

~~RIJKE~~ ~~R-600~~

bx

80136

HYDRAULISCHE RANDVOORWAARDEN

VOOR DE

PROBABILISTISCHE BEREKENING VAN DE
BELASTING OP DE SLUIZEN IN DE AFSLUITDIJK

SSWB-R-87006

RIJKSWATERSTAAT
Dir. Sluizen & Stuven
Hoofdafd. Waterbouw
B.J. Kouwenhoven

februari 1987

Rijkswaterstaat
directie IJsselmeergebied
bibliotheek
postbus 600
8200 AP Lelystad

VOORWOORD

In dit rapport wordt de basis gelegd voor een integrale probabilistische aanpak van de Afsluitdijk.

Deze studie is verricht in het kader van het op Deltaveiligheid brengen van de Afsluitdijk. Hiertoe is een werkgroep (Werkgroep Aanpassing Kunstwerken Afsluitdijk (WAK)) opgericht welke de mogelijke oplossingen voor het bereiken van deze veiligheid bestudeert.

De hoofdafdelingen Waterbouw van de Dienst Weg- en Waterbouw en de direktie Sluizen & Stuwen hebben het initiatief genomen tot de probabilistische aanpak van het probleem. Het resultaat van het eerste deelprojekt, de bepaling van de hydraulische randvoorwaarden en de belasting op de spuisluisen, wordt in dit rapport behandeld.

De projektleiding was in handen van J. K. Vrijling, direktie Sluizen & Stuwen.

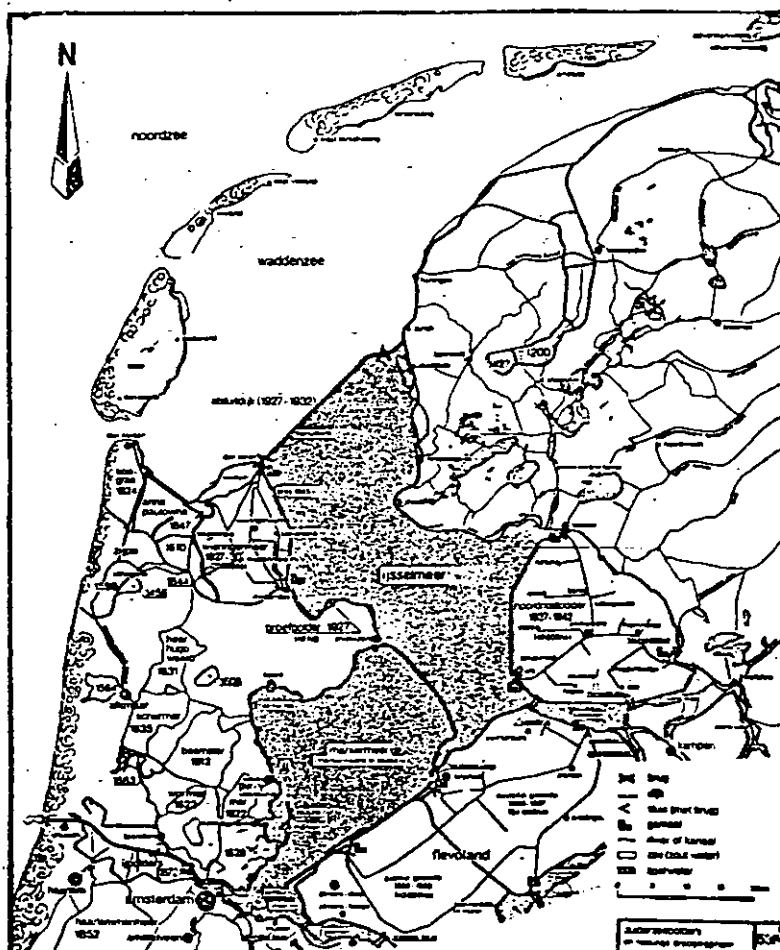
Bx
80136

INHOUDSOPGAVE

1. BEPALING RANDVOORWAARDEN	3
.0 inleiding	3
.1 hoogwaterstand	5
.2 astronomisch getij	6
.3 windopzet waddenzee	7
.4 hoogwaterstand als functie van de tijd	9
.5 relatie windopzet - windsnelheid	10
.6 golfgroei noordzee	14
.7 lokaal windveld waddenzee	14
.8 golfgroei waddenzee	16
.9 golfbeeld waddenzee	16
.10 gemiddelde waterstand ijssselmeer	17
.11 lokaal windveld ijssselmeer	18
.12 windopzet ijssselmeer	18
.13 golfgroei ijssselmeer	19
.14 lange zeegolven t.g.v. buioscillaties	19
.15 relatieve zeespiegelrijzing	19
2. INVLOEDEN OP DE RANDVOORWAARDEN	20
.1 golfoverslag en golfdoordringing in buitenhaven	20
.2 schuin invallende golven	24
3. BELASTING OP DE SLUIZEN	27
.1 belasting t.g.v. verval	27
.2 golfbelasting	27
.3 belasting op de schuiven	29
4. BELASTING OP DE SLUIZEN - MODEL OPBOUW	30
5. KONKLUSIES	31
6. LITERATUUR	33
BIJLAGEN	34
.1 golfhoogtereductie t.g.v. demping wad	34
.2 spektrale benadering van de golfenergie	39
.3 golfhoogteverdeling waddenzee	41
.4 windopzet ijssselmeer	42
BEREKENINGSRESULTATEN	45
OVERSCHRIJDINGSLIJNEN BELASTING	51
LISTING Z-FUNKTIE	54

1.0 INLEIDING.

De in de dertiger jaren ontworpen en gebouwde Afsluitdijk zal in het kader van de Deltawet op Deltasterkte gebracht moeten worden. In dit rapport worden de randvoorwaarden bestudeerd ten behoeve van een probabilistische berekening van de belasting op de sluisconstructies ter plaatse van Den Oever en Kornwerderzand. Figuur 1.1 geeft een geografisch overzicht van het gebied rond de Afsluitdijk.

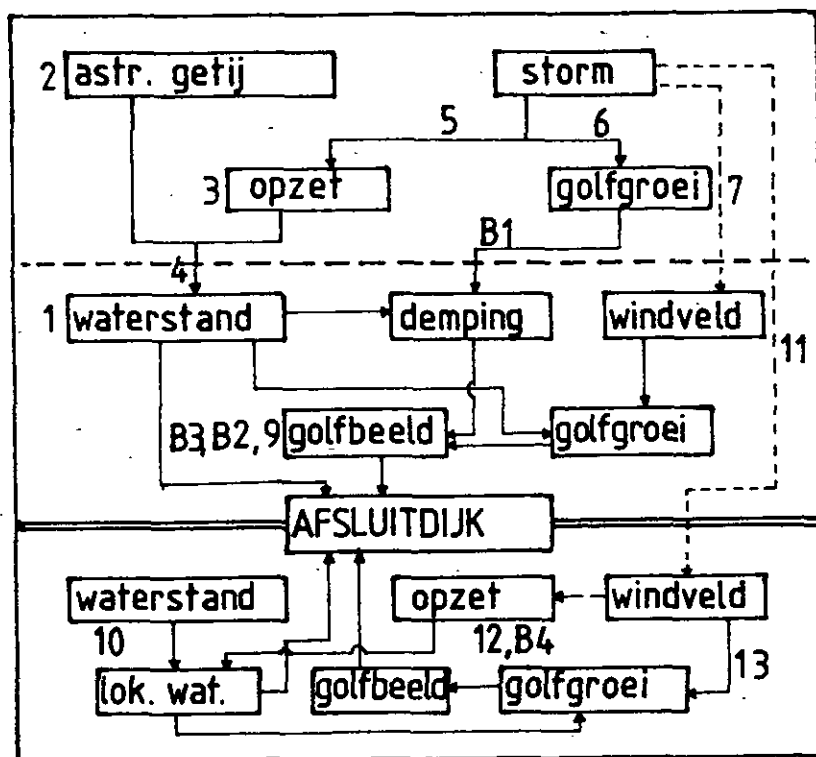


figuur 1.1 Geografisch overzicht Afsluitdijk.

Ten behoeve van een probabilistische berekening van de belastingen op de afsluitdijk zijn de hydraulische randvoorwaarden bepaald. De van invloed zijnde factoren voor deze belastingbepaling worden zoveel mogelijk als stochastische variabelen beschouwd. Van elke randvoorwaarde is bepaald volgens welke kansverdelingsfunctie deze kan worden beschreven en vervolgens zijn de hierbij behorende parameters bepaald. De gegevens dienen als invoer voor de probabilistische berekeningsmethode, zoals deze in het computerprogramma AFDA wordt gehanteerd.

Er is zoveel mogelijk getracht om voor de twee maatgevende lokaties langs de afsluitdijk, namelijk ter plaatse van de sluizen Den Oever en Kornwerderzand, te bepalen volgens welke verdelingen de randvoorwaarden zich manifesteren.

De fysische relaties zijn in eerste instantie in grove lijnen opgesteld en later verder uitgewerkt. Een schema van deze fysische relaties is te vinden in figuur 1.2. De in de figuur aangegeven cijfers langs de relatielijnen komen zoveel mogelijk overeen met de paragraafindeling in dit hoofdstuk.



figuur 1.2 Fysische relaties randvoorwaarden.

N.B. Alle stochastische variabelen worden in dit rapport aangeduid met het achtervoegsel st.

1.1 STORMVLOEDSTAND.

De overschrijdingslijnen van de stormvloedstanden (SVS_st), zoals weergegeven in lit[1] vormen de basis van de verdelingsfunctie van de SVS. Uit de overschrijdingslijn zijn twee markante punten genomen, waaruit de verdelingsfunctie kan worden berekend. De SVS_st volgt de zgn. GUMBELVERDELING.

