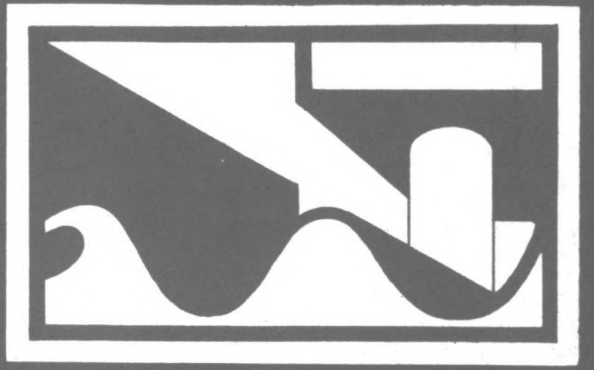
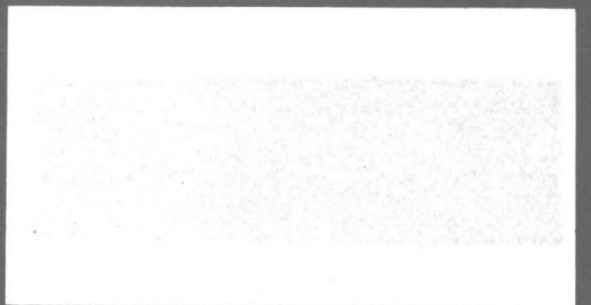


618A



Haven Monrovia - H. Stefess 1989

Bjke



# De Haven van Monrovia.

Delft, september 1984.

H. Stefess

## Contents

1 Aanpassing van de havendammen.	6
1.1 Inleiding	6
1.2 Algemeen.	6
2 golven.	8
2.1 Beschrijving van het golfbeeld.	8
2.2 Lange termijn statistiek van de golven te Monrovia.	13
2.2.1 Inleiding	13
2.2.2 Lange termijn statistiek van de deining te Monrovia	13
2.3 Golfspectrum te Monrovia.	15
2.4 lange termijn statistiek van het golfklimaat in de toegangseul.	17
2.4.1 Golfvervorming bij een geul.	17
2.4.2 Reductie refractie- diffractie verschijnselen.	21
2.4.3 Lange termijn statistiek van het golfklimaat in de geul.	24
3 Binnenloopmanoeuvre van het maatgevende schip.	25
3.1 Inleiding.	25
3.1.1 Manoevreereigenschappen van een schip bij lage snelheden.	25
3.1.2 De stopmanoeuvre op ondiep water.	28
3.2 Sleepboothulp.	33
3.3 Overzicht van de binnenloopmanoeuvre te Monrovia.	34
4 Verticale scheepsbewegingen.	36
4.1 Inleiding.	36
4.2 Inzinking.	37

4.3 Verticale scheepsbewegingen o.i.v. golven.	
4.3.1 Algemeen.	42
4.3.2 .1 Bewegingsvergelijkingen.	42
4.3.1 .2 Relatie golfspectrum en spectrum van de verticale scheepsbeweging.	45
4.3.2 Responsiefunctie	46
4.3.2 .1 Responsiefunctie verticale scheepsbeweging o.i.v. golven.	46
4.3.2 .2 De invloed van het golfspectrum op de responsiefunctie.	50
4.3.2 .3 De invloed van de vaarsnelheid op de responsiefunctie.	51
4.3.2 .4 Golfgroepen (wave grouping ).	60
4.3.2 .5 Samenvatting.	61
4.3.3 Berekening bewegingsspectra.	62
4.3.4 Lange termijn verdeling van de standaardafwijking van de verticale scheepsbeweging.	67
5 Bodem	71
5.1 Bodemgesteldheid	71
5.2 Standaardafwijking bodemverloop.	71
6 Bepaling van de maatgevende waterstand.	74
6.1 Het getij.	74
6.1.1 opwaaiing/afwaaiing.	74
6.1.2 De maatgevende waterstand.	75
7 Bepaling geuldiepte.	77
7.1 Algemeen.	77
7.2 Beschrijving bodemvrijheidverloop.	78
7.3 Raken van de bodem.	80
7.4 De bestuurbaarheid van het schip.	88
8 Bepaling van de optimale geuldiepte.	90
8.1 Aanlegkosten.	90
8.2 Schadekosten.	92
8.3 Wachtgeldkosten.	96
8.4 De optimale geuldiepte.	97
9 Geulaanzanding.	101



9.1 Algemeen.	101
9.2 Golven en stroming.	103
9.3 Zandtransport o.i.v. golven en stroming.	106
9.4 Zandtransport bij een geul.	111
Symbolenlijst.	119
Literatuurlijst.	121
Bijlagen.	123

Samenvatting.

Dit rapport is een vervolgstudie op het door Smole en van de Vijver [1] verrichtte vooronderzoek betreffende de aanpassing van de haven van Monrovia. de aanpassing van de haven moet het mogelijk maken schepen van 150.000 dwt te ontvangen. De huidige haven lay-out staat de ontvangst van ertscarriers van 80.000 dwt toe.

In het kader van deze aanpassing zijn in dit rapport de volgende aspecten nader onderzocht:

- De binnenloopmanoeuvre van het maatgevende schip.
- Geuldiepte en geulorientatie.
- Aanzanding van de toegangseul.

In verband met de beperkte financieringsmogelijkheden van een land als Liberia is het uitgangspunt bij de aanpassing geweest te komen tot een ontwerp met lage aanlegkosten. Kostbare ingrepen, hierbij wordt gedacht aan een havendamverlenging, zijn waar mogelijk vermeden.

De binnenloopmanoeuvre van het maatgevende schip wordt door de volgende factoren beïnvloedt; De manoeuvreereigenschappen van het schip, de beschikbare remweglengte en de aanwezigheid van sleepboothulp.

De maatgevende schepen lopen te Monrovia geballast binnen. De geballaste 150.000 dwt ertscarrier beschikt bij een vaarsnelheid van 5 knoop over goede manoeuvreereigenschappen. Deze snelheid van 5 knoop wordt aangehouden als de maximaal toelaatbare snelheid bij de kop van de zuidelijke havendam. Bij deze snelheid is de beschikbare ruimte in het havenbekken van Monrovia ruim voldoende om het schip veilig tot stilstand te brengen.

De geulorientatie wordt voornamelijk bepaald door de optredende golfdoordringing in het havenbekken en door de daarmee samenhangende refractie-, diffractie verschijnselen bij de geul. Bij een toegangsheul met een orientatie van  $100^\circ$  (zie figuur 2.5 ) komen de genoemde refractie-, diffractie verschijnselen procentueel weinig voor en is ook de golfdoordringing beperkt.

De benodigde geuldiepte wordt ondermeer bepaald door de waterstanden, de diepgang van het maatgevende schip, de inzinking, de bodemligging, het golfklimaat en de verticale scheepsbewegingen.

Monrovia heeft een dubbeldaags getij met een gemiddelde verticale getij amplitude van 0.4 meter. De maatgevende waterstand is bepaald voor een getijpoort in de dood tij kromme, de amplitude is dan gelijk aan 0.3 meter. De diepgang van de geladen ertscarrier bedraagt 16.5 meter. Bij een vaarsnelheid van circa 5 knoop bedraagt de inzinking ongeveer 0.3 meter. Van de bodemligging wordt aangenomen dat deze normaal verdeeld is, de bepaalde standaardafwijking is gelijk aan 0.53 meter. De grootte van de verticale scheepsbewegingen is zeer afhankelijk van de hoek van inval en de periode van de invallende golven. De beladen ertscarrier is met name gevoelig voor dwars inkomende golven met golfperiodes rond die van de eigenperiode van de rolbeweging (circa 12 seconden ). In dat geval heeft de responsiefactor de waarde 3.1. Het maatgevende schip is dus in het bijzonder gevoelig voor deininggolven. Met behulp van de deiningsspectra en de door het Marin gegeven scheepsresponsiefunctie zijn de spectra van de verticale scheepsbeweging berekend. Hieruit is uiteindelijk de lange termijnverdeling van de standaardafwijking van de verticale scheepsbeweging afgeleid.

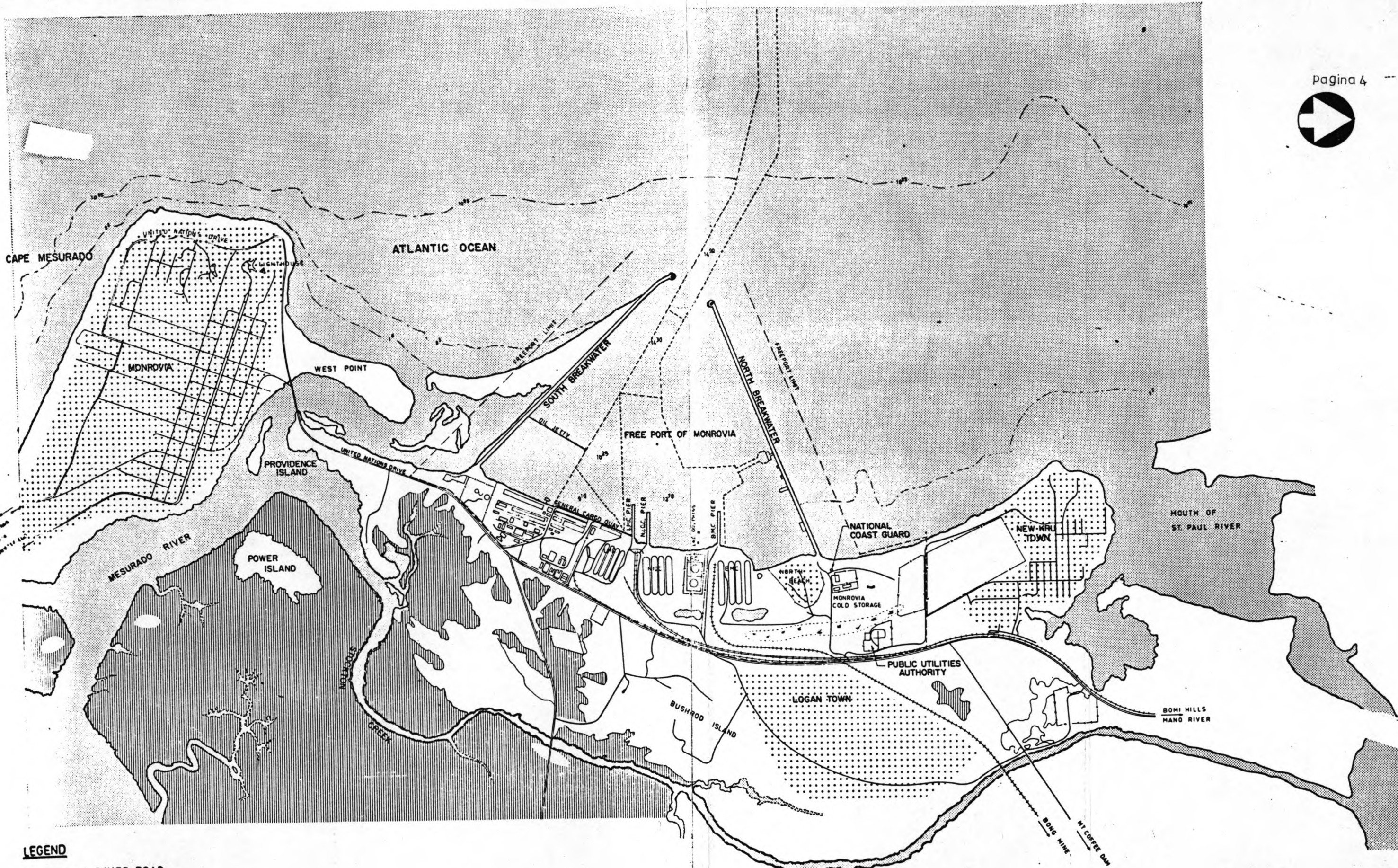
Voor vijf alternatieve geuldiepten zijn de totale kosten bepaald. De totale kosten zijn opgebouwd uit de aanlegkosten, de schadekosten en de door de wachttijden veroorzaakte kosten. De hieruit resulterende geuldiepte bedraagt 19 meter. Bij deze geuldiepte is in tien procent van de gevallen de toelaatbare kans op raken per geulvaart groter dan  $10^{-2}$  waardoor de geulvaart uitgesteld worden.

Tenslotte is de jaarlijks langs de geul te verwachten sedimentatie bepaald. Deze bedraagt 350.000 tot 400.000 m<sup>3</sup> per jaar. Deze hoeveelheid maakt regelmatig onderhoudsbaggerwerk, om de twee a drie jaar, noodzakelijk.

De totale kosten van het project bedragen honderd miljoen gulden, (inclusief de kosten verbonden aan het inkorten van de noordelijke havendam en de kosten van het baggeren van het havenbekken). De totaal kosten van alleen de geul bedragen circa zestig miljoen gulden.

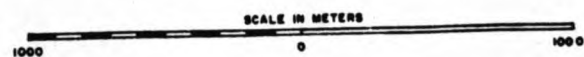
Ten opzichte van het eerste globale ontwerp van Smole en van de Vijver is het voorliggende ontwerp aanzienlijk goedkoper. De besparingen komen voort uit de niet uitgevoerde havendamverlenging ten bedrage van 110 miljoen gulden en de besparingen op het baggerwerk ten behoeve van de geulaanleg ten bedrage van 20 miljoen gulden. De te verwachten besparingen op de transportkosten van het erts bij vervoer met 150.000 dwt schepen bedraagt circa 45 miljoen gulden per jaar. ( Bij een geschatte export van 17.5 miljoen ton per jaar.) De investeringskosten van dit project laten zich op korte termijn terugverdienen, zodat uitvoering van de aangegeven lay-out zeer rendabel lijkt te zijn.



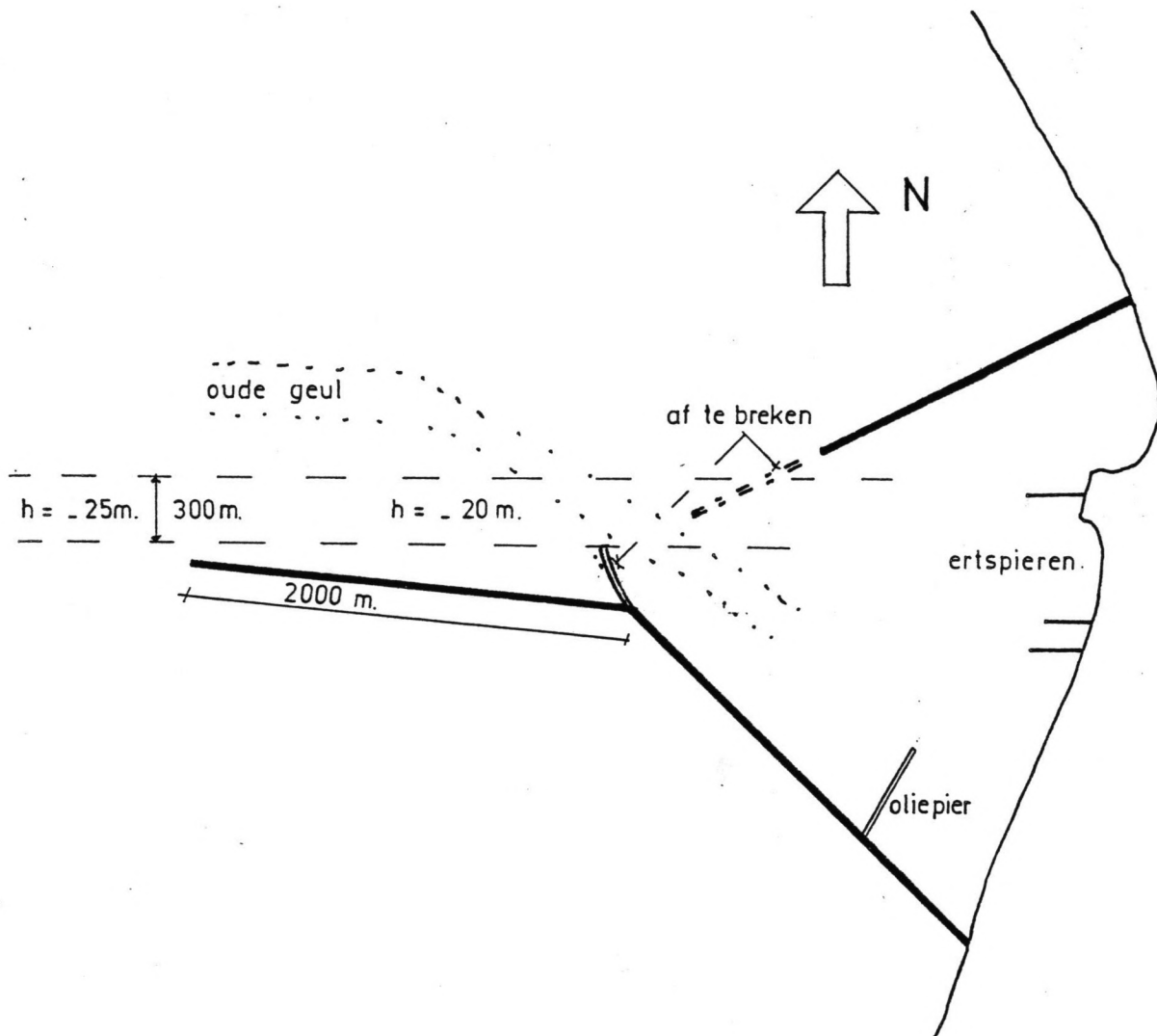


**LEGEND**

- PAVED ROAD
- OTHER ROAD
- RAIL ROAD
- MANGROVE
- RESIDENTIAL AREA
- RIVER
- SWAMP



THE FREEPORT OF MONROVIA  
GENERAL LAYOUT OF THE PORT  
FIGURE 0.1



Figuur 0.2

Haven van Monrovia.

Ontwerp SMOLE en v d VIJVER



## 1 Aanpassing van de havendammen.

### 1.1 Inleiding

De aanlegkosten van de door Smole en van de Vijver ontworpen haven lay-out (zie figuur 1.2) bedragen 180 miljoen gulden. (prijspeil 1979) Van dit bedrag komt 65 miljoen op rekening van de uit te voeren baggerwerkzaamheden aan de toegangseul en het havenbekken. De voorgestane havendamverlenging is op 110 miljoen gulden begroot. Mogelijke besparingen op de aanlegkosten van dit project zullen dus voornamelijk gezocht moeten worden bij de te verlengen havendam. Onderzocht zal worden of een kortere havendam mogelijk is.

### 1.2 Algemeen.

Allereerst worden de vier belangrijkste functies van havendammen beschreven en vervolgens zal worden nagegaan in hoeverre deze functies in het geval van de haven van Monrovia vervuld dienen te worden.

#### - Havendamfuncties.

##### 1. Bescherming bieden tegen de golven.

Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen:

- a De vaargeul, te grote golfactiviteit kan voor grote verticale scheepsbeweging zorgen en zodoende sleepboothulp zeer bemoeilijken.
- b Het havenbekken, golfdoordringing in het havenbekken kan het laden en lossen van schepen hinderen.

##### 2. Beperken van de aanzanding in de toegangseul en het havenbekken.

Door de havendam wordt het langstransport van sediment voor de kust afgebroken.

##### 3. Gebruik van de havendam als kade.

In gebieden waar de natuurlijke bescherming klein of bijna niet aanwezig is, wordt deze uitvoering van de havendam wel toegepast om de beschikbare kaderuimte in de haven te vergroten.

4 Geleiding van de stroming.

Goede geleiding van de langsstroom voorkomt dat er bij de kop van de havendam sterke contractie van de stroomlijnen optreedt. De genoemde contractie veroorzaakt een grote dwarsstroomgradient in de toegangseul. Deze gradient levert de scheepvaart grote problemen op.

Voor de haven van Monrovia kan ten aanzien van de hierboven vermelde functies het volgende worden opgemerkt:

ad 1: Bescherming bieden tegen golven. Het is zonder meer duidelijk dat een wijziging in de lengte van de zuidelijke havendam invloed heeft op de golfcondities in de toegangseul en het havenbekken van Monrovia. Voor elk van de onder punt 1 genoemde factoren moet onderzocht worden wat de gevolgen zijn van een eventueel inkorten van de havendam.

ad 2: Beperking van de aanzandingen. De grootte van het langstransport bij Monrovia bedraagt circa 400.000 m<sup>3</sup> per jaar. [1] Dit transport vindt plaats in noord-westelijke richting. Indien deze hoeveelheid wordt aangehouden als bovengrens van de geulaanzanding, dan zijn de onderhoudsbaggerkosten in de orde van grootte van 3 miljoen gulden per jaar. Het is duidelijk dat dit bedrag alleen een havendamverlenging niet rechtvaardigt.

ad 3: Gebruik van de havendam als kade. Niet ter zake doende. De havencapaciteit van Monrovia is ruim voldoende.

ad 4: De geleiding van de stroming. Eveneens niet ter zake doende. De stroomsnelheden voor de havenmond zijn zeer bescheiden. (Maximale stroomsnelheid bedraagt circa 0.4 m/s.)



## 2. golven.

### 2.1 Beschrijving van het golfbeeld.

De bewegingen van het zeeoppervlak zoals men het in de natuur aantreft worden gekenmerkt door een schijnbare chaos. In deze chaos kan men ordening aanbrengen door een statistische beschrijving van het golfbeeld; Hierbij wordt het golfbeeld opgebouwd gedacht uit een groot aantal sinusvormige componenten met verschillende amplitude, frequentie, richting en fase. Deze lineaire beschrijving is geoorloofd indien de steilheid van de golven klein is. De opsplitsing in sinusvormige componenten wordt spectraal-analyse genoemd. De golfbeweging in een punt laat zich dan beschrijven volgens:

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^n a_i \cos(\omega_i t - \alpha_i) \quad (2.1)$$

met  $\eta(t)$  is de uitwijking van het wateroppervlak  
 $\alpha_i$  is de fasehoek  
 $a_i$  is de golfamplitude  
 $\omega_i$  is de hoekfrequentie

De som van een zeer groot aantal stochastisch onafhankelijke variabelen is onder ruime voorwaarden bij benadering normaal verdeeld (centrale limietstelling), en als zodanig geldt dit voor  $\eta(t)$  dus ook. Een Gaussische variabele, hier  $\eta(t)$ , is in statistische zin geheel bepaald door zijn variantie. (Het gemiddelde van de variabelen wordt hier gelijk aan nul gesteld.) Bij de beschrijving van een Gaussisch proces kan niet volstaan worden met kennis van de afzonderlijke variabelen ( $\eta(t_1)$ ,  $\eta(t_2)$ , etcetera); kennis van de samenhang tussen ( $\eta(t_1)$ ,  $\eta(t_2)$ ) is dan noodzakelijk. Als het proces stationair is, dat wil zeggen dat de statistische eigenschappen in de tijd constant zijn, is het tijdsverschil ( $\tau$ ) tussen de variabelen ( $\eta_t$  en  $\eta_{t+\tau}$ ) bepalend voor de mate waarin de variabelen samenhang vertonen. De autocovariantiefunctie beschrijft deze samenhang.

$$C_{\eta\eta}(\tau) = E(\eta_t \cdot \eta_{t+\tau}) \quad (2.2)$$

$E(x)$  = verwachtingswaarde van  $x$   
 = gemiddelde waarde van  $x$

De Fourier getransformeerde van de autocovariantiefunctie is de spectrale variantiedichtheidsfunctie,  $S_{\eta\eta}(\omega)$ . De variantie wordt verkregen door bovenstaande functie te integreren.

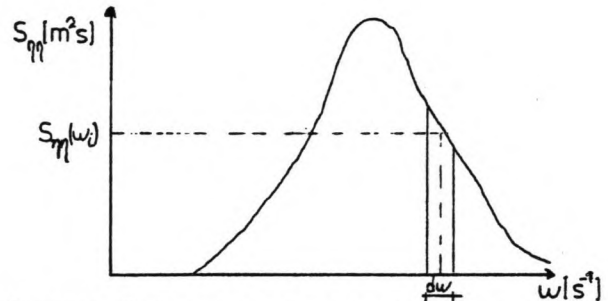
$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} S_{\eta\eta}(\omega) d\omega \quad (2.3)$$

$\sigma^2$  = variantie  
 $\sigma$  = standaardafwijking

$S_{\eta\eta}$  beschrijft een stationair Gaussisch proces in statistische zin volledig.  $S_{\eta\eta}$  wordt ook wel energiedichtheidsfunctie genoemd, omdat de functie de bijdrage per eenheid van frequentie aan de gemiddelde energie van het golfveld beschrijft. In formulevorm:

$$S_{\eta\eta}(\omega_i) * d\omega = 0.5 * (a_i)^2 \quad (2.4)$$

$a_i$  is de gemiddelde golf-amplitude bij  $\omega_i$



figuur 2.1 : energiedichtheidsspectrum

Een illustratie van de samenhang tussen het golfbeeld zoals beschreven door  $\eta_t$ , de autocovariantiefunctie  $C_{\eta\eta}$  en het energiedichtheidsspectrum wordt in figuur 2.2 gegeven.

In het eerste geval, zie figuur 2.2, is er sprake van een zuiver sinusvormige golf.  $C_{\eta\eta}$  is dan ook sinusvormig en de energiedichtheid is bij de golfrequentie oneindig groot (de golfenergie bij deze frequentie bedraagt  $0.5 a^2$ ). Het laatste geval laat het andere uiterste zien. In het golfbeeld is geen sprake meer van enige periodiciteit. Het golfbeeld is zeer grillig. De spectrale componenten (zie (2.1)) variëren sterk in frequentie maar zijn vrijwel even energierijk. De samenhang tussen het golfbeeld op tijdstip  $t$  en dat op  $t+\tau$  op zekere plaats is zelfs bij kleine waarden van  $\tau$  minimaal. De

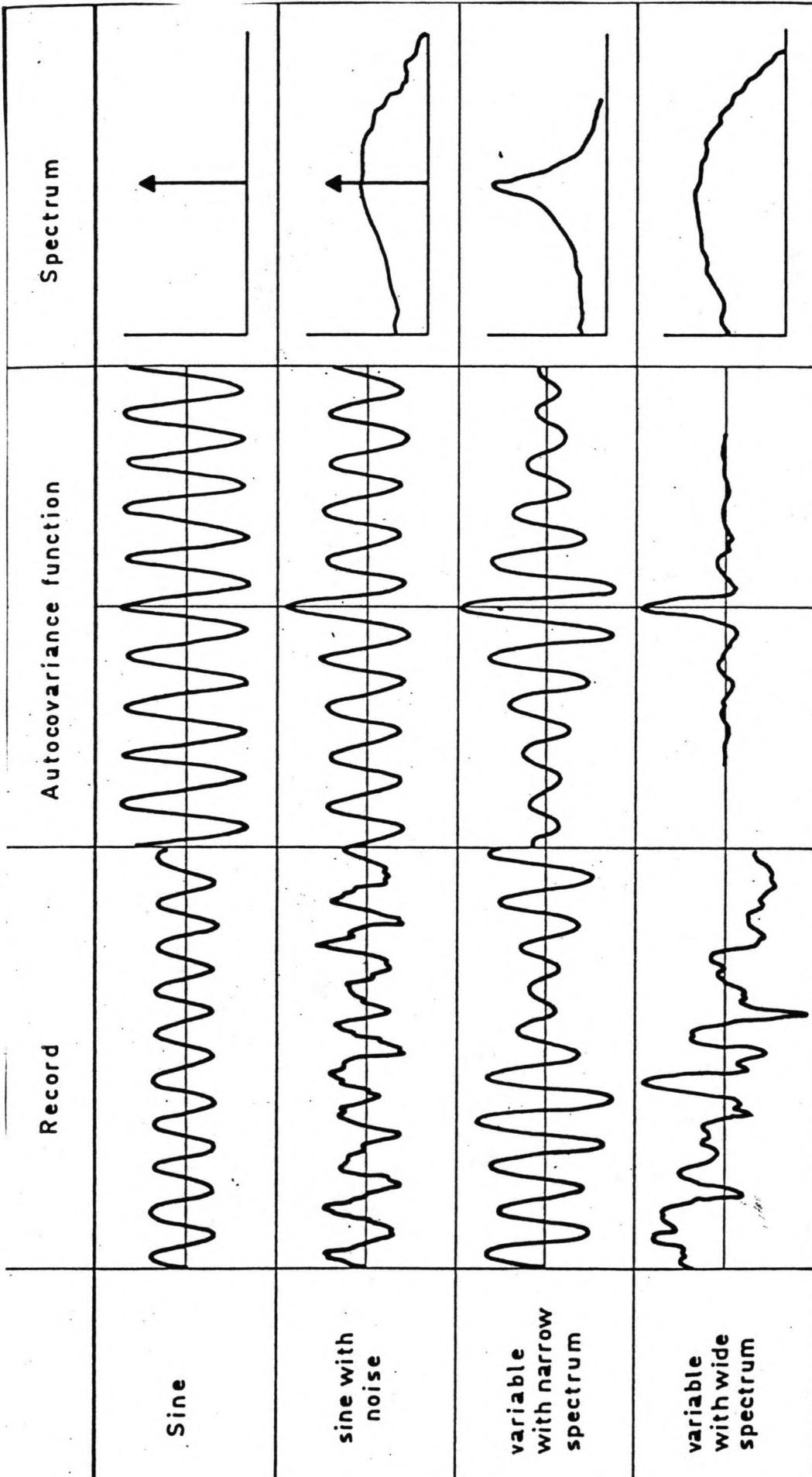


Figure 2.2 EXAMPLES OF CHARACTERISTIC RECORDS WITH THEIR AUTOCOVARANCE FUNCTIONS AND SPECTRA.

autocovariantiefunctie bereikt in dit geval al snel de waarde nul. Het energiedichtheidsspectrum is breed.

De overige gevallen variëren tussen boven beschreven extremen. In het algemeen kan gesteld worden dat een regelmatig golfbeeld een brede autocovariantiefunctie heeft en een smal energiedichtheidsspectrum. Evenzo heeft een onregelmatig golfbeeld een smalle autocovariantiefunctie en een breed spectrum.

Indien het energiedichtheidsspectrum bekend is kunnen de het golfveld bepalende grootheden worden bepaald. Deze grootheden worden veelal uitgedrukt in "momenten" van het spectrum.

$$\text{Het } i^{\text{de}} \text{ moment } m_i = \int_0^{\infty} \omega^i * S_{\eta\eta}(\omega) d\omega \quad (2.5)$$

$$\text{zo is } m_0 = \int_0^{\infty} S_{\eta\eta}(\omega) d\omega = \sigma^2 \quad (2.6)$$

Onder vrij ruime voorwaarden geldt:

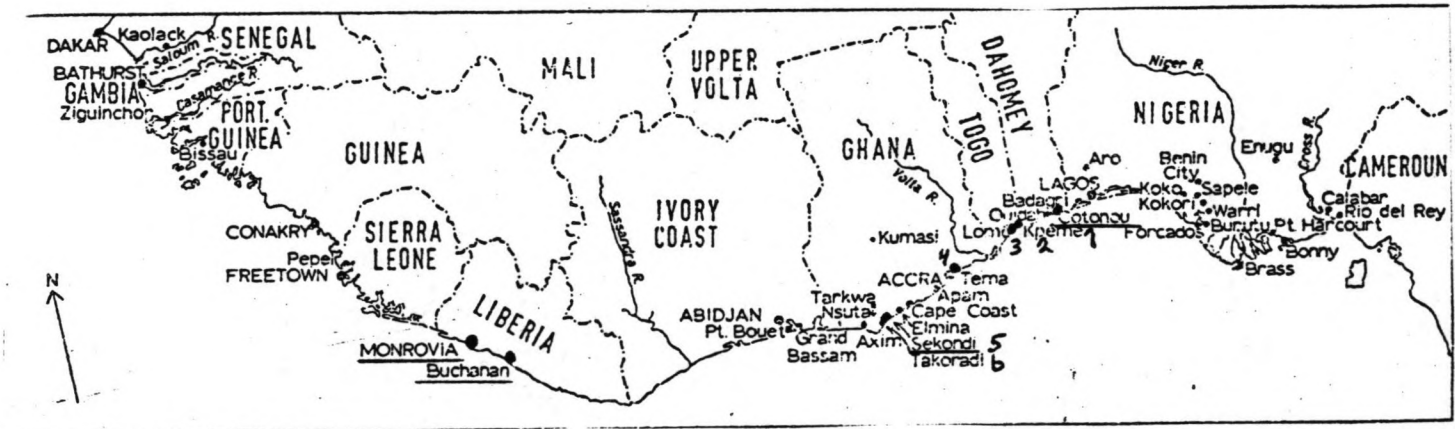
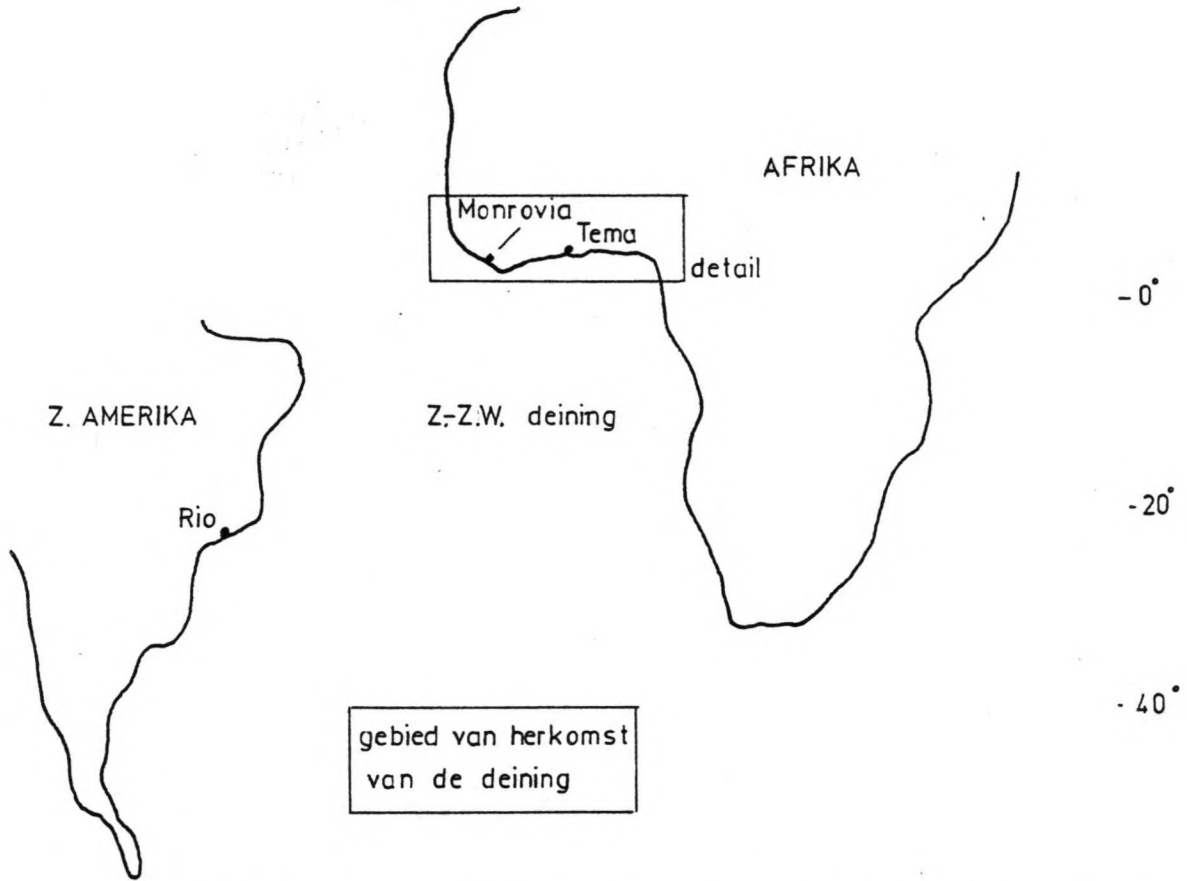
$$H_s = 4 * \sqrt{m_0} \quad (2.7)$$

$H_s$ , de significante golfhoogte, is het gemiddelde van het hoogste eenderde deel van de golfhoogten. Een ander veel gebruikte grootheid is  $\bar{T}_0$ , de gemiddelde nuldoorgangsperiode:

$$\bar{T}_0 = 2 * \pi * (m_0 / m_2)^{1/2} \quad (2.8)$$

Voor de meeste lokaties zijn geen gegevens in de vorm van spectra beschikbaar, wel beschikbaar zijn in het algemeen lange termijn verdelingen van  $H_s$  en  $\bar{T}_0$ . In dat geval kan men gebruik maken van theoretische spectra. Door de het golfbeeld bepalende grootheden  $H_s$  en  $\bar{T}_0$ , in een dergelijk spectrum in te voeren kan het golfspectrum worden benaderd. Veel gebruikte theoretische spectra zijn:

- Voor volgroeide zeeegang op diep water, het Neuman spectrum en het Pierson-Moskowitz spectrum.
- Voor groeiende zeeegang op diep water, het Jonswap spectrum.



Detail : Kust van West Afrika. schaal  $\approx 1:20000000$ .

Figuur 23. Ligging van Monrovia t.o.v. de deiningsoorsprong.

## 2.2 Lange termijn statistiek van de golven te Monrovia.

### 2.2.1 Inleiding

Het golfklimaat voor de haven van Monrovia wordt bepaald door deining uit zuid-westelijke richtingen. De oorsprong van deze deining ligt tussen de 40° en 50° zuiderbreedte. De afstand van dit gebied tot de West Afrikaanse kust bedraagt circa 5000 km. Langs de gehele kust wordt de genoemde deining aangetroffen.

De zeegang te Monrovia is beperkt: Monrovia ligt in de doldrums (windstilten gebied). Windsnelheden boven de 10 m/s komen zeer sporadisch voor.[1] De door de wind in dit gebied opgewekte golven hebben maximaal een periode van circa 7 seconden.

### 2.2.2 Lange termijn statistiek van de deining te Monrovia

Zoals in hoofdstuk 1 vermeld is, zal onderzocht worden in hoeverre het met het oog op de scheepvaart toelaatbaar is de havendam slechts weinig of niet te verlengen. De scheepsbewegingen zijn hierbij van bijzonder bepalende invloed. Uit onderzoek is gebleken dat de scheepsbewegingen met name gevoelig zijn voor golven met relatief lage frequenties, zie hoofdstuk 4.3.2.1. In dit kader kan de zeegang te Monrovia buiten beschouwing gelaten worden.

