens zeetransport niet groter mag zijn dan 0,01 %.

5.5.2 Gebruiksfase

Golfvoorspanning

De kans op overschrijden van de golfmomenten, en dus de kans op overschrijden van de voorspanning, mag niet groter zijn dan 0,01. Om de faalkans beter uit de grafiek af te kunnen lezen wordt figuur 5.6 vergroot weergegeven in de buurt van een faalkans van $1 \cdot 10^{-2}$, uit figuur 5.7 blijkt dan dat de benodigde voorspanning voor het opnemen van de golfmomenten gelijk moet zijn aan:

- $F_p = 40,6 \text{ MN}$

De excentriciteit van de golfvoorspanning is 0,2 m, zodat voor de spanningen en golfmomenten onder en boven in het element de volgende waarden gelden:

$$\sigma_o = \frac{F_p}{A} - \frac{F_p \cdot e}{W_o} = 0,408 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_b = \frac{F_p}{A} + \frac{F_p \cdot e}{W_b} = 0,480 \text{ N/mm}^2$$

[5.8]

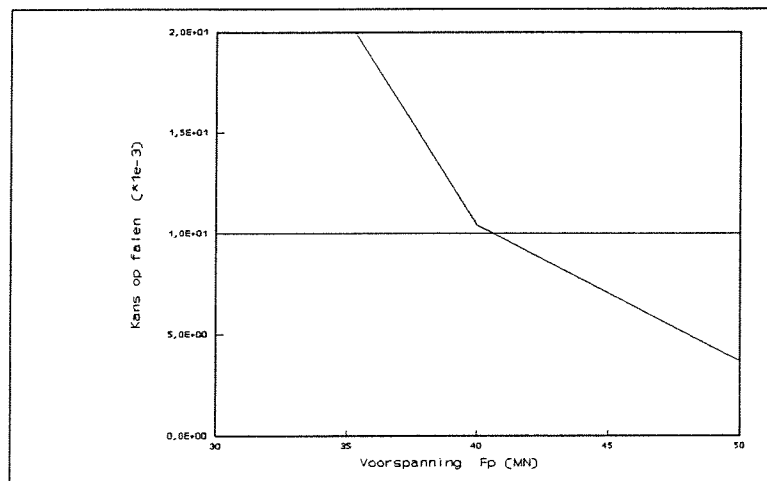
$$\rightarrow M_o = M_b = M_{goff} = 100300 \text{ kNm}$$

Voor de Wijkertunnel is voor het totale golfmoment bij een overschrijding van 1 % de volgende waarde uit de modelproeven gevonden:

$$M_b = 91100 \text{ kNm en}$$

$$M_o = 92500 \text{ kNm.}$$

De hierbij benodigde golfvoorspanning is dan gelijk aan 37200 kN. De afwijking bedraagt 8,4 % De afwijking wordt veroorzaakt door verschillen van de berekende significante momenten met de gemeten waarde hiervan uit de modelproeven en door de vereenvoudigde schematisatie van de dwarsdoorsnede, zodat de dwarsdoorsnede grootheden die voor de berekeningen is aangenomen, verschillen.



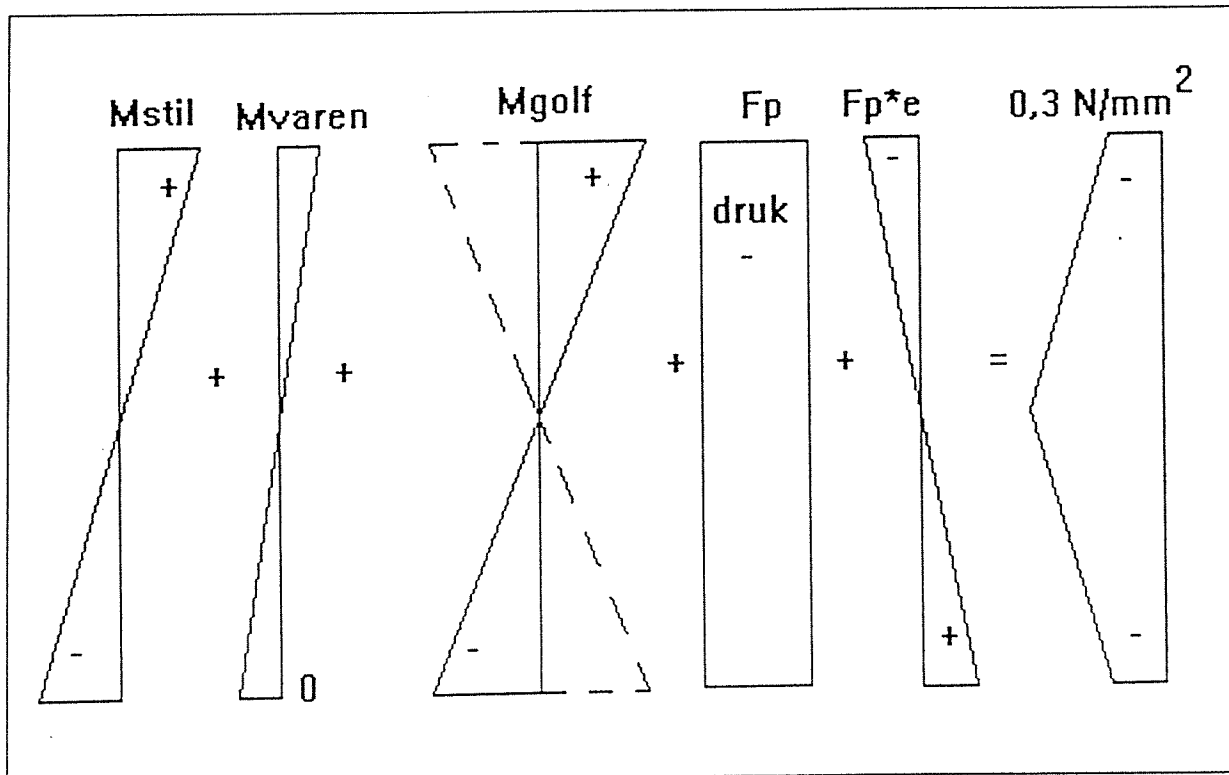
Figuur 5.7 Benodigde voorspanning bij een faalkans van 10^{-2}

Totale voorspanning

Voor de totaal benodigde hoeveelheid voorspanning tijdens transport in de gebruiksfase moeten de momenten veroorzaakt door de stilwaterbelasting en de vaarsnelheid van het element opgeteld worden bij de golfmomenten (zie bijlage 1, stilwaterbelastingen).

De stilwaterbelasting levert een opbuigend moment op van 73400 kNm, de voorwaartse snelheid (bij 4 kn) levert een opbuigend moment van 25000 kNm (modelproeven Wijkertunnel).

Als eis wordt gesteld dat altijd een drukspanning van 0,3 N/mm² aanwezig moet zijn in de voegen. Voor de spanningen onder en bovenin het element geldt dan zie figuur 5.8.



Figuur 5.8 Aanwezige spanningen als gevolg van de momenten en normaaldrukken bij transport over zee in de gebruiksfase

$$\sigma_b = \frac{M_{stil}}{W_b} + \frac{M_{varen}}{W_b} + \frac{M_{golf}}{W_b} - \frac{Fp_{tot}}{A_b} - \frac{Fp_{tot} \cdot e_{tot}}{W_b} \leq -0,3 \frac{N}{mm^2} \quad [5.9]$$

$$\sigma_o = -\frac{M_{stil}}{W_o} + \frac{M_{golf}}{W_o} - \frac{Fp_{tot}}{A_b} + \frac{Fp_{tot} \cdot e_{tot}}{W_b} \leq -0,3 \frac{N}{mm^2}$$

Invullen van alle waarden geeft

$$\frac{Fp_{tot} \cdot W_b}{A_b} + Fp_{tot} \cdot e_{tot} = 73400 + 25000 + 100300 + 62700 \text{ en}$$

$$\frac{Fp_{tot} \cdot W_o}{A_b} - Fp_{tot} \cdot e_{tot} = -73400 \quad -0 + 100300 + 73710$$

waaruit volgt dat

$$Fp_{tot} = 73300 \text{ kN,}$$

$$e_{p_{tot}} = 1296 \text{ mm.}$$

Hoofdstuk 5 Probabilistische dimensionering van de golfvoorspanning

Voor de Wijkertunnel was berekend een voorspanning met een excentriciteit

$$F_{p_{tot}} = 69000 \text{ kN},$$
$$e_{ptot} = 1318 \text{ mm}.$$

De afwijking tussen de berekende waarden van de totale benodigde voorspanning en excentriciteit bedraagt respectievelijk 5,87 % en 1,67 %.

Bij de berekening van de totale voorspanning is geen rekening gehouden met de aanwezige drukspanning veroorzaakt door de waterdruk op de kopvlakken. Dit is gedaan om de uitkomsten te kunnen vergelijken met die voor de ontwerpberekeningen van de Wijkertunnel, waar de waterdruk ook niet is meegenomen. De achterliggende gedachte is dat de waterdruk door de golfbeweging moeilijk te bepalen is omdat de hoogte van de waterkolom voor het kopschot varieert met de golfbeweging. Juist bij golven die maatgevend zijn (grote golfhoogte en opbuigend moment) is de voorspanning door waterdruk klein (geringe hoogte waterkolom voor het kopschot). Het moment veroorzaakt door de horizontale waterdruk is wel in het moment door het eigengewicht meegenomen omdat deze juist de benodigde voorspanning vergroot (geeft namelijk ook een opbuigend moment). Wanneer uitgegaan wordt van de stilwaterbelasting zou de horizontale waterdruk een drukkracht van

$$10,05 * h_{water} = 77 \text{ kN/m}^2$$
$$F_w = 7688 * h * \frac{1}{2} = 8,9 \text{ MN}$$

opleveren. De totale voorspanning zou dan met deze kracht kunnen worden verminderd. Om bovengenoemde redenen wordt hiermee echter verder geen rekening gehouden.

5.5.3 Bezwijkfase

Golfvoorspanning

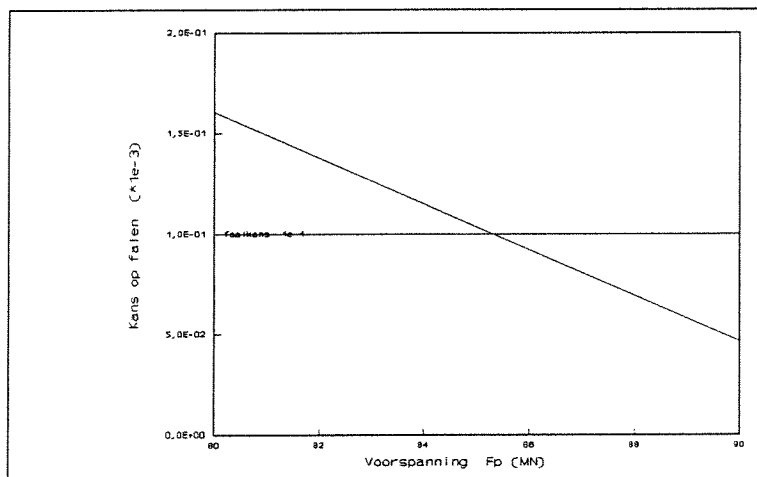
De kans op overschrijden van de momenten, en dus de kans op overschrijden van de golfvoorspanning, bij bezwijken is gesteld op $1 * 10^{-4}$. Uit figuur 5.9 blijkt dan dat de benodigde golfvoorspanning dan gelijk moet zijn aan:

- $F_p = 85,3 \text{ MN}$

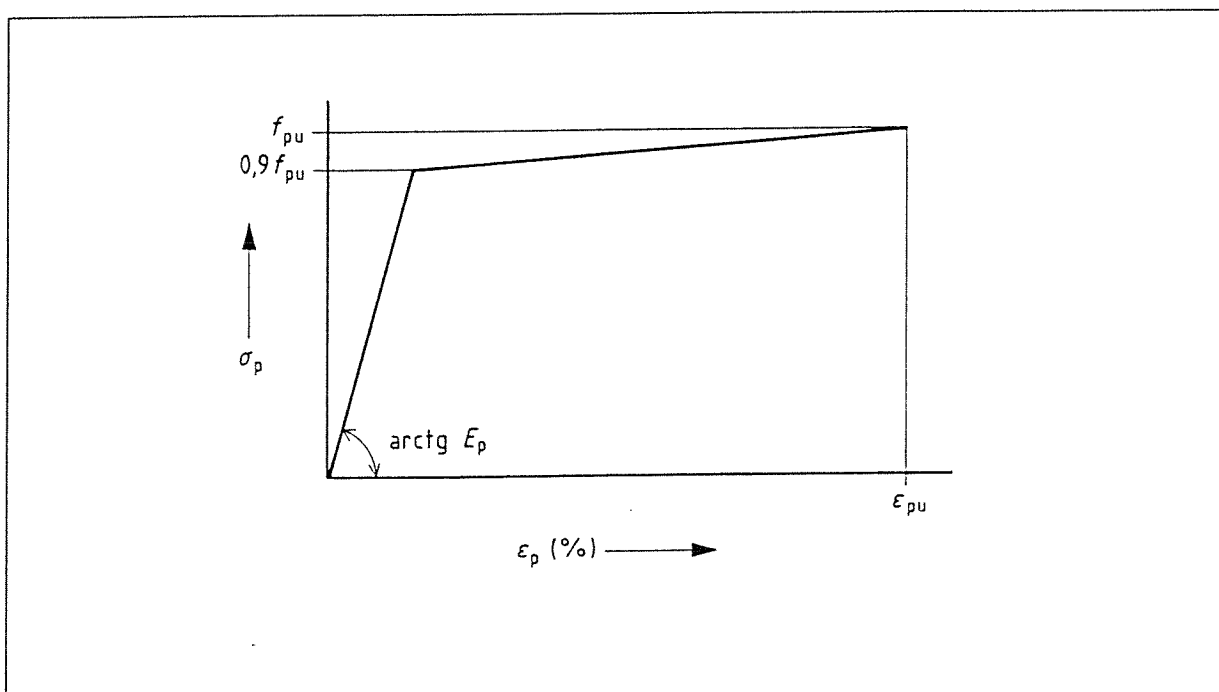
Een tunnelelement bezwijkt wanneer tijdens transport over zee de voegen open komen te staan zodat het element volloopt met water. Voor de Wijkertunnel is daarom gesteld dat de rek in de voeg niet groter mag zijn dan 50 mm. Voor de afleiding van de opneembare momenten in de bezwijkfase is het nodig om de materiaaleigenschappen van de gebruikte voorspanning te kennen. Tevens moet voor de berekening in de bezwijkfase materiaal en belastingfactoren worden gebruikt voor de deterministisch bepaalde belastingen en sterkte. Voor de materiaal en belastingfactoren worden respectievelijk aangehouden:

- $\gamma_m = 1,1$
- $\gamma_g = 1,2$ (en 0,9 voor meewerkende belasting)

Het gebruikte voorspanstaal is FeP 1860, in figuur 5.10 het σ/ϵ diagram voor FeP 1860 weerge-



Figuur 5.9 Benodigde voorspanning bij een faalkans van 10^{-4}


 Figuur 5.10 Het σ/ϵ diagram voor FeP 1860

geven. De rekenwaarde voor de treksterkte $f_{pu} = f_{purep}/\gamma_m = 1690 \text{ N/mm}^2$ de bijbehorende rek $\epsilon_{pu} = 3,5 \%$ en $E_p = 200000 \text{ N/mm}^2$.

De werkvoorspanning na verwerking van de verliezen wordt gesteld op $\sigma_{pw} = 0,8 * f_{pu} = 1350 \text{ N/mm}^2$. De berekening van het opneembare bezwijkmoment geschiedt als volgt; Voor de rek in de voeg is gesteld dat deze bij bezwijken 50 mm bedraagt. Dit houdt in dat de rek gelijk is aan

$$\epsilon = \frac{\Delta/l}{l} = \frac{50}{1200} = 0.04$$

Het voorspanstaal mag dan een rek hebben van $\epsilon + \epsilon_{pw}$ alvorens van bezwijken wordt gesproken. De spanning behorende bij een rek van $\epsilon + \epsilon_{pw} = 0,04 + 1350/200000 = 4,675 \%$ is gelijk aan $f_{pu} = 1690 \text{ N/mm}^2$. De spanning was 1350 N/mm^2 dus is de toegestane $\Delta\sigma_p$ gelijk aan 340 N/mm^2 . Dit betekent dat bij een werkvoorspanning van 1350 N/mm^2 de opneembare momenten bij bezwijken boven en onder respectievelijk

$$\begin{aligned} 340 * W_b &= 340 * 209 = 71060 \text{ kNm}, \\ 340 * W_o &= 340 * 245.7 = 83538 \text{ kNm} \text{ zijn.} \end{aligned}$$

Omdat de excentriciteit van de golfvoorspanning nagenoeg te verwaarlozen is kan ook gesteld worden dat de golfvoorspanning F_p verminderd kan worden met een kracht van

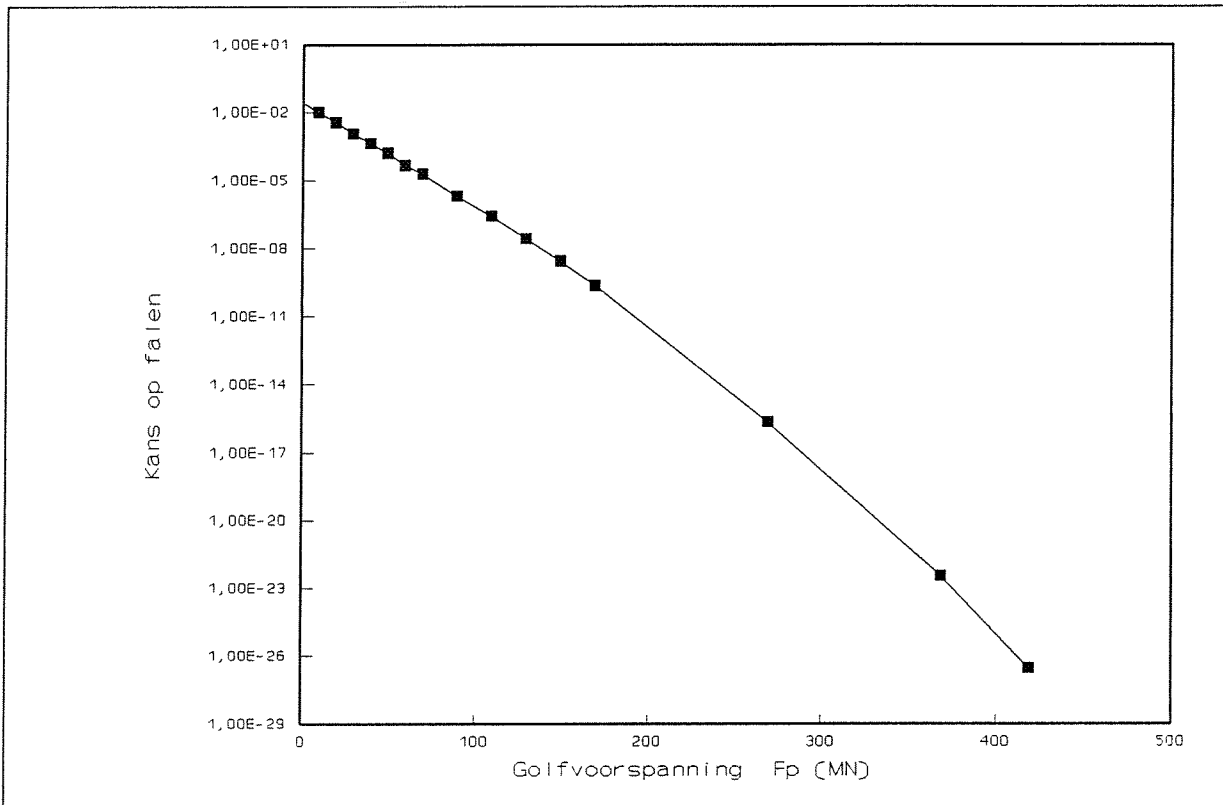
$$F_{p_{bengolf}} = F_{p_{golf}} - \frac{M_b \cdot A}{W_b} \quad (\text{of} - \frac{M_o \cdot A}{W_o}) = F_{p_{golf}} - 31,3 \text{ MN} \quad [5.10]$$

om de spanningen nul te krijgen onder en boven in de constructie.

Totale voorspanning

De golfvoorspanning bij een bepaalde faalkans kan dus verminderd worden met een kracht van $31,3 \text{ MN}$ om de benodigde golfvoorspanning te krijgen in de bezwijkfase. Dit komt omdat bij bezwijken de spanning in de voorspankabels groter is dan de werkvoorspanning waarmee de

faalkans berekend is, omdat een rek 50 mm in plaats van 0 mm wordt beschouwd als bezwijken van de constructie. De grafiek voor de faalkans als functie van de golfvoorspanning F_p ziet er dan als volgt uit, zie figuur 5.11.



Figuur 5.11 Faalkans als functie van de golfvoorspanning F_p

De berekening van de totale benodigde voorspanning is gelijk aan die in de gebruiksfase maar dan met toepassing van belasting- en materiaalfactoren. De benodigde golfvoorspanning is gelijk aan $85,3 - 31,3 = 54$ MN. Dit komt overeen met een golfmoment van $M_{golf} = 133400$ kNm. Voor de totaal benodigde voorspanning voor de bezwijkfase geldt dan

$$\sigma_b = \gamma_g \cdot \left(\frac{M_{eg}}{W_b} + \frac{M_v}{W_b} \right) + \frac{M_{golf}}{W_b} - \frac{1}{\gamma_m} \left(\frac{F_{p_{tot}}}{A_b} + \frac{F_{p_{tot}} \cdot e_{tot}}{W_b} \right) \leq 0 \frac{N}{mm^2} \quad [5.11]$$

$$\sigma_o = \gamma_g \cdot \left(\frac{M_{eg}}{W_o} \right) + \frac{M_{golf}}{W_o} - \frac{1}{\gamma_m} \left(\frac{F_{p_{tot}}}{A_b} - \frac{F_{p_{tot}} \cdot e_{tot}}{W_b} \right) \leq 0 \frac{N}{mm^2}$$

Invullen van alle waarde geeft

$$\frac{F_{p_{tot}} \cdot W_b}{A_b} + F_{p_{tot}} \cdot e_{tot} = 96890 + 33000 + 146740 \text{ en}$$

$$\frac{F_{p_{tot}} \cdot W_o}{A_b} + F_{p_{tot}} \cdot e_{tot} = -72660 - 0 + 1146740$$

waaruit volgt dat $F_{p_{tot}} = 71000$ kN,
 $e_{p_{tot}} = 1626$ mm.

De opneembare momenten uit de gebruiksfase voldoen dus ook voor de bezwijkfase zoals te zien is in tabel 5.4.

	Gebruiksfase	Bezwijkfase
Opneembaar moment boven	262 MNm	261 MNm
Opneembaar moment onder	102 MNm	75 MNm

Tabel 5.4 Opneembare momenten bij de toegepaste voorspanning in de gebruiksfase en bezwijkfase

De berekende voorspanning uit de gebruiksfase is dus ook maatgevend voor de bezwijkfase en zal worden toegepast.

$$F_{p_{tot}} = 74 \text{ MN}$$

$$e_{p_{tot}} = 1,3 \text{ m}$$

Met behulp van de kans op falen als functie van de voorspanning voor de bezwijkfase kan de voorspanning worden geoptimaliseerd door minimaliseren van de voorspankosten en het risico, gedefinieerd als de kans op falen * kosten van falen. Dit wordt verder uitgewerkt in hoofdstuk 6.

6 Optimalisatie van de golf-voorspanning

6.1 Inleiding

Met de resultaten van het programma besproken in het vorige hoofdstuk is het mogelijk om de voorspanning te optimaliseren. De voorspanning wordt naar kosten geoptimaliseerd, dit gebeurt aan de hand van het risico. Het risico is gedefinieerd als het produkt van de kans op falen tijdens het transport over zee en de kosten die hiermee gepaard gaan. Het optimum wordt dan gevonden door het minimum te bepalen van dit risico ($p_{\text{falen}} * \text{kosten}_{\text{falen}}$) en de kosten voor de bijbehorende voorspanning. De optimalisatie van de voorspanning voor de Wijkertunnel geschiedt aan de hand van het programma in § 6.2.

Zoals reeds in hoofdstuk 2 naar voren is gekomen staat de dwarsdoorsnede van een tunnel vast met het benodigde profiel van vrije ruimte. De voorspanning moet voor de verschillende uitvoeringsfasen de langsmomenten opnemen. Deze momenten zijn, behalve van de dwarsdoorsnede-afmetingen en de golven, afhankelijk van de lengte van het afzinkelement. De benodigde voorspanning zal toenemen met een toenemende lengte van het element, omdat de momenten evenredig zijn met het kwadraat van de overspanning. Wanneer de element lengte toeneemt zal het moment bij een golf met een lengte gelijk aan de lengte van het element grotere significante momenten opleveren, daar staat tegenover dat de kans op zo'n moment kleiner wordt omdat de kans op een hogere piekperiode kleiner is. Dit kan betekenen dat het optimum van de voorspankosten lager ligt bij een grotere lengte van het element. Zelfs al is dit niet het geval dan nog kan een langer afzinkelement economisch voordelig zijn omdat dan minder elementen nodig zijn en dus minder transporten, zinkoperaties en dergelijke, hetgeen het totale risico en de kosten vermindert. Dit wordt nader bekeken in § 6.3 voor de Wijkertunnel en tunnels in het algemeen.

6.2 Optimalisatie van de golfvoorspanning voor de Wijkertunnel

6.2.1 De kans op falen tijdens transport over zee

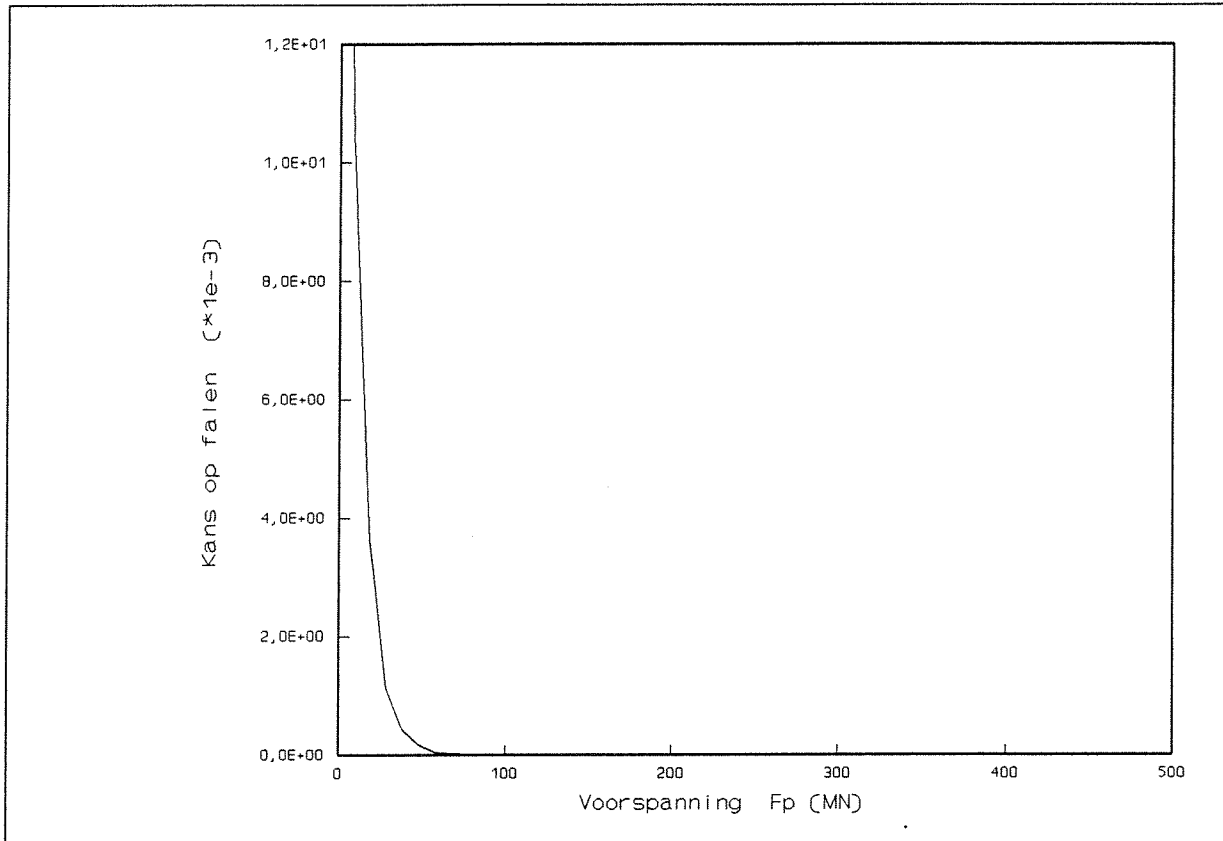
Om een optimalisatie te kunnen maken van de voorspankosten is het nodig om bij verschillende waarden van de voorspanning de kans op falen te kennen. Met behulp van het programma is voor de verschillende voorkomende karakteristieke golven deze faalkans bepaald, zie figuur 5.4. De figuur wordt hier nog een keer afgebeeld met een normale schaal voor de y-as (faalkansen), omdat dat na vermenigvuldiging met de kosten een beter beeld geeft van de kosten als functie van de voorspanning, figuur 6.1

Nu de faalkans bekend is moeten de kosten van voorspanning als functie van de hoeveelheid voorspanning en de kosten van falen gekwantificeerd worden om zodoende de totale voorspankosten te kunnen optimaliseren.

6.2.2 Kosten van de voorspanning

Aantal kabels

De staaldoorsnede van een voorspankabel bedraagt	$A_p = 1800 \text{ mm}^2$
De werkvoorspanning	$\sigma_{pw} = 1350 \text{ N/mm}^2$
Voorspankracht per kabel	$A_p * \sigma_{pw} = 2430 \text{ kN}$
Aantal vereiste kabels	$n_k = F_p / 2430$



Figuur 6.1 Faalkans als functie van de golfvoorspanning Fp

Kosten per kabel

Voor de voorspanning wordt een eenheidsprijs van fl 4,- per kilogram aangehouden. De volumieke massa is ongeveer 7800 kg/m^3 . Het staaloppervlak van een kabel bedraagt 1800 mm^2 . Voor de kosten van de ankers, het aanbrengen en doorslijpen van de kabels moet bij de lengte van de kabels 45 meter worden opgeteld per kabel om de kosten hiervan te verwerken. De kosten van een kabel wordt dan : $(45 + L) * A_p * 7800 * 4 = \text{fl } 8.000,-$

Voorspankosten

De voorspankosten voor een tunnelelement met een lengte van 96 meter zijn gelijk aan de kosten per kabel maal het aantal kabels en dus gelijk aan

- $K_{\text{voor}} = 3,4 * F_p \text{ (gld/kN)}$.

6.2.3 Kosten van falen

Als het tunnelelement bezwijkt tijdens zeetransport betekent dit dat de volgende extra werkzaamheden moeten plaatsvinden. Er zal een nieuw element gebouwd moeten worden, en het wrak van het gezonken element moet worden opgeruimd. De bouw van een nieuw element betekent dat het bouwdok weer in gebruik moet worden genomen en dat nog een keer de dijk moet worden doorgebaggerd om het bouwdok te inunderen. Ook is er een extra transport nodig. Tevens zullen de werkzaamheden een vertraging oplopen van de bouwtijd van het element plus wat extra voor het aanpassen van het bouwdok, het opruimen van het gezonken tunnelelement en het transport van het element. De kosten van falen zijn dus onder te verdelen in

- Bouw element
- Opruimen wrak
- Kosten bouwdok
- Extra transport
- Kosten van vertraging

De verschillende kosten zijn voor zover mogelijk geschat aan de hand van de gegevens van de Wijkertunnel. De kosten van opruimen van het wrak zijn geschat op de helft van de bouwkosten, die ongeveer 7,5 mln bedragen. De bouwdokkosten bestaan voor 0,7 mln uit eenmalige bemalings-, inundatie- en baggerkosten en voor 1,4 mln uit kosten voortkomend uit langer gebruik van bouwdok. De kosten van vertraging van 1 jaar kunnen op verschillende manieren beschouwd worden. Er kan gekeken worden naar het verlies in opbrengsten door de vertraging of naar kosten voor de aannemer door een te late oplevering. Het verschil tussen de derving van opbrengsten en de geschatte kosten van vertraging is niet zo groot. Het bedrag voor de vertragingkosten is afgerond op 15 mln.

De totale kosten van falen komt hiermee neer op een bedrag van ongeveer :

- Faalkosten : fl 30.000.000,-

Een opmerking is hier op zijn plaats, omdat bepaalde kosten erg moeilijk in te schatten zijn zoals opruimen van het wrak en de vertragingkosten, is met globale cijfers gewerkt, en afgerond op hele miljoenen. De totale kosten zullen zeker niet exact zijn maar geven wel een indicatie.

Ook voor de kosten van de voorspanning kan de staalprijs per kilogram verschillen met de hier gebruikte. De kosten van de voorspanning zijn ook naar boven afgerond. Voor de Wijkertunnel waren de kosten van de voorspanning fl 200.000,-, uit de gebruikte formule zou een kostprijs van fl 234.000,- worden gekregen bij een voorspanning van 69000 kN. Het optimum ligt, door de hogere aangenomen kosten van de voorspanning, bij een wat lagere voorspanning.

6.2.4 Kostenoptimalisatie

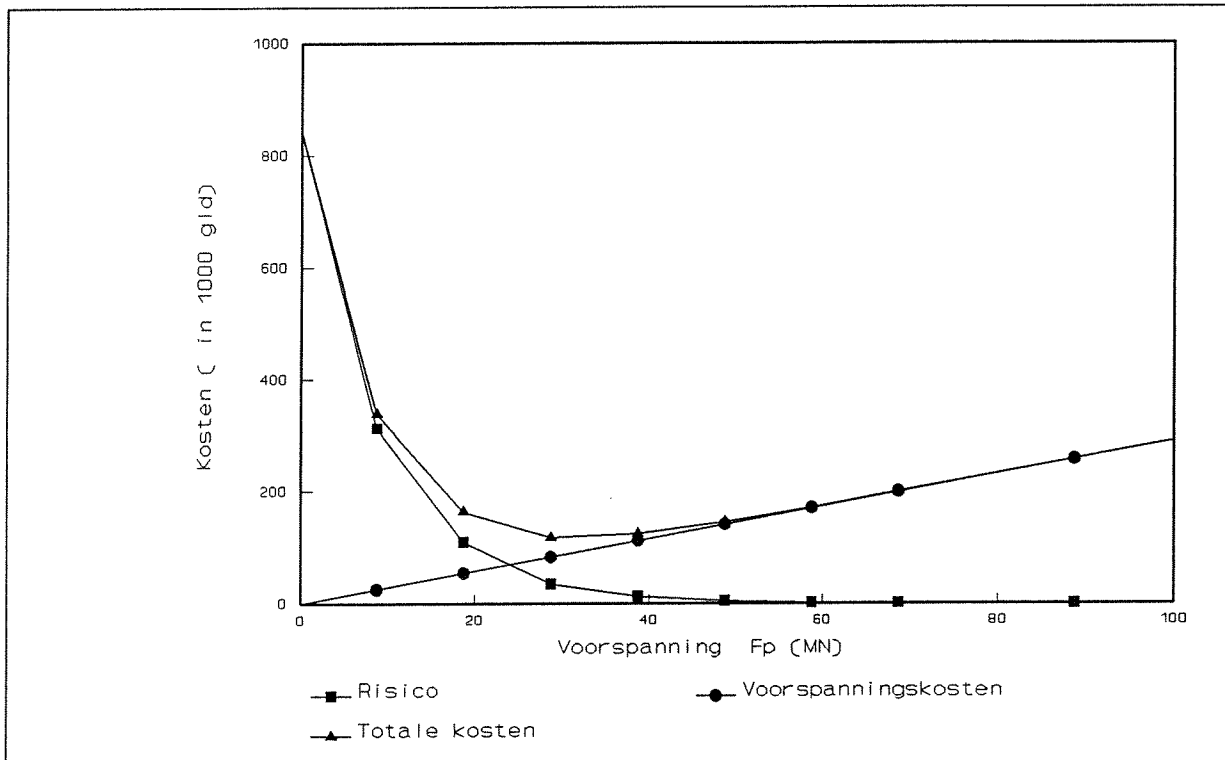
De kosten van de golfvoorspanning kunnen nu geoptimaliseerd worden door het minimum te bepalen van het risico (faalkans*faalkosten) en de voorspanningskosten per element. Figuur 6.1 moet daarvoor worden vermenigvuldigd met de faalkosten (= 30 mln.). In de figuur kunnen dan de voorspankosten worden geplot, optellen van de twee grafieken geeft de totale kosten als functie van de hoeveelheid golfvoorspanning, zie figuur 6.2.

Uit de figuur blijkt dat de optimale golfvoorspanning ligt bij een voorspanningskracht van 33 MN. Dit is dus kleiner dan de toegepaste golfvoorspanning van 54 MN. In tabel 6.1 worden de kosten en faalkansen van de optimale en de toegepaste voorspanning vergeleken.

Voorspanning Fp (MN)	Voorspankosten per element	Risico bij 1 transport	Totale kosten	Kans op bezwij- ken
optimale 33	fl 112000	fl 18870	fl 131000	6,29 * 10 ⁻⁴
toegepast 54	fl 183600	fl 2910	fl 186500	0,97 * 10 ⁻⁴
Verschil	fl - 71600	fl 15960	fl -55000	6,5 maal

Tabel 6.1 Vergelijking van de kosten bij de optimale en toegepaste voorspanning

Voor het economisch optimum in de bezwijkfase zou met een kleinere voorspanning gewerkt kunnen worden om zodoende de totale kosten te minimaliseren. De kans op falen tijdens het zeetransport wordt echter wel groter. Zoals al is gebleken is de gebruiksfase maatgevend voor het zeetransport. De optimale voorspanning is echter bepaald voor bezwijken.



Figuur 6.2 Totale kosten per element als functie van de golfvoorspanning

Bij de optimale voorspanning van 33 MN wordt de kans dat het opneembare golfmoment in de gebruiksfase wordt overschreden als volgt berekend;

Moment dat door de golfvoorspanning kan worden opgenomen = $F_p \cdot W_b / A + 0,2 \cdot F_p = 81600$ kNm. De totale toegepaste voorspanning in de bezwijkfase wordt dan bepaald door

$$\frac{F_p}{A} + \frac{F_p \cdot e}{W_b} = 1,2 \cdot \frac{M_{eg}}{W_b} + 1,2 \cdot \frac{M_v}{W_b} + \frac{81600}{W_b}$$

$$\frac{F_p}{A} + \frac{F_p \cdot e}{W_b} = -0,9 \cdot \frac{M_{eg}}{W_o} + \frac{81600}{W_o}$$

waarmee voor $F_{p_{tot}}$ en e_p volgt: $43600 \cdot 1,1 = 48000$ kN respectievelijk 2,26 m.

De opneembare belastingen boven en onder bedragen dan :

$$\sigma_b = F_p / A + e_p \cdot F_p / W_b = 0,997 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_o = F_p / A - e_p \cdot F_p / W_o = 0,117 \text{ N/mm}^2$$

voor de gebruiksfase geldt

$$\sigma_o = \frac{M_{eg}}{W_o} + \frac{M_v}{W_o} + \frac{M_{golf}}{W_o} + 0,3$$

$$\sigma_b = -\frac{M_{eg}}{W_b} + \frac{M_{golf}}{W_b} + 0,3$$

zodat de golfvoorspanning in de gebruiksfase slechts 11000 kN is. De bijbehorende overschrijdingskans is gelijk aan 50 %, zie figuur 5.6. Dit betekent dat de mogelijkheden voor transport veel minder worden omdat de helft van de tijd niet aan de eis in de gebruiksfase wordt voldaan. Uit de kostenberekening van § 6.2.3 bleek reeds dat een dag vertraging ongeveer 40.000 gulden

kost, hier moeten de kosten voor bijvoorbeeld huur van de sleepboten nog bij opgeteld worden zodat dan het uitgespaarde bedrag door het optimaliseren van de golfvoorspanning bijna teniet is gedaan. Tevens blijkt uit de figuur dat de stijging rechts van het optimum veel kleiner is dan links van het optimum. Dit betekent dat een extra veiligheid tegen bezwijken niet zoveel extra kosten met zich meebrengt. De optimalisatie is alleen gedaan voor de sterkte (kans dat de constructie bezwijkt) de wachttijden voor het transport van de elementen kunnen dan echter de bespaarde kosten op de voorspanning teniet doen. Het blijkt juist dat meerkosten veroorzaakt door extra voorspanning, de werkbaarheid dusdanig vergroten dat de besparing op wachttijden de totale kosten zal verminderen, hiervoor wordt verwezen naar het afstudeerrapport van D. van Elsdingen, waarin onderzoek is verricht naar de werkbaarheid (gebruiksfase) voor het transport van tunnelementen over zee. Verder wordt daarom gewerkt met de berekende golfvoorspanning voor de gebruiksfase.

6.3 Optimalisatie van de tunnellingte

6.3.1 Inleiding

Wanneer de elementlengte toeneemt zal het moment bij een golf met een lengte gelijk aan de lengte van het element grotere significante momenten opleveren, daar staat tegenover dat de kans op zo'n moment kleiner wordt omdat de kans op een hogere piekperiode kleiner is. Dit kan betekenen dat de voorspankosten lager zijn bij een grotere lengte van het element. Zelfs al is dit niet het geval dan nog kan een langer afzinkelement economisch voordelig zijn omdat dan minder elementen nodig zijn en dus minder transporten en zinkoperaties. Voor de faalkans van de golfvoorspanning wordt 0,01 % aangehouden omdat dan aan de eis in de gebruiksfase wordt voldaan (faalkans eigenlijk $0,00097 \approx 0,01\%$). Er wordt dus bekeken of bij gelijke faalkansen de kosten kunnen worden gereduceerd door het aanpassen van de lengte van de tunnelementen. Om de kosten te kunnen vergelijken moeten zowel de kosten van voorspanning als functie van de lengte bekend zijn als de kosten van een transport plus afzinkoperatie. De benodigde golfvoorspanning bij verschillende tunnellingtes wordt bepaald met behulp van het programma Voorspanning.