Voor Den Oever geldt:

SVS	P(SVS_st > SVS)
=====	=====
	-4
5.25 m + NAP	7.10
	-4
5.85 m + NAP	1.10

Hieruit volgt de verdelingsfunctie:

$$F(SVS_st) = \text{EXP}[-\text{EXP}(-3.243(SVS-3.01)))] \text{ (Den Oever) } (1.1)$$

Een soortgelijke werkwijze volgt voor Kornwerderzand:

SVS	P(SVS_st > SVS)
=====	=====
	-4
5.30 m + NAP	7.10
	-4
5.90 m + NAP	1.10

De verdelingsfunctie luidt nu:

$$F(SVS_st) = \text{EXP}[-\text{EXP}(-3.243(SVS-3.06)))] \text{ (Kornwerderzand) } (1.2)$$

1.2 ASTRONOMISCH GETIJ.

Het astronomisch getij kan worden beschreven met een vergelijking van de vorm:

$$\text{astro}(t) = \text{astro_st} \cdot \cos(2\pi t/T) \quad (1.3)$$

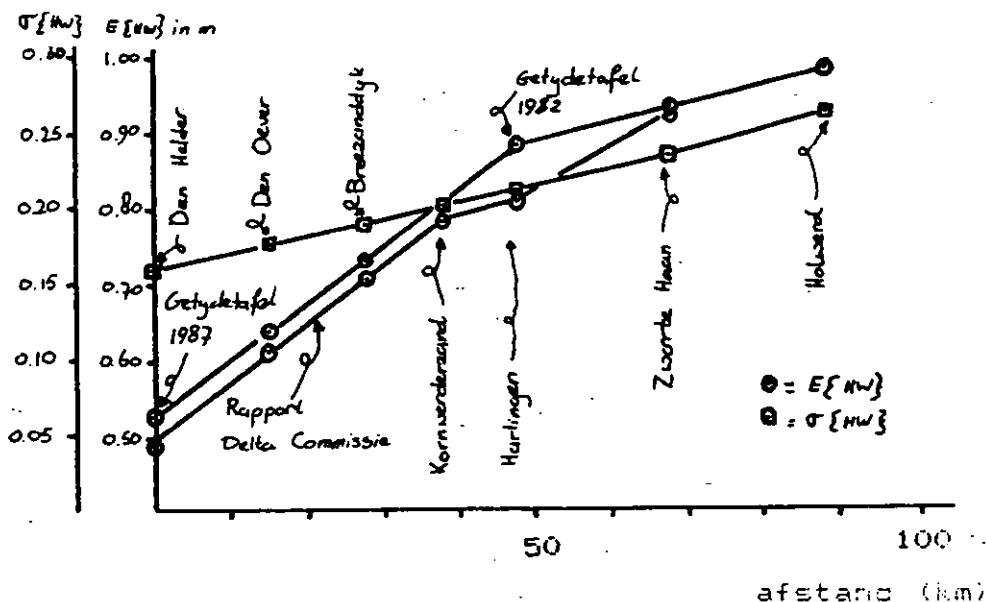
met:

astro_st = astronomisch hoogwater
t = tijdstip
T = periode (12.4 uur)

Bepaling astro_st:

Uit getijdetafels is het astronomisch getij van Den Helder en van Harlingen bekend. Voor de bepaling van de randvoorwaarden is het van belang de verdeling van het astronomisch hoogwater te kennen ter plaatse van de sluizen te Den Oever en Kornwerderzand. Deze is niet direkt te bepalen. Daarom is er lineair geïnterpoleerd tussen de gegevens van Den Helder en Harlingen. De parameters van de kansverdelingsfunctie (gemiddelde hoogwaterstand en de standaardafwijking) zijn bepaald door middel van een grafische bepaling van de verdeling van de hoogwaterstand. Voor Harlingen zijn de gegevens ontleend aan lit[2] en voor de verdeling van hoogwater te Den Helder is de analyse uitgevoerd met gegevens uit lit[3].

Figuur 1.3 geeft de resultaten van de interpolatie weer. Het astronomisch hoogwater heeft een NORMALE VERDELING.



figuur 1.3 Gemiddelde en standaardafwijking van het astronomisch hoogwater.

Samengevat luiden de resultaten:

Den Oever: $E(\text{astro_st}) = 0.635 \text{ m} + \text{NAP}$
 $\sigma(\text{astro_st}) = 0.174 \text{ m}$

Kornwerderzand: $E(\text{astro_st}) = 0.805 \text{ m} + \text{NAP}$
 $\sigma(\text{astro_st}) = 0.195 \text{ m}$

Bepaling t:

Astronomisch getij en storm zijn stochastisch onafhankelijk. Dit heeft tot gevolg dat gedurende de maximale windopzet het astronomisch getij volkomen willekeurig tussen eb en vloed kan verkeren. Om deze onafhankelijkheid in het model te verwerken wordt een als stochastische variabele te beschouwen faseverschil geïntroduceerd tussen getij en opzet. Dit faseverschil, ϕ_{st} , zal een UNIFORME VERDELING bezitten. De kenmerken van deze stochast zijn:

$E(\phi_{\text{st}}) = 0 \text{ uur}$
Linker grens = -6 uur
Rechter grens = 6 uur

1.3 WINDOPZET WADDENZEE.

De windopzet is door diverse wetenschappers onderzocht. (Zie hiervoor lit[2] en lit[6]). Men vond dat de windopzet kan worden beschreven met de volgende formule:

$$S(t) = s_{\text{max_st}} \cdot \cos^2(\pi t / T_{\text{st}}) \quad (1.4)$$

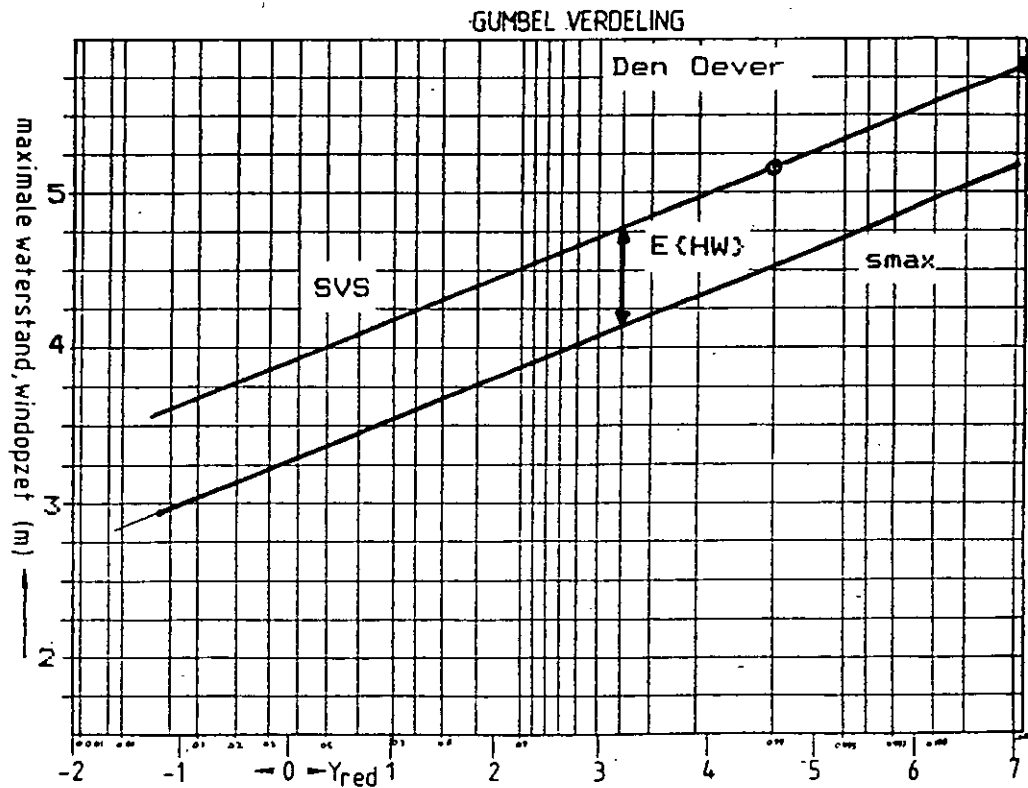
Hierbij zijn:

$s_{\text{max_st}}$ = maximale windopzet
 T_{st} = stormduur

Bepaling s_{max_st} :

Een stormvloedstand kan samengesteld worden gedacht als de sommatie van astronomisch hoogwater en maximale windopzet. De verdeling van de maximale windopzet is te bepalen door van de verdeling van de SVS uit te gaan en hiervan een konstante waarde, overeenkomend met gemiddeld astronomisch hoogwater, af te trekken. Hieruit volgt dus ook dat de verdelingsfunctie van de maximale windopzet een GUMBELVERDELING is.

Een en ander wordt verduidelijkt in figuur 1.4.



figuur 1.4 Overschrijdingslijnen stormvloedstand en maximale windopzet.

Voor Den Oever geldt dan:

$$F(s_{max_st}) = \text{EXP}[-\text{EXP}(-3.243(s_{max} - 2.37))] \quad (1.5)$$

En voor Kornwerderzand:

$$F(s_{max_st}) = \text{EXP}[-\text{EXP}(-3.243(s_{max} - 2.26))] \quad (1.6)$$

Bepaling T_{st} :

De stormduur is in lit[2] onderzocht. Van een ruim aantal stormen is ter plaatse van de Waddenzee de stormduur bepaald en de verdelingsfunctie is opgesteld. Uit dit onderzoek volgt voor een storm ter plaatse van het Friese wad een stormduur met een NORMALE VERDELING, gekenmerkt door de volgende parameters:

$$\begin{aligned} E(T_{st}) &= 48 \text{ uur} \\ \sigma(T_{st}) &= 12 \text{ uur} \end{aligned}$$

Aangenomen wordt dat deze gegevens kunnen worden gebruikt voor de Afsluitdijk, daar de afstand tussen het Friese wad en de Afsluitdijk ten opzichte van de afmetingen van een windveld verwaarloosd kunnen worden. In de berekening van de belasting op de sluizen echter, is deze tijdsduur van de windopzet niet relevant en wordt dan ook niet gebruikt.

1.4 STORMVLOEDSTAND ALS FUNKTIE VAN DE TIJD.

De stormvloedstand, zoals is vastgesteld in hoofdstuk 1.1, zal nu als volgt zijn gedefinieerd:

$$SVS_{st}(t) = astro(t + \bar{q}_{st}) + S(t) \quad (1.7)$$

Deze eerste direkte randvoorwaarde voor het bepalen van de belasting op de sluizen in de afsluitdijk kan nog enigszins vereenvoudigd worden door de tijdsafhankelijkheid van de functie niet te betrekken bij de berekening. De faseverschuiving van getij ten opzichte van windopzet wordt op een andere wijze in rekening gebracht. Dit leidt tot:

$$SVS_{st} = astro_{st} \cdot \cos(2\pi \cdot \bar{q}_{st} / 12.4) + smax_{st} \quad (1.8)$$

1.5 RELATIE WINDOPZET - WINDSNELHEID.

De lokale windopzet wordt veroorzaakt door windvelden boven de Noordzee en de Waddenzee. Om de windsnelheid als stochastische invoer parameter in de berekening te betrekken, zou het noodzakelijk zijn om een zeer gedetailleerd beeld van de windvelden boven de Noordzee te hebben. Deze gegevens zijn echter niet voorhanden. Er is daarom voor een andere methode gekozen door de invoering van een "gewogen gemiddelde" windsnelheid, welke verantwoordelijk is voor de windopzet ter plaatse van de Afsluitdijk. Deze windopzet is bekend (via formule 1.5 en 1.6) en via de beschikbare modellen kan de relatie tussen opzet en windsnelheid worden bepaald.

De windopzet ter plaatse van de afsluitdijk wordt gemodelleerd door deze uit twee componenten opgebouwd te veronderstellen. Een gedeelte van de windopzet is opgewekt op de Noordzee en een gedeelte van de opzet wordt lokaal (Waddenzee) opgebouwd door het lokale windveld. In lit[2] wordt een windopzet berekening uitgevoerd voor het Friese wad. Een dergelijke werkwijze wordt gevolgd voor de twee lokaties langs de afsluitdijk. De berekende relatie wordt tenslotte getoetst aan de hand van een aantal stormgegevens en beschikbare windstatistieken.