De grootte van de scheepsbewegingen is zeer afhankelijk van , behalve de golfhoogte, de gemiddelde golfperiode en de invalshoek van de golven. In verband hiermee is het belangrijk om over golfgegevens te beschikken, waarvan de informatie betreffende golfhoogte, golfperiode en golfrichting gekoppeld is. Hiertoe is het golfklimaat te Monrovia beschreven met een drie dimensionale kansdichtheidsfunctie  $p(H_s, \bar{T}, \phi_0)$ . De dimensies zijn de significante golfhoogte,  $H_s$ , de gemiddelde golfperiode,  $\bar{T}$ , en de golfrichting op diep water,  $\phi_0$ .

Omdat er voor Monrovia geen golfgegevens bekend zijn is bij het opstellen van de kansdichtheidsfunctie, in het vervolg k.d.f. genoemd, gebruik gemaakt van gegevens van Buchanan (80 km ten zuid-oosten van Monrovia gelegen.) en van deininggegevens van plaatsen aan de kust van West-Afrika, te weten Sekondi en Contonou, zie figuur 2.2.



De gebruikte gegevens zijn :

- Buchanan - golfroos  
- lange termijn verdeling  $H_e$
- Sekondi -  $H_e-T_e$  scatterdiagram  
- lange termijn verdeling  $H_e$
- Contonou -  $H_e-\emptyset$  diagram  
- lange termijn verdeling  $H_e$

De koppeling van deze gegevens , uitgangspunt daarbij zijn de gegevens van Buchanan geweest, en de bepaling van de resulterende k.d.f. wordt in het deelontwerp [3] besproken. De in [3] gevonden k.d.f. wordt gegeven in bijlage 2.1. De resultaten zijn gepresenteerd als kans van optreden van een bepaalde combinatie van  $H_e$ ,  $T_e$ , en  $\emptyset_e$ . De golfhoogten zijn hierbij opgedeeld in 5 klassen met een klassebreedte van 0.5 m . De golfperiodes in 4 klassen met een klassebreedte van 2 seconden. En de golfrichtingen tenslotte in 5 klassen , hierbij is voor een belangrijk deel de golfroos van Buchanan aangehouden. Aldus zijn de volgende klassen verkregen:

golfhoogteklasse	golfperiodeklasse	golfrichtingsektor
$0.5 \leq H_e < 1$ m	$8 \leq \bar{T} < 10$ s	$\emptyset_e < 185\text{o}$
$1 \leq H_e < 1.5$ m	$10 \leq \bar{T} < 12$ s	$185\text{o} \leq \emptyset_e < 195\text{o}$
$1.5 \leq H_e < 2$ m	$12 \leq \bar{T} < 14$ s	$195\text{o} \leq \emptyset_e < 205\text{o}$
$2 \leq H_e < 2.5$ m	$14 \leq \bar{T} < 16$ s	$205\text{o} \leq \emptyset_e < 215\text{o}$
$2.5 \leq H_e$		$215\text{o} \leq \emptyset_e < 240\text{o}$

Zoals in bijlage 2.1 is op te merken heeft het grootste deel van de deining een een golfperiode in de klasse  $10 \leq \bar{T} < 12$  s , en een golfrichting tussen de  $185\text{o}$  en  $215\text{o}$  (op diep water ). Tevens valt op te merken dat met het toenemen van de significante golfhoogte , de kans op grotere golfperiodes relatief toeneemt.

Opgemerkt moet worden dat ten aanzien van de lange termijn verdeling de nodige voorzichtigheid moet worden betracht omdat de golfgegevens van vrij korte waarnemingsperiodes afkomstig is. (langste meetperiode bedraagt 4 jaar, de kortste 5 maanden).

### 2.3 Golfspectrum te Monrovia.

De kans van optreden van een golfveld gekenmerkt door de parameters  $H_s$ ,  $T$ ,  $\phi$  is nu bekend. Nog niet bekend is de vorm van het golfenergiespectrum dat door  $H_s$  en  $T$  bepaald wordt. De theoretische spectra zijn zeeangspectra, deze zijn hier niet van toepassing. Het is echter mogelijk om tot een redelijke benadering van het te Monrovia aanwezige spectrum te komen. Immers de spectrale componenten van de tussen de 40° en 50° breedtegraad opgewekte zeeang planten zich onafhankelijk van elkaar voort, elk met een eigen voortplantingssnelheid  $c_g$ . Op diep water geldt:

$$c_g = 1/4 \cdot \pi \cdot g / f \quad (2.11)$$

met  $f$  is de golffrequentie  
 $f = 1/T$   
 $g$  is de zwaartekrachtversnelling

Golven met een lage frequentie hebben een grote voortplantingssnelheid. Buiten het opwekkend windveld vindt er een uiteenrafeling plaats. Deze sortering naar frequentie wordt dispersie genoemd. De vorm van het deiningsspectrum te Monrovia kan met de onderstaande schematisatie benaderd worden.

$A$  is de kleinste afstand tussen Monrovia en de oorsprong van de deining

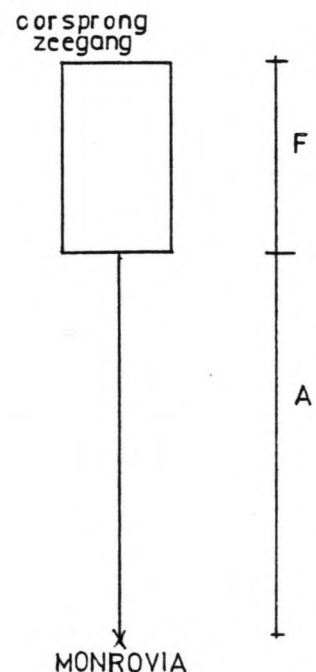
$F$  is de fetch van het windveld

$(A+F)$  is de grootste afstand Monrovia-oorsprong deining

tijdstip:  $t_0=0$  in het opwekkingsgebied begint een storm

$t_1$ : de storm is gaan liggen

$t_2$ : er wordt te Monrovia een spectrum een gemeten





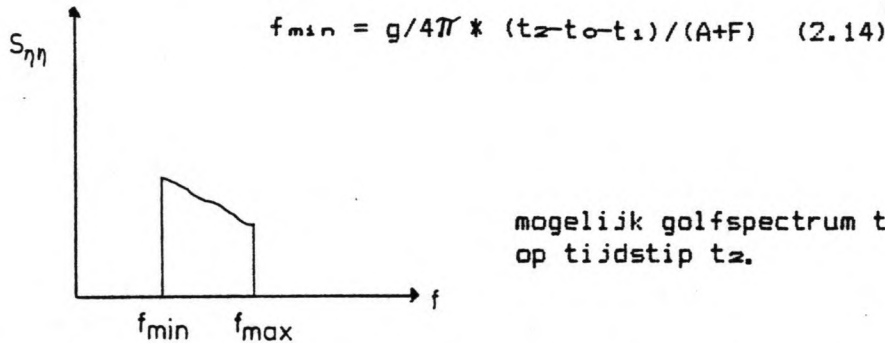
Onder de op het tijdstip  $t_2$  te Monrovia gemeten hoogste frequentie van het deiningsspectrum vindt men de bijdrage van de golven met de kleinste voortplantingssnelheid, zie (2.11). Deze golven hebben de kleinst mogelijke loopafstand afgelegd en daar de grootst mogelijke looptijd voor nodig gehad. Voor deze golven geldt dus:

$$c_{\min} = A / (t_2 - t_0) \quad (2.12)$$

(2.12) gelijkstellen aan (2.11) geeft:

$$f_{\max} = g / 4\pi * (t_2 - t_0) / A \quad (2.13)$$

De op het tijdstip  $t_2$  te Monrovia gemeten laagste frequentie is dan gelijk aan:

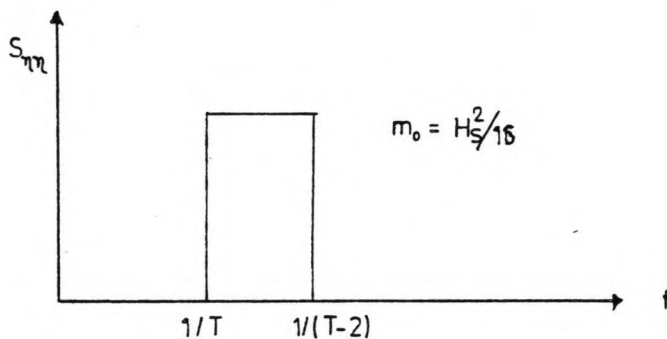


De breedte van het te Monrovia optredende deiningsspectrum,  $(f_{\max} - f_{\min})$ , wordt bepaald door de parameters  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $F$  en  $A$ . In tabel 2.1 wordt voor aangenomen waarden van  $f_{\max}$  bij verschillende waarden van de het stormveld bepalende parameters  $F$  en  $t_1$ , de waarde van de laagste op het tijdstip  $t_2$  te Monrovia gemeten frequentie,  $f_{\min}$ , bepaald.

$f_{\max}$	$T_{\min}$	$A$	$F$	$t_1$	$t_2$	$f_{\min}$	$T_{\max}$
0.1	10	5000	200	12	178	0.089	11.2
0.1	10	5000	500	12	178	0.085	11.8
0.1	10	5000	500	24	178	0.079	12.7
0.083	12	5000	200	12	148	0.074	13.5
0.083	12	5000	500	12	148	0.070	14.4
0.083	12	5000	500	24	148	0.064	15.7

tabel 2.1 bepaling minimale frequentie:  $f_{\min}$

Uit tabel 2.1 blijkt dat het te Monrovia optredende spectrum inderdaad zeer smal is. Het verschil tussen de maximale golfperiode,  $T_{max}$ , en de minimale golfperiode,  $T_{min}$ , bedraagt circa 2 seconden. Het bij de berekening van het bewegingsspectrum van de verticale scheepsbewegingen te gebruiken golfspectrum, zie hoofdstuk 4, wordt voor dit doel redelijk benaderd worden met een blokvormige schematisatie, met een breedte ter grootte van  $T_{max}-T_{min}=2$  seconden.

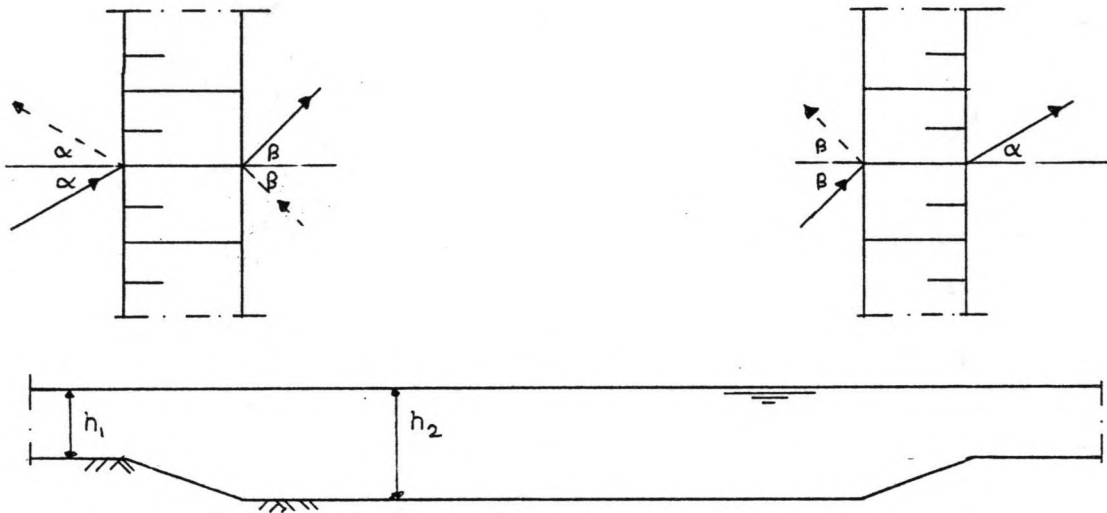


figuur 2.2 geschematiseerd deiningsspectrum.

2.4 lange termijn statistiek van het golfklimaat in de toegangseul.

2.4.1 Golfvervorming bij een geul.

Het golfbeeld in de toegangseul kan duidelijk afwijken van dat voor de geul. Deze verandering in het golfpatroon kan verwacht worden, indien er een vrij groot verschil is tussen de waterdiepten binnen en buiten de geul en indien de invalrichting van de invallende golven een vrij grote hoek maakt met de normaalrichting op de dieptelij die het onderwatertalud bepaald. (oftewel een kleine hoek maakt met de geulas). Indien deze hoek iets kleiner is dan een bepaalde kritieke waarde dan zijn de golven in de geul aanmerkelijk hoger dan de invallende golf. Is deze hoek groter dan de kritieke hoek dan wordt een groot gedeelte van de invallende golfenergie op het geultalud gereflecteerd.



figuur 2.3 golfvervorming bij een geul.

Met behulp van figuur 2.3 en de wet van Snellius is voor het onderwatertalud de volgende relatie op te stellen: (zie ook [3])

$$\sin \alpha / \sin \beta = \tanh(k \cdot h)_1 / \tanh(k \cdot h)_2 \quad (2.15)$$

waaruit volgt,

$$\beta = \arcsin[\tanh(k \cdot h)_2 / \tanh(k \cdot h)_1 * \sin \alpha] \quad (2.16)$$

$\beta$  wordt onbepaald indien  $\tanh(k \cdot h)_2 / \tanh(k \cdot h)_1 * \sin \alpha > 1$

de kritieke invalshoek is dus:

$$\alpha_{\text{krit.}} = \arcsin [\tanh(k \cdot h)_1 / \tanh(k \cdot h)_2] \quad (2.17)$$

met  $k$  is het golfgetal  
 $k = 2\pi/L$   
 $L$  is de golflengte

bij  $\alpha = \alpha_{\text{krit.}}$  is  $\beta$  gelijk aan  $\pi/2$

ter illustratie:	geuldiepte	22 m
	buitendiepte	10 m
	gemiddelde golflengte	12 s
	$\tanh(k \cdot h)_{10}$	= 0.504
	$\tanh(k \cdot h)_{20}$	= 0.704

$$\alpha_{\text{krit.}} = 45.7^\circ$$

Tevens geldt volgens deze benadering:

$$\cos \beta / \cos \alpha = b_{geul} / b_{invalleend} \quad (2.18)$$

b is de afstand tussen twee naburige golfstralen

Voor  $\beta = \pi/2$  snijden de golfstralen en de golfhoogte in het snijpunt zou oneindig groot zijn, zie (2.18). Met de gebruikte refractietheorie kan het probleem niet beschreven worden. Daarom is een refractie- diffractie benadering toegepast. De beschrijving van deze benadering is in het deelontwerp [3] te vinden. De uitgangsvergelijking is de zogenaamde "mild slope" vergelijking.

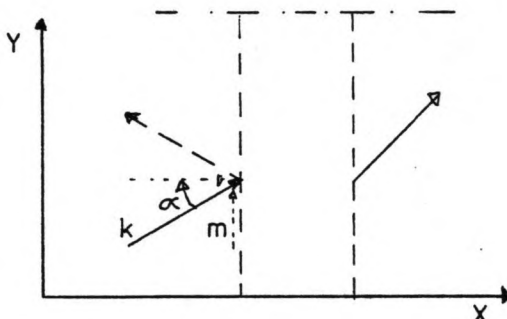
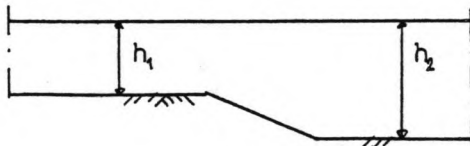
$$\frac{\partial}{\partial x} (c c_g \frac{\partial \psi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (c c_g \frac{\partial \psi}{\partial y}) + k^2 c c_g \psi = 0 \quad (2.19)$$

met  $\psi$  is de complexe tweedimensionale golfpotentiaal functie  
 $\psi = a(x,y) * \exp(i*s(x,y))$   
 a is de golfamplitude  
 s is de fasefunctie  
 i is de imaginaire eenheid ( $i^2 = -1$ )

Indien het talud van de geul oneindig lang wordt verondersteld, kan het probleem gedeeltelijk eendimensionaal beschreven worden: de golfamplitude varieert alleen loodrecht op het talud en niet in de lengterichting. De complexe golfpotentiaal functie kan dan geschreven worden als:

$$\psi(x,y) = \Psi(x) * \exp(i*m*y) \quad (2.20)$$

met m is de y component van het golfgetal  
 $m = k * \sin(\alpha)$



Substitutie van (2.20) in (2.19) geeft:

$$\frac{\partial}{\partial x} (c \times c_g \times \frac{\partial \psi}{\partial x}) + (k^2 - m^2) \times c \times c_g \times \psi = 0 \quad (2.21)$$

Vergelijking (2.21) is in het deelontwerp numeriek opgelost met als resultaat: de golfhoogten in de geul. De conclusies volgend uit deze benadering zijn:

- Bij een hoek van inval die groter is dan de eerder genoemde kritieke hoek van inval is er sprake van volledige reflectie op het geultalud. In het gebied voor de geul ontstaan hoge golven. De hier optredende golfhoogte kan een waarde bereiken van tweemaal de invallende golfhoogte. In de geul dringt geen golfenergie door, zodat de waarde van de optredende golfhoogte hier tot nul nadert.
- Bij een hoek van inval welke iets kleiner is dan de kritieke hoek, treden er in de geul verhoogde golven op. In de geul worden golfhoogten met een ruim tweemaal grotere waarde dan de invallende golfhoogte geregistreerd.

In bijlage 2.2 wordt, voor de eerder in hoofdstuk 2.2.2 genoemde combinaties van golfrichtingsector en golfperiodeklasse, de verhouding tussen de inkomende golfhoogte en de hoogte in de geul gegeven. Tevens wordt de hoek van inval van de golven aan de bovenzijde van het geultalud gegeven en de golfrichting in de geul.

Uit bijlage 2.2 blijkt dat de golven in de geul belangrijk hoger zijn dan de inkomende golven. Ook is de golfrichting in de geul in vele gevallen zodanig dat een groot deel van de golfenergie in het havenbekken doordringt. Bovengenoemde ongewenste verschijnselen zijn een gevolg van het feit dat de hoek van inval van de golven aan de rand van het geultalud,  $\psi_1$ , in de meeste gevallen een waarde heeft in de buurt van de kritieke hoek van inval,  $\alpha_{krit}$ .

Alvorens de lange termijn statistiek van de golven in de geul te bepalen, zal onderzocht worden of de in bijlage 2.2 geschetste refractie- diffractie verschijnselen enigszins gereduceerd kunnen worden.

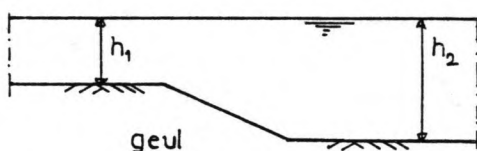
### 2.4.2 Reductie refractie- diffractie verschijnselen.

De refractie- diffractie verschijnselen kunnen gereduceerd worden door het verschil tussen  $\varphi_1$  en  $\alpha_{krist}$  te vergroten. Dit kan men bewerkstelligen door:

1. de waarde van  $\alpha_{krist}$  te vergroten
2. de waarde van  $\varphi_1$  te verkleinen

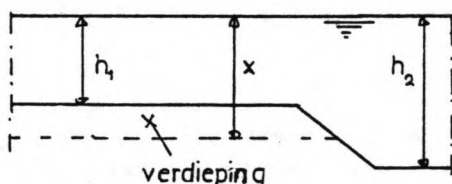
ad 1: Vergroting van de waarde van  $\alpha_{krist}$ . Met behulp van vergelijking (2.17) is  $\alpha_{krist}$  te bepalen:

$$\alpha_{krist} = \arcsin(\tanh(k \cdot h)_1 / \tanh(k \cdot h)_2)$$



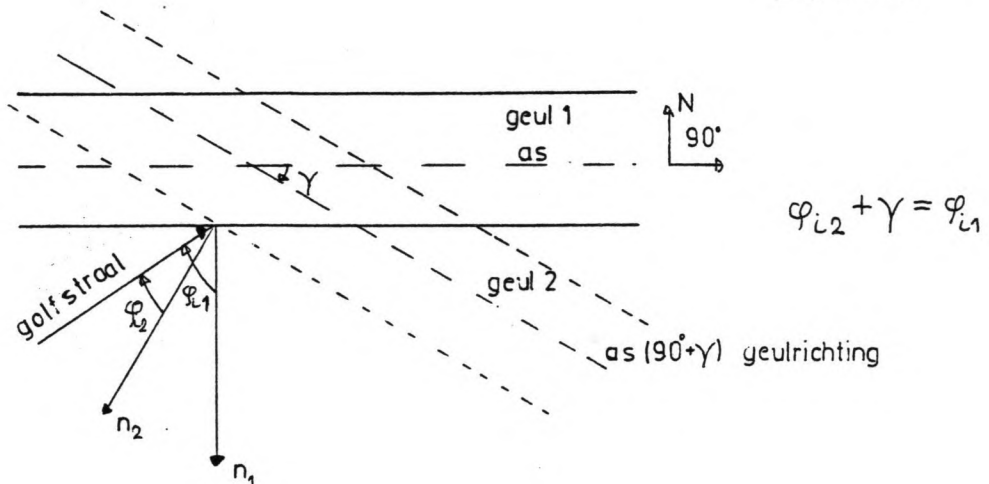
De waarde van  $\alpha_{krist}$  kan vergroot worden door de term  $(\tanh(k \cdot h)_1 / \tanh(k \cdot h)_2)$  te vergroten. Dit is mogelijk door:

- Verkleining van de geuldiepte  $h_2$ . Deze mogelijkheid is in geval van een scheepvaartgeul natuurlijk uitgesloten.
- Verdieping van het gebied voor de geul. Het effect van deze ingreep is tweeledig:



- a  $\alpha_{krist}$  wordt groter.
- b De refractie van de golven is door de verdieping kleiner en de hoek van inval aan de rand van het geulalud,  $\varphi_1$ , dus ook.

ad 2: Verkleining van de hoek  $\varphi_1$ . Een kleinere waarde voor  $\varphi_1$  wordt verkregen door de geulrichting anders te kiezen, zie figuur 2.4.

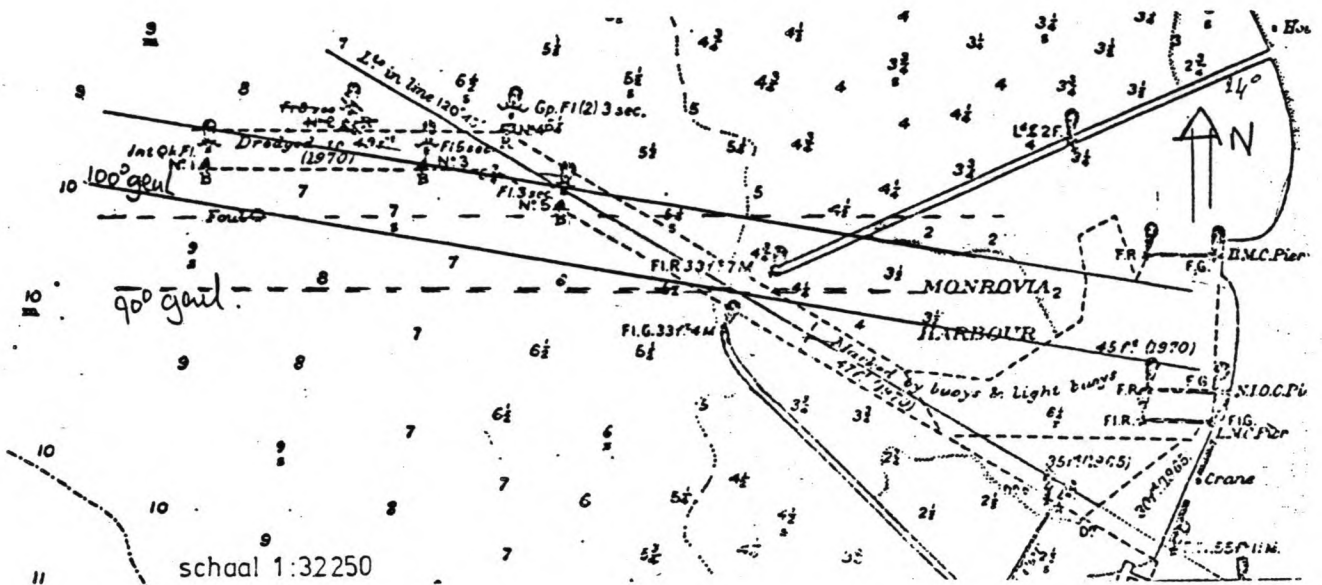


figuur 2.4: Geulverdraaiing over een hoek  $\gamma$

De mate waarin de geulrichting kan worden gevarieerd is te Monrovia beperkt. De situering van het bestaande havenbekken is zodanig dat een geulrichting groter dan circa  $110^\circ$  met het oog op een veilige ontvangst van de schepen niet gewenst is. Bovendien leiden geulrichtingen groter dan circa  $110^\circ$  tot zeer grote geullengten (de dieptelijnen lopen onder een hoek van circa  $150^\circ$ ).

Van de onder 1 en 2 genoemde mogelijkheden is de verandering van geulrichting verreweg het goedkoopst. De onder 1 genoemde verdieping maakt vrij aanzienlijke hoeveelheden baggerwerk noodzakelijk. De geulverdraaiing leidt, bij gelijkblijvende geuldiepte, weliswaar tot een grotere geullengte, maar heeft tevens tot gevolg dat een groter deel van de oude geul met de nieuwe samenvalt. Om deze reden zullen de baggerkosten niet wezenlijk veranderen. Doordat bij een verdraaide geul de noordelijke havendam minder ingekort behoeft te worden zijn er ten opzichte van de geul lopend onder  $90^\circ$  enige besparingen te verwachten, zie figuur 2.5.





figuur 2.5: Haven van Monrovia, ingetekend zijn de oude (huidige) geul, de 90°geul en de 100°geul.

In geval van Monrovia wordt daarom de geulverdraaiing toegepast om de refractie- diffractie verschijnselen bij de geul te reduceren. Van de mogelijke geulrichtingen (van 90° tot 110°) moet nu in principe iedere richting meegenomen worden in de uit te voeren geul-haven optimalisatie. Uit de optimalisatieberekening volgt dan de optimale geulrichting. Hier wordt echter op voorhand met een geulrichting van 100° verder gewerkt. Tot de keuze voor een geulrichting van 100° is op de volgende gronden besloten:

- Bij een geulorientatie van 100° is er slechts in de richtingsektor  $215^\circ < \varphi < 240^\circ$  sprake van refractie-diffractie verschijnselen. Ook bij de maximale geulverdraaiing (110°) is er in deze richtingsektor sprake van genoemde verschijnselen.
- Een grote geulhoek leidt tot golven in de geul die vrijwel dwars op de schepen invallen. Het maatgevende schip te Monrovia, een 150.000 dwt ertscarrier, heeft zeer hoge responsiewaarden bij dwars inkomende deiningsgolven, zie hoofdstuk 4.3.2.1. Het is dus belangrijk een zo klein mogelijke geulrichting te kiezen.



### 3 Binnenloopmanoeuvre van het maatgevende schip.

#### 3.1 Inleiding.

Smole en van de Vijver [1] verwachten dat het binnenlopen van het maatgevende schip, een 150.000 dwt ertscarrier, zonder bescherming van een verlengde zuidelijke havendam moeilijkheden oplevert. Voornamelijk op grond van deze verwachting is tot havendamverlenging besloten. Onderzocht zal worden in welke mate de binnenloopmanoeuvre van het maatgevende schip in geval van achterwege laten van de geplande verlenging bemoeilijkt wordt.

Het vaargedrag van schepen wordt bij het binnenvaren van een haven door diverse factoren beïnvloed. Zo heeft het schip niet langer een vaarweg van onbeperkte afmetingen tot haar beschikking, maar worden er door de vaargeul, de grootte van het havenbekken en de aanwezigheid van andere schepen scherpe eisen gesteld aan de aan te houden vaarsnelheid, de te volgen koers en dus ook aan de manoeuvreereigenschappen van het schip. Deze eisen zijn voor een deel tegenstrijdig: men wil de vaarsnelheid zo laag mogelijk hebben om tijdig tot stilstand te kunnen komen en tevens wil men zo lang mogelijk over optimale manoeuvreereigenschappen blijven beschikken en dus de vaarsnelheid slechts minimaal terugbrengen. Stroming voor de havenmond, sleepboothulp en het golfklimaat zijn evenzeer meespelende factoren (zie bijlage 3.1 ). Het maatgevende schip bij de binnenloopmanoeuvre te Monrovia is de geballaste 150.000 dwt ertscarrier. De gegevens van het maatgevende schip zijn: scheepslengte 300 m , breedte 44 m , diepgang 11.5 m .

#### 3.1.1 Manoevreereigenschappen van een schip bij lage snelheden.

Hooft [4] heeft onderzoek verricht naar de manoeuvreereigenschappen bij lage snelheden. Uitgangspunt van de studie was de aanname dat een schip varend met een constante snelheid van 7.5 knoop goede manoeuvreereigenschappen heeft.

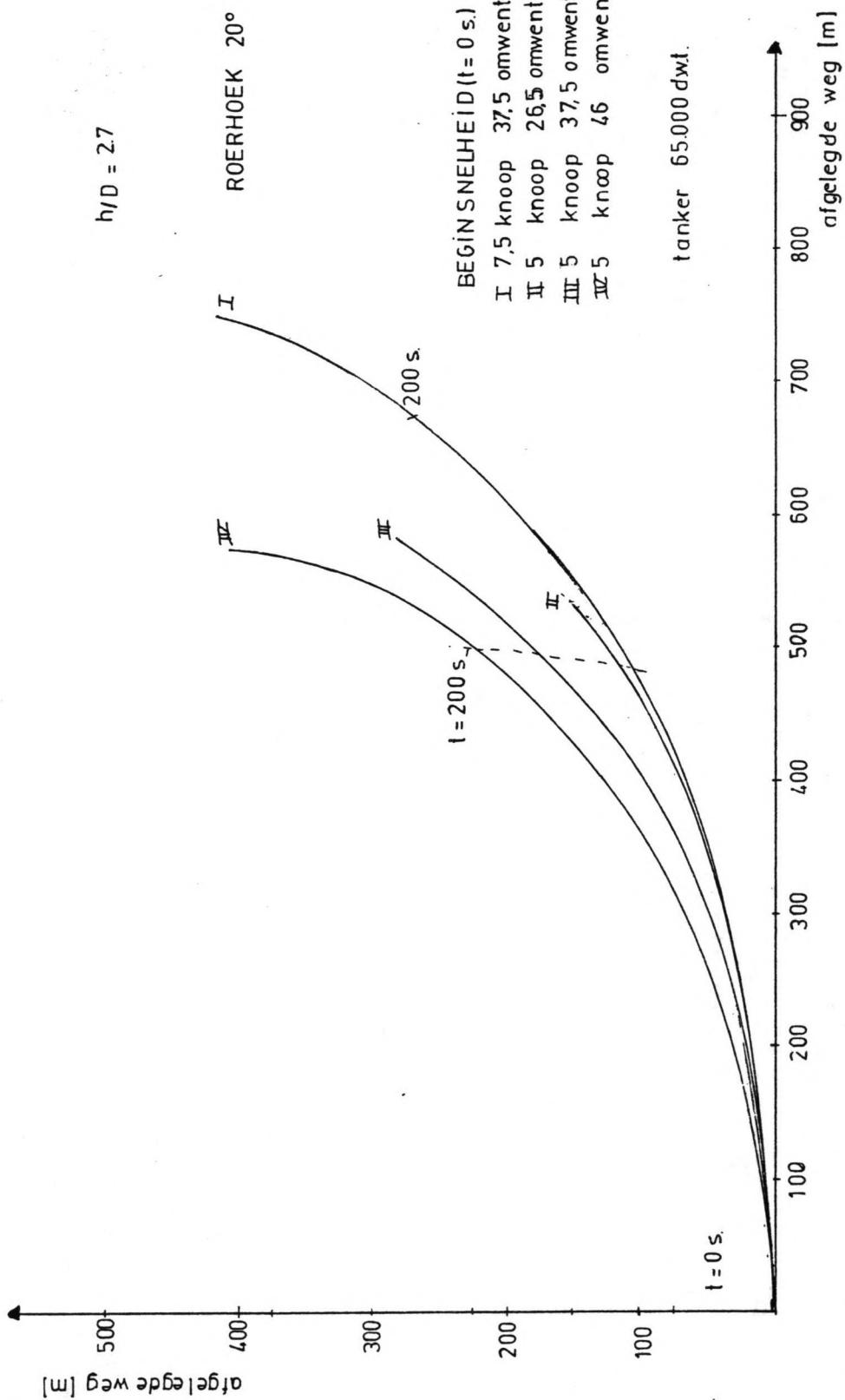
Indien men nu bij een lagere vaarsnelheid dan 7.5 knoop, door het opvoeren van het aantal schroefomwentelingen dezelfde krachten kan uitoefenen als ingeval van vaart bij 7.5 knoop, dan mag verwacht worden dat in dat geval de manoeuvreereigenschappen ook ruim voldoende zijn.

De aan de hand van meetresultaten opgestelde figuur 3.1 laat zien dat dit inderdaad het geval is. De uitgeoefende krachten in geval 1 (vaarsnelheid 7.5 knoop) en geval 4 (vaarsnelheid 5 knoop, aantal schroefomwentelingen opgevoerd tot 46 per minuut) zijn gelijk. In geval 4 is door de kleinere beginsnelheid de in voorwaartse richting afgelegde weg kleiner. Geconcludeerd kan worden dat de stuuereigenschappen in geval 4 zeker niet onderdoen voor die van het schip varende met 7.5 knoop.

Opmerking bij figuur 3.1: Het samenvallen van de lijnen 1 en 2 berust op toeval. Lijn 2 is het geval van een kleine voorwaartse snelheid en een kleine koersverandering per eenheid van tijd (immers het door de op het roer aangrijpende krachten uitgeoefend moment is door de lage snelheid en het lage toerental relatief klein). Voor lijn 1 zijn zowel de voorwaartse snelheid als de koersverandering per eenheid van tijd groter. Verhoging van het aantal schroefomwentelingen heeft als nadeel dat de vaarsnelheid toeneemt. In geval 4 is de vaarsnelheid op het moment  $t=200$  s opgelopen tot circa 6 knoop (beginsnelheid 5 knoop, toerentalverhoging van 26.5 naar 46 omwentelingen per minuut). Door de duur van de verhoging beperkt te houden, het geven van "bursts", zal de snelheid weinig toenemen.

De metingen zijn verricht bij een h/D waarde (waterdiepte - diepgang schip verhouding) van 2.7. Voor Monrovia bedraagt de geuldiepte 22 m en de diepgang van het schip circa 11.5 m, zodat  $h/D = 2$  en er sprake is van een vergelijkbare situatie.

De conclusie luidt, dat er voor een met 5 knoop varende schip ten aanzien van de manoeuvreereigenschappen, zeker in de gunstige binnenloopcondities waarvan te Monrovia sprake is, een geringe dwarsstroom en weinig wind, geen moeilijkheden te verwachten zijn.



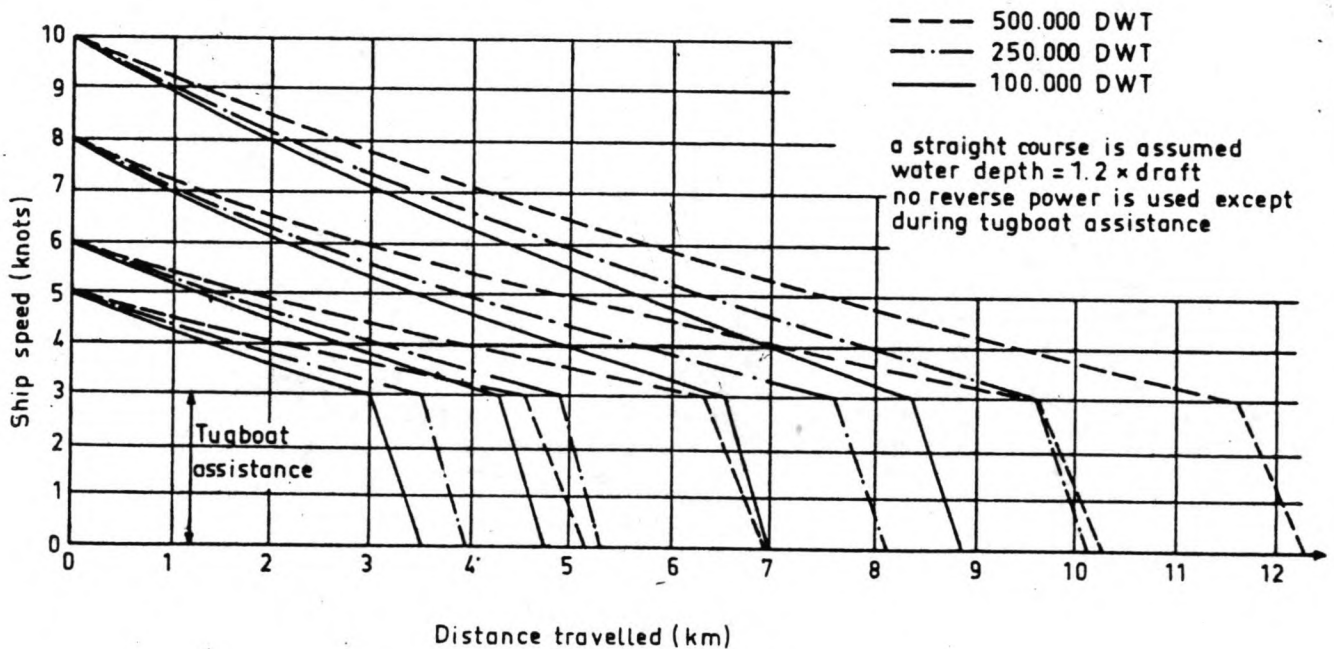
Figuur 31 Stuurvermogen bij lage snelheden, met en zonder toerentalverhoging [4.]

3.1.2 De stopmanoeuvre op ondiep water.

De wijze waarop de stopmanoeuvre op ondiep water wordt uitgevoerd is afhankelijk van de ruimte die beschikbaar is. Indien een haven voldoende uitloopruimte heeft zal daar gebruik van worden gemaakt door het schip zeer geleidelijk tot stilstand te brengen; heeft een haven deze ruimte niet maar wel de mogelijkheid om enige uitwijking dwars op de koers toe te laten, dan zal men in dat geval door vol achteruit te slaan het schip tot stilstand kunnen brengen. (Het door de schroef opgeworpen water oefent op het achterschip een kracht uit welke dit, in geval van een rechtsdraaiende schroef, naar bakboord uit laat draaien.)

Een combinatie van beide methoden kan natuurlijk ook worden toegepast. De stopafstand is tevens afhankelijk van de vaarsnelheid, de grootte en de beladingsgraad van het schip. Onderstaand volgt het bij de drie methoden behorend cijfermateriaal.

