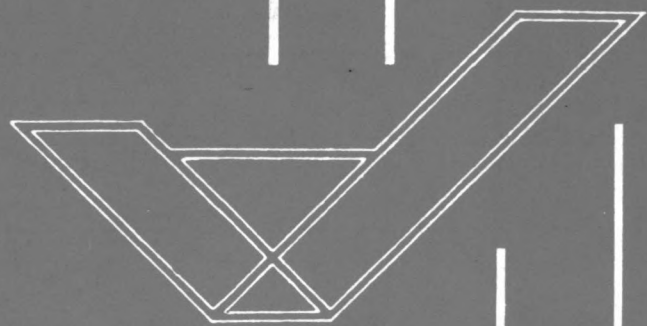


610B



Golfklimaat Toegangseul Monrovia

H. Stefess

december 1984  
R/1984/D/21

Technische Hogeschool Delft  
afdeling der Civiele Techniek  
vakgroep Vloeistofmechanica

# GOLFKLIMAAT TOEGANGSGEUL MONROVIA

---

H. Stefess

december, 1984.

## Inhoudsopgave

1 Inleiding.	1
2 Bepaling lange termijn statistiek golfklimaat Monrovia.	4
2.1 Overzicht.	4
2.2 De golfgegevens.	5
2.3 Beschrijving van het golfklimaat te Buchanan met 3 dimensies ( $H_s, \bar{T}, \varphi$ ).	7
2.3.1 $p(\varphi H_s)$ Buchanan	7
2.3.2 $p(\bar{T} H_s)$ Buchanan	9
2.4 De verwerking van de waarnemingen.	11
2.4.1 Bepaling $p(H_s \varphi)$ Contonou en $p(\varphi H_s)$ Buchanan.	11
2.4.2 Bepaling $P(H_s \bar{T})$ Sekondi	12
2.4.3 $P(\bar{T})$ Sekondi	14
2.5 Samenvatting.	14
3 Golfvervorming bij een geul.	15
3.1 Inleiding.	15
3.2 Beschrijving golfvoortplanting.	16
3.2.1 Refractiebenadering.	16
3.2.2 Refractie-diffractie benadering.	19
3.3 Golfvervorming bij de toegangseul van Monrovia.	21
3.3.1 Invloed geultalud.	21
3.3.2 Bepaling $H_{geul}/H_{nv}$ voor golfklimaat en geul te Monrovia.	22
4 Koppeling golfvervorming en lange termijn statistiek.	24
5 Samenvatting.	26
Symbolenlijst	28
Literatuurlijst.	29
Bijlagen	30

## 1 Inleiding.

In dit deelrapport is de lange termijn statistiek van het golfklimaat in de toegangsgoel van de haven van Monrovia bepaald.

Deze golfklimaatbeschrijving is uitgevoerd in het kader van de in het hoofdontwerp " De haven van Monrovia " te verrichten geuldieptebeplating. De verticale scheepsbeweging onder invloed van golven is bij deze beplating van bijzonder belang. De grootte van deze scheepsbeweging is met name afhankelijk van de combinatie hoek van inval van de golven op het schip en de bijbehorende gemiddelde golfperiode. Bij de beplating van de verticale scheepsbeweging is het dan ook wenselijk om over golfgegevens te beschikken waarvan de informatie betreffende golfhoogte , golfperiode en golfrioting gecombineerd is.

Liberia is gelegen aan de kust van West Afrika. Voor deze kust wordt een permanent aanwezige deining aangetroffen. Deze deining wordt opgewekt door stormen die in het gebied tussen de 40° en 50° zuiderbreedte woeden. Een deel van de aldaar opgewekte zeevang plant zich in noordelijke richting voort en manifesteert zich voor de kust van West Afrika als deining met een richting varierend van zuid tot zuid-west. De gemiddelde golfperiode en de gemiddelde golfhoogte vertonen langs deze kust een redelijke overeenkomst met elkaar.

Liberia ligt in het gebied van de doldrums ( gordel van windstilten ); windsnelheden boven de 10 m/s komen zeer sporadisch voor. Als gevolg hiervan heeft de zeevang in het gebied een maximale golfperiode van circa 7 sekonde. Het maatgevende schip bij de geuldieptebeplating , een ertscarrier van 150.000 dwt. , is nauwelijks gevoelig voor dergelijke korte golven. De Beschrijving van het golfklimaat wordt daarom beperkt tot een beschrijving van de deining. Omdat golfgegevens van Monrovia niet bekend waren , is met de beschikbare gegevens van de plaatsen Buchanan , Sekondi en Contonou , het golfklimaat te Monrovia benaderd. Dit heeft geresulteerd in een 3 dimensionale kansdichtheidfunctie voor het golfklimaat in de toegangsgoel. De dimensies zijn de significante golfhoogte ,  $H_g$  , de gemiddelde golfperiode ,  $T$  , en de golfrioting in de goel  $\phi$  .



Bij deze beschrijving is de invloed van de toegangsgedul op het golfklimaat in rekening gebracht. Er is namelijk een duidelijke verandering in het golfpatroon te verwachten indien er een vrij groot verschil is tussen de waterdiepte in en buiten de geul en indien de richting van de invallende golven een vrij kleine hoek maakt met de geulas .

Indien deze hoek een bepaalde kritieke waarde nadert wordt een groot gedeelte van de invallende golfenergie bij het geultalud gereflecteerd. De grootte van de kritieke hoek van inval is afhankelijk van het verschil in waterdiepte in en buiten de geul en van de golfperiode.

Deze verschijnselen blijken goed beschreven te kunnen worden met de zogenaamde 'mild slope' vergelijking.[10]

Met een op deze vergelijking gebaseerd numeriek model is de invloed van het geultalud op de golfvervorming onderzocht. Op grond van de uitkomsten van dit onderzoek is een geultalud gekozen. Voor het aldus bepaalde geulprofiel is de te Monrovia optredende golfvervorming berekend. Met behulp van de uit de berekening resulterende verhouding golfhoogte in de geul- hoogte van de invallende golven is de kansdichtheidfunctie van het golfklimaat in de geul,  $p(H_g, \bar{T}, \varphi)$  , bepaald.

De voornaamste resultaten en conclusies zijn :

- het is mogelijk gebleken het golfklimaat in de toegangsgedul te Monrovia met een driedimensionale k.d.f. te beschrijven.
- indien de inkomende golven ter plaatse van de geul een hoek van inval gelijk aan de kritieke hoek van inval hebben treedt er grote golfvervorming op. De hierbij optredende golfhoogte in de geul is een factor twee groter dan de hoogte van de invallende golven.
- het golfklimaat in de geul van Monrovia wordt zeer bepaald door de golfvervorming bij de geul.

te Monrovia heeft een deel van de golven uit de diep water richtingsektor  $215^\circ < \varphi < 240^\circ$  ter hoogte van de havenmond (waterdiepte buiten de geul bedraagt ter plaatse 10 m.) een kritieke hoek van inval. De kritieke hoek van inval bedraagt voor deze deininggolven circa  $45^\circ$ .

- de golfklasse met de grootste kans van optreden in de geul wordt beschreven door:

$$\begin{aligned} 0.5 &\leq H_m < 1 \text{ m} \\ 10 &\leq T < 12 \text{ s} \\ 225^\circ &\leq \varphi < 235^\circ \end{aligned}$$

de kans van optreden van golfhoogten in de geul groter dan 2 m is door de golfvervorming bij de geul toegenomen van  $0.4 \cdot 10^{-4}$  tot  $1.6 \cdot 10^{-4}$ .

## 2. Bepaling lange termijn statistiek golfklimaat Monrovia.

### 2.1 Overzicht.

De te volgen methode bij de beschrijving van de lange termijn statistiek van het golfklimaat te Monrovia wordt in hoge mate bepaald door de golfgegevens waarover beschikt kan worden. In het onderhavige geval kan over 1- en 2-dimensionale verdelingen van de het golfklimaat beschrijvende parameters worden beschikt. Door deze gegevens te combineren is het mogelijk een beschrijving in 3 dimensies te verkrijgen.

Bijkomend probleem hierbij is dat de gegevens afkomstig zijn van verschillende locaties langs de kust van West Afrika. De grote afstand, circa 5000 km. zie bijlage 1.1, tussen de oorsprong van de deining en de kust van West Afrika maakt echter dat de deininggegevens van de plaatsen langs deze kust redelijk met elkaar overeenkomen,

zie bijlage 2.1 ( uitzondering hierop vormt de golfhoogte verdeling van Contonou, zie hoofdstuk 2.2 ) Het genoemde overeenkomende beeld maakt het mogelijk om golfgegevens afkomstig van verschillende plaatsen langs deze kust te combineren.

Bij de bepaling van het golfklimaat is gebruik gemaakt van de golfgegevens van Buchanan, Sekondi en Contonou. De gegevens van de laatste twee plaatsen zijn gebruikt omdat het de enige twee plaatsen zijn met gegevens in 2 dimensies. In geval van Sekondi betreft het gecombineerde golfhoogte-golfperiode gegevens en van Contonou zijn golfhoogte-golfrichting gegevens beschikbaar. De gegevens van Buchanan worden gebruikt omdat deze representatief worden beschouwd voor Monrovia (van Monrovia zelf zijn geen gegevens beschikbaar). De relatief geringe afstand Monrovia-Buchanan en de overeenkomende hydrografie van de betreffende kustdelen rechtvaardigen, gegeven het redelijk overeenkomende deiningbeeld voor de kust van West Afrika, deze aanname. In principe wordt in dit hoofdstuk dus een beschrijving van het golfklimaat te Buchanan gegeven. Deze beschrijving wordt van toepassing geacht te Monrovia.

## 2.2 De golfgegevens.

Alvorens in te gaan op de beschikbare golfgegevens, worden de in dit hoofdstuk gebruikte grootheden gedefinieerd.

- $H_s$ , de significante golfhoogte, is het gemiddelde van het hoogste 1/3 deel van de golven (de gegeven waarden zijn de golfhoogten op circa 10 m. diep water.).
- $\bar{T}$ , is de gemiddelde waarde van het tijdsinterval tussen twee opeenvolgende opgaande nuldoorgangen van de zeeoppervlak uitwijking.
- $\varphi_0$ , is de golfrichting op diep water, de richting is gerelateerd aan het noorden en rechtsomdraaiend, zodat golven komend uit het oosten een richting gelijk aan  $90^\circ$  hebben.

De golfgegevens van Buchanan bestaan uit een lange termijn verdeling van de significante golfhoogte, zie bijlage 2.2, en een kansdichtheidfunctie van de golfrichting op diep water, zie bijlage 2.3. De golfhoogtegegevens berusten op een waarnemingsduur van 4 jaar. Er is niet bekend waar en hoe de waarnemingen zijn uitgevoerd. Van de golfrichtinggegevens zijn zowel de meetduur als de meetmethode niet bekend.

Van Sekondi is een zogenaamd scatterdiagram van  $H_s$  en  $\bar{T}$  beschikbaar [3], zie bijlage 2.3. Het diagram geeft de kans van optreden, uitgedrukt in promillen, van een combinatie van  $H_s$ - en  $\bar{T}$ -interval. De gegevens zijn met behulp van meetapparatuur verzameld. De duur van de waarnemingen bedraagt 5 maanden. Tevens is een golfhoogte verdeling beschikbaar, zie bijlage 2.1. Deze gegevens berusten op waarnemingen van een jaar, uitgevoerd met meetapparatuur.

De meetgegevens van Contonou [2] bestaan uit een lange termijn verdeling van de golfhoogte, zie bijlage 1.2, en gecombineerde golfhoogte en golfrichting waarnemingen, zie bijlage 2.4. De golfhoogte verdeling is op waarnemingen van 1 jaar gebaseerd. De metingen zijn verricht bij de haven op 12 m diep water. Niet duidelijk is of het hier om visuele waarnemingen gaat of dat de waarnemingen met meetapparatuur zijn uitgevoerd. De gevonden golfhoogte verdeling vertoont een afwijkend verloop t.o.v. de andere golfhoogteverdelingen; de golfhoogten te Contonou zijn beduidend hoger. De in bijlage 2.1 en 2.2 gegeven

golfhoogteverdeling blijkt zelfs tot hogere golven te leiden dan de door Hogben en Lumb [6] gegeven golfhoogteverdeling van sektor 34. Deze sektor is gelegen tussen de oorsprong van de deining en de kust van West Afrika, zie bijlage 1.1. De hydrografie van het kustgebied te Contonou geeft een bodemverloop te zien dat niet wordt verstoord door banken, riffen en dergelijke. (dit kan ook ten aanzien van het bodemverloop van de kust voor de de andere twee gebruikte plaatsen gezegd worden.) Het vermoeden bestaat dan ook dat bij de registratie of bij de verwerking van de golfhoogtegegevens van Contonou fouten zijn gemaakt. De afwijking tussen de golfhoogten van Contonou en die van overige plaatsen bedraagt ongeveer een factor 1.6. Het is daarom denkbaar dat bij de verwerking van de gegevens van Contonou de significante golfhoogte ten onrechte als gemiddelde golfhoogte is aangeduid. In een latere fase kan deze 'gemiddelde golfhoogte' door vermenigvuldiging met de factor 1.596 (zoals volgend uit de Rayleigh verdeling) naar de 'significante golfhoogte' zijn getransformeerd.

De gecombineerde golfhoogte-golfrichting gegevens van Contonou betreffen een waarnemingsperiode van 4 jaar. Niet duidelijk is hoe de metingen zijn uitgevoerd. De golfhoogten uit deze waarnemingen komen redelijk overeen met de eerdergenoemde golfhoogteverdeling van Contonou. Het is daarom aannemelijk dat beide golfhoogteverdelingen van dezelfde bron afkomstig zijn.

Opmerking : t.a.v. de uitkomsten van de op grond van deze meetgegevens bepaalde kans van optreden van een bepaalde combinatie van golfhoogte, -richting en -periode moet men enige voorzichtigheid betrachten. De waarnemingsduur van de meetgegevens van met name Sekondi is vrij kort. Als gevolg hiervan kunnen de gemeten waarden ten opzichte van het gemiddelde golfklimaat afwijken. Voor betrouwbare lange termijn verdelingen zijn meetgegevens over meerdere jaren noodzakelijk. Eventueel optredende afwijkingen in de golfparameters worden dan uitgemiddeld.



### 2.3 Beschrijving van het golfklimaat te Buchanan met 3 dimensies $(H_0, \bar{T}, \varphi)$ .

Het is mogelijk tot een 3 dimensionale beschrijving te komen door de gegevens van de 2 dimensionale waarnemingen te combineren. De verbinding tussen de beide 2 dimensionale verdelingen wordt gevormd door de gemeenschappelijke dimensie, in dit geval  $H_0$ .

De verdelingsfunctie,  $P(H_0, \bar{T}, \varphi)$ , is te schrijven als het produkt van een voorwaardelijke verdeling en een marginale verdeling. In dit geval wordt de gemeenschappelijke dimensie gevormd door de significante golfhoogte dus :

$$P(H_0, \bar{T}, \varphi) = P(\bar{T}, \varphi | H_0) * P(H_0) \quad (2.1)$$

In dit rapport zal, bij gebrek aan andere gegevens worden aangenomen dat  $\bar{T}$  en  $\varphi$  stochastisch onafhankelijk van elkaar zijn, zodat geldt :

$$p(H_0, \bar{T}, \varphi) = p(\bar{T} | H_0) * p(\varphi | H_0) * p(H_0) \quad (2.2)$$

Met deze relatie is het golfklimaat te Buchanan in beginsel beschreven. De termen in bovenstaande vergelijking kunnen op basis van het beschikbare waarnemingsmateriaal bepaald worden. Op de algemene lijn van deze bepaling wordt in onderstaande paragrafen nader ingegaan. De bepaling zelf wordt gegeven in hoofdstuk 2.4 : de verwerking van de meetgegevens.

#### 2.3.1 $-p(\varphi | H_0)$ Buchanan

Bij de bepaling van de voorwaardelijke k.d.f. van de golfrichting wordt gebruik gemaakt van de gecombineerde golfhoogte-golfrichting waarnemingen van Contonou. De op basis van deze gegevens bepaalde voorwaardelijke k.d.f. beschrijft het verband tussen golfhoogte en richting te Contonou. Deze beschrijving moet in overeenstemming worden gebracht met de golfgegevens van Buchanan. Van Buchanan zijn zowel de golfhoogte verdeling,  $P(H_0)$  zie bijlage 2.2, als de k.d.f. van de golfrichting,  $p(\varphi)$  zie bijlage 2.3, bekend.