De windopzet vanuit de Noordzee kan worden berekend met de formule van Weenink (lit[10]). Gekozen wordt voor de windopzet ter plaatse van het Eierlandse gat. De formule luidt:

$$S_s = (0.32 \cdot \cos \alpha + 0.36 \cdot \sin \alpha) \cdot 5.5E-3 \cdot U_5^{1.9} \quad (1.9)$$

met:

α = hoek van inval wind t.o.v. y-as model Weenink.
 $U_5(10)$ = windsnelheid gedurende 5 uur overschreden.
5

Deze opzet dient bij de gemiddelde waterdiepte in de Waddenzee te worden opgeteld. De nieuwe waterdiepte is vervolgens invoer voor de berekening van de lokale windopzet.

De lokale windopzet wordt berekend met de formule van Groen en Verploegh (lit[11]). Deze relatie is afgeleid voor de situatie ter plaatse van de Waddenzee:

$$s = 10^{-7} \cdot F/d \cdot \cos(\beta) \cdot U_1^{2.4} \quad (1.10)$$

met:

F = strijklengte
d = diepte Waddenzee
B = hoek van inval wind t.o.v. NNW
U (10) = windsnelheid gedurende 1 uur overschreden
1

De windsnelheid op de waddenzee hoeft slechts gedurende 1 uur, een bepaald nivo te hebben overschreden voordat zich een evenwichtsopzet instelt, in tegenstelling tot de windduur van 5 uur boven de Noordzee. Voor de berekening is het echter een goede benadering om voor de windsnelheid boven de Waddenzee ook een U5 (10) (gelijk aan Noordzee wind) in te voeren. Dit wordt veroorzaakt door, uitgaande van een timelag van ca. 5 uur, een vervroeging van hoogwater onder stormomstandigheden van 1 uur en een hoge correlatie tussen windvelden boven de Noordzee en de Waddenzee te veronderstellen.

De totale windopzet is bepaald door:

$$S = S_s + s \quad (1.11)$$

De twee lokaties hebben de volgende gegevens:

	<u>Den Oever</u>	<u>Kornwerderzand</u>
F (m)	17000	28000
d (m)	3.635 + S _s	1.805 + S _s
windrichting	315°	315°

Voor deze situatie wordt nu de windopzet berekend bij een aantal verschillende windsnelheden. Vervolgens wordt de inverse functie $u = f(S)$ bepaald door een onderstaande funktievorm door de verkregen grafiekpunten te leggen. De formules worden weergegeven door:

$$U(10) = \frac{A \cdot S^n}{5} \quad (1.12)$$

met:

	<u>Den Oever</u>	<u>Kornwerderzand</u>
A =	16.58	13.60
n =	0.52	0.50

Deze relaties zijn voor de lagere windsnelheden getoetst aan een aantal stormgegevens. De grafiek op de volgende bladzijde geeft weer in hoeverre de functie de werkelijkheid beschrijft. De stormgegevens zijn afkomstig van 8 geselecteerde stormen uit de periode 1971-1983.

Voor de hogere windsnelheden zijn geen waarnemingen beschikbaar. Om nu toch een indruk te krijgen van de geldigheid van de relatie, vooral voor windsnelheden boven 20 m/s, is de volgende controle uitgevoerd.

Gezien de eenvoudige functie $u = f(S)$, kan worden verondersteld dat een windopzet met een bepaalde overschrijdingskans wordt veroorzaakt door een windsnelheid met dezelfde overschrijdingskans. Het monotoon stijgende karakter van de relatie ondersteunt deze gedachte.

Figuur 1.6 toont de statistiek van de 1-uurs windsnelheid, verkregen van metingen op de luchthaven Schiphol. Deze overschrijdingslijnen kunnen, na enig omwerken worden toegepast op de windsnelheden boven de Noordzee. Deze omwerking houdt achtereenvolgens in:

- Toepassen vermenigvuldigingsfaktor van 1.12 voor windsnelheid op open water (Wieringa).
- Omwerken naar een 5-uurs windsnelheid met behulp van de formule van Rijkooft (1.13) -

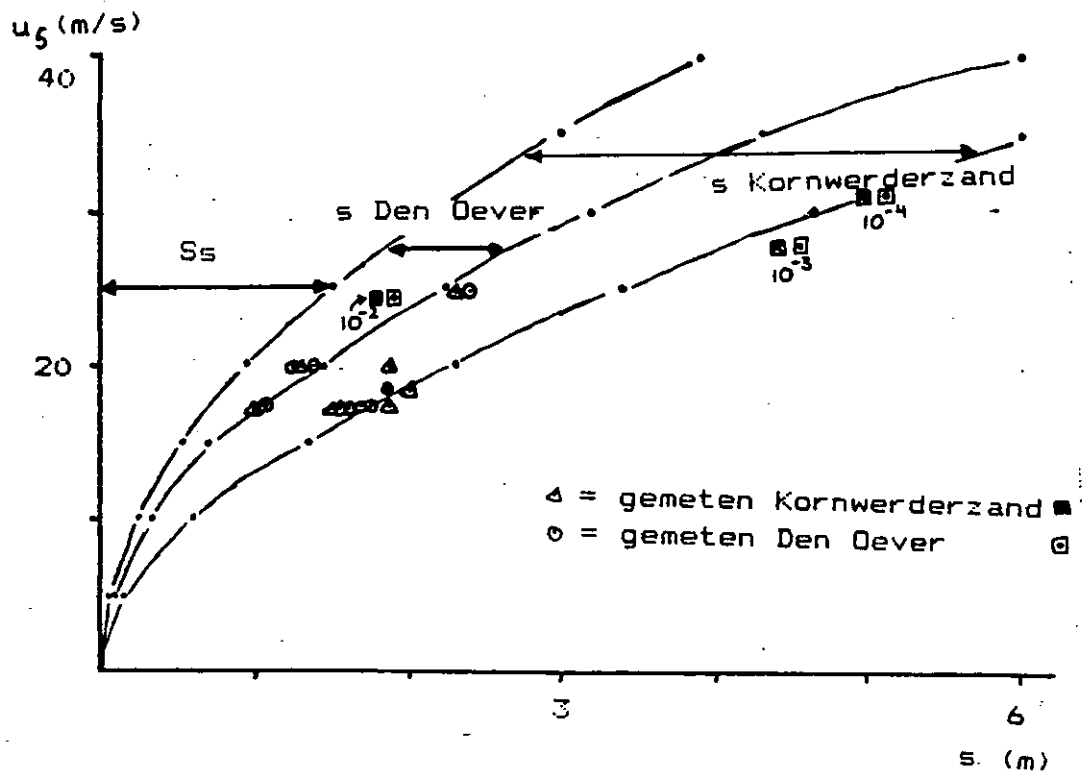
Deze omwerking wordt uitgevoerd voor verschillende overschrijdingsfrequenties (1/100, 1/1000, 1/10000). Met de verkregen 5-uurs windsnelheden, welke representatief geacht worden voor de Noordzee, kunnen nu de bijbehorende windopzetten bepaald worden (met dezelfde overschrijdingsfrequenties, formule 1.5 en 1.6). De resultaten zijn toegevoegd aan figuur 1.5.

Vergelijking van alle gegevens leidt tot de konklusie, dat de formule voor Kornwerderzand een redelijke benadering is van de windopzet-windsnelheidsrelatie. De relatie voor Den Oever vertoont bij hogere windsnelheden een te sterke afwijking van de "statistische" benadering en wordt daarom verworpen. Voor de lagere windsnelheden vertonen de meetgegevens een zekere spreiding rond de berekende relaties. Deze spreiding kan worden verdisconteerd in een storingsvariabele, die wordt opgeteld bij de funktiewaarde. Deze storingsvariabele, `error_st`, wordt verondersteld een NORMALE VERDELING te hebben.

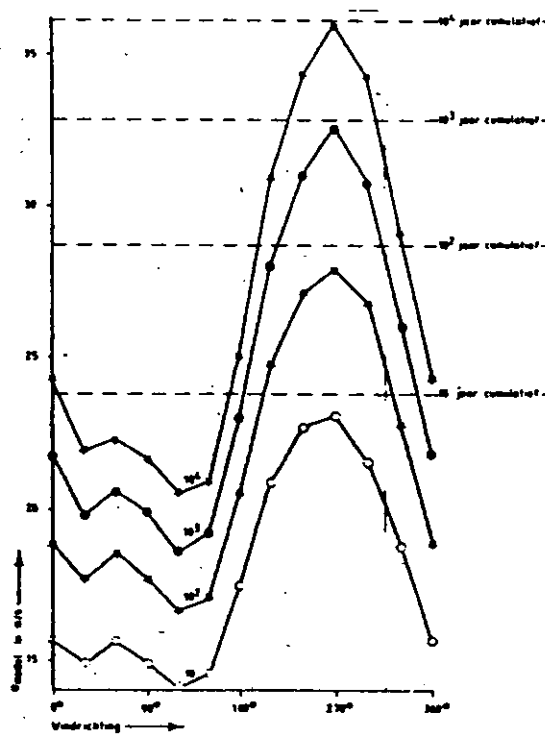
De parameters zijn:

$$\begin{aligned} E(\text{error_st}) &= 0 \\ \sigma(\text{error_st}) &= 2.5 \end{aligned}$$

In deze storingsvariabele worden invloeden als onnauwkeurigheid bij bepalen meetgegevens, wisselende windrichting, variërende strijklengte en windsnelheid etc. verdisconteerd.



figuur 1.5 Relatie U - S.



figuur 1.6 Windstatistiek Schiphol.

1.6 GOLFGROEI NOORDZEE.

Aan de golfgroei op diep water (Noordzee) is in eerste instantie niet gerekend, omdat van deze golfbeweging na het passeren van de Waddeneilanden weinig overblijft. Het energieverlies is bijzonder groot. In bijlage 1 wordt door middel van een voorbeeldberekening aangetoond dat een typische "100-jaars golf" zeer sterk gedempt wordt als gevolg van:

- breking
- energieverlies door bodemwrijving
- diffractie

Bij gebrek aan meetgegevens van de golfklimatologie (geen golfmeetboeien) is de bovenvermelde veronderstelling vooralsnog niet geverifieerd.

1.7 LOKAAL WINDVELD WADDENZEE.

Voor het berekenen van de golfgroei op de Waddenzee is een windsnelheid, welke gedurende 1 uur wordt bereikt of overschreden, in te voeren. Dit betekent, dat voor het berekenen van de golfgroei de instantane windsnelheid kan worden gebruikt. Er hoeft geen lange tijd gewacht te worden voordat zich een evenwicht instelt.

Deze instantane windsnelheid kan worden berekend uit de eerder geformuleerde 5-uurs windsnelheid met behulp van de formule van Rijkooft. Hiervoor geldt dat een 1-uurs windsnelheid wordt verkregen uit de 5-uurs windsnelheid via:

$$U_{\max} = U_5 \cdot ((k/26.8)^{1.2} + 1) \quad (1.13)$$

voor $k = 5$ volgt dan: $U_{\max} = 1.13U_5$

Omdat de windsnelheid gedurende de maximale windopzet bij benadering een lineair afnemende funktie is van de tijd, kan tijdens de maximale windopzet de grootte van de windsnelheid variëren tussen een minimum- en een maximumwaarde. Deze uiterste grenzen worden voorgesteld door het 1-uurs gemiddelde (maximum) en het 24-uurs gemiddelde (minimum).