A ruimte: uitloopmogelijkheid groot, toegestane zijdelingse uitwijkingen beperkt.



figuur 3.2 : Stopafstanden Europoort. [5]

Op grond van metingen in het Europoortgebied is figuur 3.2 samengesteld. [5] De schepen draaien dead slow tot de snelheid is teruggelopen tot circa 3 knoop. Bij een snelheid van 3 knoop wordt volle kracht achteruit geslagen. De vier aanwezige sleepboten proberen de hierbij optredende koersafwijking te corrigeren.

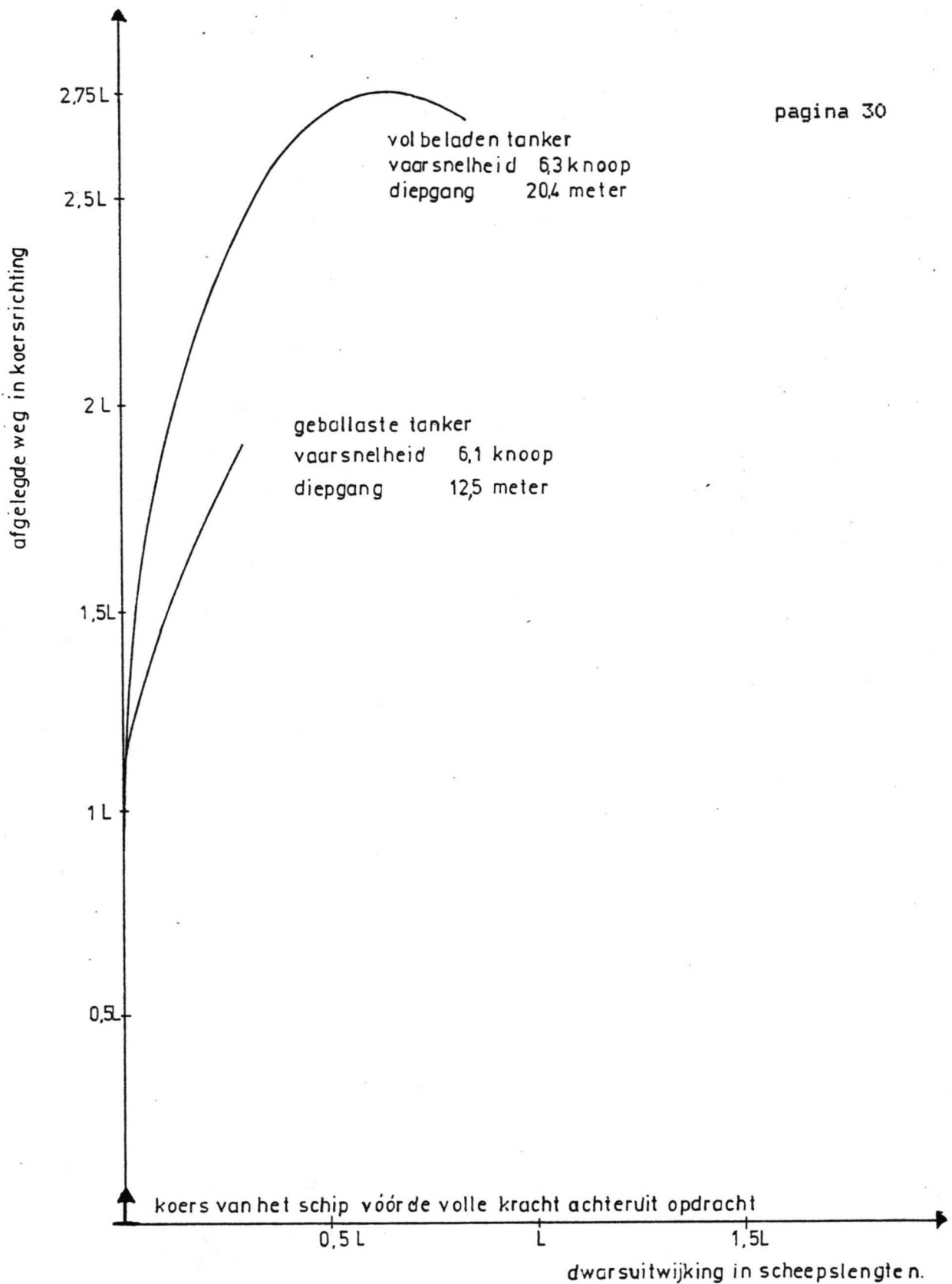
B ruimte: geen beperkingen aan de toelaatbare koersafwijkingen bij de stopactie.

Eryuzlu [6] heeft met behulp van modelonderzoek stopafstanden bepaald voor een 227.000 dwt tanker. Het onderzoek is verricht bij verschillende vaarsnelheden en waterdiepten, ook de invloed van volbeladen en in ballast varen is onderzocht. De schepen worden tot stilstand gebracht door ze volle kracht achteruit te laten slaan. Zie figuur 3.3. De remwegverhouding geballast schip - volbeladen schip is voor de met 6 knoop varende tanker gelijk aan: 2/2.75. Voor de dwarsuitwijking wordt voor het geballaste schip een waarde van 0.3 scheepslengte gevonden, tegen een waarde van 0.9 voor het beladen schip.

Aangenomen mag worden dat een geballaste 150.000 dwt ertstcarrier een vergelijkbaar gedrag vertoont als de geballaste 227.000 dwt tanker. De door Eryuzlu gevonden relaties voor het geballaste schip zullen ook voor de 150.000 dwt ertscarrier aangehouden worden:

stopafstand  $2 l_{pp}$   
 dwarsuitwijking  $0.3 l_{pp}$

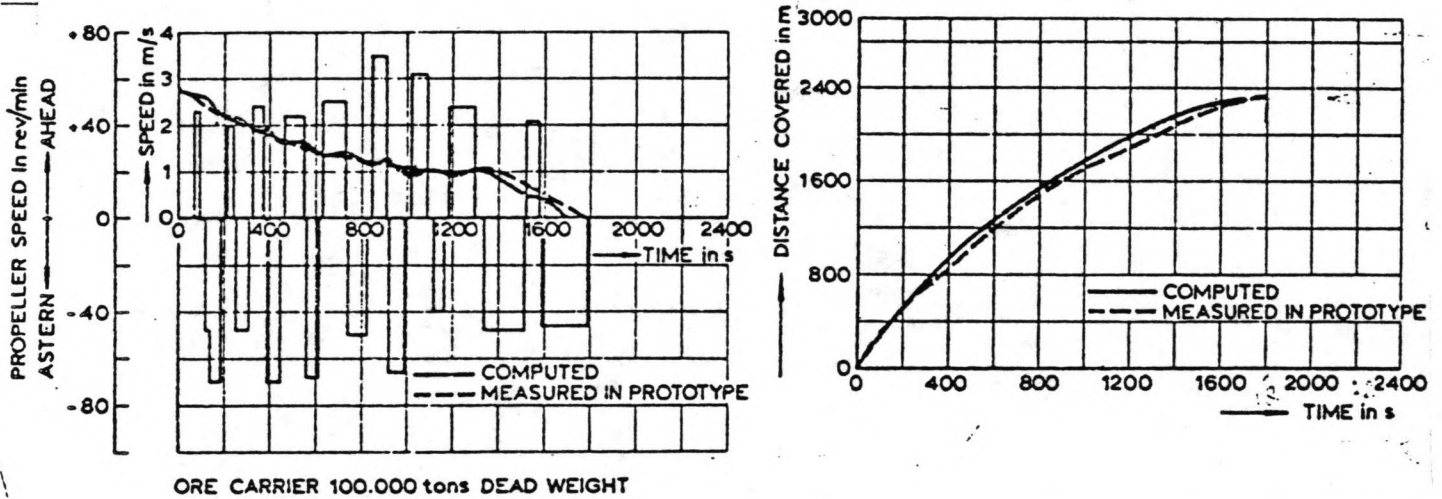
met  $l_{pp}$  is de scheepslengte tussen de loodlijnen.



Figuur 3.3 Stopafstanden, model 227.000 dwt tanker.[6]

C (combinatie A en B): ruimte: uitloopmogelijkheid beperkt, zijdelingse uitloopmogelijkheden beperkt (kleine haven).

Onderstaand is een registratie opgenomen van het binnenlopen van een 100.000 dwt ertscarrier in een kleine haven. Vier sleepboten verlenen hierbij assistentie. Bij het uitlopen moet veelvuldig het toerental en de roerhoek gevarieerd worden om koers te houden.



figuur 3.5 : Stopmanoeuvre 100.000 dwt ertscarrier in een kleine haven. [7]

Voor de drie stopmethoden wordt nu ter illustratie de stopafstand van een geladen 100.000 dwt schip met een vaarsnelheid van 6 knoop bepaald.

methode	afgelegde weg in vaarrichting	dwarsuitwijking
A	4750 m	-
B	2.75 $l_{pp}$ = 800 m	0.9 $l_{pp}$ = 250m
C	2400 m	-

tabel 3.1 : Stopafstanden.

De grote invloed van de gevolgde stopmethode volgt hier duidelijk uit. Voor Monrovia is de geballaste erts-carrier het maatgevende schip. Een schip van dit type zal 160 maal per jaar de haven aandoen. Met het oog hierop is het aanvaardbaar het overige scheepvaartverkeer bij het binnenlopen van dit schip buiten de geul te houden, zodat het schip de gehele toegangseul en het aansluitende deel van het havenbekken kan gebruiken. Te Monrovia is er aan beide zijden van de geul voldoende ruimte om volgens methode B te stoppen. Ervan uitgaand dat het schip met een snelheid van circa 5 knoop binnenkomt (zie hfst. 3.2), wordt met behulp van de relaties van Eryuzlu de stopafstand bepaald:

stopafstand:  $2 l_{pp} = 600$  m  
 dwarsuitwijking:  $0.3 l_{pp} = 100$  m



### 3.2 Sleepboothulp.

Het gebruik van sleepboten is wenselijk bij het binnenlopen van de ertscarrier:

- in geval van storing (motor/ roer ) regulerend optreden.
- schip assisteren bij het dead slow lopen en de stopactie.
- afmeren van de ertscarrier.

Om hun taak te kunnen vervullen moeten de sleepboten in staat zijn vast te maken aan het schip. De gebruikelijke procedure hierbij is: oppikken van de werplijn van het zeeschip door de sleper, waarna de sleepkabel aan de werplijn bevestigd wordt, en vervolgens aan boord van het zeeschip wordt gehesen en wordt vastgemaakt.

Bij een gebruikelijk aantal van vier sleepboten duurt de vastmaakmanoeuvre circa 30 minuten. (Bron: Smit Rotterdam ) Indien dit moet gebeuren bij een  $H_s \geq 1.5$  m, dan levert het oppikken van de werplijn moeilijkheden op; door de grotere overvaringskans van de sleepboten moet men voorzichtiger zijn en de duur van de vastmaakmanoeuvre wordt langer. Deze manoeuvre moet dus eerder ingezet worden. Het gemiddeld aantal keren per jaar dat dit het geval zal zijn, is eenvoudig te berekenen: Bij iedere geulvaart heeft men een constante kans om een golfveld aan te treffen met  $H_{s/g\text{eul}} \geq 1.5$  m (  $H_{s/g\text{eul}}$  is de significante golfhoogte in de geul). Deze kans wordt  $p$  genoemd. Indien het gemiddeld aantal geulvaarten per jaar  $N$  bedraagt, is het gemiddeld aantal geulvaarten per jaar dat onder golfcondities met  $H_{s/g\text{eul}} \geq 1.5$  m wordt uitgevoerd gegeven door:

$$u = p * N \quad (3.1)$$

De gegevens voor Monrovia zijn:

aantal geulvaarten per jaar: 160

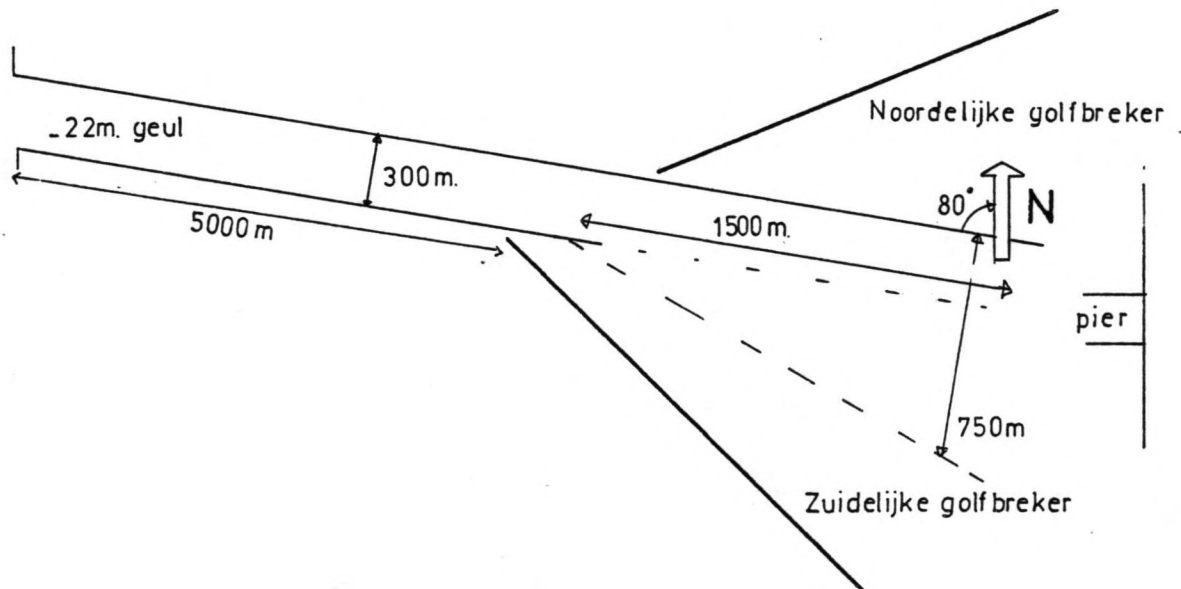
kans op  $H_{\text{geul}} \geq 1.5 \text{ m}$  per vaart:  $722 \cdot 10^{-4}$

zodat  $u = 160 \cdot 722 \cdot 10^{-4} = 11.5$

Gemiddeld 11.5 maal per jaar kan de sleepboothulp bemoeilijkt worden. Dit aantal is zo gering dat men kan overwegen in die gevallen geen sleepboothulp te verlenen. De schepen kunnen dan op de rede op rustiger vaarwater wachten.

### 3.3 Overzicht van de binnenloopmanoeuvre te Monrovia.

De beschikbare ruimte te Monrovia bestaat uit een uitlooptenue binnengaats van 1500 m en een breed havenbekken.



figuur 3.6 : Schematisatie van de haven van Monrovia.

Indien het maatgevende schip bij de kop van de zuidelijke havendam een snelheid van 5 knoop heeft, beschikt het over voldoende manoeuvreereigenschappen om de havenmond veilig te passeren (zie hfst. 3.2.1). De stopafstand bedraagt in dat geval 600 m met een dwarsuitwijking van 100 m (zie hfst. 3.2.2). Gezien de afmetingen van het havenbekken levert dit geen problemen op. Een snelheid van 5 knoop bij de kop van de zuidelijke havendam laat een maximale snelheid van 8 knoop toe bij het binnenlopen van de geul, aangenomen dat de schepen in de geul dead slow draaien.

Bij een vastmaaktijd van 30 min. en een vaarsnelheid in de geul van circa 5 knoop, moeten de sleepboten circa  $2.5 * 30 * 60 = 4500$  m buitengaats met het vastmaken beginnen. De sleepboothulp zal zich, mede gezien de kleine stroming voor de havenmond (max. 0.4 m/s), in het algemeen beperken tot hulp bij het afmeren of ingrijpen bij een eventuele motorstoring.

Conclusie: De lay-out van de haven van Monrovia zoals geschetst in figuur 3.6 geeft geen problemen ten aanzien van de ontvangst van de geballaste 150.000 dwt ertscarrier.

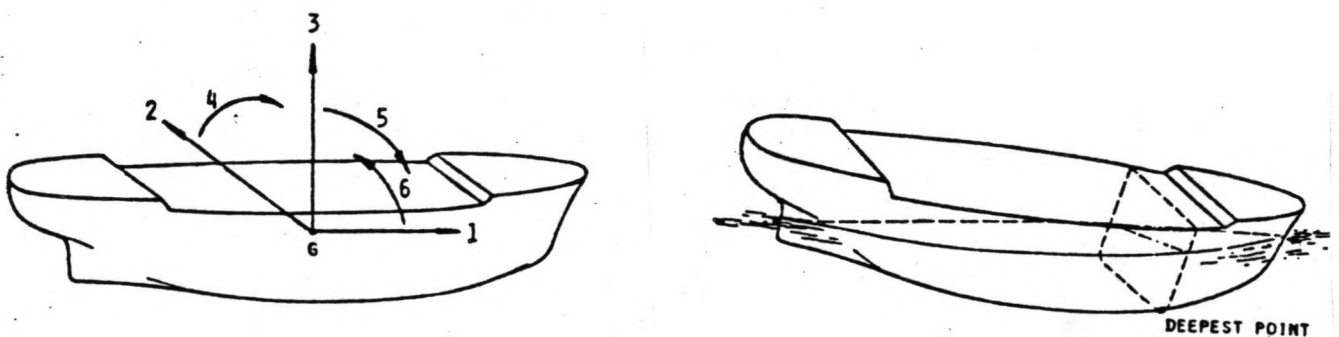
Teneinde de bij bovenstaande lay-out benodigde geuldiepte te kunnen bepalen zullen in hoofdstuk 4 de verticale scheepsbewegingen onderzocht worden.

4 Verticale scheepsbewegingen.

4.1 Inleiding.

Bij de bepaling van de geuldiepte zijn de verticale uitwijkingen van het maatgevende schip uiteraard zeer belangrijk. Een schip heeft zes vrijheidsgraden. De te onderscheiden bewegingen zijn: (zie figuur 4.1 )

1. Translatie in de x richting: schrikken X.
2. Translatie in de y richting: verzetten Y.
3. Translatie in de z richting: dompen Z.
4. Rotatie om de x as: rollen  $\phi$ .
5. Rotatie om de y as: stampen  $\theta$ .
6. Rotatie om de z as: gieren  $\chi$



figuur 4.1: Scheepsbewegingen.

De bewegingen rollen, dompen en stampen zijn van invloed op de verticale verplaatsingen van het schip.

De grootte van deze verplaatsingen is onder meer afhankelijk van de vorm en grootte van het schip. Verder is het aanwezige golfveld zeer van belang; golfperiode en hoek van inval zijn van grote invloed op de waarde van de responsiefactor. (zie 4.3.2) Ook de invloed van de waterdiepte moet genoemd worden. Een schip dat vaart van diep naar ondieper water ondervindt wijzigingen in het scheepsgedrag. Onder invloed van de afnemende waterdiepte veranderen namelijk zowel de hydrodynamische coëfficiënten (zie 4.3.1. ) als het golfbeeld (golfhoogte en richting). Tevens is er sprake van een toename van de inzinking ten opzichte van het in dieper water varende schip.

Bij de bepaling van de verticale verplaatsingen wordt onderscheid gemaakt tussen de verplaatsingen ten gevolge van de vaarsnelheid van het schip, de inzinking (hoofdstuk 4.2 ), en die ten gevolge van de golven (hoofdstuk 4.3 ).

#### 4.2 Inzinking.

Een varende schip verdringt bij de boeg een hoeveelheid water en een gelijke hoeveelheid water moet achter het schip aangevuld worden. De aldus opgewekte retourstroom rond het schip leidt tot een waterspiegeldaling (wet van Bernouilli ). Het schip volgt deze verlaging, ook wel gemiddelde inzinking genaamd. De waterspiegelverlaging rond de scheepsromp neemt toe naarmate het schip een hogere vaarsnelheid heeft, als bovendien de waterdiepte afneemt wordt het effect nog versterkt.

Snelheidsverschillen in de retourstroom in de langsrichting van het schip leiden tevens tot een verandering in de trim van het schip. Onder trim verstaat men een hoekverdraaiing om een dwarsscheepse as. In het algemeen trimt een schip als gevolg van de door de schroefwerking veroorzaakte sterke aanzuiging naar achteren. Zeer grote schepen, met een grote blokcoëfficiënt ( $C_b=0.85$  ), trimmen, vanwege retourstroomconcentraties bij de boeg, voorover.

Tuck [8] heeft voor het geval van een onbegrensde waterweg, de gemiddelde inzinking en trim van varende schepen bestudeerd en heeft de volgende relaties afgeleid :

$$\text{gem. inzinking: } z_{gem} = \frac{Fr^2 * c_z * \nabla}{(1-Fr^2)^{1/2} * l_{pp}^2} \quad (4.1)$$

met

- Fr = Froudegetal
- =  $u/(g*h)^{1/2}$
- u = sloopssnelheid [m/s]
- h = waterdiepte [m]
- $\nabla$  = waterverplaatsing [m<sup>3</sup>]
- c<sub>z</sub> = vormfactor sloopssromp, waarde varieert van 1.4 tot 1.53
- l<sub>pp</sub> = sloopslengte tussen de loodlijnen [m]

$$\text{gem. trim: } \theta_{gem} = \frac{Fr^2 * c_{\theta} * \nabla}{(1-Fr^2)^{1/2} * l_{pp}^3} \quad (4.2)$$

met c<sub>θ</sub> = vormfactor

Voor de vormfactoren worden de door Hooft [9] aanbevolen waarden gebruikt,  $c_z = 1.5$  en  $c_e = 1$ . Indien de waterwegafmetingen niet onbegrensd zijn zullen de gemiddelde inzinking en de trim toenemen. Door de beperkte ruimte veroorzaakt de waterverplaatsing van het schip namelijk grotere stoomsnelheden. Een vergelijkbaar effect treedt op als het schip niet in het midden van de geul vaart.

De met behulp van formule (4.1) en (4.2) bepaalde inzinking moet in dat geval met een tweetal correctiefactoren vermenigvuldigd worden. [10] Voor een onbegrensd vaarweg geldt:

$$\text{inzinking} = z_{gem} + \theta_{gem} * l_{pp} / 2 \quad (4.3)$$

$$= \frac{Fr^2 * (2 * c_z * \nabla + c_e * \nabla)}{2 * (1 - Fr^2)^{1/2} * l_{pp}^2}$$

Data Monrovia : 150.000 dwt ertscarrier  
 $\nabla = 185.000 \text{ m}^3$   
 $l_{pp} = 300 \text{ m}$

De vaarsnelheid bij het verlaten de haven bedraagt 7 knoop, zodat de inzinking 0.24 m bedraagt.

Deze waarde moet nog gecorrigeerd worden omdat de vaarwegafmetingen niet onbegrensd zijn. De correctie die de positie van het schip ten opzichte van de geulas verdiscon- teerd, kan in geval van een open geul type, hiervan is te Monrovia sprake, achterwege blijven. Alleen bij zeer begrensd vaarwater zoals in geval van een kanaal wordt deze correctie toegepast.

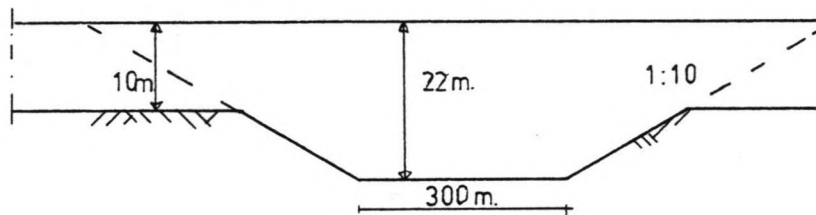
-correctiefactor geulvormgeving,  $K_e$

$K_e$  is een functie van de parameter  $S$ .

$$S = A_x / A_{ch} \quad (4.4)$$

met  $A_x$  = oppervlakte grootspant onder de waterspiegel  
 $= 0.98 * B * D$

en  $A_{ch}$  = oppervlakte dwarsdoorsnede van de geul  
 (taludhelling verlengd tot aan de waterspiegel )



geulafmetingen te Monrovia.

zodat  $A_{ch} = 22 * (300 + 740) / 2 = 11440 \text{ m}^2$

voor een beladen 150.000 dwt ertscarrier is  $A_x$  :

$$A_x = 0.98 * 44 * 16.5 = 712 \text{ m}^2$$

dus  $S = 0.062$

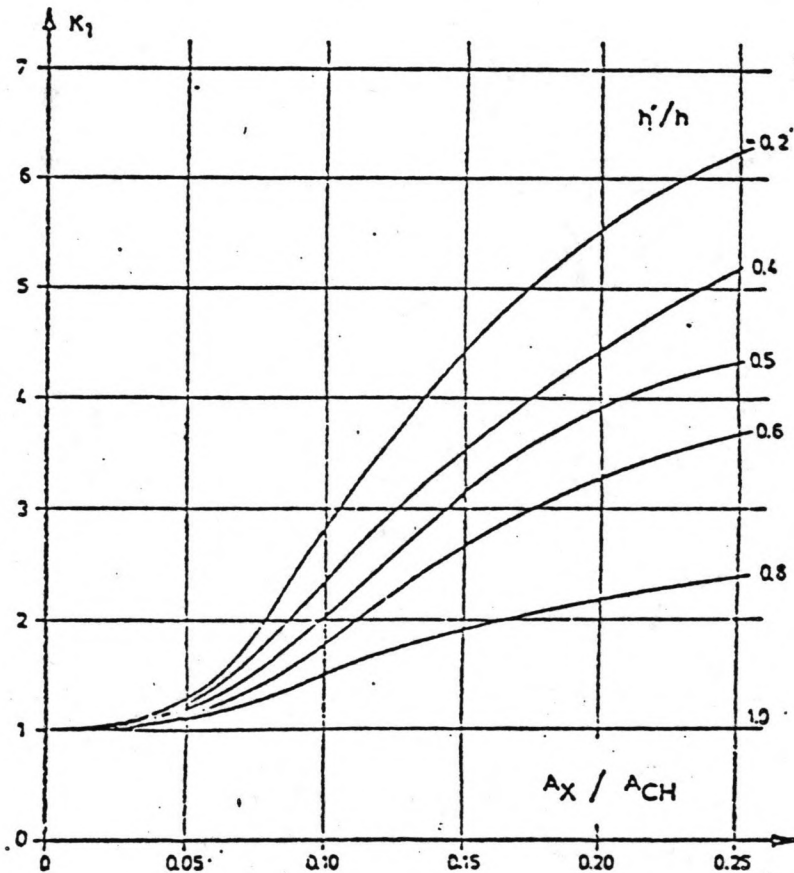
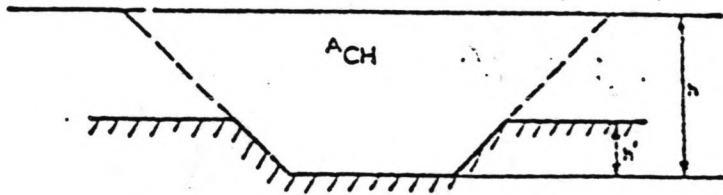
$K_e$  is nu te bepalen volgens :

$$S \leq 0.03 \text{ dan } K_e = 1$$

$$0.03 < S < 0.15 \text{ dan } K_e = 7.45 * S / K_1 + 0.76$$

hierin is  $K_1$  een factor voor de diepteverhouding  
 geul / omliggende zeebodem. zie figuur 4.2





figuur 4.2: Inzinking, correctiefactor  $K_1$ .

Met de in deze figuur gevonden waarde van  $K_1 = 1.12$ , is  $K_2$  bepaald.

$$K_2 = 7.45 * 0.062 / 1.12 + 0.76 = 1.17$$

Zodat de gecorrigeerde inzinking gelijk is aan:

$$Z = 1.17 * 0.24 = 0.30 \text{ m}$$

### 4.3 Verticale scheepsbewegingen o.i.v. golven.

#### 4.3.1 Algemeen.

#### 4.3.2 .1 Bewegingsvergelijkingen.

Bij de beschrijving van de scheepsbeweging is het uitgangspunt dat de door de golven opgewekte beweging lineair is met de golfbeweging. Deze aanname is in geval van relatief kleine bewegingen correct [9].

Tevens wordt gebruik gemaakt van de langsscheepse symmetrie van het schip; de bewegingen in dit vlak zijn onafhankelijk van de krachten die hier loodrecht opwerken. De domp en stamp beweging is dus onafhankelijk van de combinatie rol en verzet. De invloed van de gier en schrik beweging mag bij de verticale scheepsbeweging verwaarloosd worden.

Er resteren dan twee stel bewegingsvergelijkingen voor een schip in golven [9]:

domp en stamp beweging:

$$(m+a_{zz})\ddot{z}+b_{zz}\dot{z}+c_{zz}z+a_{ze}\ddot{\theta}+b_{ze}\dot{\theta}+c_{ze}\theta = Z(t) \quad (4.5)$$

$$a_{ez}\ddot{z}+b_{ez}\dot{z}+c_{ez}z+(I_{yy}+a_{ee})\ddot{\theta}+b_{ee}\dot{\theta}+c_{ee}\theta = M(t) \quad (4.6)$$

met  $m$  = massa van het schip

$I_{yy}$  = massatraagheidsmoment om de Y-as.

$\dot{x}$  = de afgeleide van  $x$  naar de tijd.

$a_{ij}$ ,  $b_{ij}$  en  $c_{ij}$  zijn hydrodynamische coëfficiënten.

$a_{ij}$  is de toegevoegde massa van het schip in de  $i$  richting, ten gevolge van een beweging in de  $j$  richting.

$b_{ij}$  is de dempingscoëfficiënt in  $i$  richting ten gevolge van een beweging in de  $j$  richting.

$c_{ij}$  is de veercoëfficiënt.

$z(t)$  is de door golven uitgeoefende kracht.

$M(t)$  is het door de golven uitgeoefende stampmoment.

Rol en verzet beweging:

$$(m+a_{yy})\ddot{y}+b_{yy}\dot{y}+c_{yy}y+a_{y\phi}\ddot{\phi}+b_{y\phi}\dot{\phi}+c_{y\phi}\phi = Y(t) \quad (4.7)$$

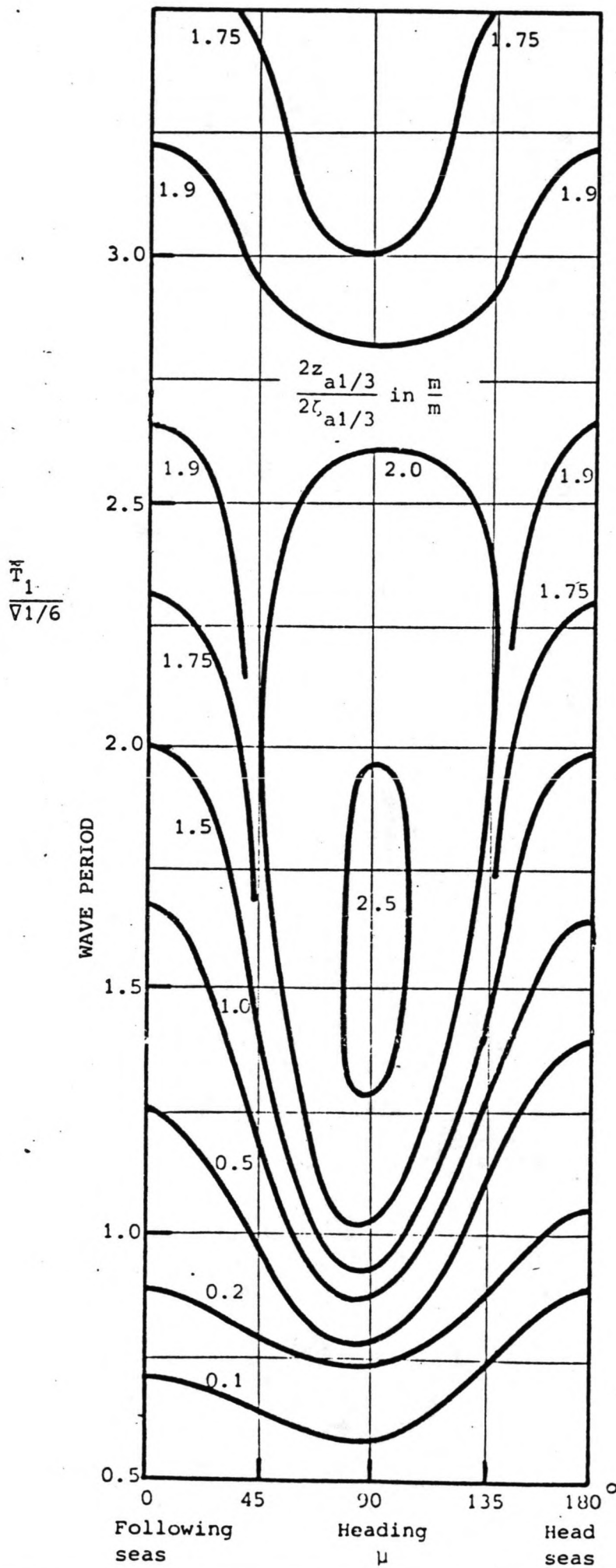
$$a_{\phi y}\ddot{y}+b_{\phi y}\dot{y}+c_{\phi y}y+(I_{xx}+a_{\phi\phi})\ddot{\phi}+b_{\phi\phi}\dot{\phi}+c_{\phi\phi}\phi = K(t) \quad (4.8)$$

met  $I_{xx}$  is het massatraagheidsmoment om de x-as.

$Y(t)$  is de door de golven uitgeoefende dwarskracht.

$K(t)$  is het door de golven uitgeoefende rolmoment.

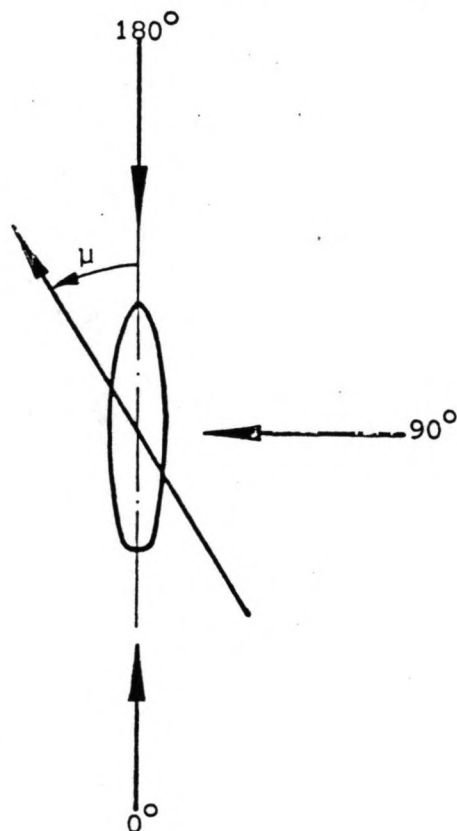
De hydrodynamische coëfficiënten  $a_{ij}$ ,  $b_{ij}$  en  $c_{ij}$  en de golfkrachten zijn afhankelijk van de scheepsvorm, scheepssnelheid en water diepte. In het algemeen worden deze factoren met de strip theorie bepaald. Dit is een twee dimensionale benadering. Tot een h/D verhouding van circa 1.5 geeft deze benadering zeer bevredigende resultaten. Bij een kleinere h/D verhouding kunnen de driedimensionale effecten niet langer verwaarloosd worden. De hieruit voortvloeiende rekenprogramma's zijn zeer omvangrijk en worden pas recent toegepast. Als gevolg hiervan zijn van ondiep water omstandigheden slechts weinig gegevens voorhanden. Voor de bepaling van de scheepsbeweging ten gevolge van de golven is dan ook dankbaar gebruik gemaakt van een door het Marin (voormalig N.S.P.) beschikbaar gestelde figuur. (zie figuur 4.3) De figuur geeft de verhouding tussen de grootste significante verticale scheepsbeweging en de invallende significante golfhoogte. De figuur is van toepassing op stilliggende bulkschepen.



Waves: PM Spectra of unit height  
 Water depth: 1.175 \* Draft  
 $\bar{T}$  : Average wave period [s]  
 $\nabla$  : Displacement [m<sup>3</sup>]  
 $\mu$  : Heading [deg.]

Stationary ship

Vertical motions  
 $2z_{a1/3}$  per meter wave height  
 $2\zeta_{a1/3}$



Figuur 4.3

#### 4.3.1 .2 Relatie golfspectrum en spectrum van de verticale scheepsbeweging.

Figuur 4.3 geeft de zogenaamde responsiefunctie van de verticale scheepsbeweging. Met behulp van de responsiefunctie kan uit het golfspectrum het energiedichtheidsspectrum van de verticale scheepsbeweging, kortweg bewegingsspectrum genoemd, bepaald worden.

Uitgangspunt hierbij is, evenals in hoofdstuk 4.3.1, dat de door de golven opgewekte scheepsbeweging lineair is met de golfbeweging. Omdat bovendien tijdens de geulvaart de golfcondities constant blijven, is hier het systeem golven - scheepsbeweging als een lineair tijdsonafhankelijk systeem te beschouwen. Een belangrijke eigenschap van een dergelijk systeem is dat het superpositie beginsel toegepast kan worden: de responsie op de som van een aantal ingangssignalen is gelijk aan de som van de responsies op die signalen afzonderlijk. Tevens geldt dat de responsie op een sinusvormig ingangssignaal ook sinusvormig is en wel met dezelfde frequentie.

De golfbeweging in een punt laat zich beschrijven volgens:

$$\eta(t) = \sum a_i * \cos(\omega_i * t - \alpha_i) \quad (2.1)$$

De scheepsbeweging in dit punt ten gevolge van die golfbeweging is dan te beschrijven met:

$$I(t) = \sum b_i * \cos(\omega_i * t - \beta_i) \quad (4.9)$$

met  $I$  is de verticale uitwijking van het schip.

$b_i$  is de amplitude van de scheepsbeweging.

$\beta_i$  is de fasehoek.

De verhouding tussen  $b_i$  en  $a_i$  noemt men de versterking van het systeem, hier  $R$  genoemd,  $R_i = b_i/a_i$ .  $R$  is voor een gegeven systeem slechts een functie van de frequentie,  $R(\omega)$ .

De responsie van het schip op de golfbeweging wordt dus gegeven door:

$$\sum b_i * \cos(\omega_i t - \beta_i) = \sum R(\omega_i) * a_i * \cos(\omega_i t - \alpha_i) \quad (4.10)$$

Het verband tussen golfspectrum en bewegingsspectrum van het schip is dan (zie hoofdstuk 2.1):

$$S_{\eta\eta}(\omega) * R(\omega)^2 = S_{xx}(\omega) \quad (4.11)$$

immers de spectrale dichtheid is evenredig met het kwadraat van de amplituden van de spectrale componenten.

opmerking: Bovenstaande relatie's zijn van toepassing in geval van een stilliggend schip. De relatie's die gelden voor een varend schip worden in hoofdstuk 4.3.3 gegeven.