Met behulp van de eerder gegeven relatie tussen voorwaardelijke en marginale verdeling volgt :

$$p(\varphi|H_s)_{\text{Contonou}} = \frac{p(\varphi, H_s)_{\text{Contonou}}}{p(H_s)_{\text{Contonou}}} \quad (2.3)$$

en ook

$$p(\varphi|H_s)_{\text{Contonou}} = \frac{p(H_s|\varphi)_{\text{Contonou}} * p(\varphi)_{\text{Contonou}}}{p(H_s)_{\text{Contonou}}} \quad (2.4)$$

De voorwaardelijke k.d.f. van de golfrichting van Buchanan,  $p(\varphi|H_s)$ , wordt verkregen door de termen in het rechterlid van vergelijking (2.4) te transformeren naar de golfgegevens van Buchanan.

De functies  $p(H_s)_{\text{Contonou}}$  en  $p(\varphi)_{\text{Contonou}}$  kunnen hiertoe eenvoudigweg vervangen worden door de functies  $p(H_s)_{\text{Buchanan}}$  en  $p(\varphi)_{\text{Buchanan}}$ . Deze laatste twee functies zijn bekend, zie bijlage 2.2 en 2.3.

In geval van  $p(H_s|\varphi)_{\text{Contonou}}$  moeten zowel de golfhoogte als de golfrichting getransformeerd worden naar overeenkomstige waarden te Buchanan.

-1. de golfrichting. De k.d.f. van de golfrichting te Contonou, welke af te leiden is uit bijlage 2.4, komt matig overeen met die van Buchanan. De overeenkomst tussen bovenstaande k.d.f.'s verbetert aanzienlijk indien alle golfrichtingen van Contonou 5° tegen de klok ingedraaid worden. De corresponderende golfrichtingsektoren van Contonou en Buchanan en de bijbehorende kans van optreden van golven zijn opgenomen in bijlage 2.7. De voorwaardelijke k.d.f.'s,  $p(H_s|\varphi)_{\text{Contonou}}$  zijn voor de in deze bijlage gegeven sectoren bepaald, zie hoofdstuk 2.4.1.

-2. de golfhoogte. Van een golfhoogte te Contonou kan de overeenkomende golfhoogte te Buchanan bepaald worden door gebruik te maken van de verdelingsfuncties van de golfhoogten. Indien de overschrijdingskans van een zekere golfhoogte te Contonou gelijk is aan  $y$  :

$$P(H_s)_{\text{Contonou}} = y$$

dan wordt de corresponderende golfhoogte te Buchanan zo gekozen dat :

$$P(H_s \text{ Buchanan}) = y$$

In bijlage 2.2 zijn de overeenkomende golfhoogten van Contonou en Buchanan direct te bepalen door bij gelijke  $P(H_s)$  de waarden voor  $H_s \text{ Buchanan}$  en  $H_s \text{ Contonou}$  af te lezen.

De voorwaardelijke k.d.f. van de golfrichting van Buchanan is dan gelijk aan:

$$p(\varphi|H_s) \text{ Buchanan} = \frac{p(H_s|\varphi) \text{ Contonou} \# \cdot p(\varphi) \text{ Buchanan}}{p(H_s) \text{ Buchanan}}$$

$p(H_s|\varphi) \text{ Contonou} \#$  is gelijk aan de , volgens bovenstaande punten -1. en -2. , getransformeerde voorwaardelijke k.d.f. van Contonou ,  $p(H_s|\varphi) \text{ Contonou}$  .

### 2.3.2 $p(\bar{T}|H_s) \text{ Buchanan}$

Het beschikbare scatterdiagram van Sekondi , zie bijlage 2.3 , maakt het mogelijk vrij direct de voorwaardelijke verdeling van de golfperiode te Sekondi ,  $p(\bar{T}|H_s) \text{ Sekondi}$  , te bepalen. Echter i.v.m. de relatief grote veranderingen die de waarde van de responsfactor van het maatgevende schip bij golfperiodes tussen de 9 en 13 seconde kent , is het van belang om bij deze golfperiodes de verdeling van de grotere golfhoogten goed beschreven te hebben. Het scatterdiagram van Sekondi geeft echter nauwelijks registraties van grotere (hiermee worden in dit geval golven groter dan 5.5 foot bedoeld) golfhoogten. Als gevolg hiervan is het niet mogelijk voor golfhoogteklassen waarin deze hogere golven vallen betrouwbare voorwaardelijke verdelingsfuncties ,  $P(\bar{T}|H_s)$  , op te stellen. Daarom is in dit geval gekozen voor een beschrijving met behulp van  $p(H_s|\bar{T})$  . De gevraagde functie  $p(\bar{T}|H_s) \text{ Sekondi}$  wordt in dat geval verkregen volgens :

$$p(\bar{T}|H_s) \text{ Sekondi} = \frac{p(H_s|\bar{T}) \text{ Sekondi} \cdot p(\bar{T}) \text{ Sekondi}}{p(H_s) \text{ Sekondi}} \quad (2.5)$$

Ook deze beschrijving moet om  $p(\bar{T}|H_s) \text{ Buchanan}$  te kunnen bepalen getransformeerd worden naar de golfgegevens van Buchanan. De termen in het rechterlid van vergelijking (2.5) worden hiertoe

herschreven.

De golfhoogteverdeling van Sekondi wordt eenvoudigweg vervangen door de golfhoogteverdeling van Buchanan. Deze laatstgenoemde verdeling is gegeven in bijlage 2.2.

Van de golfperiodeverdeling te Buchanan zijn geen gegevens beschikbaar. Aangenomen wordt dat de betreffende verdelingen van Buchanan en Sekondi aan elkaar gelijk zijn:  $p(\bar{T})_{\text{Sekondi}} = p(\bar{T})_{\text{Buchanan}}$ . De verdeling van de golfperiodes van Sekondi is m.b.v. de beschikbare waarnemingen te bepalen, zie bijlage 2.12 en hoofdstuk 2.4.3.

Van de term  $p(H_s | \bar{T})_{\text{Sekondi}}$  dienen de golfhoogtewaarden door overeenkomstige golfhoogten te Buchanan te worden vervangen. De in hoofdstuk 2.3.1 gegeven methode wordt ook in dit geval toegepast, dus: Indien de overschrijdingskans van een zekere golfhoogte te Sekondi gelijk is aan  $w$ :

$$P(H_s)_{\text{Sekondi}} = w$$

dan wordt de corresponderende golfhoogte te Buchanan zo gekozen dat:

$$P(H_s)_{\text{Buchanan}} = w$$

Bovenstaand verband wordt wederom m.b.v. bijlage 2.2 bepaald.

De voorwaardelijke k.d.f. van de golfperiode te Buchanan wordt tenslotte beschreven door:

$$p(\bar{T} | H_s)_{\text{Buchanan}} = \frac{p(H_s | \bar{T})_{\text{Sekondi}} \cdot p(\bar{T})_{\text{Buchanan}}}{p(H_s)_{\text{Buchanan}}}$$

$p(H_s | \bar{T})_{\text{Sekondi}}$  is de getransformeerde van  $p(H_s | \bar{T})_{\text{Sekondi}}$ .

Resumerend kan gezegd worden dat de k.d.f. van het golfklimaat te Buchanan beschreven wordt door:

$$p(H_s, \bar{T}, \varphi) = \frac{p(H_s | \bar{T})_{\text{Sekondi}} \cdot p(\bar{T})_{\text{Buchanan}} \cdot p(H_s)_{\text{Contonou}} \cdot p(\varphi)_{\text{Buchanan}}}{p(H_s)_{\text{Buchanan}}}$$

In de volgende paragraaf wordt meer gedetailleerd ingegaan op de bepaling van de onbekende termen in bovenstaande vergelijking.

#### 2.4 De verwerking van de waarnemingen.

##### 2.4.1 Bepaling $p(H_s|\varphi)$ Contonou en $p(\varphi|H_s)$ Buchanan.

De  $H_s - \varphi_0$  waarnemingen van Contonou zijn gerangschikt in golfhoogteklassen en richtingsektoren, zie bijlage 2.5. De ingevoerde golfhoogteklassen corresponderen met golfhoogteklassen te Buchanan met een breedte van 0.5 m, met deze klassebreedte wordt een in het kader van deze studie voldoende gedetailleerde beschrijving van het golfklimaat verkregen. Bij de keuze van de golfrichtingsektoren is de indeling aangehouden welke door k.d.f. van de golfrichting van Buchanan wordt gegeven.

De hierbij gebruikte golfrichtingsektoren zijn t.o.v. de bij de k.d.f. van de golfrichting van Buchanan gebruikte richtingsektoren  $5^\circ$  verdraaid. Hierdoor wordt een betere overeenkomst verkregen tussen de beide k.d.f.'s (de verdraaiing is zodanig dat geldt  $\varphi_{\text{Buchanan}} = \varphi_{\text{Contonou}} + 5^\circ$ ).

De gebruikte golfhoogteklassen hebben een breedte van 0.25 m. Deze waarde is aangehouden om over voldoende punten te beschikken bij de grafische verwerking van de gegevens. Bijlage 2.6 geeft de voor 5 richtingsektoren uitgezette voorwaardelijke verdelingsfuncties. De coördinaten van de in bijlage 2.6 uitgezette punten zijn de bovengrenzen van de golfhoogteklassen en de bijbehorende overschrijdingskans.

De gegevens zijn uitgezet op Weibull papier. De Weibull-verdeling bleek in dit geval de gegevens beter te benaderen dan de log-normaal verdeling. Op het oog is de best passende lijn bepaald. De Weibull verdeling wordt gegeven door :

$$P\{H_s > x\} = \exp -[(x-c)/a]^b \quad \text{bij } x > c \quad (2.6)$$

$$= 1 \quad \text{bij } x < c$$

$P\{H_s > x\}$  is gelijk aan de kans dat de golfhoogte groter is dan de waarde  $x$ .

- c is de ondergrens van x.  
 a is een schaalfactor ( $a > 0$ )  
 b is een vormfactor

Voor de 5 verdelingsfuncties in bijlage 2.6 zijn de factoren a, b en c bepaald, zie bijlage 2.5.

Uit de waarden blijkt dat de Weibull verdeling in dit geval met 2 parameters beschreven kan worden,  $c=0$ , zodat geldt voor de richtingsektor  $\varphi_0$ :

$$P(H_s | \varphi_0) = 1 - \exp -[x/a_1]^{b_1} \quad (2.7)$$

Bij de berekening van bovenstaande k.d.f. zijn zowel de golfhoogten als de golfrichtingen opgedeeld in 5 klassen, zie bijlage 2.7 en 2.8. Met vergelijking (2.7) is de kans bepaald dat voor een zekere richtingsektor de golfhoogte in een bepaalde golfhoogteklasse valt,  $P(H_s | \varphi_{0i})$  zie bijlage 2.8. De kans op golven met een golfhoogte groter dan 2.65 m, overeenkomend met een golfhoogte te Buchanan van 1.5 m, is voor alle richtingsektoren zeer klein. Als gevolg hiervan is het niet mogelijk voor deze golfhoogteklassen een betrouwbare  $P(\varphi_0 | H_s)$  verdeling op te stellen. In de desbetreffende gevallen wordt aangenomen dat de golfhoogte en de golfrichting stochastisch onafhankelijk van elkaar zijn zodat geldt:

$$P(\varphi_0 | H_s) = p(\varphi_0)$$

, zie bijlage 2.8, tweede tabel.

#### 2.4.2 Bepaling $P(H_s | \bar{T})$ Sekondi

Bij de bepaling wordt gebruik gemaakt van het scatterdiagram van  $H_s$  en  $\bar{T}$  van Sekondi, zie bijlage 2.3. De in het  $H_s$ - $\bar{T}$  diagram gepresenteerde waarnemingen zijn gegroepeerd in 4 golfperiodeklassen te weten:

$8 \leq \bar{T} < 10$  s,  $10 \leq \bar{T} < 12$  s,  $12 \leq \bar{T} < 14$  s,  $14 \leq \bar{T} < 16$  s, zie bijlage 2.9.

Er is gekozen voor deze golfperiodeklassen omdat de voor de verticale scheepsresponsies interessante golfperioden in deze klassen vallen. Ook is in verband met de korte waarnemingsduur en het geringe aantal meetpunten de betrouwbaarheid van de golfperiodeverdeling voor golfperioden groter dan 16 s en



kleiner dan 8 s twijfelachtig.

De golfhoogteklassen hebben een breedte van 1 foot. Deze breedte is aangehouden om over voldoende punten te beschikken bij de grafische verwerking van de gegevens.

In bijlage 2.10 zijn op basis van bovenstaande voor de 4 golfperiodeklassen de golfhoogte verdelingen uitgezet. De coördinaten van de punten zijn wederom de klassegrenzen en de bijbehorende overschrijdingskans. De log-normaalverdeling blijkt in dit geval de meetwaarden beter te beschrijven dan de Weibullverdeling. Op het oog is de best passende lijn bepaald.

De log-normale kansdichtheidsfunctie is gegeven door :

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_x} \exp \left[ -\frac{(x - \mu_x)^2}{2\sigma_x^2} \right] \quad (2.8)$$

met  $\mu_x$  is de gemiddelde waarde van  $x$   
 $\sigma_x$  is de standaardafwijking van  $x$   
 $x = \log H_s$

Van de 4 voorwaardelijke verdelingsfuncties (bijlage 2.10) zijn de parameters van de bijbehorende kansdichtheidsfunctie bepaald, zie bijlage 2.9. De voorwaardelijke verdeling van de golfhoogte bij een golfperiodeklasse  $T_k$  wordt beschreven door :

$$P(H_s | T_k) = \int_{-\infty}^{\log H_s} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_x} * \exp \left[ -\frac{(\log H_s - \mu_{xk})^2}{2\sigma_{xk}^2} \right] dx \quad (2.9)$$

De uitkomst van deze integraal kan met behulp van tabellen, zie bijlage 2.11, gevonden worden, de hierbij te hanteren parameter  $u$  wordt gegeven door :

$$u = (\log H_s - \mu_x) / \sigma_x \quad (2.10)$$



2.4.3  $-P(\bar{T})$  Sekondi

De marginale verdelingsfunctie van de golfperiode te Sekondi is met behulp van het scatterdiagram, zie bijlage 2.3, bepaald. Om over voldoende punten te beschikken bij de grafische verwerking zijn golfperiodeklassen gebruikt met een breedte van 1 seconde, zie bijlage 2.12. Op het oog is de best passende lijn bepaald. De verdeling is beschreven met een log-normale k.d.f., zie ook vergelijking (2.8). De bepalende parameters van de k.d.f. zijn gelijk aan:

$$\begin{aligned}\mu_y &= 1.03 \\ \sigma_y &= 0.19 \\ y &= \log \bar{T}\end{aligned}$$

## 2.5 Samenvatting.

Het golfklimaat voor Buchanan kan, nu alle termen van vergelijking (2.2) bekend zijn, met een analytische uitdrukking beschreven worden. Met deze uitdrukking kan voor elke gewenste golfhoogteklassen de 3 dimensionale k.d.f. bepaald worden. De golfrichtingsektoren en de golfperiodeklassen liggen echter als gevolg van de gebruikte voorwaardelijke k.d.f.'s vast. Bij de beschrijving nu is een opdeling gemaakt in 5 golfhoogteklassen, 4 golfperiodeklassen en 5 richtingsektoren, te weten:

golfhoogteklasse	golfperiodeklasse	golfrichtingsektor
$0.5 \leq H_s < 1.0 \text{ m}$	$8 \leq \bar{T} < 10 \text{ s}$	$150^\circ \leq \phi_0 < 185^\circ$
$1.0 \leq H_s < 1.5 \text{ m}$	$10 \leq \bar{T} < 12 \text{ s}$	$185^\circ \leq \phi_0 < 195^\circ$
$1.5 \leq H_s < 2.0 \text{ m}$	$12 \leq \bar{T} < 14 \text{ s}$	$195^\circ \leq \phi_0 < 205^\circ$
$2.0 \leq H_s < 2.5 \text{ m}$	$14 \leq \bar{T} < 16 \text{ s}$	$205^\circ \leq \phi_0 < 215^\circ$
$H_s > 2.5 \text{ m}$		$215^\circ \leq \phi_0 < 240^\circ$

De golfhoogten zijn de golfhoogten op circa 12 m diep water (de waarnemingen zijn bij deze diepte uitgevoerd). De golfrichting is de richting op diep water. In verband met de overzichtelijkheid van de berekeningen wordt de invoering van de werkelijke golfrichtingen uitgesteld tot de beschrijving van het golfklimaat in de toegangseul. In het laatste geval wordt naast de richtingverandering t.g.v. de refractie van de golven en ook de golfvervorming bij het geultalud, zie hoofdstuk 3, in rekening gebracht. In bijlage 2.13 wordt de kans gegeven dat een bepaalde golfconditie, beschreven door een van de mogelijke combinaties van golfrichtingsektor, golfperiodeklasse en golfhoogteklasse, optreedt. De eenheid van de in de bijlage gegeven kans is  $10^{-4}$ .