De grenzen zijn berekend als:

$$U_1 = 1.13 \cdot U_5$$

$$U_{24} = 0.60 \cdot U_5$$

Figuur 1.7 geeft de bovenstaande redenering meer gestalte.

De instantane windsnelheid wordt UNIFORM VERDEELD beschouwd met de volgende kenmerken:

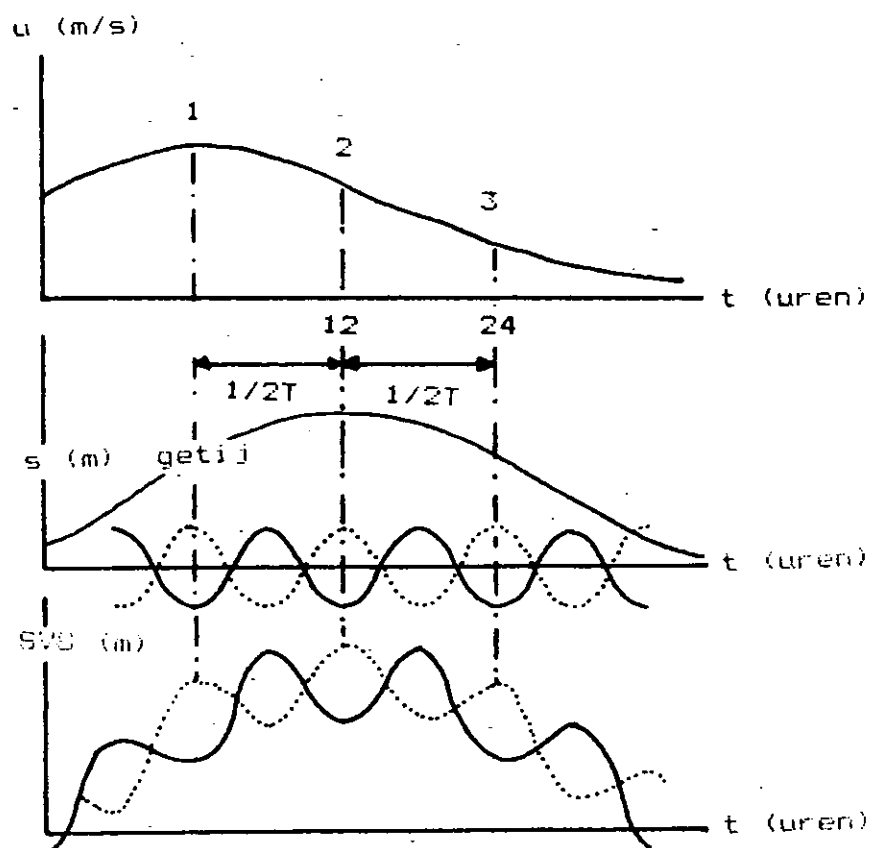
$$U_i = \text{faktor_st} \cdot U_5 \quad (1.14)$$

met:

$$E(\text{faktor_st}) = 0.87$$

$$\text{Linker grens} = 0.60$$

$$\text{Rechter grens} = 1.13$$



figuur 1.7 Invloeden wind, opzet en getij.

1.8 GOLFGROEI WADDENZEE.

De invoervariabelen voor het berekenen van de golfgroei op de Waddenzee zijn nu bekend. Met behulp van de Bretschneider-Sanders formule kan uit gegeven windsnelheid, strijklengte en waterdiepte berekend worden hoe groot de significante golfhoogte en de topperiode ter plaatse van de lokaties langs de afsluitdijk zijn. Voor de bepaling van de strijklengte is een windrichting NNW aangenomen en een schaduwwerking ten gevolge van de aanwezigheid van de Waddeneilanden van 1 km.

1.9 GOLFBEELD WADDENZEE.

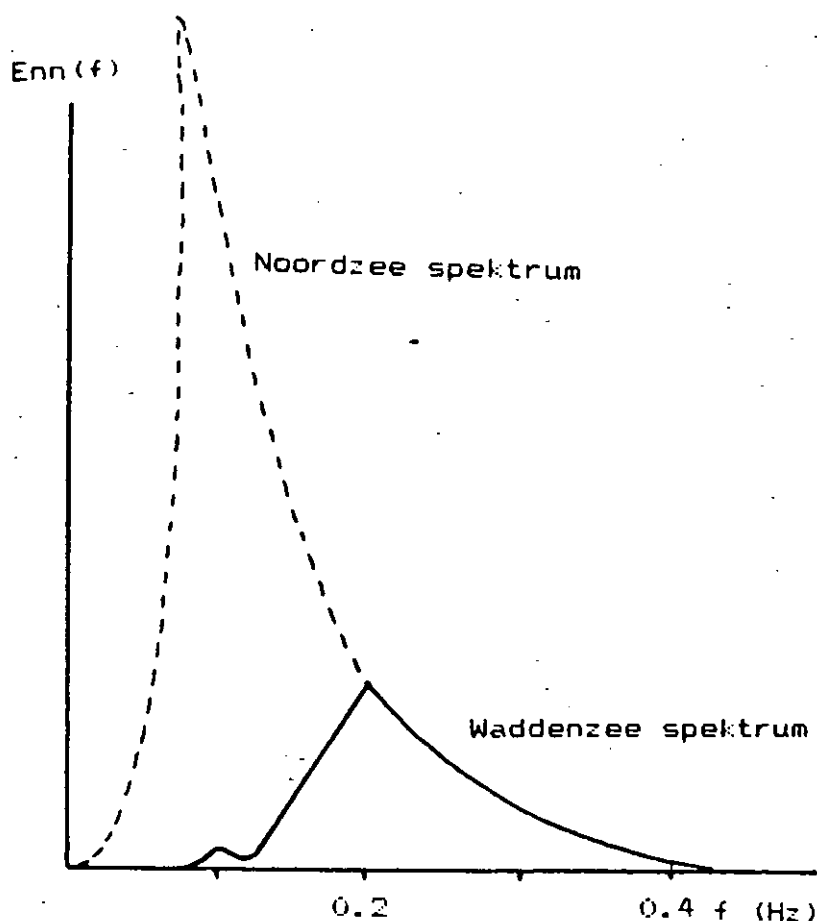
Het golfbeeld voor de Afsluitdijk wordt weergegeven in het energiespektrum en zal voornamelijk bepaald worden door de hoogfrequentie golfenergie ten gevolge van de lokale golfgroei. In bijlage 2 wordt het een en ander over het spektrum opgemerkt. Een zeer sterk gedempt laagfrequent gedeelte wordt veroorzaakt door de overblijfselen van de golven op de Noordzee. In grafiekvorm ziet de opbouw van het spektrum eruit als aangegeven in figuur 1.8. In het model wordt slechts met de uit de Bretschneider-Sanders formule berekende significante golfhoogte gewerkt. Hierbij wordt een energiespektrum gedefinieerd. In eerste instantie wordt verondersteld dat er totaal geen laagfrequentie golfenergie aanwezig is.

Eventuele metingen met een meetboei zullen duidelijkheid omtrent het werkelijk optredende spektrum moeten geven.

De verdeling van de golfhoogten wordt in bijlage 3 nader uitgewerkt. Gedurende een storm wordt de verdeling van de maximale golfhoogte weergegeven door een EXTREME WAARDE VERDELING.

$$F(H) = \text{EXP}[-\text{EXP}(-2(H/H_s)^2 + 7.68)] \quad (1.15)$$

Later wordt hier bij de berekening van de golfkracht verder op in gegaan.



figuur 1.8 Opbouw energiespektrum (veronderstelling)

1.10. GEMIDDELDE WATERSTAND IJSSELMEER.

De waterstand in het IJsselmeer wordt zoveel mogelijk beheerst met het oog op scheepvaart en waterhuishouding.

Het volgende streefpeil wordt gehanterd:

Zomerseizoen :	NAP - 0.20 m
Winterseizoen:	NAP - 0.40 m

Omdat de "Deltastorm" in het winterseizoen zal optreden zal de verdeling van de waterstanden gedurende het winterhalfjaar worden onderzocht.

De overschrijdingslijn van de waterstand op het IJsselmeer is bekend. Hierbij is echter de overschrijdingskans van de maximale waterstand (jaarmaximum) op het meer weergegeven, terwijl de verdeling van de gemiddelde dagelijkse waterstanden benodigd is. Bovendien kan opgemerkt worden dat de waterstanden op het IJsselmeer enigszins gekorreleerd zijn

met de waterstanden op op Waddenzee. Dit wordt veroorzaakt door het al of niet kunnen spuien. Wanneer nu een storm nadert en de windopzet een belangrijker rol gaat spelen op de Waddenzee, dan kan niet meer gespuid worden en zal diensgevolge de waterstand op het IJsselmeer stijgen.

Hierdoor is het moeilijk om een verdelingsfunctie vast te stellen voor de waterstanden op het IJsselmeer, daar vooral extrapolatie naar ontwerpomstandigheden de werkelijkheid geweld aan kan doen.

Uit ervaring is bekend dat het streefpeil van NAP - 0.40 m slechts zeer zelden wordt bereikt. Meestal is de waterstand hoger, zodat nu voor een benadering van de verdelingsfunctie wordt gekozen in de vorm van een NORMALE VERDELING met de volgende parameters:

$$\begin{aligned} E(\text{laagw_st}) &= \text{NAP} - 0.35 \text{ m} \\ \sigma(\text{laagw_st}) &= 0.05 \text{ m} \end{aligned}$$

1.11 LOKAAL WINDVELD IJSSELMEER.

Voor de berekening van de afwaaiing op het IJsselmeer is een van de windsnelheid op open zee afgeleide windsnelheid benodigd.

De afwaaiing volgt uit de verkregen 5-uurs windsnelheid en een te berekenen golfgroei volgt onder andere uit een 1-uurs windsnelheid:

$$U1 = 1.13 \cdot U5 \quad (1.16)$$

1.12 WINDOPZET (AFWAAIING) IJSSELMEER.

Ten gevolge van een sterke NNW storm zal er op het IJsselmeer een verandering van de waterstand optreden. Dit betekent een waterstandsverlaging (afwaaiing) ter plaatse van de afsluitdijk en een opzet ter plaatse van de polders. De vorm van het gekromde oppervlak moet worden bepaald om te weten hoe groot de waterstandsverlaging direkt achter de Afsluitdijk is. In bijlage 4 wordt een afleiding gegeven van de in een afgesloten bekken optredende windopzet. De

berekening volgt uit een verhandeling over dit onderwerp in lit[4].

De verkregen windopzetformule dient te worden geijkt aan gegevens van de afwaaiing achter de Afsluitdijk. Deze zijn beschikbaar in de vorm van het model WAQUA, dat is gebruikt voor PEILOF berekeningen door directie ZZW. Over de ijking wordt in bijlage 4 gesproken.

1.13 GOLFGROEI IJSSELMEER.

Er zal ten gevolge van een MNW storm geen golfgroei van betekenis aan de IJsselmeerzijde van de afsluitdijk optreden.