#### 4.3.2 Responsiefunctie

##### 4.3.2 .1 Responsiefunctie verticale scheepsbeweging o.i.v. golven.

Zoals in hoofdstuk 4.3.1 opgemerkt is wordt gebruik gemaakt van de door het Marin opgestelde figuur 4.3 . De figuur is bepaald voor een h/D verhouding van 1.175 . Het gebruikte golfspectrum is het Pierson-Moskowitz spectrum. De grootste verticale verplaatsingen van het schip worden gegeven; deze zijn combinatie's van de domp, stamp en rolbeweging van het schip. (zie figuur 4.1)

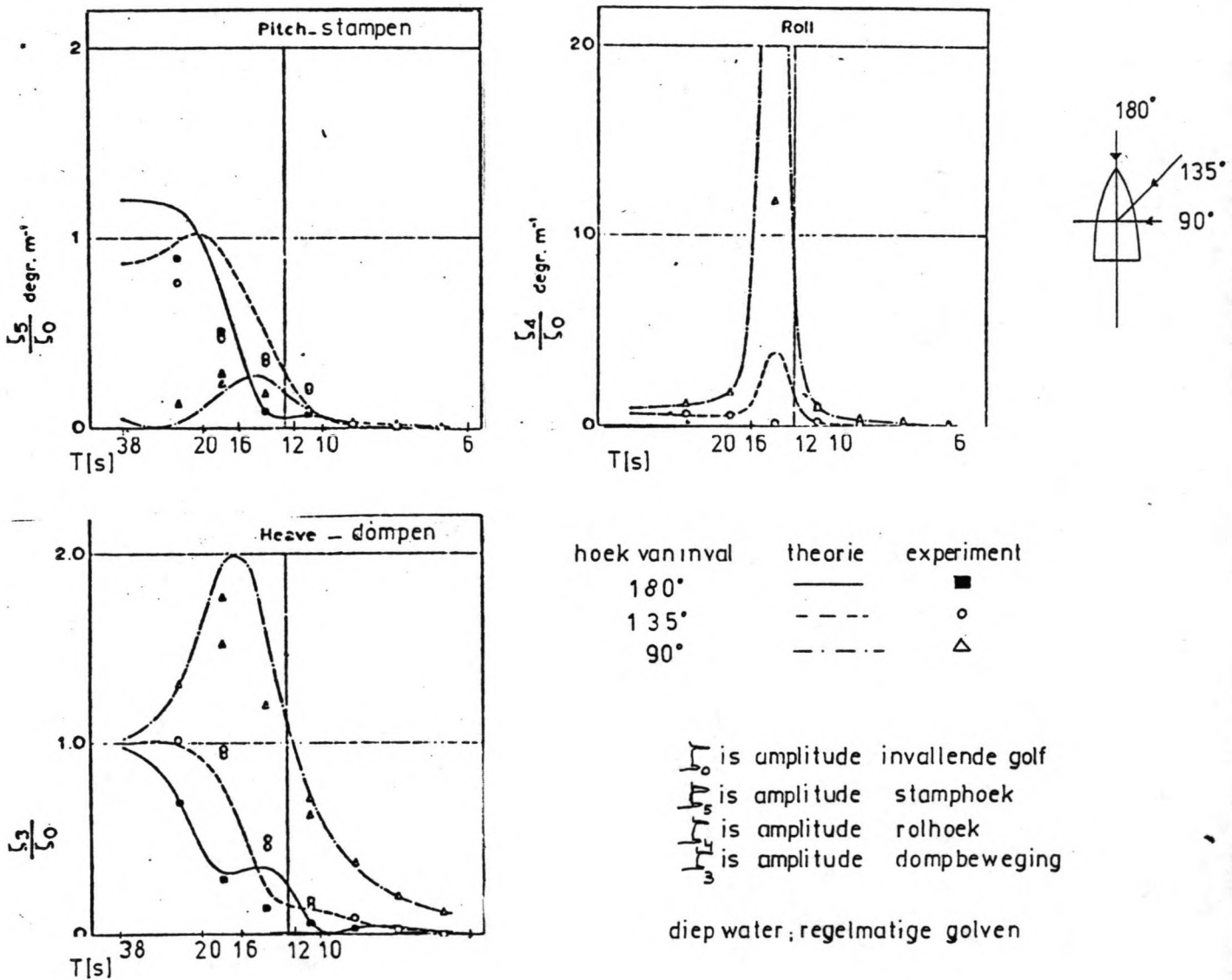
De extreme verplaatsingen zullen in geval van de combinatie dompen en stampen plaatsvinden bij de loodlijn van de boeg van het schip. Bij dwarsinkomende golven kan ook de rolbeweging een belangrijke bijdrage aan de verplaatsingen leveren en zullen de grootste verplaatsingen bij de voorschouders plaatsvinden.

Figuur 4.3 is voor bulkcarriers van verschillende grootte te gebruiken. Dit blijkt ook uit de verticale as waar  $\bar{T}/\sqrt{\lambda}$  is uitgezet,  $\bar{T}$  is de gemiddelde golfperiode en  $\sqrt{\lambda}$  is gelijk aan de waterverplaatsing van het schip. De horizontale as geeft de invalshoek van de golven op het schip.

In de figuur 4.3 worden lijnen gegeven waarlangs de scheepsresponsie een konstante waarde heeft. Deze "hoogtelijnen" geven een duidelijk beeld van het verloop van de extreme verplaatsingen. Het verloop van de grootste verticale verplaatsingen kan verklaard worden door de afzonderlijke scheeps-

bewegingen rollen, dompen en stampen nader te beschouwen.

In figuur 4.4 wordt van deze scheepsbewegingen voor 3 hoeken van inval het verloop van de responsfactor als functie van de golfperiode gegeven.



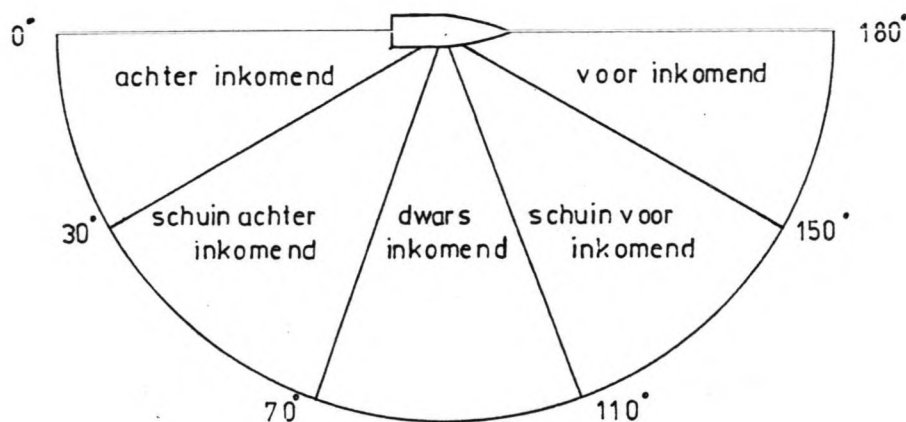
figuur 4.4 rol-, stamp- en dombewegingsrespons van een 65.000 dwt tanker.



Deze responsiefactoren zijn bepaald met behulp van modelproeven met een stilliggende tanker van 65.000 dwt. Een dergelijke tanker en bulkarrier zijn identiek van vorm. De blokcoefficient,  $c_b$ , heeft voor beide type schepen een waarde van circa 0.8. Het verloop van de scheepsresponsie van beide scheepstypen is overeenkomstig.

De Marin-figuur geeft bij waarden van  $T/(\nabla)^{1/3}$  van circa 2.25 tot 0.75, en bij schuin voor respectievelijk schuin achter inkomende golven (zie figuur 4.5), een sterk verloop van de responsiewaarden te zien. Ten opzichte van voor respectievelijk achter inkomende golven neemt de responsiewaarde toe.

In figuur 4.4 is bovenstaand verloop terug te vinden. De bovengenoemde waarden van  $T/\nabla^{1/3}$  komen overeen met golfperioden van circa 16 tot 6 seconden. Zowel de stamp als de domprespons zijn bij deze golfperioden voor een hoek van inval van  $135^\circ$  (de streepjeslijn) groter dan voor een hoek van inval van  $180^\circ$  (de getrokken lijn). Daarnaast is er bij een hoek van inval van  $135^\circ$  een bijdrage van de rolbeweging aan de totale verticale beweging.



figuur 4.5: Benaming van de invallende golven.



De Marin-figuur laat daarnaast, bij dwarsinkomende golven en een golfperiode rond die van de eigenfrequentie van de rolbeweging (voor een ertscarrier van 150.000 dwt is  $T_{ro1}=13$  s. , [11].), een maximum zien met een responsiefactor van 2.5 . Met behulp van figuur 4.4 is te zien dat deze waarde hoofdzakelijk wordt bepaald door de bijdragen van de domp en rolbeweging.

De randvoorwaarden waarvoor de Marin-figuur is opgesteld komen niet geheel overeen met die welke te Monrovia van kracht zijn, zodat deze figuur niet zonder meer toegepast kan worden.

De afwijkingen betreffen:

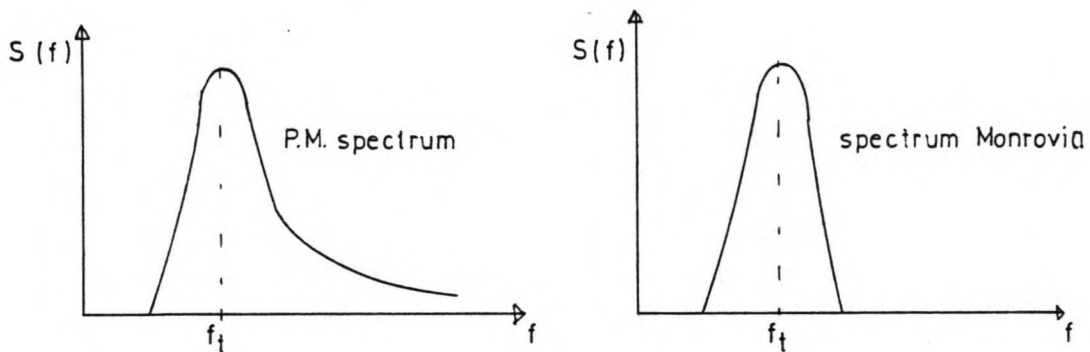
a Het golfspectrum ;het Marin gebruikt een Pierson-Moskowitz spectrum en te Monrovia is er een smal deiningsspectrum.

b De scheepssnelheid ;de Marin-figuur is opgesteld voor een stilliggend schip. Te Monrovia bedraagt de vaarsnelheid bij het verlaten van de haven circa 7 knoop.

Onderzocht zal worden in welke mate de onder a en b genoemde factoren de verticale scheepsbeweging beïnvloeden en wat hiervan de consequenties zijn ten aanzien van de bruikbaarheid van de Marin-figuur.

#### 4.3.2 .2 De invloed van het golfspectrum op de responsiefunctie.

Het Pierson-Moskowitz spectrum is een spectrum voor volgroeide zeevang en dientengevolge een vrij breed spectrum. Het golfspectrum te Monrovia is een smal deiningsspectrum.



Theorie en metingen aan scheepsmodellen laten zien dat de rolrespons rond de eigenfrequentie, voor dwarsinkomende regelmatige golven, een smalle piek heeft. (zie figuur 4.4) Er is rond de eigenfrequentie sprake van opslinging. In geval van een smal spectrum als in Monrovia is er bijna sprake van regelmatige golven. Ook hier is dus, in bovenstaand geval, gezien de waarden van de optredende golfperiodes, opslinging te verwachten.

Bij een breed spectrum is de opslinging door de meerdere frequenties geringer. (Dit bij gelijke golfenergie). De Marin-figuur, berekend met het brede P.M.spectrum, zal daarom voor de situatie te Monrovia, in geval van dwarsinkomende golven met een periode rond de eigenfrequentie van de rolbeweging van het schip, te lage waarden geven voor de scheepsresponsie.

In dit opslingeringsgebied moet gebruik worden gemaakt van responsiewaarden welke verkregen zijn door modelproeven met regelmatige golven. De Graauw [11] heeft dergelijke metingen uitgevoerd. Het gebruikte scheepsmodel bij deze metingen was, evenals het maatgevende schip in dit rapport, een ertscarrier van 150.000 dwt. De waterdiepte bij de modelproeven bedroeg 1.2 maal de diepgang van het schip. Er is sprake van een stilliggend schip.

De meetresultaten zijn gegeven in bijlage 4.1 . Op de verticale as is het quotient van de amplitude van de scheepsbeweging en de golfamplitude uitgezet, op de horizontale as de dimensieloze coëfficiënt  $\omega \sqrt{L/g}$ , de hiermee corresponderende golfperiode is op de onderliggende as aangegeven.

De figuur laat bij dwarsinkomende golven een smalle piek zien in de scheepsrespons. De Graauw vindt een maximale responsiewaarde van 3.1. In de Marin-figuur wordt een waarde gevonden van 2.5. De door De Graauw gevonden waarde zal worden aangehouden.

Bij andere hoeken van inval is de invloed van de rolbeweging op de extreme scheepsbeweging veel minder uitgesproken. De grootste verticale beweging wordt dan gedomineerd door de bijdragen van de domp en stampbeweging. Deze bewegingen zijn in veel mindere mate gevoelig voor de spectrumvorm (de responsfuncties verlopen geleidelijk zie figuur 4.4). De invloed van de spectrumvorm kan bij deze hoeken van inval verwaarloosd worden.

Resumerend: Bij dwarsinkomende golven, met een periode rond de eigenperiode van de rolbeweging van het schip, wordt in plaats van de in de Marin-figuur gegeven waarde van 2.5, de waarde 3.1 gebruikt. Overigens is de Marin-figuur ongewijzigd te gebruiken.

#### 4.3.2 .3 De invloed van de vaarsnelheid op de responsiefuntie.

Ten opzichte van een stilliggend schip veranderen er voor een varend schip een aantal zaken:

- er wordt niet meer met de golffrequentie gerekend, maar met de ontmoetingsfrequentie. (verdiscontering van de vaarsnelheid zie hoofdstuk 4.3.3 )
- de coëfficiënten van de bewegingsvergelijkingen worden door de vaarsnelheid beïnvloed.

De laatstgenoemde invloed zal onderzocht worden.

- vaarsnelheid en rolbeweging.

De rolbeweging in golven laat zich door de volgende vergelijking beschrijven (zie ook (4.8) ) :

$$(I_{xx} + a\phi\phi) \ddot{\phi} + b\phi\phi \dot{\phi} + c\phi\phi \phi = K(t) \quad (4.12)$$

met  $I_{xx}$  is massatraagheidsmoment om de x-as.  
 $a\phi\phi$  is de toegevoegde massa van het schip t.g.v. de rolbeweging.  
 $b\phi\phi$  is de dempingscoefficient. [Nms/rad.]  
 $c\phi\phi$  is de veercoefficient.  
 $\phi$  is de rolhoek.  
 $\dot{\phi}$  is de afgeleide van  $\phi$  naar de tijd.  
 $K(t)$  is het door de golven uitgeoefend rolmoment.

(zie figuur 4.1)

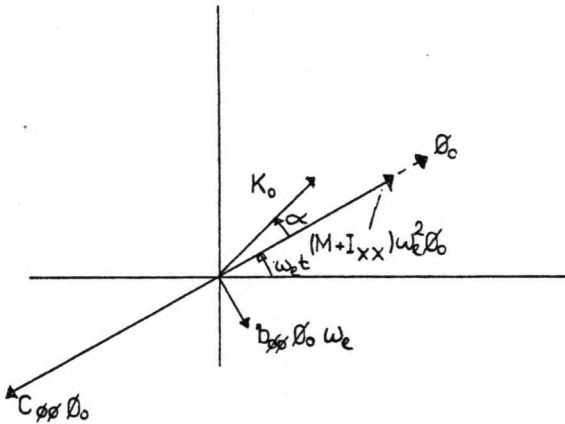
Bij golfperioden in de buurt van de eigenperiode van het schip worden de bewegingen alleen door de door de golven uitgeoefende krachten en door de relatief kleine dempingskrachten bepaald. Dit is in te zien door de termen van vergelijking (4.12) voor de particuliere oplossing uit te schrijven. [16]

particuliere oplossing  $\phi = \phi_0 \sin(\omega_e t - \alpha)$

De termen van vergelijking (4.12) zijn gelijk aan:

$K(t)$	$K_0 \sin(\omega_e t)$
traagheidskracht	$(M + I_{xx}) \omega_e^2 \phi_0 \sin(\omega_e t - \alpha)$
dempingskracht	$b\phi\phi \omega_e \phi_0 \sin(\omega_e t - \alpha + \pi/2)$
veerkracht	$c\phi\phi \phi_0 \sin(\omega_e t - \alpha)$

De krachten worden nu weergegeven als vector, zie de figuur:



$\alpha$  = fasehoek tussen door golven uitgeoefend rolmoment en de rolbeweging.

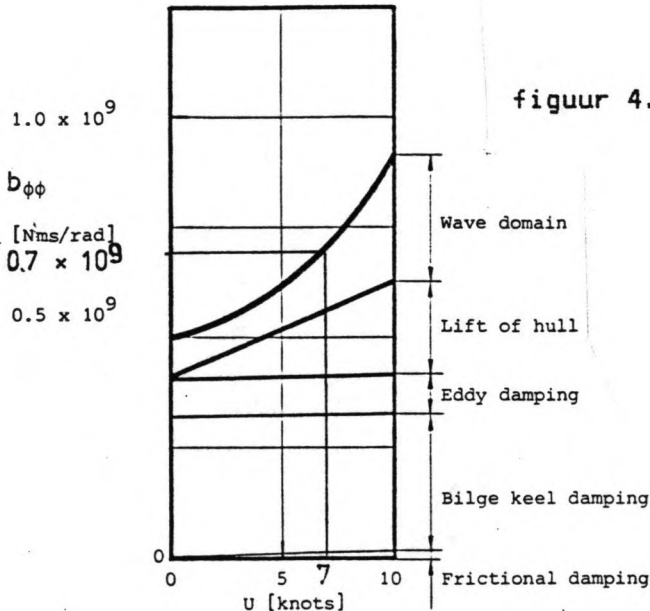
$\omega_e$  = de ontmoetingshoekfrequentie van de golven.

Resonantie treedt op bij  $\alpha = \pi/2$ , de veerkracht en de traagheidskracht zijn in dit geval even groot. De uitwendige kracht wordt geheel opgenomen door de dempingskracht, zodat geldt:

$$K(t) = b_{\phi\phi} \dot{\phi} \quad (4.13)$$

Het verband tussen de roldemping en de sloopssnelheid is onderzocht door Ikeda [12], zie figuur 4.5.

ROLL DAMPING  
ACCORDING IKEDA  
Deep water, 125.000 m<sup>3</sup> LNG  
carrier, T<sub>φ</sub> = 21.0 s



figuur 4.5 roldemping en sloopssnelheid

De waarden van figuur 4.5 zijn diep water waarden. Er is echter geen reden om aan te nemen dat de roldemping op ondiep water af zal nemen. De gevonden waarden worden daarom ook voor de ondiep water situatie toegepast.

Het maatgevende schip te Monrovia heeft een vaarsnelheid van circa 7 knoop. De roldemping van een schip varend met 7 knoop is een factor  $0.7/0.5 = 1.4$  groter dan de roldemping van een stilliggend schip, zie figuur 4.5. Het rolmoment dat door de golven wordt uitgeoefend is in beide gevallen (varend of stilliggend) gelijk zodat geldt:

$$1.4 * \phi_{7 \text{ knoop}} = \phi_{\text{st11}}$$

$$\text{en ook } 1.4 * \phi_{7 \text{ knoop}} = \phi_{\text{st11}}$$

De rolbeweging veroorzaakt ter plaatse van de schouders van het schip een verticale verplaatsing hier  $Z_{r01}$  genoemd.

$$Z_{r01} = \text{tg}(\phi) * B/2 \quad (4.14)$$

met  $B$  is de breedte van het schip.

bij rolhoeken kleiner dan  $20^\circ$  geldt dat  $\text{tg}(\phi) = \phi$

$$\text{zodat } 1.4 * Z_{7 \text{ knoop}} = Z_{\text{st11}}$$

De verticale scheepsbeweging, bij dwarsinkomende golven met een periode rond de eigenfrequentie van de rolbeweging, bestaat in geval van de door de Marin-figuur beschreven bulkcarriers, voor circa 50% uit een bijdrage van de rolbeweging. De overige 50% komt op rekening van de dompbeweging [bron: Marin].

De reductie op de totale verticale scheepsbeweging, tengevolge van de hierboven beschreven extra roldemping, is gelijk aan een factor:

$$(1/1.4) * 0.5 + 0.5 = 0.85$$

(bij dwarsinkomende golven met een golfperiode rond  $T_{r01}$ )

De invloed van de vaarsnelheid op de domp en stampbeweging wordt in het volgende deel bepaald.

- de invloed van de vaarsnelheid op de domp en stamprespons.

De invloed van de vaarsnelheid op de domp en stamprespons is met behulp van door Van Wijk [14] verzamelde gegevens onderzocht.

Van een groot aantal geladen bulkschepen, in grootte variërend van circa 100.000 dwt tot 150.000 dwt, is het bewegingsspectrum gemeten. Tevens heeft men het bijbehorende golfspectrum en de hoek van inval van de golven op het schip bepaald.

De metingen zijn verricht in de toegangseul van Richards Bay (Zuid-Afrika). Deze toegangseul heeft een diepte van 24 m. De gemiddelde vaarsnelheid van de schepen bedroeg circa 4 m/s (dit is gelijk aan circa 8 knoop). Te Monrovia wordt gerekend met een toelaatbare vaarsnelheid van 7 knoop voor het maatgevende schip. Bij de berekening van de responsiefunctie van de grootste verticale uitwijkingen van een stilliggend schip wordt gebruik gemaakt van de relatie (4.11),

$$S_{xx}(f) = R^2(f) * S_{\eta\eta}(f) \quad (\text{zie ook hoofdstuk 4.3.2.1})$$

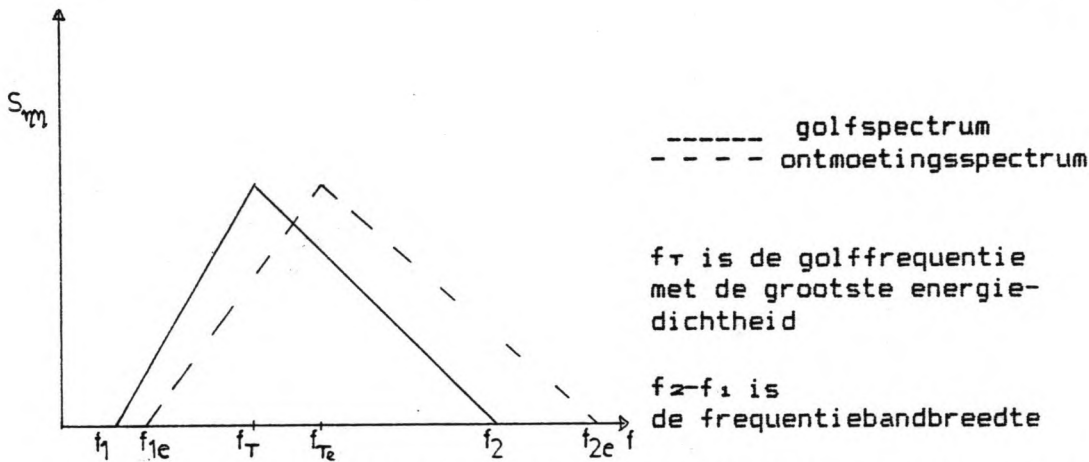
In geval van een varend schip moeten de golffrequenties vervangen worden door de ontmoetingsfrequenties. (zie hoofdstuk 4.3.3) De relatie luidt in dat geval:

$$S_{xx}(f_{\bullet}) = R^2(f_{\bullet}) * S_{\eta\eta}(f_{\bullet}) \quad (4.15)$$

De waarden van  $S_{xx}(f_{\bullet})$  en  $S_{\eta\eta}(f_{\bullet})$  zijn in dit geval dankzij metingen bekend.

In  $S_{\eta\eta}(f)$  worden nu de golffrequenties door de bijbehorende ontmoetingsfrequenties vervangen.





In bovenstaande figuur is het geval getekend van een varend schip en van voren inkomende golven. De ontmoetingsfrequenties zijn in dit geval groter dan de bijbehorende golffrequenties. Het schip ervaart dus kortere golven. Bovendien ontmoet het schip per eenheid van tijd meer golven dan een stilliggend schip. De energie-inhoud van het ontmoetingspectrum is dus groter dan die van het golfspectrum. Dit is direct af te leiden uit de grotere frequentiebandbreedte van het ontmoetingspectrum.

Indien  $S_{\eta\eta}(f_e)$  bepaald is kan men de responsiefactor bepalen volgens:

$$R = 2 * I_s / H_{se} \quad (4.10)$$

met  $I_s =$  de significante amplitude van de scheepsbeweging

$$I_s = 2 * \sqrt{m_{011}} \quad (2.3)$$

$$H_{se} = 4 * \sqrt{m_{0\eta\eta_e}} \quad (2.3)$$

opmerking:  $H_{se}$  is maat voor de inhoud van het ontmoetingspectrum. De golfhoogteverdeling wordt door  $H_s$  beschreven.

Van Wijk volstaat met het bepalen van de waarde van  $H_s$ . De waarde van  $H_{se}$  kan met de beschikbare gegevens niet zonder meer bepaald worden. Bij de berekening van de responswaarde  $R$  zal daarom de waarde van  $H_{se}$  benaderd worden. Hierbij wordt gebruik gemaakt van het voor een van de geulvaarten gegeven golfspectrum. De voor deze geulvaart berekende verhouding tussen  $H_s$  en  $H_{se}$  is:  $H_{se} = 1.1 * H_s$  (van voren inkomende golven).

Omdat voor de verschillende geulvaarten de diverse parameters, zie tabel 4.2, niet al te zeer uiteenlopen wordt ingeval van voor inkomende golven  $H_{se}$  benaderd met  $H_{se} = 1.1 * H_e$ , in geval van achter inkomende golven wordt dit  $H_{se} = 0.9 * H_e$ . De responsfactor wordt dus bepaald volgens:

$$R = 2 * I_e / 1.1 * H_e \quad \text{vertrekkende schepen}$$

$$R = 2 * I_e / 0.9 * H_e \quad \text{binnenlopende schepen}$$

De aldus bepaalde responswaarde zijn in tabel 4.2 verzameld. In deze tabel zijn ook de met de Marin-figuur bepaalde responsfactoren opgenomen. Tabel 4.1 geeft een overzicht van de bijbehorende scheepsgrootheden.

Event	Ship code	Principal dimensions						Loading conditions			
		LOA (m)	LPP (m)	BEAM (m)	DRAFT (m)	LSW (t)	DMT (t)	Drafts (m)			DMT (t)
								FWD	MID	AFT	
R002A	P(I)	260,0	248,0	41,6	16,81	19 819	125 903	16,55	16,80	16,61	123 125
R004A	PP	259,8	249,0	39,6	15,78	20 180	112 731	15,36		15,83	109 437
R012	NN	261,0	250,0	40,8	16,20	20 181	119 500	14,82	15,30	15,68	109 336
R019	O(II)	283,3	270,0	42,5	16,42	22 942	140 440	15,60	16,14	16,46	136 434
R041	V	250,1	237,0	38,9	14,68	20 189	95 357	9,14	9,94	10,74	42 208
R050	P(I)	260,0	248,0	41,6	16,81	19 819	125 103	16,53	16,81	16,83	124 796
R065	C(II)	266,0	251,5	38,4	15,78	19 910	110 338	15,39		15,93	110 318
R067	O(II)	283,3	270,0	42,5	16,42	22 942	140 440	15,72	16,08	16,28	120 000
R068	OO	269,0	256,0	42,7	16,77	20 488	139 720	15,19	15,56	15,83	120 000
R069	U(II)	303,0	287,0	43,0	16,64	28 854	148 200	16,26	16,59	16,15	144 964
R070	R(I)	261,0	247,0	40,6	17,61	20 739	129 629	12,30	12,50	12,80	74 000
R089	E	292,0	280,4	42,7	17,30	24 276	154 483	17,06	17,06	17,06	152 267
R095	LL	268,0	259,0	39,0	16,08	18 407	123 000	15,70	16,00	16,00	122 800
R101	EE(II)	261,0	249,0	39,6	16,45	20 407	118 712	15,39	15,77	16,08	112 210
R106	T	262,0	247,0	40,8	17,58	23 525	129 537	17,07		17,09	122 045
R122	NN	280,0	266,5	43,4	16,61		153 322	16,23		16,84	133 081
R136	E	292,0	280,4	42,7	17,30	24 276	154 483	17,25	17,15	17,22	147 863
R149	PP(II)	267,6	259,0	39,0	16,09	18 311	123 125	13,90	14,30	14,70	

Tabel 4.1: Gegevens bulk carriers.

Event	Incident waves				Ship/wave encounter				Shipmotions		Responsfactor	
	H <sub>0</sub> (m)	T <sub>p</sub> (s)	θ <sub>0</sub>	Channel	D/A*	V (m/s)	α (°)	T <sub>0</sub> (s)	T <sub>p</sub> (s)	I <sub>g</sub> (m)	R <sub>prototype</sub>	R <sub>Marin</sub>
R002A	2,7	14,5	SSW/S	140-150	D	3,5	210	12,0	12,2	1,4	0,95	1,35
R004A	2,7	17,8	SSW	135-155	D	4,5	220-210	14,5-14,0	13,4	10	0,65	1,6
R012	1,8	12,5	SW/SSW	150-160	D	3,9	215-225	10,0-10,5	11,3	12	1,2	1,3
R019	1,8	11,7	S	145-155	D	4,1-6,1	215-220	9,5-9,0	11,5	15	1,5	0,9
R041	2,4	14,1	SW/SSW (8,0)	145-155 (SE) (130-135)	A	3,9-5,1	35 (15-20)	18,0-19,5 (12,0-13,5)	13,6	0,9	0,85	1,9
R050	3,0	15,4	SW/SSW	140-155	D	3,9-4,2	190-210	12,5	12,5	1,7	1,05	1,1
R065	1,7	15,4	SW/SSW	140-155	D	4,3-5,5	215-230	12,5-13	12,5	1,6	1,7	1,8
R067	2,3	14,3	S	140-150	D	4,1-5,0	210-225	11,5	12,1	12	1	1,3
R068	2,8	12,5	S	145-155	D	4,1-4,8	205-220	10,0	11,1	10	0,7	0,9
R069	3,0	14,2	SSE	135-140	D	5,0-4,2	205	10,5-11,5	11,1	0,6	0,35	1,0
R070	2,6	14,2	SSE	135-140	A	4,1	35-25	18,5	15,4	0,6	0,4	1,8
R089	2,8	11,7	SSW/S	145-160	D	2,9-2,5	220-225	10,0-10,5	11,1	1,4	0,9	1,5
R095	1,2	13,2	S	145-150	D	4,8	215-220	10,5	11	11	1,7	1,4
R101	1,7	15,5	SW/SSW	140-155	D	4,5-5,5	210-220	12,5-12,0	12,1	1,7	1,8	1,9
R106	1,7	13,4	SW	150-160	D	4,1-4,5	215-235	11,0-11,5	12	1,8	2,0	1,8
R122	1,4	13,0	SW/SSW (11,0)	150-160 (S/SSE) (145-150)	D	4,3-4,0	215-220	10,5 (9,0)	11,8	1,5	1,9	1,5
R136	1,6	13,8	SW/SSW	145-160	D	4,7-4,1	220-225	11,0-11,5	12,2	1,7	1,9	1,75
R149A	1,8	13,8	SSW	145-155	D	4,8-5,6	195-220	10,5	10,7	1,6	1,6	1,4

\* D - departure  
A - arrival

Tabel 4.2: Gegevens golf- en bewegingsspectra, en responsiefactoren.

Bij nadere een beschouwing van de resultaten van tabel 4.2 moet onderscheid gemaakt worden tussen vertrekkende schepen (voor inkomende golven) en binnenlopende schepen (achter inkomende golven). De gemeten responswaarden van de aankomende schepen (in totaal twee schepen; de geulvaarten R041 en R070) blijken aanzienlijk kleiner te zijn dan de met de Marin-figuur bepaalde waarden. Deze grote verschillen worden waarschijnlijk veroorzaakt door het feit dat de schepen in geballaste conditie de haven binnenlopen (zie tabel 4.1). In dergelijke gevallen blijkt de Marin-figuur niet toegepast te kunnen worden. Voor de situatie te Monrovia heeft dit geen consequenties. De responsies van de beladen vertrekkende 150.000 dwt ertscarrier zijn hier maatgevend.

Voor de vertrekkende schepen is de overeenkomst tussen  $R_{\text{prototype}}$  en  $R_{\text{Marin}}$  beter. Voor enkele geulvaarten zijn de optredende verschillen echter niet te verwaarlozen. Onvolkomenheden bij de metingen zijn voor een deel oorzaak van deze verschillen. Met name de bepaling van de hoek van inval van de golven op het schip is niet zeer nauwkeurig. Daarnaast is de vaarsnelheid bij enige geulvaarten aanzienlijk groter geweest dan de aangenomen snelheid van 3.5 m/s (tot 6.1 m/s, zie geulvaart R019). Als gevolg van dit laatste is met een te lage waarde van  $H_{\text{ee}}$  gerekend. De aldus berekende waarde van  $R_{\text{prototype}}$  is dientengevolge te groot (zie vergelijking 4.10).

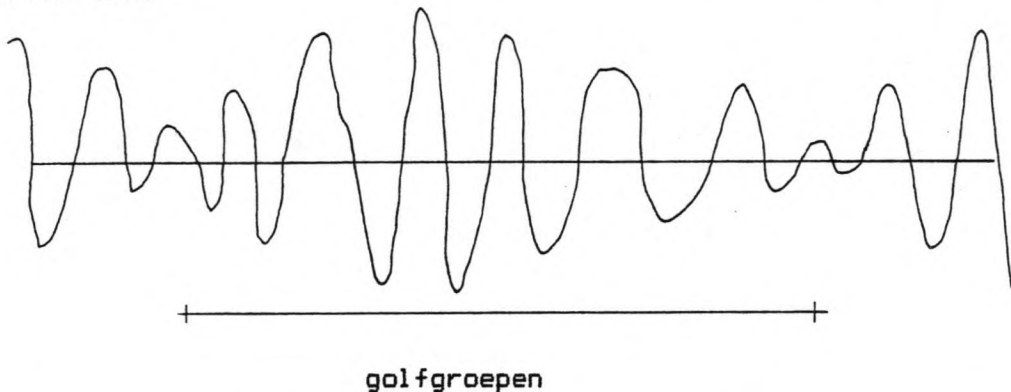
Indien bovengenoemde invloed verdisconteerd wordt is de met de Marin-figuur bepaalde responsfactor in vrijwel alle gevallen groter of gelijk aan de met de prototype metingen verkregen responswaarden. Gebruik van van de Marin-figuur bij de bepaling van de grootste verticale scheepsbewegingen leidt dus in het algemeen tot scheepsresponsies die groter zijn dan de werkelijk optredende responsies.

Bij de geuldiepte bepaling is dit een veilige benadering. Op grond hiervan wordt gesteld dat ten aanzien van de bijdragen van de domp en stamp beweging bij een vaarsnelheid van circa 7 knoop de in de Marin-figuur gegeven responswaarden geen wijziging behoeven.

#### 4.3.2 .4 Golfgroepen (wave grouping ).

In het voorafgaande stuk is gesteld dat het bewegingsspectrum van het schip bepaald kan worden met het golfspectrum en de responsiefunctie. Vervolgens kunnen uit het bewegingsspectrum de significante scheepsbeweging,  $I_s$ , en de standaardafwijking van de scheepsbeweging,  $\sigma_s$ , bepaald worden. Hiermee is in principe de beschrijving van de optredende verticale scheepsbeweging bepaald.

Analyse van het golfspectrum geeft echter geen enkele informatie omtrent het eventueel optreden van golfgroepen. Een golfgroep wordt gekenmerkt door een opeenvolging van relatief hoge golven, tussen de golfgroepen is de golfhoogte duidelijk minder. Dit verschijnsel wordt veroorzaakt door golven met dezelfde voortplantingsrichting en met maar weinig verschillende golfperiodes. De golfgroepen ontstaan doordat punten waar deze golven in fase zijn, afgewisseld worden door punten waar ze in tegenfase zijn.



Als gevolg van de grote golfamplitude en de mogelijk optredende opslingering (opeenvolgende golven met vrijwel gelijke golfperiode ) kunnen de door de golfgroep veroorzaakte scheepsresponsies aanzienlijk groter zijn dan de op basis van het golfspectrum berekende responsies.

Een tweede optredend effect is de invloed op de gemiddelde waterstand. Onder de hoge golven is er sprake van een verlaging van de gemiddelde waterstand (set down ), tussen de golfgroepen is er sprake van een verhoging (set up ). [17]

Het golfspectrum te Monrovia is een smal deiningsspectrum (brongebied van deze deining is 6000 km van Monrovia verwijderd zie hoofdstuk 2). Monrovia ligt in de doldrums (windstille gebied), de zeeegang terplaatse kan daarom verwaarloosd worden. Aan de hand van de golfhoogtegegevens zijn geschematiseerde (blokvormige) golfspectra opgesteld, zie hoofdstuk 2. Door deze werkwijze is het eventuele optreden van golfgroepen verdisconteerd. Met het optreden van opslinging is eveneens rekening gehouden (zie hfd.4.3.2.1). De genoemde invloed op de gemiddelde waterstand kan als gevolg van de kleine golfhoogten die te Monrovia optreden verwaarloosd worden.

#### 4.3.2 .5 Samenvatting.

Resumerend: de responswaarden in de Marin-figuur dienen bij gebruik te Monrovia op twee punten aangepast te worden; beide aanpassingen vinden plaats in geval van dwarsinkomende golven met golfperiodes rond de waarde van de eigenperiode van de rolbeweging van het maatgevende schip:

- correctie ten gevolge van de vorm van het golfspectrum: de responswaarde is gelijk aan 3.1. (de Marin-figuur geeft 2.5)

- correctie ten gevolge van de invloed van de vaarsnelheid op de rolrespons.

De responswaarde van de totale verticale scheepsbeweging (stilstaand schip) moet bij een vaarsnelheid van 7 knoop met een factor 0.85 vermenigvuldigd worden.

De uiteindelijke responswaarde (in geval van dwars- inkomende golven met een golfperiode rond  $T_{rol}$ ) is:

$$0.85 * 3.1 = 2.65$$

Overigens kan de Marin-figuur ongewijzigd gebruikt worden.