### 3 Golfvervorming bij een geul.

#### 3.1 Inleiding.

De aanwezigheid van een geul heeft een versturende invloed op het beeld van de invallende golven. De mate waarin het golfbeeld wordt verstoord is afhankelijk van de hoek van inval van de golven, de golfperiode, het geultalud en de waterdiepte binnen en buiten de geul.

Bij een hoek van inval groter of gelijk aan, wat de kritieke hoek van inval wordt genoemd, wordt een groot deel van de invallende golfenergie nabij de geulrand gereflecteerd. De hoek van inval wordt gedefinieerd als de hoek tussen de golfrichting en de normaal op het geultalud. Bij deze hoek van inval kunnen langs de geulrand golven optreden die aanzienlijk hoger zijn dan de invallende golf, terwijl dan in de geul de golven relatief laag zijn. In geval van een iets kleinere hoek van inval dan de kritieke hoek van inval zijn ook in de geul hoge golven te verwachten. De grootte van de kritieke hoek van inval is een functie van de waterdiepte buiten en binnen de geul en van de golfperiode.

Verdieping van de toegangsgedul, iets wat voor vele havens door de toenemende diepgang van de grote schepen noodzakelijk is, kan dus duidelijke consequenties hebben ten aanzien van de golfvervorming.

Bij een door het Waterloopkundig Laboratorium Delft uitgevoerd hydraulisch modelonderzoek naar de golfdoordringing in de nieuwe buitenhaven van Europoort zijn in geval van een tot -30 m verdiepte Maasgeul bovenbeschreven verschijnselen gevonden [8]. Een hydraulisch modelonderzoek van Zwamborn en Grieve [7] aan de havenlay-out van Richards Bay (Zuid Afrika), geuldiepte -25 m, geeft soortgelijke resultaten te zien.

Berkhoff en Zwols [8] hebben zowel in een hydraulisch model als met een numeriek model de golfvorming bij een geul onderzocht. De uitkomsten van beide modellen komen redelijk overeen. En ook hier wordt het zelfde beeld gevonden: Bij een hoek van inval iets kleiner dan de kritieke hoek zijn er hoge golven ter plaatse van het talud en de geul. Bij een hoek van inval gelijk of groter dan de kritieke hoek worden hoge golven op en voor het talud gevonden, in de geul zijn de golven laag.

### 3.2 Beschrijving golfvoortplanting.

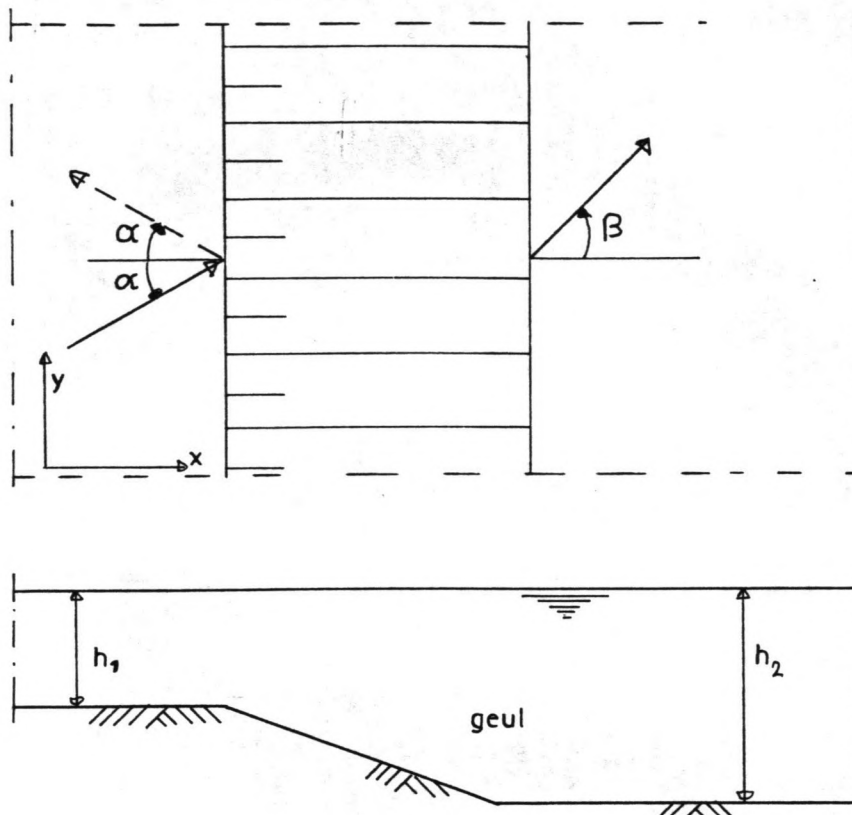
Allereerst wordt met behulp van de refractietheorie de golfvorming bij een geul beschreven. Vervolgens zal het probleem met de zogenaamde 'mild slope' vergelijking benaderd worden.

#### 3.2.1 Refractiebenadering.

Er wordt gebruik gemaakt van de refractiebenadering zoals deze door Battjes [9] beschreven is. Belangrijke uitgangspunten van deze benadering zijn:

- de golven zijn lineair
- lokale diepte en golfparameters variëren langzaam.

In het geval van rechte evenwijdige dieptelijnen is de wet van Snellius toepasbaar zodat geldt: (zie figuur 3.1)



figuur 3.1 Golfrefractie bij een geul.

$$\frac{\sin \beta}{\sin \alpha} = \frac{c_2}{c_1} = \frac{\tanh(k \cdot h)_2}{\tanh(k \cdot h)_1} \quad (3.1)$$

met  $c$  is de voortplantingssnelheid  
 $h$  is de waterdiepte  
 $k$  is het golfgetal  
 $k = 2\pi/L$   
 $L$  is de golflengte

hieruit volgt :

$$\beta = \arcsin [\sin \alpha \cdot (\tanh(k \cdot h)_2 / \tanh(k \cdot h)_1)] \quad (3.2)$$

wordt onbepaald indien :

$$\sin \alpha \cdot [\tanh(k \cdot h)_2 / \tanh(k \cdot h)_1] > 1$$

De kritieke hoek van inval wordt nu gedefinieerd als :

$$\alpha_{\text{kritiek}} = \arcsin \left( \frac{\tanh(k \cdot h)_1}{\tanh(k \cdot h)_2} \right) \quad (3.3)$$

Bij deze invalshoek heeft  $\beta$  de waarde  $\pi/2$  en dringt er geen golfenergie tot de geul door.

Het golfbeeld vóór de geul wordt bepaald door de som van de invallende en de gereflecteerde golf. In het geval dat  $\alpha = \alpha_{\text{kritiek}}$  ontstaat er voor de geul een golfpatroon met golfhoogten die variëren van 0 tot 200% van de invallende golfhoogte.

De golfhoogte in een lopende golf (geen reflectie) laat zich, bij verwaarlozing van dissipatie, bepalen met :

$$\frac{d}{ds} [ P \cdot \delta b ] = 0 \quad (3.4)$$

met  $P$  is de gemiddelde energieflex per eenheid van lengte [W/m]

$$P = E \cdot n \cdot c$$

$s$  is een coördinaat in de richting van de golfvoortplanting

$b$  is de afstand tussen naburige golfstralen

$$\text{en} \quad \cos \beta / \cos \alpha = \delta b_{\text{geul}} / \delta b_{\text{invallend}} \quad (3.5)$$

Indien  $\alpha$  de waarde van  $\alpha_{\text{kritiek}}$  benadert, nadert de waarde van  $\beta$  tot  $\pi/2$ , en  $\cos \beta$  tot nul. Bij een kritieke hoek van inval is  $b_{\text{geul}} = 0$ , zie (3.5). In dat geval snijden de golfstralen en de golfhoogte ter plaatse zou oneindig zijn. Dit is een consequentie van het uitgangspunt van de refractieberekening:

- de berekening van elk van de golfstralen kan volledig losgekoppeld gebeuren van naburige golfstralen en van het amplitudeverloop in de omgeving.

Bij hoeken van inval in de buurt van  $\alpha_{\text{kritiek}}$  blijkt de refractietheorie niet te voldoen. In de beschrijving van de golfvoortplanting moet in dat geval naast refractie ook met diffractie rekening worden gehouden.

### 3.2.2 Refractie-diffractie benadering.

Bij deze benadering zal gebruik worden gemaakt van de onder andere door Berkhoff [10] afgeleide zogenaamde 'mild slope' vergelijking. Deze tweedimensionale differentiaalvergelijking beschrijft de voortplanting van enkelvoudige lineaire golven over een gebied met variabele diepte. De vergelijking luidt:

$$\nabla \cdot (c \cdot c_0 \nabla \phi) + \omega^2 \cdot c_0 / c \cdot \phi = 0 \quad (3.6)$$

met  $\phi$  is 2 dimensionale complexe golfpotentiaal functie

$$\phi(x,y) = a(x,y) \cdot \exp[i \cdot S(x,y)]$$

$$c_0 = n \cdot c$$

$$n = 0.5 \cdot [1 + (2 \cdot k \cdot h / \sinh 2 \cdot k \cdot h)]$$

$x, y$  zijn coördinaten in het horizontale vlak.

$S(x,y)$  is de fasefunctie.

$a(x,y)$  is de golfamplitude functie

Deze vergelijking beschrijft zowel refractie als diffractie verschijnselen. In geval van een constante diepte reduceert (3.6) tot de vergelijking van Helmholtz :  $\nabla^2 \phi + k^2 \cdot \phi = 0$ . De golfvorming bij een geul is door Booij [11] als volgt benaderd. Het talud van de geul wordt oneindig lang verondersteld. Het probleem is dan gedeeltelijk eendimensionaal te beschrijven: de golfamplitude varieert alleen in de richting loodrecht op het talud en niet in de lengterichting. De complexe golfpotentiaal functie kan dan geschreven worden als :

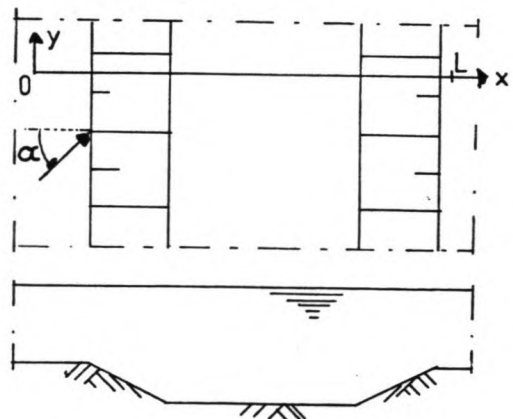
$$\phi(x,y) = \psi(x) \cdot \exp(i \cdot m \cdot y) \quad (3.7)$$

$m$  is gelijk aan de  $y$  component van het golfgetal :

$$m = k \cdot \sin \alpha$$

(3.7) in (3.6) geeft

$$\frac{d}{dx} (c \cdot c_0 \cdot \frac{d\psi}{dx}) + (k^2 - m^2) \cdot c \cdot c_0 \cdot \psi = 0 \quad (3.8)$$





Aangenomen wordt dat voor  $x < 0$  en  $x > L$  de diepte constant is. De randvoorwaarden van vergelijking (3.8) zijn dan:

rand op  $x=L$  er is een in positieve  $x$  richting lopende golf.

randvoorwaarde  $\frac{\partial \psi}{\partial x} = i * 1 * \psi$

na substitutie van  $\psi(x) = \hat{\psi} \exp[i * 1 * x]$  in (3.8) kan uit de resulterende vergelijking de positieve wortel van 1 bepaald worden.

rand op  $x=0$  er is een in positieve  $x$  richting lopende invallende golf en in negatieve  $x$  richting lopende gereflecteerde golf.

randvoorwaarde :  $\psi = \psi_{inv.} + \psi_{refl.}$

$$= \hat{\psi}_{inv.} * \exp[i * l_{inv.} * x] + \hat{\psi}_{refl.} * \exp[i * l_{refl.} * x]$$

en

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} = i * l_{refl.} * \psi + (i * l_{inv.} - i * l_{refl.}) * \hat{\psi}_{inv.}$$

Met een door Booijs [11] ontwikkeld computerprogramma, berustend op de eindige elementen methode, is de differentiaalvergelijking (3.8) numeriek opgelost. (Met dit programma is het tevens mogelijk de invloed van een stroming op de golfvoortplanting in beschouwing te nemen.)

Ter illustratie zijn voor de in bijlage 3.1 gegeven geulconfiguratie enige berekeningen uitgevoerd. De resultaten zijn opgenomen in bijlage 3.1.a, 3.1.b en 3.1.c. De bij deze berekeningen gebruikte geuldiepte en geulbreedte komen overeen met de desbetreffende waarden van de te Monrovia geplande geul. Het talud van de geplande geul is nog niet vastgesteld. Dit laatste gebeurt in hoofdstuk 3.3.1. In het voorbeeld is met de voor zandbodems gebruikelijke waarde van 1:10 als taludhelling gerekend. Voor drie hoeken van inval aan de geulrand, te weten  $40^\circ$  (zie bijlage 3.1.a),  $45.7^\circ$  (zie bijlage 3.1.b) en  $50^\circ$  (zie bijlage 3.1.c) is de golfvorming bepaald. De hierbij gebruikte golfperiode bedraagt 12 s. De hoek van inval van  $45.7^\circ$  is gelijk aan de kritieke hoek van inval.

### 3.3 Golfvervorming bij de toegangsecul van Monrovia.

De invloed van het geultalud op de golfvervorming zal worden onderzocht. Op basis van de resultaten van dit onderzoek is voor de toegangsecul van Monrovia de toe te passen taludhelling bepaald. Tenslotte is de golfvervorming bij de toegangsecul van Monrovia berekend.

#### 3.3.1 Invloed geultalud.

De invloed van het geultalud op de golfvervorming is onderzocht met behulp van het eerder genoemde rekenmodel. Bij de berekeningen is een geulprofiel gebruikt met afmetingen gelijk aan de afmetingen van de geul van Monrovia. De onderzochte taluds variëren van 1:10 tot 1:100, zie overzicht bijlage 3.2. Voor de hoek van inval van de inkomende golven aan de bovenrand van het talud is bij de berekeningen een waarde van  $45^\circ$  gebruikt. Deze hoek van inval is iets kleiner dan de gemiddelde kritieke hoek van inval van de deining te Monrovia. Zoals eerder is opgemerkt worden bij een hoek van inval iets kleiner dan de kritieke de hoogste golven in de toegangsecul aangetroffen. De gebruikte golfperiodes variëren van 7 tot 13s. Voor de genoemde geulafmetingen is een hoek van inval van  $45^\circ$  juist gelijk aan de kritieke indien de golfperiode gelijk is aan  $12.3 \text{ s}$  ( $\alpha_{\text{kritiek}} = \arcsin(\tanh(k \cdot h)_1 / \tanh(k \cdot h)_2)$  (3.3)) Voor golven met een periode groter dan 12.3 s is de gebruikte hoek van inval van  $45^\circ$  groter dan de kritieke hoek.

De resultaten van de berekeningen zijn in bijlage 3.2 opgenomen. Gegeven wordt de verhouding van de maximaal optredende golfhoogte in de geul tot de golfhoogte van de invallende golf.