1.14 LANGE ZEEGOLVEN T.G.V. BUI-OSCILLATIES.

Ten gevolge van een storm op de Noordzee met buistoten zal een lange golf ontstaan. Er zijn geen meetgegevens beschikbaar over de amplituden van deze bui-oscillaties, zodat er in de eerste instantie moet worden volstaan met een schatting. De golf zal vrijwel ongehinderd de wadden-zee kunnen binnendringen, gezien de lange periode van ca. 35 minuten. De onderzoeken naar dit verschijnsel in IJmuiden hebben een golf opgeleverd, welke NORMAAL VERDEELD is aangenomen met:

$$\begin{aligned} E(\text{buiamp_st}) &= 0.25 \text{ m} \\ \sigma(\text{buiamp_st}) &= 0.05 \text{ m} \end{aligned}$$

In lit[5] wordt gesproken over een amplitude van 0.20 m a 0.50 m. Totdat er voldoende meetgegeven beschikbaar zijn zal met bovenstaande waarden worden gewerkt.

1.15 RELATIEVE ZEESPIEGELRIJZING.

Voor de relatieve zeespiegelrijzing zal de door de Delta-commissie opgestelde norm van 20 cm per eeuw worden gehanteerd. Voor een konstruktie met een levensduur van 50 jaar, of een goed te onderhouden konstruktie kan de helft worden aangenomen. Dit levert een zeespiegelrijzing, met een NORMALE VERDELING volgens:

$$\begin{aligned} E(\text{zeesp_st}) &= 0.10 \text{ m} \\ \sigma(\text{zeesp_st}) &= 0.025 \text{ m} \end{aligned}$$

2 INVLOEDEN OP DE RANDVOORWAARDEN.

2.1 GOLFOVERSLAG EN GOLFDOORDRINGING IN DE BUITENHAVEN.

Het golfveld binnen de spuikom van de twee sluizen wordt bepaald door een combinatie van golfoverslag, diffractie en refractie. De invloeden worden onderzocht in deze paragraaf.

Er is in het geval van de sluizen te Den Oever en Kornwerderzand sprake van onderdompeling van de havendammen. De kruinhoogte van deze dammen bedraagt NAP + 4 m. De mate van onderdompeling is van invloed op de diffractie en de golfoverslag. Omdat niet kan worden overzien hoe de uitwerking van deze beïnvloeding is, is een benaderende methode ter hand genomen. De factoren worden los van elkaar gezien en er wordt bepaald hoe groot de golfhoogtereductie is ten gevolge van de afzonderlijke invloeden. Hierna worden de minima van elk der factoren aangehouden als ondergrens voor de golfhoogtereductie.

a. Diffractie

Wanneer de havendammen niet zouden zijn ondergedompeld, zouden de golfhoogten ter plaatse van de sluizen bepaald kunnen worden met behulp van een diffractieberekening. De drie sluisgroepen te Den Oever en de twee sluisgroepen te Kornwerderzand geven dan de volgende reductie in golfhoogte te zien:

$$\begin{aligned} D1 &= 0.25 & D &= \text{Den Oever} \\ D2 &= 0.50 \\ D3 &= 1.00 \\ K1 &= 0.00 & K &= \text{Kornwerderzand} \\ K2 &= 0.00 \end{aligned}$$

met: D1, D2, D3 = de drie spuikomplexen te Den Oever
K1, K2 = twee spuikomplexen te Kornwerderzand

De telling geschiedt van west naar oost.

b. Golfoverslag

Golfoverslag over een doorlopende havendam kan worden benaderd met de vuistregels van Bijker en de relatie van Hamer & Hamer. De golfhoogtereductie wordt voor alle sluiskolken gelijk gesteld en is afhankelijk van de mate van onderdompeling van de havendammen:

$$Hg(1/3)/Hi = -0.56(Zc/Hi) + 0.58 \quad (2.1)$$

Aangepast aan de situatie ter plaatse van de sluisen:

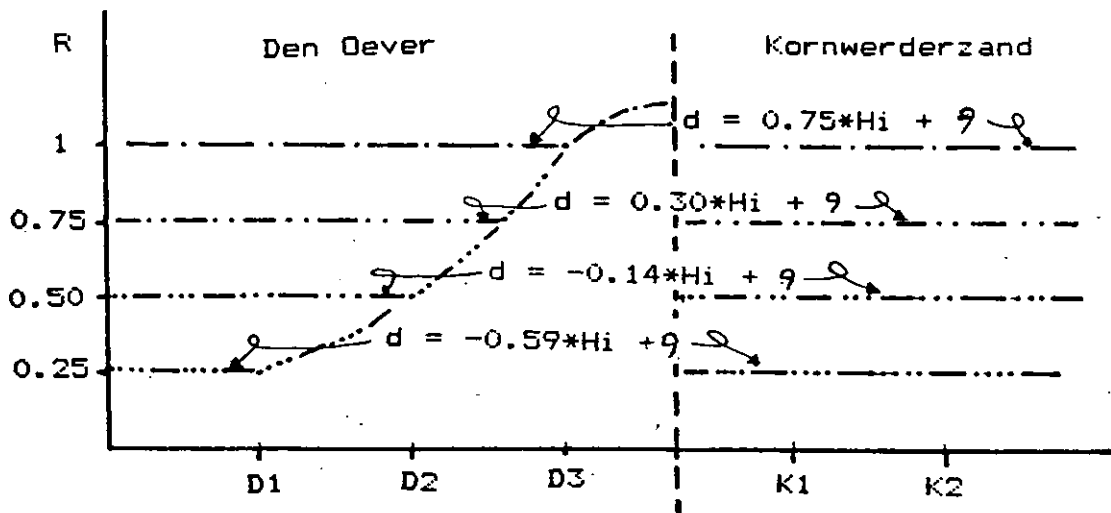
$$H_g(1/3)/H_i = -0.56(d - 9)/H_i + 0.58 \quad (2.2)$$

met:

$H_g(1/3)$ = significante overblijvende golfhoogte
 H_i = golfhoogte inkomende golf
 d = waterdiepte

Figuur 2.1 laat zien hoe de golfhoogtereductie wordt weergegeven als functie van de afstand langs de sluisen, in de langsrichting van de Afsluitdijk. De horizontale lijnen stellen de reductie ten gevolge van golfoverslag voor, voor verschillende waterdiepten en golfhoogten; de kromme geeft het verloop van de reductie door diffractie weer, voor het geval dat de golfbrekers niet zouden zijn ondergedompeld. In de ontwerpsituatie zal echter van golfhoogtereductie geen sprake zijn, gezien de hoge waterstand.

Als bovengrens wordt de inkomende golfhoogte genomen. Bovendien wordt in het computerprogramma het lineaire verband benaderd door een sinusverband om een continu-differentieerbaar functie voorschrift te verkrijgen. Dit is gedaan met het oog op de werking van AFDA.



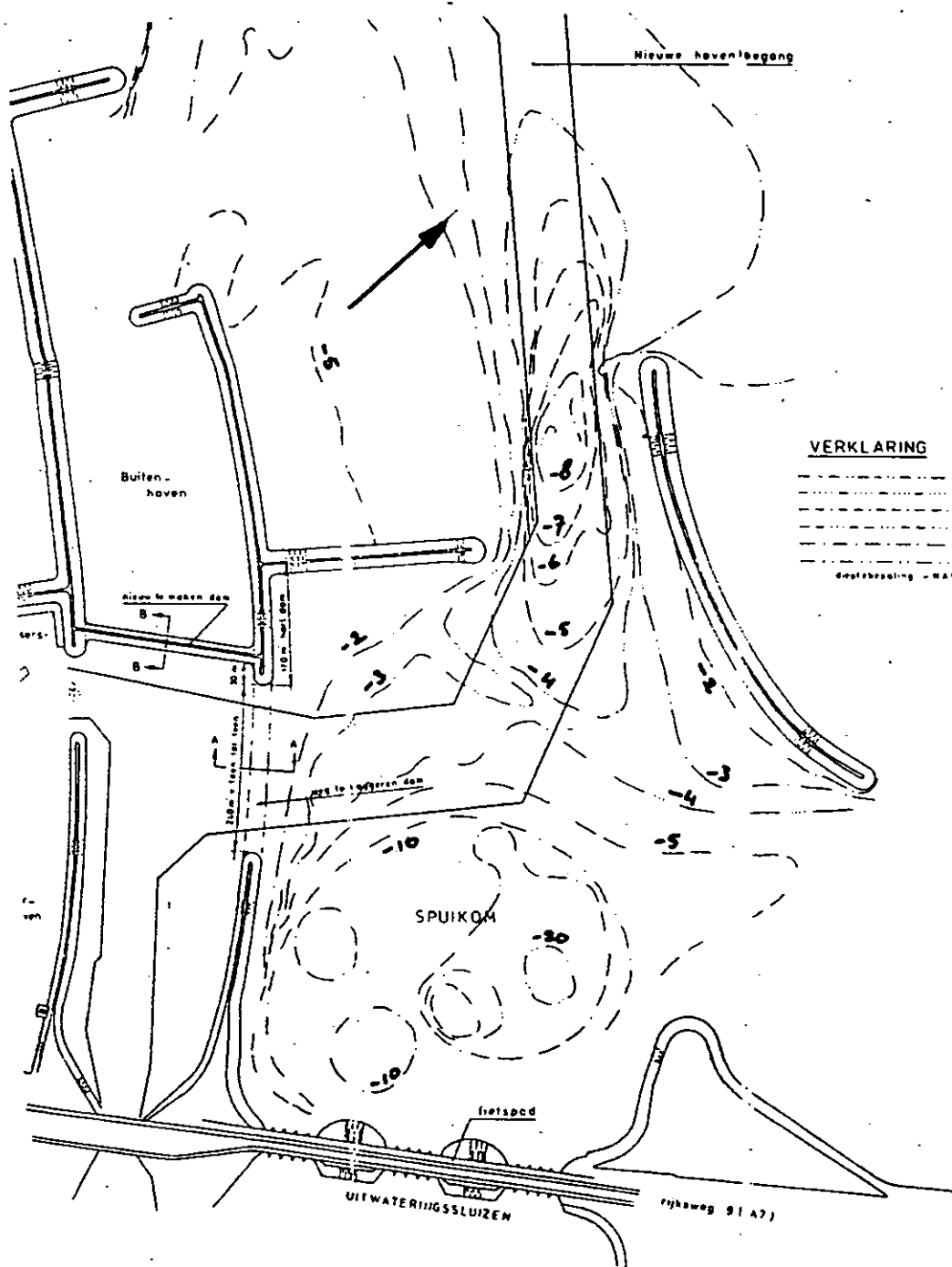
figuur 2.1 Golfhoogtereductie t.g.v. overslag en diffractie