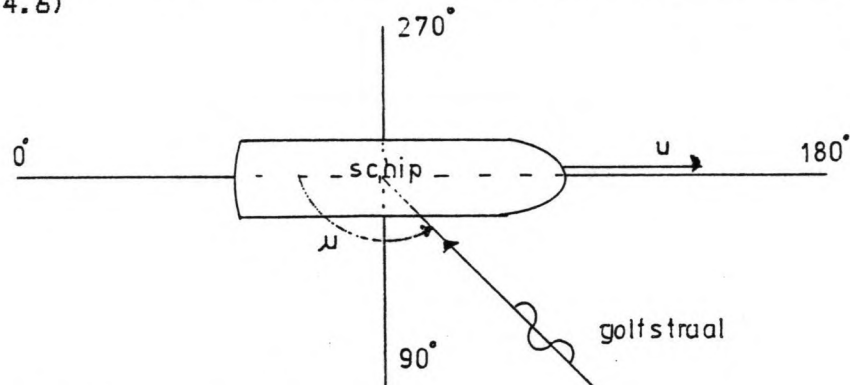
### 4.3.3 Berekening bewegingsspectra.

Indien het golfspectrum en de responsiefunctie bekend zijn kan men het energiedichtheidsspectrum van de verticale scheepsbeweging, hier bewegingsspectrum genoemd, bepalen. Er geldt:

$$S_{\eta}(\omega) = R^2(\omega) * S_{\eta}(\omega) \quad (4.3)$$

Alvorens met deze relatie het bewegingsspectrum bepaald kan worden moet de invloed van de vaarsnelheid verdisconteerd worden.

De door het schip ervaren golfperiode is afhankelijk van de vaarsnelheid en de hoek van inval van de golven op het schip (zie figuur 4.6)



figuur 4.6: Ontmoetingsperiode.

Eenvoudig is af te leiden dat de zogenaamde ontmoetingsperiode gelijk is aan:

$$T_e = 1 / (1/\bar{T} - u \cdot \cos(\mu) / L) \quad (4.17)$$

- met L is de golflengte
- u is de sloopssnelheid
- $\bar{T}$  is de gemiddelde golfperiode
- $\mu$  is de hoek van inval van de golven.

In geval van Monrovia is de vertrekkende ertscarrier maatgevend bij de geuldiepte bepaling. Door de van voren inkomende golven is voor dit schip de ontmoetingsperiode altijd kleiner dan de golfperiode (tabel 4.3).

In hoofdstuk 2 is het golfklimaat geschematiseerd door de invoering van 5 golfhoogteklassen, 5 golfrichtingsektoren (richting op diep water) en 4 golfperiodeklassen. (In totaal dus  $5 \cdot 5 \cdot 4 = 100$  combinatie's  $H_{si} T_{sj} \phi_k$ , de indices  $i, j, k$  geven de klassen aan.)

Voor iedere combinatie van richtingsektor en golfperiodeklasse is de gemiddelde hoek van inval van de golven op het schip bepaald. Dit is aan de hand van refractieberekeningen gebeurd. Met vergelijking (4.17) is vervolgens de gemiddelde ontmoetingsperiode bepaald voor ieder van deze combinaties. (zie tabel 4.3)

In deze tabel is tevens voor iedere combinatie de gemiddelde waarde van de responsiefactor  $\bar{R}$  opgenomen.  $\bar{R}$  is met behulp van figuur 4.3 te bepalen volgens:

$$\bar{R} = \frac{\int_{f_1}^{f_2} R \, d\omega}{[f_2 - f_1]} \quad (4.18)$$

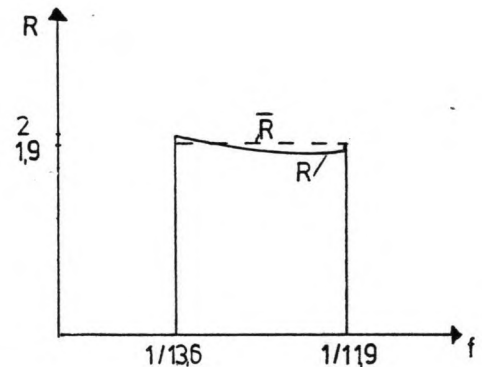
met  $f_2 - f_1$  is de frequentiebandbreedte van het ontmoetingsspectrum

Ter illustratie:

golfperiodeklasse 14-16 s  
 richtingsektor  $185^\circ < \phi < 195^\circ$   
 $\bar{u} = 133^\circ$

frequentiebandbreedte ontmoetingsspectrum:  
 $f_2 - f_1 = 1/11.9 - 1/13.6$

$$\bar{R} = 1.9$$



GOLFPERIODE KLASSE [s]	$\bar{T}$ [s]		GOLFRICHTINGSEKTOR, diep water richting				
			$0^\circ < \theta < 185^\circ$	$185^\circ \leq \theta < 195^\circ$	$195^\circ \leq \theta < 205^\circ$	$205^\circ \leq \theta < 215^\circ$	$215^\circ \leq \theta < 240^\circ$
8 - 10	9	$\mu$	111°	116°	124°	131°	180°
		$\bar{T}_e$	8,1	8,0	7,7	7,6	7,0
		R	1,5	12,5	0,6	0,5	0,15
10 - 12	11	$\mu$	118°	121°	129°	137°	180°
		$\bar{T}_e$	9,8	9,7	9,4	9,2	8,7
		R	1,9	1,9	1,25	0,75	0,3
12 - 14	13	$\mu$	123°	126°	133°	140°	180°
		$\bar{T}_e$	11,3	11,3	11,0	10,8	10,3
		R	1,9	1,9	1,75	1,4	0,55
14 - 16	15	$\mu$	130°	133°	140°	145°	180°
		$\bar{T}_e$	12,9	12,7	12,6	12,4	11,9
		R	1,85	1,85	1,6	1,45	0,95

VAA RSNELHEID 35 m/s  
 GEULDIEPTE 22 m.

tabel 4.3 Gemiddelde ontmoetingsperioden, hoek van inval en responsies

Vervolgens is met behulp van onderstaande relatie's het bewegingsspectrum bepaald.

$$\text{met } \int S_{\eta\eta}(f_{\bullet}) df_{\bullet} = m_{\eta\eta e} \quad (4.19)$$

$$\text{en } m_{\eta\eta e} = (H_{\theta_{\theta u_1 e}})^2 / 16 \quad (4.20)$$

$$\text{wordt verkregen: } \int S_{\eta\eta}(f_{\bullet}) df_{\bullet} = \bar{R}^2 (H_{\theta_{\theta u_1 e}})^2 / 16 \quad (4.21)$$

Omdat het golfspectrum tot een blokvorm geschematiseerd is, is de spectruminhoud rechtevenredig met de frequentiebandbreedte van het spectrum.

$$m_{\eta\eta e} = m_{\eta\eta} * (f_2 - f_1) / (f_2 - f_1) \quad (4.22)$$

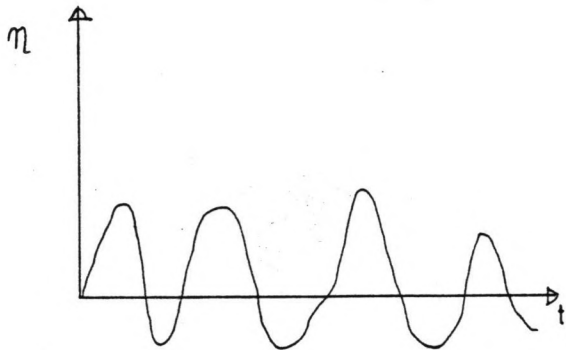
hieruit volgt:

$$(H_{\theta_{\theta u_1 e}})^2 / 16 = [(H_{\theta_{\theta u_1}})^2 / 16] * (f_2 - f_1) / (f_2 - f_1) \quad (4.23)$$

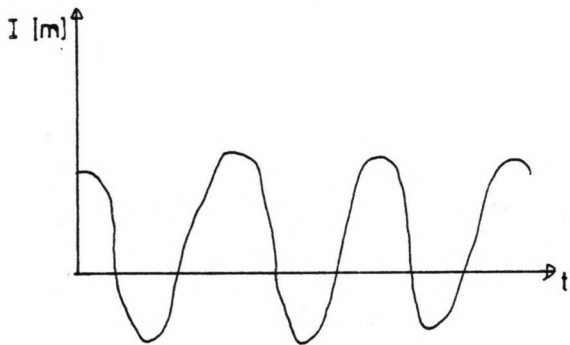
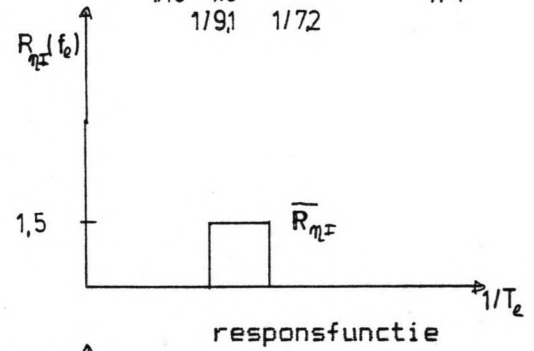
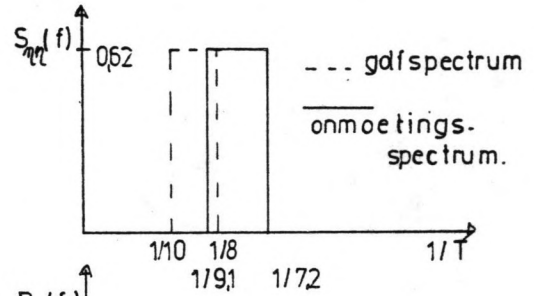
zodat

$$\int S_{\eta\eta}(f_{\bullet}) df_{\bullet} = \bar{R}^2 * [(H_{\theta_{\theta u_1}})^2 / 16] * (f_2 - f_1) / (f_2 - f_1) \quad (4.24)$$

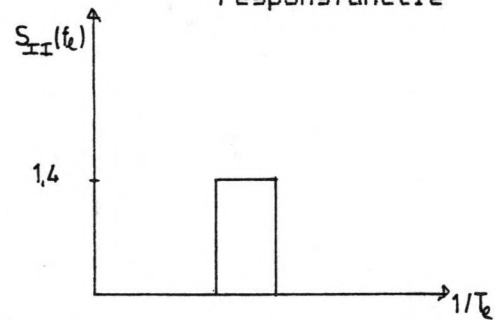
In figuur 4.7 is voor een combinatie van golfperiodeklasse en richtingsektor voor een bepaalde  $H_{\theta_{\theta u_1}}$  waarde het bewegingsspectrum bepaald.



golfregistratie  
 golfperiodeklasse 8- 10 s  
 richtingsektor  $\beta < 185^\circ$   
 golfhoogte in de geul is 0.5 m



verticale scheepsbeweging



bewegingsspectrum

figuur 4.7: Golf- en bewegingsspectrum.

#### 4.3.4 Lange termijn verdeling van de standaardafwijking van de verticale scheepsbeweging.

Bij de bepaling van de optimale geuldiepte wordt gebruik gemaakt van de lange termijn verdeling van de standaardafwijking van de verticale scheepsbeweging,  $\sigma_z$ . Onder de verticale scheepsbeweging wordt nog steeds verstaan de beschrijving van de ligging van het diepste punt van de scheepsbodem.

De standaardafwijking,  $\sigma_z$ , is uit het bewegingsspectrum af te leiden.

$$\text{er geldt } \int S_{zz}(f) df = (\sigma_z)^2 \quad (4.25)$$

$$\text{en ook } \int S_{zz}(f) df = \bar{R}^2 * [(H_{g,0,0,1})^2 / 16] * (f_2 - f_1) / (f_2 - f_1) \quad (4.24)$$

zodat:

$$\sigma_z = (\bar{R} * H_{g,0,0,1} / 4) * [(f_2 - f_1) / (f_2 - f_1)]^{1/2} \quad (4.26)$$

Aldus is de lange termijn verdeling van  $\sigma_z$  uit die van de golfhoogte in de geul,  $H_{g,0,0,1}$ , af te leiden.

Ten einde de geuloptimalisatie overzichtelijk te houden worden de  $\sigma_z$  waarden gerangschikt in klassen met als klassegrens een veelvoud van 0.25 m. Op deze wijze worden de volgende  $\sigma_z$  klassen verkregen

$$\begin{aligned} 0.25 &\leq \sigma_z < 0.5 \text{ m} \\ 0.5 &\leq \sigma_z < 0.75 \text{ m} \\ 0.75 &\leq \sigma_z < 1.0 \text{ m} \\ 1.0 &\leq \sigma_z < 1.25 \text{ m} \\ &\sigma_z \geq 1.25 \text{ m} \end{aligned}$$

Met behulp van vergelijking (4.26) zijn voor de optredende combinaties van richtingsektor en golfperiodeklasse de golfhoogten bepaald waarbij de waarde van  $\sigma_x$  gelijk is aan 0.25 m. (zie tabel 4.4)

golfrichtingssektor op diep water	golfperiodeklasse			
	8 - 10 s	10 - 12 s	12 - 14 s	14 - 16 s
$\emptyset < 185^\circ$	0.65	0.50	0.50	0.50
$185^\circ < \emptyset < 195^\circ$	0.75	0.50	0.50	0.50
$195^\circ < \emptyset < 205^\circ$	1.50	0.75	0.50	0.60
$205^\circ < \emptyset < 215^\circ$	1.80	1.25	0.65	0.60
$215^\circ < \emptyset < 240^\circ$	5.55	2.90	1.55	0.90

tabel 4.4: Overzicht  $H_{s_{geul}}$  waarden waarvoor  $\sigma_x = 0.25$  m.

Met behulp van de in tabel 4.4 gegeven waarden van de golfhoogte in de geul en de in bijlage 2.3 gegeven  $H_{s_{geul}}/H_s$  verhouding kunnen de bij de  $\sigma_x$  klassen behorende golfhoogteklassen worden bepaald.

bijvoorbeeld: richtingsektor  $\emptyset < 185^\circ$   
golfperiodeklasse  $8 \leq T < 10s$

$$P(0.25 \leq \sigma_x < 0.5 \text{ m}) = P(0.65 \leq H_{s_{geul}} < 1.3 \text{ m})$$

$$P(0.5 \leq \sigma_x < 0.75 \text{ m}) = P(1.3 \leq H_{s_{geul}} < 1.95 \text{ m})$$

etc.

Vervolgens kan de lange termijn verdeling worden bepaald. Voor die combinaties met  $H_{s_{geul}} = 0.5$  m., zie tabel 4.4, is de kans van optreden gelijk aan de in bijlage 2.2 gegeven kans. Voor deze combinaties geldt namelijk dat  $H_{s_{geul}}/H_s = 1$ , zie bijlage 2.2



De bepaling van de kans van optreden van de overige combinaties gebeurt door de in tabel 4.4 gegeven golfhoogtegrenzen in te voeren in de relatie:

$$p(H_{s1}, T_J, \Phi_K) = p(T_J | H_{s1}) * p(\Phi_K | H_{s1}) * p(H_{s1})$$

met  $H_{s1}$  is een golfhoogteklasse  
 $T_J$  is een golfperiodeklasse  
 $p(T_J | H_{s1})$  is de kans op golven uit een bepaalde golfhoogteklasse in een zekere golfperiodeklasse vallen.  
 $p(H_{s1})$  is de golfhoogteverdeling.  
 $\Phi_K$  is een richtingsektor  
 $P(\Phi_K | H_{s1})$  is de kans dat golven uit  $H_{s1}$  in  $\Phi_K$  vallen  
 $p(H_{s1}, T_J, \Phi_K)$  is de kans op golven uit  $H_{s1}$ ,  $T_J$  en  $\Phi_K$

Een uitgebreide beschrijving van deze berekening is in het in het kader van deze studie gemaakte deelontwerp [3] te vinden. De resultaten worden in bijlage 4.2 gegeven. De in de tabel opgenomen waarden geven de kans van optreden per jaar van een  $\sigma_x$  waarde en geven ook de bijbehorende golfperiodeklasse en golfrichtingsektor. De eenheid van de in de tabel gegeven kansen is  $10^{-4}$ .

ter illustratie: de kans dat een vertrekkende 150.000 dwt ertscarrier een standaardafwijking van de verticale scheepsbeweging,  $\sigma_x$ , heeft in de klasse  $0.75 \leq \sigma_x < 1.0$  m en golven in de geul ontmoet met een golfperiode in de klasse  $14 \leq T < 16$  s en een golfrichting in de sektor  $185^\circ \leq \Phi < 195^\circ$ , is gelijk aan  $9.3 * 10^{-4}$ .

Bij de geuloptimalisatie zijn de grootste  $\sigma_x$  waarden van belang. Deze blijken op te treden in geval van golven met golfperioden in de klassen  $12 \leq T < 14s$  en  $14 \leq T < 16s$ . De bijbehorende golfrichtingen op diep water vallen in de sektoren  $195^\circ \leq \phi_0 < 205^\circ$  en respectievelijk  $\phi_0 < 185^\circ$ ,  $185^\circ \leq \phi_0 < 195^\circ$ . De kans van optreden van  $\sigma_x \geq 1.25$  m is voor iedere vaart gelijk aan  $0.4 \cdot 10^{-4}$ . Het gemiddeld aantal geulvaarten per jaar waarbij  $\sigma_x$  een waarde heeft  $\geq 1.25m$  is dan:

$$u = p * N \quad (3.1)$$

met  $N$  is het aantal geulvaarten per jaar  
 $p$  is de kans op  $\sigma_x \geq 1.25m$   
 $u$  gemiddeld aantal geulvaarten

$$u = 0.4 \cdot 10^{-4} * 160 = 6.4 \cdot 10^{-3}$$

Er vindt dus praktisch geen geulvaart plaats onder omstandigheden waarbij de standaardafwijking van de verticale scheepsbeweging  $\geq 1.25m$  is.

## 5 Bodem

### 5.1 Bodemgesteldheid

Bij de constructie van de haven in 1948 heeft men in het havenbekken en ter plaatse van de vaargeul zand met slib weggebaggerd.[13] In het centrum van het havenbasin is bij de verdieping van -12.80 m tot -13.80 m (dit is in 1970 gebeurd) doleriet aangetroffen. Doleriet is een stollingsgesteente dat verwant is aan basalt. (de hardheid van beide gesteenten is gelijk) Bij de verdieping van de toegangseul tot -14.80 m is geen gesteente aangetroffen. Aangenomen wordt dat ter plaatse van de te baggeren toegangseul (voor een deel samenvallend met de oude geul) geen gesteente aanwezig is en de bodem uit zand met slib bestaat. Een seismologisch onderzoek ter plaatse kan hierover zekerheid verschaffen. De korrelgrootteverdeling van het sediment is niet bekend. Voor Buchanan is dit wel het geval;  $D_{50} = 183 \cdot 10^{-6} \text{ m}$  en  $D_{90} = 340 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ . De diameter  $D_p$  geeft aan dat p% (naar gewicht of volume) van het mengsel een diameter kleiner dan  $D_p$  heeft. De korrelgrootteverdeling van Buchanan wordt ook voor Monrovia aangehouden.

### 5.2 Standaardafwijking bodemverloop.

De standaardafwijking van het gemiddelde bodemverloop,  $\sigma_B$ , wordt door twee invloeden bepaald. Als eerste kan genoemd worden de invloed van de baggerwerkzaamheden (zowel geulaanleg als geulonderhoud) daarnaast wordt de bodemligging bepaald door aanzandingen, deze worden door golven en stroming veroorzaakt.

a invloed baggerwerkzaamheden op  $\sigma_B$ .

De baggerwerkzaamheden ten behoeve van de geulaanleg /-verdieping vinden buitengaats plaats. De keuze tussen de mogelijk in te zetten baggerwerktuigen wordt dan ook hoofdzakelijk bepaald door het golfklimaat en de stromingsconditie's voor de haven. De maximale stroomsnelheid voor de havenmond bedraagt circa 0.4 m/s. Het golfklimaat wordt bepaald door de altijd aanwezige deining (zie hoofdstuk 2). In verband met dit laatste zal vrijwel zeker voor gebruik van een sleepzuiger worden gekozen. Een sleepzuiger in de klasse van 6.000-18.000 ton laadvermogen (dit zijn de grote sleepzuigers) levert onder normale produktieomstandigheden, baggerwerk met een verticale tolerantie van van globaal 75 cm. [15]. Tengevolge van dit baggerwerk zullen zandribbels ontstaan die min of meer in de langsrichting van de geul zullen lopen. Ten opzichte van de gemiddelde bodemligging zal de grootste hoogte van de ribbels circa 75 cm kunnen bedragen. Indien aangenomen wordt dat de bodemuitwijkingen ten opzichte van de gemiddelde bodemligging Gaussisch verdeeld zijn, dan kan de standaardafwijking van de bodemonregelmatigheden bepaald worden. Hiertoe wordt de overschrijdingskans van de maximale verticale tolerantie (75 cm ) gelijk gesteld aan 5%, zodat:

$$\sigma_B = 0.75/1.64 = 0.46 \text{ m.}$$

Indien bovenstaande overschrijdingskans kleiner wordt gesteld, bijvoorbeeld 2.5%, wordt ook de standaardafwijking kleiner:

$$\sigma_B = 0.75/1.96 = 0.38 \text{ m.}$$

Hier zal de veiliger waarde van  $\sigma_B=0.46 \text{ m.}$  worden aangehouden. Mocht in de praktijk blijken dat de optredende waarde van  $\sigma_B$  groter is, dan kan dit ondervangen worden door de geul met overdiepte aan te leggen.

b  $\sigma_B$  onder invloed van golven en stroming.

Het zandtransport o.i.v. golven en stroming zal nadat de geul gebaggerd is, voor aanzanding zorgen. Hierdoor zullen zowel de gemiddelde bodemhoogte als de standaardafwijking veranderen. De golven en stroming zullen het gebaggerde bodemprofiel vereffenen. Indien aangenomen wordt dat aldus ribbels ontstaan met een min of meer sinusvormig verloop en een amplitude gelijk aan de eerder genoemde 75 cm., dan is de standaardafwijking te berekenen met de in hoofdstuk 2 gegeven theorie van spectra. Het bodemverloop wordt sinusvormig aangenomen en beschreven met:

$$B = \hat{b} \sin x$$

De inhoud van het bijbehorende spectrum is (2.3) en (2.4) te bepalen:

$$\int S_{BB} dx = \hat{b}^2/2 = (\sigma_B)^2$$

zodat  $\sigma_B = \hat{b}/\sqrt{2}$

met  $\hat{b} = 0.75$  m is  $\sigma_B = 0.53$  m.

Bij de geuldieptebeplating zal de grootste waarde van de bodemstandaardafwijking,  $\sigma_B = 0.53$  m., worden gebruikt.

## 6. Bepaling van de maatgevende waterstand.

### 6.1 Het getij.

Het getij te Monrovia is een dubbeldaags getij, men kent er 2 maal daags hoog en laag water. De gegevens van de verticale getijbeweging zijn:

	hoog water	laag water
gemiddeld springtij	1.28 m	0.18 m
gemiddeld dood tij	1.01 m	0.43 m

Bovenstaande getijgegevens zijn gerelateerd aan het L.L.W.S. vlak (laag laag water spring). Dit is het reductie vlak voor zeekaarten. Het L.L.W.S. peil wordt berekend als het meerjarig gemiddelde (in het algemeen over een periode van 5 jaar) van het laagste spring laag water van elke maand. De gemiddelde getijamplitude te Monrovia bedraagt 0.4 m.

#### 6.1.1 opwaaiing/afwaaiing.

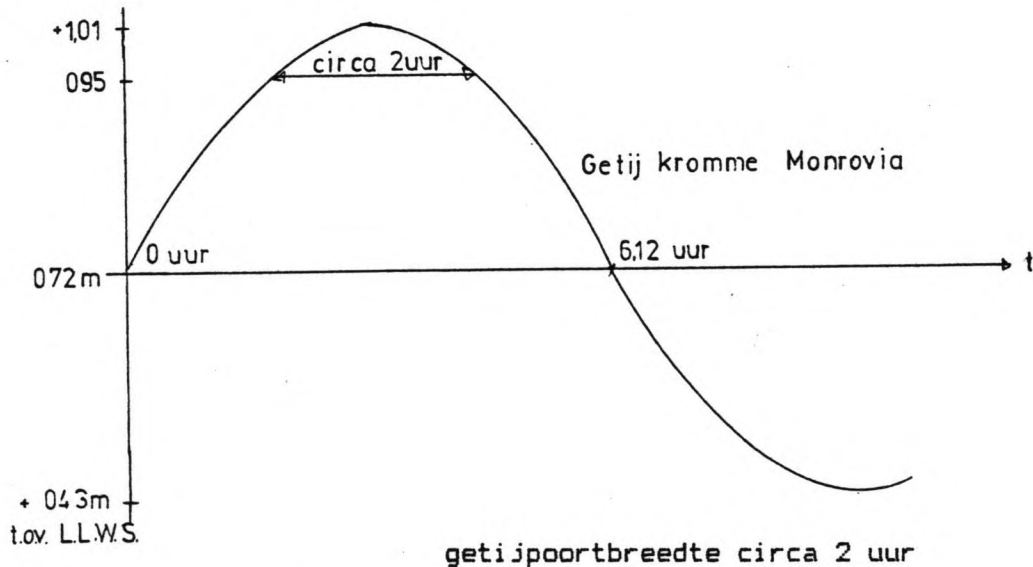
Een langdurig sterke wind uit dezelfde richting kan voor opwaaiing/afwaaiing zorgen. De grootte van deze waterstandsverandering is afhankelijk van de hydrografie van het gebied, de begin toestand van het systeem en de eigenschappen van het windveld. Liberia ligt in het gebied van de doldrums en windsnelheden groter dan 10 m/s komen er sporadisch voor. De windrichting is in het algemeen landinwaarts (ZW) en zorgt dan in principe voor een waterstandsverhoging, door de kleine windsnelheden zal deze verhoging zeer bescheiden zijn. De zeewaarts gerichte winden hebben een nog kleinere windsnelheid, zodat de afwaaiing verwaarloosd kan worden. De waterstandsvariaties ten gevolge van de wind zijn verwaarloosbaar klein en worden bij de geuldieptebepaling buiten beschouwing gelaten.

6.1.2 De maatgevende waterstand.

De geuldieptebepaling gebeurt met behulp van de maatgevende waterstand. Dit is de laagste waterstand welke tijdens een geulvaart optreedt. De waarde die aangehouden moet worden voor de maatgevende waterstand is bijzonder afhankelijk van de frequentie waarmee het maatgevende schip van de geul gebruik maakt.

In geval van een haven waar een veerdienst onderhouden wordt en waar men ieder dag op een vast uur de haven moet kunnen verlaten/ binnenlopen, zal men een maatgevende waterstand kiezen die zelden onderschreden wordt. Hierbij moet gedacht worden aan L.L.W.S. .

Te Monrovia heeft men te maken met een maatgevend schip dat bij het binnenlopen niet afhankelijk is van de waterstand (het schip loopt geballast binnen). Het verlaten van de haven vindt voor dit type schip slechts 160 maal per jaar plaats. Het is daarom aanvaardbaar om dit vertrek alleen rond hoog water toe te staan. De lengte van de toegangsecul en de vaarsnelheid van het maatgevende schip bepalen dan de minimaal benodigde getijpoortbreedte.





Voor de getijkromme is een sinusvormig verloop aangehouden. De getijgolf op de Atlantische Oceaan ondervindt langs de Liberiaanse kust en de meer zuidelijk gelegen kusten weinig vervorming; langs deze kusten heeft de getijamplitude vrijwel dezelfde waarde, circa 0.4 m.

De geullengte te Monrovia bedraagt circa 5000 m, bij een vaarsnelheid van 3.5 m/s is het schip ongeveer 30 minuten in de geul. Een maatgevende waterstand van +1.0 m ten opzichte van L.L.W.S. geeft een getijpoortbreedte van een half uur. Bij een maatgevende waterstand van +0.95 m is de breedte van de getijpoort 2 uur.

Een optimale keuze kan gemaakt worden door bij de geuldiepte berekening met enige alternatieve maatgevende waterstanden te rekenen. Hier zal echter worden volstaan met een berekening. Deze zal in hoofdstuk 7 uitgevoerd worden voor een maatgevende waterstand van +0.95 m. Er is voor een hoogte van +0.95 m gekozen, omdat het aantrekkelijk is een wat bredere getijpoort te hebben. Dankzij het bescheiden getijverloop te Monrovia is dat tegen zeer geringe meerkosten mogelijk.

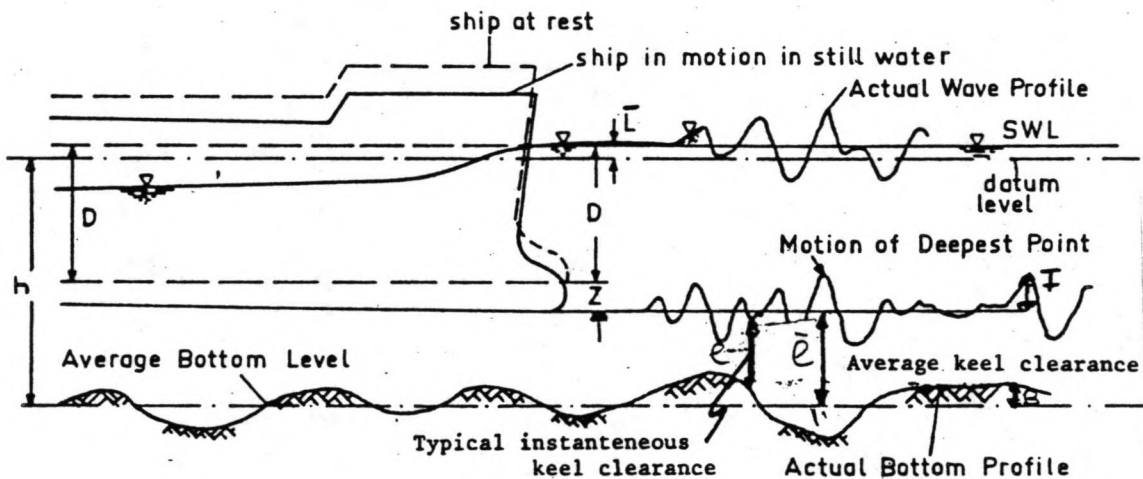
## 7 Bepaling geuldiepte.

### 7.1 Algemeen.

In dit hoofdstuk wordt de aanzet gegeven tot de bepaling van de optimale geuldiepte. Hiertoe wordt de geulvaart van het maatgevende schip aan een tweetal criteria getoetst:

- de kans op raken van de bodem.
- de stureigenschappen van het schip.

De eerder besproken parameters die de geuldiepte beïnvloeden zijn, zie figuur 7.1 :



figuur 7.1: Overzicht van de parameters, welke de geuldiepte beïnvloeden.

- $\bar{L}$  is de maatgevende waterstand, de waarde t.o.v. chart datum is gelijk aan +0.95 m.
- $D$  is de feitelijke diepgang van het schip, deze wordt bepaald door de beladingsgraad van het schip en de dichtheid van het water ; de beladen ertscarrier te Monrovia heeft een diepgang van 16.5 m.
- $z$  is de inzinking van het schip,  $z = 0.30$  m. (zie hoofdstuk 4.2)
- $I$  is de momentane verticale scheepsbeweging, de lange termijn verdeling van de standaardafwijking van deze stochastische variabele is in bijlage 4.3 gegeven.
- $B$  is de momentane bodemligging,  $\bar{B} = 0.0$  m en  $\sigma_B = 0.53$  m.
- $e$  is de momentane bodemvrijheid (keelclearance)

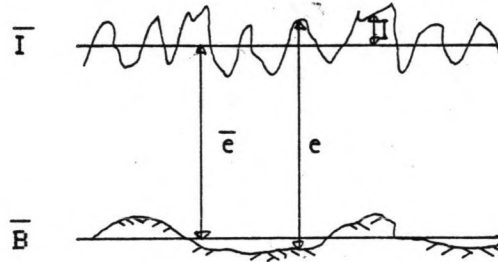
## 7.2 Beschrijving bodemvrijheidverloop.

Met behulp van figuur 7.1 is de volgende relatie op te stellen:

$$h + \bar{L} = D + z + \bar{e} \quad (7.1)$$

Hierin is  $\bar{e}$  gelijk aan de gemiddelde bodemvrijheid. De momentane bodemvrijheid wordt bepaald door de stochastische variabelen  $I$  en  $B$ .

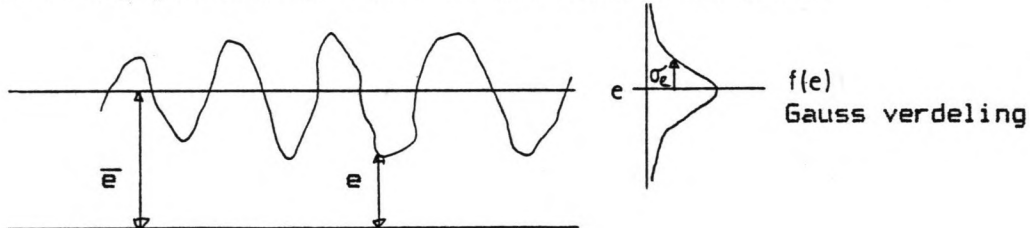
$$e = \bar{e} + B - I \quad (7.2)$$



I en B zijn stochastisch onafhankelijke variabelen, met een standaardafwijking gelijk aan  $\sigma_I$  respectievelijk  $\sigma_B$ . omdat de variabelen onafhankelijk zijn geldt:

$$(\sigma_e)^2 = (\sigma_I)^2 + (\sigma_B)^2 \quad (7.3)$$

De stochastisch onafhankelijke variabele e is hiermee bepaald. B en I voldoen aan de Gauss verdeling (ook wel normale verdeling genoemd) en ook e is dus normaal verdeeld.



Aan de waarde van e worden nu de volgende eisen gesteld:

- De kans dat het schip tijdens de geulvaart de bodem raakt moet aanvaardbaar klein zijn.
- De bestuurbaarheid van het schip moet tijdens de geulvaart gewaarborgd zijn.

## 7.3 Raken van de bodem.

De kans dat het schip de bodem raakt wordt bepaald door het verloop van de minima van de bodemvrijheid.



De Rayleigh verdelingsfunctie beschrijft het verloop van de minima,  $x_m$ , van een stationair Gaussisch proces met een smal energiedichtheidsspectrum. Indien de variantie van de verdeling gelijk is aan  $m_0$  dan is de verdelingsfunctie te schrijven als:

$$P(x < X) = \{ 1 - \exp [-X^2 / (2 * m_0) ] \} \quad (7.4)$$

De kans dat in geval van een gemiddelde bodemvrijheid,  $\bar{e}$ , en een variantie,  $(\sigma_e)^2$ , de bodem niet wordt geraakt, is dan gelijk aan:

$$P\{e < \bar{e}\} = \{ 1 - \exp [-(\bar{e} / \sigma_e)^2 / 2] \} \quad (7.5)$$

Dit is de kans op niet raken van de bodem bij 1 extreme uitwijking. Tijdens de geulvaart komt het schip meerdere extremen tegen. In geval van een smal golfspectrum is de gemiddelde golfperiode gelijk aan de gemiddelde periode van de minima van de golven. Het aantal extreme uitwijkingen van het schip tijdens de geulvaart, hier  $N$  genoemd, wordt bepaald door het quotient van de tijdsduur dat het schip in de geul is en de gemiddelde ontmoetingsperiode van de golven.

$$N = l / (\bar{u} * T_e) \quad (7.6)$$

met  $l$  is de geullengte

$\bar{u}$  is de gemiddelde vaarsnelheid van het schip

$T_e$  is de gemiddelde ontmoetingsperiode

Nu  $N$  bekend is kan de kans op niet raken tijdens een geulvaart bepaald worden. Deze is gelijk aan:

$$[ P\{e < \bar{e}\} ]^N = \{ 1 - \exp [ -(\bar{e}/\sigma_e)^2 / 2 ] \}^N \quad (7.7)$$

De kans op raken tijdens een geulvaart wordt dan:

$$E_{11} = 1 - \{ 1 - \exp [ -(\bar{e}/\sigma_e)^2 / 2 ] \}^N \quad (7.8)$$

$E_{11}$  geeft de kans op raken van de bodem indien het schip onder golfcondities 'i' de geulvaart uitvoert. De kans dat een vaart onder deze condities wordt uitgevoerd is gelijk aan het produkt van de kans dat het maatgevende schip in de geul is,  $p(s)$ , en de kans dat de golfconditie 'i' optreedt,  $P\{\sigma_{e1}, N_1\}$ . Deze laatste kans is gelijk aan  $P\{\sigma_{11}, N_1\}$ . Immers  $\sigma_e$  is constant zodat met (7.3) bovenstaande gelijkheid gevonden wordt.

$p(s)$  = aantal geulvaarten per jaar / aantal mogelijke geulvaarten per jaar

voor Monrovia geldt:  $p(s) = 160/705 = 2.27 \cdot 10^{-4}$ .

De kans op voorkomen van een combinatie van  $N$  en  $\sigma_e$ ,  $P\{\sigma_{e1}, N_1\}$ , is met behulp van de kansverdeling van  $\sigma_1$  te bepalen, zie bijlage 4.2. De resultaten van de berekeningen worden in bijlage 7.1 gegeven.

De kans dat een schip onder de golfcondities 'i' een geulvaart uitvoert en daarbij de bodem raakt, is nu te bepalen:

$$E_{21} = E_{11} * p(s) * P\{\sigma_{e1}, N_1\} \quad (7.9)$$

De kans op raken bij een geulvaart tijdens een willekeurige hoog water periode laat zich bepalen door sommatie van de kansen  $E_{21}$ , dus

$$E_3 = \sum E_{21} \quad (7.10)$$

In deze kans  $E_3$  zijn ook combinatie's opgenomen met een hoge kans op raken bij een geulvaart, corresponderend met een hoge  $E_{11}$  waarde.

Op dit punt moet de berekening verfiind worden. Een kapitein zal namelijk, indien de kans op raken bij bepaalde golfcondities een zekere norm te boven gaat, besluiten niet uit te varen. Ook is het in het belang van de havenmeester dergelijke risicovolle geulvaarten af te raden. Door het in voorkomende gevallen ontraden van de geulvaart, i.v.m. verzekeringsclausule's zal de schipper in een dergelijk geval niet uitvaren, verandert de waarde van  $E_{\Sigma}$ . De waarde van  $E_{\Sigma}$  wordt nu verkregen door die  $E_{21}$  waarden te sommeren waarvan de bijbehorende  $E_{11}$  waarde de gestelde norm niet overschrijdt. De grootte van de aanvaardbaar geachte kans op raken per vaart,  $E_{11}$ , en ook van de toelaatbare raakkans per jaar,  $E_{\Sigma}$ , is afhankelijk van de mogelijke gevolgen van deze gebeurtenis.