6.3.2 Kosten

De kosten van voorspanning zijn reeds in § 6.2.2 berekend, hier wordt de formule nogmaals gegeven.

$$\bullet K_{\text{voor}} = F_p / \sigma_{\text{pv}} * (45 + L) * A_p * 7800 * 4$$

Uit het bestek van de Wijkertunnel blijkt dat de kosten van een afzinkoperatie en transport ongeveer fl 1.360.000,- zijn. De totale kosten liggen iets hoger omdat bijvoorbeeld een afmeerconstructie nodig is. Deze kosten zijn echter onafhankelijk van het aantal elementen en zijn dus voor de lengte-optimalisatie niet van belang. Er wordt vanuit gegaan dat deze kosten constant zijn over de lengte omdat de kosten posten bijna allemaal onafhankelijk zijn van de elementlengte. De transportkosten zouden voor erg lange tunnels groter kunnen worden doordat er meer sleepboten worden ingezet, hier wordt dit echter verwaarloosd, zodat voor de afzinkkosten geldt dat ze 1,36 mln per afzinkoperatie en transport bedraagt.

$$\bullet K_{\text{afz}} = 1.360.000 * L_{\text{totaal}} / L = 1,36 * 10^6 * N, \text{ met } N \text{ het aantal elementen.}$$

6.3.3 Benodigde voorspanning als functie van de lengte

Met de momenten berekend door het programma Seaway voor de verschillende lengten wordt met het programma 'Voorspanning' de benodigde golfvoorspankracht bepaald bij een faalkans

Hoofdstuk 6 Optimalisatie van de golfvoorspanning

van 0,01 %, voor zes verschillende lengten van de tunnelementen. De elementlengte zijn respectievelijk 82 meter, 96 meter, 115 meter, 144 meter, 192 meter en 288 meter. De uitkomsten van de berekening staan in tabel 6.2.

Lengte van het element	Benodigd aantal elementen	Benodigde golfvoorspanning bij een faalkans van $1 \cdot 10^{-4}$
82 meter	7	13914 kN
96 meter	6	53998 kN
115 meter	5	43998 kN
144 meter	4	66265 kN
192 meter	3	66965 kN
288 meter	2	95015 kN

Tabel 6.2 Benodigde golfvoorspanning als functie van de elementlengte voor de Wijkertunnel

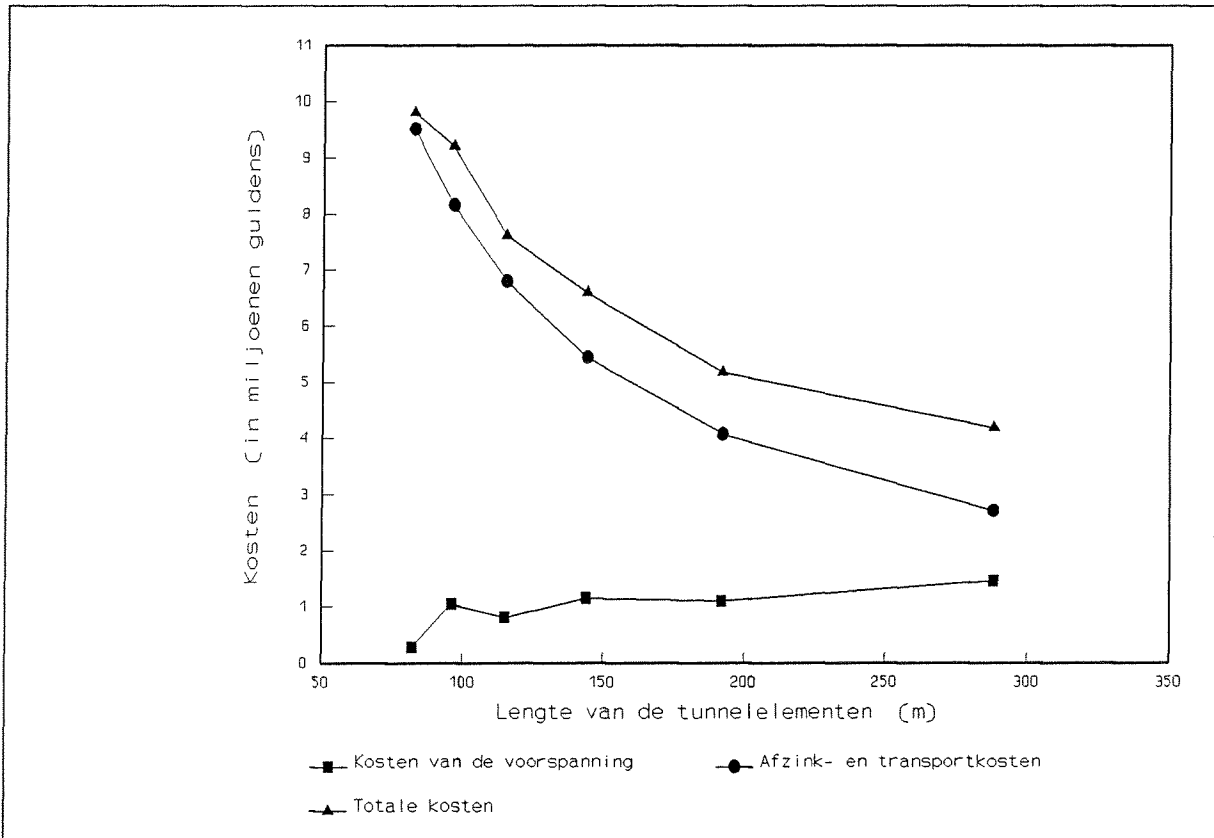
Het blijkt inderdaad zo te zijn dat de benodigde voorspanning bij toepassen van vijf elementen kleiner is dan bij zes, ondanks de grotere lengte van de elementen. Ook de kosten van de voorspanning zijn voor elementen met een lengte van 115 meter lager dan bij elementen met een lengte van 96 meter.

6.3.4 Kostenoptimalisatie

In tabel 6.3 staan de voorspankosten en de totale kosten voor de verschillende elementlengten. De totale kosten zijn minimaal bij een zo groot mogelijke lengte van de elementen. Dit komt doordat de kosten voor afzinken en transport van een element in verhouding tot de kosten van de voorspanning erg groot zijn. Figuur 6.3 schetst het verloop van de kosten voor de voorspanning en het afzinken alsmede de totale kosten.

Elementlengte	Aantal elementen	Benodigde voorspanning	Kosten voorspanning	Afzinkkosten	Totale kosten (*10 ³)
82 meter	7	14 MN	288.000,-	9.520.000,-	fl 9.808
96 meter	6	54 MN	1.056.000,-	8.160.000,-	fl 9.216
115 meter	5	<u>44 MN</u>	<u>814.000,-</u>	6.800.000,-	fl 7.614
144 meter	4	66 MN	1.153.000,-	5.440.000,-	fl 6.593
192 meter	3	67 MN	1.101.000,-	4.080.000,-	fl 5.181
288 meter	2	95 MN	1.462.000,-	2.720.000,-	fl 4.182

Tabel 6.3 Totale kosten bij verschillende lengten van de elementen



Figuur 6.3 Kosten als functie van de lengte van de tunnelelementen

6.3.5 Randvoorwaarden lengte-optimalisatie

Uit de kostenoptimalisatie van de lengte blijkt dat een lengte van 288 meter voor de afzinkelementen het meest economische alternatief is. Er zijn echter bovengrenzen voor de element lengte die voort vloeien uit de maximale voorspanning en lengte ten behoeve van manoeuvreerbaarheid van de tunnelelementen.

Voorspanning

De voorspanning in de elementen mag niet zodanig groot worden dat de drukspanning van beton wordt overschreden. Tevens moet het aantal voorspankabels niet teveel zijn in verband met de hart op hart afstand van de kabels. Aan beide eisen wordt nog voldaan bij een tunnallengte van 288 meter, zie bijlage 8.

Lengte

De lengte van de elementen wordt hoofdzakelijk door vier grootheden beperkt te weten

- diepgang tijdens transport
- manoeuvreerbaarheid tijdens uitvaren
- lengte van de sluis bij IJmuiden
- manoeuvreerbaarheid tijdens afzinken

De diepgang zal bij toenemende lengte groter worden omdat één element gekromd is in verticale zin. Eventueel kan dit element een groter vrijboord worden gegeven zodat de diepgang ook voldoet bij een langer element of kan de lengte worden aangepast zodat het kromme element

korter kan worden uitgevoerd. De lengte van de sluis bij IJmuiden bedraagt ± 400 m, zodat een element met een lengte van 288 meter de sluis kan passeren.

De breedte van de waterweg bij het afzinken is twee maal de elementlengte van 288 meter en dus voldoende.

Het bouwdok in Barendrecht heeft een lengte van ± 400 m en een breedte van ± 140 meter. Door de beperkte breedte tijdens uitvaren is de maximale elementlengte 144 meter, zie bijlage 8.

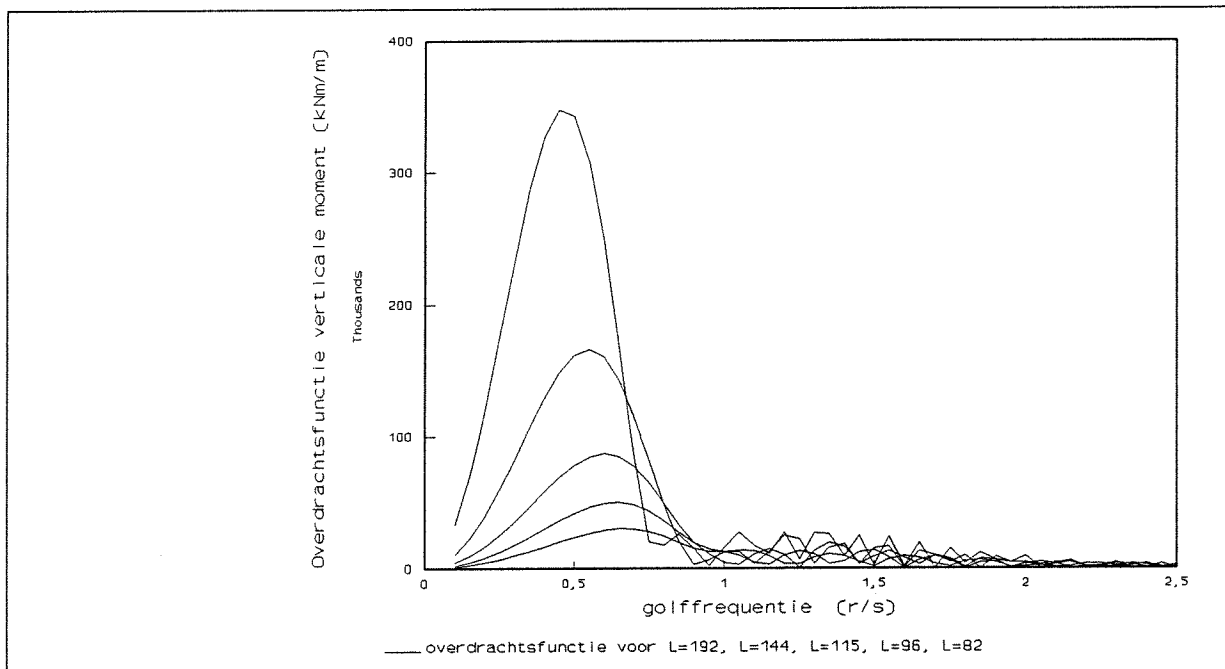
De maximale elementlengte voor de Wijkertunnel bedraagt dus 144 meter. Er zijn dan in totaal slechts vier afzinkelementen nodig. De kostenbesparing zou dan bedragen :

$$\text{Kosten besparing} = \text{Kosten}_{L=96} - \text{Kosten}_{L=144} = 9.216.000 - 6.593.000 = \text{fl } 2.600.000,-$$

6.3.6 Tunnels in het algemeen

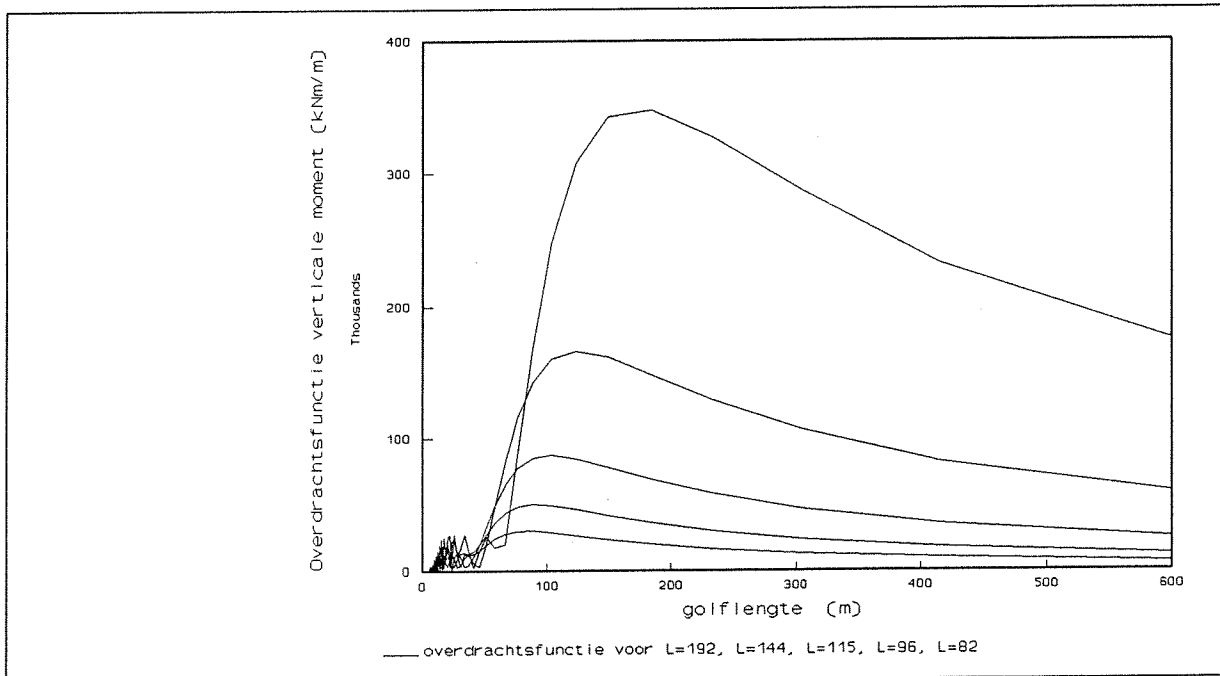
Uit de kostenvergelijking van de verschillende lengtes blijkt dat het transport over zee niet maatgevend is voor de bepaling van de maximale lengte. De randvoorwaarden die door andere oorzaken aan de lengte worden gesteld, zoals manoeuvreerbaarheid en diepgang, beperken de lengte zodanig dat de besparingen door minder transport- en afzinkoperaties ruimschoots opwegen tegen de extra kosten van de voorspanning bij langere elementen.

De buigende momenten nemen kwadratisch toe met de tunnellenlengte. Figuur 6.4 geeft een voorbeeld van de overdrachtsfunctie van het verticale moment in de middendoorsnede voor verschillende lengtes van de Wijkertunnel bij een evenwijdige inval van de golven.



Figuur 6.4 Verticaal buigende momentoverdrachtsfuncties in de middendoorsnede voor evenwijdig invallende golven bij verschillende tunnellenlengtes

De pieken van de overdrachtsfuncties liggen bij een lengte die ongeveer gelijk is aan de tunnellenlengte. Dit is weergegeven in figuur 6.5 voor tunnellenlengtes van respectievelijk 192, 144, 115, 96 en 82 meter.

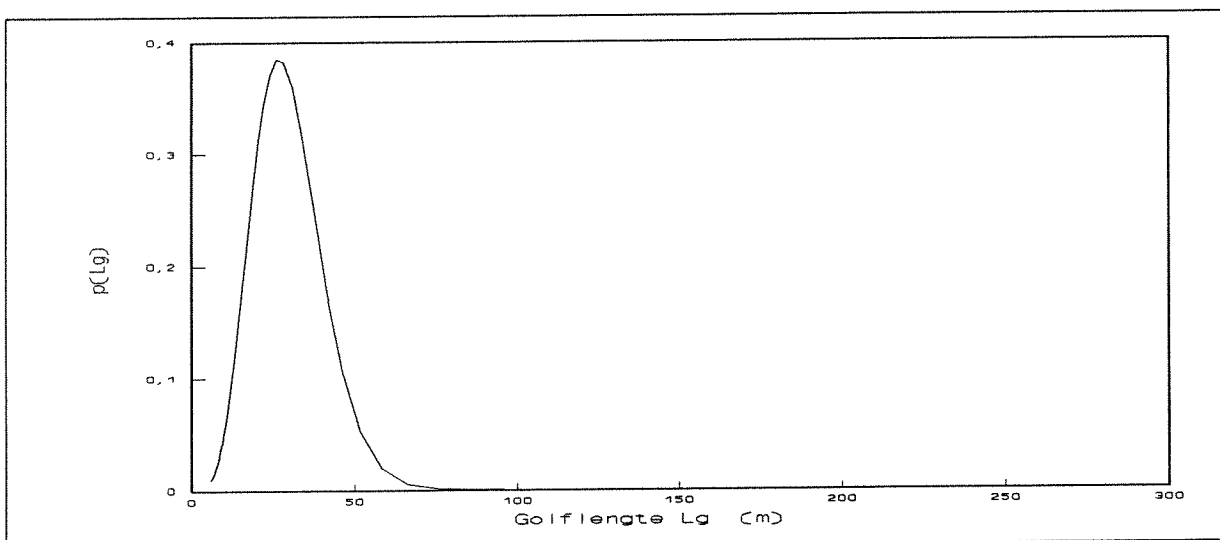


Figuur 6.5 Overdrachtsfuncties uit figuur 6.4 nu als functie van de golflengte

De significante momenten worden bepaald door de overdrachtsfuncties te vermenigvuldigen met de golfspectra. Het golfspectrum vertoont een piek bij de piekperiode. Deze piekperiode kan vertaald worden naar de golflengte door de volgende relatie :

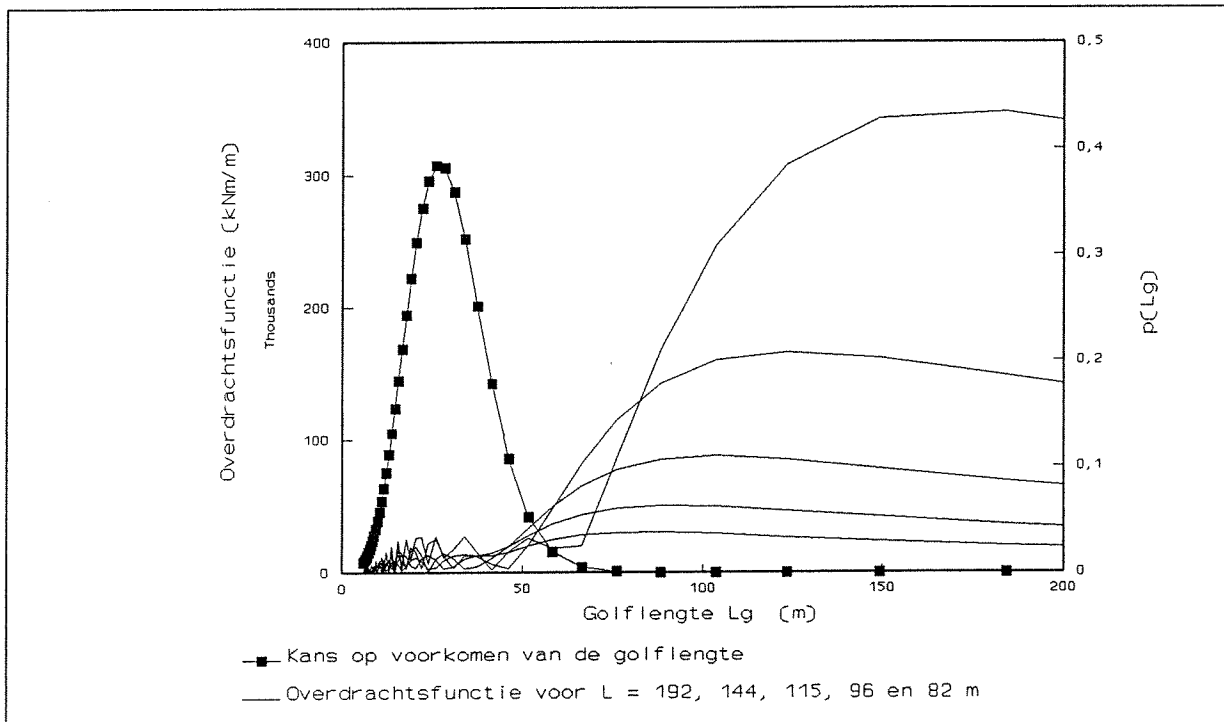
$$\text{Golfperiode } T_g = \frac{T_p}{1,285} \rightarrow \text{Golflengte } L_g = \frac{g \cdot T_g^2}{2 \cdot \pi} = 0,946 \cdot T_p^2$$

Met behulp van de kansverdeling van T_p is dan de kansverdeling voor de golflengte te bepalen. Deze kansverdeling is in figuur 6.6 uitgezet. Uit de twee figuren is duidelijk op te maken dat de momenten toenemen bij toenemende lengte van de tunnel (figuur 6.5), maar dat de kans op golven met een golflengte gelijk aan de toenemende tunnellengte kleiner wordt, figuur 6.6



Figuur 6.6 Kansdichtheidsfunctie van de golflengte

Om dit beter zichtbaar te maken zijn de twee figuren bij elkaar afgedrukt in figuur 6.7. Het is duidelijk te zien dat juist in het gebied waar de korte golven zich voordoen, de kansdichtheid van de golflengte het grootst is.



Figuur 6.7 Kans op voorkomen van de golflengte met de overdrachtsfuncties voor de verschillende tunnellenengtes

Dit betekent dat de benodigde voorspanning als functie van de lengte slechts geleidelijk toeneemt (figuur 6.7), zoals voor de Wijkertunnel is af te lezen uit tabel 6.2.

De kosten van de voorspanning per element nemen toe bij toenemende lengte van de elementen, echter omdat het aantal elementen afneemt, zullen de totale kosten van de voorspanning weer afnemen. In tabel 6.3 en figuur 6.3 is te zien dat de voorspankosten voor de Wijkertunnel bij alternatieven van 6, 5, 4 of 3 elementen onderling niet veel schelen en voor elk alternatief rond de 1,1 mln gulden ligt. Omdat de kosten van een transport en afzinkoperatie evenredig is met het aantal elementen en de kosten van één transport en afzinkoperatie hoog zijn, is het voordelig om het zinkgedeelte van een afzinktunnel met zo weinig mogelijk elementen te realiseren. Randvoorwaarden voor de lengte die voortvloeien uit diepgang van de vaarwegen, manoeuvreerbaarheid in het bouwdok of bij een sluispassage zullen maatgevend zijn voor de maximale lengte.

Hoewel de gebruikte getallen en kostprijs gelden voor de Wijkertunnel zal voor een willekeurig andere tunnel de afwijkingen hiervan niet zodanig groot zijn dat significante verschillen op zouden treden.

De variabelen gebruikt voor de bepaling van de optimale lengte zijn :

- Golfcondities van de Noordzee voor de zomermaanden.
- Dwarsdoorsnede grootheden Wijkertunnel
- Afzink- en transportkosten voor de Wijkertunnel

Voor de voorspankosten is een algemene formule gebruikt die in principe voor elke tunnel geldt. De golfmomenten zijn behalve voor de lengte ook afhankelijk van de breedte, het verband tussen de twee is rechtevenredig zodat voor tunnels met een andere breedte de voorspanning rechtevenredig toe of afneemt, door het grote verschil in kosten tussen voorspanning en het transport

en afzinken zal een toenemende breedte van de elementen niet veel uitmaken. De afzink- en transportkosten zijn voor het grootste deel onafhankelijk van de tunnelafmetingen zodat deze kosten ook weinig zullen verschillen voor tunnels.

De benodigde voorspanning is bepaald voor golfcondities op de Noordzee voor de zomermaanden, wanneer het transport over de Noordzee plaats vindt, gelden de verdelingen voor de karakteristieke golven bepaald in hoofdstuk 4. Als het transport onder andere omstandigheden plaats vindt zullen ook andere verdelingen moeten worden bepaald. Dit zal van invloed zijn op de benodigde golfvoorspanning tijdens transport. Omdat de kosten van de voorspanning echter veel lager liggen dan de afzink- en transportkosten, zie figuur 6.3, zal een grote lengte van de afzinkelementen economisch het voordeligst zijn.

Hier komt nog bij dat het kans op falen voor het transport van alle elementen kleiner wordt omdat er minder transporten zijn. De optimalisatie was namelijk gedaan voor faalkans van $1 \cdot 10^{-4}$ per transport. De totale faalkans is dus gelijk aan de faalkans per transport maal het aantal transporten. Voor langere elementen zijn er minder transporten nodig, zodat de totale faalkans kleiner wordt.

7 Deterministische dimensionering van de tunnelementen

7.1 Inleiding

Tot nu is alleen gekeken naar de voorspanning benodigd voor het opvangen van de golfbelasting. Het transport over zee is echter niet de enige situatie waarin zich buigende momenten in langsricting voordoen. In alle uitvoeringsfasen (zie § 2.2.1) treden buigende momenten op. In dit hoofdstuk wordt de benodigde voorspanning voor elke fase deterministisch berekend zodat de uiteindelijk toe te passen voorspanning kan worden bepaald.

Ook voor de zeetransport-fase geldt dat de golfbelasting niet de enige belasting is, er ontstaan ook buigende momenten door de vaarsnelheid en door de stilwaterbelasting. Deze momenten kunnen gesuperponeerd worden met de buigende momenten veroorzaakt door de golfbelasting, zodat de uiteindelijk benodigde voorspanning voor de transport-fase kan worden bepaald (§ 7.2).

De golfbelasting veroorzaakt niet alleen buigende momenten maar ook een wringmoment in langsricting, zoals in hoofdstuk 3 al naar voren is gekomen. De voorspanning vergroot de opneembare dwarskracht en dus ook het opneembare wringmoment. In § 7.3 wordt de wringcapaciteit deterministisch bepaald.

7.2 Voorspanning

7.2.1 Fasering

Nadat de tunnelementen in het bouwdok gereed zijn kan met het transport van de elementen worden begonnen. Het transport is in verschillende fasen in te delen (zie ook § 2.2.1 Uitvoering) met ieder een karakteristieke belasting. De buigende momenten die voorkomen tijdens de verschillende fasen moeten door de voorspanning worden opgenomen. Tot nu is alleen naar het transport over zee gekeken, om te verifiëren of de voorspanning voldoet voor iedere fase worden deze hieronder kort beschreven. In bijlage 9 staan de berekeningen van de buigende momenten voor de verschillende fasen.

Fase 1 : Vullen bouwdok

Voordat het bouwdok gevuld wordt met water worden de ballasttanks gevuld zodat de elementen niet meteen opdrijven en kunnen gaan drijven.

Fase 2 : Opdrijven elementen

Nadat het bouwdok gevuld is, worden de elementen één voor één opgedreven door middel van het gecontroleerd leegpompen van de ballasttanks.

Fase 3 : Transportgereed maken

In deze fase worden de voorzieningen ten behoeve van het transport aangebracht. Door het aanbrengen van ballastbeton wordt het vereiste vrijboord verkregen van 0,4 m voor het zeetransport.

Fase 4 : Transport over zee

Fase 5 : Afzinkgereed maken

Nabij de uiteindelijke bestemming wordt het tunnelement aan een afbouwkade voorzien van de afzinkuitrusting.

Fase 6 : Afzinken

Tijdens het afzinken wordt het element opgehangen aan vier kabels en worden vervolgens de ballasttanks gevuld met water. Er wordt van uitgegaan dat in alle vier de kabels een gemiddelde kracht van 500 kN aanwezig is, zodat een totaal gewicht van 2000 kN moet worden afgezonden. Hierop moet de hoeveelheid ballastwater worden bepaald. Er zal rekening gehouden moeten worden met de gelaagdheid van het water, vanwege een zouttong. Dit heeft invloed op de hoeveelheid ballastwater.

Fase 7 : Opleggen op steunpunten

Het element wordt, wanneer het op diepte is, op de tijdelijke opleggingen, een tandoplegging, met twee consoles in de zinkvoeg aan de primaire zijde en twee vizelpennen ter plaatse van de buitenwand aan de andere zijde, geplaatst. De zinkvoeg wordt daarna leeggepompt en het element wordt extra geballast om opdrijfkrachten ten gevolge van scheepvaart, onderstromen en variaties in het zoutgehalte op te vangen.

Fase 8 : Opleggen volgend element

Door het ondersteunen van het volgende element zal aan de secundaire zijde een extra belasting op het tunnelement werken, omdat het element nog niet is afgelaten op het onderstroomzand.

Fase 9 : Onderstromen

Het onderstromen van het element kan op twee tijdstippen plaatsvinden, direct na oplegging (fase 7) of na het opleggen van het volgende element (fase 8). Met beide situaties wordt rekening gehouden.

Fase 10 : Afwerking

Na het onderstromen van het volgende element kan het element afgelaten worden op het onderstroomzand. Na verwijderen van de vizels en afdichten van openingen kan de voorspanning worden doorgeslepen. Vervolgens wordt de zinksleuf aangevuld en kan worden begonnen met afbouwwerkzaamheden.

7.2.2 belastinggevallen

De verschillende belastingen die in de fasen van invloed zijn op de buigende momenten worden voor iedere fase in bijlage 9 berekend, hier wordt volstaan met het vermelden van deze belastingen.

- Eigengewicht plus uitrusting (kopschotten)
- Ballastbeton en -water
- Opwaartse waterdruk
- Golfbelastingen en sleepbelastingen
- Verticale waterbelasting voor het kopschot
- Moment door kopwater
- Afzinkuitrusting
- Reactie Gina-profiel
- Scheepvaart
- Oplegging volgend element
- Onderstromen

7.2.3 Resultaten

In bijlage 9 staan de berekeningen van de verschillende belastingen die gelden voor de verschillende fasen. De resultaten zijn in tabel 7.1 naast elkaar gezet.

fase	Positief moment (trek boven)	Negatief moment (trek onder)	Plaats in de doorsnede
1	63200 kNm	-	1/2 L
2	90500 kNm	-	1/2 L
3	73400 kNm	-	1/2 L
4 transport	190000 kNm	19100	1/2 L
5	80800 kNm	-	1/2 L
6	85300 kNm	-	1/2 L
7	53100 kNm	34100 kNm	1/2 L (1/4 L)
8	52300 kNm	31100 kNm	5/6 L (1/4 L)
9	73100 kNm	36400 kNm	1/2 L(1/4 L)

Tabel 7.1 Resultaten moment-berekeningen voor elke fase

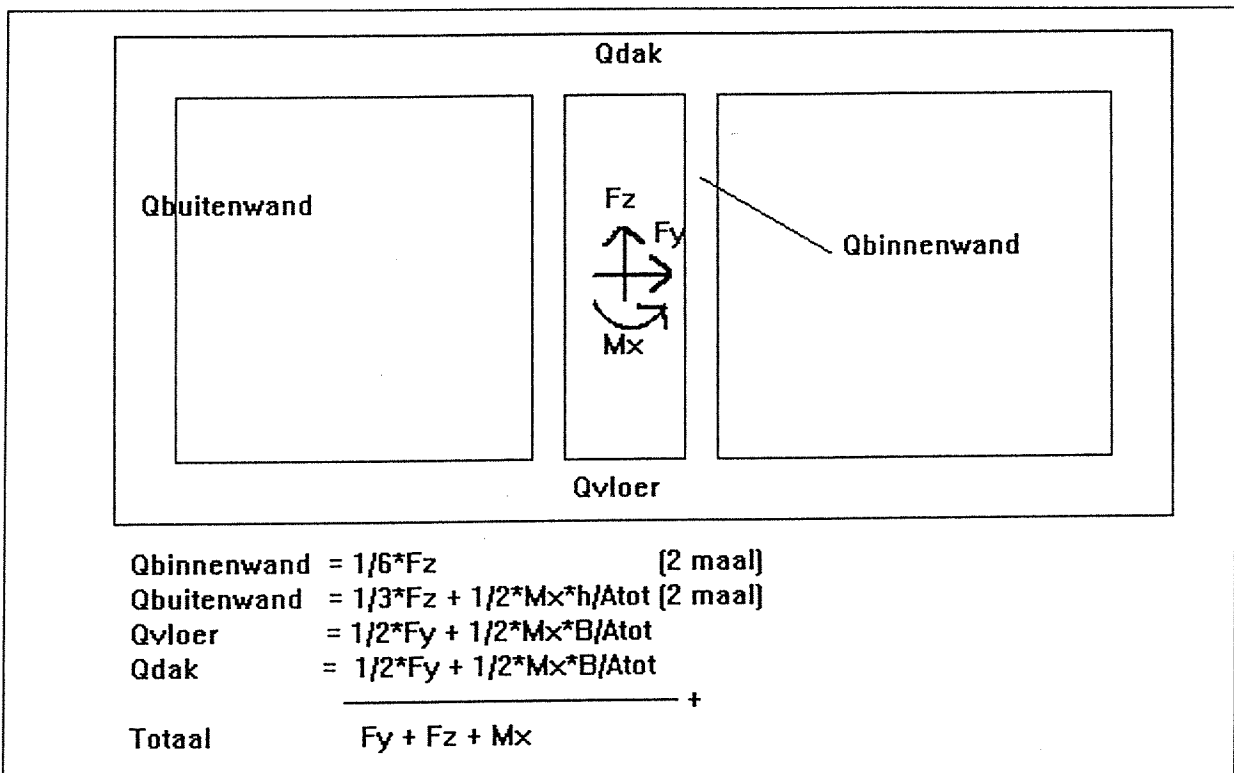
De grootste positieve momenten en negatieve momenten op een 1/2 L komen dus voor tijdens transport over zee. De voorspanning hoeft dus niet nog worden aangepast omdat de momenten uit fase 4, waarbij de voorspanning is bepaald, maatgevend zijn.

7.3 Wringing

Er is getracht de voorspanning te optimaliseren naar de buigende momenten veroorzaakt door de golfbelastingen. Door de golfbelastingen ontstaan ook dwarskrachten alsmede wringende momenten in de constructie. In deze paragraaf zal worden bekeken of de tunnelementen de afschuifkrachten op kunnen nemen.

Voor de berekeningen moet onderscheid worden gemaakt in verticale (z-richting) dwarskracht en horizontale (y-richting) dwarskracht. De verticale dwarskracht wordt evenredig door de binnen- en buitenwanden opgenomen, de horizontale dwarskracht evenredig door het dak en de vloer, zie figuur 7.1.

Voor de berekening van de opneembare schuifkrachten wordt weer onderscheid gemaakt tussen de gebruiks- en bezwijkfase.



Figuur 7.1 Op te nemen dwarskrachten voor vloer, dak en wanden

7.3.1 Gebruiksfase

Dwarskracht in z-richting (wanden)

Voor de schematisatie van de dwarsdoorsnede zie figuur 7.1. De belasting voor de dwarskracht in z-richting bestaat uit de volgende vier componenten :

- Dwarskracht door de stilwaterbelasting, uit de schematisatie van fase 3 uit bijlage 9 is bepaald dat de dwarskracht door het eigengewicht voor de doorsneden op 1/2 L respectievelijk 1/4 L gelijk is aan

$$1/2 L \quad Q_{eg} = 0 \text{ kN}$$

$$1/4 L \quad Q_{eg} = -1300 \text{ kN}$$

- Dwarskracht als gevolg van de voorwaartse snelheid, uit metingen volgt voor de dwarskracht

$$1/2 L \quad Q_v = 500 \text{ kN}$$

$$1/4 L \quad Q_v = -1000 \text{ kN}$$

- Dwarskracht F_z veroorzaakt door de golfbelasting zowel positief als negatief

- Dwarskracht door het wringend moment M_x veroorzaakt door de golfbelasting zowel positief als negatief

De dwarskracht in z-richting wordt evenredig door de buiten en binnenwanden opgenomen. Dit betekent per buitenwand $Q_{Fz} = 1/3 F_z$.

Het wringend moment wordt evenredig door de buitenwanden opgenomen. Voor één buitenwand betekent dit

$$Q_{M_x} = \frac{M_x \cdot h}{2 \cdot A_{tot}} = \frac{M_x \cdot 5,94}{2 \cdot 29,25 \cdot 6,94} = 14,63 \cdot 10^{-3} \cdot M_x$$

De gecombineerde werking van F_z en M_x is afhankelijk van de invalshoeken van de golven. In de onderstaande tabel staan de waarden van de krachten en momenten voor verschillende invalshoeken. De waarden van M_x en F_z zijn overgenomen uit het onderzoek van het MARIN.

$1/3 F_z + 14,63 \cdot 10^{-3} M_x$ (kN)	μ	Doorsnede L/2	Doorsnede L/4
	180°	733 + 101 = 834	<u>1200 + 86 = 1286</u>
	150°	<u>583 + 431 = 1014</u>	950 + 287 = 1237
	120°	250 + 689 = 939	517 + 531 = 1048

Tabel 7.2 Waarde van de dwarskracht bij gecombineerde werking verticale kracht en wring moment (de onderstreepte waarden zijn maatgevend)

Voor de doorsnede op de helft van de lengte geldt dan voor de maximale dwarskracht

$$Q_{wand}(1/2L) = \frac{1}{3} Q_v + Q_{F_z} + Q_{M_x} = 1/3 \cdot 500 + 1014 = 1180 \text{ kN}$$

Voor de doorsnede op een kwart van de lengte geldt dan voor de maximale dwarskracht

$$Q_{wand}(1/4L) = \frac{1}{3} Q_{eg} + \frac{1}{3} Q_v + Q_{F_z} + Q_{M_x} = 1/3 \cdot 1300 + 1/3 \cdot 1000 + 1286 = 2053 \text{ kN}$$

De binnenwanden werken niet mee aan het opvangen van het wringmoment maar wel voor het opvangen van de dwarskracht. Voor de binnenwanden geldt dan op de helft van de lengte

$$Q_{binnenwand}(1/2L) = \frac{1}{6} Q_v + \frac{1}{2} Q_{F_z} = 500/6 + 733/2 = 450 \text{ kN}$$

en op een kwart van de lengte

$$Q_{binnenwand}(1/4L) = \frac{1}{6} Q_{eg} + \frac{1}{6} Q_v + \frac{1}{2} Q_{F_z} = 1300/6 + 500/6 + 1200/2 = 983 \text{ kN}$$

Dwarskracht in y-richting (vloer en dak)

De belasting in y-richting bestaat uit de dwarskracht F_y veroorzaakt door de golven en een aandeel van het wringmoment M_x veroorzaakt door de golven.

De dwarskracht in y-richting wordt evenredig door de vloer en dak opgenomen. Dit betekent per vloer cq. dak $Q_{F_y} = 1/2 F_y$.

Het wringend moment wordt evenredig door de vloer en het dak opgenomen.

$$Q_{M_x} = \frac{M_x \cdot h}{2 \cdot A_{tot}} = \frac{M_x \cdot 30,25}{2 \cdot 29,25 \cdot 6,94} = 74,5 \cdot 10^{-3} \cdot M_x$$

Hoofdstuk 7 Deterministische dimensionering van de tunnelementen

De gecombineerde werking van F_y en M_x is afhankelijk van de invalshoeken van de golven. In de onderstaande tabel staan de waarden van de krachten en momenten voor verschillende invalshoeken. De waarden van M_x en F_y zijn overgenomen uit het onderzoek van het MARIN.

$1/2 F_y + 74,5 \cdot 10^{-3}$ M_x (kN)	μ	Doorsnede L/2	Doorsnede L/4
	180°	173 + 526 = 699	198 + 451 = 649
	150°	1000 + 2255 = 3255	1075 + 1503 = 2578
	120°	<u>750 + 3157 = 3907</u>	<u>1025 + 2781 = 3806</u>

Tabel 7.3 Waarde van de dwarskracht bij gecombineerde werking horizontale kracht en wring moment (de onderstreepte waarden zijn maatgevend)

De onderstreepte waarden gelden voor zowel het dak als de vloer.

Opneembare dwarskracht door de voorspanning bij de voeg op 1/2 L

Uit de betontechnologie is bekend dat bij een aanwezige drukspanning de dwarskrachtcapaciteit verhoogd kan worden met

$$\tau_1 = 0,15 \cdot \sigma \quad [7.1]$$

Voor de vloer en het dak geldt dat er altijd een drukspanning van 0,3 N/mm² aanwezig is (eis in de gebruiksfase). Voor de wanden mag een gemiddelde waarde worden genomen, de laagste van de volgende twee gevallen :

(1) Bovenin wordt de minimale drukspanning bereikt:

$$\sigma_b = -0,3 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_o = -M_{eg}/W_o - M_{golf}/W_o - F_p/A + F_p \cdot e/W_o =$$

$$= -73400/245,7 - 100300/245,7 - 74000/92 + 74000 \cdot 1,3/245,7 = -1,12 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{gem} = -0,71 \text{ N/mm}^2$$

(2) Onderin wordt de minimale drukspanning bereikt:

$$\sigma_b = -0,3 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_o = -M_{eg}/W_b + M_v/W_b - M_{golf}/W_b - F_p/A - F_p \cdot e/W_b =$$

$$= 73400/209 + 25000/209 - 100300/209 - 74000/92 - 74000 \cdot 1,3/209 = -1,27 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{gem} = -0,78 \text{ N/mm}^2$$

Met formule [7.1] volgt dat voor de opneembare dwarskracht geldt

$$T_{opn} = 0,15 \cdot \sigma_{gem} \cdot h \cdot l \quad [7.2]$$

Voor de verschillende onderdelen volgt hieruit:

$$-T_{opn,dak} = 0,15 \cdot 0,3 \cdot 1050 \cdot 29750 = 1400 \text{ kN}$$

$$-T_{opn,vloer} = 0,15 \cdot 0,3 \cdot 1060 \cdot 29750 = 1420 \text{ kN}$$

$$-T_{opn,buitenwand} = 0,15 \cdot 0,71 \cdot 1000 \cdot 6940 = 739 \text{ kN}$$

$$-T_{opn,binnenwand} = 0,15 \cdot 0,71 \cdot 500 \cdot 5940 = 316 \text{ kN}$$

De opneembare dwarskrachten zijn kleiner dan de dwarskrachten die in de constructie door de belastingen aanwezig zijn. De resterende dwarskracht kan eventueel opgenomen worden door de tandconstructie van de voeg voor de resterende dwarskracht geldt, voor de verschillende onderdelen:

- dak	$T_{rest} = 3907 - 1400 = 2507 \text{ kN}$
- vloer	$T_{rest} = 3907 - 1420 = 2487 \text{ kN}$
- buitenwand	$T_{rest} = 1180 - 739 = 441 \text{ kN}$
- binnenwand	$T_{rest} = 450 - 316 = 134 \text{ kN}$

De tandconstructie van de Wijkertunnel kan een dwarskracht 337 kN per strekkende meter opnemen (ontwerpberekeningen Wijkertunnel). Dit betekent dat de dwarskrachtcapaciteit van de binnenwanden voldoet voor de gebruiksfase. Voor de buitenwanden, het dak en de vloer is dit echter niet het geval.

Om de krachten toch op te kunnen nemen moet er dus een extra voorziening worden aangebracht.