c. Refraktie

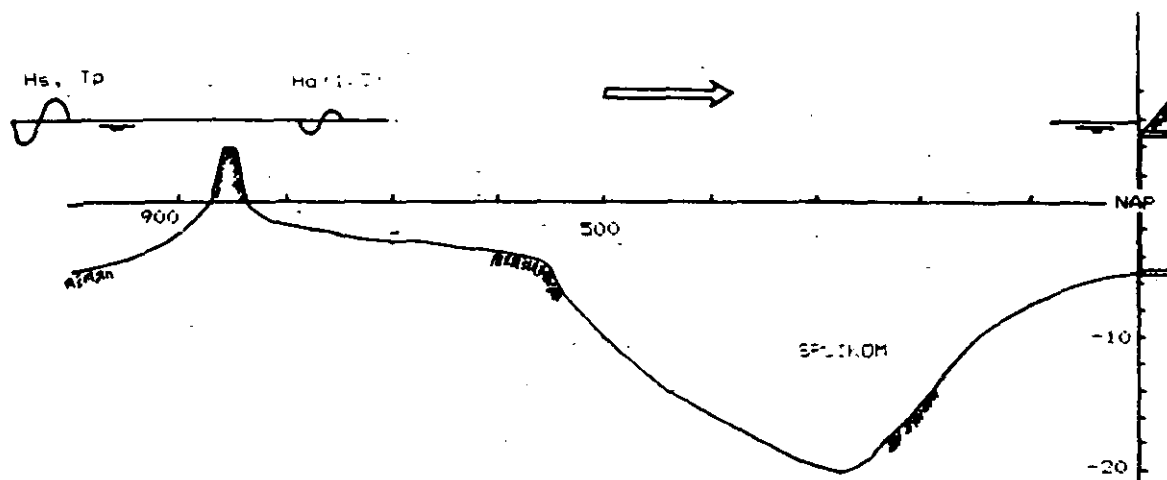
Van refraktie van de golven valt niet veel te zeggen. Aan de hand van het bodemprofiel van figuur 2.2 (Den Oever) kan heel globaal worden gesteld, dat de diepteijnen evenwijdig lopen aan de dijkas, zodat refraktie niet veel invloed heeft op de golfhoogte. Voor de sluizen zal er nog een golfhoogte verandering optreden ten gevolge van een shoaling-achtig proces. De bodem heeft een verloop als weergegeven in figuur 2.3 (Den Oever NNW - ZZO). De sterke verdieping, gevolgd door een verondieping heeft achtereenvolgens een reducerend en een vergrotend effect op de golfhoogte. Energiedissipatie ten gevolge van wrijving zal niet optreden over een dergelijke kleine afstand, zodat na het doorlopen van het traject, de golfhoogte ongeveer op de oorspronkelijke hoogte is teruggekeerd.

Om de onzekerheid in deze modellering weer te geven wordt een storingsvariabele `golf_st` bij de relatie opgeteld. Deze variabele wordt verondersteld een NORMALE VERDELING te hebben.

$$\begin{aligned} E(\text{golf_st}) &= 0 \\ \sigma(\text{golf_st}) &= 0.20 \end{aligned}$$



figuur 2.2 Bodemprofiel sluizen Den Oever



figuur 2.3 Bodemprofiel in golfvoortplantingsrichting.

2.2 SCHUIN INVALLENDE GOLVEN

Wanneer een golf front de sluisas onder een hoek nadert, dan zal dit een reducerend effect hebben op de uitgeoefende golfkracht. Ten behoeve van de Oosterschelde stormvloedkering is hiernaar onderzoek gedaan door Battjes (lit[8]). Twee oorzaken van golfkrachtreductie kunnen worden genoemd:

- hoek van inval golf front
- richtingsspreiding van golfenergie (korte golfkammen)

Van invloed op de reductie zijn voorts:

- golflengte L
- konstruktiebreedte B
- hoek van inval α

De eerstgenoemde oorzaak is als volgt in formulevorm te brengen:

$$r(L, B, \alpha) = (L / (180 \cdot B \cdot \sin \alpha)) \cdot \sin(180 \cdot B \cdot \sin \alpha / L) \quad (2.3)$$

Hierbij zijn de volgende veronderstellingen gedaan:

- Golfkammen zijn recht en lopen evenwijdig aan elkaar.
- Golfkracht recht evenredig met lokale waterhoogte langs de konstruktie.

De tweede oorzaak, de richtingsspreiding van golfenergie, wordt weergegeven door een cosinus-kwadraat verdeling van het energiespektrum:

$$Enn(\theta|w) = A \cos^2(\theta - \alpha) \quad (2.4)$$

met:

θ = hoek, variërend tussen $\alpha - 90^\circ$ en $\alpha + 90^\circ$
 α = hoofdrichting van het golffront
 A = $2/\pi$

De uiteindelijke reductie in golfkracht wordt nu geschreven met:

$$R(\alpha) = \sqrt{\int_{\alpha-90}^{\alpha+90} r^2(L, B, \alpha) \cdot Enn(\theta|w) d\theta} \quad (2.5)$$

In figuur 2.4 worden de reductie volgens (2.3) en volgens (2.5) weergegeven. De reductie is nu alleen nog een functie van α , de hoofdrichting van het golffront. Deze hoofdrichting is een, - als stochastisch te beschouwen, variabele met een UNIFORME VERDELING. De volgende kenmerken zijn hierbij gedefinieerd:

$E(\text{hoek_st})$: 315°
 linker grens : 300°
 rechter grens : 330°

De orientatie van de sluisassen:

Den Oever : 324°
 Kornwerderzand : 345°

Hieruit volgt de verdeling van de golfvoortplantingsrichting ten opzichte van de sluisassen:

Den Oever : -24° -- 6°
 Kornwerderzand : -45° -- -15°

In de berekening is uitgegaan van een golflengte van 50 m en een konstruktiebreedte van 90 m.

De reductie voor de situatie ter plaatse van de sluisen wordt nu duidelijk uit de figuur:

Kornwerderzand:

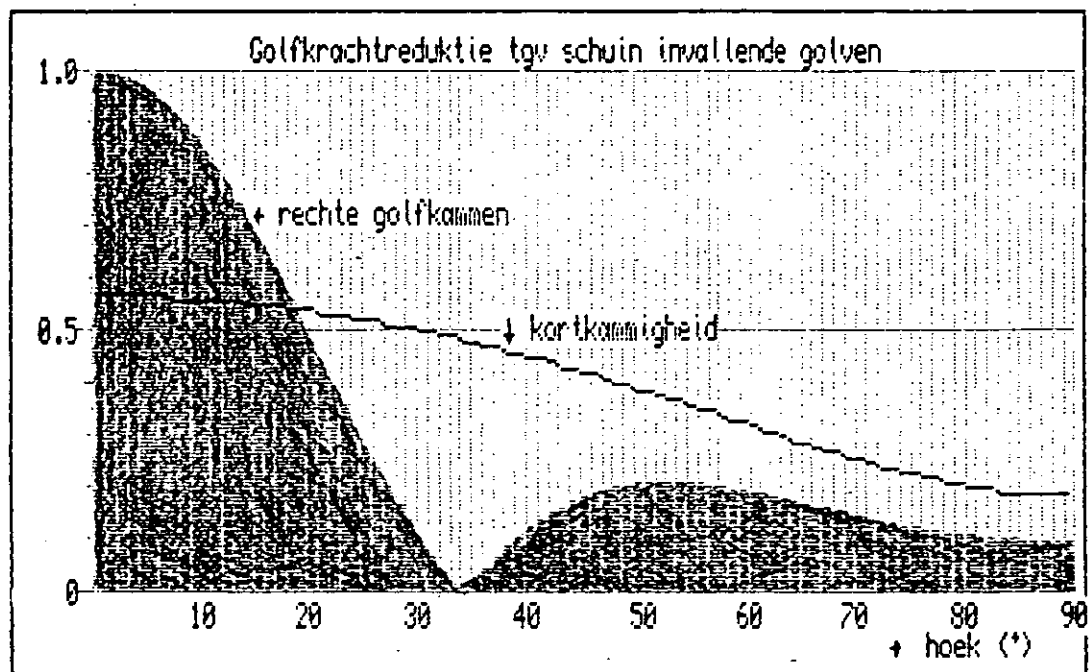
$$\text{reductie} = -4.27 \cdot 10^4 / \text{hoek_st} + 1.8523 \cdot 10^2 \quad (2.6)$$

Den Oever:

4

$$\text{reduktie} = -1.532 \cdot 10^{-4} / \text{hoek}_{st} + 1.043 \cdot 10^2$$

(2.7)

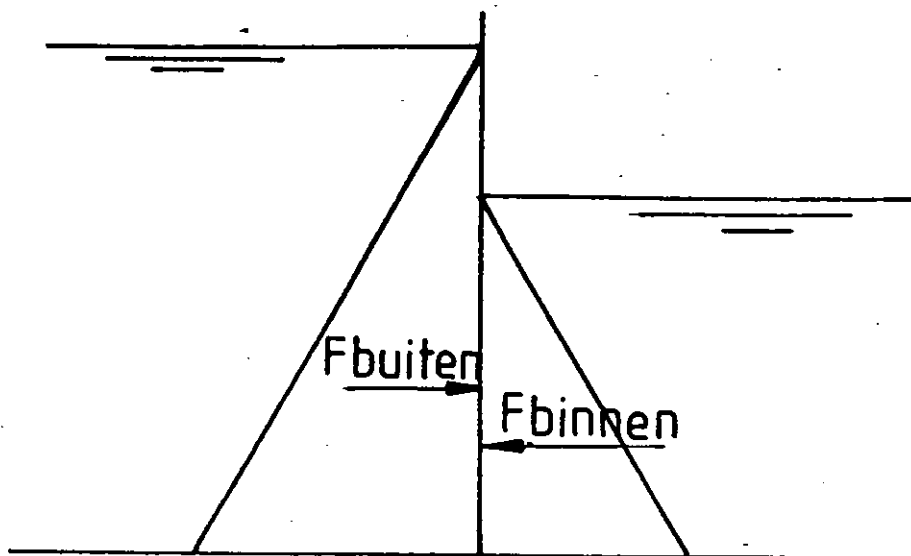


figuur 2.4 Golfkrachtreduktie t.g.v. schuin invallende golven

3 BELASTING OP DE SLUIZEN

3.1 BELASTING T.G.V. VERVAL

De belasting ten gevolge van verval over de afsluitdijk wordt zeer eenvoudig berekend volgens onderstaande figuur.



figuur 3.1 Belasting ten gevolge van verval.