De gevolgen worden in hoge mate bepaald door de aard van de bodemgesteldheid, rots, zand, of modder en het karakter van de door het maatgevende schip vervoerde lading, bijv. explosief, sterk vervuilend, etc. De maatgevende schepen te Monrovia zijn geladen met ijzererts, een 'ongevaarlijke' lading. Tevens is er sprake van een zandige bodem zodat de gevolgen van een eventueel raken beperkt zullen blijven. In geval van een bodemvrijheid gelijk aan nul of iets kleiner dan nul (hierbij moet gedacht worden aan circa 30 cm.) zal de schade beperkt blijven tot schade aan het schilderwerk van de scheepsbodem. Het schip vlakt in het onderhavige geval als het ware de toppen van de zandribbels af.

Op grond van de in het algemeen bescheiden gevolgen bij het raken van de bodem wordt een kans op raken voor zowel  $E_{11}$  als  $E_{\Sigma}$  van  $10^{-2}$  aanvaardbaar geacht en als norm aangehouden. De optimale waarde van de toelaatbaar geachte kans op raken van de bodem kan bepaald worden door de optimalisatieberekening (zie hoofdstuk 8) voor verschillende waarden van  $E_{11}$  en  $E_{\Sigma}$  uit te voeren.

Met behulp van de in dit hoofdstuk gegeven relatie's worden 5 alternatieve geuldiepten aan bovenstaande normen getoetst.



## -Berekening.

De berekeningen worden voor vijf geuldiepten uitgevoerd te weten 19 m, 19.5 m, 20 m, 21 m en 22 m. Uitgangspunt van de berekening is de norm  $E_{11} \leq 10^{-2}$ . Er wordt aangenomen dat geulvaarten met een grotere kans op raken niet uitgevoerd worden. Van de wel uitgevoerde geulvaarten is de waarde van  $E_3$  bepaald.

Allereerst wordt met vergelijking (7.8) de maximaal toelaatbare standaardafwijking van de bodemvrijheid berekend:

$$E_{11} = \{1 - [1 - \exp(-\bar{E}/\sigma_e)^2/2]\} N_1 \quad (7.8)$$

met  $E_{11, \max} = 10^{-2}$  volgt dan:

$$(\sigma_{e, \max})^2 = -\bar{E}^2 / 2 \ln [1 - (1 - 10^{-2})^{1/N_1}] \quad (7.11)$$

De bepaling van  $\sigma_{e, \max}$  is uitgevoerd voor het grootste en het kleinste aantal extremen,  $N_1$ . De verschillen tussen de hieruit resulterende  $\sigma_{e, \max}$  waarden zijn klein. Besloten is daarom de kleinste  $\sigma_{e, \max}$  waarde (behorend bij het grootste aantal extremen) aan te houden. Met (7.3) is vervolgens de bijbehorende maximaal toelaatbare standaardafwijking van de verticale scheepsbeweging,  $\sigma_{1, \max}$ , berekend.

$$(\sigma_e)^2 = (\sigma_B)^2 + (\sigma_x)^2 \quad (7.3)$$

$$\sigma_B = \text{constant} = 0.53 \text{ m}$$

De resultaten zijn in tabel 7.1 opgenomen.

h cm	$\bar{e}$ [m]	$N_s$ -	$E_{11}$ -	$\sigma_{max}$ [m]	$\sigma_{Imax}$ [m]	$P\{\sigma_I > \sigma_{Imax}\}$ -
19	3.15	114	$10^{-2}$	0.73	0.48	$983 \cdot 10^{-4}$
19	3.15	179	$10^{-2}$	0.71	0.48	$983 \cdot 10^{-4}$
19.5	3.65	114	$10^{-2}$	0.84	0.64	$350 \cdot 10^{-4}$
19.5	3.65	179	$10^{-2}$	0.83	0.64	$350 \cdot 10^{-4}$
20	4.15	114	$10^{-2}$	0.96	0.78	$208 \cdot 10^{-4}$
20	4.15	179	$10^{-2}$	0.94	0.78	$208 \cdot 10^{-4}$
21	5.15	114	$10^{-2}$	1.19	1.06	$13 \cdot 10^{-4}$
21	5.15	179	$10^{-2}$	1.16	1.06	$13 \cdot 10^{-4}$
22	6.15	114	$10^{-2}$	1.42	1.28	$0.4 \cdot 10^{-4}$
22	6.15	179	$10^{-2}$	1.39	1.28	$0.4 \cdot 10^{-4}$

tabel 7.1: De maximaal toelaatbare waarde van  $\sigma_e$ .

De laatste kolom van de tabel geeft de kans dat de maximaal toelaatbare waarde van  $\sigma_I$  overschreden wordt (zie ook tabel 4.2), met andere woorden de kans dat er wegens de golfcondities geen geulvaart zal plaats vinden. (Omdat  $\sigma_e$  een constante waarde heeft is dit tevens de kans dat  $\sigma_e$  overschreden wordt.)

Het feit dat niet onder alle golfcondities geulvaart mogelijk is, beïnvloed de waarde van de kans dat het maatgevende schip in de geul is,  $p(s)$ . Het aantal mogelijke geulvaarten per jaar, is door de genoemde uitsluitingen kleiner dan 705 (het aantal hoog waters per jaar). De waarde van  $p(s)$  neemt hierdoor dus toe:

$$p(s) = (160/705) * (1 - P\{\sigma_I > \sigma_{Imax}\})^{-1} \quad (7.12)$$

Tabel 7.2 geeft voor de 5 geuldiepten de waarde van  $p(s)$ .

h [m]	$P\{\sigma_1 > \sigma_{1max}\}$ -	$p(s)$ -
19	$983 \cdot 10^{-4}$	$2.52 \cdot 10^{-1}$
19.5	$350 \cdot 10^{-4}$	$2.35 \cdot 10^{-1}$
20	$208 \cdot 10^{-4}$	$2.32 \cdot 10^{-1}$
21	$13 \cdot 10^{-4}$	$2.27 \cdot 10^{-1}$
22	$0.4 \cdot 10^{-4}$	$2.27 \cdot 10^{-1}$

tabel 7.2: Kans op maatgevend schip in de geul,  $p(s)$ .

In tabel 7.1 is bij een toelaatbare kans op raken per vaart,  $E_{11}$ , van  $10^{-2}$ , de maximaal toelaatbare standaardafwijking van de bodemvrijheid bepaald. Met relatie (7.8) is voor  $\sigma_{\bullet}$  waarden kleiner dan  $\sigma_{max}$  de waarde van  $E_{11}$  berekend. Deze berekening is uitgevoerd voor de grenzen van de in bijlage 7.1 gegeven  $\sigma_{\bullet}$  klassen.

De kans dat het schip onder golfcondities 'i' een geulvaart uitvoert en daarbij de bodem raakt wordt door (7.9) gegeven.

$$E_{21} = E_{11} * p(s) * P\{\sigma_{\bullet 1}, N_{11}\} \quad (7.9)$$

Met deze relatie is, voor de in bijlage 7.1 gegeven  $\sigma_{\bullet}$  klassen, de waarde van  $E_{21}$  bepaald. De hierbij gebruikte waarde van  $E_{11}$  is berekend met de bovengrens van de betreffende  $\sigma_{\bullet}$  klasse. De aldus bepaalde waarde van  $E_{11}$  en ook van  $E_{21}$  is dus te groot. De berekende  $E_{21}$  waarden blijken zeer klein te zijn zodat het niet nodig is de berekening te verfijnen, zie tabel 7.3.

Uit de in de tabel 7.3 gegeven resultaten blijkt dat de kans op raken bij een geulvaart, voor alle beschouwde geuldiepten ruimschoots onder de gestelde norm,  $E_{21} < 10^{-2}$ , blijft. Dit resultaat is voor een deel een gevolg van het feit dat per jaar slechts 160 maatgevende schepen van de geul gebruik maken.

$E_{ic} \cdot 10^{-2}$	N	$\sigma_e [m]$									
		059		073		092		113		125	
		$E_{ic}$	$E_{2ic}$	$E_{ic}$	$E_{2ic}$	$E_{ic}$	$E_{2ic}$	$E_{ic}$	$E_{2ic}$	$E_{ic}$	$E_{2ic}$
$h = 19m$ $\sigma_e \max = 0,71m$ $\bar{e} = 31,5m$ $p(s) = 2,35 \cdot 10^{-1}$	179 149 130 114	$7,2 \cdot 10^{-8}$ $6 \cdot 10^{-8}$ $5,2 \cdot 10^{-8}$ $4,6 \cdot 10^{-8}$	$4,3 \cdot 10^{-10}$ $1,5 \cdot 10^{-9}$ $8,2 \cdot 10^{-10}$ $0,6 \cdot 10^{-10}$			$E_{ic} = 10^{-2}$ $\sigma_e = 0,71m$ $p(0,59 \leq \sigma_e < 0,73) = 188710^{-4}$ $E_{2ic} = 4,8 \cdot 10^{-4}$ $E_3 = 4,8 \cdot 10^{-4}$					
$h = 19,5m$ $\sigma_e \max = 0,83m$ $\bar{e} = 3,65m$ $p(s) = 2,35 \cdot 10^{-1}$	179 149 130 114	- - - -	- - - -	$5,7 \cdot 10^{-4}$ $5,5 \cdot 10^{-4}$ $4,8 \cdot 10^{-4}$ $4,2 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-6}$ $1,3 \cdot 10^{-5}$ $7,6 \cdot 10^{-6}$ $5,8 \cdot 10^{-7}$	$E_{ic} = 10^{-2}$ $\sigma_e = 0,83m$ $p(0,73 \leq \sigma_e < 0,83m) = 63310^{-4}$ $E_{2ic} = 1,5 \cdot 10^{-4}$ $E_3 = 1,7 \cdot 10^{-4}$					
$h = 20m$ $\sigma_e \max = 0,94m$ $\bar{e} = 4,15m$ $p(s) = 2,32 \cdot 10^{-1}$	179 149 130 114	- - - -	- - - -	$1,7 \cdot 10^{-5}$ $1,4 \cdot 10^{-5}$ $1,2 \cdot 10^{-5}$ $1,1 \cdot 10^{-5}$	$9,5 \cdot 10^{-8}$ $3,2 \cdot 10^{-7}$ $1,8 \cdot 10^{-7}$ $1,4 \cdot 10^{-8}$	$E_{ic} = 10^{-2}$ $\sigma_e = 0,94m$ $p(0,73 \leq \sigma_e < 0,92) = 76910^{-4}$ $E_{2ic} = 1,8 \cdot 10^{-4}$ $E_3 = 1,8 \cdot 10^{-4}$					
$h = 21m$ $\sigma_e \max = 1,16m$ $\bar{e} = 5,15m$ $p(s) = 2,27 \cdot 10^{-1}$	179 149 130 114	- - - -	- - - -	$3,6 \cdot 10^{-5}$ $3 \cdot 10^{-5}$ $2,6 \cdot 10^{-5}$ $2,3 \cdot 10^{-5}$	$2,6 \cdot 10^{-7}$ $2 \cdot 10^{-7}$ $2,7 \cdot 10^{-8}$	$E_{ic} = 10^{-2}$ $\sigma_e = 1,16m$ $p(0,92 \leq \sigma_e < 1,13) = 19410^{-4}$ $E_{2ic} = 4,4 \cdot 10^{-5}$ $E_3 = 4,4 \cdot 10^{-5}$					
$h = 22m$ $\sigma_e \max = 1,39m$ $\bar{e} = 6,15m$ $p(s) = 2,27 \cdot 10^{-1}$	179 149 130 114	- - - -	- - - -	- - - -	- - - -	$7,2 \cdot 10^{-5}$ $6 \cdot 10^{-5}$ $5,2 \cdot 10^{-5}$ $4,6 \cdot 10^{-5}$	$9,9 \cdot 10^{-4}$ $8,3 \cdot 10^{-4}$ $7,3 \cdot 10^{-4}$ $6,4 \cdot 10^{-4}$	$9,9 \cdot 10^{-4}$ $8,3 \cdot 10^{-4}$ $7,3 \cdot 10^{-4}$ $6,4 \cdot 10^{-4}$	$5,9 \cdot 10^{-9}$ $1,8 \cdot 10^{-7}$ $8 \cdot 10^{-8}$	$E_{2ic} = 9,1 \cdot 10^{-8}$ $E_3 = 6,4 \cdot 10^{-7}$	

tabel 7.3 Raakkansen geulen

Nogmaals de waarde van  $E_s$  is berekend met als uitgangspunt: de geulvaart vindt uitsluitend plaats bij hoog water en onder golfcondities waarbij de kans op raken per vaart niet groter is dan  $10^{-2}$ ,  $E_{s1} \leq 10^{-2}$ . Als gevolg hiervan moet er enige malen per jaar een geulvaart uitgesteld worden. Het gemiddeld aantal keren per jaar dat dit het geval is kan bepaald worden met vergelijking (3.1).

$$u = p * N \quad (3.1)$$

met  $u$  is het gemiddeld aantal uitgestelde geulvaarten per jaar

$N$  is het aantal vaarten per jaar

$p$  is de kans dat  $E_{s1} > 10^{-2}$ .

De resultaten voor de 5 geuldiepten zijn opgenomen in tabel 7.4 .

h [m]	$E_s$ -	u -
19	$4.8 \cdot 10^{-4}$	15.7
19.5	$1.7 \cdot 10^{-4}$	5.6
20	$1.8 \cdot 10^{-4}$	3.3
21	$4.4 \cdot 10^{-5}$	0.2
22	$6.4 \cdot 10^{-7}$	0.01

$E_s$  is de kans op raken van de bodem.

$u$  is het aantal uitgestelde geulvaarten per jaar.

Tabel 7.4: Overzicht geulparameters.

Alvorens het kostenaspect nader te beschouwen, de eigenlijke geuloptimalisatie uit te voeren, wordt nu het eerder genoemde bestuurbaarheids criterium onderzocht.

7.4 De bestuurbaarheid van het schip.

Bij een te kleine bodemvrijheid wordt de bestuurbaarheid van het schip onvoldoende. Als gevolg van de verstoorde aanstroming kan het schip uit het roer lopen. De tweede eis die aan de bodemvrijheid gesteld moet worden is dus dat deze zo groot is dat slechts voor korte tijd de stureigenschappen onvoldoende zijn, dit opdat de geulvaart veilig uitgevoerd kan worden.

Bij een h/D verhouding kleiner dan 1.1 blijkt het schip onvoldoende bestuurbaar te zijn [19]. De bodemvrijheid bij een h/D verhouding gelijk aan 1.1 wordt  $e_{min}$  genoemd. Er geldt:

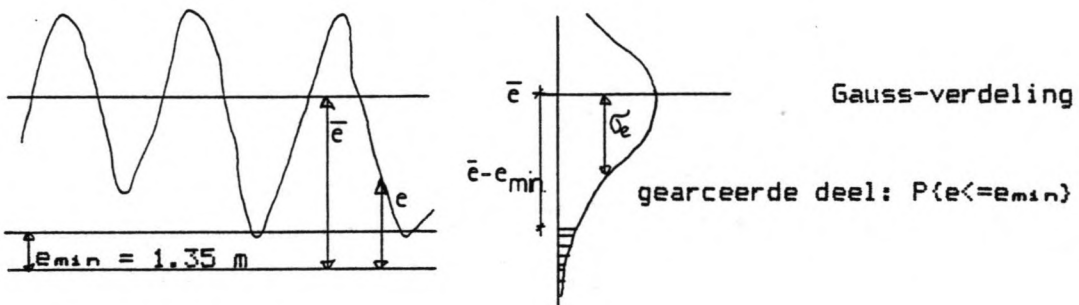
$$e_{min} = h - D - z \quad (7.13)$$

met  $z$  is de inzinking (hoofdstuk 4.2).

zodat  $e_{min} = 0.1 * D - z$

Voor Monrovia is  $D=16.5$  m en  $z=0.3$  m zodat,  $e_{min} = 1.35$  m.

Eerder is afgeleid dat het verloop van de momentane bodemvrijheid door de Gauss-verdeling beschreven kan worden. De kans dat de momentane bodemvrijheid,  $e$ , kleiner is dan  $e_{min} = 1.35$  m is met deze verdeling te bepalen.



Voor de 5 geuldiepten is, bij de in tabel 7.3 gegeven waarde van de maximaal toelaatbare standaardafwijking van de bodemvrijheid, de kans op overschrijding van  $e_{min}$  bepaald.

h [m]	e [m]	$\sigma_{e_{max}}$ [m]	$P(e < e_{min})$ -
19	3.15	0.48	57 $10^{-4}$
19.5	3.65	0.83	28 $10^{-4}$
20	4.15	0.94	14 $10^{-4}$
21	5.15	1.16	6 $10^{-4}$
22	6.15	1.39	3 $10^{-4}$

tabel 7.5: Overschrijdingskansen van  $e_{min}$ .

In geval van een geuldiepte van 19.5 m is de overschrijdingskans per gemiddelde periode van de scheepsbeweging gelijk aan  $28 \cdot 10^{-4}$ . Indien aangenomen wordt dat de gemiddelde periode van de verticale scheepsbeweging circa 12 s bedraagt (overeenkomend met de gemiddelde golfperiode), betekent bovenstaande kans dat globaal per periode  $28 \cdot 10^{-4} \cdot 12 = 3.4 \cdot 10^{-2}$ s de waarde van  $e_{min}$  overschreden wordt. Het is duidelijk dat er ten aanzien van de bestuurbaarheid van het schip gedurende de geulvaart voor alle 5 de geuldiepten geen enkel probleem bestaat.



## 8 Bepaling van de optimale geuldiepte.

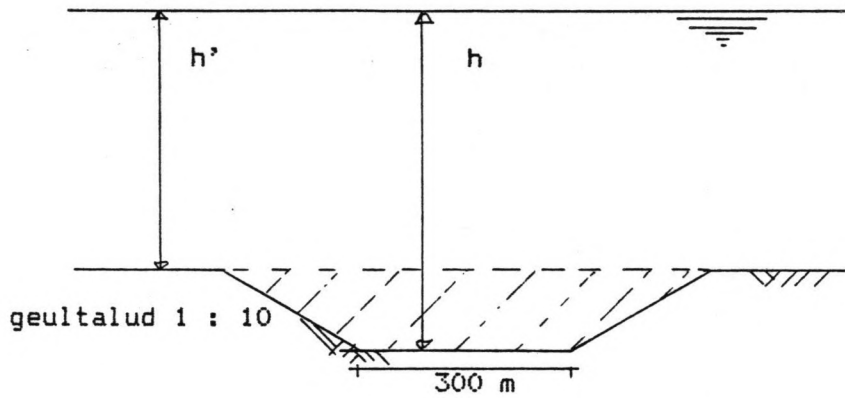
De optimale geuldiepte wordt gedefinieerd als zijnde die geuldiepte die over de levensduur van het projekt het goedkoopst is. De kosten van het projekt worden bepaald door de som van de schadekosten, de wachtgelden en natuurlijk de aanlegkosten. Voor de 5 geuldiepten zullen deze kosten bepaald worden en zal tevens de gevoeligheid van de oplossing onderzocht worden.

### 8.1 Aanlegkosten.

De aanlegkosten van de geul zijn zeer direct te berekenen door de hoeveelheid te verwijderen specie, uitgedrukt in  $m^3$ , te vermenigvuldigen met de eenheidsprijs per  $m^3$  van het baggerwerk. De eenheidsprijs wordt bepaald door een groot aantal factoren die de werksituatie bepalen. Genoemd kunnen worden de golf-, tij-, en stromingscondities ter plekke, de eigenschappen van het te baggeren materiaal, het te gebruiken baggerwerktuig, de eventuele mobilisatiekosten van het baggerwerktuig, de totaal te baggeren hoeveelheid specie, de bestemming van de specie, etc. Het is duidelijk dat de hoogte van de eenheidsprijs niet zonder meer is vast te stellen. Naast de genoemde werktechnische factoren speelt de situatie op de baggermarkt een grote rol bij de vaststelling van de aanneemsom.

Op grond van bovenstaande punten is besloten de baggerkosten voor een drietal eenheidsprijzen te bepalen. De gevoeligheid van de kostensom voor de baggerkosten kan aldus aangegeven worden.

Bepaling van de te baggeren hoeveelheid specie.



De te baggeren hoeveelheid per eenheid van geullengte is gelijk aan:

$$[ ( h-h' ) * 10 + 300 ] * ( h-h' ) = q \quad (8.1)$$

met  $h$  is de geuldiepte  
 $h'$  is de gemiddelde diepte langs de geul  
 $q$  is de te baggeren hoeveelheid per eenheid van geullengte

De totale hoeveelheid te baggeren specie is gelijk aan:

$$l * q = Q \quad (8.2)$$

met  $l$  is de geullengte(functie van de geuldiepte)

De hoeveelheid te baggeren specie en de aanlegkosten in geval van eenheidsprijzen van respectievelijk 4 ,7 , 10 gulden per  $m^3$  worden in tabel 8.1 gegeven.

h [m]	h' [m]	l [m]	Q [m <sup>3</sup> ]	aanlegkosten fl. [10 <sup>4</sup> ]		
				eenheidsprijs :		
				fl 4,-	fl 7,-	fl 10,-
19	14	3800	6.7 10 <sup>4</sup>	26.6	46.6	67
19.5	14.25	4000	7.4 10 <sup>4</sup>	29.6	51.8	74.0
20	14.5	4200	8.2 10 <sup>4</sup>	32.8	57.4	82.0
21	15	4600	9.9 10 <sup>4</sup>	39.8	69.6	99.4
22	15.5	5000	11.9 10 <sup>4</sup>	47.4	83	118.6

tabel 8.1: Baggerkosten van de geul.

opmerking: h is gelijk aan de gemiddelde geuldiepte. Aangenomen is dat het bodemverloop normaal verdeeld is met een standaardafwijking  $\sigma = 0,53$  m. Indien de baggertoleranties groter zijn dan aangenomen moet de geul met een overdiepte worden aangelegd.

De jaarlijkse onderhoudskosten aan de geul worden in deze vergelijking niet meegenomen. Aangenomen is dat deze voor de beschouwde geuldiepten vrijwel gelijk zijn. Voor de uit de optimalisatieberekening volgende geuldiepte wordt in hoofdstuk 9 de jaarlijkse aanzanding bepaald, en de gekapitaliseerde onderhoudskosten per jaar gegeven.

## 8.2 Schadekosten.

De jaarlijkse schadekosten worden door drie componenten bepaald:

1. het aantal malen dat per jaar de bodem geraakt wordt.
2. de omvang van de schade in geval van raken.
3. de present worth factor (p.w.f.); een vermenigvuldigingsfactor die het mogelijk maakt ongelijksoortige kosten als aanlegkosten en jaarlijks terugkerende kosten te vergelijken.

ad 1.

De kans op raken van de bodem bij een geulvaart onder golfcondities 'i' is gelijk aan  $E_{1i}$ . De kans dat de betreffende golfcondities optreden is ook bekend:  $P(\sigma_i, N_i)$ , zie bijlage 7.1 ( $\sigma_i$  is een functie van  $H_{0i}$ , T en  $\emptyset$  zie hoofdstuk 4). Omdat bij de golfcondities met  $E_{1i} > 10^{-2}$  niet wordt gevaren, moet op de kans  $P(\sigma_i, N_i)$  een correctie worden toegepast. De correctiefactor is gelijk aan (zie (7.12)):

$$\text{factor} = (1 - P\{E_{1i} > 10^{-2}\})^{-1}$$

Het gemiddeld aantal geulvaarten dat per jaar onder die golfcondities plaats vindt is dan:

$$n_i = N * P(\sigma_i, N_i) * (1 - P\{E_{1i} > 10^{-2}\})^{-1} \quad (8.3)$$

met N is het totaal aantal geulvaarten per jaar.

Het gemiddeld aantal keren per jaar dat tijdens deze geulvaarten de bodem geraakt wordt is:

$$A_i = n_i * E_{1i} \quad (8.4)$$

met (8.3) en (7.9) en (7.12) krijgen we:

$$A_i = 705 * E_{2i}$$

Sommatie van  $A_i$  voor alle golfcondities waarbij geulvaart mogelijk is, geeft het gemiddeld aantal keren per jaar dat de bodem geraakt wordt. Met (7.10) volgt dan:

$$A_{\text{tot}} = E_3 * 705 \quad (8.5)$$

De waarden van  $E_3$  zijn opgenomen in tabel 7.4, de waarden van  $A_{\text{tot}}$  zijn in tabel 8.3 te vinden.

ad.2

De schade die bij het raken van de bodem ontstaat is moeilijk te kapitaliseren. Er bestaan grote verschillen tussen de mogelijke gevolgen van het raken:

- geen noemenswaardige gevolgen: het schip kan haar weg ongestoord vervolgen.
- het ongunstigste geval : stranding van het schip in de geul, schip en lading gaan verloren en de haven is tot de berging van het wrak onbereikbaar.

De nieuw waarde van een ertscarrier van 150.000 dwt bedraagt circa 80 miljoen gulden. De economische schade die geleden wordt indien de haven enige tijd geen schepen kan ontvangen is moeilijk aan te geven.

De schade aan het milieu kan in dit geval verwaarloosd worden.

Dankzij de aanwezigheid van een zandige bodem zal er in het merendeel van de gevallen bij raken geen noemenswaardige schade optreden. De gemiddelde schadekosten per jaar worden daarom op 1 miljoen gulden begroot.

ad.3

De jaarlijkse schadekosten moeten worden herleid naar hun contante waarde. De contante waarde is het bedrag dat, indien het gedurende de levensduur van het projekt tegen een rentepercentage  $i$  wordt weggezet, juist gelijk is aan de som van de jaarlijkse schadekosten over de levensduur van het projekt. De contante waarde is gelijk aan het produkt van de jaarlijkse schadekosten en de p.w.f.

$$p.w.f. = \frac{(1+i)^d - 1}{(1+i)^d * i} \quad (8.7)$$

met  $i$  is het rentepercentage  
 $d$  is de levensduur van het project

aangenomen is dat  $i = 10\%$   
 $d = 50$  jaar

zodat  $p.w.f. = 9.91$

De contante waarde van de schadekosten is dus gelijk aan:

$$S_{contant} = p.w.f. * A_{tot} * \text{Schadebedrag}$$

h [m]	p.w.f.	$A_{tot}$	schadebedrag	kontante waarde
19	9.91	$2.7 \cdot 10^{-1}$	$10^6$	$2.6 \cdot 10^6$
19.5	9.91	$1.2 \cdot 10^{-1}$	$10^6$	$1.2 \cdot 10^6$
20	9.91	$1.3 \cdot 10^{-1}$	$10^6$	$1.3 \cdot 10^6$
21	9.91	$3.1 \cdot 10^{-2}$	$10^6$	$0.3 \cdot 10^6$
22	9.91	$4.15 \cdot 10^{-4}$	$10^6$	-

tabel 8.3: Overzicht contante waarde schadekosten.

### 8.3 Wachtgeldkosten.

De jaarlijkse wachtgeldkosten worden bepaald door het aantal keren per jaar dat een ertscarrier het vertrek met het oog op de golfcondities moet uitstellen. De hieruit voortkomende wachtgeldkosten kunnen met behulp van de p.w.f. wederom herleid worden tot de jaarlijkse wachtgeldkosten.

aantal keren per jaar dat geen geulvaart kan plaats vinden.

In hoofdstuk 7 is gesteld dat onder golfcondities waarbij de kans op raken per vaart groter is dan  $10^{-2}$ , de geulvaart wordt uitgesteld. De kans op jaarbasis dat de geulvaart uitgesteld moet worden wordt verkregen door sommatie van de kans van optreden van de desbetreffende golfcondities:  $P\{E_{ii} > 10^{-2}\}$ . Deze kans is voor iedere geulvaart gelijk. Per jaar worden er 160 geulvaarten uitgevoerd. Het gemiddeld aantal geulvaarten per jaar dat uitgesteld dient te worden is dan:

$$W = 160 * P\{E_{ii} > 10^{-2}\} \quad (8.9)$$

zie tabel 7.4 laatste kolom

wachtgeldkosten.

De kosten, welke door het niet uit kunnen varen worden veroorzaakt, bestaan uit de bedrijfskosten van de ertscarrier en het renteverlies over de lading. Een op grond van cijfers van het P.I.A.N.C. (1980) gemaakte schatting leidt tot waarden van de totale wachtgeldkosten van circa 1800 gulden per uur. De schepen moeten een tijperiode wachten. De totale kosten per keer wachten bedragen dan, op prijsniveau van 1984, circa 25.000 gulden.



de present worth factor.

De waarde van de p.w.f. is uiteraard gelijk aan de bij de schadekosten bepaalde waarde, p.w.f. = 9.91.

h [m]	p.w.f. -	W -	wachtgeldkosten per tijperiode	contante waarde wachtgelden
19	9.91	15.7	25.000	3.9 10 <sup>6</sup>
19.5	9.91	5.6	25.000	1.4 10 <sup>6</sup>
20	9.91	3.3	25.000	0.8 10 <sup>6</sup>
21	9.91	0.2	25.000	-
22	9.91	-	25.000	-

tabel 8.3: Wachtgeldkosten.

#### 8.4 De optimale geuldiepte.

Bij de bepaling van de optimale geuldiepte zijn de onderhoudsbaggerkosten vooralsnog buiten beschouwing gelaten. Aangenomen wordt dat deze kosten voor de alternatieve geuldiepten vrijwel gelijk zijn. De optimale geuldiepte wordt bepaald aan de hand van de laagste som van bagger-, schade- en wachtgeldkosten.

Uit tabel 8.4 blijkt dat de kosten som sterk afhankelijk is van de eenheidsprijs van het baggerwerk. Bij een eenheidsprijs van 4 gulden is deze som voor een geuldiepte van 19.5 m iets lager dan voor een geul met een diepte van 19 m. Bij hogere eenheidsprijzen is de geul van 19 m. het goedkoopst. Het verschil in totale kosten tussen de geuldiepten van 19 m en 19.5 m is, in geval van een eenheidsprijs van 4 gulden, gering. Het is daarom interessant de gevoeligheid van de totale kosten voor de grootte van schade en wachtgeldkosten te onderzoeken.

De wachtgeldkosten zijn vrij exact bekend, daarom zal alleen de invloed van de schadekosten onderzocht worden.

In geval dat de gemiddelde schadekosten per keer raken groter

zijn dan het eerder genoemde bedrag van 1 miljoen gulden nemen de schadekosten voor de geul van 19.5 m minder toe dan die voor de geul van 19 m. diep. Hiertegenover staat dat de gebruikte kans op raken van de bodem per jaar door de toegepaste berekeningswijze (zie pagina 85) te groot is; de werkelijk optredende schadekosten zullen lager zijn. Het verschil in de kostensom voor de geuldiepten van 19 en 19.5 m. zal daardoor marginaal blijven. Op grond van het voor Liberia zwaarwegende argument van lage aanlegkosten wordt voor een geuldiepte van 19 m. gekozen.

Bij een geuldiepte kleiner dan 19 m. nemen zowel de schade als de wachtgeldkosten sterk toe, zodat ondanks de lagere aanlegkosten de som van alle kosten hoger zal zijn dan voor de geuldiepten van 19 en 19.5 m. Bovendien moet bedacht worden dat bij een geuldiepte van 19 m al in 10% van de geulvaarten tot uitstel moet worden besloten. Bij een ondiepere geul zal dit cijfer aanmerkelijk hoger zijn. Dit laatste is in verband met de eisen die door de afnemers (hoogovens etc.) aan de continuïteit van de ertsaanvoer gesteld worden ontoelaatbaar.

In hoofdstuk 9 is de aanzanding bepaald welke bij de uiteindelijk gekozen geuldiepte te verwachten is. De hieruit voortkomende gekapitaliseerde onderhoudsbaggerkosten worden in tabel 8.4 gegeven. De som van deze kosten en bovengenoemde kosten geeft de totaal kosten van de geul.

De totaal kosten van het projekt worden verkregen door de baggerkosten van het havenbekken en de kosten verbonden aan het inkorten van de noordelijke havendam bij de totaal kosten van de geul te voegen. Voor deze laatste twee posten worden de door Smole en van de Vijver [1] genoemde waarden aangehouden, zie tabel 8.4. De totaal kosten van de havenaanpassing bedragen dan circa 100 miljoen gulden. Gezien de te verwachten besparingen op de transportkosten van het ijzererts, circa 45 miljoen per jaar [1], is dit een alleszins verantwoorde investering.

geuldiepte [m]	aanlegkosten [f]	prijs/m <sup>3</sup> [f]	contante waarde wachtgeldkosten [f]	contante waarde schadekosten [f]	som [f]
19	26.6	4	3.9	2.6	33.1
	46.6	7			53.1
	67	10			73.5
19.5	29.6	4	1.4	1.2	32.2
	51.8	7			54.4
	74	10			76.6
20	32.8	4	0.8	1.3	34.9
	57.4	7			59.5
	82	10			84.1
21	39.8	4	0.05	0.3	40.1
	69.6	7			69.9
	99.4	10			99.7
22	47.4	4	-	-	47
	83	7			83
	118.6	10			118

tabel 8.4 Overzicht kosten geul in miljoenen gulden.

De gekapitaliseerde onderhoudskosten zijn gelijk aan:

p.w.f. \* jaarlijkse geulaanzanding [m<sup>3</sup>] \* eenheidsprijs =  
 $9.91 * (350000 + 200000) * 4 = 20$  miljoen gulden.

De kosten verbonden aan het baggeren van het havenbekken bedragen circa 35 miljoen, het inkorten van de noordelijke havendam kost ongeveer 10 miljoen gulden.[1]

De totaal kosten van het projekt bedragen dan circa 100 miljoen gulden.

## leidraad havenmeester.

De havenmeester heeft de verantwoording t.a.v. de verzameling van gegevens van de golfcondities in de vaargeul. Deze gegevens worden door gegeven aan de belanghebbenden; gezagvoerders, loodsen, etc. Op grond van de actuele golfgegevens geeft de havenmeester het advies om wel of niet uit te varen. Dit advies is gebaseerd op de toelaatbare kans op raken per vaart. Dit criterium is vastgelegd in de vorm van een diagram. In het diagram is op de verticale as de waterstand gegeven, de horizontale as geeft de significante golfhoogte. De lijnen in de figuur geven de combinaties van golfhoogte en waterstand waarbij de geulvaart nog juist toelaatbaar is, zie figuur 8.1.

De toelaatbare combinaties van waterstand en golfhoogte zijn bepaald met de vergelijkingen (7.1), (7.3) en (7.8).

$$\bar{e} = h + \bar{L} - D - z \quad (7.1)$$

$$(\sigma_e)^2 = (\sigma_B)^2 + (\sigma_I)^2 \quad (7.3)$$

$$E_{11} = 1 - \{ 1 - \exp [-\bar{e} / \sigma_e]^2 / 2 \} \quad (7.8)$$

Bij het opstellen van figuur 8.1 is er van uit gegaan dat de havenmeester te Monrovia slechts over beperkte golfgegevens beschikt. Alleen de golfhoogte wordt bekend verondersteld. Bij de bepaling van de toelaatbare significante golfhoogte wordt daarom voor de verhouding standaardafwijking verticale scheepsbeweging- significante golfhoogte de laagste waarde aangehouden:

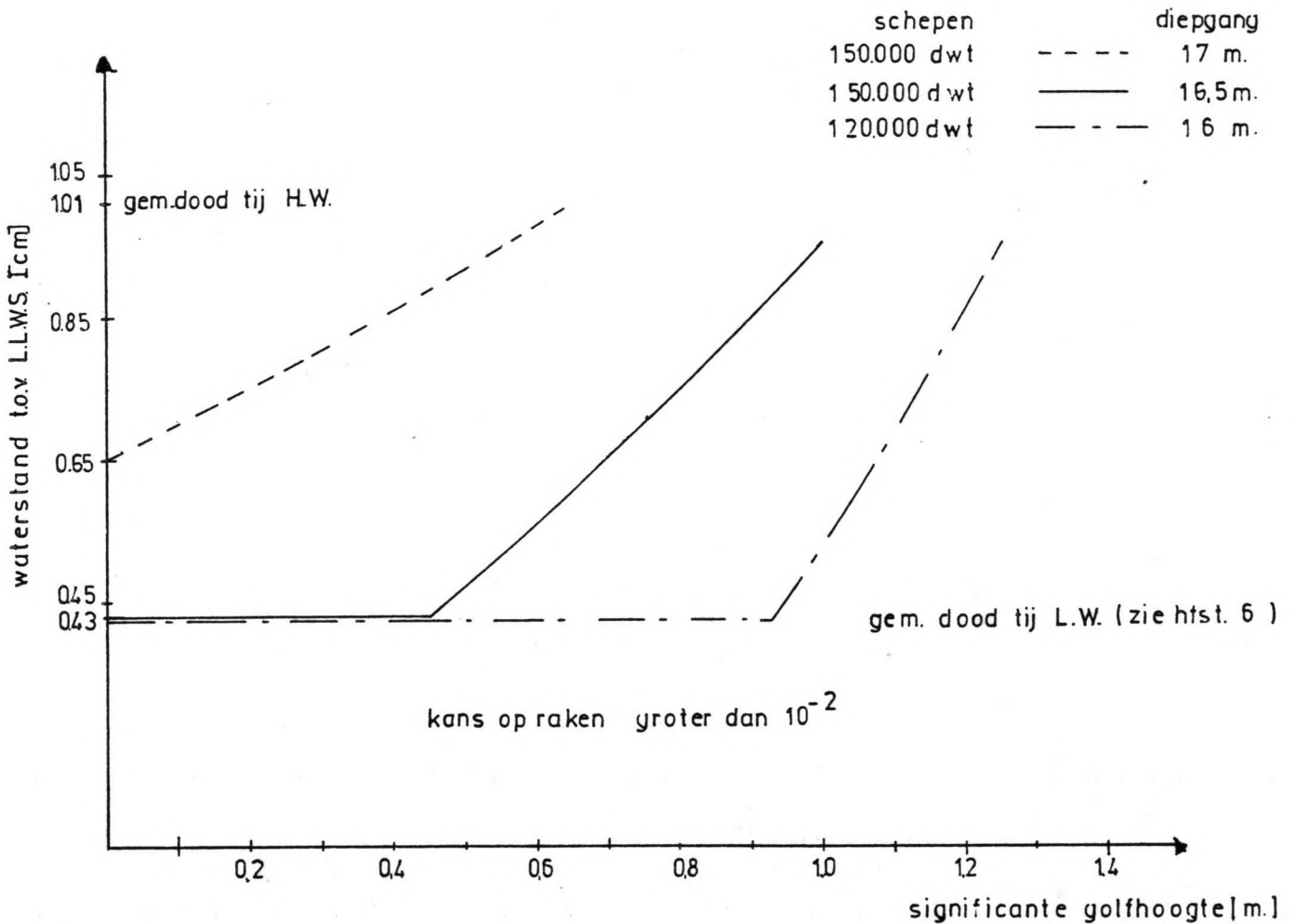
$$\sigma_I / H_B = 0.5. \text{ (zie tabel 4.4 )}$$

De overige gebruikte gegevens bij de bepaling van de figuur zijn:

$$\begin{aligned} h &= 19 \text{ m} \\ z &= 0.3 \text{ m (inzinking)} \\ \sigma_B &= 0.53 \text{ m (standaardafwijking van de bodem)} \end{aligned}$$

Geuldiepte 19 meter

Toelaatbare kans opraken bodem per vaart is  $10^{-2}$



figuur 8.1: Geulvaart diagram.

ter illustratie: de maximaal toelaatbare significante golfhoogte in geval van een geladen ertscarrier van 120.000 dwt bedraagt bij een waterstand van +0.75 m circa 1.15 m.