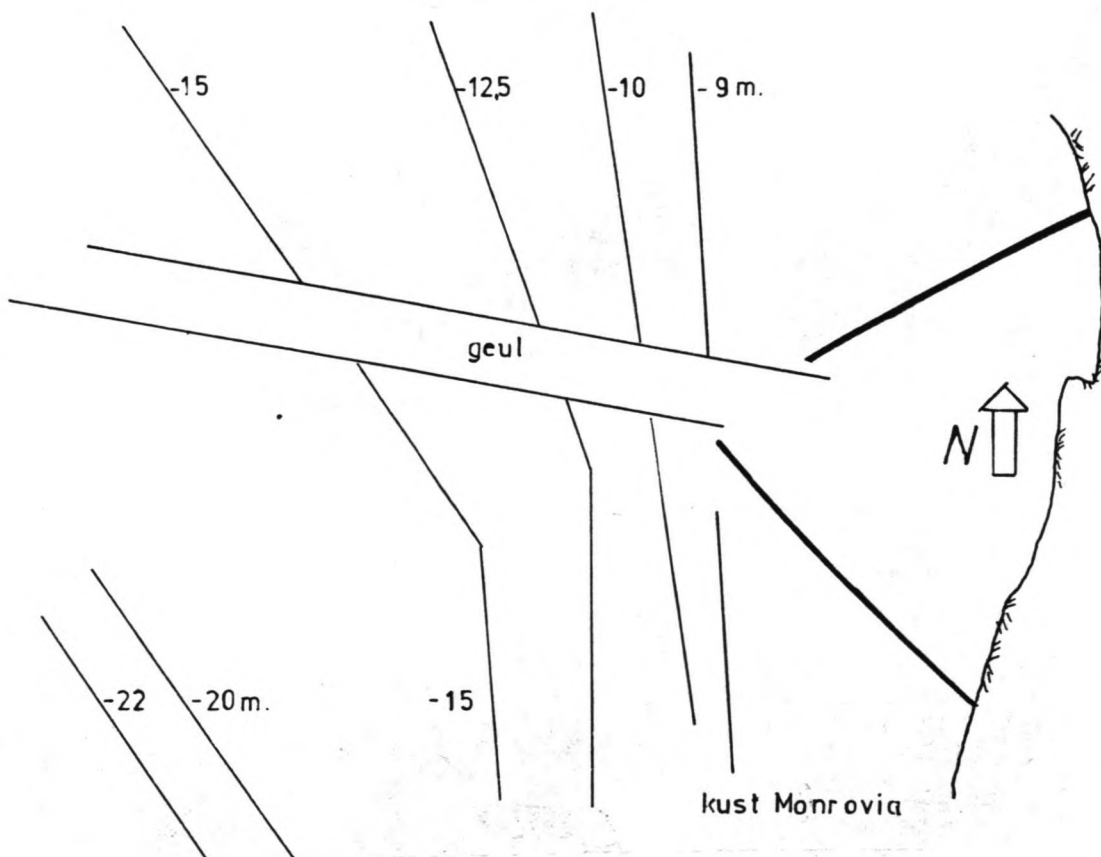
Uit de resultaten blijkt dat de optredende maximale golfhoogte in geval van flauwe taluds enigszins kleiner is dan bij steilere taluds. Met name het achterliggende talud is hierbij van invloed. De grootte van de door het toepassen van flauwe taluds verkregen reductie op de maximale golfhoogte in de geul is marginaal. De extra baggerwerken die de flauwe taluds met zich meebrengen zijn aanzienlijk. Op grond hiervan wordt gekozen

voor de goedkoopste configuratie : de geul met taluds van 1:10.

### 3.3.2 Bepaling $H_{geul}/H_{inv}$ voor golfklimaat en geul te Monrovia.

De golfvervorming bij de geul is voor de in hoofdstuk 2.5 ingevoerde golfklassen berekend. De berekeningen zijn voor twee waterdiepten buiten de geul , te weten 10 m en 15 m , uitgevoerd. De hoek van inval aan de geulrand ,  $\alpha$  , is met refractieberekeningen bepaald. In geval van een buitendiepte van 15 m is de berekening met behulp van de wet van Snellius uitgevoerd. (de dieptelijnen lopen , van diep water komend, tot de -15 m lijn vrijwel evenwijdig)

De hoek van inval aan de geulrand op 10 m diep water is in twee stappen bepaald. Tot aan de -20 m lijn is m.b.v. Snellius de refractie bepaald . Van de -20 m lijn tot de -10 m lijn is m.b.v. de door Groen en Dorrestein [12] beschreven grafische methode, zie bijlage 3.4 , het verloop van de golfstralen geconstrueerd.



Bovenstaande refractieberekeningen zijn met de hand uitgevoerd. Er is gewerkt met de klassemiddens van de eerder gegeven golfklassen. Ter illustratie: de golfklasse [ $8 \leq T < 10$ ,  $195^\circ \leq \varphi_0 < 205^\circ$ , de golfhoogte is in dit geval onbelangrijk] wordt in de refractieberekening geschematiseerd tot  $T=9$  s en  $\varphi_0=200^\circ$ .

Met o.a. de aldus verkregen waarden van de hoek van inval aan de geulrand als invoer is met behulp van het numerieke model van Booi de golfvervorming bij de geul berekend. De resultaten worden gegeven in bijlage 3.3 en zijn gepresenteerd als de verhouding van de maximale golfhoogte in de geul tot de golfhoogte van de invallende golf:  $H_{g \text{ max}}/H_1$ .

Opmerking: Een deel van de golven in de richtingsektor  $215^\circ \leq \varphi_0 < 240^\circ$  heeft op -10 m diepte een hoek van inval die rond de kritieke hoek van inval ligt. Met het oog op de grote spreiding in de waarde van  $H_{g \text{ max}}/H_1$  bij hoeken van inval rond de kritieke hoek van inval is voor deze richtingsektor de waarde van  $H_{g \text{ max}}/H_1$  niet benaderd met alleen het klassemidden maar zijn ook de waarden behorende bij de klassegrenzen bepaald. Vervolgens is hieruit de gemiddelde waarde van  $H_{g \text{ max}}/H_1$  bepaald.

De maximale waarde van de  $H_{g \text{ max}}/H_1$  verhouding langs de geul is voor iedere golfklasse in tabel 3.1 gegeven. Hierbij zijn de in bijlage 3.3 gegeven verhoudingen afgerond.

richtingsektor op diep water	golfperiodeklasse			
	$8 \leq T < 10$ s	$10 \leq T < 12$ s	$12 \leq T < 14$ s	$14 \leq T < 16$ s
$150^\circ \leq \varphi_0 < 185^\circ$	1.0	1.0	1.0	1.0
$185^\circ \leq \varphi_0 < 195^\circ$	1.0	1.0	1.0	1.0
$195^\circ \leq \varphi_0 < 205^\circ$	1.0	1.0	1.0	1.0
$205^\circ \leq \varphi_0 < 215^\circ$	1.0	1.0	1.1	1.1
$215^\circ \leq \varphi_0 < 240^\circ$	1.5	1.5	1.5	1.5

tabel 3.1 gemiddelde maximale  $H/H_1$  verhouding in de geul.

In geval van golven uit de richtingsektor  $215^\circ \leq \varphi_0 < 240^\circ$  moet er met duidelijk hogere golven in de geul rekening gehouden worden.

#### 4 Koppeling golfvervorming en lange termijn statistiek.

De koppeling tussen het golfklimaat voor de geul en dat in de geul is wat de golfhoogte betreft met de in tabel 3.1 gegeven verhoudingen eenvoudig te realiseren. Voor de golfklassen met een  $H_{geul}/H_s$  verhouding gelijk aan 1, ondergaat de verdeling uiteraard geen verandering. In de andere gevallen moeten bij de beschrijving van het golfklimaat in de geul de in de verdelingsfuncties in te voeren golfhoogtegrenzen aangepast worden. Dit kan eenvoudigweg door de oude golfhoogtegrenzen met de reciproke van  $H_{geul}/H_s$  te vermenigvuldigen. Tabel 4.1 geeft uitgaande van de eerder gebruikte golfhoogtegrenzen (0.5 m, 1.0 m etc.), de nieuwe waarden van deze grenzen.

Golfklimaat in de geul.

$H_{geul}/H_s$	in te voeren golfhoogtegrenzen [m]				
1.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
1.1	0.45	0.91	1.36	1.82	2.27
1.5	0.33	0.67	1.0	1.33	1.67

tabel 4.1 grenzen golfhoogteklassen (golfhoogte voor de geul)

Ook de invloed van de gewijzigde golfrichting moet ingevoerd worden. Bijlage 4.1 geeft het resultaat van de in hoofdstuk 3 besproken refractie en refractie-diffractie berekeningen. gegeven worden van een golfrichtingsektor op diep water, de bijbehorende gemiddelde hoek van inval aan de geulrand (op 10 m diep water) en de gemiddelde golfrichting in de geul. Uitgaande van de bovengenoemde golfrichtingen in de geul worden t.b.v. de beschrijving van het golfklimaat in de geul de volgende richtingsektoren ingevoerd:

$$\begin{aligned}
 150^\circ &\leq \varphi < 215^\circ \\
 215^\circ &\leq \varphi < 225^\circ \\
 225^\circ &\leq \varphi < 235^\circ \\
 235^\circ &\leq \varphi < 245^\circ \\
 245^\circ &\leq \varphi < 280^\circ
 \end{aligned}$$

(De golfrichting  $\varphi = 280^\circ$  is de richting evenwijdig aan de geulas.)

Als gevolg van de invoering van andere golfrichtingsektoren

wijzigt de k.d.f. Bij de herverdeling van de kansen over de richtingsektoren in de geul is aangenomen dat de verdeling van de golven over een richtingsektor uniform is.

Bijlage 4.2 tenslotte geeft de resultaten van de berekening van het golfklimaat in de geul. De bijlage geeft de kans van optreden van een zekere golfconditie in de geul. De eenheid van de gegeven kans is gelijk aan  $10^{-4}$ .

In bijlage 4.2 is de invloed van de golfvervorming duidelijk terug te vinden. Golven groter dan 2 meter komen vooral voor in de richtingsektor waarin de kritieke hoek van inval ligt,  $\alpha_{kritiek} = 235^\circ$ . De kans op golven groter dan 2 meter is in deze richtingsektor gelijk aan  $113 \cdot 10^{-4}$  tegen  $47.8 \cdot 10^{-4}$  voor de andere richtingsektoren.

Ook valt op te merken dat de langere golven in sterkere mate refracteren dan de wat kortere golven. In de richtingsektoren  $150^\circ \leq \varphi < 215^\circ$  en  $215^\circ \leq \varphi < 225^\circ$  worden geen golven met een golfperiode in de klasse  $14 \leq T < 16$  s aangetroffen.

De golfklasse met de grootste kans van optreden (= 0.07) in de geul wordt beschreven door:

$$\begin{aligned} 0.5 &< H_m < 1 \text{ m} \\ 10 &\leq T < 12 \text{ s} \\ 225^\circ &\leq \varphi < 235^\circ \end{aligned}$$



### 5. Samenvatting.

Met golfgegevens van de kust van West Afrika is het golfklimaat voor de haven van Monrovia bepaald. Hierbij zijn de volgende, uit de herkomst van de gegevens noodzakelijke aannamen gedaan :

- de golfgegevens van Buchanan kunnen ongewijzigd toegepast worden te Monrovia.
- de golfperiodeverdeling van Sekondi komt overeen met die te Monrovia.
- golfrichting en golfperiode zijn stochastisch onafhankelijke variabelen.
- Bij golven met een hoogte groter dan 1.5 m. , gerelateerd aan de golfhoogteverdeling van Buchanan ,wordt aangenomen dat de golfhoogte en -richting stochastisch onafhankelijk van elkaar zijn.

Uit de aldus gevonden k.d.f. van het golfklimaat voor de geul blijkt dat circa 20% van de golven komt uit de golfklassen:  $0.5 \leq H_w < 1$  meter en  $10 \leq T < 12$  seconden. Van deze golven heeft circa een derde deel een richting op diep water in de richtingsektor  $195^\circ \leq \varphi < 205^\circ$ .

Bij de toegangseul is er sprake van grote golfvervorming, indien de hoek van inval aan de geulrand een waarde heeft rond de kritieke hoek van inval. In geval van Monrovia, met een geuldiepte van 22 meter en een waterdiepte bij de kop van de zuidelijke havendam van circa tien meter is de kritieke hoek van inval voor de deininggolven circa  $45^\circ$ . Dit betreft golven uit de richtingsektor  $215^\circ \leq \varphi < 240^\circ$ .

De met het rekenmodel van Booij gevonden golfhoogten in de geul zijn bij een kritieke hoek van inval gelijk aan circa tweemaal de hoogte van de invallende golf. Bovenstaande berekeningen zijn uitgevoerd voor regelmatige golven. Modelproeven [ 7 ] met golven met een zekere richtingspreiding en met onregelmatige golven geven kleinere waarden voor de

golfvorming. In geval van Monrovia wordt voor golven in de geul uit de richtingsektor  $245^\circ \leq \varphi < 280^\circ$  een gemiddelde waarde van 1.5 gevonden voor de faktor  $H_{0 \text{ max}}/H_1$ . De werkelijk optredende gemiddelde waarde zal als gevolg van genoemde richtingspreiding en spektrumbreedte van de golven lager zijn.

Bij een waterdiepte van 15 meter is de kritieke hoek van inval zoveel groter dan de hoek van inval van de deininggolven zodat er geen grote golfvorming optreedt.

De koppeling van de golfvorming bij de geul met de beschrijving van het golfklimaat, leidt tot een aanzienlijke verhoging van de kans op het optreden van hoge golven in de geul. De kans op golven van 2 meter en hoger bedraagt ter plekke van de geplande geul  $0.4 \cdot 10^{-2}$  en deze kans wordt gelijk aan  $1.6 \cdot 10^{-2}$  na aanleggen van deze geul.

Tenslotte moet opgemerkt worden dat in verband met de korte duur van sommige waarnemingen er ten aanzien van de lange termijn waarden van de k.d.f. enige voorzichtigheid geboden is.