De vervalkracht luidt nu:

$$F_{\text{verval}} = F_{\text{buiten}} - F_{\text{binnen}} \quad (3.1)$$

3.2 GOLFBELASTING

Met behulp van de lineaire golftheorie wordt de drukopbouw onder de golftop berekend. Deze druk wordt vervolgens geïntegreerd over de hoogte van de constructie. Dit levert de golfkracht. De druk wordt geschreven als:

$$\hat{p}(z) = \rho g \cdot H/2 \cdot (\cosh(kz)/\cosh(kd)) \cdot (1 + kr) \quad (3.2)$$

voor $0 < z < d$

$$\hat{p}(z) = \rho g \cdot [(z - d) + H/2 \cdot (1 + kr)] \quad (3.3)$$

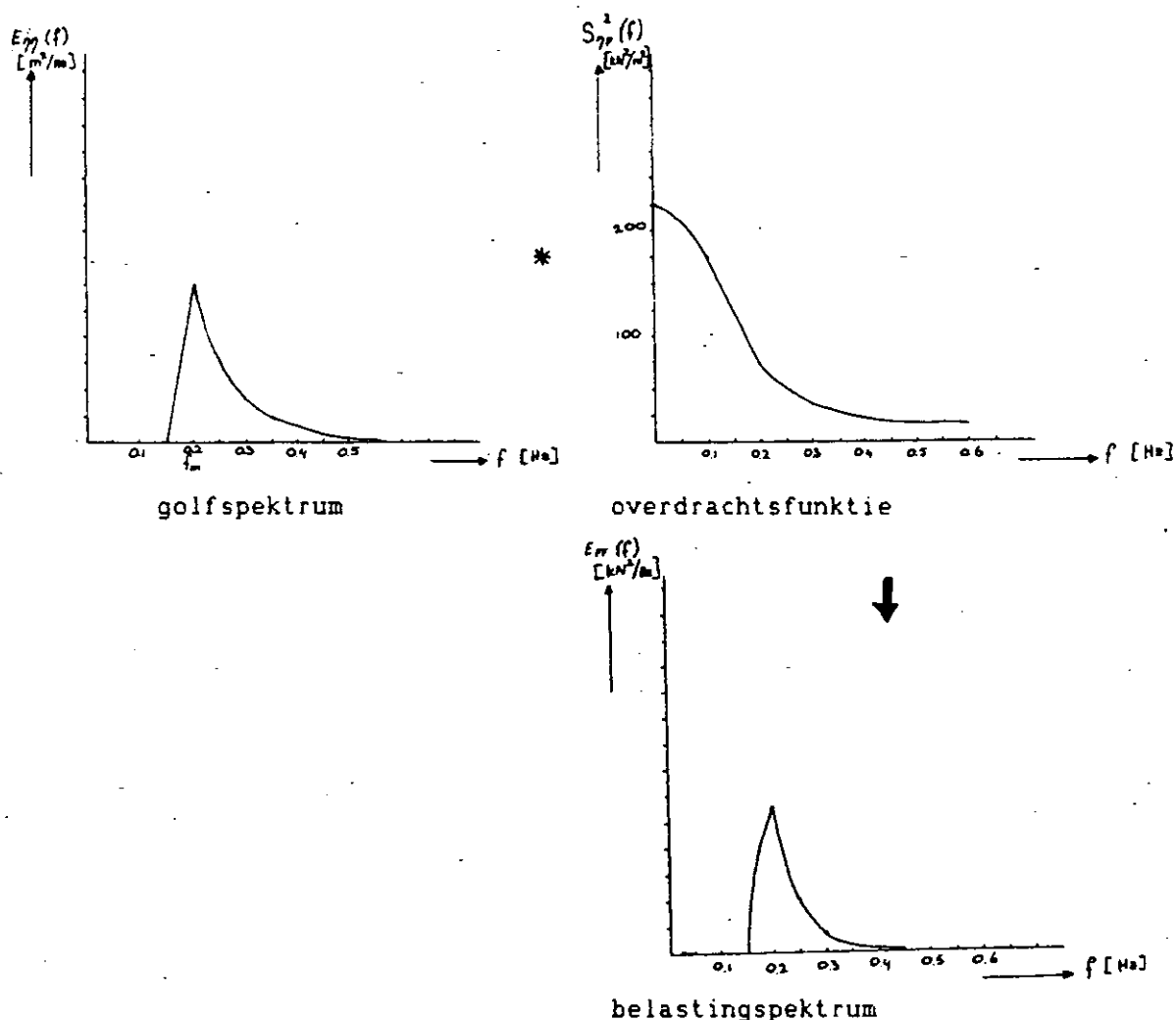
voor $d < z < H/2 \cdot (1 + kr)$

De golfbelasting is nu:

$$F_{\text{golf}} = \int_0^{H/2(1+kr)} \hat{p}(z) dz \quad (3.4)$$

De berekening van de golfbelasting op de sluizen wordt nu uitgevoerd vanuit het energiespektrum, gedefinieerd in bijlage 2. Middels een overdrachtsfunctie wordt het golfkrachtspektrum bepaald. Figuur 3.2 geeft hiervan een beeld. Uit het golfkrachtspektrum wordt vervolgens de significante golfkracht berekend.

Aan de golfkracht wordt dezelfde verdelingsfunctie toegekend als aan de golfhoogte. (de lineaire relatie tussen golfhoogte en golfkracht laat dit toe) en vervolgens wordt de reductie ten gevolge van schuin invallende golven (hoofdstuk 2.2) toegepast op de golfkracht.



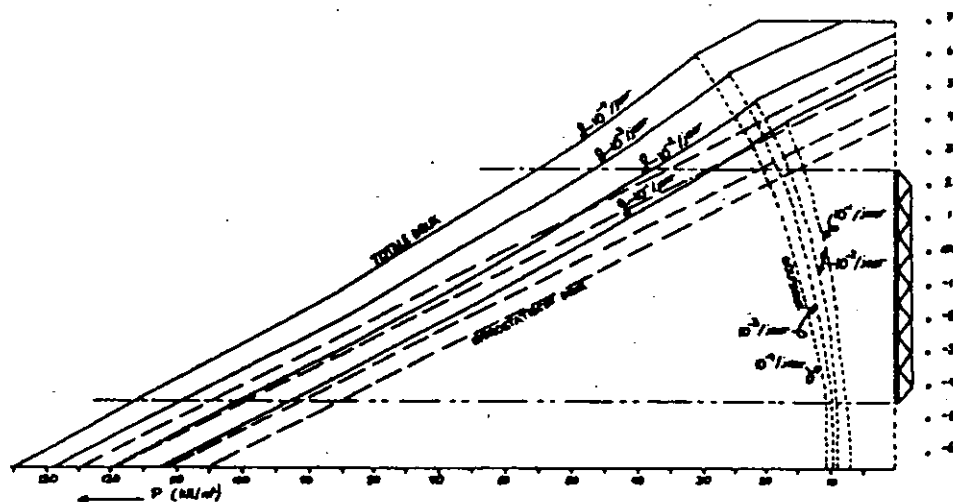
figuur 3.2 Bepaling spectrum golfkracht.

3.3 BELASTING OP DE SCHUIVEN

De drukverdeling op de schuiven ten gevolge van verval en golfbelasting is bepaald door, uitgaande van de totale golfbelasting ten gevolge van verval en golven, terug te rekenen naar de drukverdeling over de hoogte van de schuiven.

Er is echter geen reductie op de golfbelasting toegepast ten gevolge van schuin invallende, kortkammige golven, daar de verhouding schuifbreedte-golflengte te klein is om dit effect waar te nemen.

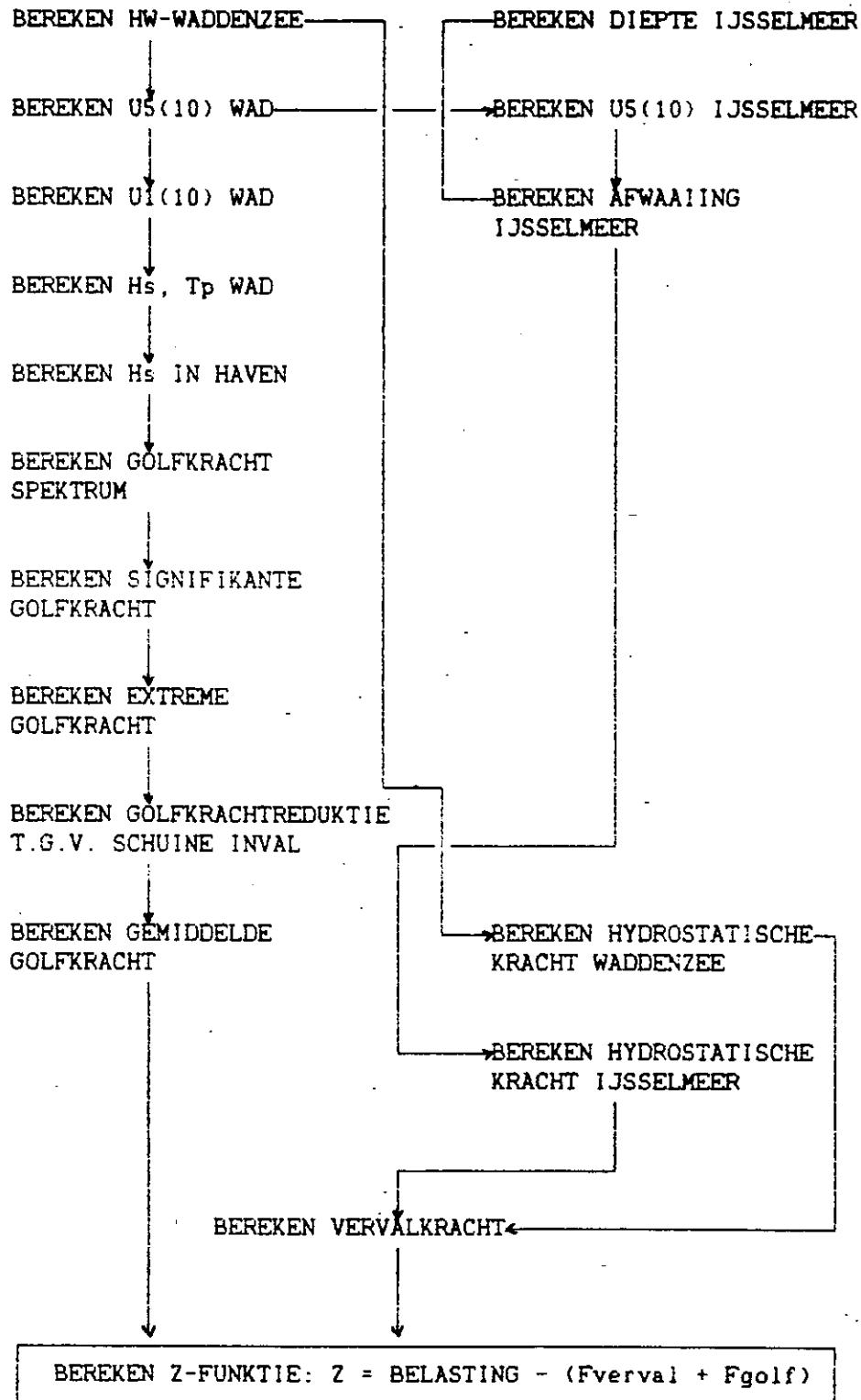
Het resultaat van de berekening is weergegeven in onderstaande figuur. Voor een aantal herhalingstijden is de drukopbouw weergegeven. De afzonderlijke drukken (golfdruk en hydrostatische druk) en de totale druk zijn hierbij vastgesteld.



figuur 3.3 Drukverdeling op de schuiven

4 BELASTING OP DE SLUIZEN - MODEL OPBOUW

De berekening van de belasting op de sluisen geschiedt nu volgens het onderstaande stroomschema:



5 KONKLUSIES

De berekeningsresultaten van de belasting op de sluizen zijn weergegeven in de tabellen en figuren op de pagina's 45 e.v. Wanneer we een vergelijking maken met de eerder uitgevoerde berekening van de belasting voor de stabiliteitsbepaling van de sluizen, dan moeten een aantal opmerkingen worden gemaakt.