## 9 Geulaanzanding.

### 9.1 Algemeen.

In de kustzone vindt er onder invloed van golven en stroming sedimenttransport plaats. Bij de vaargeul reduceert, als gevolg van de groter wordende waterdiepte, de invloed van golven en stromen en de transportcapaciteit neemt hier af. Dit resulteert in het neerslaan van sediment in het bovenstroomse deel van de geul. Bij het benedenstroomse geultalud neemt de stroomsnelheid en ook de transportcapaciteit weer toe. Als gevolg hiervan zal erosie optreden. De mate waarin dit alles gebeurt is afhankelijk van de stroomsnelheid, het aanwezige sediment, (afmetingen, soortelijk gewicht), de geuldimensies, golfcondities etc. Bij de geulaanzanding kunnen twee bijdragen onderscheiden worden:

a de bijdrage van het langtransport in de brandingszone (onder langtransport wordt het transport evenwijdig aan de kust verstaan). b Het langtransport dat onder invloed van golven en stromen op dieper water plaatsvindt.

ad a : Het langtransport in de brandingszone.

Golven kunnen een verandering van de gemiddelde waterstand en de gemiddelde waterbeweging induceren. De invloed van golven op de gemiddelde toestand wordt beschreven door de als "Radiation Stress" bekend staande theorie. Met deze theorie is af te leiden dat de, in de brandingszone brekende golven, een langsstroom kunnen induceren. De richting van deze langsstroom wordt bepaald door de hoek waaronder de golven op de kust aankomen.

Te Monrovia domineren golven uit zuidwestelijke richting, dit resulteert in een naar het noorden gericht langstransport. (De invloed van de aanwezige oceaanstroom, naar het zuiden gericht, is in de brandingszone klein.) Dit langstransport wordt ter plaatse van de zuidelijke havendam onderbroken. (zie figuur 9.1) Ten zuiden van de dam leidt dit tot aanzandingen en dus tot een aangroeiende kust. Deze kust is inmiddels zover aangegroeid dat er in de huidige situatie weer transport om de kop van de havendam plaatsvindt. Voorbij de kop is er sprake van diep water; de golven breken hier niet en de aandrijving van het langstransport valt daardoor weg. Ook nemen door de grotere waterdiepte de stroomsnelheden af. De transportcapaciteit neemt voorbij de kop sterk af en het aangevoerde sediment belandt in de geul.

Smole en van de Vijver [1] hebben dit deel van de aanzanding beschouwd. Het resultaat van genoemd onderzoek is dat in de jaren tachtig te Monrovia gerekend moet worden met een jaarlijkse geulaanzanding van circa 200.000 m<sup>3</sup>. Bovengrens van deze geulaanzanding is het totale langstransport, dit bedraagt circa 400.000 m<sup>3</sup> per jaar (in de huidige situatie slaat circa de helft van het langstransport neer tussen Cape Mesurado en de zuidelijke havendam, zie figuur 0.1)

ad b. Het langstransport op dieper water.

Ook buiten de brandingszone vindt er onder invloed van golven en stroming zandtransport plaats. In tegenstelling tot het onder a genoemde transport wordt de gemiddelde transportrichting hier bepaald door de tij- en oceaanstroming. De uit dit zandtransport resulterende geulaanzanding wordt in dit hoofdstuk bepaald. Hiertoe zijn allereerst de golf- en stromingscondities vastgesteld. Vervolgens is met een door Bijker [21] ontwikkeld geulsedimentatiemodel de jaarlijks te verwachten geulsedimentatie bepaald.



## 9.2 Golven en stroming.

## - golven

Het golfklimaat voor de haven van Monrovia is in hoofdstuk 2 beschreven. Voor de resultaten wordt verwezen naar de bijlage 2.1. Deze bijlage geeft van combinaties van golfhoogte, golfrichting en golfperiode de kans van optreden. De invloed van de golfcondities op de grootte van het zandtransport wordt in hoofdstuk 9.3 nader toegelicht.

## - stroming

De stroming voor de kust van de kust van Monrovia wordt bepaald door twee componenten; naast een getijstroom is er een oceaanstroom aanwezig. De continue oceaanstroom heeft een stroomrichting van noord naar zuid en een sterkte van circa 0.4 m/s (gemeten op circa 40 meter diep water). Van de getijstroom is gegeven dat deze groot genoeg is om de stroom voor de kust van richting te doen veranderen. Voor de amplitude van de getijstroom wordt daarom 0.6 m/s aangehouden. Tevens wordt aangenomen dat de stroom symmetrisch is en een sinusvormig verloop heeft. (zie ook het verticale getij, hoofdstuk 6) De gemiddelde stroomsnelheden op veertig meter diep water zijn gegeven. De stroomsnelheden langs de geul kunnen met behulp van de bewegingsvergelijking voor lange golven bepaald worden:

$$-\frac{\partial V}{\partial t} - V\frac{\partial V}{\partial x} - g\frac{\partial h}{\partial x} = g\frac{V|V|}{C^2h} \quad (9.1)$$

met  $V$  is de stroomsnelheid  
 $x$  is de stroomrichting  
 $C$  is de Chezycoefficient  
 $C = 18 * \log(12 * h/r)$   
 $r$  is de bodemruwheid

de continuïteitsvergelijking luidt:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -h * \frac{\partial V}{\partial x} \quad (9.2)$$

- Bepaling oceaanstroming

In geval van de oceaanstroming is er sprake van een eenparige stroming. Vergelijking (9.1) reduceert dan tot :

$$-\partial h / \partial x = v * |v| / (C^2 * h) \quad (9.3)$$

Langs de geul (vaste x-waarde) geldt dan:

$$v * |v| / (C^2 * h) = \text{constant}$$

met  $h = 40$  meter  
 $v = 0.4$  m/s  
 $r = 0.06$  meter

wordt gevonden dat

$$v * |v| / (C^2 * h) = 8 * 10^{-7}$$

Met deze relatie is de stroomsnelheid op enige plaatsen langs de geul bepaald. (zie tabel 9.1)

- Bepaling getijstroom.

De voortplanting van de getijdegolf is met (9.1) en (9.2) te schrijven als:

$$\partial h / \partial x = -V \sqrt{C^2 h - 1/g} \partial V / \partial t + V / (g h) \partial h / \partial t \quad (9.4)$$

De term,  $V / (g h) \partial h / \partial t$ , kan in dit geval verwaarloosd worden. Langs de geul (vaste x-waarde) reduceert (9.4) tot:

$$-V \sqrt{C^2 h - 1/g} \partial V / \partial t = \text{constant.}$$

Met  $h = 40\text{m}$ ,  $\hat{V}_{\text{tj}} = 0.6\text{m/s}$  en  $r = 0.06\text{m}$  is deze constante te bepalen.

$$-\hat{V}_{\text{tj}} \sqrt{C^2 h - 1/g} / (C^2 h) = 1.8 \cdot 10^{-6}$$

De stroomsnelheid tengevolge van het getij is hiermee voor verschillende waterdiepten berekend, zie tabel 9.1.

waterdiepte [m]	oceanastroom [m/s]	amplitude getijstroom [m/s]
19	0.25	0.38
15	0.22	0.32
10	0.17	0.25

tabel 9.1: tij- en oceanastroom op verschillende waterdiepten.

De resulterende stroomsnelheid wordt verkregen door het krachtenevenwicht van bodemschuifspanning en de verhangkrachten van tij- en oceanastroming te beschouwen.

## 9.3 Zandtransport o.i.v. golven en stroming.

## - Bodemsnelheden.

Alvorens het zandtransport te bepalen, zal onderzocht worden wat de orde van grootte van de stromingskrachten moet zijn wil er zandtransport kunnen optreden. Gesteld wordt dat het evenwicht van een zich in rust bevindende korrel wordt verbroken indien:

$$F/G > \text{tg } \phi \quad (9.6)$$

met  $F$  is de door de stroming op korrel uitgeoefende kracht

$G$  is de t.g.v. de zwaartekrachtversnelling

$\text{tg } \phi$  is de hoek van inwendige wrijving

Een benadering van bovengenoemde krachten geeft :

$$(\tau \pi * D^2 / 4) / [(\rho_s - \rho) * g * \pi * D^3 / 6] > \text{tg } \phi \quad (9.7)$$

met  $\tau$  is de bodemschuifspanning

$\rho_s$  is de massadichtheid van het sediment

$\rho$  is de massadichtheid van het water

$D$  is de korreldiameter

$V$  is de gemiddelde stroomsnelheid

De kritieke snelheid wordt nu gedefinieerd als die snelheid waarbij het bovengenoemd evenwicht juist niet verbroken wordt. In geval van een uniforme stroming kan (9.7) geschreven worden als:

$$(V_{krist.})^2 = 2/3 * \text{tg } \phi * (\rho_s - \rho) / \rho * D * C^2 \quad (9.8)$$

Het verband tussen de gemiddelde snelheid en de snelheid zeer dicht bij de bodem wordt gegeven door:

$$V_t = (\sqrt{g} / (\kappa * C)) * V \quad (9.9)$$

met  $V_t$  is de bodemsnelheid  
 $\kappa$  is constante van von Karman (= 0.4)

met (9.9) en (9.8) volgt dan :

$$V_{t \text{ krit}} = 1/\kappa * \sqrt{2/3 * \text{tg } \phi * (\rho_s - \rho) / \rho * g * D} \quad (9.10)$$

De kritieke bodemsnelheid te Monrovia kan met (9.10) bepaald worden.

gegeven: $\kappa$	= 0.4	$V_{t \text{ krit.}} = 8.4 \text{ cm/s}$
$D$	= $183 * 10^{-6} \text{ m}$	
$(\rho_s - \rho) / \rho$	= 1.65	
$\phi$	= $30^\circ$	

Shields heeft aangenomen dat het Reynoldsgetal  $Re_* = V_* * D / \nu$  het stroombeeld rond de korrel beschrijft. De kritieke toestand (begin van beweging) wordt dan gegeven als een functie van dit getal:

$$(V_*)^2 / (g * D * \Delta) = f(Re_*)$$

Dit door Shields gegeven verband is experimenteel bepaald.

In geval van Monrovia met een gemiddelde korreldiameter gelijk aan  $D_{50} = 183 \cdot 10^{-6} \text{ m}$  wordt gevonden:

$$(V_*)^2 / (g \cdot D \cdot \Delta) = 0.05$$

$$\text{zodat met } (V_*)^2 = (V_t)^2 \cdot (\kappa)^2 \quad (9.11)$$

$$(V_{t \text{ krit.}})^2 = 0.05 \cdot \Delta \cdot g \cdot D / (\kappa)^2$$

$$V_{t \text{ krit.}} = 0.03 \text{ m/s.}$$

Deze laatste waarde zal worden aangehouden als zijnde de kritieke bodemsnelheid. De waarde van  $V_{t \text{ krit.}}$  geeft een aanduiding van de orde van grootte. Bedacht moet worden dat gerekend is met een gemiddelde stroomsnelheid, tengevolge van turbulentie treden snelheidsfluctuaties op waarbij de momentane snelheid belangrijk groter kan zijn dan de gemiddelde snelheid. Bij een gemiddelde bodemsnelheid van  $V_{t \text{ krit.}} = 0.03 \text{ m/s}$  zal dan ook zeker enig transport plaats vinden.

De door golven en stroming veroorzaakte momentane bodemschuifspanning is gelijk aan:

$$\tau_{cw} = \rho \cdot (\kappa)^2 \cdot (V_{tR})^2 \quad (9.12)$$

$V_{tR}$ , de resulterende momentane bodemsnelheid, wordt bepaald door de bijdragen van stroming en golven aan de bodemsnelheid vectorieel op te tellen. deze optelling geeft:

$$V_{tR} = \sqrt{(V_{t \text{ stroom}})^2 + (V_{t \text{ golf}})^2 + 2 \cdot V_{t \text{ stroom}} \cdot V_{t \text{ golf}} \cdot \sin \phi} \quad (9.13)$$

$\phi$  is de hoek tussen de stroomrichting en de golfkam

De bijdrage van de golven laat zich beschrijven met:

$$V_{t \text{ golf}} = p * u_b \quad (9.14)$$

met  $u_b$  is momentane bodemsnelheid t.g.v. de orbitaalbeweging

$$u_b = \hat{u}_b * \sin \omega * t$$

$$\hat{u}_b = \omega * H / [2 * \sinh(k * h)]$$

$p$  is een parameter

$$p = 1/\kappa * \sqrt{f_w/2}$$

$f_w$  is een parameter, zie (9.20)

De momentane bodemschuifspanning is gelijk aan:

$$\tau_R = \rho * (\kappa)^2 * (V_{tR})^2 = \rho * (\kappa)^2 * [(V_{t \text{ stroom}})^2 + (p * \hat{u}_b * \sin \omega t)^2 + 2 * V_{t \text{ stroom}} * p * \hat{u}_b * \sin \omega t * \sin \phi]$$

Bij de zandtransportberekening wordt gebruik gemaakt van het tijdsgemiddelde van de bodemschuifspanning,  $\bar{\tau}_R$ .

$$\bar{\tau}_R = \rho * (\kappa)^2 * [(\overline{(V_{t \text{ stroom}})^2}) + 0.5 * (p * \hat{u}_b)^2] \quad (9.15)$$

Het tijdsgemiddelde van  $(V_{t \text{ stroom}})^2$  is gelijk aan:

$$\overline{(V_{t \text{ stroom}})^2} = \overline{(V_{t \text{ oceaan}})^2} + \overline{(V_{t \text{ tjs}})^2} \quad (9.16)$$

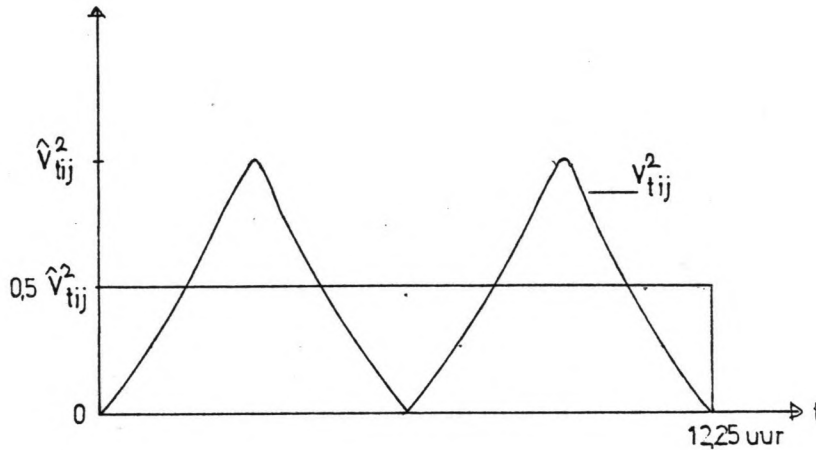
$V_{t \text{ oceaan}}$  heeft een constante waarde.  $V_{t \text{ tjs}}$  echter is sinusvormig.

$$V_{t \text{ tjs}} = \hat{V}_{t \text{ tjs}} * \sin \omega_{t \text{ tjs}} * t \quad (9.17)$$

$$\text{zodat } \overline{(V_{t \text{ tjs}})^2} = 0.5 * (\hat{V}_{t \text{ tjs}})^2 \quad (9.18)$$

Hierbij is de getijstroom over een gehele eb/vloed periode gemiddeld, zie figuur. Bij de sedimenttransportberekening wordt gecontroleerd of deze middeling toelaatbaar is.





figuur 9.2: Middeling tijstroom,  $(V_{t,ij})^2$ .

met behulp van (9.11) , (9.15) en (9.17) wordt gevonden:

$$\overline{(V_{tR})^2} = (g/(\kappa)^2 * C^2) * [(V_{oc})^2 + 0.5 * (\hat{V}_{t,ij})^2] + f_w * (\hat{U}_b)^2 / (4 * (\kappa)^2) \quad (9.19)$$

Indien de resulterende bodemsnelheid groter is dan de kritieke bodemsnelheid dan vindt er sedimenttransport plaats.

- zandtransport

Het zandtransport wordt berekend met de Bijker formule, met deze formule is de invloed van golven en stroming te verdisconteren [5]. De Bijker formule geeft een uitdrukking voor het bodemtransport,  $S_b$ , en relateert het transport van het in suspensie verkerend materiaal aan het bodemtransport. De verhouding bodemtransport- zwevend transport is door Bakker en Boogaard in tabellen vastgelegd [5]. bijlage 9.1 geeft de uit deze tabellen afgeleide figuur.

De uitdrukking voor het bodemtransport,  $S_b$ , luidt:

$$S_b = (B \cdot D \cdot \bar{V} \cdot \sqrt{g}) / C \cdot \exp\{- (0.27 \cdot C^2 \cdot D \cdot \Delta) / (\mu \cdot \bar{V}^2 \cdot [1 + 0.5 \cdot (\xi \cdot \hat{a}_b / \bar{V})^2])\} \quad (9.20)$$

- met  $S_b$  is bodemtransport  
 $B$  is coefficient, aan te houden waarde 5.  
 $\bar{V}$  is de gemiddelde stroomsnelheid  
 $\Delta$  is de relatieve dichtheid  
 $\mu$  is de ribbelfactor  
 $u = (C/C')^{1.5}$   
 $C' = 18 \cdot \log(12 \cdot h / D_{90})$   
 $D_{90}$  is korrel diameter die door 10% van de korrels overschreden wordt  
 $\xi$  is een coefficient  
 $\xi = C \cdot \sqrt{f_w} / (2 \cdot g)$   
 $f_w$  is dimensieloze coefficient  
 $f_w = \exp[-5.977 + 5.213(\hat{a}_b/r) - 0.194]$   
 $\hat{a}_b$  is de amplitude van de horizontale verplaatsing van de waterdeeltjes bij de bodem  
 $\hat{a}_b = H/2 \cdot 1/\sinh(k \cdot h)$   
 $H$  is de gemiddelde golfhoogte

Het totale sedimenttransport is gelijk aan de som van bodem- en zwevend transport:

$$S_{tot.} = S_b \cdot (1 + S_e/S_b) \quad (9.21)$$

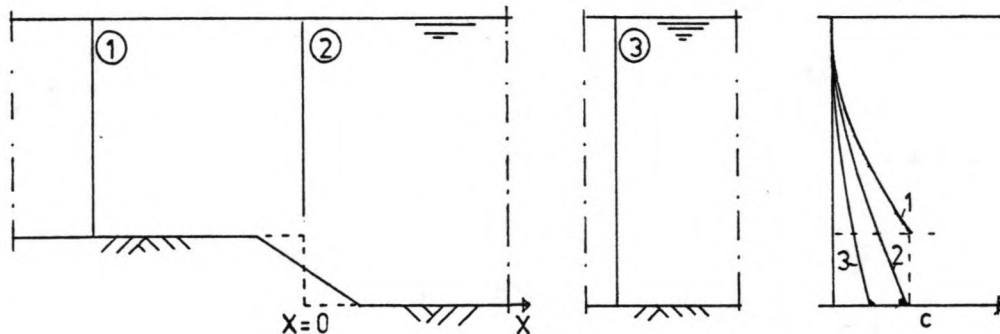
#### 9.4 Zandtransport bij een geul.

Ter plaatse van de geul veranderen de stroomomstandigheden. Deze veranderingen worden door het bodemtransport onmiddellijk gevolgd.

Het in suspensie verkerend materiaal zal als gevolg van de turbulente menging van de stroom zich slechts langzaam aan de gewijzigde omstandigheden aanpassen. Het uitzakkingsproces dat optreedt is afhankelijk van diverse parameters zoals de korrelgrootte, de valsnelheid van de korrels, stroomsnelheid en golfbeeld.

Indien de geul voldoende breed is kan de concentratieverticaal uitzakken tot de bij de heersende omstandigheden in de geul behorende evenwichtsverticaal. De geulsedimentatie wordt gevormd door de som van de hoeveelheid zand die uitgezakt is en het verschil van het bodemtransport buiten de geul met dat in de geul. Bij het benedenstroomse talud neemt door de kleiner wordende waterdiepte de transportcapaciteit toe. Het bodemtransport volgt deze veranderingen onmiddellijk, het zwevend transport past zich geleidelijk aan.

Bijker [21] heeft voor het uitzakverloop van de concentratieverticaal een relatie afgeleid waarmee, zonder dat gebruik van uitgebreide computerfaciliteiten noodzakelijk is, op snelle wijze een redelijk nauwkeurige schatting van de geulsedimentatie te maken is. Voor een uitgebreide afleiding wordt naar [21] verwezen. In het onderstaande worden de resulterende relaties gegeven.



figuur 9.3: Concentratieverticalen in de geul.

opmerking: -op plaats 3 in de geul is er sprake van volledige uitzakking  
-het talud wordt geschematiseerd tot een verdieping in 1 stap.

Aangenomen is dat de afname van de concentratieverticalen exponentieel verloopt. Het transport van in suspensie verkerend sediment in de geul laat zich dan beschrijven met:

$$S_s(x) = (S_{s1} - S_{s3}) * \exp(-\beta * x) + S_{s3} \quad (9.22)$$

met  $S_{s1}$  is het zwevend transport buiten de geul  
 $S_{s3}$  is het evenwichtstransport in de geul  
 $\beta$  is een coëfficiënt.

met  $\beta =$

$$\frac{h_{*,1} * (h_{*,2} - h_{*,1}) * W}{[h_{*,2} * (1 - \exp(-h_{*,1})) - \alpha * h_{*,1} * (1 - \exp(-h_{*,2}))] * h_g * V_g} \quad (9.23)$$

hierin is  $h_* = W * h / \varepsilon$  ( $h_{*,1} = h_*$  ter plaatse 1)

$W$  is de valsnelheid van de korrels

$h$  is de waterdiepte

$\varepsilon$  is de diffusiecoëfficiënt

van sediment

$$\varepsilon = 0.16 * h * V_{*cw}$$

$V_{*cw}$  is schuifspanningssnelheid

t.g.v. golven en stroming

$$V_{*cw} = \bar{V} * \sqrt{g} / C * [1 + 0.5 * (\xi * \hat{U} / \bar{V})^2]^{1/2}$$

$$\alpha = C_{b,3} / C_{b,1}$$

$C_b$  is de concentratie aan de bodem

$$C_b = S_b * C / (6.34 * r * \bar{V} * \sqrt{g})$$

$r$  is de bodemruwheid

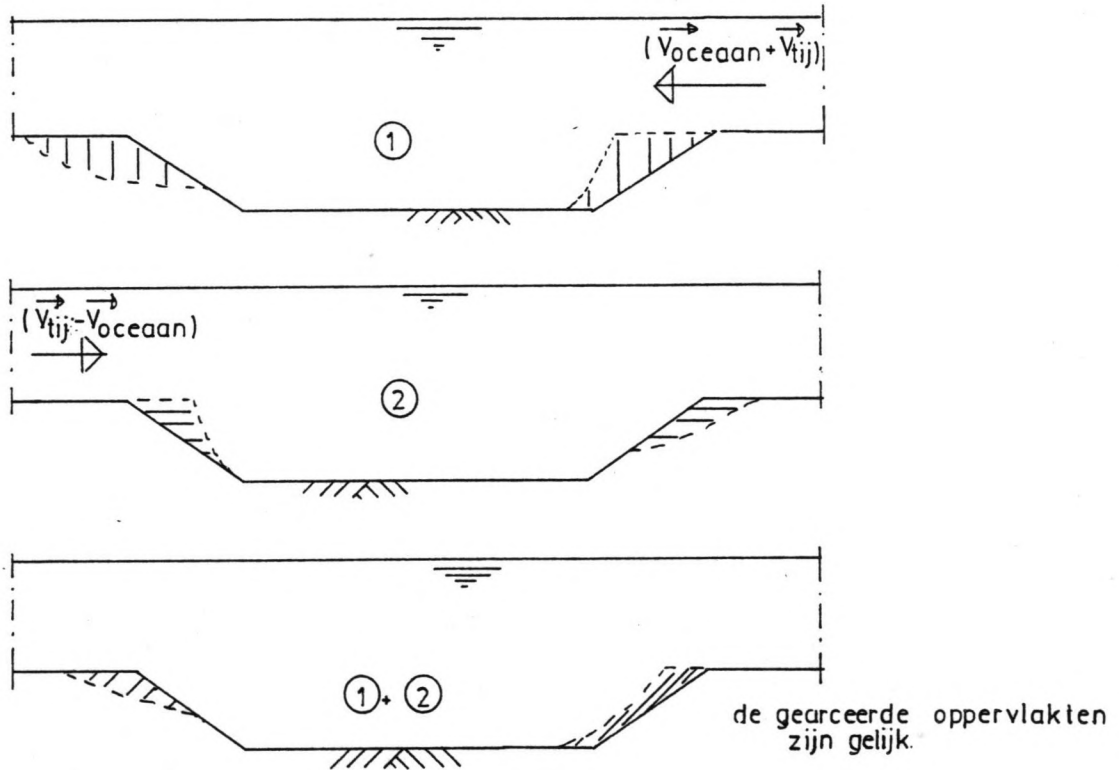
$S_b$  is het bodemtransport

$h_g$  is de waterdiepte in de geul

De hoeveelheid in de geul gesedimenteerd materiaal is te bepalen met:

$$S_v(x) = (S_{b,1} + S_{s,1}) - (S_{b,2} + S_{s,2}) - (S_{s,1} - S_{s,2}) * \exp^{-\beta \cdot x} \quad (9.24)$$

Een even grote hoeveelheid sediment zal ter plaatse van het benedenstroomse talud eroderen. Omdat er sprake is van een asymmetrische stroming (met als oorzaak de naar het zuiden gerichte oceaanstroom) is het uiteindelijke aanzandings-erosieprofiel ook asymmetrisch, zie figuur 9.4.



figuur 9.4: Erosie en sedimentatie.

Aan de noordzijde van de geul is er sprake van aanzanding, aan de zuidzijde treedt er erosie op. De desbetreffende hoeveelheden zijn te berekenen met:

$$S_{\text{sed. tot.}} = S_{v.n \rightarrow z} - S_{v.z \rightarrow n} \quad (9.25)$$

$$(S_{\text{sed. tot.}} - S_{\text{erosie tot.}} = 0)$$

De met (9.24) te bepalen waarde van  $S_v$  geeft de sedimentatie uitgedrukt in  $m^3/s$ . De bijdrage van de sedimentatie onder bepaalde golfcondities aan de jaarlijkse geulsedimentatie is eenvoudig te berekenen. Bekend is de kans van optreden per jaar van de desbetreffende golfcondities:  $P(H, T)$  zie tabel 9.2. De kans dat de gebruikte stroomcondities optreden is ook bekend, deze is gelijk aan 0.5 (de getijstroom valt of wel of niet samen met de oceaanstroom). De bijdrage van de onder stroom- en golfcondities 'i' optredende sedimentatie  $S_{v,i}$ , aan de jaarlijkse geulsedimentatie is gelijk aan:

$$S_{v,i} * P(H, T) * 0.5 * (365 * 24 * 60 * 60) [m^3/m^2] \quad (9.26)$$

Sommatie van alle bijdragen tenslotte levert de jaarlijkse geulsedimentatie bij zekere waterdiepte.

golfhoogte klassen	golfperiodenklassen			
	8 - 10 s	10 - 12 s	12 - 14 s	14 - 16 s
0.5 - 1	1195	2155	699	52
1 - 1.5	268	728	397	46
1.5 - 2	42	180	151	37
2 - 2.5	1	10	16	12
> 2.5	-	-	-	1

tabel 9.2: Lange termijn statistiek golfklimaat Monrovia, kans van optreden  $H-T$  combinaties, eenheid  $10^{-4}$ .

- Berekening geulsedimentatie.

De berekening is voor de optredende combinaties van stroming (twee) en golfcondities (20 golfklassen worden onderscheiden) uitgevoerd. Bij een zekere waterdiepte levert dit dus 40 berekeningen op. De bij de berekening gebruikte invoerwaarden zijn:

$$\begin{aligned} B &= 5 \\ D_{50} &= 183 \cdot 10^{-6} \text{ m} \\ D_{90} &= 340 \cdot 10^{-6} \text{ m} \\ \Delta &= 1.6 \\ \rho &= 1020 \text{ kg/m}^3 \\ W &= 0.022 \text{ m/s} \\ r &= 0.06 \text{ m} \end{aligned}$$

Gebruik is gemaakt van de gemiddelde golfperiode en golfhoogte van een golfklasse. Bovendien is niet de significante golfhoogte gebruikt, maar de gemiddelde golfhoogte:  $H = H_s / 1.596$ . Ter illustratie: de in de berekening gebruikte golfhoogte voor de golfklasse van 1 tot 1.5 meter bedraagt:

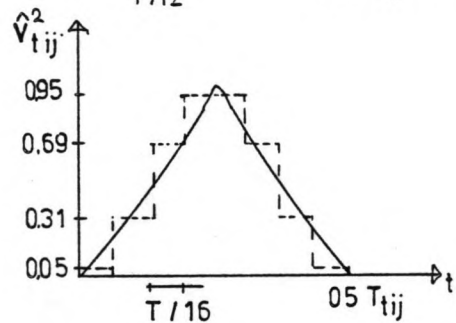
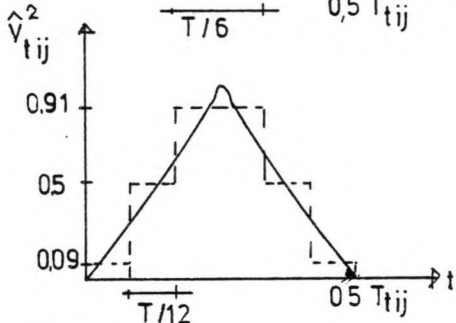
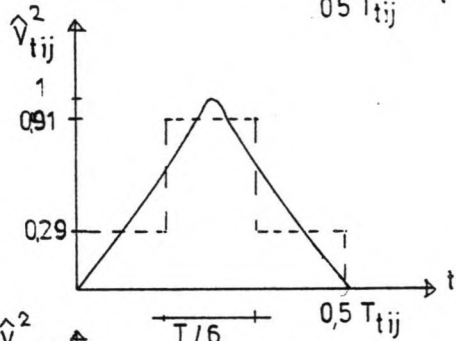
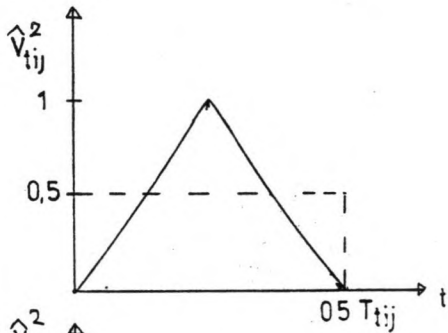
$$H_s / 1.596 = 1.25 / 1.596 = 0.78 \text{ m}$$

De geschematiseerde stroomsnelheden zijn:

$$\begin{aligned} \overline{V_{N \rightarrow Z}} &= (V_{oc})^2 + 0.5 * (\hat{V}_{t1.5})^2)^{1/2} \\ \overline{V_{Z \rightarrow N}} &= (V_{oc})^2 - 0.5 * (\hat{V}_{t1.5})^2)^{1/2} \end{aligned}$$

De berekeningen zijn uitgevoerd voor twee waterdiepten langs de geul, te weten 10 en 15 m. Met het oog op de kleine amplitude van het verticale tij, is met een constante waterdiepte gerekend.

Alvorens de berekeningen uit te voeren wordt gecontroleerd of de ingevoerde schematisatie van de tijstroom tot een gemiddelde waarde, te weten  $(\hat{V}_{t1.5})^2 = 0.5 * (\hat{V}_{t1.5})^2$ , aanvaardbaar is. Hiertoe is de tijstroom opgedeeld in meerdere delen. Voor ieder deel is de sedimentatie bepaald en vervolgens is de gemiddelde sedimentatie per tijdsperiode bepaald. De berekeningen zijn verricht voor een maatgevende golfklasse, te weten de klasse met golfperiode van 10 - 12 seconden en golfhoogte 0.5 tot 1 m. De gebruikte waterdiepte bedraagt tien meter.



$\frac{\overline{V_{tij}^2}}{\hat{V}_{tij}^2}$	$S_v$	$\overline{S_v} [m^3/sm]$
	[ eenheid $10^{-6}$ ]	
0,5	7,7	7,7
0,91	7,5	9,4
0,29	10,4*	
0,91	7,5	
0,5	7,7	8,5
0,09	10,4*	
0,95	7,1	
0,69	6,6	8,6
0,31	10,1*	
0,05	10,5*	

\* oceaanstroom overheerst resulterende stroom is noord zuid gericht

schematisering tijdstroom.

Uit de berekeningen blijkt dat het gemiddelde van de gesedimenteerde hoeveelheden redelijk overeenkomt. Ten opzichte van de schematisatie in vier stappen geeft de benadering met een stap een sedimentatie die circa tien procent lager is. In verband met de onzekerheden ten aanzien van de in de berekening ingevoerde waarden (stroomsnelheden, ruwheidsfactor en de dimensies van het sediment), is dit een aanvaardbare afwijking. In de berekeningen zal daarom van de benadering  $(V_{t_{i,j}})^2 = 0.5 * (\hat{V}_{t_{i,j}})^2$  gebruik worden gemaakt.



Bijlage 9.2 geeft de uitkomsten van de berekeningen. In de bijlage zijn opgenomen de waarden van de resulterende bodemsnelheid buiten de geul,  $V_{tr}$ , het bodemtransport buiten en in de geul,  $S_{b,1}$  en  $S_{b,3}$ , de verhouding bodemtransport/zwevend transport buiten en in de geul,  $S_{e,1}/S_{b,1}$  en  $S_{e,3}/S_{b,3}$ , en de factor  $\beta$ . De laatste kolom ten slotte geeft de jaarlijkse sedimentatie.

In het geval van golven met een significante golfhoogte kleiner dan 0.5m is het sedimenttransport te verwaarlozen.

Uit de uitkomsten van de berekening blijkt de waarde van de factor voor de meeste stroom- en golfcondities zo groot te zijn dat de concentratieverticaal vrijwel volledig uitzakt tot de evenwichtsverticaal in de geul. De geulsedimentatie kan in dat geval worden berekend volgens:

$$S_v = (S_{b,1} + S_{e,1}) - (S_{b,3} + S_{e,3}) \quad (9.27)$$

(slechts bij een waterdiepte van 15 m en samenvallende tij en oceaanstroom kan (9.27) niet gebruikt worden, maar moet de volledige formule (9.24) worden gebruikt)

Sommatie van de in bijlage 9.2 gegeven waarden van  $S_v$  geeft de jaarlijks te verwachten aanzanding.

waterdiepte buiten de geul [m]	aanzanding [ $m^3$ /jaar m]
10	161
15	70

jaarlijkse geulaanzanding

Bij een geullengte van circa 3800 m betekent dit een jaarlijkse sedimentatie van ongeveer 350.000 tot 400.000  $m^3$ . De onderhoudsbaggerwerken ten gevolge van deze sedimentatie zullen ongeveer om de twee a drie jaar uitgevoerd moeten worden. Deze termijn is afhankelijk van de eventuele overdiepte welke gebaggerd wordt. De jaarlijkse kosten van deze onderhoudsbaggerwerken bedragen circa 2 miljoen gulden. Bij een eventuele aanleg van een zandvang (ten behoeve van het langtransport in de brandingszone) bij de zuidelijke havendam kunnen de onderhoudswerkzaamheden op elkaar worden afgestemd.

Symbolenlijst.

a	golfamplitude
$a_b$	amplitude horizontale uitwijking waterdeeltjes aan de bodem
$a_{1,2}$	toegevoegde massa schip
$A_x$	nat oppervlak grootspant
$A_{ch}$	oppervlakte doorsnede geul
b	afstand tussen golfstralen
b	amplitude bodemuitwijking
$b_{1,2}$	dempingscoefficient schip
B	breedte schip
B	Bijker coefficient
c	fasesnelheid
$c_b$	blokcoefficient
$c_g$	groepssnelheid
$c_e$	vormfactor trim
$c_z$	vormfactor inzinking
$c_{1,2}$	veercoefficient
C	Chezyfactor
C	autocovariantiefunctie
D	diepgang schip
D	diameter korrels
e	momentane bodemvrijheid
E	verwachtingswaarde
f	frequentie
$f_w$	coefficient Jonsson
F	fetch
Fr	Froudegetal
g	zwaartekrachtversnelling
h	waterdiepte
$H_s$	significante golfhoogte
I	amplitude verticale scheepsbeweging
$I_{xx}$	massatraagheidsmoment om x-as
k	golfgetal
K	door golven uitgeoefend rolmoment
$K_1$	correctie coefficient inzinking
$K_s$	correctie coefficient geulvormgeving
L	golflengte
L	gemiddelde waterstand t.o.v. chart datum
$L_{pp}$	lengte schip tussen de loodlijnen
m	massa schip
$m_n$	moment van de n-de orde, $m_n = \int_0^\infty \omega^n S(\omega) d\omega$
M	stampmoment
N	aantal vaarten per jaar
N	aantal extremen per geulvaart

p	kans
q	gemiddelde hoeveelheid baggerwerk per m <sup>3</sup> geul
Q	hoeveelheid baggerwerk
r	bodemruwheid
R	responsiefactor verticale scheepsbeweging
s	fasefunctie
S	sedimenttransport
S	energiedichtheidsspectrum
t	tijd
T	golfteriode
u	scheepssnelheid
v	stroomsnelheid
w	valsnelheid
x	voortplantingsrichting golven
x	richting loodrecht op de kust
Y	door golven uitgeoefende dwarskracht
z	inzinking schip
Z	door golven uitgeoefende verticalekracht
$\alpha$	hoek
$\beta$	coefficient uitzakverloop concentratieverticaal
$\beta$	hoek
$\gamma$	hoek
$\Delta$	relatieve dichtheid sediment
$\epsilon$	diffusiecoefficient
$\eta$	uitwijking wateroppervlak
$\theta$	stamphoek
$\chi$	getal van von Karman
$\mu$	hoek
$\mu$	ribbelfactor
$\nu$	viskositeit
$\epsilon$	parameter
$\pi$	constante = 3.141592..
$\rho$	massadichtheid
$\sigma$	standaardafwijking
$\tau$	schuifspanning
$\phi$	golfrichting
$\phi$	rolhoek
$\Phi$	golffunctie
$\psi$	golffunctie
$\omega$	hoekfrequentie
$\omega_0$	ontmoetingsfrequentie
$\Delta$	waterverplaatsing schip

Literatuurlijst.