7.3.2 Vertande voegconstructie

Om de aanwezige dwarskrachten in buitenwanden, dak en vloer op te kunnen nemen wordt de voeg voorzien van een vertanding. Rekenregels voor de vertande voeg zijn in CUR-rapport 136 'Voegen in geprefabriceerde vloeren' weergegeven. Het gunstige effect van de normaaldrukkracht is in deze verdisconteerd, zodat de totale dwarskracht door de voeg moet worden opgenomen. Figuur 7.2 geeft een voorbeeld van de vertande voeg.

Een voegconstructie is vertand wanneer de hoek α tussen de hellende vlakken van de tanden en de normaal op de voeg kleiner of gelijk is aan 30° indien de hoogte t van de tand groter is dan 10 mm. Andere eisen ten aanzien van de afmetingen zijn :

- Om verbrijzelen van de tand te voorkomen moet gelden : $\lambda = h_d/t \leq 6$ en
- Om afschuiven langs schuine voegvlakken te voorkomen dient $\alpha \leq \arctan(f) + \arctan(N/T)$ waarin f = wrijvingscoëfficiënt
 N = normaaldrukkracht
 T = dwarskracht

Hier is gekozen voor een vertande voegconstructie met de volgende afmetingen :

h_d	= 120 mm
t	= 20 mm
a	= 217 mm
α	= 30°

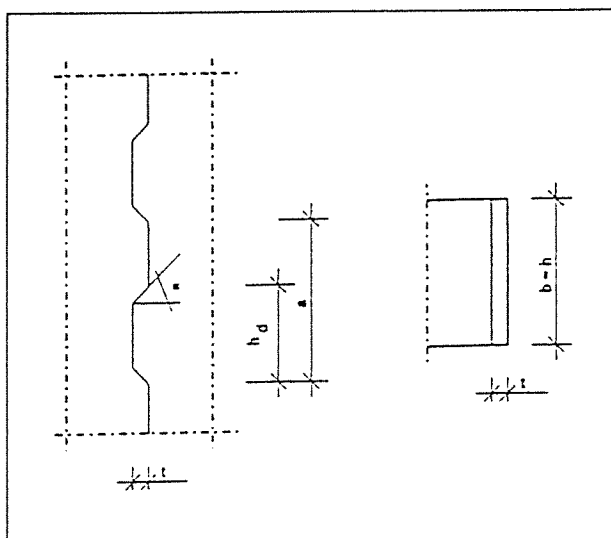
De breedte van de vertanding in de buitenwand bedraagt, gerekend vanaf de binnenkant tot 40 mm van de dilatatievoeg, $400 + (300-40) = 660 \text{ mm}$ over een lengte van 5,94 m. Voor vloer en dek is de minimale breedte van 360 mm aangehouden met een lengte van 29,25 m. De schuifsterkte van de voeg kan worden berekend met de volgende formule :

$$\tau_u = 0,06 \cdot f'_b + f \cdot (\sigma' + \omega \cdot f_s) \quad \text{als} \quad 0,02 \cdot f'_b < (\sigma' + \omega \cdot f_s) \leq 0,3 \cdot f'_b \quad [7.3]$$

$$\tau_u = (3 + f) \cdot (\sigma' + \omega \cdot f_s) \quad \text{als} \quad (\sigma' + \omega \cdot f_s) \leq 0,02 \cdot f'_b$$

Waarin :

- f = wrijvingscoëfficiënt, 0,9 voor vertande voegen
- σ' = normaaldrukspanning als gevolg van een uitwendige normaaldrukkracht
- ω = wapeningspercentage van de wapening loodrecht op de voeg



Figuur 7.2 De vertande voeg

f_s = rekenwaarde van de treksterkte van het betonstaal
 f'_b = rekenwaarde voor de betondruksterkte, 28 N/mm²

Buitenwanden bij de voeg op 1/2 L

De gemiddelde drukspanning in de wanden is gelijk aan $\sigma_{gem} = 0,71$ N/mm². Zodat de opneembare schuifspanning gelijk is aan

$$\frac{(\sigma' + \omega \cdot f'_s)}{f'_b} = \frac{0,71}{28} = 0,025 > 0,02 \text{ ----}$$

$$\tau_u = 0,06 \cdot 28 + 0,9 \cdot (0,71 + 0 \cdot f'_s) = 2,32 \text{ N/mm}^2$$

Omdat de tandconstructie per wand maar over 120 mm (h_d) van de 217 mm (a) aan de wand vastzit geldt voor de toelaatbare dwarskracht :

$$T_u = \frac{120}{217} \cdot \frac{\tau_u \cdot b \cdot h}{\gamma} = \frac{120}{217} \cdot \frac{2,32 \cdot 660 \cdot 5940}{1,7} = 2959 \text{ kN},$$

γ = veiligheidsfactor

De optredende dwarskracht in de buitenwanden ter plaatse van de voeg op 1/2 L is maximaal gelijk aan 1180 kN. De vertande voegconstructie voldoet.

Dak en vloer bij de voeg op 1/2 L

De gemiddelde drukspanning in het dak en de vloer is gelijk aan $\sigma_{gem} = 0,3$ N/mm². Zodat de opneembare schuifspanning gelijk is aan

$$\frac{(\sigma' + \omega \cdot f'_s)}{f'_b} = \frac{0,3}{28} = 0,011 < 0,02 \text{ ----}$$

$$\tau_u = (3 + 0,9) \cdot (0,3 + 0) = 1,17 \text{ N/mm}^2$$

De toelaatbare dwarskracht in het dak en de vloer is dan :

$$T_u = \frac{120}{217} \cdot \frac{\tau_u \cdot b \cdot h}{\gamma} = \frac{120}{217} \cdot \frac{1,17 \cdot 360 \cdot 29250}{1,7} = 4008 \text{ kN}$$

De optredende dwarskracht in de het dak en de vloer ter plaatse van de voeg op 1/2 L is maximaal gelijk aan 3907 kN. De vertande voegconstructie voldoet.

7.3.3 Controle bezwijkfase

Voor de bezwijkfase moet de voorspanning gedeeld worden door de materiaalfactor $\gamma_m = 1,1$ en de belastingen vermenigvuldigd met de belastingsfactor $\gamma_g = 1,2$ (0,9 bij gunstige werking). De spanningen onder en bovenin het afzinkelement worden bepaald met behulp van formule [5.11]. Twee situaties moeten daarbij worden vergeleken, te weten de situatie waarbij boven in het element de maximale spanning wordt bereikt (maatgevend voor het dak) en de situatie waarbij onderin de maximale spanning wordt bereikt (maatgevend voor de vloer). Maatgevend voor de wanden is het hoogste gemiddelde van de twee situaties. Formule [5.11] wordt hier voor de twee situatie nog eens herhaald

$$\sigma_b = \gamma_g \left(\frac{M_{eg}}{W_b} + \frac{M_v}{W_b} \right) + \frac{M_{golf}}{W_b} - \frac{1}{\gamma_m} \left(\frac{Fp_{tot}}{A_b} + \frac{Fp_{tot} \cdot e_{tot}}{W_b} \right) \quad [7.4]$$

$$\sigma_o = -\gamma_g \left(\frac{M_{eg}}{W_o} \right) - \frac{M_{golf}}{W_o} - \frac{1}{\gamma_m} \left(\frac{Fp_{tot}}{A_b} - \frac{Fp_{tot} \cdot e_{tot}}{W_b} \right)$$

Invullen van alle waarden voor situatie 1 geeft

$$\sigma_b = 1,2 \cdot \left(\frac{73400}{209} + \frac{25000}{209} \right) + \frac{133400}{209} - \frac{1}{1,1} \left(\frac{74000}{92} + \frac{74000 \cdot 1,3}{209} \right) = -0,425 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_o = -0,9 \cdot \left(\frac{73400}{245,7} \right) - \frac{133400}{245,7} - \frac{1}{1,1} \left(\frac{74000}{92} - \frac{74000 \cdot 1,3}{245,7} \right) = -1,19 \text{ N/mm}^2$$

en voor situatie 2 :

$$\sigma_b = 1,2 \cdot \left(\frac{73400}{209} + \frac{25000}{209} \right) - \frac{133400}{209} - \frac{1}{1,1} \left(\frac{74000}{92} + \frac{74000 \cdot 1,3}{209} \right) = -1,4 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_o = -0,9 \cdot \left(\frac{73400}{245,7} \right) + \frac{133400}{245,7} - \frac{1}{1,1} \left(\frac{74000}{92} - \frac{74000 \cdot 1,3}{245,7} \right) = -0,1 \text{ N/mm}^2$$

Hieruit volgt voor de spanningen in de verschillende onderdelen :

$$\begin{aligned} -\sigma_{dak} &= -0,425 \text{ N/mm}^2 \\ -\sigma_{vloer} &= -0,1 \text{ N/mm}^2 \\ -\sigma_{buitenwand} &= -0,75 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Voor de dwarskrachtbelastingen van de golven wordt bij een overschrijdingskans van 10^{-4} de volgende waarden verkregen voor

$$\begin{aligned} -F_y &= 460 \text{ kN} \\ -F_z &= 3300 \text{ kN} \\ -M_x &= 8500 \text{ kN} \end{aligned}$$

Buitenwanden

De normaaldrukspanning in de buitenwanden is gelijk aan $0,75 \text{ N/mm}^2$. Zodat de opneembare schuifspanning gelijk is aan

$$\frac{(\sigma' + \omega \cdot f'_s)}{f'_b} = \frac{0,75}{28} = 0,027 > 0,02 \text{ ----}$$

$$\tau_u = 0,06 \cdot 28 + 0,9 \cdot (0,75 + 0 \cdot f'_s) = 2,36 \text{ N/mm}^2$$

De toelaatbare dwarskracht is dan gelijk aan:

$$T_u = \frac{120}{217} \cdot \frac{\tau_u \cdot b \cdot h}{\gamma} = \frac{120}{217} \cdot \frac{2,36 \cdot 660 \cdot 5940}{1,2} = 4264 \text{ kN}$$

De optredende dwarskracht in de buitenwanden ter plaatse van de voeg op $1/2 L$ is gelijk aan

$$1,2 \cdot \frac{F_v}{3} + \frac{F_z}{3} + 14,63 \cdot 10^{-3} \cdot M_x = 1,2 \cdot \frac{500}{3} + \frac{3300}{3} + 14,63 \cdot 10^{-3} \cdot 8500 = 1424 \text{ kN}$$

De vertande voegconstructie voldoet.

Dak

De normaaldrukspanning in het dak is gelijk aan 0,425 N/mm². Zodat de opneembare schuifspanning gelijk is aan

$$\frac{(\sigma' + \omega \cdot f'_s)}{f'_b} = \frac{0,425}{28} = 0,015 < 0,02 \text{ ----}$$

$$\tau_u = (3+0,9) \cdot (0,425+0) = 1,66 \text{ N/mm}^2$$

De toelaatbare dwarskracht is dan gelijk aan:

$$T_u = \frac{120}{217} \cdot \frac{\tau_u \cdot b \cdot h}{\gamma} = \frac{120}{217} \cdot \frac{1,66 \cdot 360 \cdot 29250}{1,2} = 8055 \text{ kN}$$

De optredende dwarskracht in het dak ter plaatse van de voeg op 1/2 L is gelijk aan

$$\frac{F_y}{2} + 74,5 \cdot 10^{-3} \cdot M_x = \frac{460}{2} + 74,5 \cdot 10^{-3} \cdot 8500 = 863 \text{ kN}$$

De vertande voegconstructie voldoet.

Vloer

De normaaldrukspanning in de vloer is gelijk aan 0,1 N/mm². Zodat de opneembare schuifspanning gelijk is aan

$$\frac{(\sigma' + \omega \cdot f'_s)}{f'_b} = \frac{0,1}{28} = 0,004 < 0,02 \text{ ----}$$

$$\tau_u = (3+0,9) \cdot (0,1+0) = 0,39 \text{ N/mm}^2$$

De toelaatbare dwarskracht is dan gelijk aan:

$$T_u = \frac{120}{217} \cdot \frac{\tau_u \cdot b \cdot h}{\gamma} = \frac{120}{217} \cdot \frac{0,39 \cdot 360 \cdot 29250}{1,2} = 1892 \text{ kN}$$

De optredende dwarskracht in het dak ter plaatse van de voeg op 1/2 L is gelijk aan

$$\frac{F_y}{2} + 74,5 \cdot 10^{-3} \cdot M_x = \frac{460}{2} + 74,5 \cdot 10^{-3} \cdot 8500 = 863 \text{ kN}$$

De vertande voegconstructie voldoet.

7.4 Resumé

Uit de berekeningen van § 7.2 blijkt dat de buigende momenten bij de doorsnede op de helft van de lengte uit fase 4 maatgevend zijn voor de dimensionering van de voorspanning. De neerbuigende momenten zijn voor sommige fasen groter dan die voor fase 4 (zie tabel 7.1), deze momenten komen echter niet voor ter plaatse van de maatgevende doorsnede op de helft van de lengte. Uit tabel 5.5 blijkt dat met de toegepaste voorspanning berekend voor de doorsnede op $1/2 L$ de grotere neerbuigende momenten bij andere doorsneden ook opgenomen kunnen worden.

Uit de berekeningen van de dwarskrachtcapaciteit blijkt de toegepaste voorspanning niet voldoende voor het opnemen van de dwarskracht en het wringend moment in de voegen. Dit betekent dat de gecombineerde werking van dwarskracht en wrijving maatgevend is voor de dimensionering van de voorspanning. Om de afschuifcapaciteit van de constructie te vergroten is gebruik gemaakt een vertande voegconstructie. Voor de voeg bij de doorsnede $1/2 L$ is vervolgens gecontroleerd of de afschuifcapaciteit van het element voldeed. Dit blijkt inderdaad het geval. Door het toepassen van een vertande voeg worden de buigende momenten dus maatgevend voor de dimensionering van de voorspanning.

De afschuifbelasting voor de voeg bij de doorsnede op een kwart van de lengte is groter dan die van de gecontroleerde voeg. De vertande voeg is hier niet gecontroleerd. De benodigde voorspanning is, in dit onderzoek, bepaald voor de maatgevende doorsnede op de helft van de lengte. De voorspanning bij de doorsnede op een kwart van de lengte kan, voor het opnemen van de buigende momenten, lager zijn. Omdat deze voorspanning niet berekend is, kan de dwarskrachtcapaciteit van de voeg niet worden bepaald. Echter bij de ontwerpberekeningen van de Wijkertunnel is de capaciteit van deze voeg, met een lagere voorspanning, wel bepaald en bleek dat de voeg ook voldeed. Wanneer de berekende voorspanning voor de doorsnede op de helft van de lengte ook wordt toegepast voor de doorsnede op een kwart voldoet de vertande voegconstructie zeker. De controle van de afschuifcapaciteit van het tunnelement is gedaan voor een tunnallengte van 96 meter. Bij langere tunnelementen zal de dwarskracht in principe groter worden. Er zal dan moeten worden bekeken of de dwarskrachtcapaciteit van het element nog voldoet.

De voorspanning is gedimensioneerd aan de hand van buigende momenten op de helft van de lengte van het element voor het transport over zee. Deze situatie is, wanneer gebruik wordt gemaakt van vertande voegconstructies, maatgevend.

De benodigde voorspanning is bepaald in § 5.5 en is gelijk aan

$$F_p = 74.000 \text{ kN met een excentriciteit } e_p = 1,3 \text{ m}$$

Om de hoeveelheid voorspanning in het dak en de vloer te bepalen wordt aangenomen dat de voorspanning in het midden van de hoogte van het dak respectievelijk de vloer ligt. Dit betekent dat

$$\begin{aligned} - e_b &= 3,825 \text{ m} \\ - e_o &= 3,170 \text{ m} \end{aligned}$$

Er moet gelden

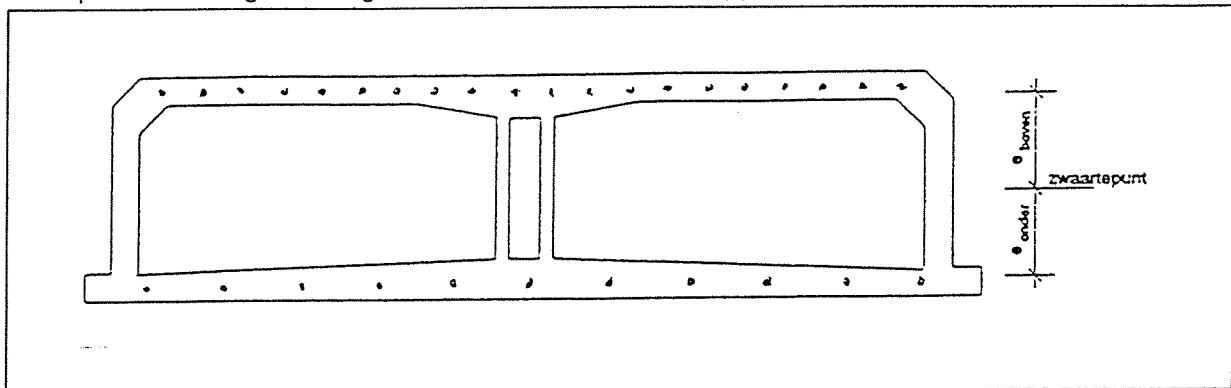
$$\begin{aligned} F_{p_{\text{boven}}} + F_{p_{\text{onder}}} &= F_p \text{ en} \\ F_{p_{\text{boven}}} * e_b - F_{p_{\text{onder}}} * e_o &= F_p * e_p \end{aligned}$$

zodat voor de voorspanning onder en boven in het tunnelement geldt :

$$\begin{aligned} - F_{p_{\text{onder}}} &= 26712 \text{ kN,} \\ - F_{p_{\text{boven}}} &= 47288 \text{ kN.} \end{aligned}$$

Dit betekent dat in het dak van het element 20 voorspankabels nodig zijn en in de vloer 11

voorspankabels. Figuur 7.3 geeft een voorbeeld van de ligging van de voorspankabels.



Figuur 7.3 Ligging voorspankabels in de doorsnede op de helft van de tunnellengete

8 Conclusies en aanbevelingen

Het onderzoek naar het zeetransport van de afzinkelementen van de Wijkertunnel heeft zich gericht op de benodigde voorspanning voor het opvangen van de golfbelastingen. Golven zijn te beschrijven als een stochastisch proces, waardoor een probabilistische aanpak van het probleem nodig is. Hier wordt uiteengezet welke conclusies uit het onderzoek getrokken kunnen worden.

8.1 Conclusies

Bij het onderzoek is gebruik gemaakt van de lineaire striptheorie (§ 3.6) voor de berekening van de overdrachtsfunctie van golfuitwijking naar golfbelastingen. In de theorie zijn enkele aannames gedaan ter vereenvoudiging van de berekeningen. Zo is voor het gehele transport over zee uitgegaan van een constante waterdiepte van 25 meter. Het programma Seaway dat gebruik maakt van de lineaire striptheorie voor de berekening van de bewegingen van het element gaat uit van oneindig hoge wanden, voor de Wijkertunnel met een vrijboord van slechts 0,4 meter tijdens zeetransport klopt deze aanname niet, omdat er in werkelijkheid golven over het dak van het element slaan. De overdrachtsfuncties, bepaald met de lineaire striptheorie, zijn vergeleken met de overdrachtsfuncties verkregen uit modelproeven, om de significante buigende momenten voor de Wijkertunnel te bepalen, uitgevoerd door het MARIN. Hieruit blijkt dat ondanks de gedane aannames, zoals de schematisatie van de dwarsdoorsnede, de overdrachtsfuncties bepaald met de lineaire striptheorie de werkelijkheid zeer goed beschrijven, zie de figuren van bijlage 6.

Voor de bepaling van de verdeling van karakteristieke golven op de Noordzee is gebruik gemaakt van meetwaarden van de karakteristieke golfhoogte en piekperiode van twee meetstations, te weten het platform Euro-0 en het meetstation bij IJmuiden, over een periode van 13 jaar voor de zomermaanden mei tot en met augustus. Door deze meetwaarden zijn verdelingen gefit die het best de werkelijke benaderen. De empirische verdelingen beschrijven de lange termijn-verdelingen van karakteristieke golven op de Noordzee. De verdeling van de piekperiode T_p , de golfsteilheid s_p en de invalshoek ϕ zijn onafhankelijk van elkaar, zodat door vermenigvuldiging van deze verdelingen de gezamenlijke kansdichtheidsfunctie wordt verkregen. De invalshoek heeft een uniforme verdeling terwijl de verdelingen voor T_p en s_p beschreven worden door normale verdelingen met respectievelijk $\mu_T = 5,326$ sec, $\sigma_T = 1,034$ sec. en $\mu_s = 1,9$ %, $\sigma_s = 0,9$ %.

Met de significante momenten, bepaald uit de overdrachtsfuncties, voor karakteristieke golven en hun kans op voorkomen is de faalkans als functie van de hoeveelheid voorspanning bepaald aan de hand van eisen ten aanzien van de gebruiksfase en de bezwijkfase voor het transport. Het blijkt dat de eisen voor de gebruiksfase maatgevend zijn. Uit de berekeningen blijkt dat een voorspanning F_p van 74.000 kN met een excentriciteit van $e_p = 1,3$ meter nodig is. De toegepaste voorspanning bij de Wijkertunnel bedroeg 69.000 kN met een excentriciteit van 1,32 m. Voor het transport van de Wijkertunnel is men uitgegaan van voorspellingen van de te verwachten golfcondities en niet van de lange-termijn verdeling van de golven. De faalkans is hierdoor kleiner omdat bij voorspellingen van golfcondities die de ontwerp golf overschrijden niet wordt uitgevaren. Het verschil (7 %) is echter gering zodat voor een eerste benadering van de berekeningen kan worden uitgegaan van de lange-termijn verdeling.

Met de kans op falen in de bezwijkfase en de totale kosten van bezwijken is de benodigde voorspanning voor het opvangen van de golfbelastingen geoptimaliseerd. De optimale golfvoorspanning bleek lager te zijn dan de toegepaste voorspanning. De optimale voorspanning voor het opvangen van de golfbelastingen is gelijk aan 33.000 kN met een faalkans in de bezwijkfase

gelijk aan $6,29 \cdot 10^4$, in plaats van de toegepaste golfvoorspanning van 54.000 kN bij een bezwijkkans van $0,97 \cdot 10^4$. De totale kostenbesparing bedraagt fl 54.000,-. Er is al geconcludeerd dat de gebruiksfase maatgevend is boven de bezwijkfase. De optimale voorspanning voor de bezwijkfase betekent echter dat de kans op overschrijden van de eisen in de gebruiksfase 50 % bedraagt. De werkbaarheid wordt hierdoor te klein. De kosten van vertraging die hierdoor worden opgelopen zullen de bespaarde kosten op de voorspanning teniet doen. De optimalisatie van de voorspanning zal aan de hand van kosten voor wachttijden voor de gebruiksfase moeten geschieden en niet aan de hand van faalkosten in de bezwijkfase.

De Wijkertunnel is de eerste tunnel waarvan de elementen over zee zijn getransporteerd, de elementlengte is relatief kort gehouden omdat geen gegevens over de belastingen bekend waren. Uit de optimalisatie van de elementlengte blijkt echter dat wanneer in plaats van zes elementen, gebruik gemaakt zou zijn van vijf elementen bij gelijke faalkansen minder voorspanning nodig is per element, met andere woorden de faalkans bij een elementlengte van 115 meter is kleiner dan de faalkans bij een elementlengte van 96 meter.

Omdat de kosten van een extra transport en afzinkoperatie veel groter zijn dan de besparing op de kosten van de voorspanning voor minder lange elementen is een zolang mogelijk element economisch het voordeligst. Voor de Wijkertunnel is de beperkende randvoorwaarde voor de lengte de manoeuvreerbaarheid in het bouwdok bij Barendrecht. De maximale lengte van de elementen waarbij nog uit het bouwdok gevaren kan worden bedraagt 144 meter. De totale kostenbesparing bij toepassing van 4 elementen van 144 meter ten opzichte van 6 elementen van 96 meter bedraagt fl 2,6 mln gulden.

Uit de kostenvergelijking van de verschillende lengtes voor de Wijkertunnel blijkt dat voor tunnels in het algemeen geldt dat het transport over zee niet maatgevend is voor de maximaal toepasbare lengte van de elementen. De randvoorwaarden die door andere oorzaken aan de lengte worden gesteld, zoals manoeuvreerbaarheid, zullen maatgevend zijn voor de maximale lengte. Dit komt doordat de extra kosten voor de voorspanning bij langere elementen niet opweegt tegen de kostenbesparing van het verkleinen van het aantal transporten en afzinkoperaties.

In eerste instantie blijkt de voorspanning niet voldoende voor het opnemen van de dwarskrachten die optreden tijdens het transport over zee. De voorspanning zou dan moeten worden geoptimaliseerd, voor het maatgevende bezwijkmechanisme, op afschuifing van de voeg. Voor de Wijkertunnel is gebruik gemaakt van een vertande voeg voor het opnemen van de dwarskrachten. Door het toepassen van deze vertande voeg worden de buigende momenten, tijdens transport over zee, maatgevend voor de dimensionering van de voorspanning.

8.2 Aanbevelingen

In dit onderzoek is uitgegaan van een lange-termijn verdeling voor de golven op de Noordzee. Omdat voor de deining niet genoeg gegevens bekend waren om een goede verdeling te maken van de deiningshoogte, is uitgegaan van een vaste waarde voor de deiningshoogte. Wanneer echter zoals bij het transport van de Wijkertunnel wordt besloten om uit te varen op basis van voorspellingen, kan voor de deining de voorspelde waarde worden aangehouden. Dit werkt gunstig op de golfbelastingen omdat deining een hoge golfperiode bezit en de piek van het spectrum vaak samenvalt met de piek van de overdrachtsfuncties. Bij een lagere golfhoogte voor de deining zou dit een aanzienlijke reductie van de benodigde voorspanning kunnen betekenen.

Uit de conclusies blijkt al dat de golfvoorspanning geoptimaliseerd dient te worden aan de hand van criteria voor wachttijden voor de gebruiksfase van het zeetransport. Omdat de kosten van extra voorspanning relatief laag zijn, kan met een hogere voorspanning de werkbaarheid worden vergroot, waardoor de kosten, voor wachten bij uitstel van een transport, afnemen. Hierdoor kan het ook mogelijk worden de voorgeschreven transportperiode, zomermaanden mei

tot en met augustus voor de Wijkertunnel, uit te breiden tot een langere periode.

Voor de Wijkertunnel zijn de buigende momenten maatgevend voor de dimensionering van de voorspanning. Dit komt doordat voor het opvangen van de dwarskrachten gebruik is gemaakt van een vertande voeg. Bij het toepassen van langere elementen zal gecontroleerd moeten worden of de afschuifcapaciteit van de elementen, met vertande voeg, voldoet.



Symbolenlijst

Latijnse letters

A_b	betonoppervlak
A_w	waterdoorsnijdend oppervlak
A_x	oppervlak dwarsdoorsnede tunnel
A_{tot}	omhullende oppervlak dwarsdoorsnede
B	oppervlak ballastbeton, drukpunt
C	oppervlak constructiebeton
$C_{xx}(t)$	autocovariantie
$COV(xy)$	covariantie van x en y
D	transportduur
E	spectrum
$E[f(x)]$	verwachtingswaarde van $f(x)$
$E_{xx}(f)$	variantiespectrum
F	kracht
FeP	voorspanstaal
FK	Froude-Krylov kracht
F_p	voorspankracht benodigd voor de golfbelasting
$F_{p_{tot}}$	totale voorspankracht
F_{p_s}	significante voorspankracht
$F_x(x)$	kansverdelingsfunctie
G	zwaartepunt
H	oppervlak holle ruimte, golfhoogte
H_{e10}	deiningsgolfhoogte
H_{m0}	spectrale golfhoogte
$H_s, H_{1/3}$	significante golfhoogte
I_{yy}	traagheidsmoment om y-as
I_{zz}	traagheidsmoment om z-as
K	kosten
M	moment, metacentrum
M_a	momentamplitude
M_n	n^{de} -moment van $p(x)$
M_s	significante moment
L	tunnellengte
N	aantal golven tijdens transport over zee
N'_{zz}	hydrodynamische demping
$P(x)$	kans op gebeutenis x, verdelingsfunctie van x
Q	dwarskracht
$R_{yx}(f)$	syssteemspectrum
S_w	statisch moment
T	diepgang
T_{m02}	golfperiode
T_p	piekperiode
V	onderwatervolume
$VAR(x)$	variantie van x
W	weerstandsmoment
a, b	hydrodynamische coefficienten
e	excentriciteit
e_p	excentriciteit van de voorspanning
f	golffrequentie

Symbolenlijst

f_m	piejrequentie
f_{pu}	treksterkte van de voorspanning
f_{purep}	rekenwaarde van de treksterkte
$f_x(x)$	kansdichtheidsfunctie
g	zwaartekrachtversnelling
h	absolute verticale beweging, waterdiepte, tunnelhoogte
k	golfgetal
k_{xx}	dynamische traagheidsstraal in x-richting
m	massa
m_n	n^{de} -moment van het variantiespectrum
m'_{zz}	hydrodynamische massa
p	druk
$p(x)$	kansdichtheid van x
q	belasting
s_p	pieksteilheid
t	tijd
v	snelheid
x_b	lengte
y_b	breedte
y_w	waterdoorsnijdende breedte
z	verticale beweging
x,y,z	driedimensionale richtingen (lengte, breedte, diepte-hoogte)

Griekse letters

α	dimensieloze constante
α_n	fase
γ	factor
γ_0	vormparameter
Δ	verschil
ϵ	rek
θ	draaibeweging
λ	golflengte
μ	hoek
μ_x	verwachtingswaarde van x
ξ	golffitwijking
ξ_a	golfamplitude
ρ	dichtheid
σ	spanning
σ_{pw}	werkvoorspanning
σ_x	standaardafwijking van x
ϕ	golfinvalshoek
ω	hoekfrequentie

Literatuurlijst

- Afstudeerverslag 'Transport van tunnelementen over zee', R.R. Kuiper, TU Delft, 1993.
- Cement nr. 7 t/m 11, artikelen Wijkertunnel, cement, 1994.
- Cement XXX nr. 12 'Algemene inleiding over het bouwen van tunnels', div. auteurs, Cement, 1978.
- Collegedictaat a130/133 'Inleiding informatica', diverse auteurs, TU Delft, 1987.
- Collegedictaat b3 'Probabilistisch ontwerpen', Ir. A.C.W.M. Vrouwenvelder/Ir. J.K. Vrijling, TU Delft, 1986.
- Collegedictaat b78 'Windgolven', Prof.dr.ir. J.A. Battjes, TU Delft, 1992.
- Collegedictaat f9c 'Waterbouwkundige kunstwerken', Prof.ir. A. Glerum, TU Delft, 1992.
- Collegedictaat f30 'Probabilistisch ontwerpen in de waterbouwkunde', Prof.drs.ir. J.K. Vrijling, TU Delft, 1993.
- Collegedictaat g22 'Construction technology of concrete structures', Prof.ir. Ch.J. Vos/ing. H.C. Jager, TU Delft, 1994.
- Collegedictaat g23 'Voorgespannen Beton', Prof.dr.ir. J.C. Walraven/Ir. J.C. Galjaard, TU Delft, 1995.
- Collegedictaat g23b 'Uitvoeringstechnologie van betonconstructies', Prof.ir. Ch.J. Vos/ing. H.C. Jager, TU Delft, 1988.
- Collegedictaat x2-mt1 'Bewegingen van constructies in golven', Ir. J.M.J. Journée, TU Delft, 1992.
- 'Controle bezwijktoestand', Strukton Betonbouw, 1994.
- CUR-rapport 136 'Voegen in geprefabriceerde vloeren'.
- De Ingenieur 'Komende tien jaar verdubbeling aantal kilometer tunnel', J. van Kasteren, De ingenieur nr. 11, 1992.
- 'Dwarskracht in mootvoegen', Strukton Betonbouw, 1993.
- Land en water nr. 3 'Wijkertunnel over zee aangevoerd', Ing W. de Leeuw/Ing. J. van Vliet, 1996.
- Manual Seaway, Ir. J.M.J. Journée, TU Delft, 1992.
- MARIN report 211762-1-BT 'Wijkertunnel model tests: transport of a 96 m section, Maritime Research Institute Netherlands, 1993.
- NEN 6720 'Voorschriften Beton TGB 1990; Constructieve eisen en rekenmethoden (VBC 1995)', NNI, 1995.

'Ontwerpnota : opdrijven, transport, afzinken en onderstromen Wijkertunnel', Strukton Betonbouw, 1993.

'Programming in Turbo Pascal', M. Yester, 1990.

Report 1049 'The behaviour of ships in a seaway', Ir. J.M.J. Journée, TU Delft, 1996.

'Transportvoorspanning', Strukton Betonbouw, 1993.

Bijlagen

Bijlage I	Schematisatie Wijkertunnel
Bijlage II	Hydrodynamische massa en -demping
Bijlage III	Berekening moment-overdrachtsfuncties
Bijlage IV	Lange-termijn verdeling van de golven
Bijlage V	Het programma Seaway
Bijlage VI	Vergelijking van de overdrachtsfuncties bepaald met Seaway en door MARIN
Bijlage VII	Het programma Voorspanning
Bijlage VIII	Randvoorwaarde tunnellengete
Bijlage IX	Belastinggevallen en fasering

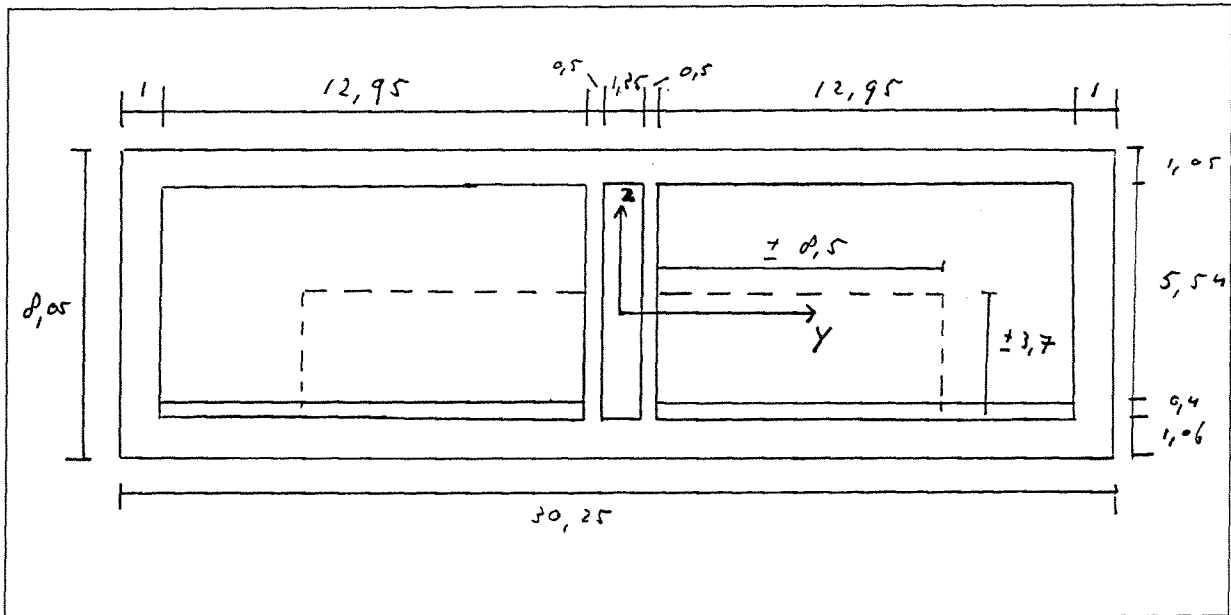
Bijlage I Schematisatie Wijkertunnel	
<u>Afmetingen Wijkertunnel</u>	1
<u>Stilwater belastingen</u>	1
<u>Dwarsdoorsnede grootheden</u>	2
<u>Drijvende stabiliteit</u>	3
 Bijlage II Hydrodynamische massa en -demping	
 Bijlage III Berekening moment-overdrachtsfuncties	
<u>De bewegingsvergelijking</u>	1
<u>Froude-Krylov kracht</u>	2
<u>Momenten in de tunnel</u>	5
<u>Overdrachtsfunctie</u>	6
 Bijlage IV Lange-termijn verdeling van de golven	
<u>Golfhoogte</u>	1
<u>Golfperiode</u>	2
<u>Golfsteilheid</u>	3
<u>Invalshoek</u>	5
 Bijlage V Het programma Seaway	
<u>Invoer</u>	1
<u>Uitvoer</u>	6
<u>Uitvoerfile van de overdrachtsfuncties</u>	10
 Bijlage VI Vergelijking van de overdrachtsfuncties bepaald met Seaway en door MARIN	
 Bijlage VII Het programma Voorspanning	
<u>Het programma</u>	1
<u>Verificatie</u>	8
 Bijlage VIII Randvoorwaarden tunnellengete	
<u>Voorspanning</u>	1
<u>Lengte</u>	1
 Bijlage IX Belastinggevallen en fasering	
<u>Belastinggevallen</u>	1
<u>Fasering</u>	3



Bijlage I Schematisatie Wijkertunnel

Afmetingen Wijkertunnel

Voor de berekening van de momenten, de invoer in Seaway en in het programma wordt de dwarsdoorsnede van de tunnel als volgt geschematiseerd (fig. 1.1).



Figuur 1.1 Aangenomen dwarsprofiel

Het lengteprofiel wordt verondersteld recht te zijn met een totale lengte van 96 meter en een mootlengte van 24 meter.