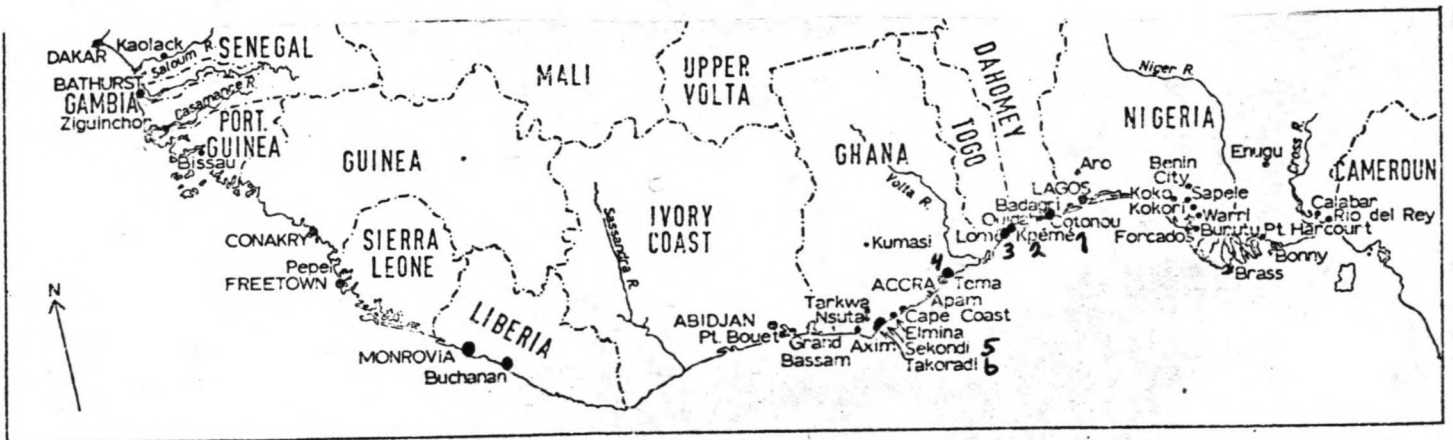
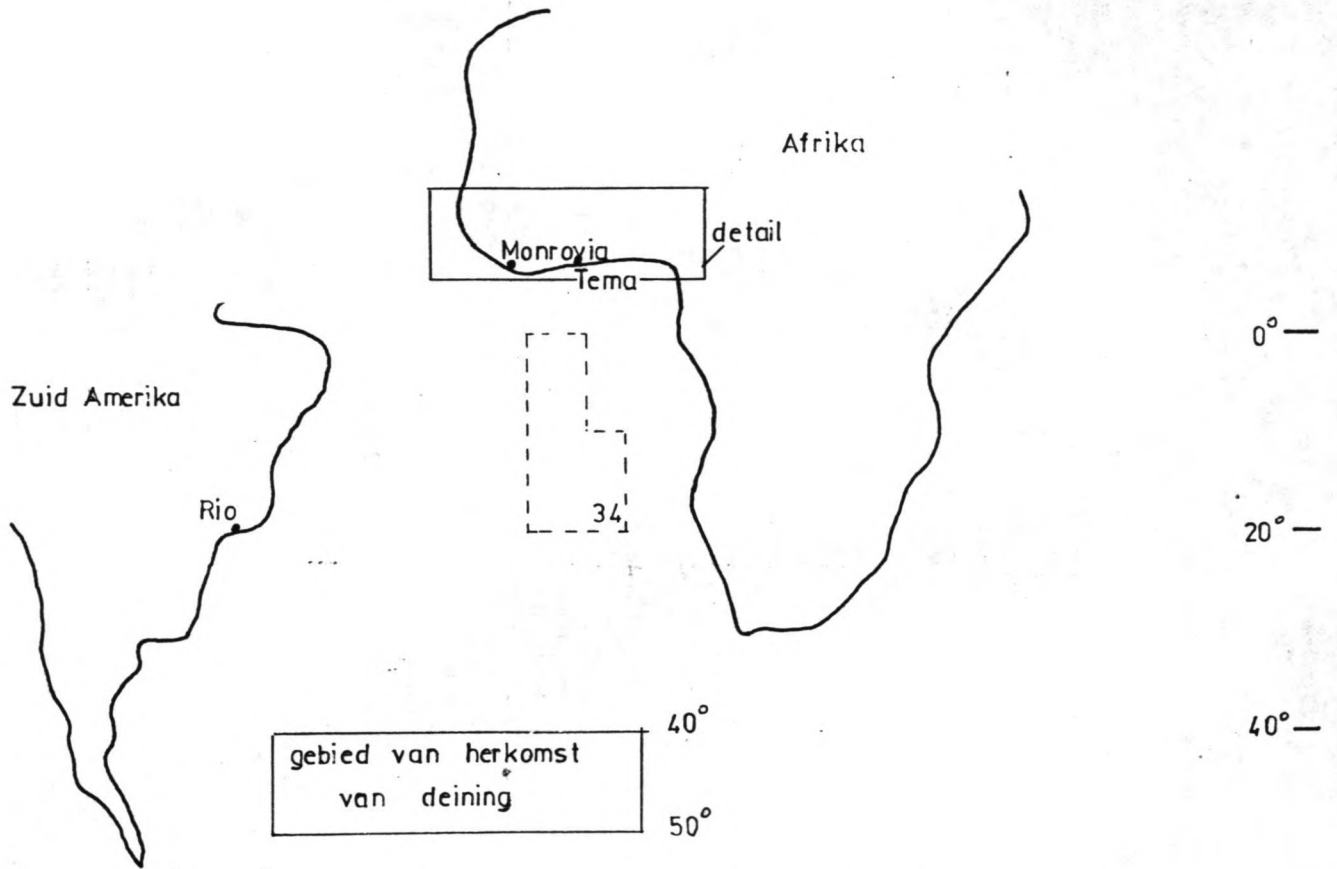
Symbolenlijst

a	golfamplitude
c	voortplantingssnelheid
$c_g$	groepssnelheid
g	versnelling van de zwaartekracht
h	waterdiepte
H	golfhoogte
i	integer getal
j	integer getal
k	integer getal
k	golfgetal
l	component in x-richting van golfgetal
L	golflengte
m	component in y-richting van golfgetal
P	gemiddelde energie flux
$\sigma$	standaardafwijking
T	golfperiode
u	factor normale verdeling
$\mu$	gemiddelde waarde
D	golfpotentiaalfunctie
$\omega$	hoekfrequentie

Literatuurlijst.

- [1] Radu ,M.Th. Moor ,R. Short term beach profile fluctuation forecast of the West African coast. Int. Conf. on Coastal and Port Eng. in developing countries , Colombo , march 20-26 , 1983.
- [2] NEDECO        Republique populaire du Benin , Port Autonome de Cotonou Tome        , juillet , 1982.
- [3] Draper ,L. Waves at Sekondi , Ghana. , 10'th Coastal Eng. Conf. , Tokyo , sept. 5-8 , 1966.
- [4] van de Vijver ,W., Smole ,T. Kustwaterbouwkundige aspecten van de haven van Monrovia. vooronderzoek. afstudeerverslag vakgroep kustwaterbouwkunde. T.H. Delft. , july 1979.
- [5] Soest ,J. van Elementaire statistiek. T.H. Delft, 1978.
- [6] Hogben ,N. , Lumb ,E.E. Ocean wave statistics. 1967.
- [7] Zwamborn ,J.N. , Grieve ,G. Wave attenuation and concentration associated with harbour approach channels. Proceedings Coastal Eng. Conf. , Copenhagen , 1974.
- [8] Berkhoff ,J.C.W. , Zwols ,A. Golfvervorming door een geul. W.L. Delft , rapport m1232 , july 1975.
- [9] Battjes ,J.A. Collegedictaat Korte Golven. T.H. Delft.
- [10] Berkhoff ,J.C.W. Mathematical models for simple harmonic linear water waves. Wave diffraction and refraction. dissertatie , Delft , 1976.
- [11] Booij ,N. Gravity waves on water with non uniform depth and current. report no.81.1 , Delft University of Technology.
- [12] Groen ,P. , Dorrestein ,R. Zeegolven , staatsdrukkerij , s'Gravenhage , 1976.

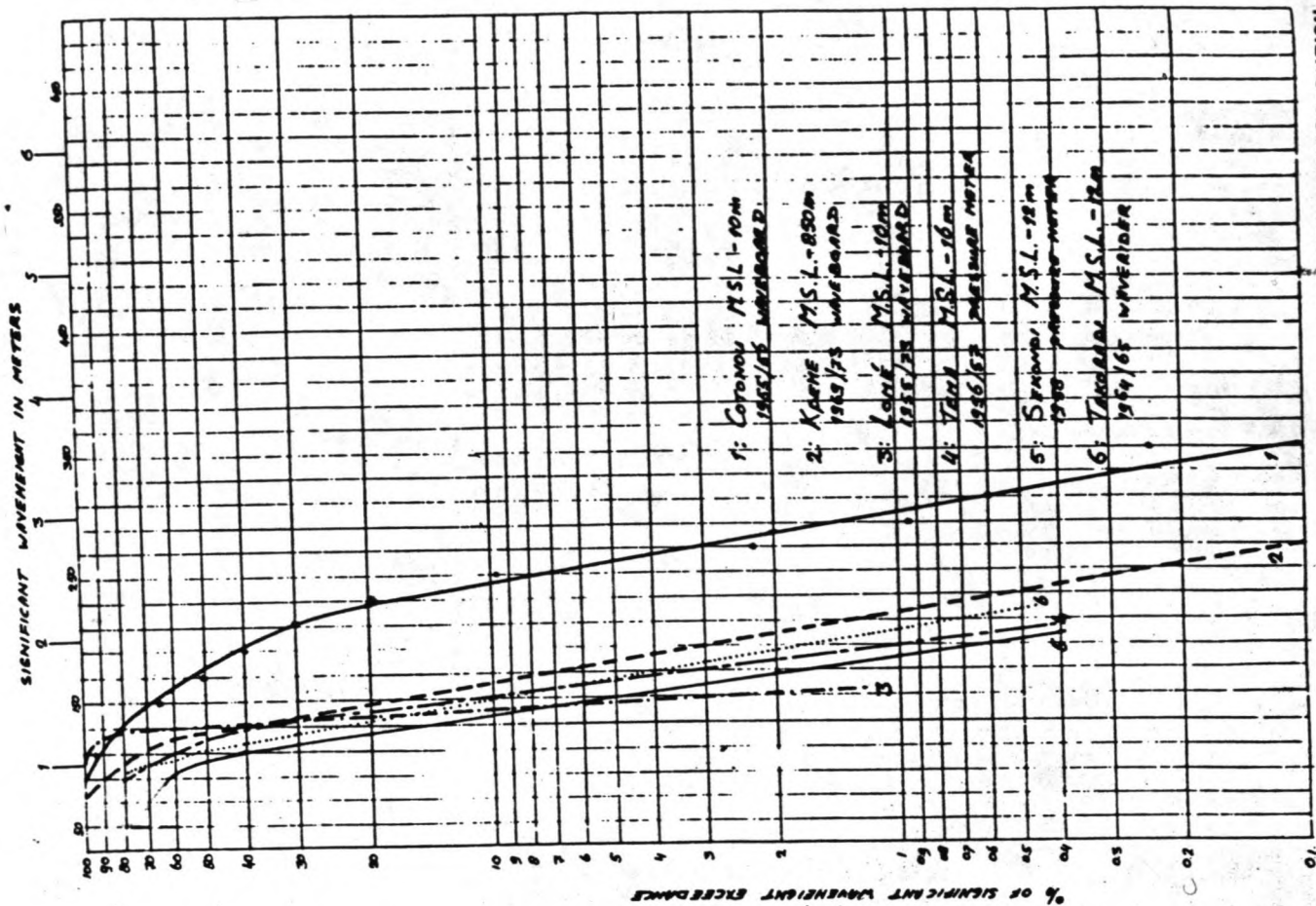
Bijlagen



West Africa: the nature of the coastline, and the pattern of port development

Detail.

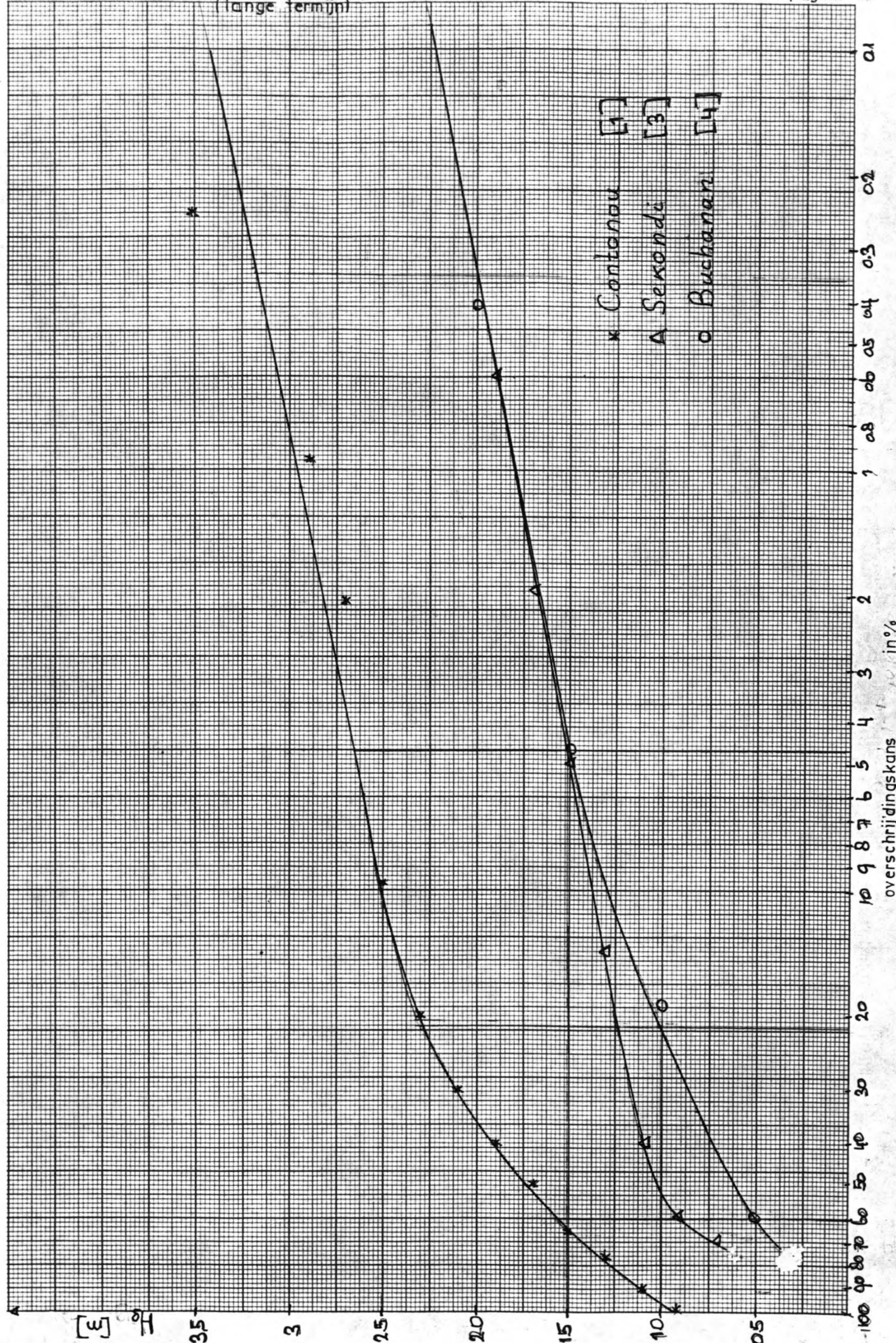




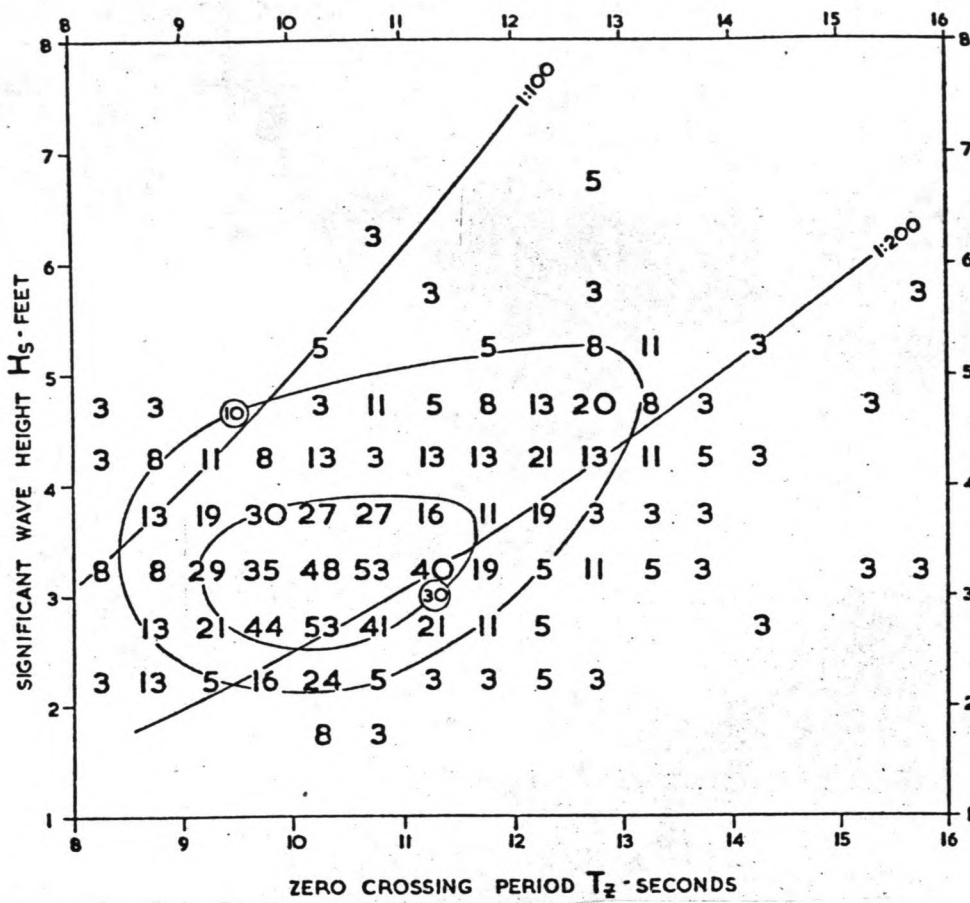
Site	Measurement means/depth (used)	duration of dominant wave measurement wave approach data	duration of dominant wave measurement wave period data	wave refraction coefficients determined
1) Cotonou	waveboard at wharf MSL-10m	1955/56 (1 year)	T=12 sec T <sub>max</sub> =19,5	no
2) Kpeme	waveboard at wharf MSL-8,5m	1969/73 (5 years)	T=8-10 s	K <sub>r</sub> (s)=0,77 (8s) K <sub>r</sub> (ssw)=0,56 (8s)
3) Lomé	waveboard at wharf MSL-10m	1955/79 (18 years)	T=8-10 s T <sub>max</sub> =17,5s	no
4) Tema	pressure recorder MSL-16m	1956/57 (1 year)	T=10-16 s	no
5) Sekondi	pressure recorder MSL-12m	1958/59 (1 year)	T=11 sec	no
6) Takoradi	floating accelerometer MSL-16m	1964/65 (1 year)	T=11 sec	no