[1] van de Vijver, W., Smole, T. Kustwaterbouwkundige aspecten van de haven van Monrovia ,vooronderzoek. afstudeerverslag vakgroep kustwaterbouwkunde. T.H. Delft july 1979.

[2] Battjes, J.A. Collegedictaat Windgolven. T.H. Delft, 1979.

[3] Stefess, H. Golfklimaat toegangseul Monrovia, deelontwerp vakgroep vloeistofmechanica. T.H. Delft, 1984.

[4] Hooft, J.P., Oosterveld, M.W.C. The manoeuvrability of ships at low speed. , Delft, T.N.O. ,report no.138s ,1970.

[5] Massie, W.W. ed. Collegedictaat Coastal Engineering vol.2 , T.H. Delft, 1978.

[6] Eryuzlu, N.E., Hausser, R. Symposium aspects of navigability of constraint waterways ,including harbour entrances, paper 9, Delft, april 1978.

[7] Hooft, J.P.ed. Symposium on shiphandling, nov. 1973, Wageningen, N.S.M.B., publ. no. 451 ,1973.

[8] Tuck, E.O., Taylor, R.J. Shallow water problems in ship hydrodynamics. Symposium on naval Hydrodynamics, Pasadena, august 1970.

[9] Hooft, J.P. The influence of nautical requirements on the dimensions and layout of entrance channels and harbours. Modern Dredging, jan. 1978, Den Haag.

[10] Luttmer, R. Scheepsbewegingen in ondiep water. afstudeerverslag vakgroep sloopshydrodynamica, T.H. Delft, 1977.

[11] de Graauw, A.F.F. Waterbouwkundige aspecten van het estuaire du Gabon. afstudeerverslag vakgroep kustwaterbouwkunde, T.H. Delft, 1976.

[12] Huijsmans, R.H.M., Dallinga, R.P. Non linear ship motions in shallow water. Int. workshop on ship and platform motions, Berkeley, 1983.

[13] The Dock and Harbour Authority, vol(51), no july, pp.69-74, 1951.

[14] van Wiijk, A.C. Wave induced ship motions in harbour entrances- a field study. Proceedings of the 18th. Conference on Coastal Engineering, Cape Town, South Africa, vol(4), New York, 1983.

[15] de Koning, J. Collegedictaat Baggerwerktuigen, i82a, T.H. Delft.

[16] Bouma, A.L. Collegedictaat Dynamica van constructies, b15a, T.H. Delft.

[17] Battjes, J.A. Collegedictaat Korte Golven , b76, T.H. Delft.

[18] van Soest, J. Elementaire Statistiek , T.H. Delft, 1978.

[19] Eden, E.W. jr. Vessel controllability in restricted waters , Journal of the waterways, harbors and coastal engineering division, vol 97, pp 475-490, New York, A.S.C.E., 1971.

[20] Prins, A. Collegedictaat Sedimenttransport, f10, T.H. Delft, 1978.

[21] Bijker, E.W. Sedimentation in channels and trenches , Proceedings of the 17th. Conference on Coastal Engineering, Sidney, Australia, New York, 1981.

Bijlagen.

Bijlage 2.1 Lange termijn statistiek van het golfklimaat voor de geul.

0.5 ≤ H <sub>s</sub> < 1 m				
richtingsektor op diep water	golfperiodeklasse [s]			
	8-10	10-12	12-14	14-16
	kans van optreden , eenheid 10 <sup>-4</sup>			
0° < α < 185°	27.5	49.6	16.1	1.2
185° < α < 195°	266.5	480.6	155.9	11.5
195° < α < 205°	360.9	650.8	211.1	15.6
205° < α < 215°	299.9	540.9	175.5	13.0
215° < α < 240°	240.2	433.2	140.5	10.4

1 ≤ H <sub>s</sub> < 1.5 m.				
richtingsektor op diep water	golfperiodeklasse [s]			
	8-10	10-12	12-14	14-16
	kans van optreden , eenheid 10 <sup>-4</sup>			
0° < α < 185°	-	-	-	-
185° < α < 195°	115.1	312.4	170.4	19.9
195° < α < 205°	50.2	136.2	74.3	8.7
205° < α < 215°	102.5	278.1	151.8	17.7
215° < α < 240°	0.5	1.5	0.8	0.1

1.5 ≤ H <sub>s</sub> < 2 m.				
richtingsektor op diep water	golfperiodeklasse [s]			
	8-10	10-12	12-14	14-16
	kans van optreden , eenheid 10 <sup>-4</sup>			
0° < α < 185°	3.2	13.9	11.6	2.8
185° < α < 195°	10.5	45.3	37.8	9.3
195° < α < 205°	14.1	61.0	50.9	12.5
205° < α < 215°	8.4	36.1	30.1	7.4
215° < α < 240°	5.6	24.0	20.1	4.9

## bijlage 2.1

2 ≤ H <sub>s</sub> < 2.5 m		golfperiodeklasse [s]			
richtingsektor op diep water		8-10	10-12	12-14	14-16
		kans van optreden , eenheid 10 <sup>-4</sup>			
0° < α < 185°		0.1	0.8	1.3	0.9
185° <= α < 195°		0.2	2.4	4.1	3.0
195° <= α < 205°		0.2	3.2	5.5	4.0
205° <= α < 215°		0.1	1.9	3.3	2.3
215° <= α < 240°		0.1	1.3	2.2	1.6

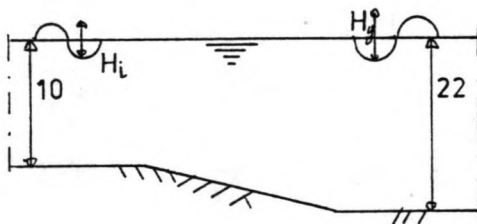
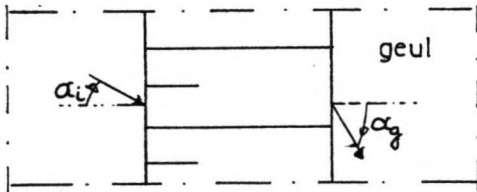
H <sub>s</sub> ≥ 2.5 m.		golfperiodeklasse [s]			
richtingsektor op diep water		8-10	10-12	12-14	14-16
		kans van optreden , eenheid 10 <sup>-4</sup>			
0° < α < 185°		-	-	-	0.1
185° <= α < 195°		-	-	-	0.2
195° <= α < 205°		-	-	0.1	0.3
205° <= α < 215°		-	-	-	0.2
215° <= α < 240°		-	-	0.2	0.1



Bijlage 2.2 Refractie-diffractie bij een geulorientatie van  $90^\circ$

richtingsektor op diep water		golfperiodeklasse [s]			
		8-10	10-12	12-14	14-16
$\phi_\alpha < 185^\circ$	$\alpha_i$	26	30	33	37
	$\alpha_g$	36	44	51	61
	$H_{geul}/H_i$	1.0	1.0	1.1	1.1
$185^\circ \leq \phi_\alpha < 195^\circ$	$\alpha_i$	29	32	35	39
	$\alpha_g$	41	48	55	65
	$H_{geul}/H_i$	1.0	1.0	1.1	1.3
$195^\circ \leq \phi_\alpha < 205^\circ$	$\alpha_i$	35	37	39	42
	$\alpha_g$	49	58	63	75
	$H_{geul}/H_i$	1.1	1.25	1.35	1.4
$205^\circ \leq \phi_\alpha < 215^\circ$	$\alpha_i$	40	42	43	45
	$\alpha_g$	59	70	75	krit.
	$H_{geul}/H_i$	1.5	1.5	1.5	1.5
$215^\circ \leq \phi_\alpha < 240^\circ$	$\alpha_i$	60	60	61	61
	$\alpha_g$	$\varphi_{krit.}$	$\varphi_{krit.}$	$\varphi_{krit.}$	$\varphi_{krit.}$
	$H_{geul}/H_i$	-	-	-	-

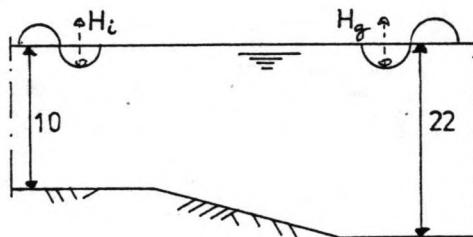
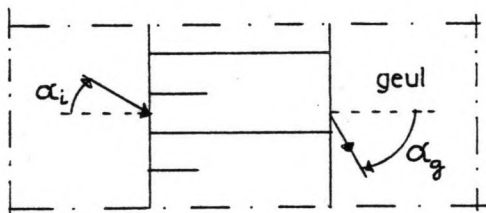
opmerking: in geval van  $\alpha_g = \varphi_{krit.}$  is er sprake van gedeeltelijke tot gehele reflectie van golfenergie bij de geul.



Bijlage 2.3 Refractie-diffractie bij een geulorientatie van  $100^\circ$

richtingsektor op diep water		golfperiodeklasse [s]			
		8-10	10-12	12-14	14-16
$\phi_o < 185^\circ$	$\alpha_s$	16	20	23	27
	$\alpha_g$	21	28	33	40
	$H_{geul}/H_s$	1.0	1.0	1.0	1.0
$185^\circ \leq \phi_o < 195^\circ$	$\alpha_s$	19	22	25	29
	$\alpha_g$	26	31	36	44
	$H_{geul}/H_s$	1.0	1.0	1.0	1.0
$195^\circ \leq \phi_o < 205^\circ$	$\alpha_s$	25	27	29	32
	$\alpha_g$	34	39	43	49
	$H_{geul}/H_s$	1.0	1.0	1.0	1.0
$205^\circ \leq \phi_o < 215^\circ$	$\alpha_s$	30	32	33	35
	$\alpha_g$	41	47	50	55
	$H_{geul}/H_s$	1.0	1.0	1.1	1.1
$215^\circ \leq \phi_o < 240^\circ$	$\alpha_s$	50	50	51	51
	$\alpha_g$	$\varphi_{krit.}$	$\varphi_{krit.}$	$\varphi_{krit.}$	$\varphi_{krit.}$
	$H_{geul}/H_s$	1.5	1.5	1.5	1.5

opmerking: in geval van  $\alpha_g = \varphi_{krit.}$  is er sprake van gedeeltelijke tot gehele reflectie van golfenergie bij de geul.



Bijlage 2.4 Lange termijn statistiek van het golfklimaat in de geul.

0.5 ≤ H <sub>s</sub> < 1 m		golfperiodeklasse [s]			
richtingsektor op diep water		8-10	10-12	12-14	14-16
		kans van optreden , eenheid 10 <sup>-4</sup>			
	φ <sub>o</sub> < 185°	27.5	49.6	16.1	1.2
	185° ≤ φ <sub>o</sub> < 195°	266.5	480.6	155.9	11.5
	195° ≤ φ <sub>o</sub> < 205°	360.9	650.8	211.1	15.6
	205° ≤ φ <sub>o</sub> < 215°	299.9	540.9	162.5	12.3
	215° ≤ φ <sub>o</sub> < 240°	17.7	332.2	73.5	5.3

1 ≤ H <sub>s</sub> < 1.5 m.		golfperiodeklasse [s]			
richtingsektor op diep water		8-10	10-12	12-14	14-16
		kans van optreden , eenheid 10 <sup>-4</sup>			
	φ <sub>o</sub> < 185°	-	-	-	-
	185° ≤ φ <sub>o</sub> < 195°	115.1	312.4	170.4	19.9
	195° ≤ φ <sub>o</sub> < 205°	50.2	136.2	74.3	8.7
	205° ≤ φ <sub>o</sub> < 215°	102.5	278.1	192.1	24.4
	215° ≤ φ <sub>o</sub> < 240°	99.3	192.2	106.7	9.0

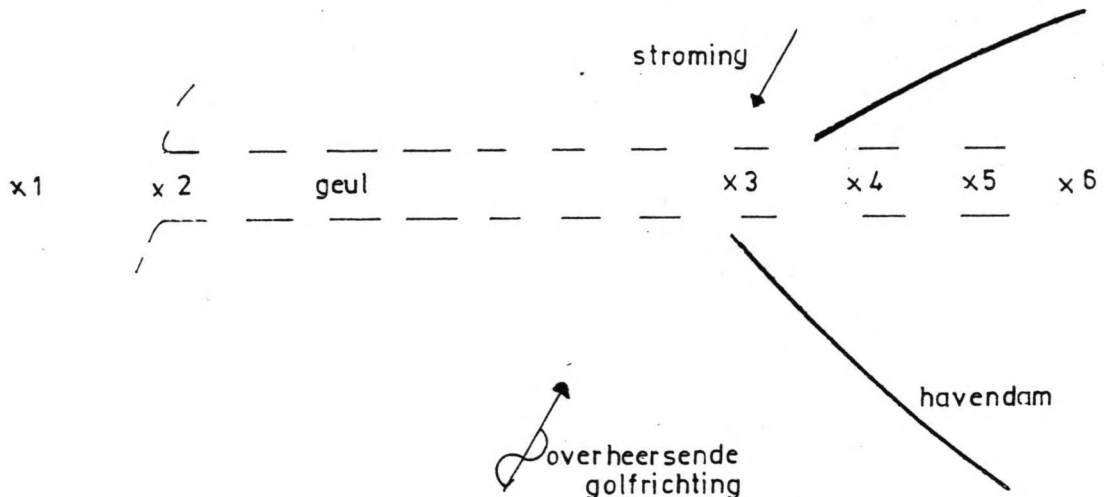
1.5 ≤ H <sub>s</sub> < 2 m.		golfperiodeklasse [s]			
richtingsektor op diep water		8-10	10-12	12-14	14-16
		kans van optreden , eenheid 10 <sup>-4</sup>			
	φ <sub>o</sub> < 185°	3.2	13.9	11.6	2.8
	185° ≤ φ <sub>o</sub> < 195°	10.5	45.3	37.8	9.3
	195° ≤ φ <sub>o</sub> < 205°	14.1	61.0	50.9	12.5
	205° ≤ φ <sub>o</sub> < 215°	8.4	36.1	30.1	7.4
	215° ≤ φ <sub>o</sub> < 240°	33.5	82.8	52.3	7.0

## bijlage 2.4

2 ≤ H <sub>s</sub> < 2.5 m				
richtingsektor op diep water	golfperiodeklasse [s]			
	8-10	10-12	12-14	14-16
	kans van optreden , eenheid 10 <sup>-4</sup>			
0° < φ <sub>o</sub> < 185°	0.1	0.8	1.3	0.9
185° <= φ <sub>o</sub> < 195°	0.2	2.4	4.1	3.0
195° <= φ <sub>o</sub> < 205°	0.2	3.2	5.5	4.0
205° <= φ <sub>o</sub> < 215°	0.1	1.9	7.5	2.3
215° <= φ <sub>o</sub> < 240°	12.5	42.8	35.6	7.3

H <sub>s</sub> ≥ 2.5 m.				
richtingsektor op diep water	golfperiodeklasse [s]			
	8-10	10-12	12-14	14-16
	kans van optreden , eenheid 10 <sup>-4</sup>			
0° < φ <sub>o</sub> < 185°	-	-	-	0.1
185° <= φ <sub>o</sub> < 195°	-	-	-	0.2
195° <= φ <sub>o</sub> < 205°	-	-	0.1	0.3
205° <= φ <sub>o</sub> < 215°	-	-	0.7	1.1
215° <= φ <sub>o</sub> < 240°	1.4	7.1	8.8	3.5

Bijlage 3.1. Schematisch overzicht van de binnenloop en stopmanoeuvre.



Onbeschermd gebied.

1-2 Naderen van de toegangsgedul , hierbij wordt de vaarsnelheid aangepast.

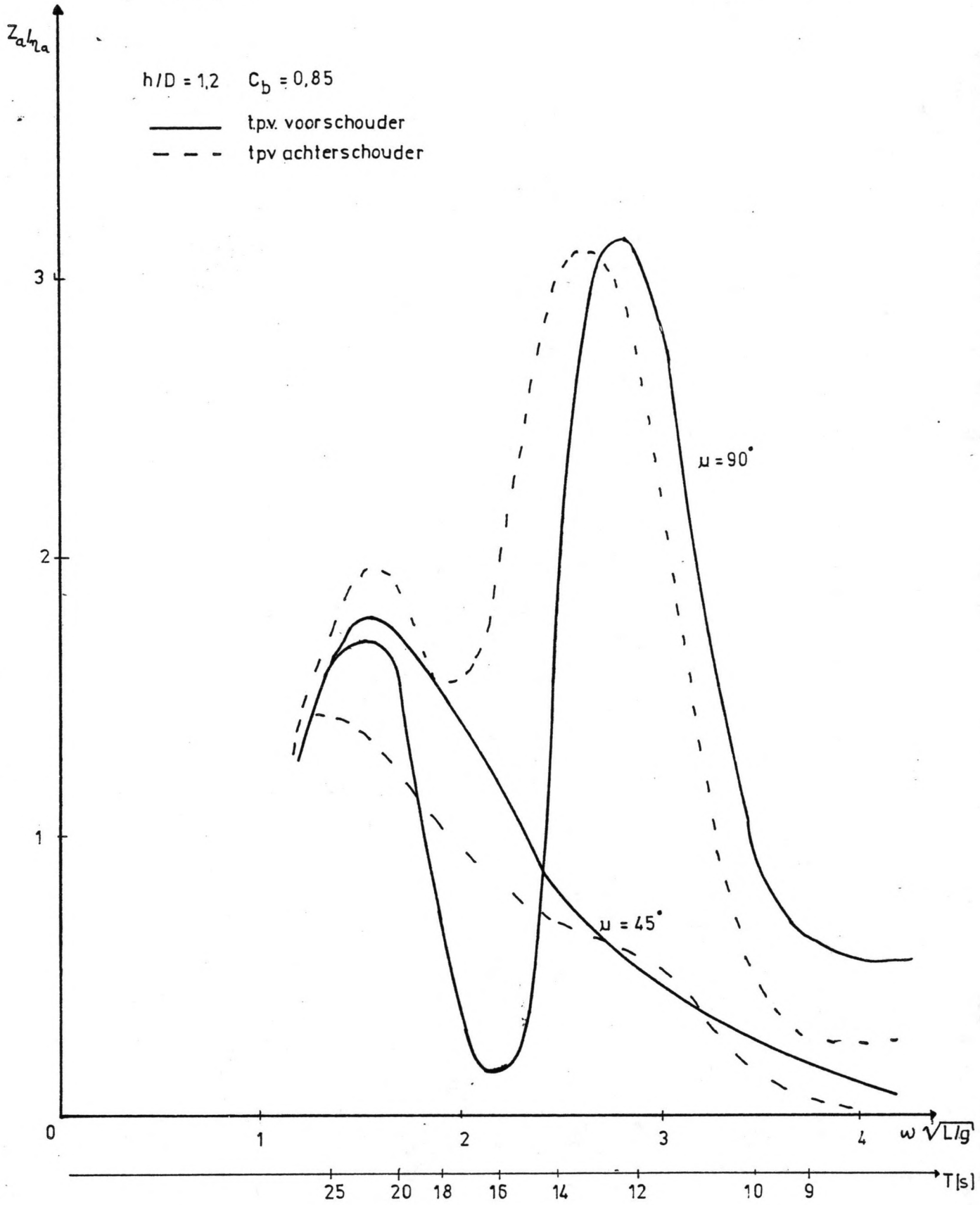
2-3 Varend in de geul; de sleepboten maken vast , het schip loopt uit , de actie wordt beïnvloed door golven en stroming.

3-4 Het binnenlopen van de havenmond , de stromingscondities voor de havenmond zijn zeer bepalend voor het verloop van de manoeuvre , een koerscorrectie kan eventueel met sleepboothulp uitgevoerd worden.

Beschermd gebied.

4-5 Inzetten van de stopmanoeuvre door het schip, de sleepboten verlenen hierbij assistentie.

5-6 Afmeren van het schip.



Responsiefunctie van de schouder.

bijlage 4.2. Lange termijn statistiek standaardafwijking verticale scheepsbeweging.

0.25 < $\sigma_x$ < 0.5 m.		richtingsektor op diep water			
		golfperiodeklasse [s]			
		8-10	10-12	12-14	14-16
		kans van optreden , eenheid $10^{-4}$			
$0^\circ < \phi < 185^\circ$		11.7	49.6	16.1	1.2
$185^\circ < \phi < 195^\circ$		211.5	480.6	155.9	11.5
$195^\circ < \phi < 205^\circ$		14.3	371.8	211.1	17.3
$205^\circ < \phi < 215^\circ$		1.7	67.2	220.3	20.9
$215^\circ < \phi < 240^\circ$		-	0.1	20.9	6.4

$$p(0.25 < \sigma_x < 0.5 \text{ m}) = 1887 \cdot 10^{-4}$$

0.5 < $\sigma_x$ < 0.75 m		richtingsektor op diep water			
		golfperiodeklasse [s]			
		8-10	10-12	12-14	14-16
		kans van optreden , eenheid $10^{-4}$			
$0^\circ < \phi < 185^\circ$		3.2	-	-	-
$185^\circ < \phi < 195^\circ$		10.7	312.4	170.4	19.9
$195^\circ < \phi < 205^\circ$		-	63.1	74.3	18.1
$205^\circ < \phi < 215^\circ$		-	-	81.7	14.4
$215^\circ < \phi < 240^\circ$		-	-	2.2	3.7

$$p(0.5 < \sigma_x < 0.75 \text{ m}) = 769.1 \cdot 10^{-4}$$

0.75 < $\sigma_x$ < 1.0 m		richtingsektor op diep water			
		golfperiodeklasse [s]			
		8-10	10-12	12-14	14-16
		kans van optreden , eenheid $10^{-4}$			
$0^\circ < \phi < 185^\circ$		-	13.9	11.6	2.8
$185^\circ < \phi < 195^\circ$		-	45.3	37.7	9.3
$195^\circ < \phi < 205^\circ$		-	1.1	50.9	5.5
$205^\circ < \phi < 215^\circ$		-	-	7.9	5.8
$215^\circ < \phi < 240^\circ$		-	-	-	2.6

$$p(0.75 < \sigma_x < 1.0 \text{ m}) = 194.5 \cdot 10^{-4}$$

## bijlage 4.2

1.0 $\leq \sigma_r < 1.25$ m		golfperiodeklasse [s]			
richtingsektor op diep water		8-10	10-12	12-14	14-16
		kans van optreden , eenheid $10^{-4}$			
$\phi < 185^\circ$		-	0.7	1.2	0.9
$185^\circ \leq \phi < 195^\circ$		-	2.4	4.1	2.9
$195^\circ \leq \phi < 205^\circ$		-	-	5.5	0.8
$205^\circ \leq \phi < 215^\circ$		-	-	-	0.7
$215^\circ \leq \phi < 240^\circ$		-	-	-	0.2

$$p(1.0 \leq \sigma_r < 1.25 \text{ m}) = 19.4 \cdot 10^{-4}$$

1.25 m $< \sigma_r$		golfperiodeklasse [s]			
richtingsektor op diep water		8-10	10-12	12-14	14-16
		kans van optreden , eenheid $10^{-4}$			
$\phi < 185^\circ$		-	-	-	0.1
$185^\circ \leq \phi < 195^\circ$		-	-	-	0.2
$195^\circ \leq \phi < 205^\circ$		-	-	0.1	-
$205^\circ \leq \phi < 215^\circ$		-	-	-	-
$215^\circ \leq \phi < 240^\circ$		-	-	-	-

$$p(1.25 \text{ m} < \sigma_r) = 0.4 \cdot 10^{-4}$$



## Bijlage 7.1 Standaardafwijking bodemvrijheid.

	golfperiodeklasse			
	8-10	10-12	12-14	14-16
N(aantal extremen)	179	149	130	114
$T_e$ (ontmoetingsperiode)[s]	8	9.7	11.2	12.6
	kans van optreden, eenheid $10^{-4}$			
$0.25 \leq \sigma_x < 0.5$ m.	2390	9690	6240	55
$0.5 \leq \sigma_x < 0.75$ m.	13.9	375	329	51
$0.75 \leq \sigma_x < 1.0$ m.	-	60	108	26
$1.0 \leq \sigma_x < 1.25$ m.	-	3.1	10.8	5.5

$\sigma_x$ klasse	$\sigma_B$	$\sigma_e$ klasse
$0.25 \leq \sigma_x < 0.5$ m.	0.53	$0.59 \leq \sigma_e < 0.73$
$0.5 \leq \sigma_x < 0.75$ m.	0.53	$0.73 \leq \sigma_e < 0.92$
$0.75 \leq \sigma_x < 1.0$ m.	0.53	$0.92 \leq \sigma_e < 1.13$
$1.0 \leq \sigma_x < 1.25$ m.	0.53	$1.13 \leq \sigma_e < 1.36$

$\sigma_x$  is de standaardafwijking van de verticale scheepsbeweging

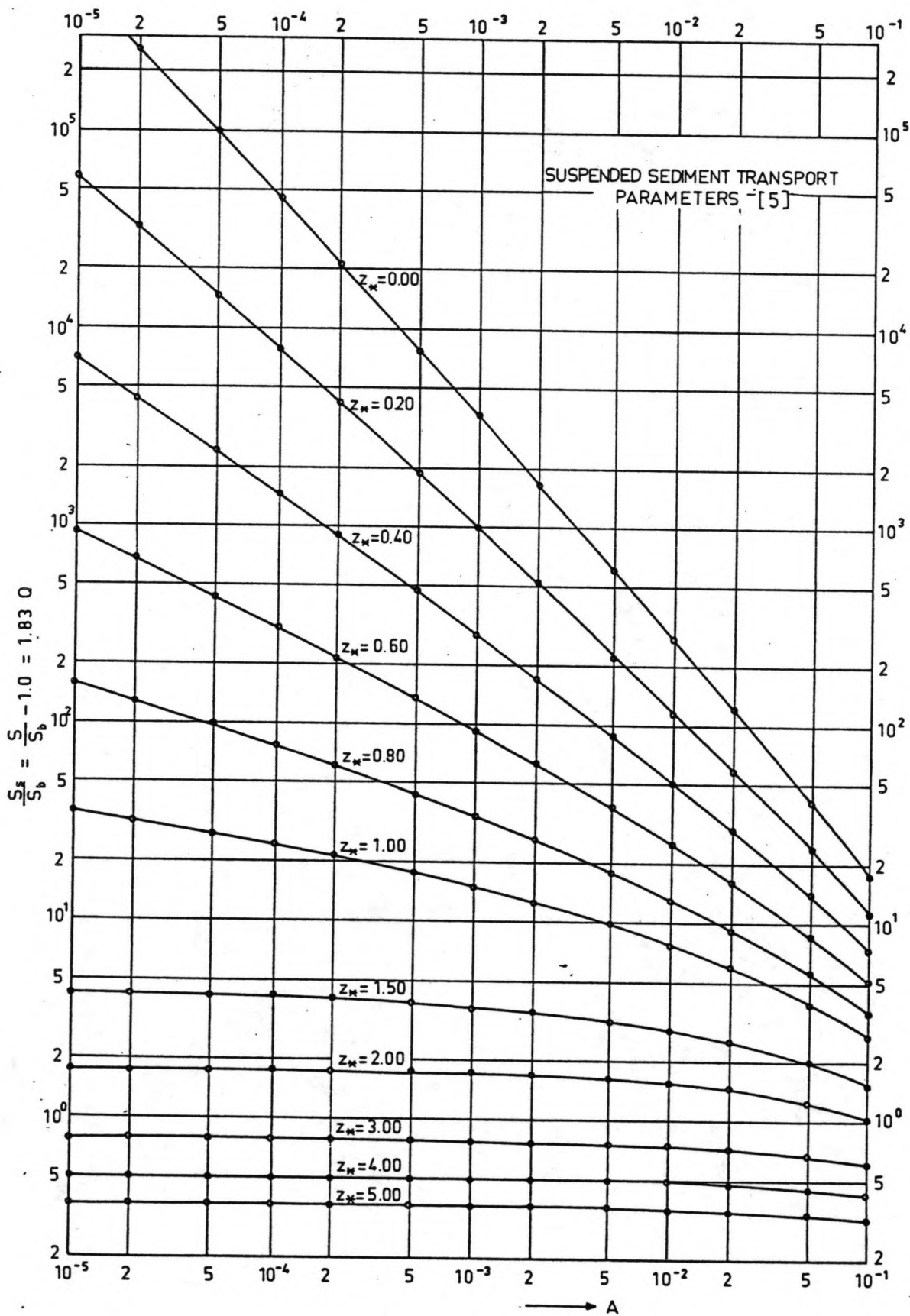
$\sigma_B$  is de standaardafwijking van de bodemuitwijking

$\sigma_e$  is de standaardafwijking van de bodemvrijheid

$$p(0.25 \leq \sigma_x < 0.5) = p(0.59 \leq \sigma_e < 0.73)$$

etc.

Bijlage 9.1 Verband bodemtransport zwevend transport.



## Bijlage 9.2 Gegevens geulsedimentatie berekeningen.

$V_{tR}$	[ m/s ]
$S_b$	[ m <sup>3</sup> /s m <sup>2</sup> ], 10 <sup>6</sup>
$S_v$	[ m <sup>3</sup> /jaar m <sup>2</sup> ]

h = 10 m.					
golfperiodeklasse 8 - 10 s.					
golfhoogteklasse	0.5-1.0	1.0-1.5	1.5-2.0	2.0-2.5	>2.5
stroming N- Z					
$V_{tR}$	0.09	0.12	0.15	0.18	0.20
$S_b$	3.1	5.6	7.2	8.3	9
$S_{\#} / S_b$	3	7.5	13	17	28
$S_b$	0.4	1.4	2.2	2.9	3.4
$S_{\#} / S_b$	1.5	2.7	4.5	7.5	9.5
$\beta$	0.008	0.012	0.013	0.013	0.014
$S_v$	21.5	17.9	5.9	0.2	-
stroming Z- N					
$V_{tR}$	0.08	0.12	0.15	0.17	0.20
$S_b$	0.5	1	1.3	1.5	1.7
$S_{\#} / S_b$	2.7	5.7	11	16	28
$S_b$	-	0.2	0.4	0.5	0.6
$S_{\#} / S_b$	-	2.7	4.5	7.5	9.5
$\beta$	0.064	0.067	0.067	0.069	0.072
$S_v$	2.6	2.5	0.9	-	-

h = 10 m.					
golfperiodeklasse 10 - 12 s.					
golfhoogteklasse	0.5-1.0	1.0-1.5	1.5-2.0	2.0-2.5	>2.5
stroming N- Z					
$V_{tR}$	0.09	0.12	0.14	0.17	0.2
$S_b$	2.7	5.3	7	8.1	8.9
$S_{\#} / S_b$	2.7	5.7	11	16	28
$S_b$	0.4	1.4	2.3	3	3.4
$S_{\#} / S_b$	1.5	2.7	4.5	7.5	11
$\beta$	0.012	0.012	0.013	0.013	0.014
$S_v$	30.5	34.8	20.3	1.8	-
stroming Z- N					
$V_{tR}$	0.08	0.11	0.14	0.17	0.19
$S_b$	0.4	0.9	1.3	1.5	1
$S_{\#} / S_b$	2.2	5.7	9.5	16	28
$S_b$	-	0.2	0.4	0.5	0.6
$S_{\#} / S_b$	-	2.7	4.5	7.5	10
$\beta$	0.064	0.067	0.069	0.072	0.075
$S_v$	4.3	6.1	3.7	0.3	-

## biilage 9.2

h = 10 m. golfperiodeklasse 12 - 14 s.						
golfhoogteklasse		0.5-1.0	1.0-1.5	1.5-2.0	2.0-2.5	>2.5
stroming N- Z						
$V_{tR}$		0.08	0.11	0.14	0.17	0.19
$S_b$		2.5	5.1	6.8	8	8.8
$S_{\#} / S_b$		2.7	5.7	11	16	28
$S_b$		0.4	1.3	2.2	2.9	3.4
$S_{\#} / S_b$		1.5	2.7	4.5	7.5	10
$\beta$		0.012	0.012	0.013	0.013	0.014
$S_v$		10.2	18.4	16.5	2.8	-
stroming Z- N						
$V_{tR}$		0.08	0.11	0.14	0.17	0.19
$S_b$		0.4	0.9	1.2	1.5	1.6
$S_{\#} / S_b$		2	4.5	12	16	28
$S_b$		-	0.2	0.4	0.5	0.6
$S_{\#} / S_b$		-	2.7	4.5	7.5	10
$\beta$		0.064	0.064	0.066	0.067	0.067
$S_v$		0.9	2.6	3.2	0.5	-

h = 10 m. golfperiodeklasse 14 - 16 s.						
golfhoogteklasse		0.5-1.0	1.0-1.5	1.5-2.0	2.0-2.5	>2.5
stroming N- Z						
$V_{tR}$		0.08	0.11	0.14	0.17	0.19
$S_b$		2.4	5	6.8	8	8.8
$S_{\#} / S_b$		2.2	5.7	11	16	28
$S_b$		0.4	1.3	2.2	2.9	3.4
$S_{\#} / S_b$		1.5	2.7	4.5	7.5	10
$\beta$		0.012	0.012	0.013	0.013	0.014
$S_v$		0.5	2.1	4.1	2.1	0.3
stroming Z- N						
$V_{tR}$		0.08	0.11	0.14	0.16	0.19
$S_b$		0.3	0.9	1.2	1.5	1.5
$S_{\#} / S_b$		2	4.5	12	16	28
$S_b$		-	0.2	0.4	0.5	0.6
$S_{\#} / S_b$		-	2.2	4.5	7.5	10
$\beta$		0.064	0.067	0.067	0.071	0.074
$S_v$		0.1	0.3	0.8	0.4	0.1

## bijlage 9.2

h = 15 m. golfperiodeklasse 8 - 10 s.						
golfhoogteklasse		0.5-1.0	1.0-1.5	1.5-2.0	2.0-2.5	>2.5
stroming N- Z						
$V_{tR}$		0.08	0.10	0.12	0.15	0.17
$S_b$		2.8	5.4	7.4	8.9	9.9
$S_a / S_b$		2.3	4.4	6.8	12.4	17
$S_b$		1.3	3	4.6	5.8	6.8
$S_a / S_b$		1.5	3	4.4	6.8	12.4
$\beta$		0.005	0.005	0.006	0.006	0.007
$S_v$		11.1	5.7	1.7	0.1	-
stroming Z- N						
$V_{tR}$		0.07	0.10	0.12	0.14	0.16
$S_b$		0.4	1.1	1.7	2.1	2.3
$S_a / S_b$		1.5	3.7	5.3	9	11.6
$S_b$		0.2	0.6	1	1.4	1.6
$S_a / S_b$		1.4	2.6	4.4	6.8	9
$\beta$		0.022	0.025	0.025	0.027	0.028
$S_v$		1.0	1.3	0.4	-	-

h = 15 m. golfperiodeklasse 10 - 12 s.						
golfhoogteklasse		0.5-1.0	1.0-1.5	1.5-2.0	2.0-2.5	>2.5
stroming N- Z						
$V_{tR}$		0.08	0.10	0.12	0.15	0.17
$S_b$		2.7	5.4	7.4	8.9	10
$S_a / S_b$		2.3	4.4	6.8	12.4	17
$S_b$		1.2	3.2	4.8	6	6.9
$S_a / S_b$		1.5	3	4.4	6.8	12.4
$\beta$		0.005	0.005	0.006	0.006	0.007
$S_v$		16.4	15.2	7.0	0.9	-
stroming Z- N						
$V_{tR}$		0.07	0.10	0.12	0.14	0.17
$S_b$		0.4	1.1	1.7	2.1	2.4
$S_a / S_b$		1.5	3.7	5.3	9	11.6
$S_b$		0.2	0.6	1.1	1.4	1.6
$S_a / S_b$		1.4	2.6	4.4	6.8	9
$\beta$		0.023	0.025	0.025	0.027	0.028
$S_v$		1.8	3.5	1.4	0.1	-

## biilage 9.2

h = 15 m. golfperiodeklasse 12 - 14 s.						
golfhoogteklasse		0.5-1.0	1.0-1.5	1.5-2.0	2.0-2.5	>2.5
stroming N- Z						
$V_{tR}$		0.08	0.10	0.12	0.14	0.16
$S_b$		2.5	5.1	7.3	8.8	9.9
$S_{\#} / S_b$		2.6	4.4	6.8	10	17
$S_b$		1.1	3	4.7	6	6.9
$S_{\#} / S_b$		1.5	3	4.4	6.8	9
$\beta$		0.006	0.006	0.006	0.007	0.007
$S_v$		5.6	7.7	6.0	1.0	-
stroming Z- N						
$V_{tR}$		0.07	0.09	0.12	0.14	0.16
$S_b$		0.3	1	1.6	2	2.3
$S_{\#} / S_b$		1.5	3	4.4	6.8	12.4
$S_b$		0.2	0.6	1.1	1.4	1.6
$S_{\#} / S_b$		1.4	2.6	4.4	6.8	9
$\beta$		0.024	0.026	0.028	0.029	0.030
$S_v$		0.3	1.5	0.6	0.1	-

h = 15 m. golfperiodeklasse 14 - 16 s.						
golfhoogteklasse		0.5-1.0	1.0-1.5	1.5-2.0	2.0-2.5	>2.5
stroming N- Z						
$V_{tR}$		0.08	0.10	0.12	0.14	0.16
$S_b$		2.4	5	7.2	8.8	9.9
$S_{\#} / S_b$		2.6	4.4	6.8	10.5	17
$S_b$		1.1	3.0	4.7	6	6.9
$S_{\#} / S_b$		1.5	3	4.4	6.8	9
$\beta$		0.005	0.005	0.005	0.006	0.006
$S_v$		0.4	0.9	1.7	0.8	0.2
stroming Z- N						
$V_{tR}$		0.07	0.09	0.12	0.14	0.16
$S_b$		0.3	1	1.6	2	2.3
$S_{\#} / S_b$		1.5	3	4.4	6.8	12.4
$S_b$		0.1	0.6	1	1.4	1.6
$S_{\#} / S_b$		1.4	2.6	4.4	6.8	9
$\beta$		0.024	0.024	0.026	0.027	0.027
$S_v$		-	0.1	0.2	0.1	-