Stilwater belastingen

Voor de soortelijke gewichten worden de volgende waarden aangehouden :

- zwaartekrachtversnelling g : 9.81 m/s^2
- soortelijke massa zoetwater : 1000 kg/m^3
- " zoutwater : 1025 kg/m^3
- soortelijk gewicht ballastbeton : 22.50 kN/m^3
- " constructiebeton : 23.40 kN/m^3
- " staal : 77.01 kN/m^3

- Opwaartse waterdruk

Als eis wordt gesteld dat het vrijboord tijdens zeetransport 0.4 meter bedraagt. Dit betekent dat de opwaartse waterdruk gelijk is aan :

$$10.05 * (8.05 - 0.4) * 30.25 = 2326 \text{ kN/m'}$$

- Eigengewicht tunnel

$$\text{Opp}_{\text{tunnel}} = 30.25 * (1.06 + 1.05) + 5.94 * (1 + 1 + 0.5 + 0.5) = 82 \text{ m}^2$$

met een wapeningspercentage van 1.8 % wordt het eigen gewicht van de tunnel

$$(23.4 + 1.39) * 82 = 2033 \text{ kN/m'}$$

- Gewicht kopschotten

$$\text{per kopschot} = 1500 \text{ kN}$$

- Water voor kopschot

Het kopschot is naar binnen geplaatst om een ruimte te creëren die na plaatsing leeggepompt kan worden, extra belasting door het water voor de kopschotten :

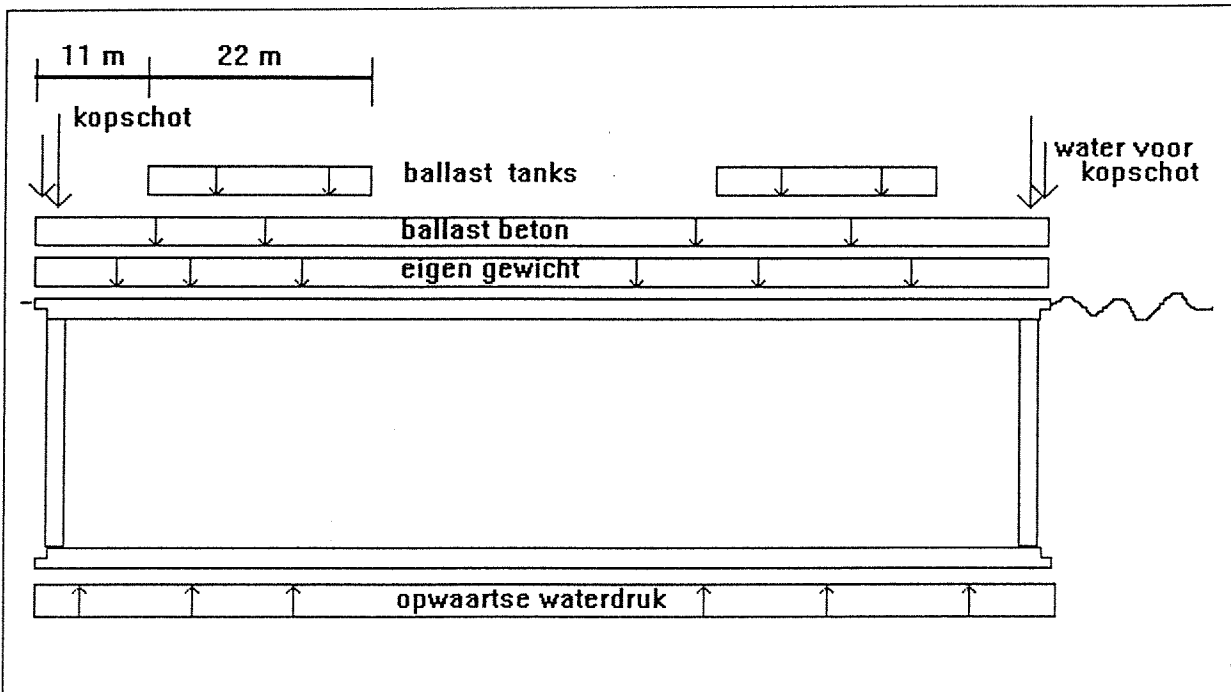
$$29.25 * 7.05 * 0.5 * 10.05 = 1036 \text{ kN}$$

- Ballasttanks

Bij het zeetransport zijn de ballasttanks leeg, voor de tanks zelf is de belasting

$$\text{per ballasttank} \quad 150 \text{ kN}$$

Het verschil tussen de opwaartse waterdruk en de neerwaartse belastingen wordt door ballastbeton in evenwicht gebracht, het ballastbeton wordt over de breedte van de twee tunnelbuizen verdeeld. Uit figuur I.2 volgt dan voor de hoeveelheid ballastbeton :



Figuur I.2 Stilwater belastingen tijdens transport over zee

-opwaartse waterdruk	2326 kN/m ↑
-eigen gewicht	2033 kN/m ↓
-kopschotten	3000 kN ↓
-water voor kopschotten	2072 kN ↓
-ballasttanks	600 kN ↓

$$\text{Ballastbeton} \quad 22456 \text{ kN} \downarrow$$

$$\text{Volume ballastbeton} = 22456 / 22.5 = 998 \text{ m}^3$$

$$\text{Hoogte ballastbeton} = 998 / (96 * 2 * 12.95) = 0.4 \text{ m zie figuur I.1.}$$

Nu de belastingen bekend zijn, kan voor de boven beschreven situatie (vrij drijven van het element), de momenten in de constructie worden bepaald. Van belang, voor de dimensionering van de benodigde voorspanning, is het buigend moment op de helft van de elementlengte. Deze is te bepalen uit de belastingen van figuur I.2. Behalve de verticale belasting veroorzaakt het water voor de kopschotten ook een moment omdat de horizontale belasting van het water voor de kopschotten niet in het zwaartepunt aangrijpt. Dit moment is gelijk aan 10230 kNm (zie bijlage 9). Het moment op de helft van de doorsnede is dan gelijk aan :

Moment door opwaartse waterdruk : $q_{opw.} * 1/2L * 1/2 * 1/2L = -2325 * 48 * 24 =$	-2678 MNm
Moment door eigengewicht : $q_{e.g.} * 1/2L * 1/2 * 1/2L = 2033 * 48 * 24 =$	2342 MNm
Moment door ballastbeton : $q_{b.b.} * 1/2L * 1/2 * 1/2L = 234 * 48 * 24 =$	270 MNm
Moment door kopschot : $F_{kopschot} * (L-1)/2 = 1500 * 47,5 =$	71 MNm
Moment door water voorkopschot : $F_{water} * (L-0,5)/2 = 1036 * 47,75 =$	50 MNm
Moment door de horizontale belasting van het water voor de kopschotten :	10 MNm
Moment door ballasttanks : $F_{tank} * (L/2-22) = 300 * 26 =$	8 MNm
	-----+
M_{stil} =	73 MNm

Dwarsdoorsnede grootheden

Uit de schematisatie van de dwarsdoorsnede (fig. I.1) volgt voor

- Betonoppervlak

$$A_b = \text{constructiebeton} + \text{ballastbeton} = (1.05 + 1.06) * 30.25 + 5.94 * (1 + 1 + 0.5 + 0.5) + 0.4 * 2 * 12.95 = 92 \text{ m}^2$$

- Zwaartepunt (G) van de doorsnede

$$z_b = \frac{1.05 \cdot 30.25 \cdot 0.525 + 1.06 \cdot 30.25 \cdot (8.05 - 0.53) + 0.4 \cdot 2 \cdot 12.95 \cdot (8.05 - 1.26) + 3 \cdot 5.94 \cdot 4.025}{A_b} = 4.35 \text{ m} \quad [I.1]$$

$$z_o = h - z_b = 8.05 - 4.35 = 3.7 \text{ m}$$

$$y_l = y_r = y = 15.125 \text{ m}$$

- Traagheidsmomenten

$$I_{yy} = \frac{1}{12} \cdot h \cdot b^3 + A \cdot y^2 = 8165 \text{ m}^4 \quad [I.2]$$

$$I_{zz} = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3 + A \cdot z^2 = 909 \text{ m}^4$$

- Weerstandsmomenten

$$W_{y_l} = W_{y_r} = I_{yy}/y = 8165/15.125 = 540 \text{ m}^3$$

$$W_{z_o} = I_{zz}/z_o = 909/3.7 = 245.7 \text{ m}^3$$

$$W_{z_b} = I_{zz}/z_b = 909/4.35 = 209.0 \text{ m}^3$$

- Dynamische traagheidsstralen

$$k_{xx} = 9.95 \text{ m}$$

$$k_{yy} = 27.74 \text{ m}$$

$$k_{zz} = 29.14 \text{ m}$$

Drijvende stabiliteit

1. Het metacentrum (M) dient minimaal 1 meter boven het drukpunt van de opwaartse kracht (B) te liggen.

$$BM = \frac{I}{V}$$

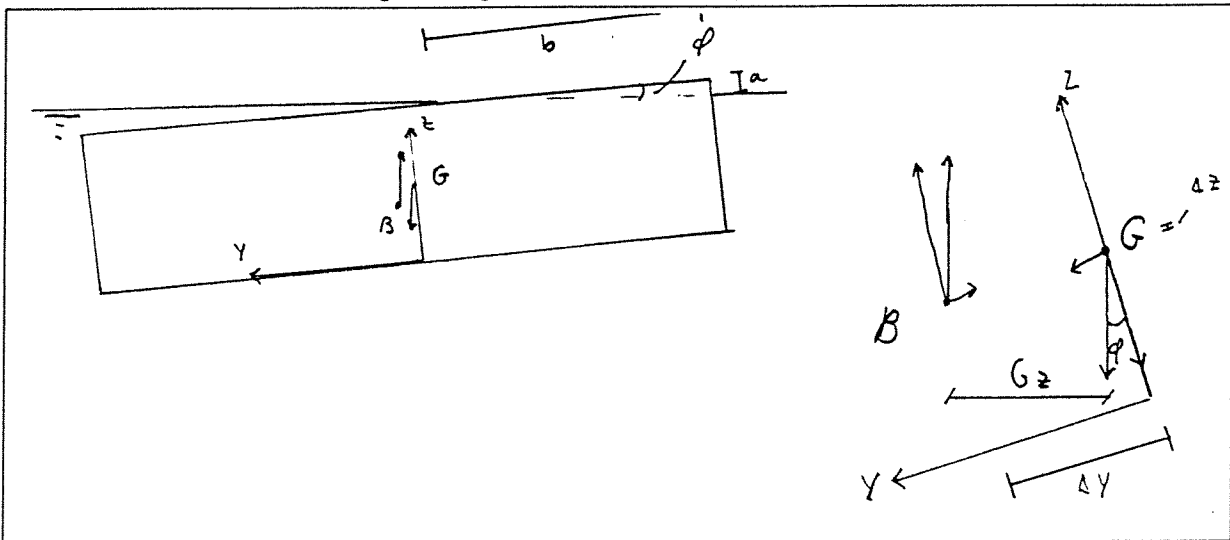
$$I = \frac{1}{12} \cdot L \cdot B^3 \text{ en } V \text{ het onderwatervolume}$$

[1.3]

$$= \frac{1/12 \cdot L \cdot B^3}{L \cdot B \cdot T} = \frac{B^2}{12 \cdot T} = 9.97 \text{ m} > 1$$

2. Tot een hellingshoek van 30° moet een stabiliserend moment aanwezig zijn.

Dit betekent dat Gz uit de volgende figuur positief moet zijn :



Figuur 1.3 Terugwerkend moment bij hoekverdraaiing

Het oppervlak bovenwater (A_{bw}) blijft altijd gelijk, zodat voor a en b geldt:

$$A_{bw} = 1/2 ab,$$

$$\tan \phi = a/b \text{ dus } A_{bw} = 1/2 a^2 / \tan \phi$$

$$a = \sqrt{2 A_{bw} \tan \phi} \text{ en } b = a / \tan \phi$$

Voor het zwaartepunt van B geldt :

$$z_b = \frac{\frac{1}{2} B H^2 - \frac{1}{2} b a (H - \frac{1}{3} a)}{B H - \frac{b a}{2}}$$

$$y_b = - \left[\frac{1}{2} B - \left(\frac{\frac{1}{2} B^2 H - \frac{1}{2} b a (B - \frac{1}{3} b)}{B H - \frac{b a}{2}} \right) \right]$$

met $\Delta z = z_G - z_B$ en

$\Delta y = y_G - y_B = -y_B$ volgt voor de arm Gz :

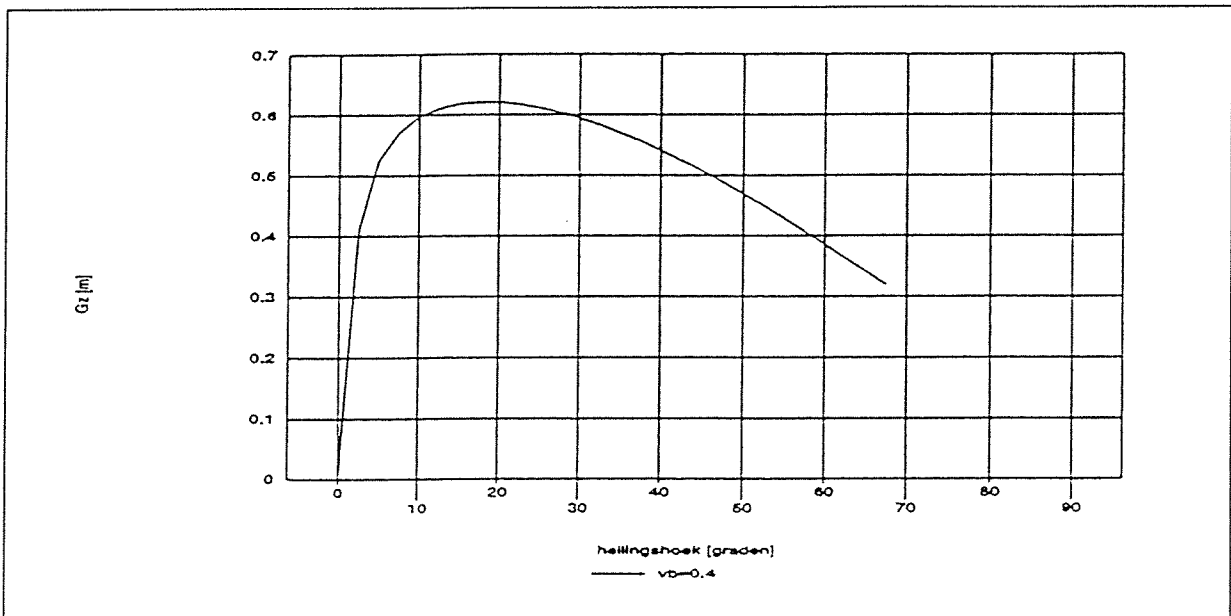
$$Gz = \sin \phi \cdot \Delta z + \cos \phi \cdot \Delta y$$

[1.4]

in figuur 1.4 is G_z uitgezet tegen de hoekverdraaiing, hieruit blijkt dat tot 70° een stabiliserend moment aanwezig is.

3. Voor de grafiek uit figuur 1.4 moet tevens gelden :

- tot een hoek van 30° moet het oppervlak onder de kromme minimaal 0.055 mrad zijn,
- tot een hoek van 40° moet het oppervlak onder de kromme minimaal 0.09 mrad zijn,
- tussen 30° en 40° moet het oppervlak onder de kromme minimaal 0.03 mrad zijn,
- tot een hoek van 30° moet een stabiliteits-arm van 0.20 meter aanwezig zijn.



Figuur 1.4 Statische stabiliteit

Uit de figuur blijkt dat aan al deze voorwaarden voldaan wordt namelijk :

- oppervlak bedraagt 0.272 mrad $>$ 0.055
- oppervlak bedraagt 0.362 mrad $>$ 0.09
- oppervlak bedraagt $0.362 - 0.272 = 0.09$ mrad $>$ 0.03
- arm is ongeveer 0.6 m $>$ 0.2.

4. Als laatste eis voor de stabiliteit moet gelden dat het zwaartepunt van de constructie onder het drukpunt ligt wanneer het tunnelelement zich geheel onder de waterspiegel bevindt.

Voor het drukpunt geldt dan $KB = 8.05/2 = 4.025$ m

$$KG = 3.7 \text{ m}$$

$KB - KG = 0.325$ meter dus het zwaartepunt ligt onder het drukpunt.

Aan alle eisen van drijvende (statische) stabiliteit wordt dus voldaan bij de gekozen afmetingen.

Bijlage II Hydrodynamische massa en -demping

Voor de bepaling van de hydrodynamische coëfficiënten wordt hier een empirische afleiding gegeven.

De beide coëfficiënten zijn afhankelijk van de breedte-diepgang verhouding en de oppervlakte-coëfficiënt gedefinieerd als $\beta = A_x/(B \cdot T)$, voor tunnels geldt dat $A_x = B \cdot T$ zodat $\beta = 1$.

In figuur II.1 wordt de hydrodynamische massa per lengte eenheid m' in dimensieloze vorm weergegeven ten opzichte van de dimensieloze frequentie.

$$C = \frac{m'}{\rho \cdot \pi \cdot B^2 / 8} \quad [II.1]$$

De dimensieloze frequentie is gelijk aan $\omega^2 B / 2g$.

Figuur II.1 kan gebruikt worden voor het bepalen van de hydrodynamische massa-coëfficiënt. Voor de Wijkertunnel is B/T gelijk aan $30,25/7,65 \approx 4$. Voor C worden de waarden aangehouden (fig.II.1) zoals in tabel II.1 is weergegeven.

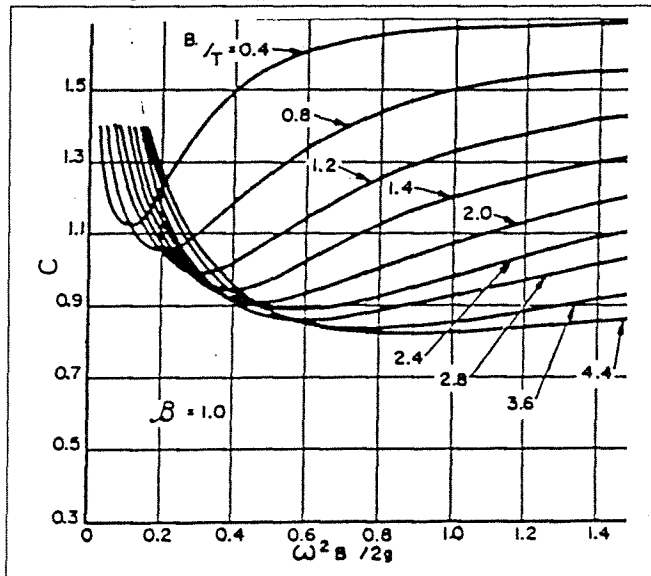
In figuur II.2 wordt de hydrodynamische demping per lengte eenheid N'_{zz} in dimensieloze vorm weergegeven ten opzichte van de dimensieloze frequentie.

$$N'_{zz} = \frac{\rho \cdot g^2 \cdot A_{zz}^2}{\omega^3} \quad [II.2]$$

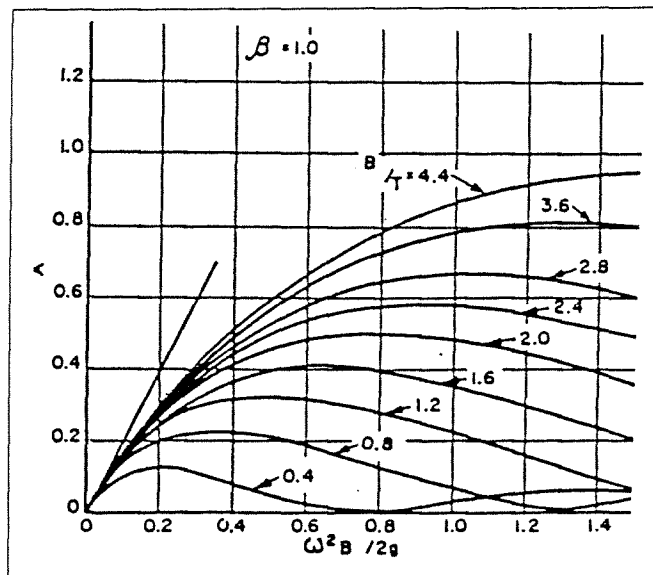
Figuur II.2 kan gebruikt worden voor het bepalen van de hydrodynamische demping-coëfficiënt, met weer voor de Wijkertunnel $B/T \approx 4$ worden voor A_{zz} de waarden aangehouden zoals in tabel II.1 is weergegeven.

Door lineaire interpolatie worden tussenliggende waarden gevonden.

Uit de gevonden waarden voor m' en N'_{zz} kunnen de verschillende coëfficiënten, zoals hydrodynamische massa, - traagheidsmomenten en -demping, die gebruikt worden in de bewegingsvergelijking worden berekend (bijl. 3).



Figuur II.1 Hydrodynamische massa-coëfficiënt



Figuur 2 Hydrodynamische demping

frequentie	x-as	C	A _{zz}	m'	N' _{zz}
0,1	0,015	3,23	0,03	1190	85
0,2	0,062	2,10	0,11	772	143
0,3	0,139	1,53	0,22	563	174
0,4	0,247	1,21	0,35	446	185
0,5	0,385	1,03	0,48	381	180
0,6	0,555	0,94	0,60	347	163
0,7	0,755	0,91	0,70	336	139
0,8	0,987	0,92	0,76	340	111
0,9	1,249	0,96	0,79	354	83
1,0	1,542	1,01	0,78	371	60
1,1	1,866	1,06	0,74	390	41
1,2	2,220	1,10	0,69	407	27
1,3	2,606	1,15	0,62	422	17
1,4	3,022	1,18	0,53	435	10
1,5	3,469	1,21	0,45	445	6
1,6	3,950	1,23	0,41	453	4
1,7	4,456	1,25	0,32	459	2
1,8	4,995	1,26	0,24	464	1
1,9	5,566	1,27	0,20	469	1
2,0	6,167	1,28	0,16	472	0
2,1	6,800	1,29	0,14	474	0
2,2	7,462	1,29	0,11	476	0
2,3	8,156	1,30	0,09	478	0
2,4	8,881	1,30	0,06	480	0
2,5	9,636	1,31	0,04	482	0

Tabel II.1

Bijlage III Berekening moment-overdrachtsfuncties

De bewegingsvergelijking

Voor de bewegingen in verticale richting van een element geldt analoog aan [3.43] en [3.48]:

$$\rho \cdot \nabla \cdot \ddot{z} = \int_{-L/2}^{L/2} F' \cdot dx_b - P + \rho \cdot g \cdot \nabla \quad \text{[III.1]}$$

met $P = \rho g \nabla$ en

$$F_1' = -2\rho g y_w \cdot (z - x_b \theta - \xi^*)$$

$$F_2' = -N_{zz}' \cdot (z - x_b \theta - \xi^*)$$

$$F_3' = -m_{zz}' \cdot (z - x_b \theta - \xi^*)$$

kan dit, in vlak water (ξ^* valt weg uit de vergelijking), geschreven worden als

$$\begin{aligned} \rho \cdot \nabla \cdot \ddot{z} = & -2 \cdot \rho \cdot g \cdot z \cdot \int y_w \cdot dx_b + 2 \cdot \rho \cdot g \cdot \theta \cdot \int y_w \cdot x_b \cdot dx_b + \\ & - \dot{z} \cdot \int N_{zz}' \cdot dx_b + \dot{\theta} \cdot \int N_{zz}' \cdot x_b \cdot dx_b + \\ & - \ddot{z} \cdot \int m_{zz}' \cdot dx_b + \ddot{\theta} \cdot \int m_{zz}' \cdot x_b \cdot dx_b \end{aligned}$$

waarin

$$2 \cdot \int_{-L/2}^{L/2} y_w \cdot dx_b = A_w \text{ (oppervlak),}$$

$$2 \cdot \int_{-L/2}^{L/2} y_w \cdot x_b \cdot dx_b = S_w \text{ (statisch moment),}$$

$$\int_{-L/2}^{L/2} m_{zz}' \cdot dx_b = m_{zz} \text{ en}$$

$$\int_{-L/2}^{L/2} N_{zz}' \cdot dx_b = N_{zz}$$

De bewegingsvergelijking wordt dan geschreven als

$$(\rho \cdot \nabla + m_{zz}) \cdot \ddot{z} + N_{zz} \cdot \dot{z} + \rho \cdot g \cdot A_w \cdot z - \ddot{\theta} \cdot \int m_{zz}' \cdot x_b \cdot dx_b - \dot{\theta} \cdot \int N_{zz}' \cdot x_b \cdot dx_b - \rho \cdot g \cdot S_w \cdot \theta = 0 \quad \text{[III.2]}$$

Voor het stampen geldt een analoge afleiding. De momenten vergelijking [3.48] luidt:

$$I_{yy} \cdot \ddot{\theta} = - \int_{-L/2}^{L/2} (F_1' + F_2' + F_3') \cdot x_b \cdot dx_b \quad \text{[III.3]}$$

waaruit volgt

$$(I_{yy} + m_{\theta\theta}) \ddot{\theta} + N_{\theta\theta} \dot{\theta} + \rho \cdot g \cdot I_y \cdot \theta - \dot{z} \int m'_{zz} \cdot x_b \cdot dx_b - \dot{z} \int N'_{zz} \cdot x_b \cdot dx_b - \rho \cdot g \cdot S_w \cdot z = 0 \quad \text{[III.4]}$$

met

$$I_y = 2 \int_{-L/2}^{L/2} y_w \cdot x_b^2 \cdot dx_b,$$

$$m_{\theta\theta} = \int_{-L/2}^{L/2} m'_{zz} \cdot x_b^2 \cdot dx_b \text{ en}$$

$$N_{\theta\theta} = \int_{-L/2}^{L/2} N'_{zz} \cdot x_b^2 \cdot dx_b$$

De gekoppelde bewegingsvergelijkingen worden korthedshalve als volgt weergegeven:

$$a_{zz} \ddot{z} + b_{zz} \dot{z} + c_{zz} z + a_{z\theta} \ddot{\theta} + b_{z\theta} \dot{\theta} + c_{z\theta} \theta = 0$$

$$a_{\theta z} \ddot{z} + b_{\theta z} \dot{z} + c_{\theta z} z + a_{\theta\theta} \ddot{\theta} + b_{\theta\theta} \dot{\theta} + c_{\theta\theta} \theta = 0 \quad \text{[III.5]}$$

Wanneer de uitwijking van de waterspiegel wordt meegenomen ([III.1]) dan moeten de termen rechts van het gelijkteken (0) in de vergelijking worden vervangen door respectievelijk:

$$2 \cdot \rho \cdot g \cdot \int y_w \cdot \xi^* \cdot dx_b + \int N' \cdot \dot{\xi}^* \cdot dx_b + \int m' \cdot \ddot{\xi}^* \cdot dx_b \text{ en}$$

$$-2 \cdot \rho \cdot g \cdot \int y_w \cdot \xi^* \cdot x_b \cdot dx_b - \int N' \cdot \dot{\xi}^* \cdot x_b \cdot dx_b - \int m' \cdot \ddot{\xi}^* \cdot x_b \cdot dx_b \quad \text{[III.6]}$$

De opgestelde vergelijkingen gelden voor rechtinvallende golven en zonder voorwaartse snelheid van het element.

Froude-Krylov kracht

Uitschrijven van formule [3.51] levert:

$$FK_z = - \iint (-\rho \cdot g + \rho \cdot g \cdot \xi \cdot k \cdot \frac{\sinh k(h+z)}{\cosh k \cdot h}) \cdot dy \cdot dz \quad \text{[III.7]}$$

De twee termen kunnen ieder apart geïntegreerd worden en met

$$\int_{-y_b}^{y_b} dy = 2y_b = \text{breedte } B$$

gaat de eerste term over in

$$\int_{-T}^{\xi} (B \cdot \rho \cdot g) \cdot dz$$

Voor de tweede term geldt

$$\int_{-y_b}^{y_b} \cos(\omega \cdot t - k \cdot x \cdot \cos \mu - k \cdot y \cdot \sin \mu) \cdot dy = \left[-\frac{1}{k \cdot \sin \mu} \cdot \sin \psi \right]_{-y_b}^{y_b}$$

$$= -\frac{1}{k \cdot \sin \mu} \cdot [\sin(\omega \cdot t - k \cdot x \cdot \cos \mu - k \cdot y_b \cdot \sin \mu) - \sin(\omega \cdot t - k \cdot x \cdot \cos \mu + k \cdot y_b \cdot \sin \mu)]$$

zodat met behulp van de regel dat $\sin(\alpha + \beta) = \sin \alpha \cdot \cos \beta + \cos \alpha \cdot \sin \beta$ met $\alpha = (\omega t - kx \cdot \cos \mu)$ en $\beta = ky_b \cdot \sin \mu$ deze term kan worden vereenvoudigd in

$$-\frac{1}{k \cdot \sin \mu} \cdot [\sin \alpha \cdot \cos \beta - \cos \alpha \cdot \sin \beta - (\sin \alpha \cdot \cos \beta + \cos \alpha \cdot \sin \beta)]$$

$$= \frac{2}{k \cdot \sin \mu} \cdot \cos \alpha \cdot \sin \beta = 2 \frac{\sin(k \cdot y_b \cdot \sin \mu)}{k \cdot \sin \mu} \cdot \cos(\omega \cdot t - k \cdot x \cdot \cos \mu)$$

[III.7] kan dus door het samenvoegen van de twee termen geschreven worden als

$$\int_{-T}^{\xi} (B \cdot \rho \cdot g) \cdot dz - \int_{-T}^{\xi} [\rho \cdot g \cdot \xi_a \cdot k \cdot \frac{\sinh k(h+z)}{\cosh kh} \cdot 2 \cdot \frac{\sin(k \cdot y_b \cdot \sin \mu)}{k \cdot \sin \mu} \cdot \cos(\omega \cdot t - k \cdot x \cdot \cos \mu)] \cdot dz$$

Integreren geeft:

$$\left[B \cdot \rho \cdot g \cdot z \right]_{-T}^{\xi} - 2 \cdot \rho \cdot g \cdot \xi_a \cdot \frac{\sin(k \cdot y_b \cdot \sin \mu)}{k \cdot \sin \mu} \cdot \cos(\omega \cdot t - k \cdot x \cdot \cos \mu) \cdot \left[\frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \right]_{-T}^{\xi}$$

Omdat ξ klein is ten opzichte van h zal $k \cdot (h + \xi)$ en dus ook de \cosh hiervan bijna gelijk zijn aan $k \cdot h$, dit betekent voor de tweede term dat de integraal van $-T$ tot ξ en van $-T$ tot nul gelijk zijn:

$$B \cdot \rho \cdot g \cdot \xi + B \cdot \rho \cdot g \cdot T -$$

$$- 2 \cdot \rho \cdot g \cdot \xi_a \cdot \frac{\sin(k \cdot y_b \cdot \sin \mu)}{k \cdot \sin \mu} \cdot \cos(\omega \cdot t - k \cdot x \cdot \cos \mu) \cdot \left[1 - \frac{\cosh k(h-T)}{\cosh kh} \right]$$

De tweede term uit de vergelijking geeft de belasting veroorzaakt door stil water. Deze moet dus niet worden meegenomen voor de golfbelasting. De verticale belasting in langsrichting wordt dan:

$$FK_z(x, t) = B \cdot \rho \cdot g \cdot \xi - 2 \cdot \rho \cdot g \cdot \xi_a \cdot \cos(\omega \cdot t - k \cdot x \cdot \cos \mu) \cdot \frac{\sin(k \cdot y_b \cdot \sin \mu)}{k \cdot \sin \mu} +$$

$$+ 2 \cdot \rho \cdot g \cdot \xi_a \cdot \cos(\omega \cdot t - k \cdot x \cdot \cos \mu) \cdot \frac{\sin(k \cdot y_b \cdot \sin \mu)}{k \cdot \sin \mu} \cdot \left[\frac{\cosh k(h-T)}{\cosh kh} \right]$$

De term $k \cdot \sin(\mu)$ is klein omdat de belastingen groot zijn bij een evenwijdige inval van de golven ($\sin \mu < 1$) en bij een grote golflengte ($k \ll 1$). Dit betekent dat $\sin(y_b \cdot (k \cdot \sin \mu)) / (k \cdot \sin \mu) \approx y_b$. En met $2y_b = B$ vereenvoudigd de Froude-Krylov kracht in:

$$FK_z = B \cdot \rho \cdot g \cdot \xi - \rho \cdot g \cdot \xi \cdot 2 \cdot y_b + 2 \cdot \rho \cdot g \cdot \xi \cdot \frac{\cosh k(h-T)}{\cosh kh} \cdot \frac{\sin(k \cdot y_b \cdot \sin \mu)}{k \cdot \sin \mu}$$

$$= 2 \cdot \rho \cdot g \cdot \frac{\sin(k \cdot y_b \cdot \sin \mu)}{k \cdot \sin \mu} \cdot \frac{\cosh k(h-T)}{\cosh kh} \cdot \xi_a \cdot \cos(\omega \cdot t - k \cdot x \cdot \cos \mu)$$
[III.8]

wanneer de invalshoek μ nul is gaat dit over in formule [3.52].

voor ξ^* geldt dus de uitdrukking:

$$\xi^* = \xi \cdot \frac{\cosh k(h-T)}{\cosh kh} \quad \text{[III.9]}$$

Froude-Krylov kracht in y-richting

De afleiding is analoog aan die hierboven, [3.53] wordt:

$$FK_y = - \int_{-T}^{\xi} \int_{-y_b}^{y_b} \rho \cdot g \cdot \xi_a \cdot k \cdot \sin \mu \cdot \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \cdot \sin(\omega \cdot t - k \cdot x \cdot \cos \mu - k \cdot y \cdot \sin \mu) \quad \text{[III.10]}$$

integreren over de breedte levert net als bij de afleiding in z-richting:

$$\begin{aligned} FK_y &= - \int_{-T}^{\xi} \rho \cdot g \cdot \xi_a \cdot k \cdot \sin \mu \cdot \frac{2 \sin(k \cdot y_b \cdot \sin \mu)}{k \cdot \sin \mu} \cdot \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \cdot \sin(\omega \cdot t - k \cdot x \cdot \cos \mu) \\ &= -2 \cdot \rho \cdot g \cdot \xi_a \cdot \frac{\sin(k \cdot y_b \cdot \sin \mu)}{k} \cdot \frac{\sinh k(h+z)}{\cosh kh} \Big|_{-T}^{\xi} \cdot \sin(\omega \cdot t - k \cdot x \cdot \cos \mu) \\ FK_y &= -2 \cdot \rho \cdot g \cdot \xi_a \cdot \frac{\sin(k \cdot y_b \cdot \sin \mu)}{k} \cdot \frac{\sinh kh - \sinh k(h-T)}{\cosh kh} \cdot \sin(\omega \cdot t - k \cdot x \cdot \cos \mu) \end{aligned} \quad \text{[III.11]}$$

De horizontale Froude-Krylov kracht is dus gelijk aan [3.54].

Froude-Krylov wringingsmoment

Uitschrijven van [3.55] geeft:

$$FK_{\phi} = \int \int [(\rho g \xi_a k \sin \mu \cdot \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \cdot \sin(\Omega)) \cdot z + (\rho g - \rho g k \xi_a \cdot \frac{\sinh k(h+z)}{\cosh kh} \cdot \cos(\Omega)) \cdot y] \cdot dy \cdot dz \quad \text{[III.12]}$$

A B

splitsen in 2 integralen levert voor A:

$$\rho \cdot g \cdot \xi_a \cdot k \cdot \sin \mu \cdot \int_{-y_b}^{y_b} \sin(\Omega) dy \cdot \int_{-T}^{\xi} z \cdot \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} dz$$

met partiële integratie en de eerder toegepaste integraal over de breedte geeft dit:

$$A = 2 \cdot \rho \cdot g \cdot \xi_a \cdot \frac{\sin(k \cdot y_b \cdot \sin \mu)}{k} \cdot \left[\frac{z \cdot \sinh k(h+z)}{\cosh kh} - \frac{\cosh k(h+z)}{k \cdot \cosh kh} \right]_{-T}^{\xi} \cdot \sin(\omega \cdot t - k \cdot x \cdot \sin \mu)$$

met als resultaat voor A:

$$2 \cdot \rho \cdot g \cdot \xi_a \cdot \sin(\omega \cdot t - k \cdot x \cdot \cos \mu) \cdot \frac{\sin(k \cdot y_b \cdot \sin \mu)}{k} \cdot \left[-\frac{1}{k} + \frac{T \cdot k \cdot \sinh k(h-T) + \cosh k(h-T)}{k \cdot \cosh kh} \right] \quad \text{[III.13a]}$$

en voor B splitsen van de integraal in B1 en B2 levert voor B1:

$$\begin{aligned}
 B1 &= \rho \cdot g \cdot \int_{-y_b}^{y_b} y \cdot \int_{-T}^{\xi} dz \cdot dy = \rho \cdot g \cdot \int_{-y_b}^{y_b} y \cdot z \Big|_{-T}^{\xi} dy = \rho \cdot g \cdot \int_{-y_b}^{y_b} y \cdot (\xi + T) \cdot dy \\
 &= \rho \cdot g \cdot T \cdot \frac{1}{2} y^2 \Big|_{-y_b}^{y_b} + \rho \cdot g \cdot \xi_a \cdot \int_{-y_b}^{y_b} y \cdot \cos(\Omega) \cdot dy
 \end{aligned}$$

partiële integratie hiervan en gebruikmaken van de integraal over de breedte levert voor B1:

$$\begin{aligned}
 B1 &= 0 + \left[\frac{\cos(\Omega) - y \cdot k \cdot \sin \mu \cdot \sin(\Omega)}{k^2 \cdot \sin^2 \mu} \right]_{-y_b}^{y_b} \\
 &= \frac{2 \cdot \rho \cdot g}{k \cdot \sin \mu} \cdot \xi_a \cdot \sin(\omega \cdot t - k \cdot x \cdot \cos \mu) \cdot \left[\frac{\sin(k \cdot y_b \cdot \sin \mu)}{k \cdot \sin \mu} - y_b \cdot \cos(k \cdot y_b \cdot \sin \mu) \right]
 \end{aligned} \tag{III.13b1}$$

en voor B2:

$$B2 = - \int \int \rho \cdot g \cdot k \cdot \xi_a \cdot \frac{\sinh k(h+z)}{\cosh kh} \cdot y \cdot \cos(\Omega) \cdot dy \cdot dz = - \rho \cdot g \cdot k \cdot \xi_a \cdot \int y \cdot \cos(\Omega) \cdot dy \cdot \int_{-T}^0 \frac{\sinh k(h+z)}{\cosh kh} \cdot dz$$

de integraal over de breedte is gelijk aan die van B1 zodat B2 te schrijven is als:

$$\begin{aligned}
 B2 &= -B1 \cdot k \cdot \int_{-T}^0 \frac{\sinh k(h+z)}{\cosh kh} \cdot dz = -B1 \cdot k \cdot \left[\frac{\cosh k(h+z)}{k \cdot \cosh kh} \right]_{-T}^0 \\
 &= -B1 \cdot \left(1 - \frac{\cosh k(h-T)}{\cosh kh} \right)
 \end{aligned} \tag{III.13b2}$$

Het Froude-Krylov moment is dus te schrijven als:

$$FK_{\phi} = A + B1 - B1 \left(1 - \frac{\cosh k(h-T)}{\cosh kh} \right) = A + B1 \cdot \frac{\cosh k(h-T)}{\cosh kh} \tag{III.14}$$

wanneer dit wordt uitgeschreven levert het formule [3.56] op.

Momenten in de tunnel

De momenten in het element worden berekend door de golfbelasting te integreren over de lengte van het element. Voor een voorbeeldberekening van de overdrachtsfunctie van het golfmoment wordt hier alleen gekeken naar de Froude-Krylov kracht. Dit kan omdat de integraal van een som gelijk is aan de som van de integralen. De hierna volgende berekening geeft dus het principe weer hoe de overdrachtsfunctie wordt bepaald.

Dwarskracht

$$D_z(x,t) = - \int q_z(x,t) \cdot dx =$$

$$- \int_L B \cdot \rho \cdot g \cdot \frac{\cosh k(h-T)}{\cosh kh} \cdot \xi_a \cdot \cos(\omega \cdot t - k \cdot x \cdot \cos \mu) = \frac{B \cdot \rho \cdot g}{k \cdot \cos \mu} \cdot \frac{\cosh k(h-T)}{\cosh kh} \cdot \xi_a \cdot \sin(\omega \cdot t - k \cdot x \cdot \cos \mu) + C_1$$

Aan het uiteinde van het element moet de dwarskracht gelijk zijn aan nul oftewel voor $x = L/2$ geldt $D_z = 0$, hieruit volgt voor C_1 :

$$C_1 = -\frac{B \cdot \rho \cdot g}{k \cdot \cos \mu} \cdot \frac{\cosh k(h-T)}{\cosh kh} \cdot \xi_a \cdot \sin(\omega \cdot t - k \cdot \frac{L}{2} \cdot \cos \mu) \text{ en voor } D_z$$

$$D_z(x,t) = \frac{B \cdot \rho \cdot g}{k \cdot \cos \mu} \cdot \frac{\cosh k(h-T)}{\cosh kh} \cdot \xi_a [\sin(\omega \cdot t - k \cdot x \cdot \cos \mu) - \sin(\omega \cdot t - k \cdot \frac{L}{2} \cdot \cos \mu)]$$

Moment

$$M_z(x,t) = \int D_z(x,t) \cdot dx =$$

$$\frac{B \cdot \rho \cdot g}{k \cdot \cos \mu} \cdot \frac{\cosh k(h-T)}{\cosh kh} \cdot \xi_a \left[\frac{\cos(\omega \cdot t - k \cdot x \cdot \cos \mu)}{k \cdot \cos \mu} - x \cdot \sin(\omega \cdot t - k \cdot \frac{L}{2} \cdot \cos \mu) \right] + C_1$$

Aan het uiteinde van het element moet het moment gelijk zijn aan nul, hieruit volgt C_1 . Schrijven we $\omega t - kx \cos \mu = \Psi$ en $\omega t - k \cdot \frac{L}{2} \cos \mu = \Psi_L$ dan kan het moment geschreven worden als:

$$M_z(x,t) = \frac{B \cdot \rho \cdot g}{k \cdot \cos \mu} \cdot \frac{\cosh k(h-T)}{\cosh kh} \cdot \xi_a \cdot \left[\frac{\cos \Psi - \cos \Psi_L}{k \cdot \cos \mu} - \left(x - \frac{L}{2}\right) \cdot \sin \Psi_L \right] \quad \text{[III.15]}$$

Overdrachtsfunctie

Hier wordt verder gegaan met de vereenvoudigde vergelijking om de overdrachtsfunctie te bepalen. De berekening geeft dus een principe oplossing aan.

Om het momenten-spectrum te bepalen moet het moment uit formule [III.15] herschreven worden in termen van cosinus en sinus.

Met $A = \frac{B \cdot \rho \cdot g}{k^2 \cdot \cos^2 \mu} \cdot \frac{\cosh k(h-T)}{\cosh kh}$ en $k' = k \cdot \cos \mu$ wordt [III.15] geschreven als

$$\begin{aligned} M_z(x,t) &= \frac{A}{k^2 \cdot \cos^2 \mu} \cdot \xi_a \cdot (\cos(\omega t - kx \cos \mu) - \cos(\omega t - k \frac{L}{2} \cos \mu) - k \cos \mu \cdot (x - \frac{L}{2}) \cdot \sin(\omega t - k \frac{L}{2} \cos \mu)) \\ &= \frac{A}{k^{*2}} \cdot \xi_a \cdot \left[\cos \omega t \cdot \cos k^* x + \sin \omega t \cdot \sin k^* x - \cos \omega t \cdot \cos k^* \frac{L}{2} - \sin \omega t \cdot \sin k^* \frac{L}{2} - k^* \left(x - \frac{L}{2}\right) \cdot (\sin \omega t \cdot \cos k^* \frac{L}{2} - \cos \omega t \cdot \sin k^* \frac{L}{2}) \right] \\ &= \frac{A}{k^{*2}} \cdot \xi_a \cdot \left[(\cos k^* x - \cos k^* \frac{L}{2} + k^* \left(x - \frac{L}{2}\right) \sin k^* \frac{L}{2}) \cdot \cos \omega t + (\sin k^* x - \sin k^* \frac{L}{2} - k^* \left(x - \frac{L}{2}\right) \cos k^* \frac{L}{2}) \cdot \sin \omega t \right] \end{aligned}$$

De modulus van M , M_a , is gelijk aan de wortel uit de som van de kwadraten van de twee termen. Na kwadrateren en wegstrepen volgt dan voor M_a :

$$M_a = \frac{A}{k^{*2}} \cdot \xi_a \cdot \sqrt{(2 - 2 \cos k^* \left(x - \frac{L}{2}\right) - 2 \cdot k^* \left(x - \frac{L}{2}\right) \sin k^* \left(x - \frac{L}{2}\right) + k^{*2} \left(x - \frac{L}{2}\right)^2)}$$

De modulus van de frequentie karakteristiek is het quotiënt van M_a en ξ_a . De overdrachtsfunctie is het kwadraat hiervan, zodat voor de overdrachtsfunctie geldt:

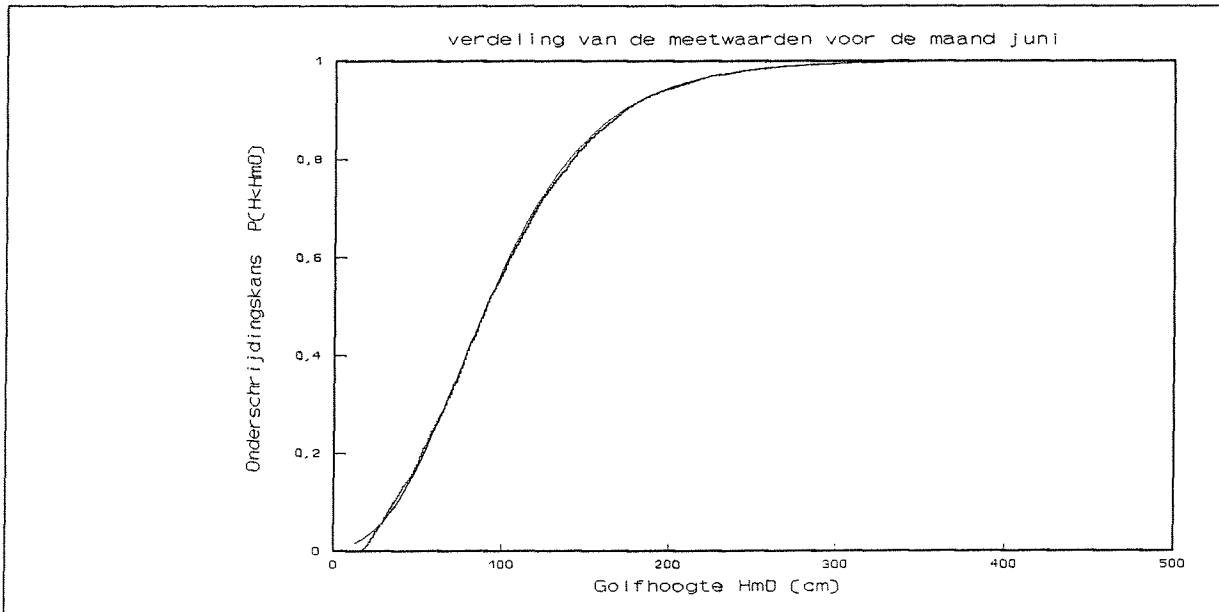
$$|R_{M\xi}(\omega)|^2 = \frac{A^2}{k^{*4}} \cdot [2 - 2 \cos k^* \left(x - \frac{L}{2}\right) - 2 \cdot k^* \left(x - \frac{L}{2}\right) \sin k^* \left(x - \frac{L}{2}\right) + k^{*2} \left(x - \frac{L}{2}\right)^2] \quad \text{[III.16]}$$

Figuur 3.18 geeft een voorbeeld van de overdrachtsfunctie.