Wave data used at the West African coast

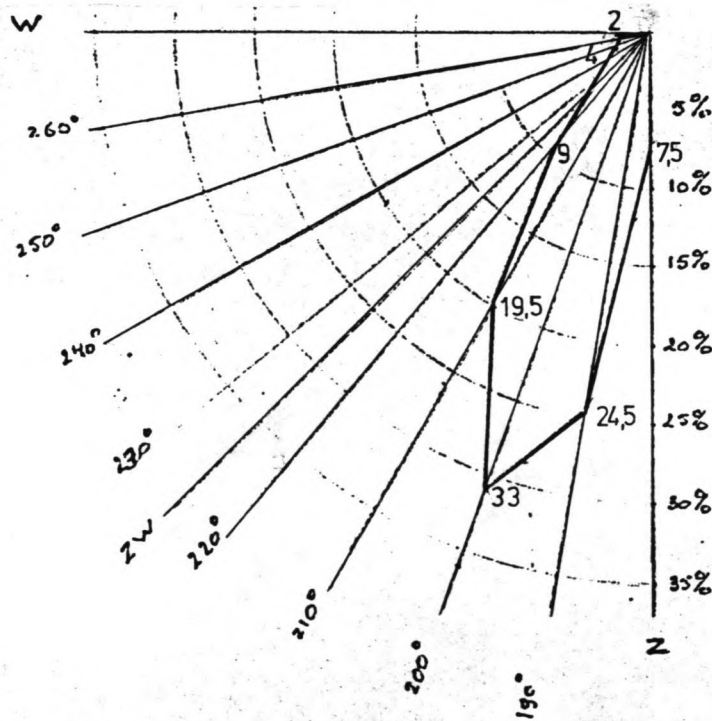
— SUMMARY OF SIGNIFICANT WAVEHEIGHT DISTRIBUTION



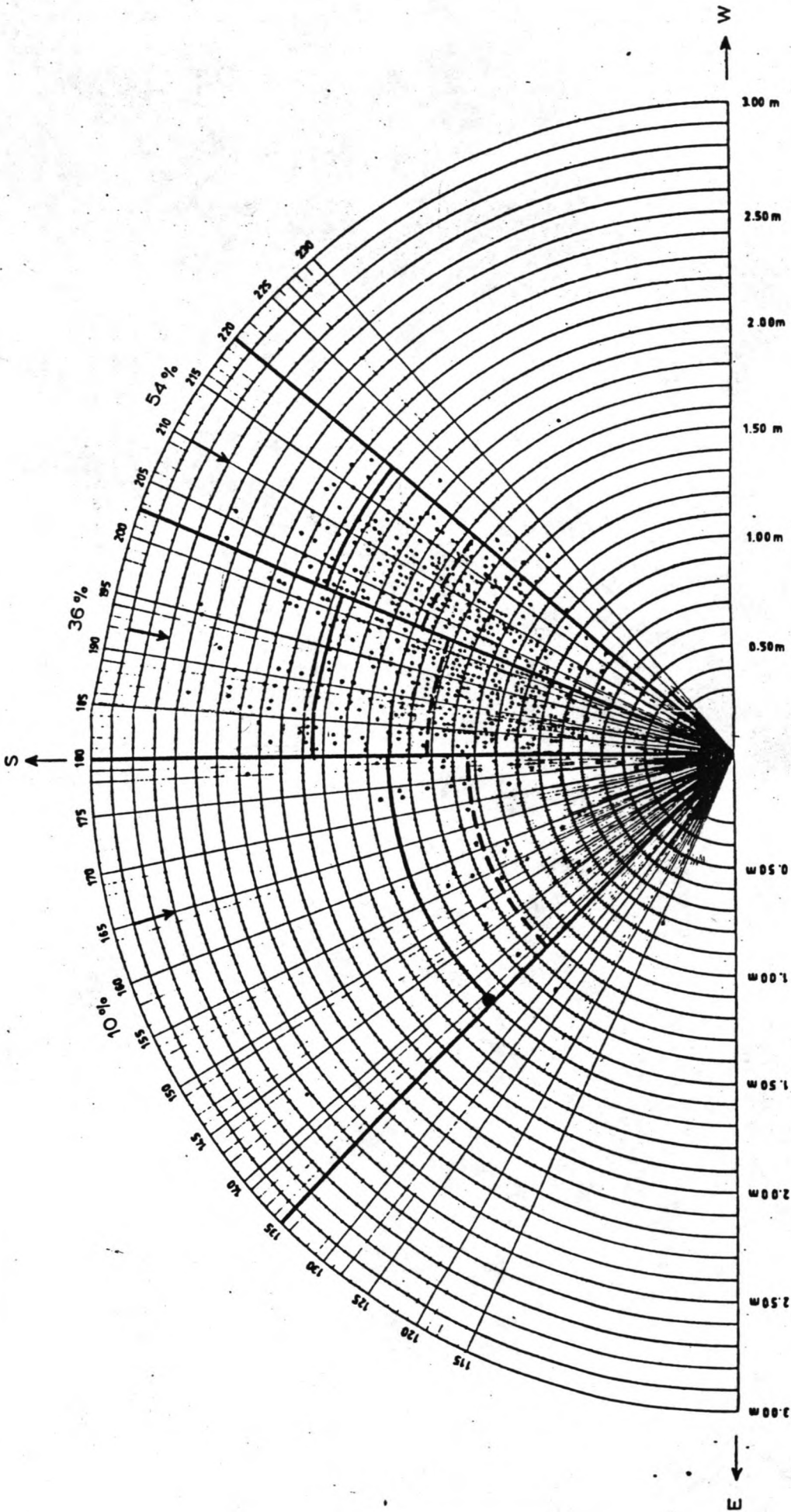




Scatterdiagram Sekondi [3]



Golfroos Buchanan [2]



observations au wharf de Cotonou du 1<sup>er</sup> Décembre 1960 au 31 Décembre 1963 et pendant la tempête des 5/6 Juin 1964

- H<sub>s</sub> = hauteur de l'onde significative
- - - H̄ = hauteur moyenne
- tempête des 5/6 juin 1964
- ↓ direction prédominante par secteur

DIAGRAMME DES HOULES	D'APRÈS (14)
	R 1557-IV FIG. 5
NEDECO [ 2 ]	

## Bijlage 2.5

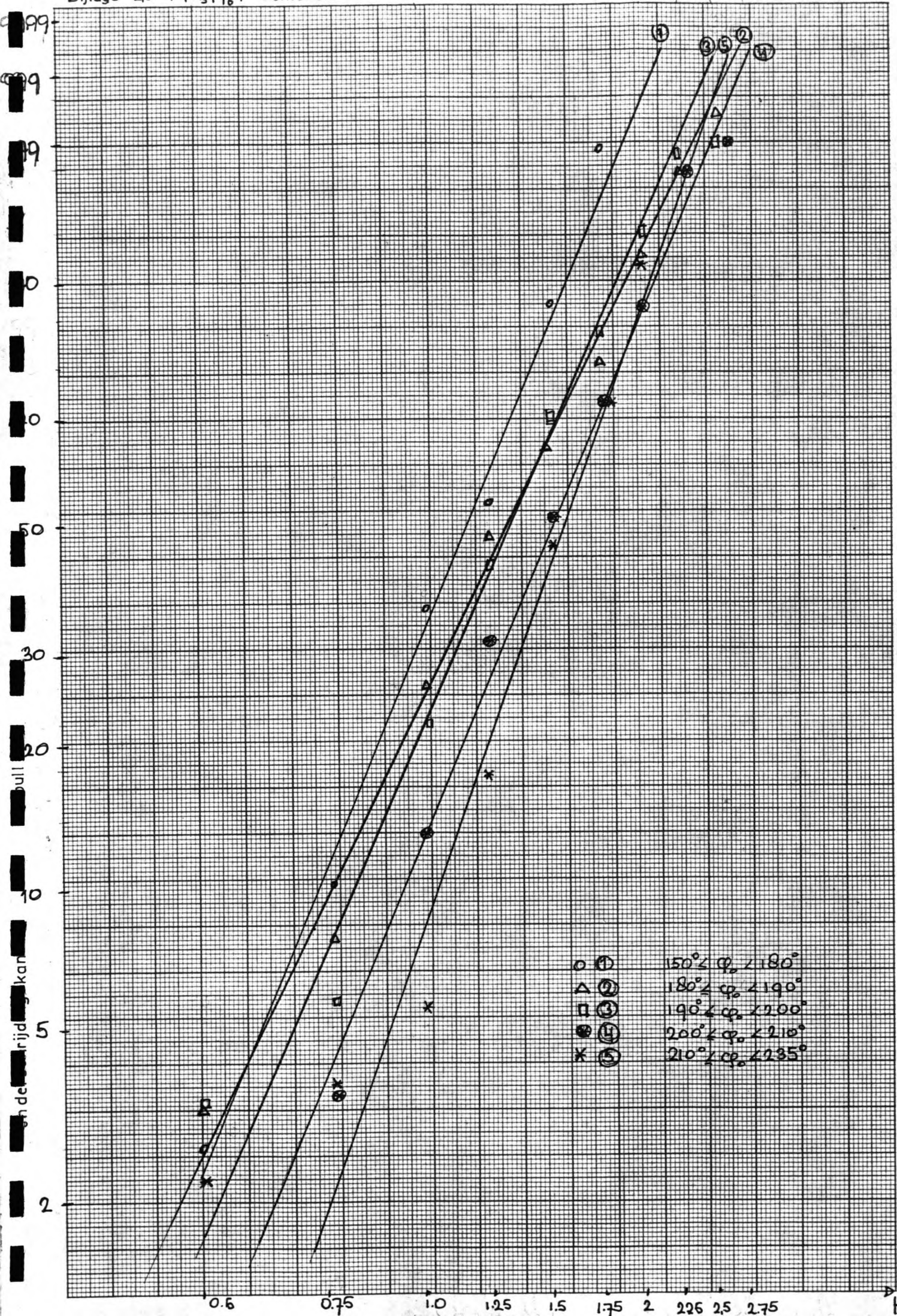
richtingssector	intervalgrenzen ( $H_m$ )									
	0.5	0.75	1.0	1.25	1.5	1.75	2.0	2.25	2.5	2.75
$150^\circ \leq \varphi < 180^\circ$	2	5	18	12	22	8	-	-	1	-
$180^\circ \leq \varphi < 190^\circ$	6	8	31	38	27	24	22	9	5	1
$190^\circ \leq \varphi < 200^\circ$	7	5	32	41	52	25	20	10	2	2
$200^\circ \leq \varphi < 210^\circ$	1	6	19	33	38	39	26	21	4	2
$210^\circ \leq \varphi < 235^\circ$	3	2	2	16	36	34	24	11	-	-

$H_s - \varphi$  diagram van Contonou.

golfrichtingsector op diep water	c	a	b
$150^\circ \leq \varphi < 180^\circ$	0	1.24	3.66
$180^\circ \leq \varphi < 190^\circ$	0	1.51	2.88
$190^\circ \leq \varphi < 200^\circ$	0	1.49	3.45
$200^\circ \leq \varphi < 210^\circ$	0	1.67	3.71
$210^\circ \leq \varphi < 235^\circ$	0	1.67	5.57

parameters Weibull verdeling van de voorwaardelijke verdelingsfunctie  
 $P(H_s|\varphi)_{\text{Contonou}}$







## Bijlage 2.7

golfrichtingsektor op diep water			
Buchanan	p (%) Buchanan	Contonou	p (%) Contonou
150° ≤ φ < 185°	0.075	150° ≤ φ < 180°	0.09
185° ≤ φ < 195°	0.245	180° ≤ φ < 190°	0.22
195° ≤ φ < 205°	0.33	190° ≤ φ < 200°	0.27
205° ≤ φ < 215°	0.195	200° ≤ φ < 210°	0.22
215° ≤ φ < 240°	0.13	210° ≤ φ < 235°	0.17

tabel corresponderende golfhoogteklassen, afgeleid uit bijlage 2.2.

Golfhoogteklasse (H <sub>a</sub> )			
Buchanan	Contonou	Sekondi	p (H <sub>a</sub> )
0.5 - 1	1.55 - 2.3	0.9 - 1.25	0.41
1 - 1.5	2.3 - 2.65	1.25 - 1.5	0.144
1.5 - 2	2.65 - 3.2	1.5 - 2	0.042
2 - 2.5	3.2 - 4.15	2 - 2.5	0.0039
> 2.5	>4.15	> 2.5	-

Bijlage 2.8

golfrichtingsektor op diep water	golfhoogteklasse				
	$1.55 < H_b < 2.3$	$2.3 < H_b < 2.65$	$2.65 < H_b < 3.2$	$3.2 < H_b < 4.15$	$H_b \geq 4.15$
$150^\circ \leq \phi_o < 180^\circ$	10.4	0.01	-	-	-
$180^\circ \leq \phi_o < 190^\circ$	30.6	3.4	0.1	-	-
$190^\circ \leq \phi_o < 200^\circ$	30.5	1.1	0.01	-	-
$200^\circ \leq \phi_o < 210^\circ$	43	3.7	0.06	-	-
$210^\circ \leq \phi_o < 235^\circ$	51.6	0.26	-	-	-

voorwaardelijke k.d.f.  $p(H_b | \phi_o)$  contonou , eenheid  $10^{-2}$ .

golfrichtingsektor op diep water	$p(H_b   \phi_o)$ Buchanan				
	$0.5 < H < 1$	$1 < H < 1.5$	$1.5 < H < 2$	$2 < H < 2.5$	$H > 2.5$
$150^\circ \leq \phi_o < 185^\circ$	2.3	-	7.5	7.5	7.5
$185^\circ \leq \phi_o < 195^\circ$	22.3	42.9	24.5	24.5	24.5
$195^\circ \leq \phi_o < 205^\circ$	30.2	18.7	33.0	33.0	33.0
$205^\circ \leq \phi_o < 215^\circ$	25.1	38.2	19.5	19.5	19.5
$215^\circ \leq \phi_o < 240^\circ$	20.1	1.3	13.0	13.0	13.0

voorwaardelijke k.d.f.  $p(\phi_o | H_b)$  van Buchanan , eenheid kans  $10^{-2}$ .