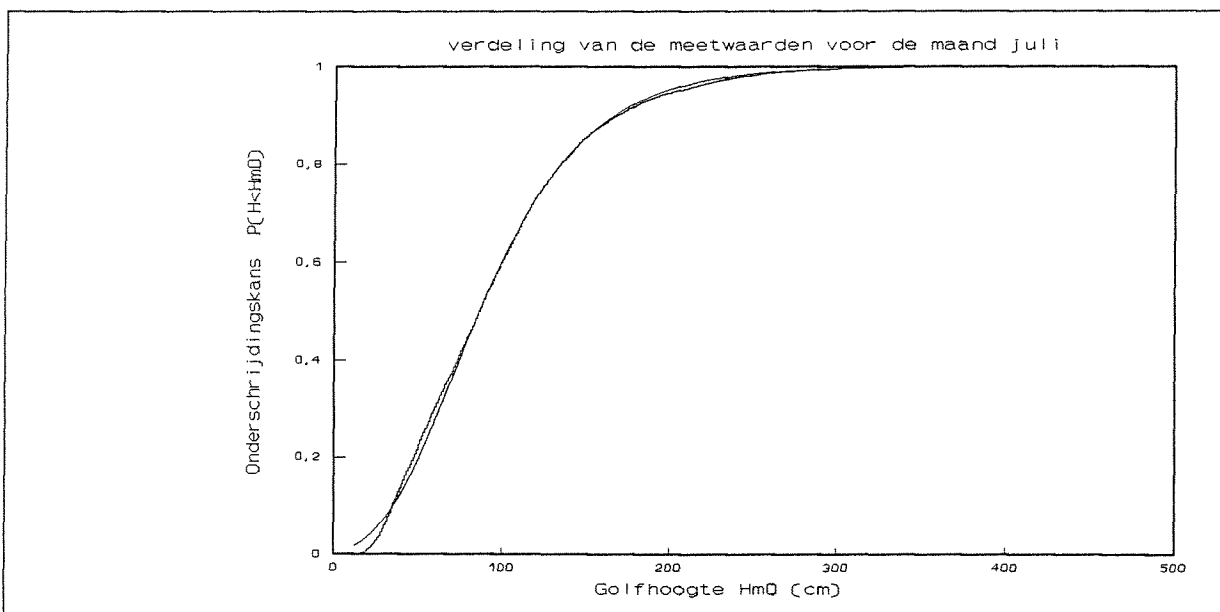
Bijlage IV Lange-termijn verdeling van de golven

Golfhoogte

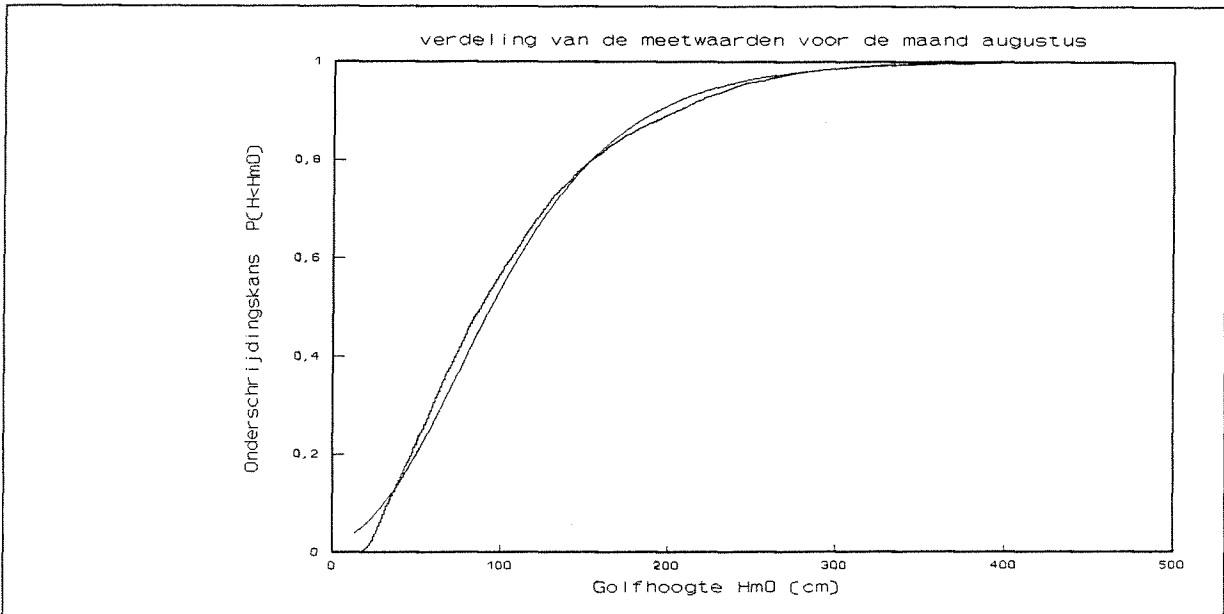
In de figuren IV.1, IV.2 en IV.3 zijn de fittingen te zien van de Gumbelverdelingen van de golfhoogte met de werkelijke verdelingen voor respectievelijk de maanden juni, juli en augustus. De waarden van de parameters A en B staan vermeld in tabel 4.1. Zoals te zien is in de figuren beschrijven de aangenomen Gumbelverdelingen de werkelijke verdeling van de golfhoogte goed.



Figuur IV.1 Fit van de Gumbelverdeling en de meetwaarden voor de golfhoogte



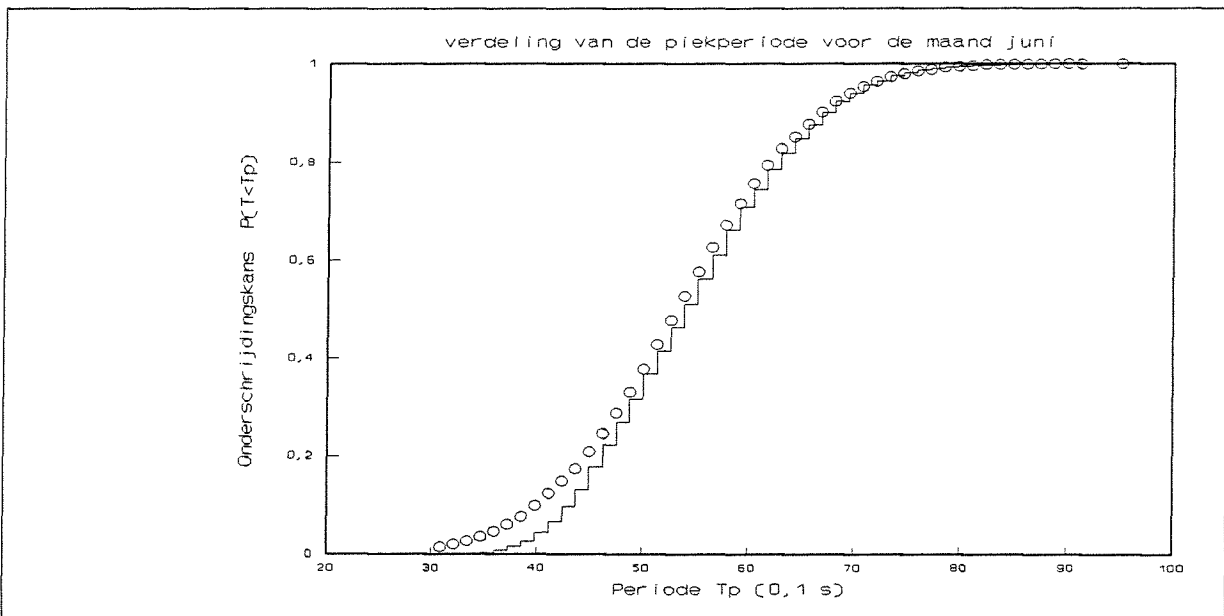
Figuur IV.2 Fit van de Gumbelverdeling en de meetwaarden voor de golfhoogte



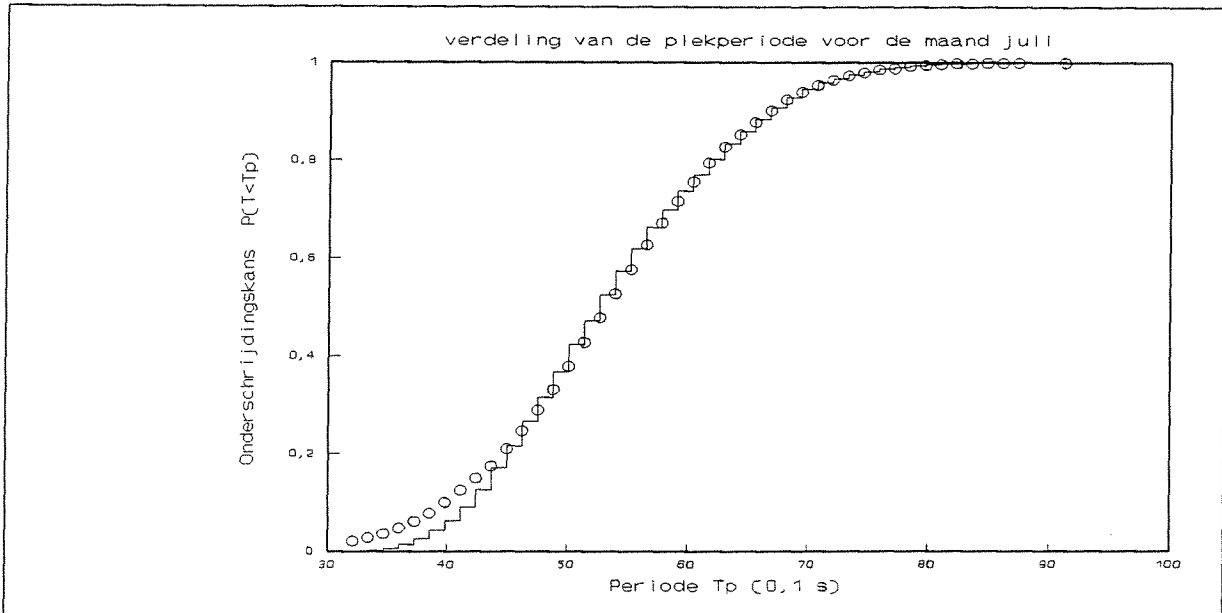
Figuur IV.3 Fit van de Gumbelverdeling en de meetwaarden voor de golfhoogte

Golfperiode

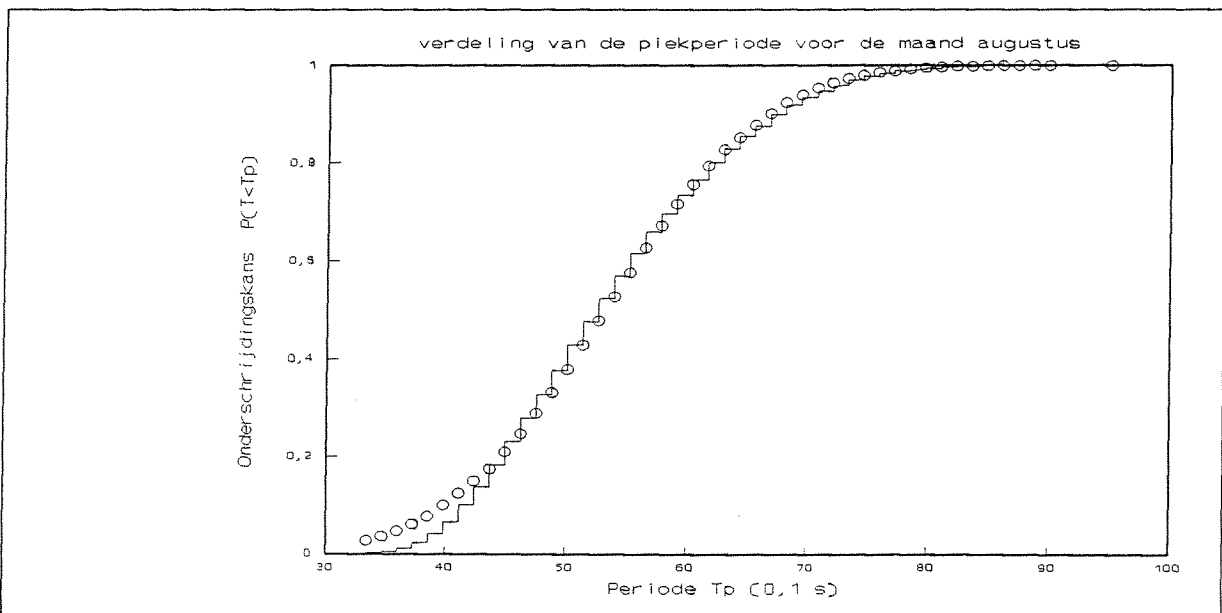
De aangenome verdeling voor de piekperiode voor de maand mei beschrijft ook de verdelingen van de maanden juni, juli en augustus goed zoals te zien is in de figuren IV.4 t/m IV.6



Figuur IV.4 Fit van de normale verdeling voor T_p met de werkelijke verdeling van de meetwaarden



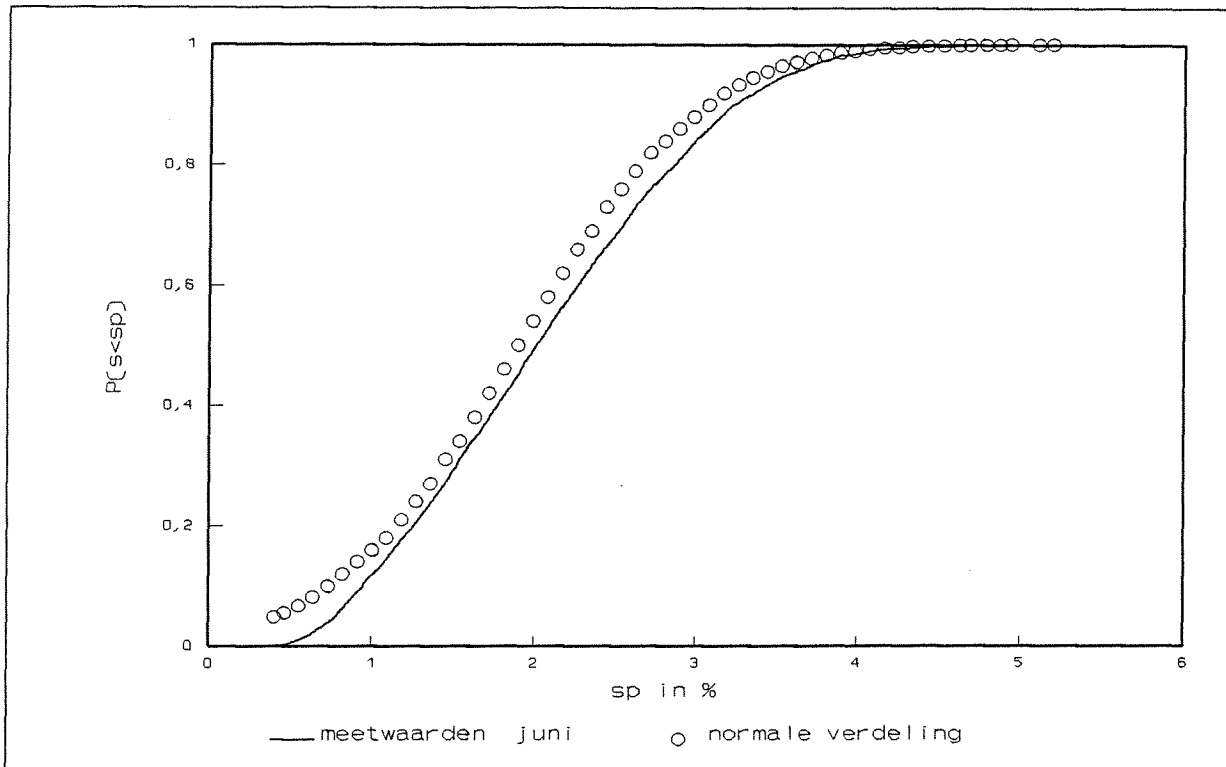
Figuur IV.5 Fit van de normale verdeling voor T_p met de werkelijke verdeling van de meetwaarden



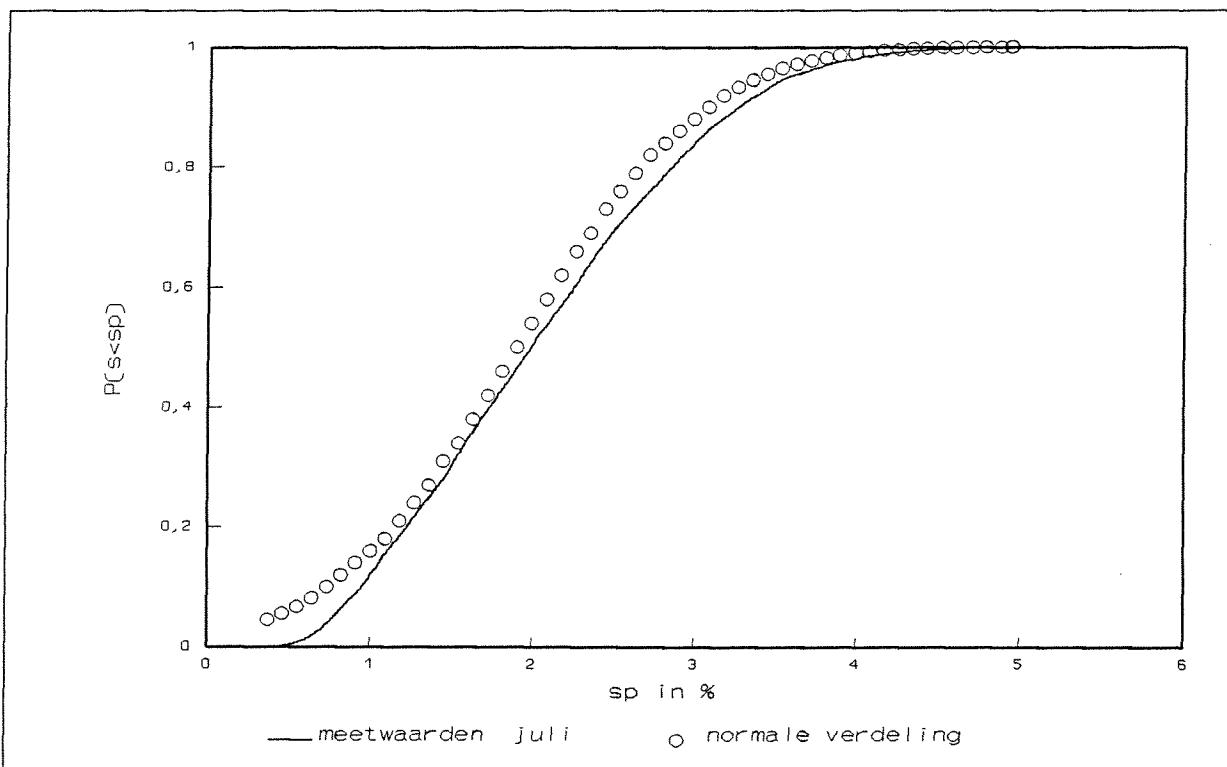
Figuur IV.6 Fit van de normale verdeling voor T_p met de werkelijke verdeling van de meetwaarden

Golfsteilheid

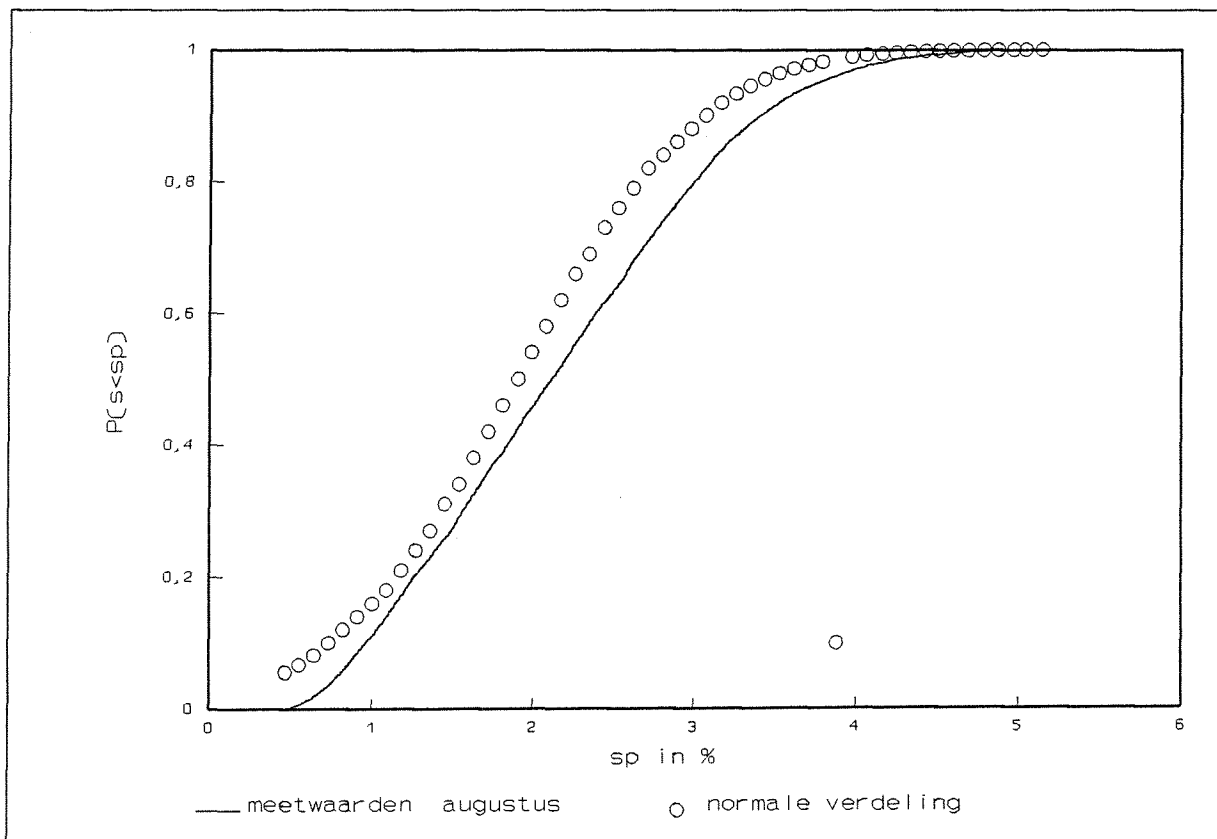
De aangenome verdeling voor de golfsteilheid voor de maand mei beschrijft ook de verdelingen van de maanden juni, juli en augustus redelijk goed zoals te zien is in de figuren IV.7 t/m IV.9



Figuur IV.7 Fit van de normale verdeling voor s_p met de werkelijke verdeling van de meetwaarden



Figuur IV.8 Fit van de normale verdeling voor s_p met de werkelijke verdeling van de meetwaarden

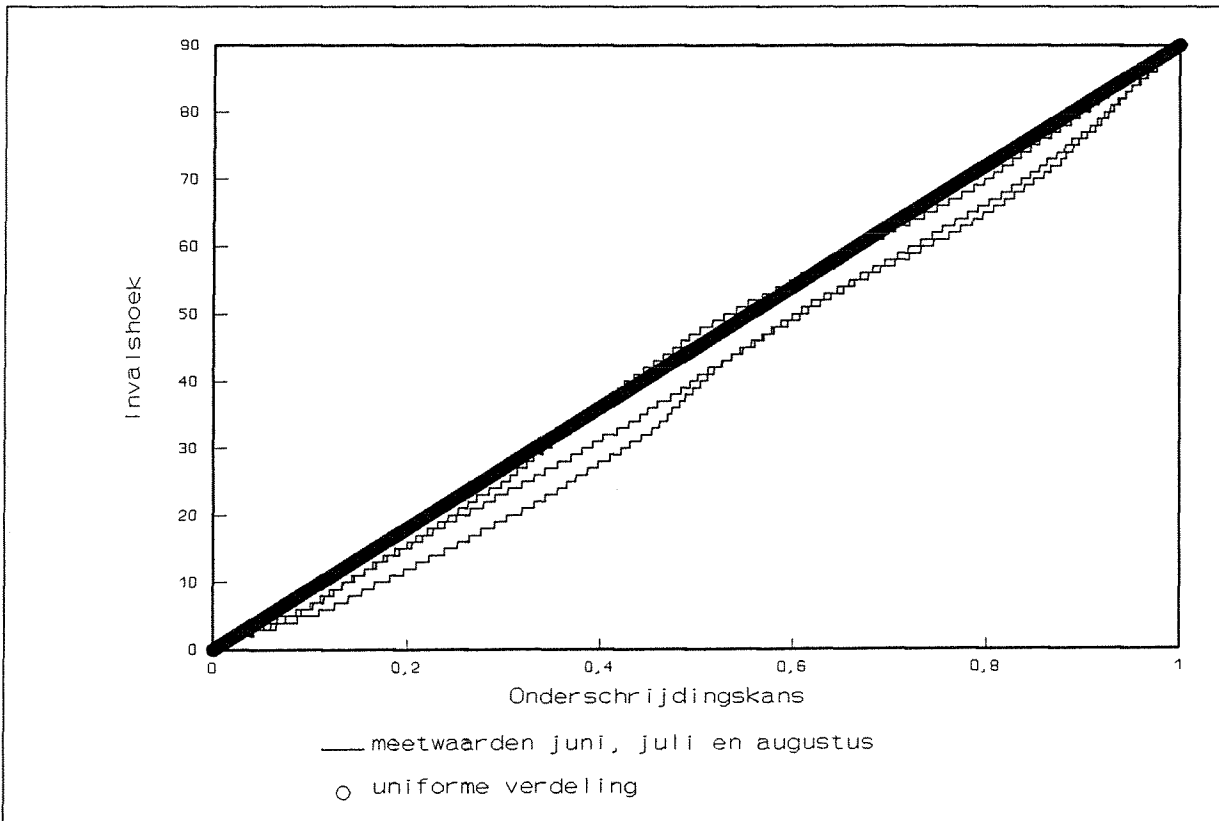


Figuur IV.9 Fit van de normale verdeling voor s_p met de werkelijke verdeling van de meetwaarden

Bij de verdelingen van de golfsteilheid is, vooral voor augustus, de benadering door de normale verdeling met $\mu = 1,9\%$ en $\zeta = 0,9\%$ niet zeer nauwkeurig. De afwijking van de werkelijkheid is echter niet groot en aan de veilige kant, want de normale verdeling geeft altijd een iets hogere kans dan de werkelijke (zie figuren), dat er van uit wordt gegaan dat de normale verdeling geldt voor alle vier de zomermaanden.

Invalshoek

De aangenomen uniforme verdeling voor de invalshoek van de golven voor de maand mei beschrijft ook de verdelingen van de maanden juni, juli en augustus goed zoals te zien is in figuur IV.10



Figuur IV.10 Fit van de werkelijke verdelingen van de meetwaarden met de uniforme verdeling

Bijlage V Het programma Seaway

De invoerparameters van seaway met hun waarden zijn als worden hieronder gegeven. De uitvoer van de significante momenten voor het vergelijken van de uitkomsten met de modelproeven van MARIN volgen op pagina 6.

Invoer

```
#####
# Program: SEAWAY                               Journee #
#                                               #
# STRIPTHEORY CALCULATIONS OF MOTIONS AND LOADS IN A SEAWAY #
#                                               #
#                               Release 4.13      #
#                               (07-10-1995)     #
#####
```

DEMO of program SEAWAY with a barge for student Bas Coopman.

INPUT DATA

```
ACTUAL MIDSHIP DRAFT ..... DRAFT : 7.650 m
ACTUAL TRIM BY STERN ..... TRIM : 0.000 m
DUMMY VALUE, FOR THE TIME BEING ..... DIST : 0.000
```

```
WATER DEPTH ..... DEPTH : 25.000 m
DENSITY OF WATER ..... RHO : 1.025 ton/m3
```

```
DEGREES OF FREEDOM CODE ..... MOT : 123456
VERSION-CODE OF STRIP THEORY METHOD ... KTH : 1
NUMBER OF TERMS IN POTENTIAL SERIES .. MSER : 10
CODE OF USED 2-D APPROXIMATION ..... KCOF : 10
NUMBER OF "FREE-CHOICE" SECTIONS ..... NFR : 0
```

```
NUMBER OF FORWARD SPEEDS ..... NV : 1
FORWARD SPEEDS (kn) ..... VK(NV) : 0.00
```

```
NUMBER OF WAVE DIRECTIONS ..... NWD : 4
WAVE DIRECTIONS (deg off stern) WAVDIR(NWD) : 180.0 150.0 120.0
                                                90.0
```

```
MAX. FREQ. OF ENCOUNTER IN SERIES . FREQMAX : 2.000 rad/sec (range = 0.000 - 2.500 rad/sec)
CODE FOR WAVE FREQUENCY INPUT ..... KOMEQ : 1
MINIMUM CIRCULAR WAVE FREQUENCY ..... OMMIN : 0.100 rad/sec
MAXIMUM CIRCULAR WAVE FREQUENCY ..... OMMAX : 2.500 rad/sec
INCREMENT IN WAVE FREQUENCIES ..... OMINC : 0.050 rad/sec
```

```
WAVE AMPLITUDE FOR LINEARISATION ... WAVAMP : 1.250 m
```

BASE LINE TO CENTRE OF GRAVITY ... +GKGM=KG : 3.960 m

MASS-GYRADIUS k-xx GYR(1) : 9.950 m
 MASS-GYRADIUS k-yy GYR(2) : 27.740 m
 MASS-GYRADIUS k-zz GYR(3) : 29.140 m

NUMBER OF LOAD-CALCULATION SECTIONS .. NBTM : 2
 LOCATIONS FORWARD A.P.P. AND ABOVE BASE (m) : 24.00 3.60
 48.00 3.60

NUMBER OF LOAD-INFORMATION SECTIONS ... NSM : 2

X-APP (m)	SECTIONAL MASS (ton/m)	SECTIONAL KG (m)	SECTIONAL k-xx (m)
0.000	2.370E+02	3.960	9.950
96.000	2.370E+02	3.960	9.950

TUNE-CODE SECTIONAL MASSES KTUN(1) : 0
 TUNE-CODE SECTIONAL VERTICAL C.G. ..KTUN(2) : 1
 TUNE-CODE SECTIONAL GYRADII IN ROLL KTUN(3) : 1

CODE OF ROLL DAMPING INPUT KRD : 1
 AVERAGE ROLL AMPLITUDE ROLAMP : 5.000 deg
 ROLL DAMPING COEFFICIENTS (-) RDK1 and RDK2 : 0.0200 and 0.5000

CODE OF ANTI-ROLLING DEVICES KARD : 0

NUMBER OF LINEAR SPRINGS NCAB : 0

NUMBER OF DISCRETE POINTS NPTS : 0

NUMBER OF SEA STATES NSEA : 4
 CODE OF IRREGULAR SEA DESCRIPTION KSEA : -3
 WAVE HEIGHTS (m) / PERIODS (s) / Gamma (-) : 2.00 4.67 3.30
 2.00 5.84 3.30
 2.00 7.39 3.30
 3.50 7.39 3.30

INPUT-CODE OF CRITERA FOR SHIPMOTIONS KRIT : 0

GEOMETRICAL HULLFORM DATA

ACTUAL MIDSHIP DRAFT (T) : 7.650 m
 ACTUAL TRIM BY STERN : 0.000 m

LENGTH BETWEEN PERPENDICULARS (Lpp) : 96.000 m
 REAR SECTION TO A.P.P. : 0.000 m

WATERLINE : LENGTH (Lwl) : 96.000 m
 BEAM (B) : 30.250 m
 AREA : 2904 m²
 AREA COEFFICIENT (Lpp) : 1.0000
 AREA COEFFICIENT (Lwl) : 1.0000
 CENTROID TO A.P.P. : 48.000 m (+0.000 m or +0.00 % Lpp/2)
 CENTROID TO REAR SECTION : 48.000 m (+0.000 m or +0.00 % Lwl/2)

DISPLACEMENT : VOLUME : 22215 m³
 BLOCKCOEFFICIENT (Lpp) : 1.0000
 BLOCKCOEFFICIENT (Lwl) : 1.0000
 CENTROID TO A.P.P. : 48.000 m (+0.000 m or +0.00 % Lpp/2)
 CENTROID TO REAR SECTION .. : 48.000 m (+0.000 m or +0.00 % Lwl/2)
 CENTROID TO WATERLINE : 3.825 m
 CENTROID TO KEELLINE : 3.825 m
 MIDSHIP SECTION COEFFICIENT : 1.0000
 LONG. PRISMATIC COEFFICIENT : 1.0000
 VERT. PRISMATIC COEFFICIENT : 1.0000
 RATIO Lpp/B : 3.174
 RATIO Lwl/B : 3.174
 RATIO B/T : 3.954
 WETTED SURFACE HULL : 4835 m²

STABILITY PARAMETERS

KB : 3.825 m
 KG : 3.960 m
 BM-TRANSVERSE . : 9.968 m
 GM-TRANSVERSE . : 9.834 m
 BM-LONGITUDINAL : 100.397 m
 GM-LONGITUDINAL : 100.262 m

SECTIONAL HULLFORM DATA

STATION NUMBER	X-APP (m)	HALF CL-CL (m)	HALF WIDTH (m)	DRAFT (m)	AREA (m ²)	AREA COEFF (-)	KB (m)	BO (m)	WETTED LENGTH (m)
0.00	0.000	0.000	15.125	7.650	231.4011	1.0000	3.825	3.825	45.548
10.00	48.000	0.000	15.125	7.650	231.4011	1.0000	3.825	3.825	45.548
20.00	96.000	0.000	15.125	7.650	231.4011	1.0000	3.825	3.825	45.548

ORIGINAL AND MODIFIED LOAD DISTRIBUTION DATA

X-APP (m)	...ORIGINAL DISTRIBUTION...			...MODIFIED DISTRIBUTION...				
	MASS (ton/m)	KG (m)	k-xx (m)	MASS (ton/m)	KG (m)	k-xx (m)		
0.000	2.372E+02	3.960	9.950	2.372E+02	3.960	9.950		
12.000	2.372E+02	3.960	9.950	2.372E+02	3.960	9.950		
24.000	2.372E+02	3.960	9.950	2.372E+02	3.960	9.950		
36.000	2.372E+02	3.960	9.950	2.372E+02	3.960	9.950		
48.000	2.372E+02	3.960	9.950	2.372E+02	3.960	9.950		
60.000	2.372E+02	3.960	9.950	2.372E+02	3.960	9.950		
72.000	2.372E+02	3.960	9.950	2.372E+02	3.960	9.950		
84.000	2.372E+02	3.960	9.950	2.372E+02	3.960	9.950		
96.000	2.372E+02	3.960	9.950	2.372E+02	3.960	9.950		
MASS (ton) : 22771				MASS (ton) : 22770				
KG (m) : 3.960				KG (m) : 3.960				
APP-CoG (m) : 48.000				APP-CoG (m) : 48.000				
k-xx (m) : 9.950				k-xx (m) : 9.950				I-xx : 2.254E+06 ton.m2
k-yy (m) : 27.713				k-yy (m) : 27.713				I-yy : 1.749E+07 ton.m2
k-zz (m) : 27.713				k-zz (m) : 27.713				I-zz : 1.749E+07 ton.m2
								I-xz : 3.056E-08 ton.m2
								I-zx : 3.056E-08 ton.m2

VERTICAL STILL WATER LOADS

X-APP (m)	SHEAR	BENDING
	FORCE (kN)	MOMENT (kNm)
24.000	7.708E-03	2.004E-01
48.000	2.499E-02	2.450E-01

NATURAL ROLL AND COEFFICIENTS AT FIXED AMPLITUDE

FORWARD SHIP SPEED . (kn) : 0.00
MEAN ROLL AMPLITUDE (deg) : 5.000

NATURAL ROLL PERIOD . (s) : 7.779
NATURAL FREQUENCY . (r/s) : 0.808

LINEAR EQUIVALENT GM (m) : 9.846

MASS, k-phi-phi (m) : 12.165
COMPONENTS k-phi-phi:
 SOLID MASS PART .. (m) : 9.950
 2-D POTENTIAL PART (m) : 7.000

DAMPING, kappa (-) : 0.0636
COMPONENTS kappa:
 2-D POTENTIAL PART (-) : 0.0589
 ADDITIONAL PART .. (-) : 0.0047

NATURAL HEAVE AT ZERO FORWARD SPEED

NATURAL HEAVE PERIOD (s) : 8.625
NATURAL FREQUENCY (r/s) : 0.728

NATURAL PITCH AT ZERO FORWARD SPEED

NATURAL PITCH PERIOD (s) : 8.631
NATURAL FREQUENCY (r/s) : 0.728

Uitvoer

STATISTICS OF LOADS IN SECTIONS

FORWARD SPEED = 0.00 kn
 WAVE DIRECTION = +180 deg off stern

SECTION NR = 01
 X-APP = 24.000 m
 Y-CL = 0.000 m
 Z-BL = 3.600 m

.....SIGNIFICANT VALUES OF.....											
.....SEA.....		.....VERTICAL.....				.....HORIZONTAL.....				.....TORSIONAL.....	
HEIGHT	PER	..SHEAR FORCE..		.BENDING MOMENT.		..SHEAR FORCE..		.BENDING MOMENT.		....MOMENT.....	
(m)	(s)	AMPL	PER	AMPL	PER	AMPL	PER	AMPL	PER	AMPL	PER
		(kN)	(s)	(kNm)	(s)	(kN)	(s)	(kNm)	(s)	(kNm)	(s)
2.00	4.67	6.791E+02	6.23	1.010E+04	6.25	6.325E-08	6.28	6.325E-08	6.28	6.325E-08	6.28
2.00	5.84	1.124E+03	8.00	1.868E+04	8.14	6.325E-08	6.28	6.325E-08	6.28	6.325E-08	6.28
2.00	7.39	1.364E+03	9.61	2.379E+04	9.75	6.325E-08	6.28	6.325E-08	6.28	6.325E-08	6.28
3.50	7.39	2.387E+03	9.61	4.163E+04	9.75	6.325E-08	6.28	6.325E-08	6.28	6.325E-08	6.28

STATISTICS OF LOADS IN SECTIONS

FORWARD SPEED = 0.00 kn
 WAVE DIRECTION = +180 deg off stern

SECTION NR = 02
 X-APP = 48.000 m
 Y-CL = 0.000 m
 Z-BL = 3.600 m

.....SIGNIFICANT VALUES OF.....											
.....SEA.....		.....VERTICAL.....				.....HORIZONTAL.....				.....TORSIONAL.....	
HEIGHT	PER	..SHEAR FORCE..		.BENDING MOMENT.		..SHEAR FORCE..		.BENDING MOMENT.		....MOMENT.....	
(m)	(s)	AMPL	PER	AMPL	PER	AMPL	PER	AMPL	PER	AMPL	PER
		(kN)	(s)	(kNm)	(s)	(kN)	(s)	(kNm)	(s)	(kNm)	(s)
2.00	4.67	5.879E+02	5.82	1.734E+04	6.98	6.325E-08	6.28	6.325E-08	6.28	6.325E-08	6.28
2.00	5.84	6.060E+02	6.95	3.441E+04	8.36	6.325E-08	6.28	6.325E-08	6.28	6.325E-08	6.28
2.00	7.39	5.266E+02	7.99	4.316E+04	9.83	6.325E-08	6.28	6.325E-08	6.28	6.325E-08	6.28
3.50	7.39	9.216E+02	7.99	7.552E+04	9.83	6.325E-08	6.28	6.325E-08	6.28	6.325E-08	6.28

STATISTICS OF LOADS IN SECTIONS

FORWARD SPEED = 0.00 kn
 WAVE DIRECTION = +150 deg off stern

SECTION NR = 01
 X-APP = 24.000 m
 Y-CL = 0.000 m
 Z-BL = 3.600 m

.....SIGNIFICANT VALUES OF.....

.....SEA.....		.....VERTICAL.....				.....HORIZONTAL.....				.....TORSIONAL.....	
HEIGHT	PER	..SHEAR FORCE..		.BENDING MOMENT.		..SHEAR FORCE..		.BENDING MOMENT.		....MOMENT.....	
(m)	(s)	AMPL	PER	AMPL	PER	AMPL	PER	AMPL	PER	AMPL	PER
		(kN)	(s)	(kNm)	(s)	(kN)	(s)	(kNm)	(s)	(kNm)	(s)
2.00	4.67	6.370E+02	6.32	9.563E+03	6.42	1.188E+03	6.45	1.833E+04	6.46	7.833E+03	6.30
2.00	5.84	9.564E+02	7.93	1.630E+04	8.09	1.179E+03	7.34	1.928E+04	7.42	8.992E+03	7.51
2.00	7.39	1.104E+03	9.47	1.955E+04	9.63	9.226E+02	7.99	1.539E+04	8.14	8.884E+03	8.84
3.50	7.39	1.932E+03	9.47	3.421E+04	9.63	1.615E+03	7.99	2.694E+04	8.14	1.555E+04	8.84

STATISTICS OF LOADS IN SECTIONS

FORWARD SPEED = 0.00 kn
 WAVE DIRECTION = +150 deg off stern

SECTION NR = 02
 X-APP = 48.000 m
 Y-CL = 0.000 m
 Z-BL = 3.600 m

.....SIGNIFICANT VALUES OF.....

.....SEA.....		.....VERTICAL.....				.....HORIZONTAL.....				.....TORSIONAL.....	
HEIGHT	PER	..SHEAR FORCE..		.BENDING MOMENT.		..SHEAR FORCE..		.BENDING MOMENT.		....MOMENT.....	
(m)	(s)	AMPL	PER	AMPL	PER	AMPL	PER	AMPL	PER	AMPL	PER
		(kN)	(s)	(kNm)	(s)	(kN)	(s)	(kNm)	(s)	(kNm)	(s)
2.00	4.67	5.156E+02	5.77	1.715E+04	6.88	9.428E+02	6.08	3.323E+04	6.65	9.883E+03	6.91
2.00	5.84	4.747E+02	6.59	2.976E+04	8.25	7.011E+02	6.44	3.498E+04	7.57	1.404E+04	7.99
2.00	7.39	3.885E+02	7.42	3.523E+04	9.69	4.844E+02	6.56	2.785E+04	8.26	1.360E+04	9.18
3.50	7.39	6.799E+02	7.42	6.165E+04	9.69	8.478E+02	6.56	4.873E+04	8.26	2.379E+04	9.18

STATISTICS OF LOADS IN SECTIONS

FORWARD SPEED = 0.00 kn
 WAVE DIRECTION = +120 deg off stern

SECTION NR = 01
 X-APP = 24.000 m
 Y-CL = 0.000 m
 Z-BL = 3.600 m

SIGNIFICANT VALUES OF											
SEA		VERTICAL				HORIZONTAL				TORSIONAL	
HEIGHT	PER	SHEAR FORCE		BENDING MOMENT		SHEAR FORCE		BENDING MOMENT		MOMENT	
(m)	(s)	AMPL	PER	AMPL	PER	AMPL	PER	AMPL	PER	AMPL	PER
		(kN)	(s)	(kNm)	(s)	(kN)	(s)	(kNm)	(s)	(kNm)	(s)
2.00	4.67	4.277E+02	5.84	6.677E+03	5.96	1.337E+03	6.11	2.256E+04	6.16	1.527E+04	6.40
2.00	5.84	4.516E+02	7.00	7.954E+03	7.33	1.080E+03	6.66	1.850E+04	6.75	1.519E+04	7.33
2.00	7.39	4.477E+02	8.44	8.140E+03	8.79	7.849E+02	7.00	1.354E+04	7.12	1.286E+04	8.23
3.50	7.39	7.835E+02	8.44	1.424E+04	8.79	1.374E+03	7.00	2.369E+04	7.12	2.250E+04	8.23

STATISTICS OF LOADS IN SECTIONS

FORWARD SPEED = 0.00 kn
 WAVE DIRECTION = +120 deg off stern

SECTION NR = 02
 X-APP = 48.000 m
 Y-CL = 0.000 m
 Z-BL = 3.600 m

SIGNIFICANT VALUES OF											
SEA		VERTICAL				HORIZONTAL				TORSIONAL	
HEIGHT	PER	SHEAR FORCE		BENDING MOMENT		SHEAR FORCE		BENDING MOMENT		MOMENT	
(m)	(s)	AMPL	PER	AMPL	PER	AMPL	PER	AMPL	PER	AMPL	PER
		(kN)	(s)	(kNm)	(s)	(kN)	(s)	(kNm)	(s)	(kNm)	(s)
2.00	4.67	2.114E+02	5.33	1.249E+04	5.94	5.621E+02	5.62	4.112E+04	6.16	2.402E+04	6.44
2.00	5.84	1.624E+02	5.62	1.434E+04	7.25	3.960E+02	5.74	3.352E+04	6.74	2.343E+04	7.33
2.00	7.39	1.161E+02	5.93	1.449E+04	8.70	2.686E+02	5.80	2.447E+04	7.09	1.930E+04	8.14
3.50	7.39	2.032E+02	5.93	2.536E+04	8.70	4.701E+02	5.80	4.282E+04	7.09	3.378E+04	8.14

STATISTICS OF LOADS IN SECTIONS

FORWARD SPEED = 0.00 kn
 WAVE DIRECTION = +090 deg off stern

SECTION NR = 01
 X-APP = 24.000 m
 Y-CL = 0.000 m
 Z-BL = 3.600 m

.....SIGNIFICANT VALUES OF.....

.....SEA.....		.....VERTICAL.....				.....HORIZONTAL.....				.....TORSIONAL.....	
HEIGHT	PER	..SHEAR FORCE..		.BENDING MOMENT.		..SHEAR FORCE..		.BENDING MOMENT.		....MOMENT.....	
(m)	(s)	AMPL	PER	AMPL	PER	AMPL	PER	AMPL	PER	AMPL	PER
		(kN)	(s)	(kNm)	(s)	(kN)	(s)	(kNm)	(s)	(kNm)	(s)
2.00	4.67	4.478E-04	7.09	5.728E-03	7.11	1.384E-03	6.77	2.047E-02	6.88	1.796E-02	6.68
2.00	5.84	1.003E-03	8.57	1.229E-02	8.50	1.753E-03	7.73	3.356E-02	7.90	1.862E-02	7.56
2.00	7.39	1.370E-03	10.25	1.383E-02	9.84	1.608E-03	8.75	2.638E-02	8.79	1.354E-02	7.93
3.50	7.39	2.397E-03	10.25	2.420E-02	9.84	2.814E-03	8.75	4.617E-02	8.79	2.370E-02	7.93

STATISTICS OF LOADS IN SECTIONS

FORWARD SPEED = 0.00 kn
 WAVE DIRECTION = +090 deg off stern

SECTION NR = 02
 X-APP = 48.000 m
 Y-CL = 0.000 m
 Z-BL = 3.600 m

.....SIGNIFICANT VALUES OF.....

.....SEA.....		.....VERTICAL.....				.....HORIZONTAL.....				.....TORSIONAL.....	
HEIGHT	PER	..SHEAR FORCE..		.BENDING MOMENT.		..SHEAR FORCE..		.BENDING MOMENT.		....MOMENT.....	
(m)	(s)	AMPL	PER	AMPL	PER	AMPL	PER	AMPL	PER	AMPL	PER
		(kN)	(s)	(kNm)	(s)	(kN)	(s)	(kNm)	(s)	(kNm)	(s)
2.00	4.67	1.002E-03	7.21	2.092E-02	7.06	3.692E-03	6.76	5.226E-02	6.61	3.649E-02	6.69
2.00	5.84	2.297E-03	8.55	4.601E-02	8.54	4.477E-03	7.63	6.100E-02	7.73	4.021E-02	7.66
2.00	7.39	2.992E-03	10.16	6.265E-02	10.21	3.540E-03	8.35	6.702E-02	9.07	2.917E-02	8.03
3.50	7.39	5.236E-03	10.16	1.096E-01	10.21	6.196E-03	8.35	1.173E-01	9.07	5.104E-02	8.03

Uitvoerfile van de overdrachtsfuncties

De uitvoerfile heeft de filenaam FORT20. en bevat de amplitude van de dwarskrachten en momenten als functie van de frequentie voor verschillende invalshoeken en plaatsen in de doorsnede voor een golf met hoogte $H = 2$ m. De overdrachtsfunctie is gelijk aan het kwadraat van het quotient van de moment amplitude en de amplitude van de uitwijking, dus kan de overdrachtsfunctie gemakkelijk berekend worden uit de gegeven waarden:

$$R_{M\xi}^2(\omega) = \left(\frac{M_a}{\xi_a}\right)^2, \text{ met } \xi_a = 1 \text{ volgt } R_{M\xi}^2 = M_a^2 \quad [\text{V.1}]$$

De uitvoerfile bevat de volgende gegevens:

- invalshoek (180,150, enz.)
- plaats in de doorsnede (1 = 1/4 L ; 2 = 1/2 L)
- golffrequentie ω (van 0,1 tot 2,5 met stapgrootte 0,05)
- amplitude van de verticale dwarskracht
- amplitude van het verticale moment
- amplitude van de horizontale dwarskracht
- amplitude van het horizontale moment
- amplitude van het wringmoment, zie onderstaand gedeelte van de uitvoerfile FORT20 :

180.0	1	0.100	6.656E+01	1.208E+03	0.000E-01	0.000E-01	0.000E-01
180.0	1	0.150	1.430E+02	2.599E+03	0.000E-01	0.000E-01	0.000E-01
180.0	1	0.200	2.507E+02	4.560E+03	0.000E-01	0.000E-01	0.000E-01
180.0	1	0.250	3.894E+02	7.086E+03	0.000E-01	0.000E-01	0.000E-01
180.0	1	0.300	5.490E+02	9.986E+03	0.000E-01	0.000E-01	0.000E-01
180.0	1	0.350	7.344E+02	1.334E+04	0.000E-01	0.000E-01	0.000E-01
180.0	1	0.400	9.265E+02	1.679E+04	0.000E-01	0.000E-01	0.000E-01
180.0	1	0.450	1.120E+03	2.022E+04	0.000E-01	0.000E-01	0.000E-01
180.0	1	0.500	1.302E+03	2.340E+04	0.000E-01	0.000E-01	0.000E-01
180.0	1	0.550	1.449E+03	2.589E+04	0.000E-01	0.000E-01	0.000E-01
180.0	1	0.600	1.550E+03	2.747E+04	0.000E-01	0.000E-01	0.000E-01
180.0	1	0.650	1.578E+03	2.768E+04	0.000E-01	0.000E-01	0.000E-01
180.0	1	0.700	1.529E+03	2.641E+04	0.000E-01	0.000E-01	0.000E-01
180.0	1	0.750	1.387E+03	2.339E+04	0.000E-01	0.000E-01	0.000E-01
180.0	1	0.800	1.173E+03	1.902E+04	0.000E-01	0.000E-01	0.000E-01
180.0	1	0.850	9.090E+02	1.380E+04	0.000E-01	0.000E-01	0.000E-01
180.0	1	0.900	6.719E+02	9.096E+03	0.000E-01	0.000E-01	0.000E-01
180.0	1	0.950	5.452E+02	6.490E+03	0.000E-01	0.000E-01	0.000E-01
180.0	1	1.000	5.292E+02	6.077E+03	0.000E-01	0.000E-01	0.000E-01
180.0	1	1.050	5.184E+02	5.975E+03	0.000E-01	0.000E-01	0.000E-01
180.0	1	1.100	4.884E+02	6.810E+03	0.000E-01	0.000E-01	0.000E-01
180.0	1	1.150	5.518E+02	9.917E+03	0.000E-01	0.000E-01	0.000E-01
180.0	1	1.200	7.379E+02	1.332E+04	0.000E-01	0.000E-01	0.000E-01
180.0	1	1.250	9.071E+02	1.456E+04	0.000E-01	0.000E-01	0.000E-01
180.0	1	1.300	9.400E+02	1.261E+04	0.000E-01	0.000E-01	0.000E-01
180.0	1	1.350	8.020E+02	8.819E+03	0.000E-01	0.000E-01	0.000E-01
180.0	1	1.400	5.555E+02	7.785E+03	0.000E-01	0.000E-01	0.000E-01
180.0	1	1.450	3.737E+02	1.002E+04	0.000E-01	0.000E-01	0.000E-01
180.0	1	1.500	4.173E+02	1.031E+04	0.000E-01	0.000E-01	0.000E-01
180.0	1	1.550	5.051E+02	7.320E+03	0.000E-01	0.000E-01	0.000E-01
180.0	1	1.600	5.033E+02	4.212E+03	0.000E-01	0.000E-01	0.000E-01
180.0	1	1.650	4.082E+02	5.988E+03	0.000E-01	0.000E-01	0.000E-01
180.0	1	1.700	2.627E+02	7.053E+03	0.000E-01	0.000E-01	0.000E-01

Bijlage VI Vergelijking van de overdrachtsfuncties bepaald met Seaway en door MARIN

Op de volgende pagina's zijn de overdrachtsfuncties getekend voor de verticale en horizontale momenten. De dikke doorgetrokken lijn geeft de overdrachtsfunctie berekend met Seaway weer. Deze is ingetekend in de figuren van MARIN. De doorgetrokken lijnen gelden voor een significante golf met $H_s = 2$ m en $T_p = 9.5$ sec, de gestippelde lijn voor $H_s = 2$ m en $T_p = 7.5$ sec, de onderbroken lijn voor $H_s = 3.5$ m en $T_p = 9.5$ sec en de punten voor enkelvoudige golven. Theoretisch zouden deze lijnen samen moeten vallen omdat de overdrachtsfunctie onafhankelijk is van het soort golf. Hieruit blijkt dat ook dat ook de modelproeven een benadering zijn van de werkelijkheid.

De figuren geven de overdrachtsfuncties bij de volgende condities:

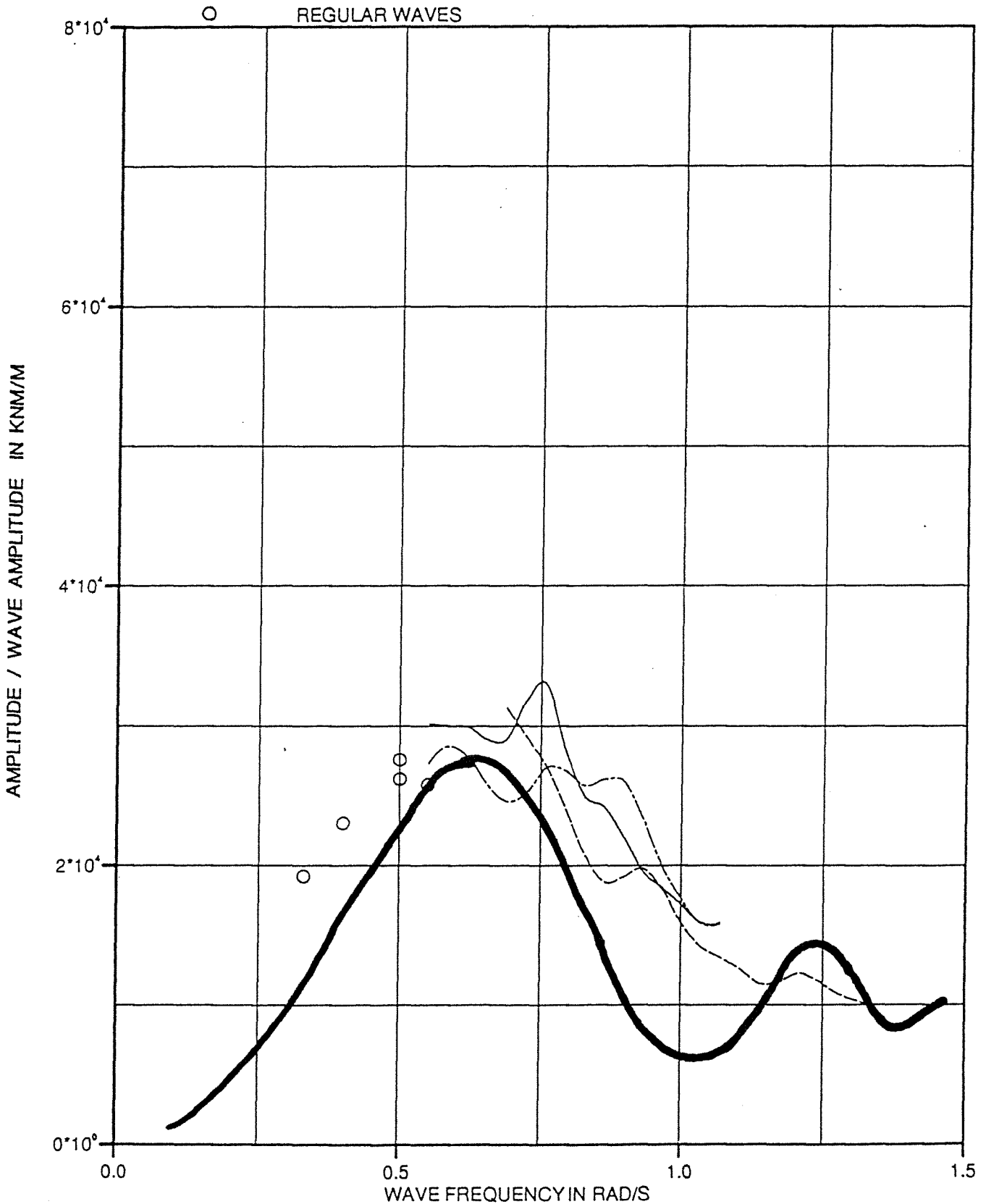
- pagina 2: Verticale moment op 1/4 van de lengte en een invalshoek van 180° en snelheid nul
- pagina 3: Verticale moment op 1/2 van de lengte en een invalshoek van 180° en snelheid nul
- pagina 4: Horizontale moment op 1/4 van de lengte en een invalshoek van 180° en snelheid nul
- pagina 5: Verticale moment op 1/4 van de lengte en een invalshoek van 150° en snelheid nul
- pagina 6: Verticale moment op 1/2 van de lengte en een invalshoek van 150° en snelheid nul
- pagina 7: Horizontale moment op 1/4 van de lengte en een invalshoek van 150° en snelheid nul
- pagina 8: Horizontale moment op 1/2 van de lengte en een invalshoek van 150° en snelheid nul
- pagina 9: Verticale moment op 1/4 van de lengte en een invalshoek van 120° en snelheid nul
- pagina 10: Verticale moment op 1/2 van de lengte en een invalshoek van 120° en snelheid nul
- pagina 11: Horizontale moment op 1/2 van de lengte en een invalshoek van 120° en snelheid nul
- pagina 12: Horizontale moment op 1/4 van de lengte en een invalshoek van 90° en snelheid nul
- pagina 13: Horizontale moment op 1/2 van de lengte en een invalshoek van 90° en snelheid nul
- pagina 14: Verticale moment op 1/4 van de lengte en een invalshoek van 0° en snelheid nul
- pagina 15: Verticale moment op 1/2 van de lengte en een invalshoek van 0° en snelheid nul
- pagina 16: Horizontale moment op 1/4 van de lengte en een invalshoek van 0° en snelheid nul
- pagina 17: Verticale moment op 1/4 van de lengte en een invalshoek van 180° en snelheid 4 kn
- pagina 18: Verticale moment op 1/2 van de lengte en een invalshoek van 180° en snelheid 4 kn

Uit de figuren blijkt dat de overdrachtsfuncties berekend met Seaway niet exact maar toch zeer goed de overdrachtsfuncties uit de modelproeven benaderd.

WIJKER TUNNEL MODEL TESTS: TRANSPORT OF A 96 M SECTION

RESPONSE OF MY L/4 (6)

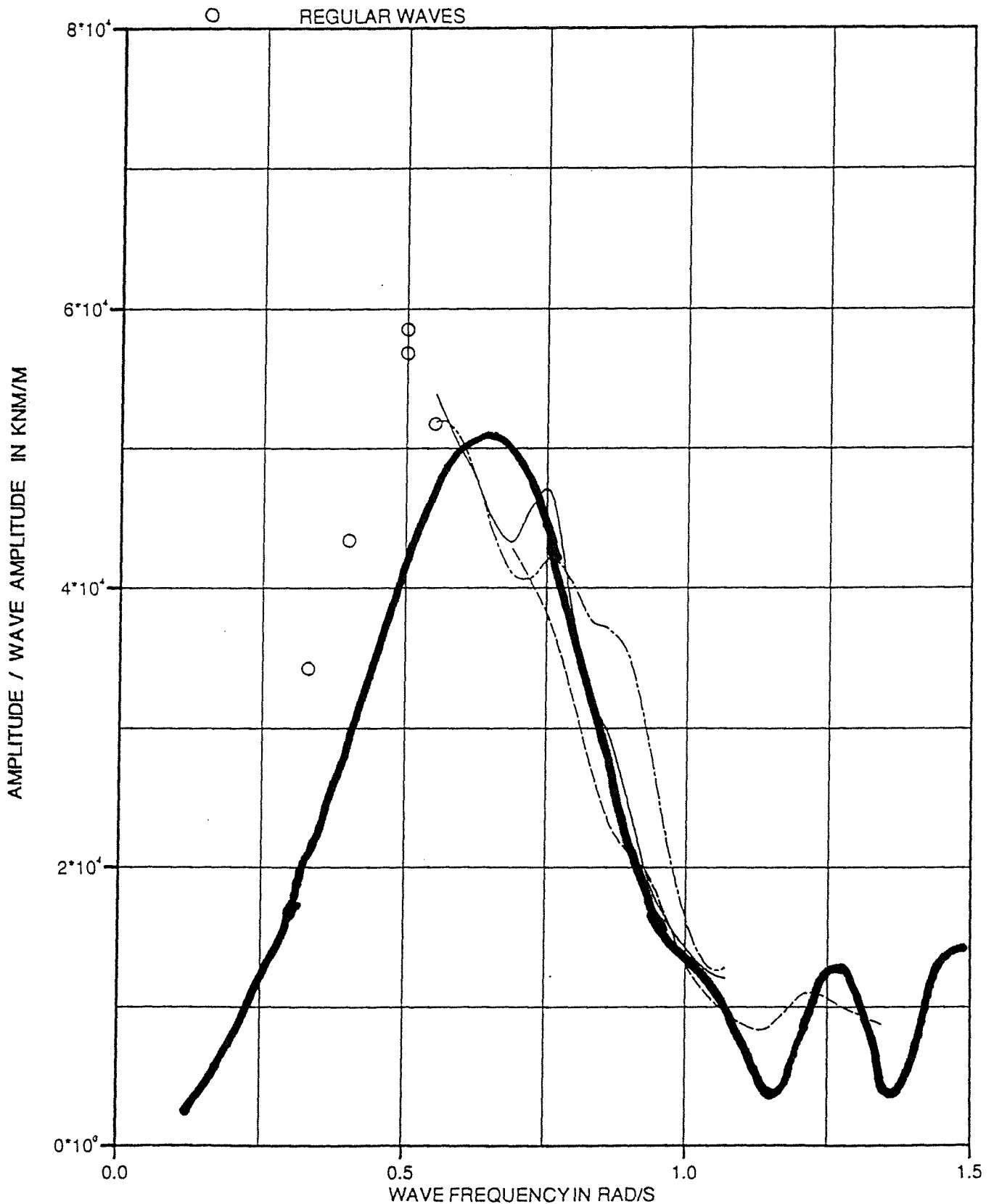
- TEST NO. 875601 Sign. height 2.0 m, Peak period 9.5 s
 - TEST NO. 875701 Sign. height 2.0 m, Peak period 7.5 s
 - - - - - TEST NO. 875801 Sign. height 3.5 m, Peak period 9.5 s
- TESTS IN IRREGULAR HEAD SEAS (180 deg)
TUNNEL SECTION MOORED IN SOFT SPRINGS



WIJKER TUNNEL MODEL TESTS: TRANSPORT OF A 96 M SECTION

RESPONSE OF MY L/2 (11)

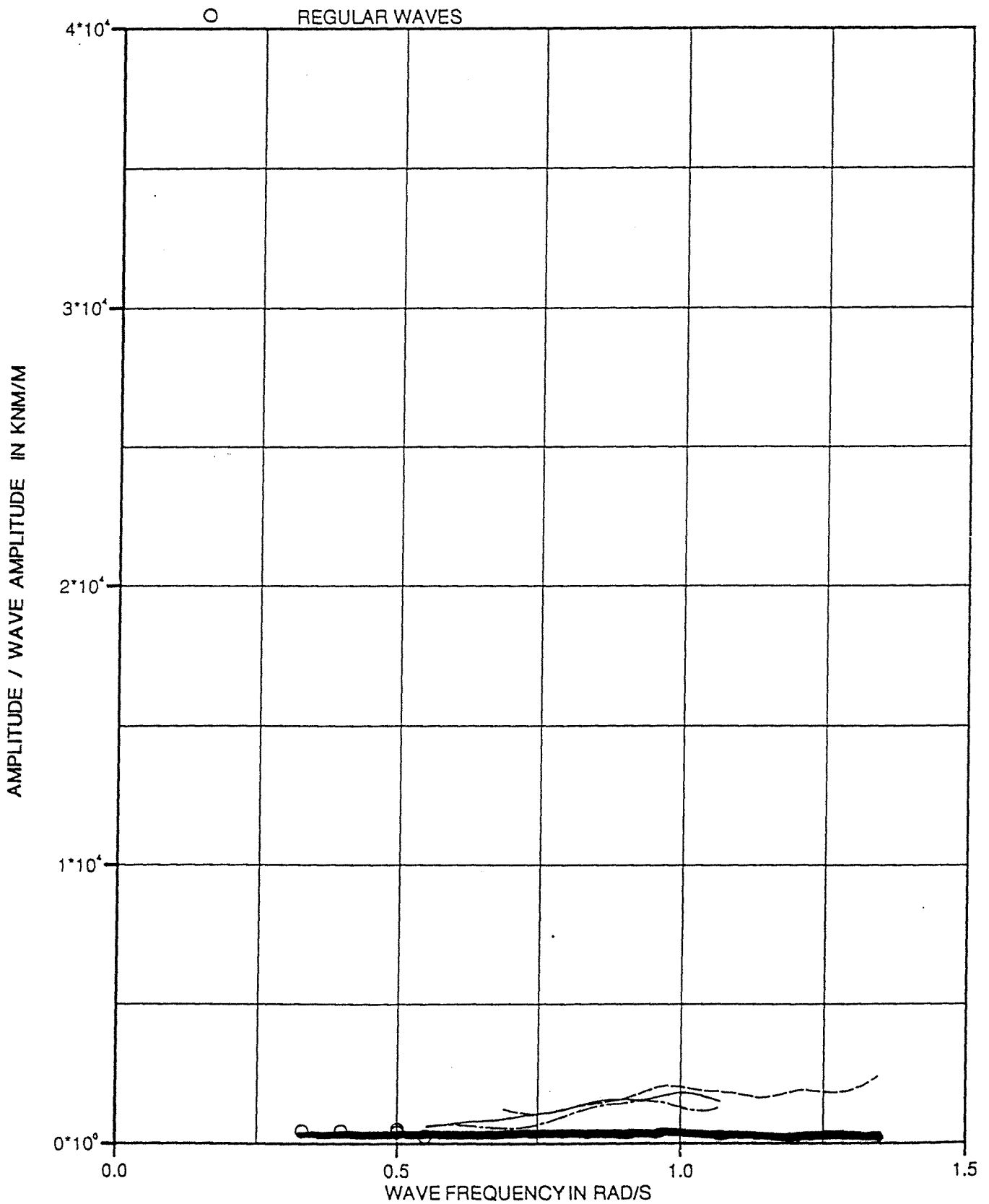
- TEST NO. 875601 Sign. height 2.0 m, Peak period 9.5 s
 - TEST NO. 875701 Sign. height 2.0 m, Peak period 7.5 s
 - - - - - TEST NO. 875801 Sign. height 3.5 m, Peak period 9.5 s
- TESTS IN IRREGULAR HEAD SEAS (180 deg)
TUNNEL SECTION MOORED IN SOFT SPRINGS



WIJKER TUNNEL MODEL TESTS: TRANSPORT OF A 96 M SECTION

RESPONSE OF MZ L/4 (107)

- TEST NO. 875601 Sign. height 2.0 m, Peak period 9.5 s
 - - - - - TEST NO. 875701 Sign. height 2.0 m, Peak period 7.5 s
 - · - · - TEST NO. 875801 Sign. height 3.5 m, Peak period 9.5 s
- TESTS IN IRREGULAR HEAD SEAS (180 deg)
TUNNEL SECTION MOORED IN SOFT SPRINGS

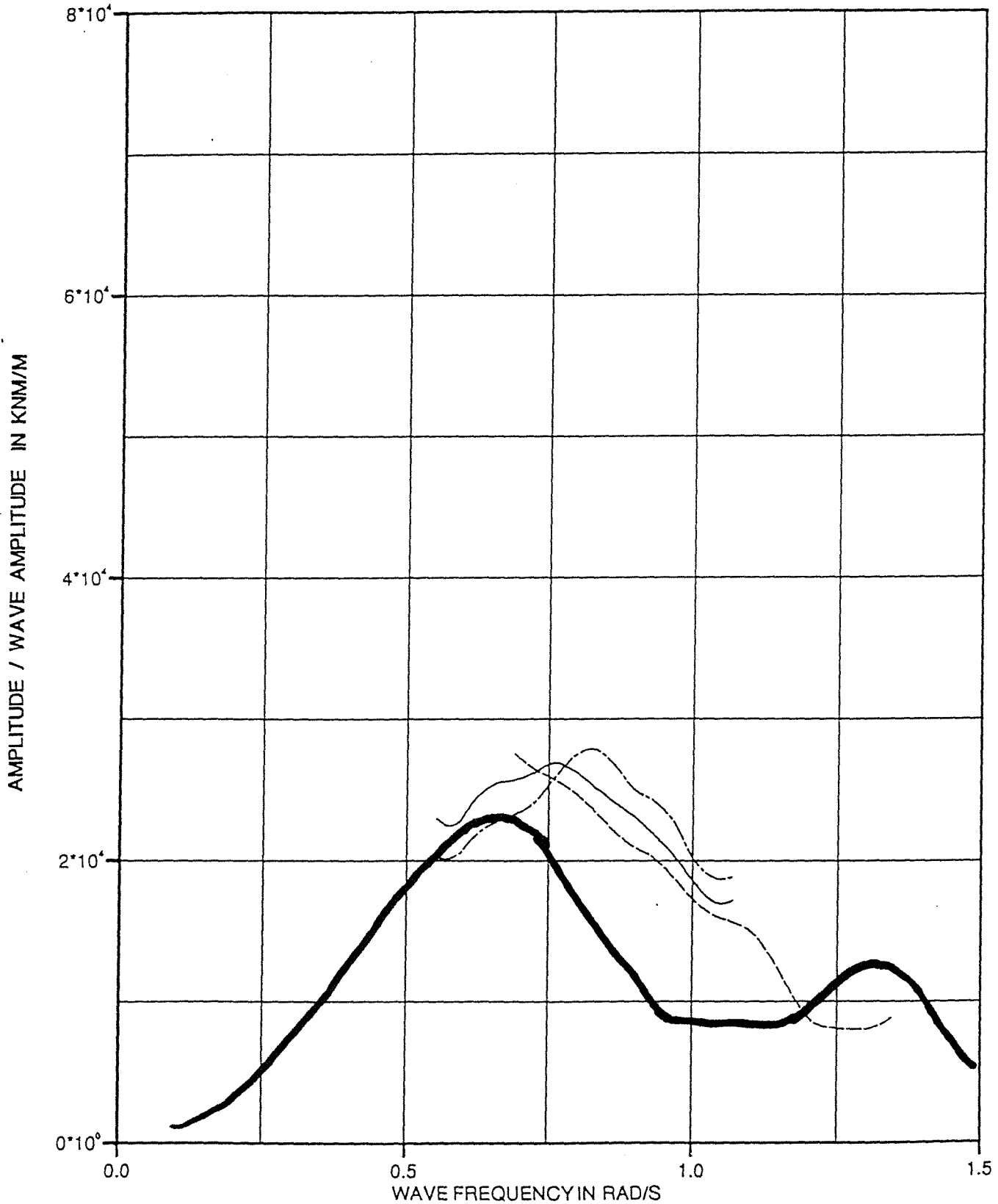


WIJKER TUNNEL MODEL TESTS: TRANSPORT OF A 96 M SECTION

RESPONSE OF MY L/4 (6)

- TEST NO. 876301 Sign. height 2.0 m, Peak period 9.5 s
- - - - - TEST NO. 876201 Sign. height 2.0 m, Peak period 7.5 s
- · - · - TEST NO. 876401 Sign. height 3.5 m, Peak period 9.5 s

TESTS IN IRREGULAR BOW QUARTERING SEAS (150 deg)
TUNNEL SECTION MOORED IN SOFT SPRINGS

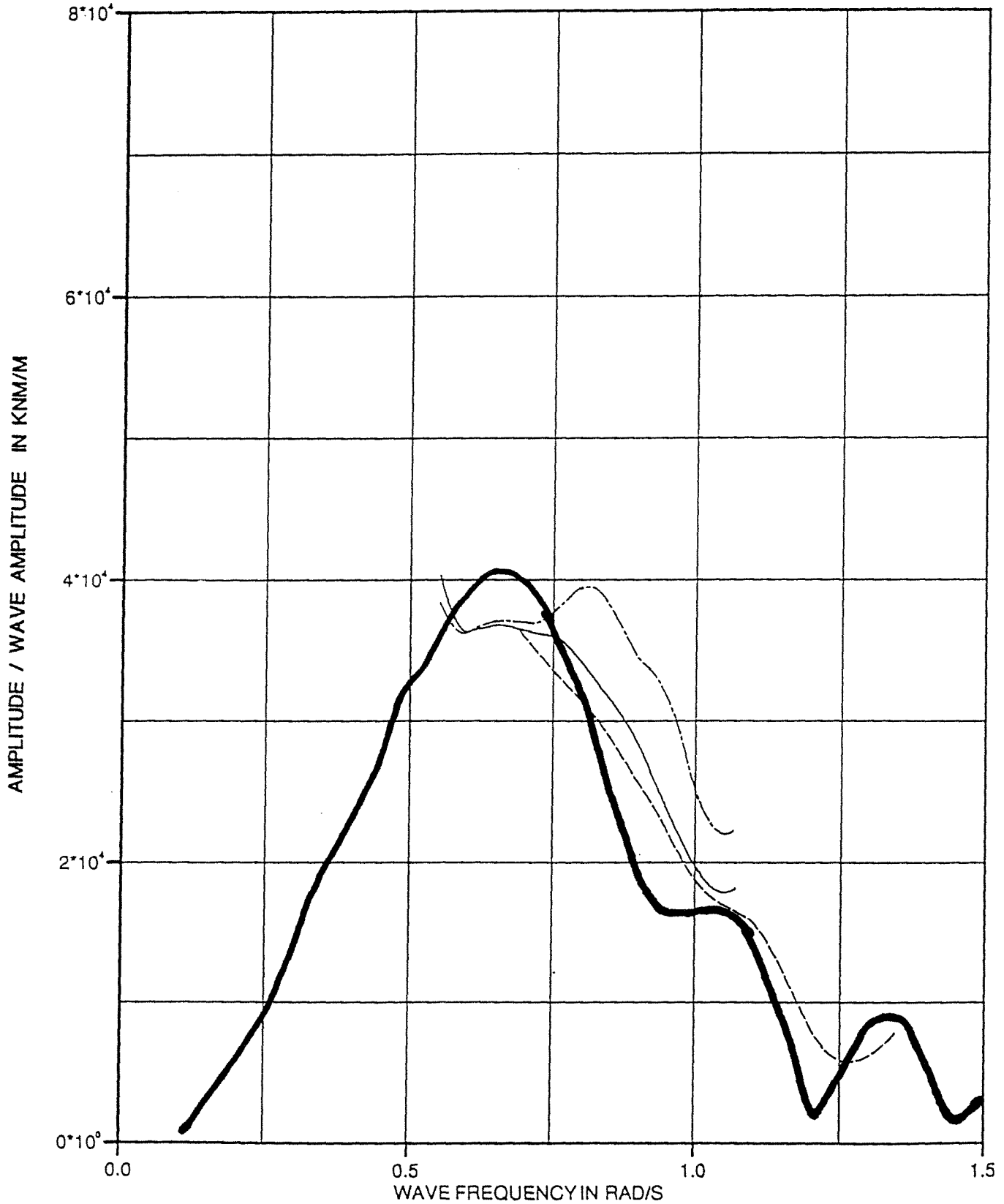


WIJKER TUNNEL MODEL TESTS: TRANSPORT OF A 96 M SECTION

RESPONSE OF MY L/2 (11)

- TEST NO. 876301 Sign. height 2.0 m, Peak period 9.5 s
- - - - - TEST NO. 876201 Sign. height 2.0 m, Peak period 7.5 s
- · - · - TEST NO. 876401 Sign. height 3.5 m, Peak period 9.5 s

TESTS IN IRREGULAR BOW QUARTERING SEAS (150 deg)
TUNNEL SECTION MOORED IN SOFT SPRINGS

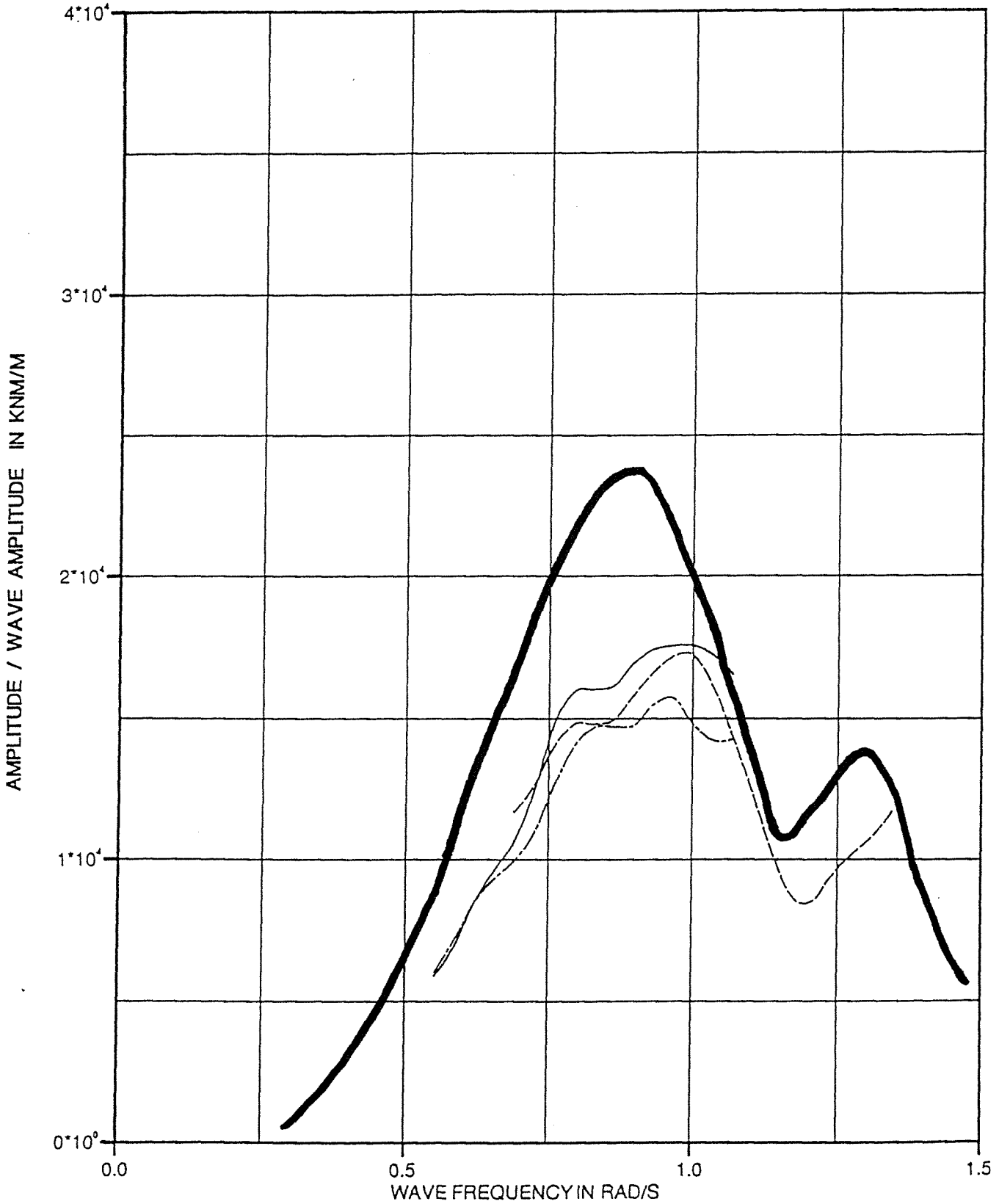


WIJKER TUNNEL MODEL TESTS: TRANSPORT OF A 96 M SECTION

RESPONSE OF MZ L/4 (107)

- TEST NO. 876301 Sign. height 2.0 m, Peak period 9.5 s
- - - - - TEST NO. 876201 Sign. height 2.0 m, Peak period 7.5 s
- · - · - TEST NO. 876401 Sign. height 3.5 m, Peak period 9.5 s

TESTS IN IRREGULAR BOW QUARTERING SEAS (150 deg)
TUNNEL SECTION MOORED IN SOFT SPRINGS

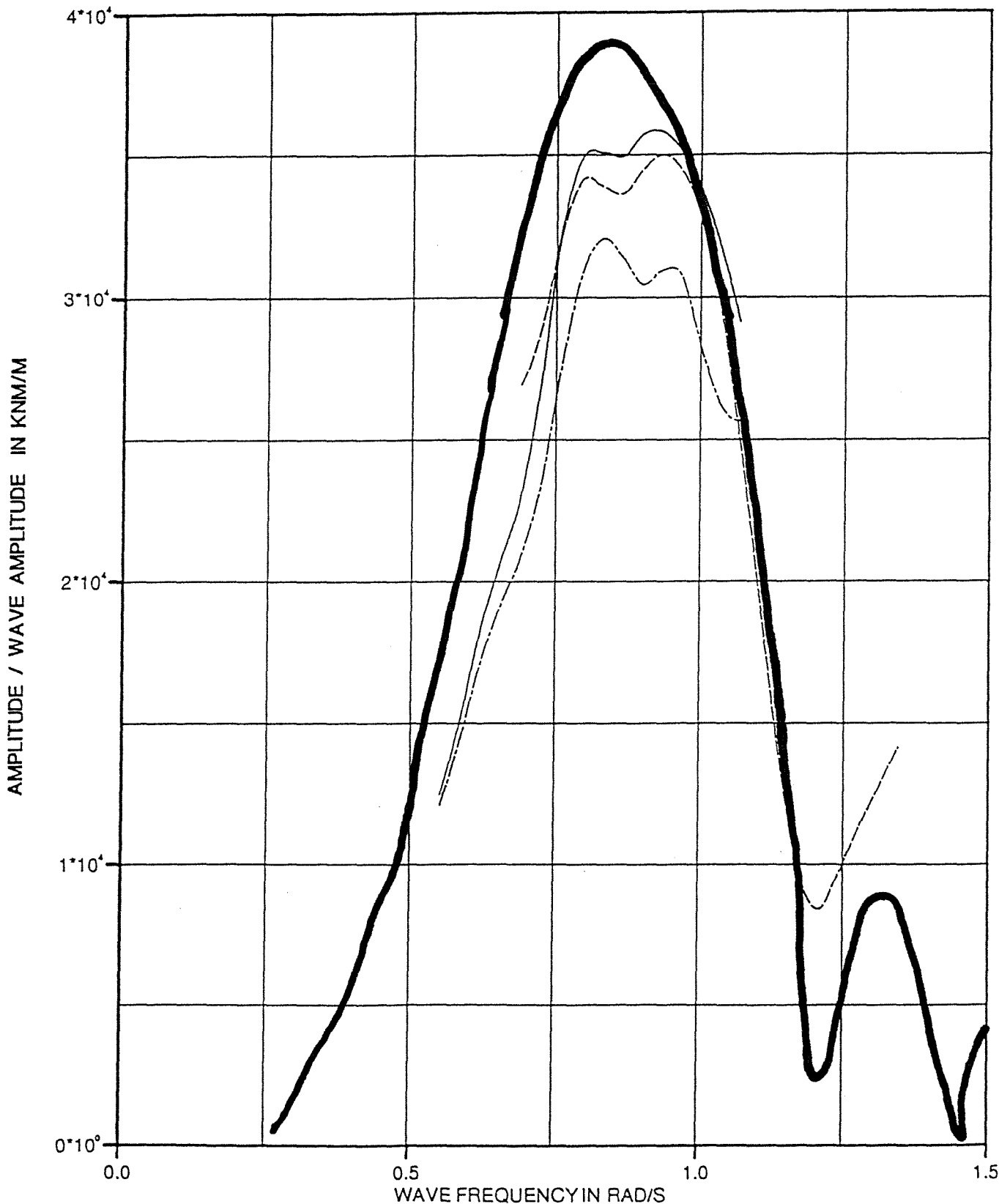


WIJKER TUNNEL MODEL TESTS: TRANSPORT OF A 96 M SECTION

RESPONSE OF MZ L/2 (112)

- TEST NO. 876301 Sign. height 2.0 m, Peak period 9.5 s
- - - - - TEST NO. 876201 Sign. height 2.0 m, Peak period 7.5 s
- · - · - TEST NO. 876401 Sign. height 3.5 m, Peak period 9.5 s