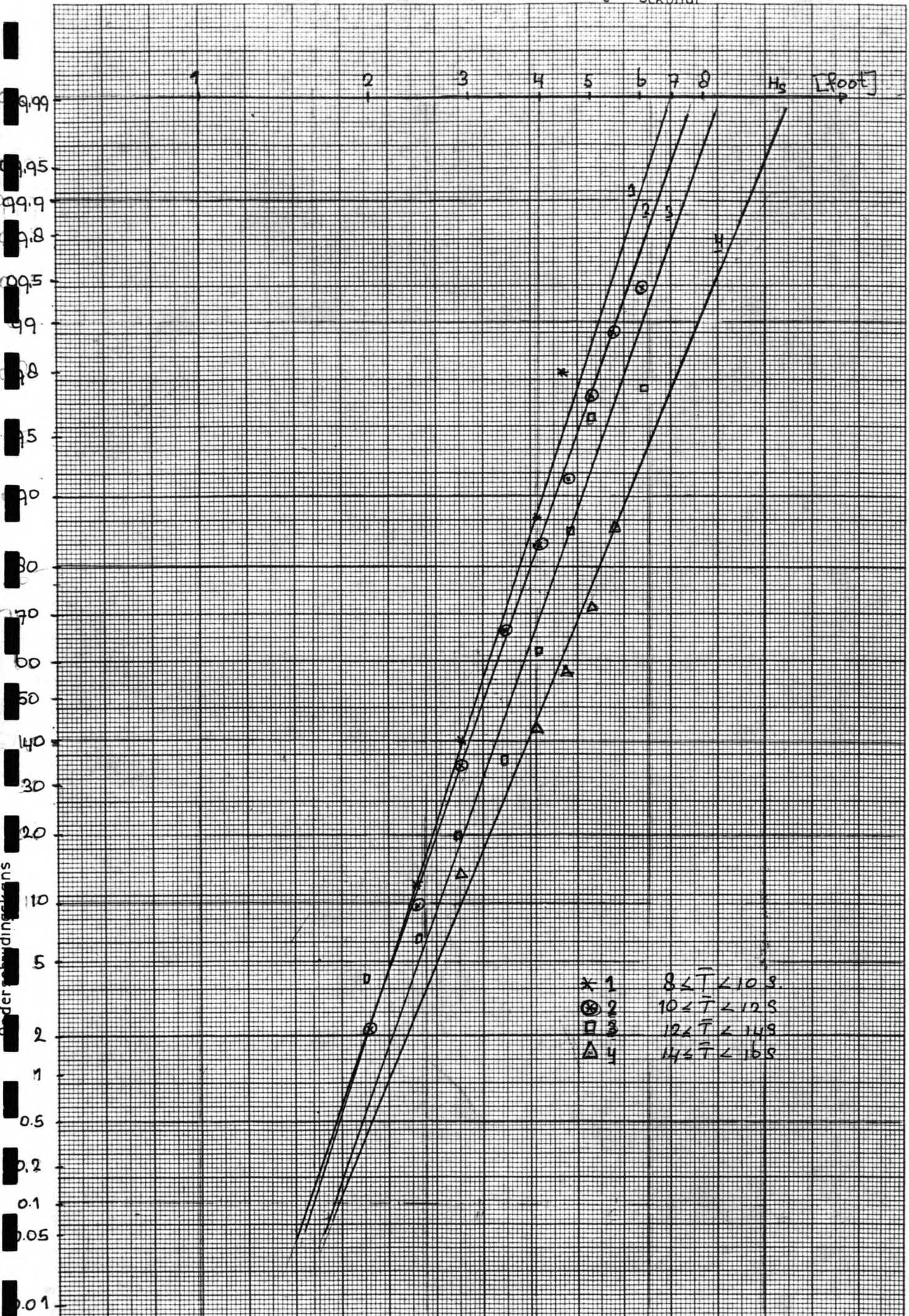
## Bijlage 2.9

golfhoogte interval $H_s$ [foot]	golfperiodeklasse			
	$8 \leq \bar{T} < 10$	$10 \leq \bar{T} < 12$	$12 \leq \bar{T} < 14$	$14 \leq \bar{T} < 16$
$1 \leq H_s < 2$	-	11	8	-
$2 \leq H_s < 3$	115	161	29	3
$3 \leq H_s < 4$	142	241	78	6
$4 \leq H_s < 5$	36	69	63	6
$5 \leq H_s < 6$	-	13	3	6
$6 \leq H_s < 7$	-	3	5	-
$H_s > 7$	-	-	-	-

$H_s - \bar{T}$  diagram Sekondi.

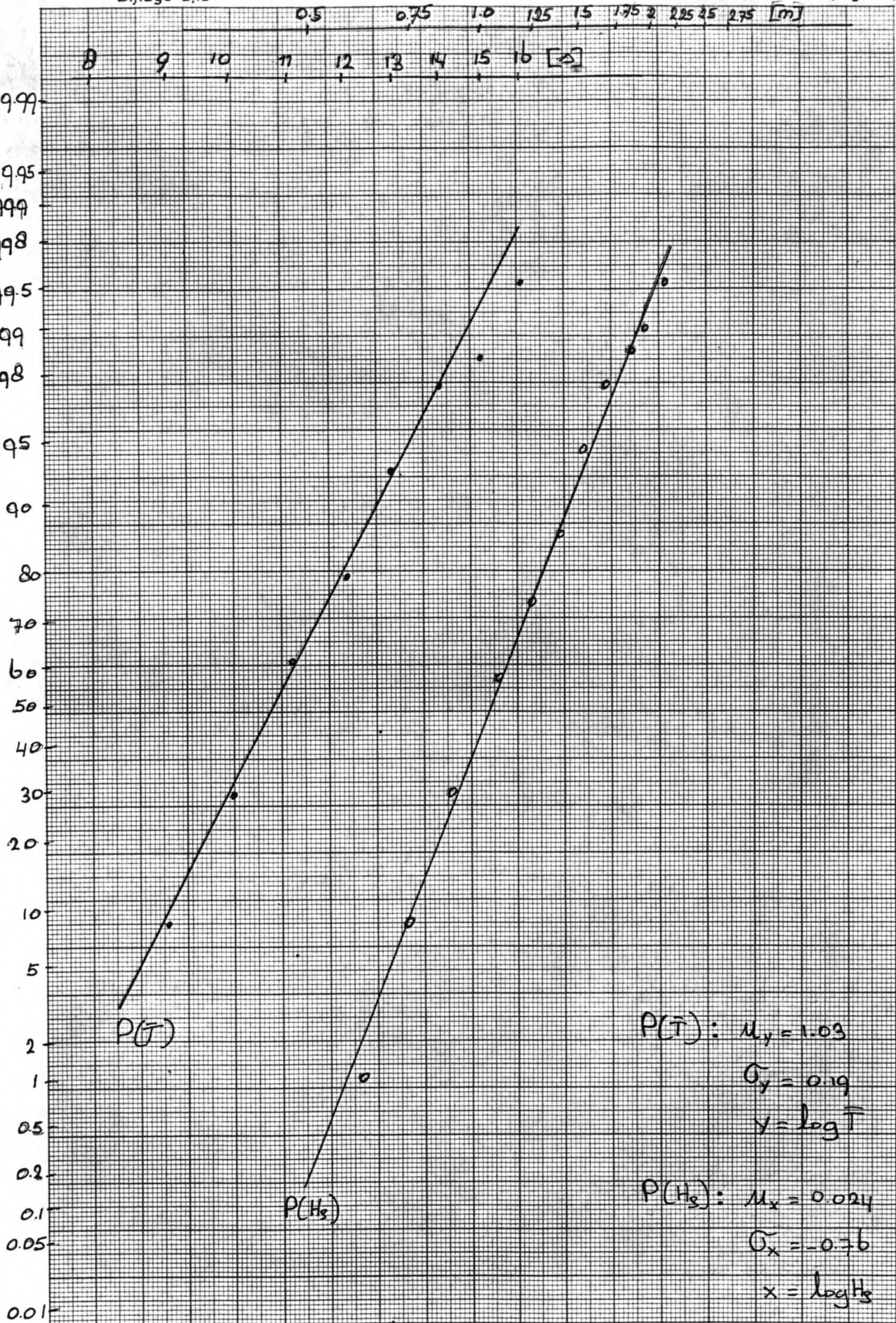
	golfperiodeklasse			
	$8 \leq \bar{T} < 10$	$10 \leq \bar{T} < 12$	$12 \leq \bar{T} < 14$	$14 \leq \bar{T} < 16$
$\mu_y = \log H_s$	-0.0325	-0.016	0.034	0.093
$\sigma_y = (y_{0.95} - y_{0.05}) / 2$	0.092	0.102	0.103	0.120

parameters lognormaal verdeling Sekondi,  $P(H_s | \bar{T})$ .









$P(H_2)$  en  $P(T)$  van Sekondi.



Bijlage 2.13 Lange termijn statistiek van het golfklimaat voor 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>			
150° ≤ 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	175.5	13.0
215° ≤ φ <sub>o</sub> < 240°		240.2	433.2	140.5	10.4

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>			
150° ≤ 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	151.8	17.7
215° ≤ φ <sub>o</sub> < 240°		0.5	1.5	0.8	0.1

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>			
150° ≤ 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°		5.6	24.0	20.1	4.9

bijlage 2.13.

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° < θ < 185°		0.1	0.8	1.3	0.9
185° ≤ θ < 195°		0.2	2.4	4.1	3.0
195° ≤ θ < 205°		0.2	3.2	5.5	4.0
205° ≤ θ < 215°		0.1	1.9	3.3	2.3
215° ≤ θ < 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° < θ < 185°		-	-	-	0.1
185° ≤ θ < 195°		-	-	-	0.2
195° ≤ θ < 205°		-	-	0.1	0.3
205° ≤ θ < 215°		-	-	-	0.2
215° ≤ θ < 240°		-	-	0.2	0.1

In de bijlage wordt het verloop van de waarde van het reële en van het imaginaire deel van de golf functie gegeven, respectievelijk  $\psi_1$  en  $\psi_2$ . De inkomende golf heeft een amplitude gelijk aan 1. Er is sprake van een in positieve x richting lopende golf indien het faseverschil tussen  $\psi_1$  en  $\psi_2$  gelijk is aan  $\pi/2$  en de amplituden aan elkaar gelijk zijn. In geval van een staande golf is het faseverschil tussen  $\psi_1$  en  $\psi_2$  gelijk aan 0.

ad-bijlage-3.1.a-40°

De hoek van inval is iets kleiner dan de kritieke hoek van inval. Er is sprake van een in positieve x richting lopende golf. In de geul en op het talud is de golfamplitude,  $\hat{\psi}$ , iets groter dan 1. ( $\hat{\psi} = \sqrt{[\text{Re}(\psi)]^2 + [\text{Im}(\psi)]^2}$ ) In de geul neemt de golflengte toe.

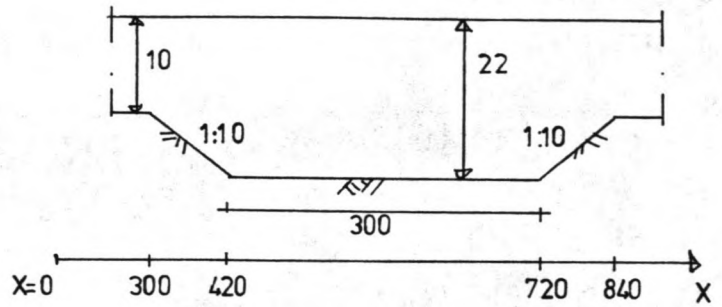
ad-bijlage-3.1.b-45.7°

$\alpha_i = \alpha_{\text{kritiek}}$ . Voor de geul wordt een staande golf aangetroffen. De optredende golfamplitude voor de geul is circa 1.9 maal zo groot als de amplitude van de invallende golf. In de geul neemt de amplitude af tot ongeveer 0.3 van de invallende golf. Overigens verandert de golf functie hier nauwelijks, de oorzaak hiervan is gelegen in het feit dat de golfrichting in de geul vrijwel parallel aan die van de geulas is. Aan de overzijde van de geul tenslotte is er een lopende golf met een amplitude van 0.3.

ad-bijlage-3.1.c-50°

$\alpha_i > \alpha_{\text{kritiek}}$ . Er is sprake van totale reflectie. Voor de geul wordt een staande golf gevonden met amplitude 2. Op het talud neemt de golfamplitude richting geul snel af tot de waarde nul.

$T = 12 \text{ s}$



$\alpha_i = 40^\circ$

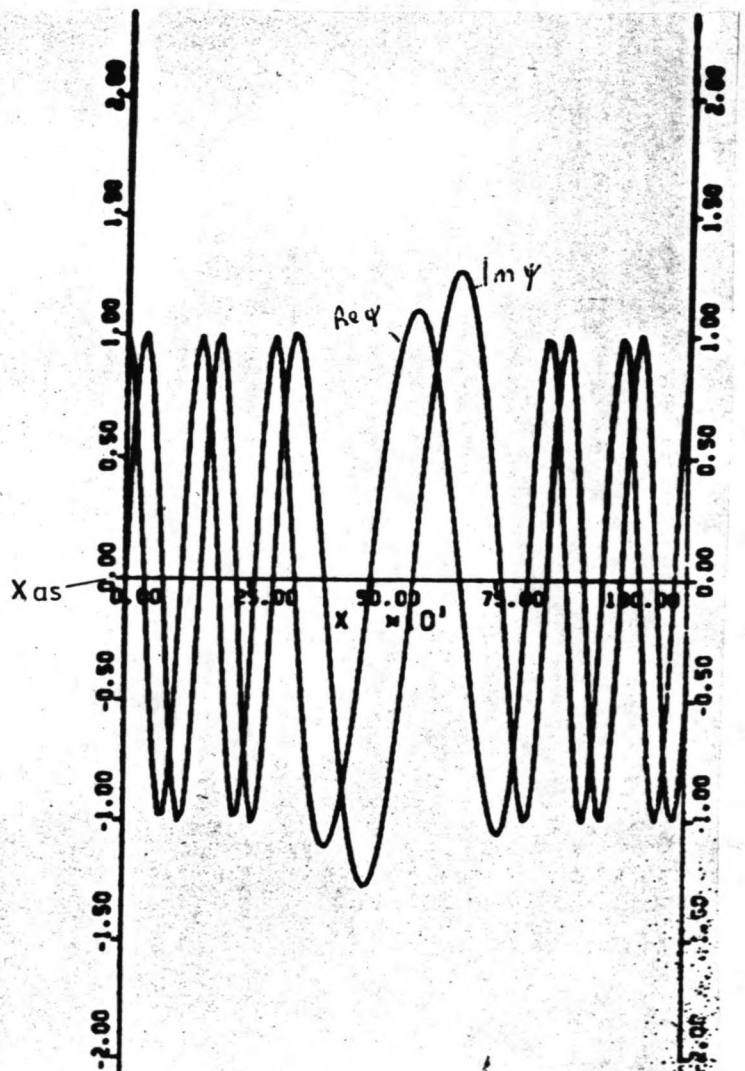
$OM = 0.52$

$AM = 0.04$

$G = 9.81$

$QX = 0.00$

$OM = 2\pi/T$   
 $AM = K \sin \alpha$



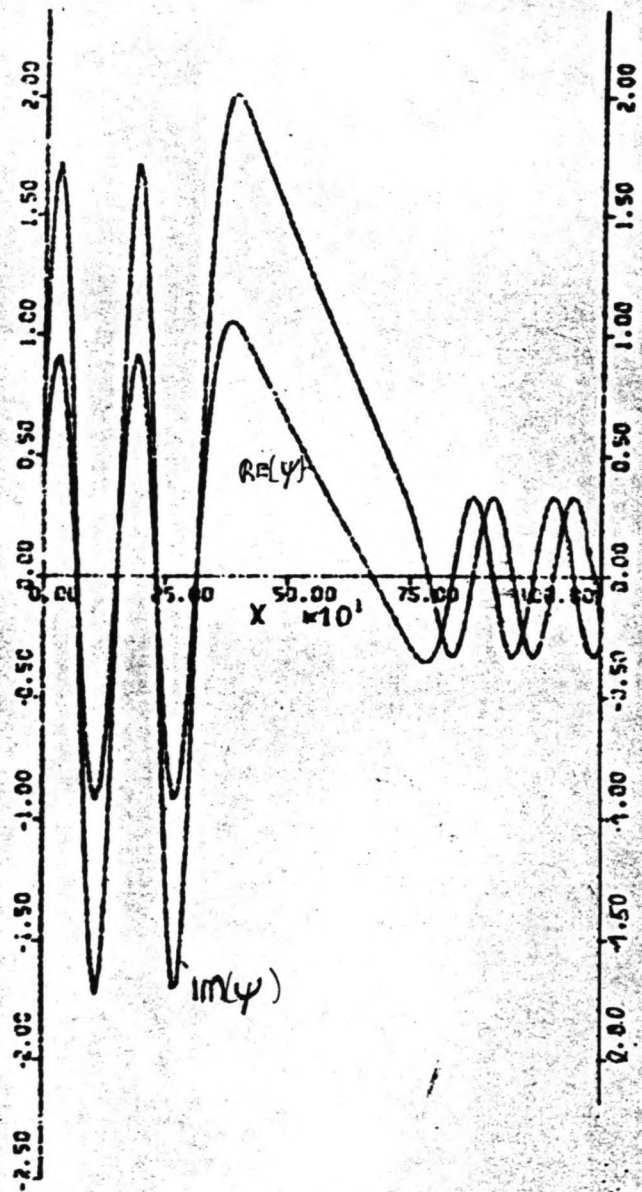
$$\alpha_L = \alpha_{kritiek} = 45.7^\circ$$