TESTS IN IRREGULAR BOW QUARTERING SEAS (150 deg)
TUNNEL SECTION MOORED IN SOFT SPRINGS



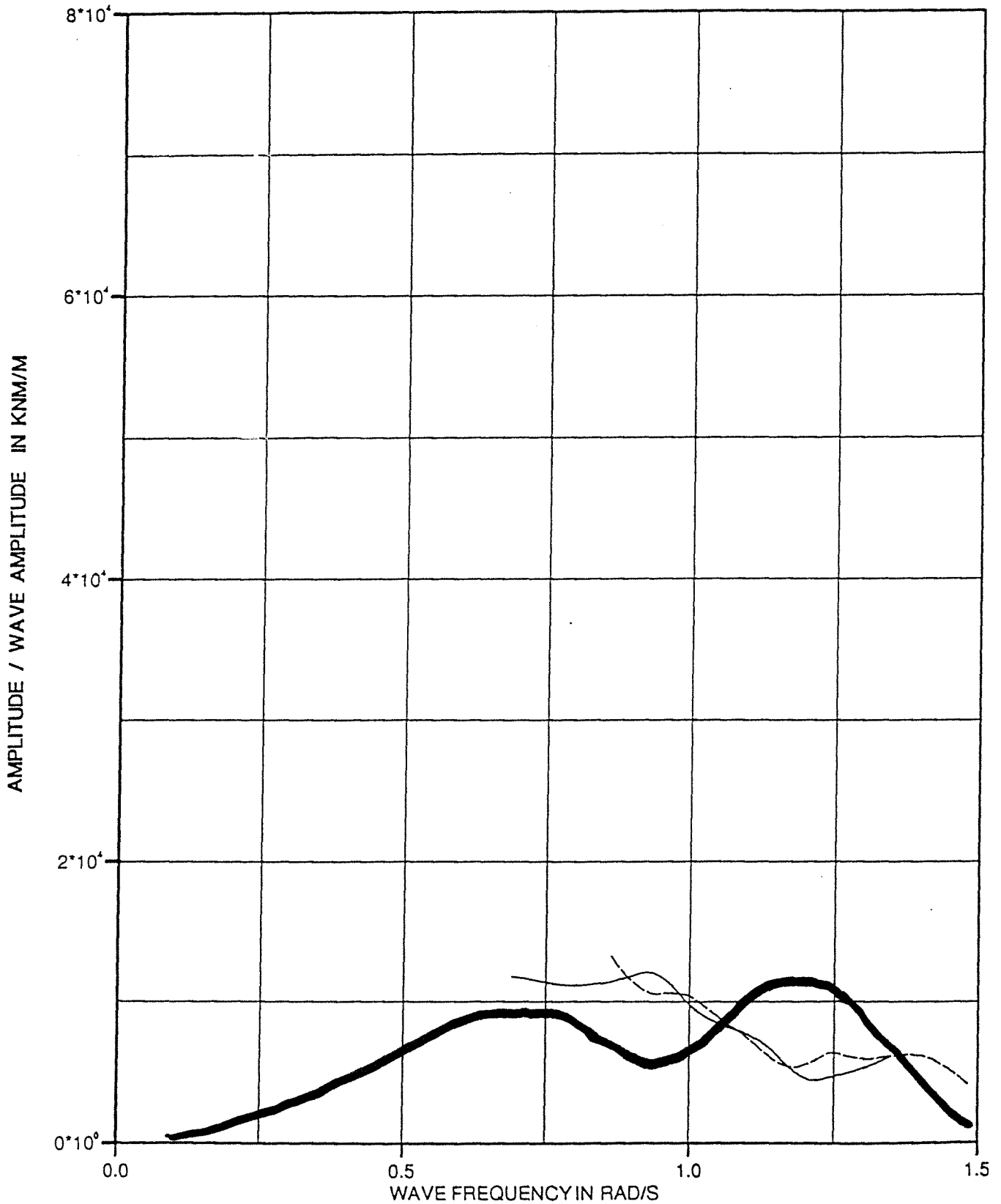
WIJKER TUNNEL MODEL TESTS: TRANSPORT OF A 96 M SECTION

RESPONSE OF MY L/4 (6)

———— TEST NO. 876101 Sign. height 2.0 m, Peak period 7.5 s

- - - - - TEST NO. 876001 Sign. height 2.0 m, Peak period 6.0 s

TESTS IN IRREGULAR BOW QUARTERING SEAS (120 deg)
TUNNEL SECTION MOORED IN SOFT SPRINGS

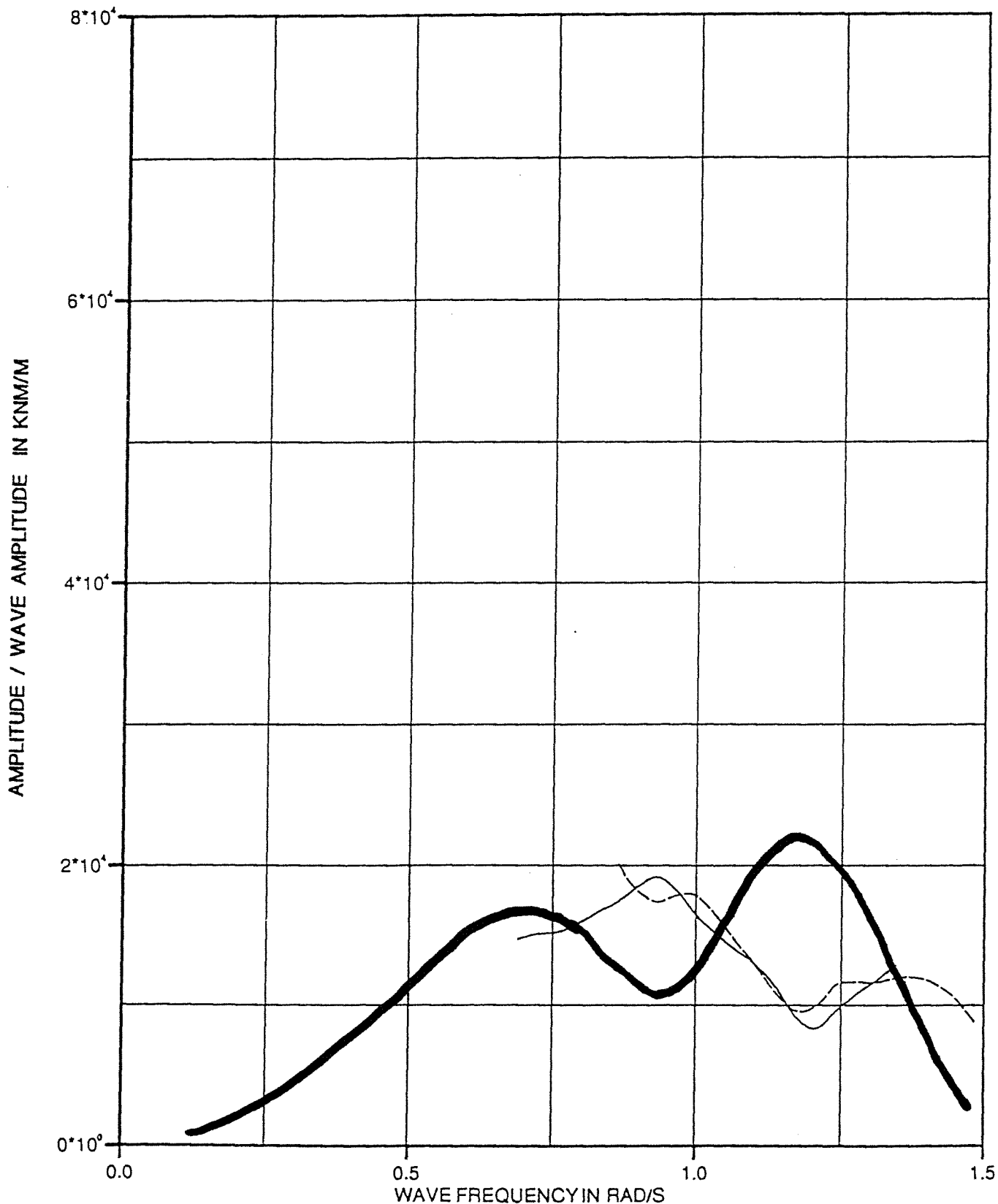


WIJKER TUNNEL MODEL TESTS: TRANSPORT OF A 96 M SECTION

RESPONSE OF MY L/2 (11)

- TEST NO. 876101 Sign. height 2.0 m, Peak period 7.5 s
- - - - - TEST NO. 876001 Sign. height 2.0 m, Peak period 6.0 s

TESTS IN IRREGULAR BOW QUARTERING SEAS (120 deg)
TUNNEL SECTION MOORED IN SOFT SPRINGS

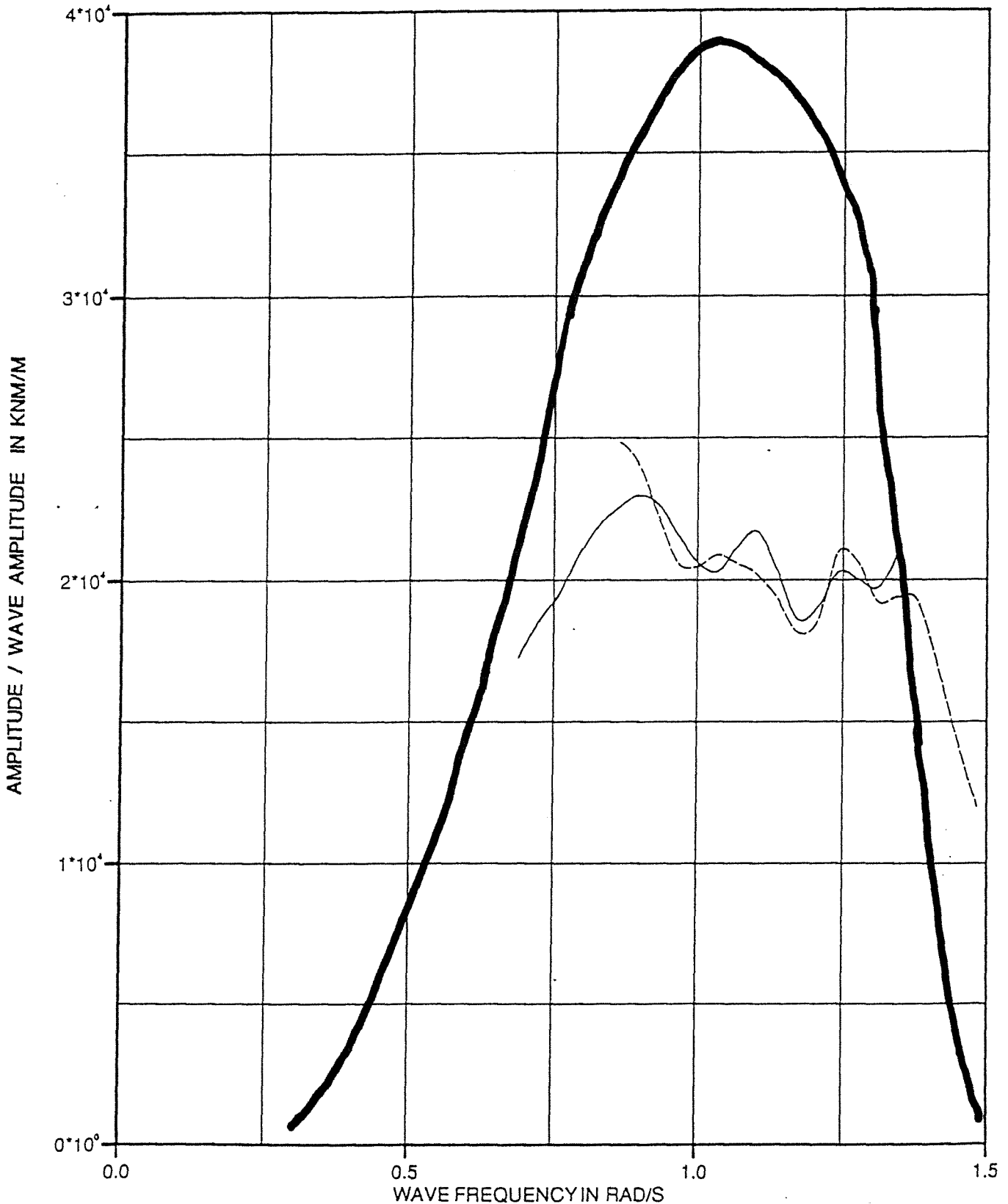


WIJKER TUNNEL MODEL TESTS: TRANSPORT OF A 96 M SECTION

RESPONSE OF MZ L/2 (112)

- TEST NO. 876101 Sign. height 2.0 m, Peak period 7.5 s
- - - - - TEST NO. 876001 Sign. height 2.0 m, Peak period 6.0 s

TESTS IN IRREGULAR BOW QUARTERING SEAS (120 deg)
TUNNEL SECTION MOORED IN SOFT SPRINGS



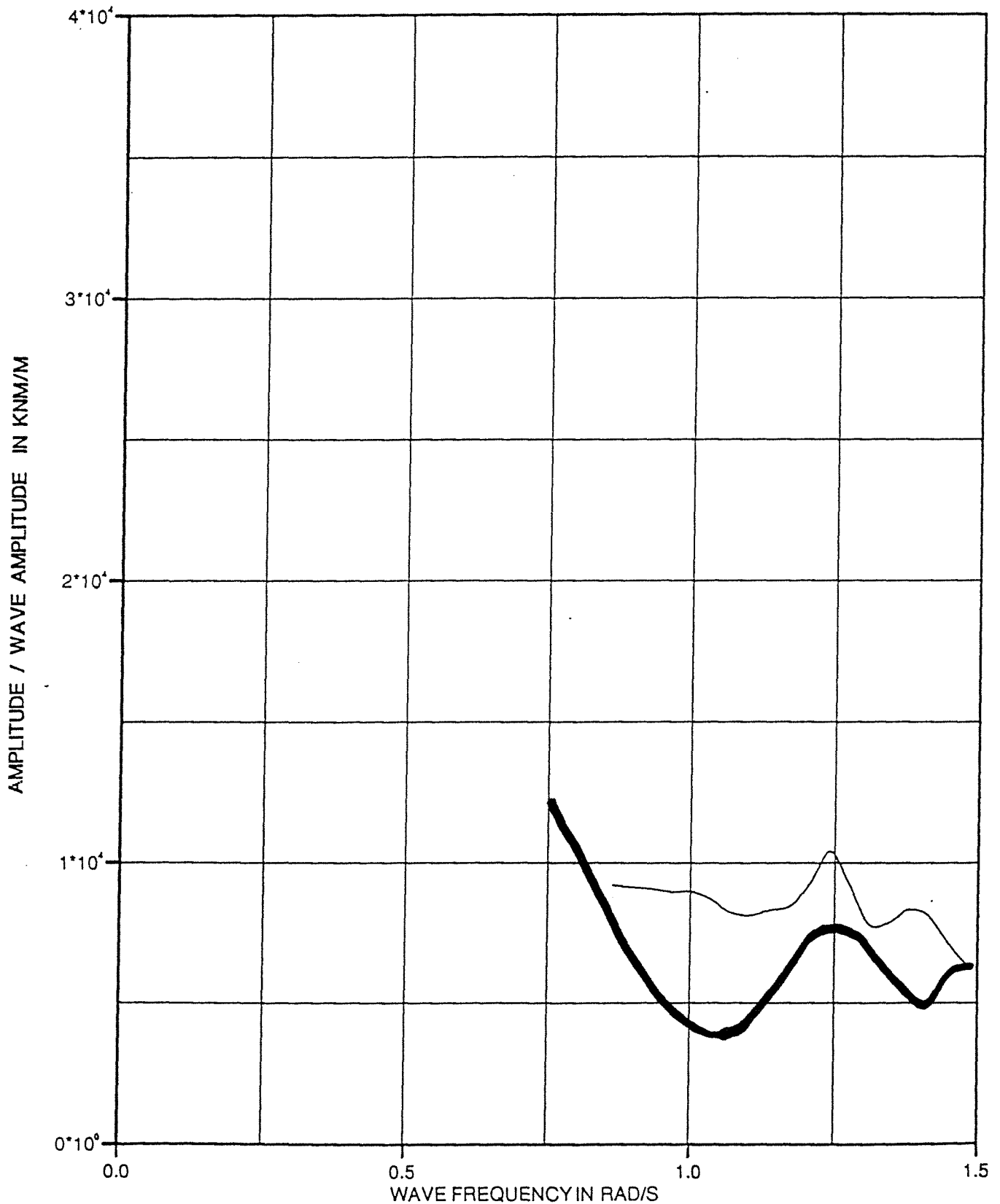
WIJKER TUNNEL MODEL TESTS: TRANSPORT OF A 96 M SECTION

RESPONSE OF MZ L/4 (107)

TEST NO. 875901 Sign. height 2.0 m, Peak period 6.0 s

TEST IN IRREGULAR BEAM SEAS (90 deg)

TUNNEL SECTION MOORED IN SOFT SPRINGS



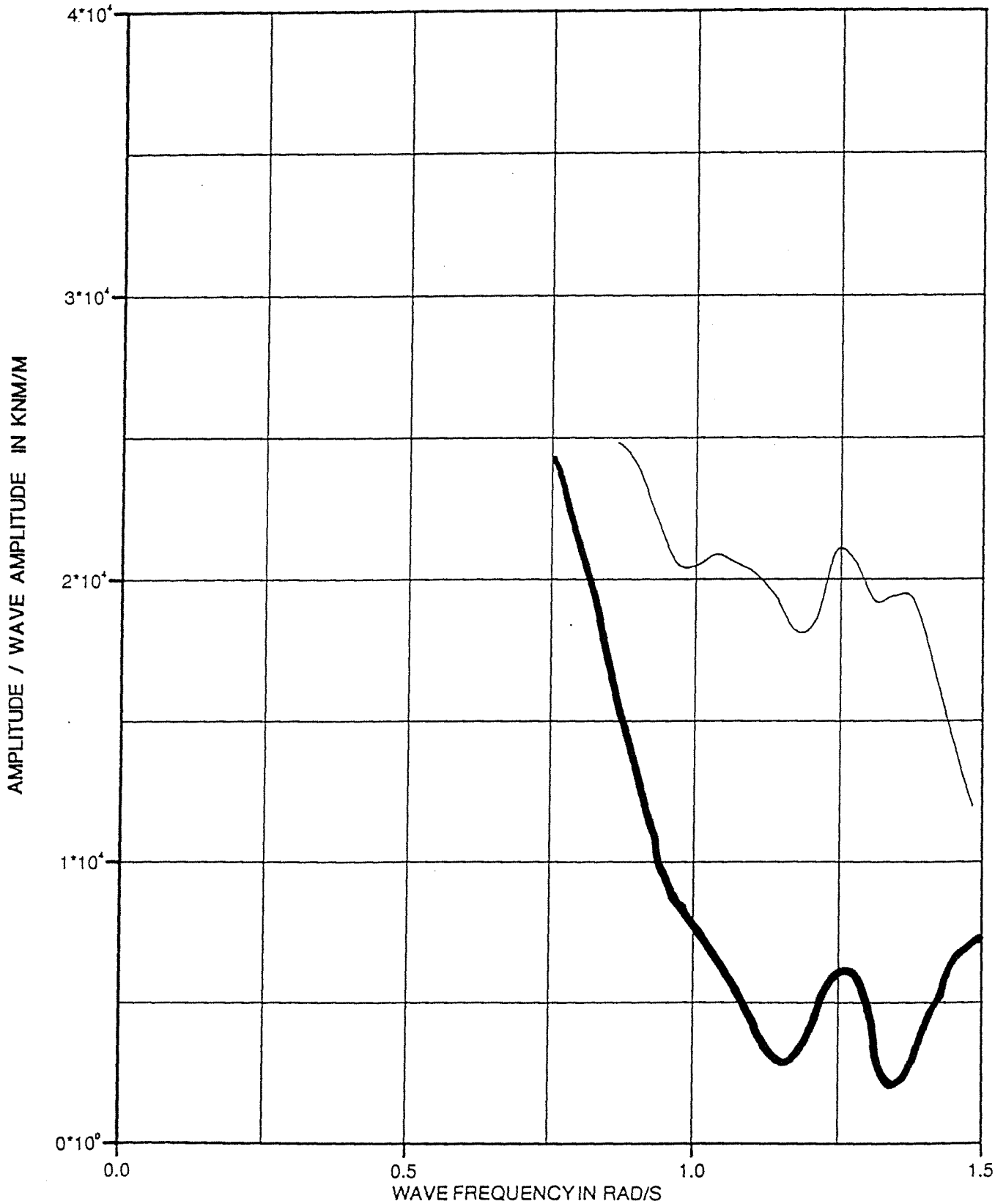
WIJKER TUNNEL MODEL TESTS: TRANSPORT OF A 96 M SECTION

RESPONSE OF MZ L/2 (112)

TEST NO. 876001 Sign. height 2.0 m, Peak period 6.0 s

TEST IN IRREGULAR BEAM SEAS (90 deg)

TUNNEL SECTION MOORED IN SOFT SPRINGS

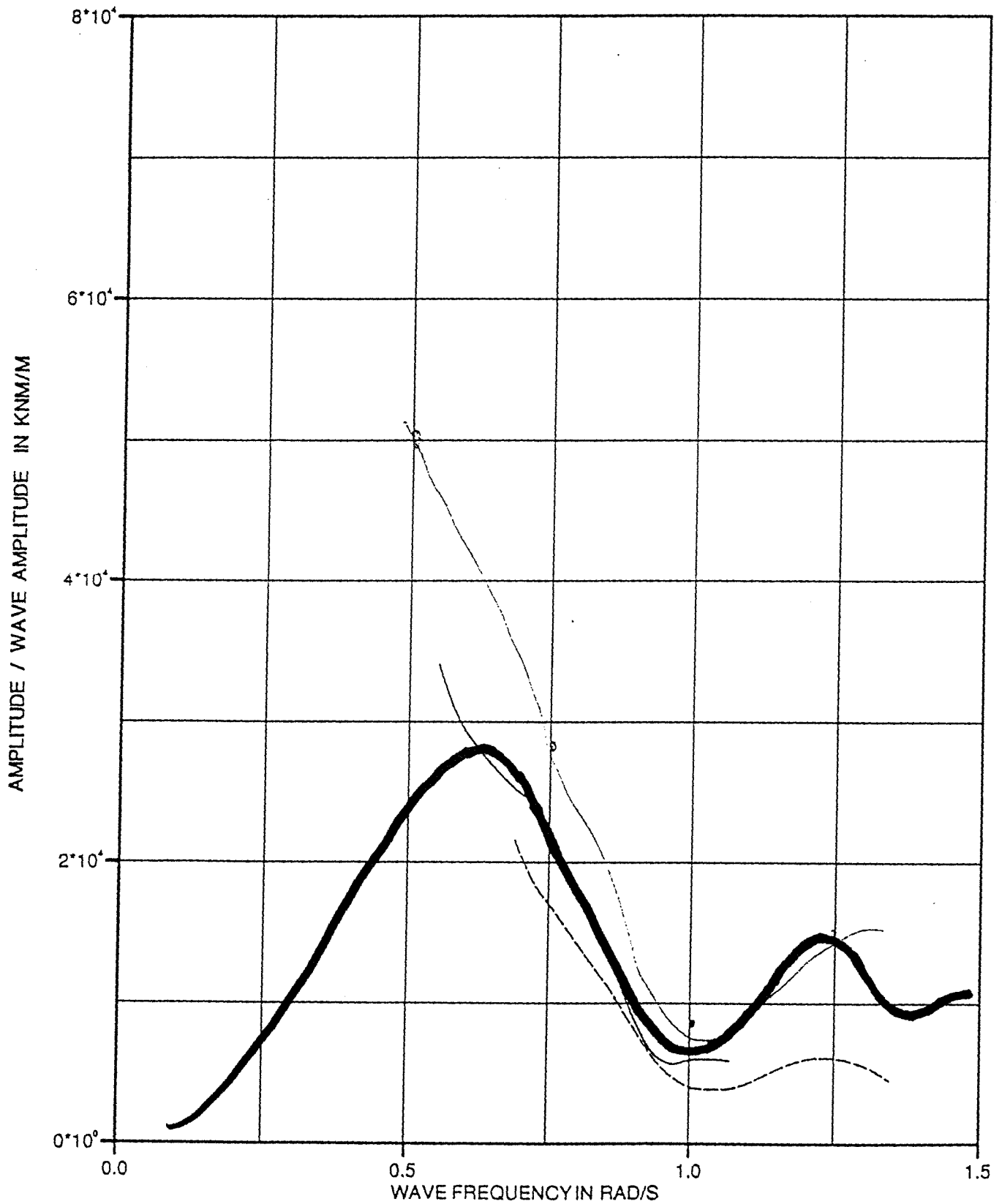


WIJKER TUNNEL MODEL TESTS: TRANSPORT OF A 96 M SECTION

RESPONSE OF MY L/4 (6)

- TEST NO. 876601 Sign. height 2.0 m, Peak period 9.5 s
- - - - - TEST NO. 876701 Sign. height 2.0 m, Peak period 7.5 s

TESTS IN IRREGULAR FOLLOWING SEAS (0 deg)
TUNNEL SECTION MOORED IN SOFT SPRINGS

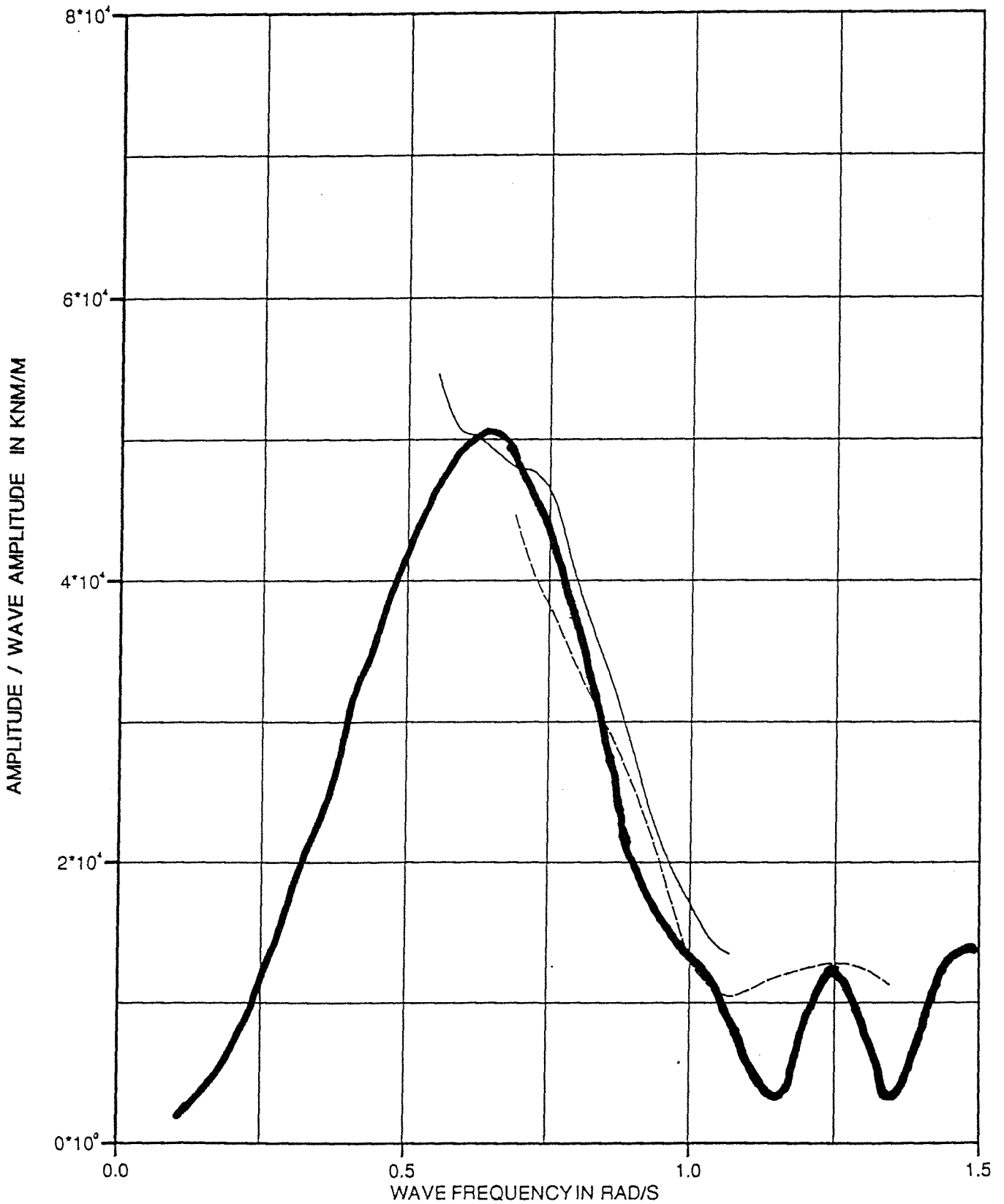


WIJKER TUNNEL MODEL TESTS: TRANSPORT OF A 96 M SECTION

RESPONSE OF MY L/2 (11)

- TEST NO. 876601 Sign. height 2.0 m, Peak period 9.5 s
- - - - - TEST NO. 876701 Sign. height 2.0 m, Peak period 7.5 s

TESTS IN IRREGULAR FOLLOWING SEAS (0 deg)
TUNNEL SECTION MOORED IN SOFT SPRINGS



WIJKER TUNNEL MODEL TESTS: TRANSPORT OF A 96 M SECTION

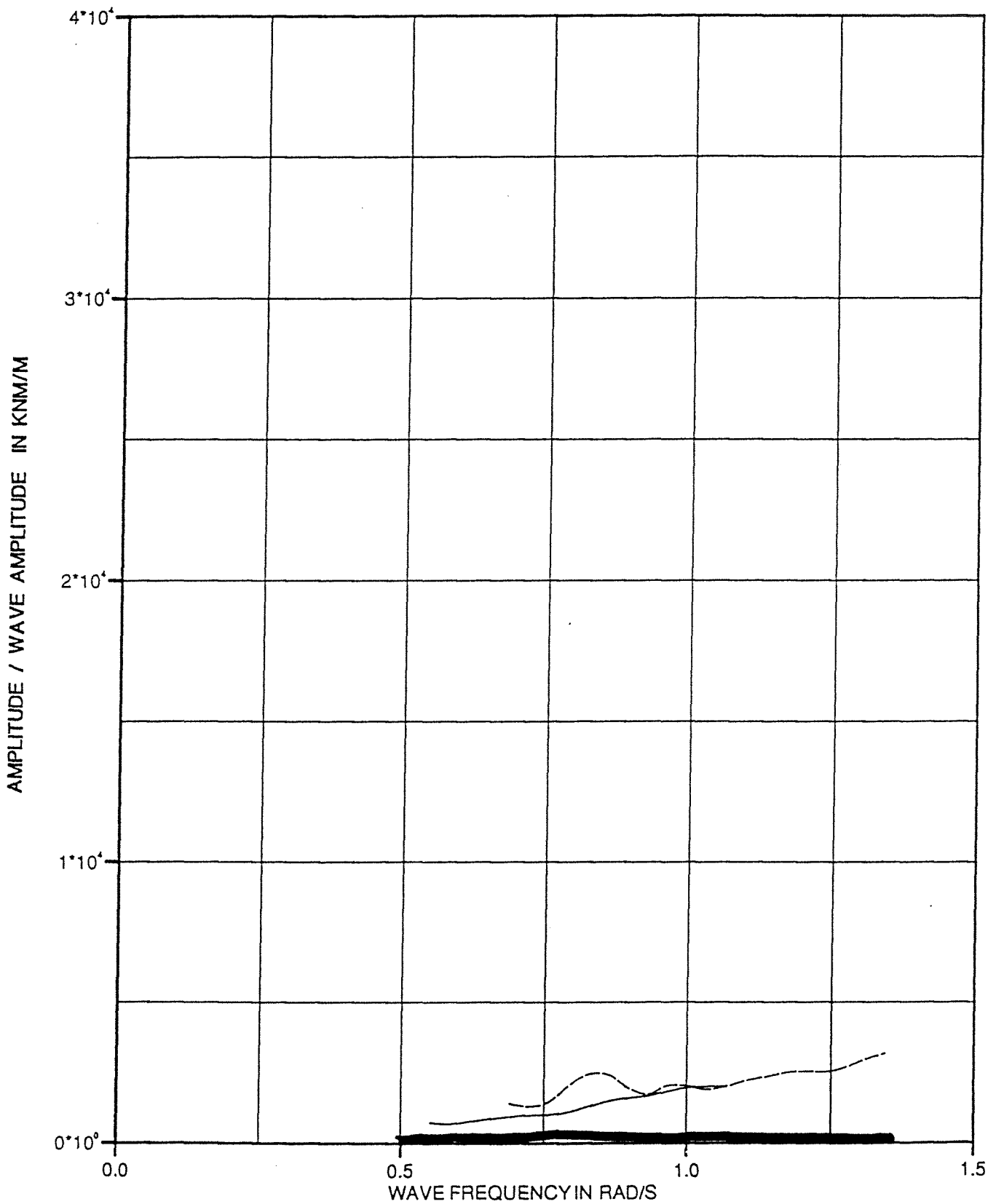
RESPONSE OF MZ L/4 (107)

———— TEST NO. 876601 Sign. height 2.0 m, Peak period 9.5 s

- - - - - TEST NO. 876701 Sign. height 2.0 m, Peak period 7.5 s

TESTS IN IRREGULAR FOLLOWING SEAS (0 deg)

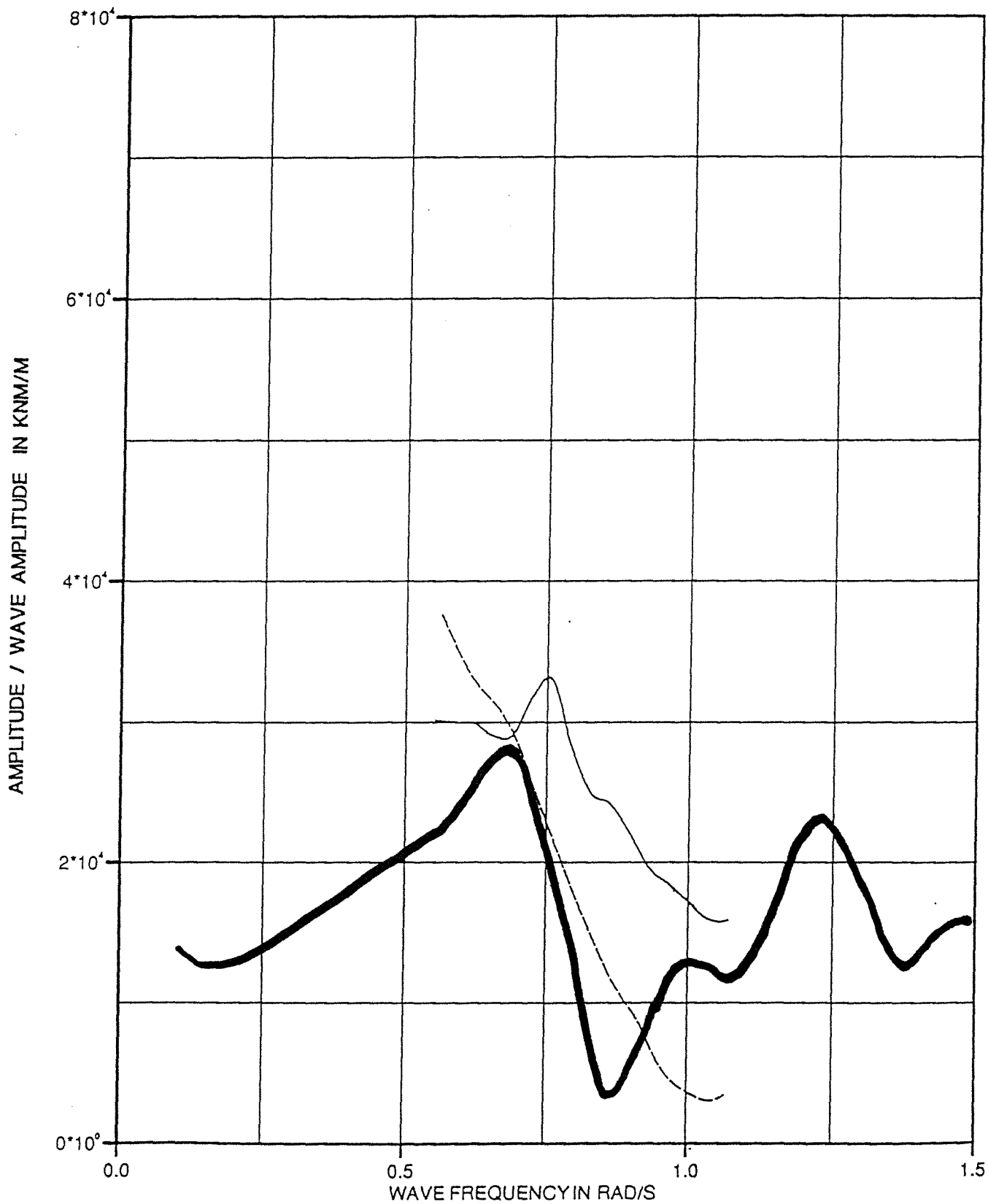
TUNNEL SECTION MOORED IN SOFT SPRINGS



RESPONSE OF MY L/4 (6)

- TEST NO. 875601 TUNNEL SECTION MOORED IN SOFT SPRINGS
- - - - - TEST NO. 877502 TOWING TEST, TOWING SPEED 4 knots

TESTS IN IRREGULAR HEAD SEAS (180 deg)
Sign. wave height 2.0 m, Peak period 9.5 s

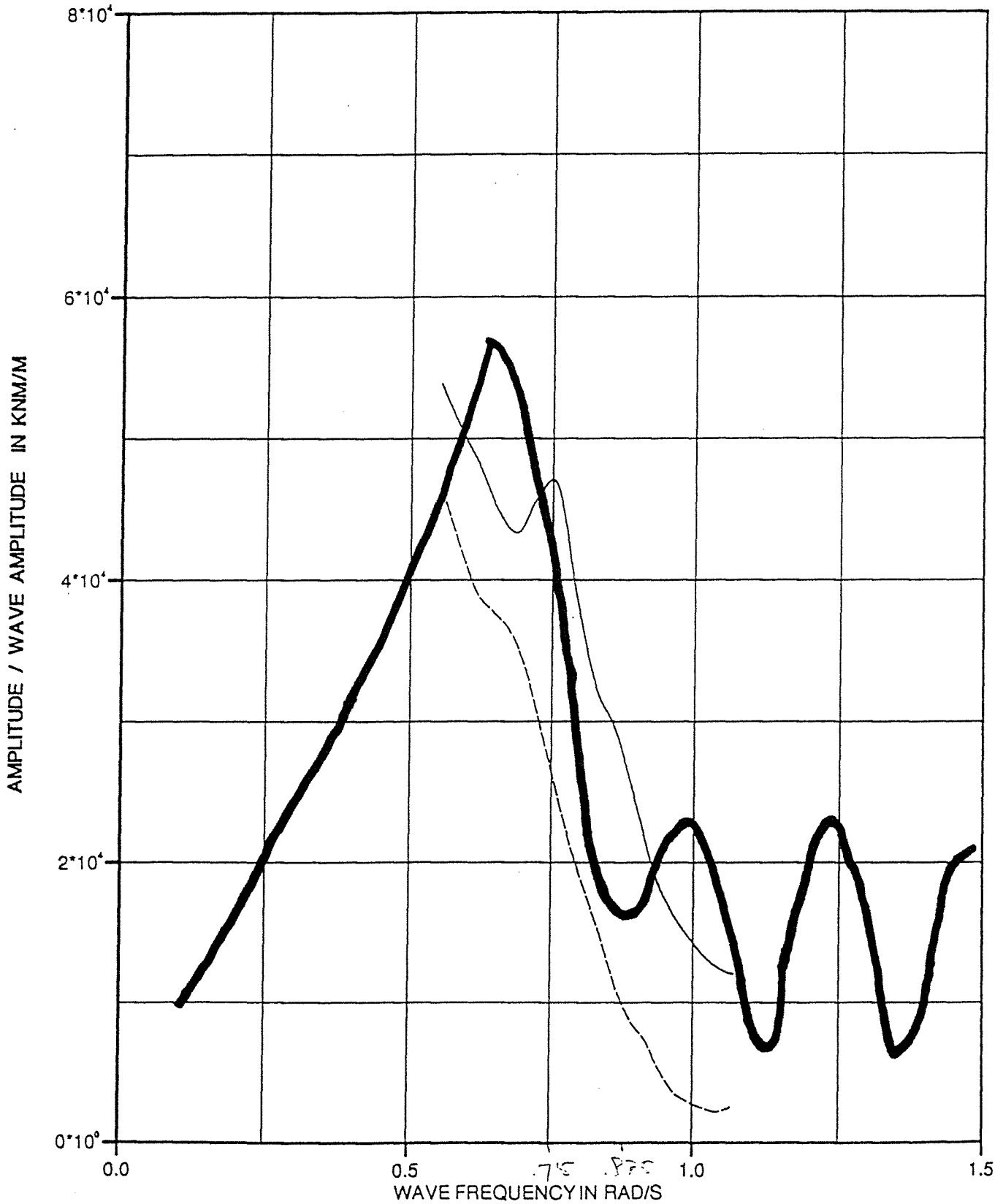


WIJKER TUNNEL MODEL TESTS: TRANSPORT OF A 96 M SECTION

RESPONSE OF MY L/2 (11)

- TEST NO. 875601 TUNNEL SECTION MOORED IN SOFT SPRINGS
- - - - - TEST NO. 877502 TOWING TEST, TOWING SPEED 4 knots

TESTS IN IRREGULAR HEAD SEAS (180 deg)
Sign. wave height 2.0 m, Peak period 9.5 s



Bijlage VII Het programma Voorspanning

Het programma

In het programma wordt de uitvoerfile FORT20 van Seaway, met de overdrachtsfunctie, ingevoerd. Het programma berekend voor alle voorkomende intervallen van T_p en s_p het golfspectrum en de kansdichtheid van de golven aan de hand van tabel 5.1 en 5.2. Ook voor de deining wordt het spectrum bepaald voor deiningshoogten van 0,5 tot 0,1 meter.

Het momenten spectrum wordt berekend door vermenigvuldiging van het golfspectrum met het kwadraat van de overdrachtsfunctie, de significante momenten zijn dan gelijk aan twee maal de wortel uit het oppervlak van de momentenspectra. Met de significante momenten wordt de benodigde significante voorspanning bepaald. Bij een gegeven aanwezige voorspanning wordt met de extreme Rayleigh-verdeling de overschrijdingskans van de voorspanning bepaald. Sommeren van de overschrijdingskans maal de kansdichtheid van elke golf, voor alle golven geeft de kans op falen tijdens het zeetransport.

Deze faalkans bij een gegeven aanwezige voorspanning wordt op het scherm afgedrukt.

Op de volgende pagina's staat de listing van het programma, onderverdeeld in de verschillende procedures:

pagina 2 : Variabelen declaraties, de variabelen stellen de volgende grootheden voor:

omega	: golffrequentie,
somkans	: totale faalkans,
T_p	: de piekfrequentie van een karakteristieke golf,
T_{pkans}	: de kansdichtheid van een specifieke piekfrequentie,
s_p, s_{pkans}	: de pieksteilheid en kansdichtheid hiervan,
Edein5	: het deiningsspectrum voor een golfhoogte van 0,5 m,
hoek	: de invalshoek van een golf,
RAOdz	: de overdrachtsfunctie voor de dwarskracht(d) in verticale richting(z),
E	: het golfspectrum,
M_{sz}, M_{sy}	: significante buigende moment in verticale cq. horizontale richting,
E_{mz}, E_{my}	: buigende momentenspectrum voor het verticale, horizontale moment,
n	: aantal golven per zeetransport,
Fps	: significante benodigde voorspanning,
Fp	: aanwezige voorspanning,
kans	: extreme Rayleigh-verdeling voor de voorspanning,
totkans	: faalkans voor een specifieke karakteristieke golf met specifieke invals hoek.

pagina 3 : Deiningsspectrum

pagina 4 : Golfspectrum

pagina 5 : Overdrachtsfunctie en Momentenspectra

pagina 6 : Significante moment

pagina 7 : Faalkans, hoofdprogramma.

```
PROGRAM Optimalisatie_Voorspanning(input,output);

{ Berekent aan de hand van gegevens over de golfcondities op de Noordzee
de faalkans bij verschillende waarden van de voorspanning van tunnelelementen,
die over zee worden vervoerd, met behulp van de overdrachtsfuncties voor de
elementen bepaald met Seaway.}

USES
  Crt;

TYPE
  ar1 = ARRAY[1..9] OF REAL;
  ar2 = ARRAY[1..7] OF REAL;
  ar3 = ARRAY[1..49] OF REAL;
  ar4 = ARRAY[1..10] OF REAL;
  ary1 = ARRAY[1..9,1..7] OF REAL;
  ary2 = ARRAY[1..10,1..49] OF REAL;
  arr1 = ARRAY[1..9,1..7,1..49] OF REAL;
  arr2 = ARRAY[1..9,1..7,1..10] OF REAL;
  ara1 = ARRAY[1..9,1..7,1..10,1..49] OF REAL;

VAR
  omega,somkans           : real;
  Tp,Tpkans              : ar1;
  spkans                 : ar2;
  Edein5                 : ar3;
  hoek                   : ar4;
  RAOdz,RAOmz,RAOdy,RAOmy,RAOmw : ary2;
  E                      : arr1;
  Msz,Msy                : arr2;
  Emz,Emy                : ara1;

function Power(x,y : real) : REAL;
VAR
  teken : INTEGER;
BEGIN
  teken:=1;
  IF x<>0 THEN
  BEGIN
    IF x<0 THEN
    BEGIN
      x:=-x;
      teken:=-1;
    END;
    IF y/2 = INT(y/2) THEN teken:=1;
    Power:=teken*exp(y*ln(x));
  END
  ELSE Power:=0;
END;
```



```
PROCEDURE Deiningsspectrum(VAR Edein5 : ar3);

VAR
  i                : integer;
  Edein4,Edein3,Edein2,Edein1 : ar3;

BEGIN
  Edein5[1]:=0;Edein5[2]:=0;Edein5[3]:=0;Edein5[4]:=0;Edein5[5]:=0;Edein5[6]:=0;
  Edein5[7]:=0.004;Edein5[8]:=0.017;Edein5[9]:=0.031;Edein5[10]:=0.038;Edein5[11]:=0.038;
  Edein5[12]:=0.034;Edein5[13]:=0.029;Edein5[14]:=0.023;Edein5[15]:=0.019;Edein5[16]:=0.015;
  Edein5[17]:=0.012;Edein5[18]:=0.009;Edein5[19]:=0.007;Edein5[20]:=0.006;Edein5[21]:=0.005;
  Edein5[22]:=0.004;Edein5[23]:=0.003;Edein5[24]:=0.003;Edein5[25]:=0.002;Edein5[26]:=0.002;
  Edein5[27]:=0.002;Edein5[28]:=0.001;Edein5[29]:=0.001;Edein5[30]:=0.001;Edein5[31]:=0.001;
  Edein5[32]:=0.001;Edein5[33]:=0.001;Edein5[34]:=0.001;Edein5[35]:=0;Edein5[36]:=0;
  Edein5[37]:=0;Edein5[38]:=0;Edein5[39]:=0;Edein5[40]:=0;Edein5[41]:=0;Edein5[42]:=0;
  Edein5[43]:=0;Edein5[44]:=0;Edein5[45]:=0;Edein5[46]:=0;Edein5[47]:=0;Edein5[48]:=0;
  Edein5[49]:=0;
  i := 1;
  FOR i := 1 TO 49 DO
    BEGIN
      Edein4[i] := Edein5[i]*0.64;
      Edein3[i] := Edein5[i]*0.36;
      Edein2[i] := Edein5[i]*0.16;
      Edein1[i] := Edein5[i]*0.04;
    END;
  END;
END;
```

Bijlage VII Het programma Voorspanning

```

PROCEDURE Golfspectra(Edein5 : ar3;VAR Tp,Tpkans : ar1;spkans : ar2;VAR E : arr1);

CONST
  y0 = 3.3;
VAR
  i,z,w                : integer;
  omega,alpha,sigma,wm,
  f,a,b,c,d,piék,
  g,h,l,j,k,m         : real;
  sp                   : ar2;
  Hs                   : ary1;
  Egolf               : arr1;

BEGIN
  i := 1;
  FOR i := 1 TO 9 DO
    BEGIN
      Tp[i] := i+1;
      Tp[1] := 2.5;
      Tpkans[1] := 0.0032;Tpkans[2] := 0.03586;Tpkans[3] := 0.17129;Tpkans[4] := 0.35696;
      Tpkans[5] := 0.29991;Tpkans[6] := 0.11488;Tpkans[7] := 0.01683;Tpkans[8] := 0.00104;
      Tpkans[9] := 0.00003;
      wm := 1.95*pi/Tp;
      alpha := Tp/4.498;
      z := 1;
      FOR z := 1 TO 7 DO
        BEGIN
          sp[z] := 0.01*(z-1);
          sp[1] := 0.005;
          spkans[1] := 0.0603;spkans[2] := 0.26637;spkans[3] := 0.42333;spkans[4] := 0.212;
          spkans[5] := 0.03602;spkans[6] := 0.00198;spkans[7] := 0.000003;
          Hs[i,z] := 1.56131*Tp[i]*Tp[i]*sp[z];
          omega := 0.1;
          w := 1;
          FOR w := 1 TO 49 DO
            BEGIN
              IF omega<wm THEN sigma := 0.07 ELSE sigma := 0.09;
              a := sqr(omega-wm);
              b := sqr(sigma*wm);
              c := -a/(2*b);
              d := exp(c);
              piék := power(y0,d);
              g := omega/wm;
              h := power(g,-4);
              l := -h*1.25;if l<-89 then j := 0 else
              j := exp(l);
              k := j*0.0989*9.81*9.81;
              m := power(omega,-5)*k;
              Egolf[i,z,w] := 0.5*sqr(Hs[i,z])*m*piék/(2*pi*power(alpha,4));
              E[i,z,w] := Egolf[i,z,w]+Edein5[w];
              omega := omega+0.05;
            END;
          END;
        END;
      END;
    END;
  END;

```

```
PROCEDURE Overdrachts_functies(hoek : ar4; omega : real; VAR RAOdz,RAOmz,RAOdy,RAOmy,RAOmW : ary2);
```

```
VAR
```

```
inp : text;
i,w : integer;
```

```
BEGIN
```

```
assign (inp,'i:\99100\student\tp6\FORT20.dat');
reset(inp);
i := 1;
FOR i := 1 TO 10 DO
  BEGIN
    w := 1;
    For w := 1 to 49 do
      Begin
        readln(inp,hoek[i],omega,RAOdz[i,w],RAOmz[i,w],RAOdy[i,w],RAOmy[i,w],RAOmW[i,w]);
      End;
    readln(inp);
  END;
END;
```

```
PROCEDURE Momentenspectra(E : arr1;RAOmz,RAOmy : ary2; VAR Emz,Emy : ara1);
```

```
VAR
```

```
i,j,z,w : integer;
RAO2mz,RAO2my : ary2;
```

```
BEGIN
```

```
i := 1;
FOR i := 1 TO 10 DO
  BEGIN
    w := 1;
    For w := 1 to 49 do
      Begin
        RAO2mz[i,w] := sqr(RAOmz[i,w]);
        RAO2my[i,w] := sqr(RAOmy[i,w]);
        j := 1;
        FOR j := 1 TO 9 DO
          BEGIN
            z := 1;
            FOR z := 1 TO 7 DO
              BEGIN
                Emz[j,z,i,w] := E[j,z,w]*RAO2mz[i,w];
                Emy[j,z,i,w] := E[j,z,w]*RAO2my[i,w];
              END;
            END;
          End;
        END;
      END;
    END;
  END;
```

```
PROCEDURE Moment_Ms(Emz,Emy : arr1;VAR Msz,Msy : arr2);

VAR
  i,j,z,      : integer;
  hulpz,hulpy : real;
  xz,xy       : arr2;

BEGIN
  j := 1;
  FOR j := 1 to 9 DO
    BEGIN
      z := 1;
      FOR z := 1 TO 7 DO
        BEGIN
          i := 1;
          FOR i := 1 TO 10 DO
            BEGIN
              hulpz := 0;
              hulpy := 0;
              w := 1;
              For w := 1 to 48 do
                Begin
                  xz[j,z,i] := 0.05*(Emz[j,z,i,w]+Emz[j,z,i,w+1])/2;
                  hulpz := hulpz + xz[j,z,i];
                  xy[j,z,i] := 0.05*(Emy[j,z,i,w]+Emy[j,z,i,w+1])/2;
                  hulpy := hulpy + xy[j,z,i];
                End;
              Msz[j,z,i] := 2*(sqrt(hulpz));
              Msy[j,z,i] := 2*(sqrt(hulpy));
            END;
          END;
        END;
      END;
    END;
  END;
```

```

PROCEDURE Faalkans(Tp,Tpkans : ar1;spkans : ar2;Msz,Msy : arr2; VAR somkans : real);

VAR
  j,z,i          : integer;
  Fp,hoekkans,help : real;
  n              : ar1;
  kans,totkans   : arr2;

BEGIN
  Fp := 100000;
  hoekkans := 0.1;
  help := 0;
  somkans := 0;
  j := 1;
  FOR j := 1 TO 9 DO
  BEGIN
    n[j] := 51840/Tp[j];
    z := 1;
    FOR z := 1 TO 7 DO
    BEGIN
      i := 1;
      FOR i := 1 TO 10 DO
      BEGIN
        Fps[j,z,i] := 0.1704*Msy[j,z,i]+0.4074*Msz[j,z,i];
        if Fps[i]<1 then kans[j,z,i] := 0 else
        kans[j,z,i] := 1-exp(-n[j]*exp(-2*sqr(Fp/Fps[j,z,i])));
        totkans[j,z,i] :=Tpkans[j]*spkans[z]*hoekkans*kans[j,z,i];
        help := totkans[j,z,i];
        somkans := somkans+help;
      END;
    END;
  END;
  writeln('De kans op falen bij het transport over zee van de tunnelementen');
  writeln('is gelijk aan : ',somkans:14,' bij een voorspanning van Fp = ',Fp:6);
  readln;
END;

BEGIN
  clrscr;
  Deiningsspectrum(Edein5);
  Golfspectra(Edein5,Tp,Tpkans,spkans,E);
  Overdrachts_functies(hoek,omega,RAOdz,RAOmz,RAOdy,RAOmy,RAOmW);
  Momentenspectra(E,RAOmz,RAOmy,Emz,Emy);
  Moment_Ms(Emz,Emy,Msz,Msy);
  Faalkans(Tp,sp,Tpkans,spkans,Msz,Msy,voorspan,som);
END.

```

Verificatie

Ter controle van het programma zijn de berekende significante momenten vergeleken met die berekend door Seaway, zie tabel VII.1 voor enkele voorbeelden hiervan. De geringe afwijking wordt veroorzaakt door afrondfouten en door verschillen in de berekende golfspectra (dit doordat Seaway het golfspectrum berekend aan de hand van de nuldoorgangsperiode, T_{02} , en niet aan de hand van de piekperiode, T_p , gebruikt in het programma 'Voorspanning'). Bij een invoer van identieke spectra voor de deininggolven (deiningsspectra uit de twee programma's zijn wel gelijk) blijkt dat de significante momenten exact gelijk zijn, en het programma dus goed werkt.

karakteristieke golf	Verticale moment		Afwijking	Horizontale moment		Afwijking		
	Hs	T_p	μ	Seaway	programma	%	Seaway	programma
0.3 3 0	571	488	14,5	-	-	-	-	-
0.1 4 10	463	467	0,9	201	200	0,5		
0.4 5 70	1833	1887	2,9	5203	4953	4,8		
1.1 6 40	9326	8989	3,6	23900	22900	4,2		
2.3 7 50	21590	20100	6,9	49970	54020	7,5		
4.0 8 60	29520	29610	0,3	62000	69000	10,1		
6.3 9 20	123600	123400	0,2	69030	76170	9,4		
9.4 10 30	163500	170700	4,2	122000	137000	10,9		

Tabel VII.1 Verificatie van de berekende significante momenten

Verder is de bezwijkkans alsmede de kansdichtheid uit het programma gecontroleerd aan de hand van handberekeningen hiervan voor enkele golven. De afwijkingen blijken minimaal en te wijten aan afrondfouten.

Bijlage VIII Randvoorwaarden tunnellenge

Voorspanning

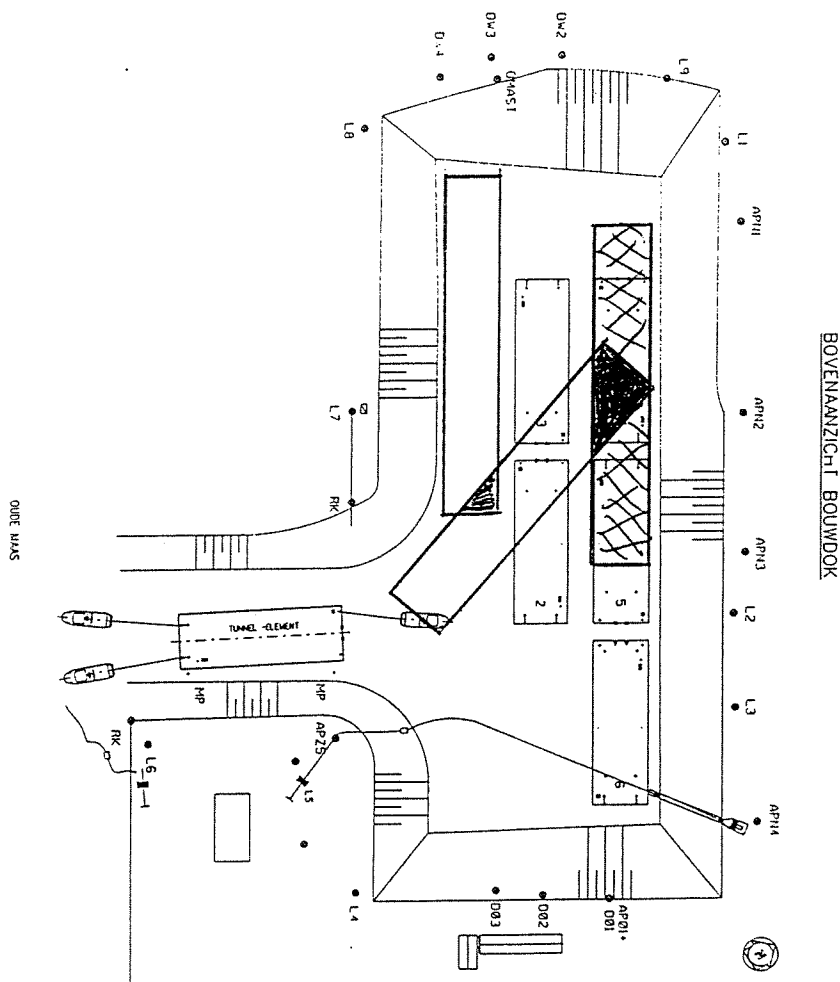
De maximale drukspanning in beton bedraagt voor beton B35 $f_b = 27 \text{ N/mm}^2$.
 Het maximaal opneembare moment is dus gelijk aan $\sigma \cdot W_0 = 27 \cdot 245,7 = 5643 \text{ MNm}$.
 De momenten zijn bij een lengte van 288 m en een golfvoorspanning van 95000 kN ongeveer gelijk aan $M_{eg} = 1500 \cdot 144 = 216000$, $M_{golf} = 235000$ en $M_v = 25000$ zodat het maximale moment gelijk is aan

$$1,2 \cdot M_{eg} + 1,2 \cdot M_v + 2 \cdot M_{golf} = 757 \text{ MNm}$$

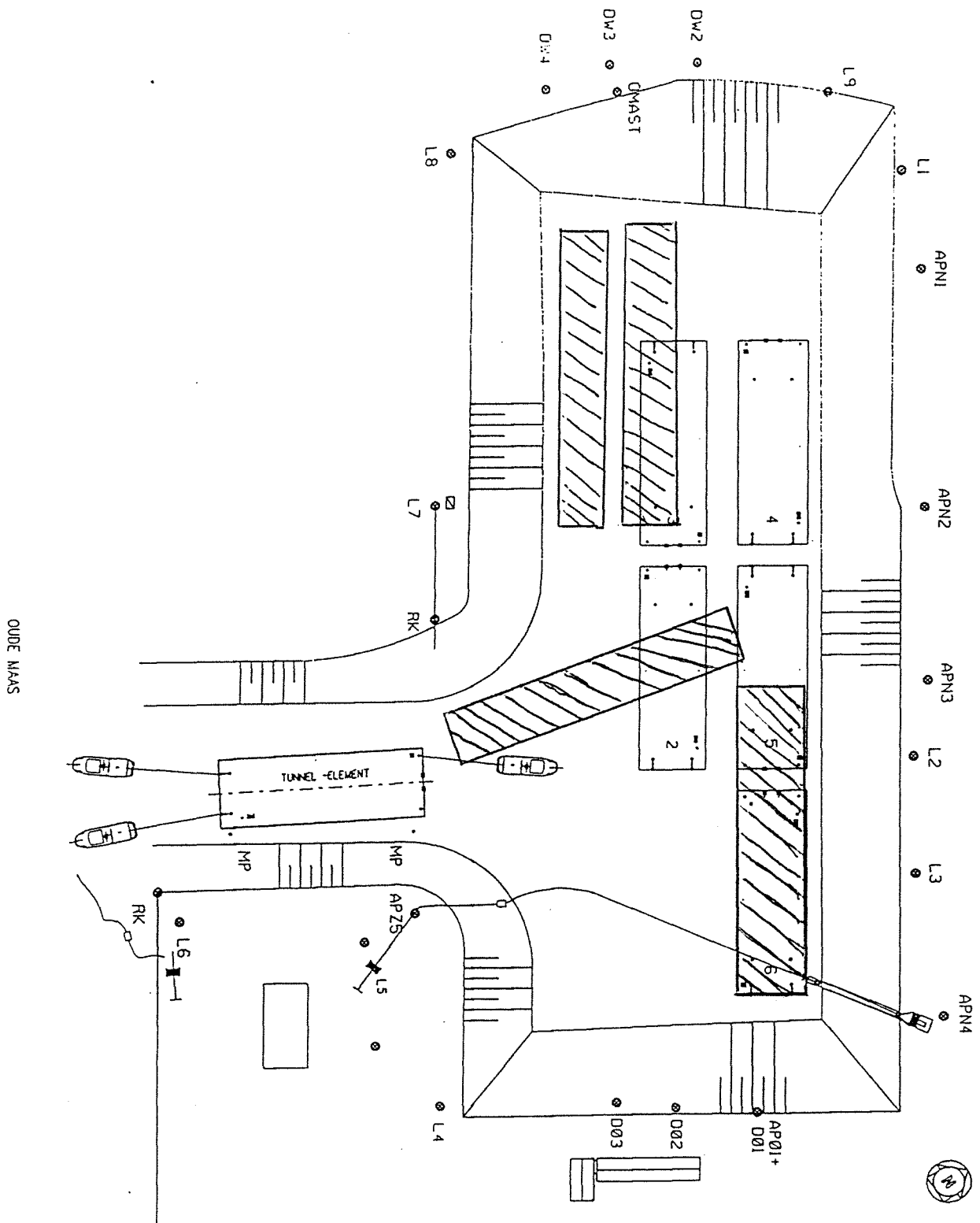
dit is veel kleiner dan het toelaatbare moment.

Lengte

Door de vorm en de plaats van de opening bij het bouwdok in Barendrecht is de manoeuvreerbaarheid bij een elementlengte van 192 meter juist onvoldoende en bij een elementlengte van 144 meter voldoende zie de figuur hieronder en op de volgende pagina, waar de elementlengte van respectievelijk 192 meter en 144 meter is ingetekend.



BOVENANZICHT BOUWDOK



Bijlage IX Belastinggevallen en fasering

Belastinggevallen

De meeste belastingen zijn reeds in bijlage 1 berekend hier worden ze voor de volledigheid wel vermeld.

Eigengewicht plus uitrusting

- Eigengewicht

$$q = A_b \cdot \gamma_b = 82 \cdot 24,8 = 2033 \text{ kN/m'}$$

- Ballasttanks, per tank:

$$150 \text{ kN}$$

- Kopschotten, per kopschot:

$$1500 \text{ kN}$$

Ballastbeton en -water

- Ballastbeton:

$$0,4 \cdot 2 \cdot 12,95 \cdot 22,5 = 233 \text{ kN/m'}$$

- Ballastwater: $10 \cdot V$ kN

Opwaartse waterdruk

- onderwater:

$$8,05 \cdot 9,81 \cdot 30,25 = 2390 \text{ kN/m'}$$

- vrijboord 0,4 in zoutwater:

$$7,65 \cdot 10,05 \cdot 30,25 = 2325 \text{ kN/m'}$$

Golfbelastingen en sleepbelastingen

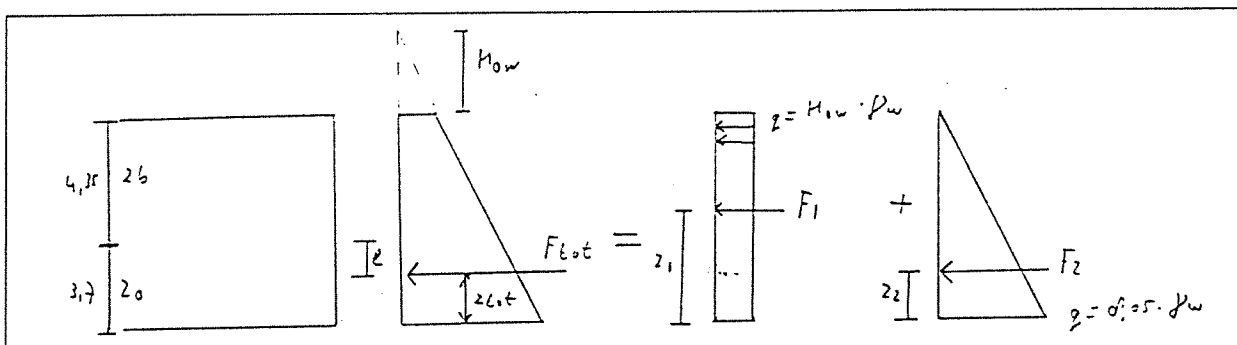
De momenten uit de golfbelastingen worden in hoofdstuk 5 berekend. Voor de momenten ten gevolge van de voorwaatse snelheid (4 kn) blijkt uit de modelproeven dat de momenten voor $1/2 L$ en $1/4 L$ gelijk zijn aan respectievelijk: 25000 kNm en 22000 kNm.

Waterbelasting voor het kopschot

- Verticale belasting (zie bijlage 1) :

$$1036 \text{ kN}$$

- Moment door horizontale belasting (zie figuur IX.1)



Figuur IX.1 Moment door water voor kopschot

Bijlage IX Belastinggevallen en fasering

vrijboord van 0,4 m

$$M = F \cdot e, \quad F = 1/2 \cdot q \cdot T \cdot B = 1/2 \cdot 10,05 \cdot T \cdot T \cdot B = 8896 \text{ kN}$$
$$e = z_o - 1/3 \cdot T = 3,7 - 2,55 = 1,15 \text{ m}$$

$$M = F \cdot e = 8896 \cdot 1,15 = 10230 \text{ kNm}$$

geheel onder water

$$F_1 = \gamma_w \cdot \text{How} \cdot 7,65 \cdot 30,25 = 231 \cdot \gamma_w \cdot \text{How}$$

$$F_2 = 1/2 \cdot \gamma_w \cdot T \cdot T \cdot B = 885 \cdot \gamma_w$$

$$z_1 = 1/2 \cdot h = 4,025 \text{ m}, \quad z_2 = 1/3 \cdot h = 2,68 \text{ m}$$

$$z_{\text{tot}} = (F_1 \cdot z_1 + F_2 \cdot z_2) / F_{\text{tot}}$$

$$e = z_o - z_{\text{tot}} = 3,7 - z_{\text{tot}}$$

Afzinkuitrusting

Twee torens à 400 kN = 800 kN plus verankerings en takeluitrusting à 400 kN

Totaal : 1200 kN

Reactie Gina-profiel

Zie figuur IX.1 : $q_{\text{gina}} \cdot \text{omtrek} = F_{\text{tot}} \rightarrow q_{\text{gina}} = F_{\text{tot}} / 73,4$

$$M_{\text{gina}} = q_{\text{gina}} \cdot \text{omtrek} \cdot (4,025 - z_o) = 0,325 \cdot F_{\text{tot}}$$

Scheepvaart

Wanneer schepen over een afgezonken element varen werken diverse krachten op het element. De snelheid van de schepen heeft hierop invloed. Omdat de krachten erg groot worden wanneer de schepen met de gebruikelijke maximale snelheid varen wordt een snelheidsbeperking opgelegd aan de scheepvaart. De maximale snelheden zijn afhankelijk van de diepgang van de schepen.

Diepgang	max. snelheid
< 4 m	14 km/uur
4-8 m	8 km/uur
> 8 m	6 km/uur

De belastingen die in dit geval op het tunnelement werken zijn (overgenomen uit ontwerpberekeningen Wijkertunnel):

$$F_{\text{opw}} = 880 \text{ kN} \quad q_{\text{opw}} = 9,2 \text{ kN/m'}$$

$$F_{\text{neerw}} = 1360 \text{ kN} \quad q_{\text{neerw}} = 14,2 \text{ kN/m'}$$

$$F_{\text{hor}} = 570 \text{ kN}$$

$$M_{\text{max}} = 6960 \text{ kNm}$$

Oplegging volgend element

De belastingen zijn overgenomen uit de ontwerpberekeningen voor de Wijkertunnel.

Onderstromen

Uitgaande van een debiet van 0,131 m³/s en een straal van 12 meter ontstaat er per onderstroompunt een opwaartse belasting van 1250 kN. Gelijkmatische verdeling over de hart op hart afstand van de onderstroompunten (17,5 m) geeft opwaartse verdeelde belasting van

$$q = 71,4 \text{ kN/m'}$$

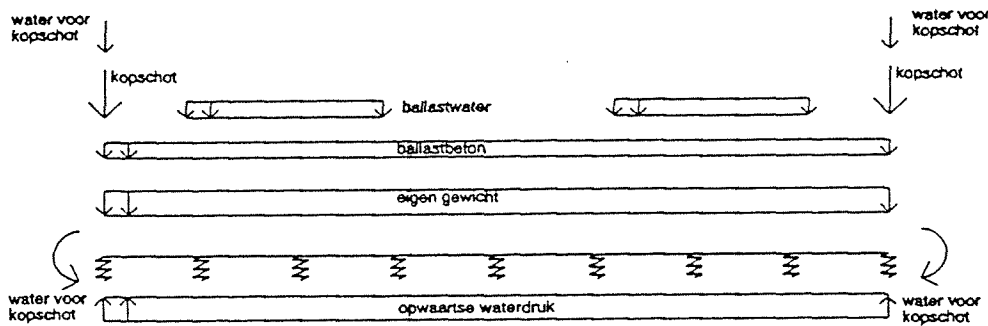
Fasering

Met de belastingen uit de vorige paragraaf kunnen de buigende momenten in iedere fase worden bepaald. Per fase wordt een schematisatie van de belastingen gegeven en de momentenlijn.

Fase 1 : Vullen bouwdok

De bovenkant van het tunneldak ligt 1,7 m onder de waterspiegel. Het element ligt op de bodem van het bouwdok, in dit geval is sprake van een verend ondersteunde ligger. Voor de beddingsconstante wordt 3000 kN/m² aangenomen.

Schematisatie



Momentenlijn

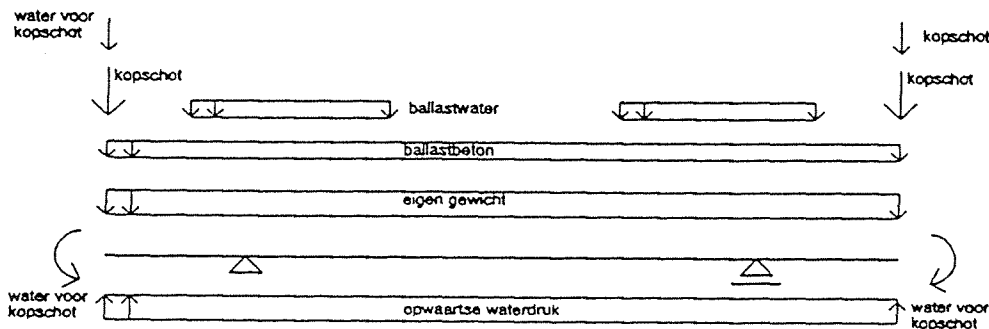


$M_{1/2L} = 63200 \text{ kNm.}$

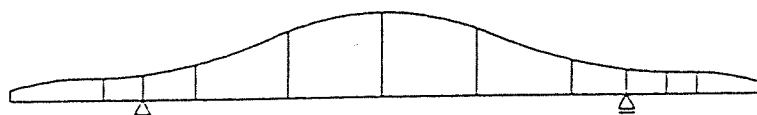
Fase 2 : Opdrijven element

Het tunnelelement ligt nog net onder water. De steunpuntsreactie dienen gelijk te zijn aan nul.

Schematisatie



Momentenlijn

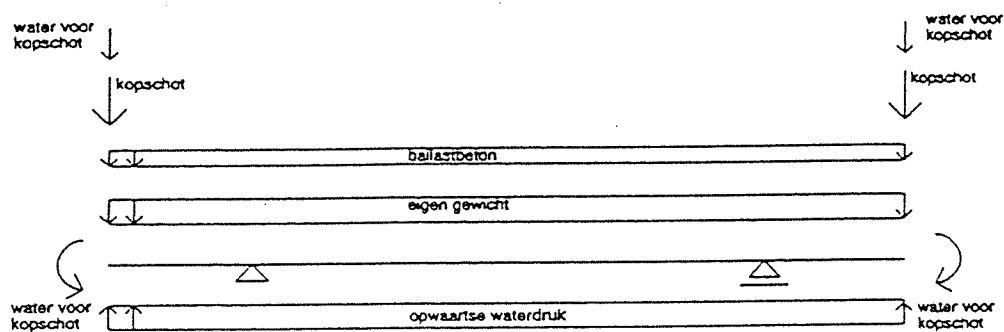


$$M_{1/2L} = 90500 \text{ kNm.}$$

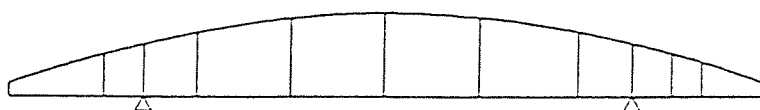
Fase 3 : Transportgereed maken

Het vrijboord in zout water moet 0,4 m bedragen.

Schematisatie



Momentenlijn



$$M_{1/2L} = 73400 \text{ kNm.}$$

Fase 4 : Transport over zee

Belastingen uit fase 3 plus een sleepmoment van 25000 kNm bij 1/2 L en een golfbuigend moment van 92500 kNm

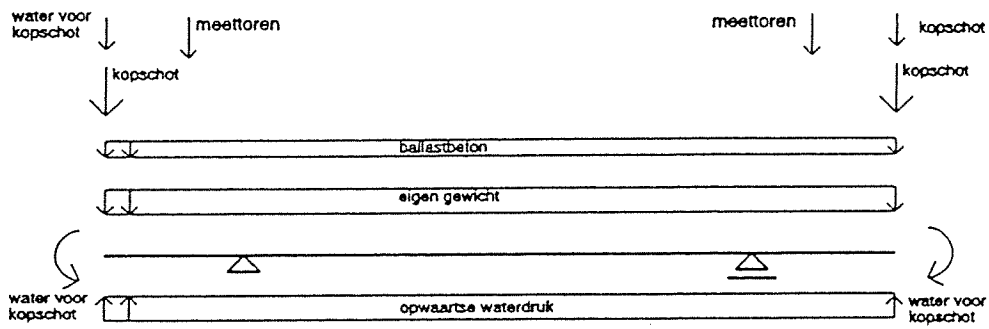
$$M_{1/2L} = 190000 \text{ kNm}$$

en voor het negatieve moment $M_{1/2L} = 19100 \text{ kNm}$

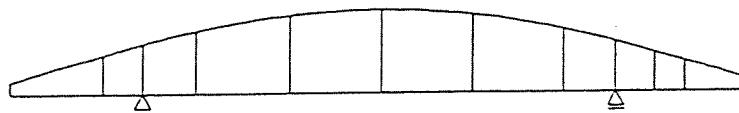
Fase 5 : Afzinkgereed maken

De afzinktorens worden op 10 meter van de zijkant geplaatst.

Schematisatie



Momentenlijn

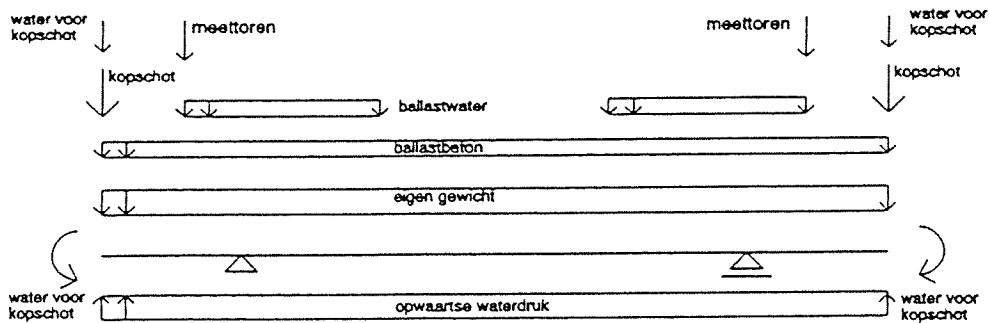


$M_{1/2L} = 80800 \text{ kNm.}$

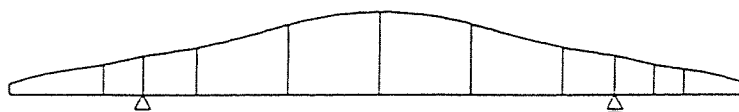
Fase 6 : Afzinken

Het tunnelelement ligt net onderwater en in alle vier de kabels is een kracht van 500 kN aanwezig. De ophangpunten liggen 17 m van de zijkant.

Schematisatie



Momentenlijn

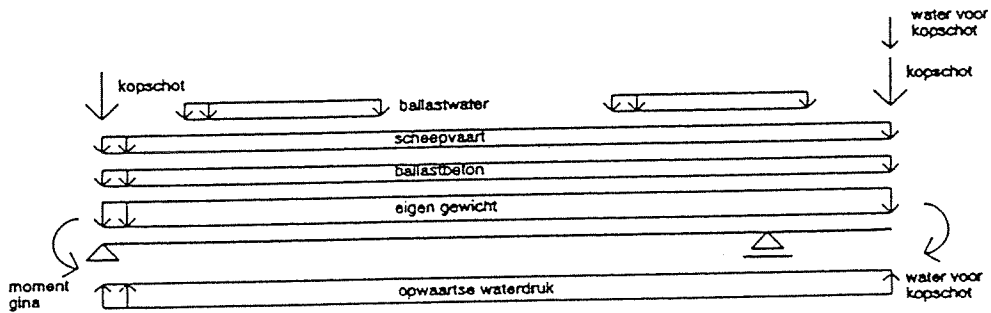


$M_{1/2L} = 85300 \text{ kNm.}$

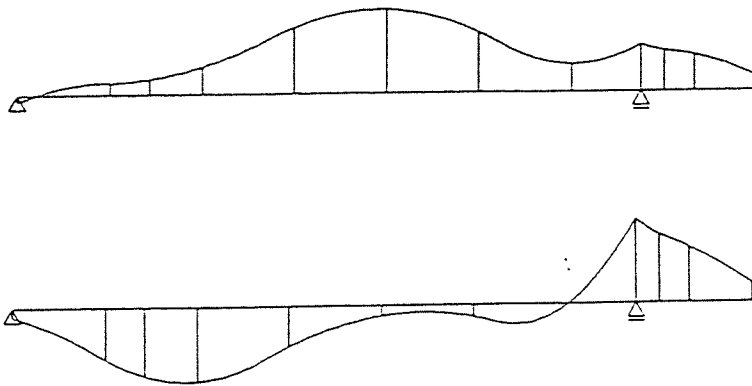
Fase 7 : Opleggen op tijdelijke steunpunten

Er worden twee belastinggevallen berekend, te weten zout water en een opwaartse scheepsbelasting en zoet water en een neerwaartse scheepsbelasting

Schematisatie



Momentenlijn



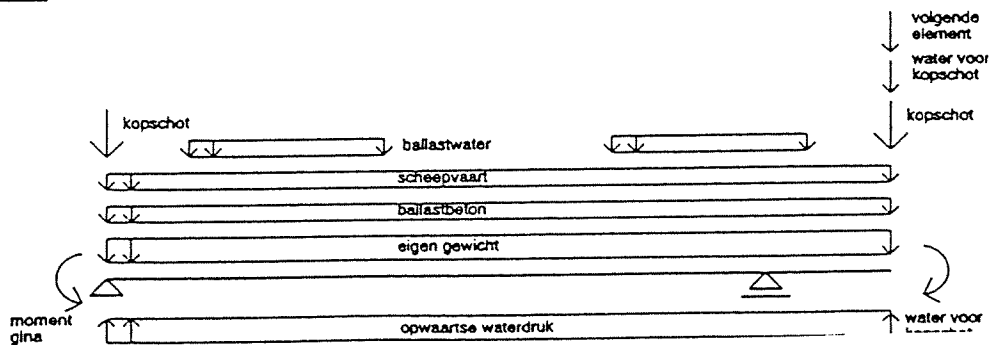
$M_{1/2L} = 53100$ (zout en opwaartse scheepsbelasting)

$M_{1/4L} = -34100$ (zoet en neerwaartse scheepsbelasting)

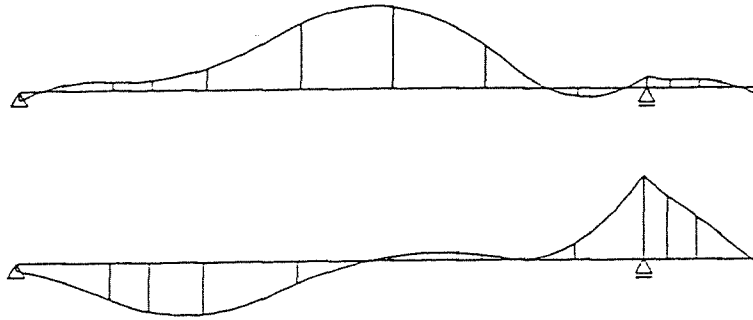
Fase 8 : Opleggen volgend element

De momenten zijn weer uitgerekend voor de twee verschillende belastinggevallen.

Schematisatie



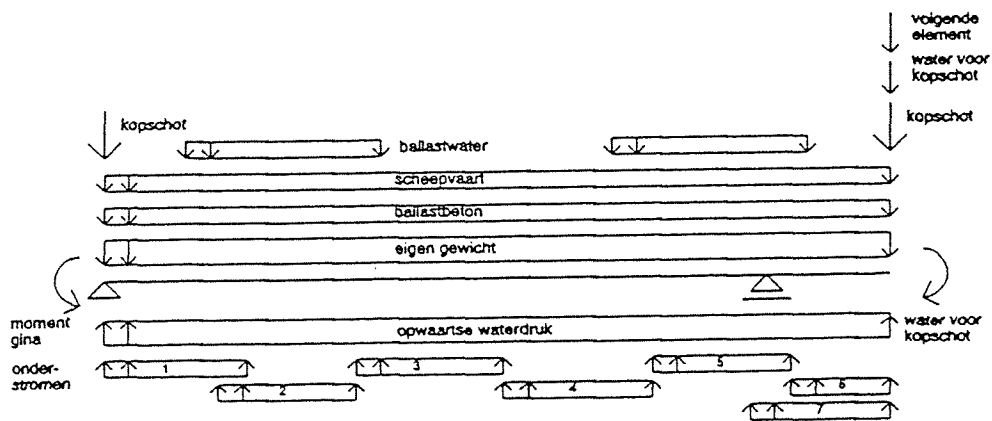
Momentenlijn



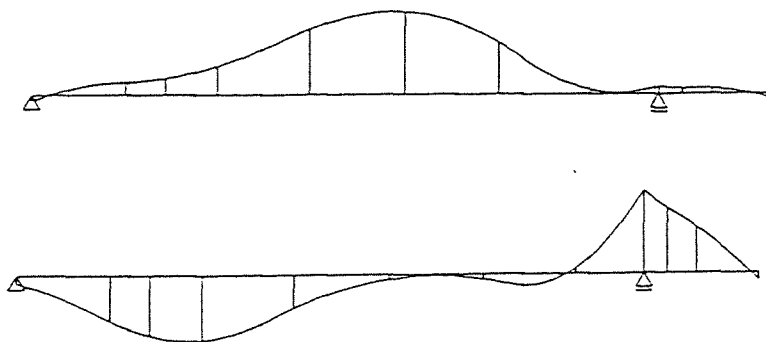
$M_{5/6 L} = 52300$ (zoet en neerwaartse scheepsbelasting)
 $M_{1/4 L} = -31100$ (zoet en neerwaartse scheepsbelasting)

Fase 9 : Onderstromen

De momenten zijn weer uitgerekend voor de twee verschillende belastinggevallen.
Schematisatie



Momentenlijn



$M_{1/2 L} = 73100$ (zout en opwaartse scheepsbelasting)
 $M_{1/4 L} = -36400$ (zoet en neerwaartse scheepsbelasting)

In tabel 7.1 van § 7.2.3 zijn de resultaten overzichtelijk bijeen gezet.