$$OM = 0.52$$

$$AM = 0.04$$

$$G = 9.81$$

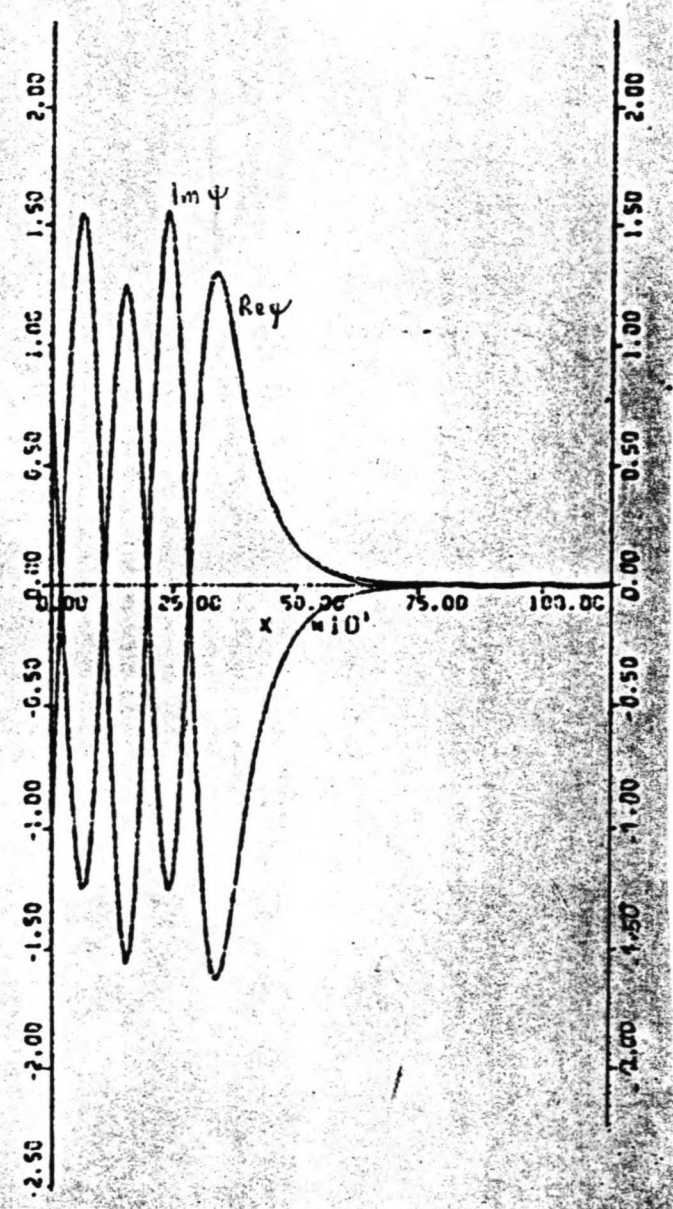
$$OX = 0.00$$





$$\alpha_i > \alpha_{\text{kritiek}}$$
$$\alpha_i = 50^\circ$$

$\theta M = 0.52$   
 $A M = 0.04$   
 $G = 9.81$   
 $Q X = 0.00$



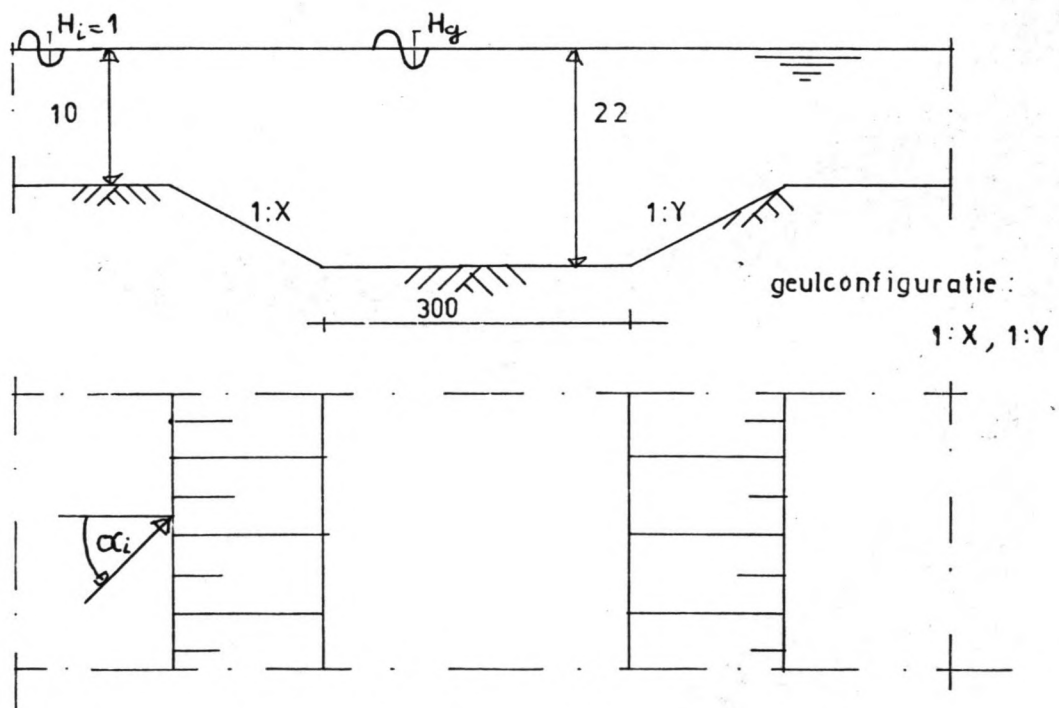


Bijlage 3.2

hoek van inval $\alpha_i = 45^\circ$		golfperiode				
geulconfiguratie 1:x    1:y		7	9	10	11	13
		$H_g \text{ max}/H_s$				
1:10	1:10	1.24	1.41	1.61	1.99	1.9--0.34
1:20	1:10	1.24	1.41	1.62	1.99	2 --0.35
1:20	1:20	1.24	1.37	1.55	1.86	1.9--0.4
1:40	1:20	1.24	1.37	1.56	1.88	2 --0.4
1:40	1:40	1.23	1.34	1.51	1.77	2.01-0.4
1:60	1:20	1.24	1.37	1.56	1.88	1.99-0.4
1:100	1:20	1.24	1.37	1.56	1.89	2 --0.4

noot: -- geeft aan dat de maximale golfhoogte in de geul afneemt tot de laatst vermeldde waarde.

Maximale  $H_g/H_s$  verhouding in de geul, bij verschillende geulconfiguraties.



## Bijlage 3.3

waterdiepte buiten de geul 10 m

golfrichtingsektor op diep water	golfperiodeklasse			
	$8 \leq T < 10$	$10 \leq T < 12$	$12 \leq T < 14$	$14 \leq T < 16$
	$H_{g \max}/H_s$			
$150^\circ \leq \phi_o < 185^\circ$	0.97	0.96	0.95	0.95
$185^\circ \leq \phi_o < 195^\circ$	0.99	0.97	0.96	0.99
$195^\circ \leq \phi_o < 205^\circ$	1.01	0.99	0.99	1.0
$205^\circ \leq \phi_o < 215^\circ$	1.05	1.02	1.08	1.08
$215^\circ \leq \phi_o < 240^\circ$	1.5	1.5	1.5	1.5

waterdiepte buiten de geul 15 m

golfrichtingsektor op diep water	golfperiodeklasse			
	$8 \leq T < 10$	$10 \leq T < 12$	$12 \leq T < 14$	$14 \leq T < 16$
	$H_{g \max}/H_s$			
$150^\circ \leq \phi_o < 185^\circ$	1.0	1.0	1.0	1.0
$185^\circ \leq \phi_o < 195^\circ$	1.0	1.0	1.0	1.0
$195^\circ \leq \phi_o < 205^\circ$	1.0	1.0	1.0	1.0
$205^\circ \leq \phi_o < 215^\circ$	1.02	1.02	1.02	1.03
$215^\circ \leq \phi_o < 240^\circ$	1.07	1.08	1.08	1.08

Bijlage 34 Constructie refractiepatroon volgens Groen en Dorrestein[12].

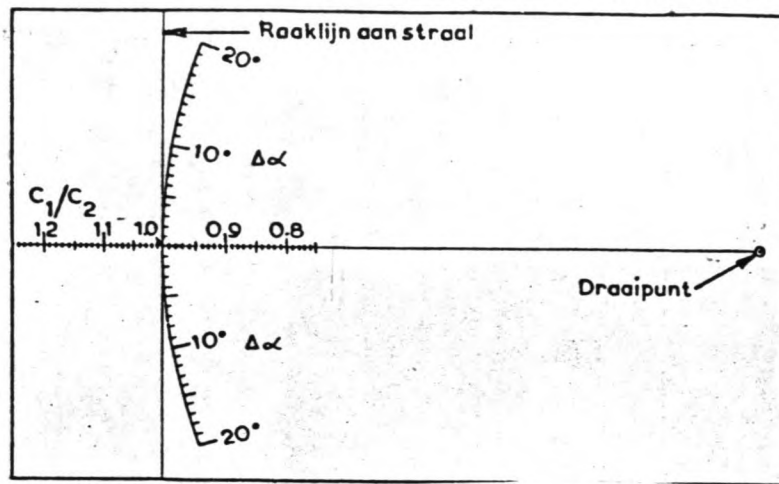


Fig. 37 Schaaltje voor het construeren van refractiepatronen.

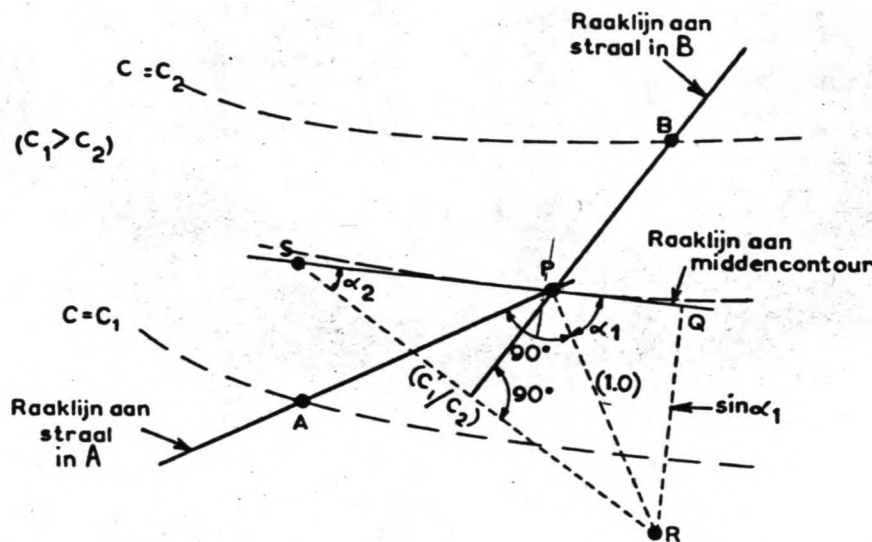


Fig. 38 Constructie van een refractiepatroon.

De figuur hierboven (fig. 38) illustreert, hoe dit schaalte gebruikt wordt. In deze figuur zijn dieptelijnen aangegeven als streepjeslijnen. We nemen aan, dat in een punt A van één dieptelijne, die we als 1 zullen aanduiden, de richting van een straal bekend is. De refractie van deze straal tussen deze en de volgende dieptelijne (2) wordt dan als volgt grafisch benaderd. De refractie-index  $C_1/C_2$  zij vermeld in het bovengenoemde staatje.

1. Teken op het oog een dieptelijne midden tussen de beide gegeven dieptelijnen.
2. Trek een raaklijne aan deze dieptelijne in het punt waar deze gesneden wordt door een straal zoals deze vermoedelijc zal lopen.
3. Leg het schaalte zó op de kaart, dat de lijne gemerkt 'raaklijne aan straal' samenvalt met de bekende raaklijne aan de straal in A en dat het punt 1.0 komt op het snijpunt P van deze raaklijne en de raaklijne aan de midden-dieptelijne.
4. Roteer het schaalte om het voorgeschreven draaipunt (R in fig. 38), totdat het punt op de rechte middellijne van het schaalte met de gegeven  $C_1/C_2$ -waarde komt op de raaklijne aan de midden-dieptelijne (in punt S).
5. Trek de raaklijne aan de straal op de dieptelijne 2 door P evenwijdig aan de gedraaide 'raaklijne' van het schaalte.

Dit procédé wordt herhaald in het gebied tussen de dieptelijne 2 en de daarop volgende, enz.

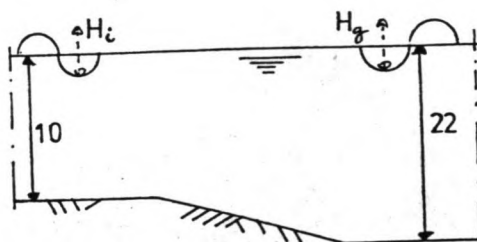
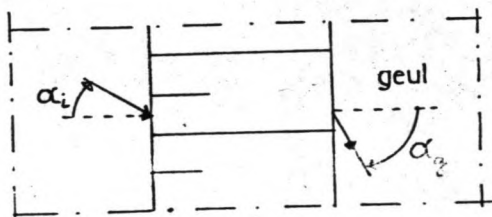
In fig. 38 is een overdreven sterke refractie voorgesteld. Om enige nauwkeurigheid te bereiken is het gewent  $C_2/C_1$  tussen de grenzen 0.8 en 1.2 en de richtingverandering van de straal binnen  $15^\circ$  te houden. Met behulp van de sinusregel in driehoek SPR ziet men in dat  $\sin \alpha_2 / \sin \alpha_1 = C_2 / C_1$ ; de gebroken straal APB zou dus optreden bij de overgang van een homogeen gebied met snelheid  $C_1$  naar een homogeen gebied met snelheid  $C_2$ , die gescheiden zijn door een lijne door P evenwijdig aan de raaklijne aan de midden-dieptelijne.

Zijn op een voldoende aantal opeenvolgende dieptelijnen de snijpunten en de raaklijnen van de straal vastgelegd, dan wordt hierlangs de straal als een vloeiende lijne getrokken.

Bijlage 4.1 Refractie-diffractie bij een geulorientatie van 190°

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

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



Bijlage 4.2 Lange termijn statistiek golfklimaat in de geul.  
Kans van optreden per jaar, eenheid  $10^{-4}$ .

0.5 $\leq H_m < 1$ m				
richtingssector	golfperiodeklasse			
	8-10	10-12	12-14	14-16
150° $\leq \phi < 215^\circ$	27.5	49.6	-	-
215° $\leq \phi < 225^\circ$	492.5	480.6	60.6	-
225° $\leq \phi < 235^\circ$	435.2	728.1	262.1	8.1
235° $\leq \phi < 245^\circ$	39.3	501.6	222.8	26.4
245° $\leq \phi < 280^\circ$	137.7	294.2	73.5	11.4

1 $\leq H_m < 1.5$ m				
richtingssector	golfperiodeklasse			
	8-10	10-12	12-14	14-16
150° $\leq \phi < 215^\circ$	-	-	-	-
215° $\leq \phi < 225^\circ$	146.5	312.4	48.7	-
225° $\leq \phi < 235^\circ$	121.3	175.9	174.8	12.0
235° $\leq \phi < 245^\circ$	22.0	260.4	213.3	28.7
245° $\leq \phi < 280^\circ$	77.3	170.2	106.7	21.2

1.5 $\leq H_m < 2$ m				
richtingssector	golfperiodeklasse			
	8-10	10-12	12-14	14-16
150° $\leq \phi < 215^\circ$	3.2	13.9	-	-
215° $\leq \phi < 225^\circ$	19.3	45.3	23.4	-
225° $\leq \phi < 235^\circ$	13.7	66.2	39.1	8.4
235° $\leq \phi < 245^\circ$	7.4	40.4	71.1	22.4
245° $\leq \phi < 280^\circ$	26.0	73.3	52.3	13.2



2 ≤ H <sub>m</sub> < 2.5 m				
richtingssector	golfperiodeklasse			
	8-10	10-12	12-14	14-16
150° ≤ φ < 215°	0.1	0.8	-	-
215° ≤ φ < 225°	0.3	2.4	2.4	-
225° ≤ φ < 235°	0.2	3.5	6.7	2.7
235° ≤ φ < 245°	2.8	6.5	9.1	7.3
245° ≤ φ < 280°	9.7	37.9	35.6	9.5

H <sub>m</sub> ≥ 2.5 m				
richtingssector	golfperiodeklasse			
	8-10	10-12	12-14	14-16
150° ≤ φ < 215°	-	-	-	-
215° ≤ φ < 225°	-	-	-	-
225° ≤ φ < 235°	-	-	0.1	0.2
235° ≤ φ < 245°	0.3	0.8	0.7	0.9
245° ≤ φ < 280°	1.1	6.3	8.8	4.1