In de stabiliteitsberekening wordt een kracht berekend van:

$$13500 \text{ kN} / 16 \text{ m} = 844 \text{ kN} / \text{m}$$

Hierbij is uitgegaan van een

waterstand Waddenzee	:	NAP + 5.30 m
waterstand IJsselmeer	:	NAP - 1.00 m
verhoging peil t.g.v.		
golfbeweging	:	2.25 m

Voor Den Oever en Kornwerderzand worden dezelfde belastingen aangehouden.

In de AFDA berekening worden de volgende variabelen toegevoegd:

NAP daling	:	0.10 m
Buistoot	:	0.25 m

Dit levert een verhoging van de belasting ter grootte van ca. 42.5 kN/m t.o.v. de berekende stabiliteitsbelasting.

De aangenomen IJsselmeerwaterstand van NAP - 1.00 m wordt in de AFDA berekening ruimschoots onderschreden. (vooral Den Oever geeft een grote afwijking te zien). Dit wordt veroorzaakt door de vrij sterke afwaaiing in het model.

Bij de berekening van de belasting wordt ervan uitgegaan dat de onderzijde van de sluizen op NAP - 6.50 m ligt. Het is uit tekeningen en beschrijvingen van de sluizen niet duidelijk geworden op welke diepte de onderkant zich precies bevindt. In de beschrijving wordt over NAP - 6.10 m gesproken, terwijl in de tekening NAP - 6.50 m aangegeven staat.

Deze verschillen in ogenschouw nemend, volgen voor de twee sluizen de volgende belastingen bij een overschrijding van $7 \cdot 10^{-4}$ / jaar:

Den Oever	:	770 kN/m (- 9 %)
Kornwerderzand	:	683 kN/m (- 19 %)

Het verschil tussen de berekende belasting en de eerder aangenomen belasting wordt in hoofdzaak bepaald door:

- Probabilistische aanpak
- Reduktie voor schuin invallende golven
- Gedetailleerde bepaling golfkrachten

Invloed van de verschillende variabelen op de belasting:

Uit de computeruitdraai van de AFDA berekening blijkt dat de windopzet op de Waddenzee een zeer grote invloed heeft op de belasting op de sluizen. Dit wordt veroorzaakt door de wijze van modelleren. De opzet wordt namelijk als invoer voor de bepaling van de windsnelheid genomen, waaruit vervolgens de golfgroei op de Waddenzee en de afwaaiing op het IJsselmeer worden berekend. De overige variabelen hebben diensgevolge een minder grote invloed op de totale belasting.

Aanbevelingen

De volgende zaken kunnen nog van invloed zijn op de grootte van de berekende belasting:

- Controle op de aanwezigheid van buistoten.
- Meting van golfspektrum op diverse plaatsen langs de Afsluitdijk.
- Golfhoogtebepaling: IJking aan meetgegevens.

6 LITERATUUR

1. Rapport Deltacommissie, deel 4, 1956.
2. W.G. de Rijke, Beschrijving van de natuurrandvoorwaarden, van belang voor een probabilistisch ontwerp van een waterkering aan het Friese wad. vakgroep vloeistofmechanica, TH Delft, 1983.
3. Getijdetafels 1987
4. Shore protection manual, U.S. Army coastal engineering research center, department of the army corps of engineers, 1975
5. J.W. Gerner en J.H. de Reus, nota WWKZ 80.H003
6. J.K. Vrijling en A.C.W.M. Vrouwenfelder, B3 diktaat probabilistisch ontwerpen, TH Delft, 1984.
7. I.J.C.A. van Beurden e.a., Probabilistische deurbelastingbepaling sluizencomplex IJmuiden.
8. J.A. Battjes, B78 Diktaat windgolven, TH Delft, 1984.
9. Jaarboeken der waterhoogten, diverse jaargangen.
10. M.P.H. Weenink, A theory and method of calculation of wind effects on sea levels in a partly enclosed sea, Proefschrift, Den Haag, 1958.
11. G. Verploegh en P. Groen, De uitwerking van de wind over de Groningse Waddenzee op de hoogwaterstanden van Delfzijl, K.N.M.I., Wetenschappelijk rapport, De Bildt, 1955.

BIJLAGE 1. GOLFHOOGTEREDUKTIE T.G.V. DEMPING WAD.

Een storm op het zuidelijke gedeelte van de Noordzee veroorzaakt een golfbeeld met een geschatte significante golfhoogte met bijbehorende periode:

$$H_s = 8 \text{ m}$$

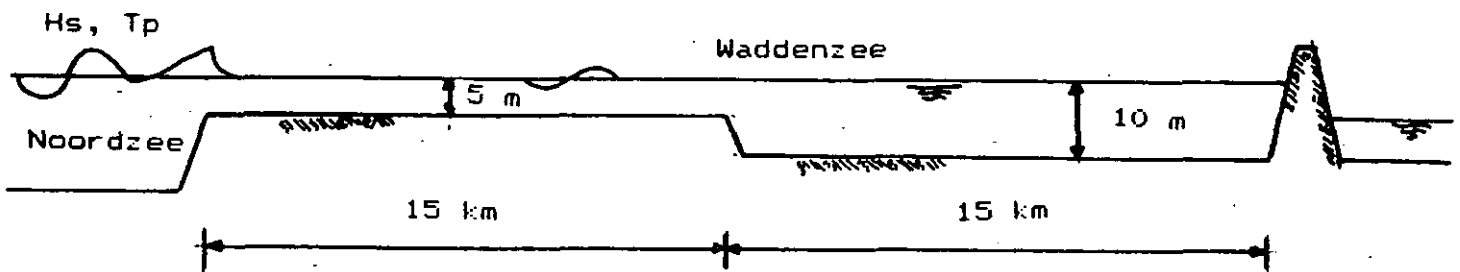
$$T_p = 10 - 12 \text{ s}$$

Bij het bereiken van de Waddeneilanden zullen zich een aantal processen gaan afspelen, welke een energieverlies veroorzaken in het golfveld.

Deze processen zijn achtereenvolgens:

- breking van golven
- energiedissipatie t.g.v. bodemwrijving
- diffractie rond de eilanden

De bovengenoemde "100-jaars golf" wordt nu op zijn/haar weg gevolg richting Afsluitdijk. Om dit te kunnen doen is een traject gekozen in een rechte lijn tussen het Eierlandse gat en de Afsluitdijk, in ZZW richting. Een waterhoogte van ca. 5.90 m + NAP wordt verondersteld. Het geïdealiseerde bodemprofiel ziet eruit als in figuur B.1.



figuur B.1. Schematisch bodemprofiel Waddenzee.

Bij het naderen van de Waddeneilanden zal de golf allereerst breken op de ondiepte. Er zijn twee criteria, welke het breken bepalen:

- golfsteilheid
- waterdiepte

Het eerste brekingskriterium luidt (Miche):

$$a_{\max} = (\beta/k) \cdot \tanh(kd) \quad (\text{regelmatige golven}) \quad (B.1)$$

met:

$$\beta = 0.093 \cdot \pi \quad (\text{v. Marle, aangepast aan onregelmatige golven})$$

bij een diepte van ca. 5 meter volgt dan voor de maximale golfamplitude:

$$a_{\max} = (0.093 \cdot \pi / (2 \cdot \pi / L)) \cdot \tanh(10 \cdot \pi / L) \quad (B.2)$$

met:

$$L = T \cdot \sqrt{g \cdot d} = 10 \cdot \sqrt{50} = 70 \text{ m} \quad (B.3)$$

volgt nu:

$$a_{\max} = 3.255 \cdot \tanh(0.45) = 1.36 \text{ m} \quad (B.4)$$

De brekerhoogte zal dus ongeveer $2 \cdot 1.36 \text{ m} = 2.72 \text{ m}$ bedragen.

Het waterdiepte criterium leidt tot een maximale golfhoogte van:

$$H_{br} = (0.6 \text{ a } 0.8) \cdot d = 3 \text{ a } 4 \text{ m} \quad (B.5)$$

Laten we voor de golfhoogte na breken aanhouden:

$$H_{red} = 3 \text{ m} \quad (B.6)$$

Na breken zal de golf over de ondiepe plaat richting Afsluitdijk gaan.

Tijdens het doorlopen van dit traject wordt de golfhoogte beheerst door een energiebalans:

$$dP/ds + e = 0 \quad (B.7)$$

met:

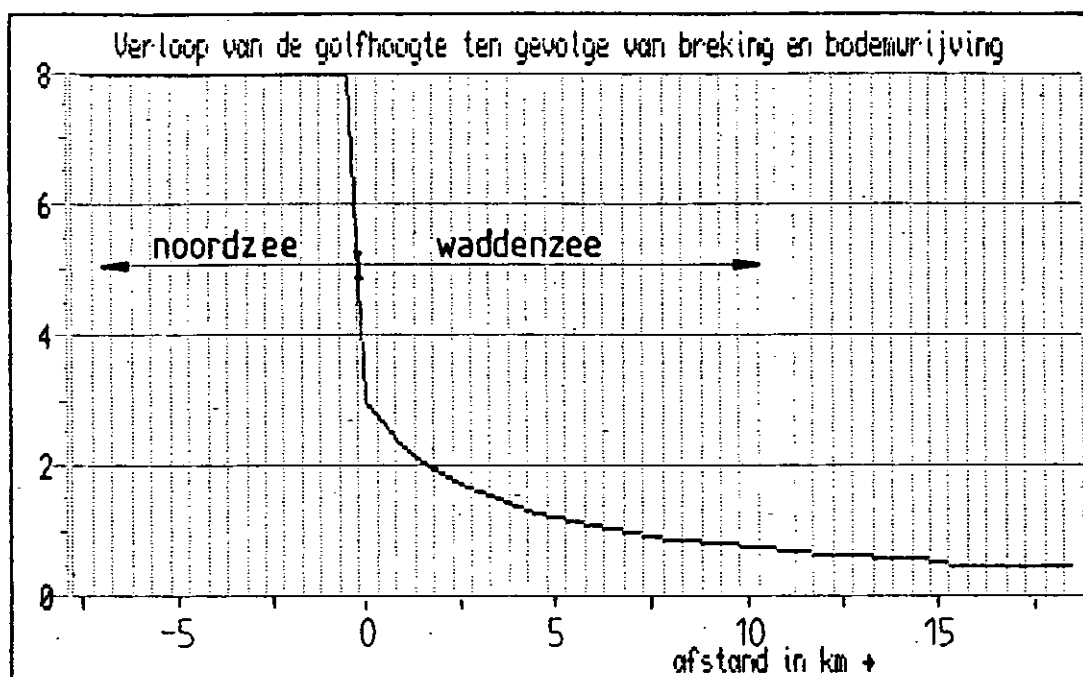
$$P = Enc = 1/2 \rho g a^2 n c \quad (B.8)$$

$$n c = 1/2 (1 + 2 k d / \sinh 2 k d) \sigma / k \quad (B.9)$$

$$\sigma = \sqrt{g k \tanh(k d)} \quad (B.10)$$

$$e = (4 \cdot 10^{-2} / 3 \cdot \pi) \cdot \rho \cdot (\sigma a / \sinh k d)^3 \quad (B.11)$$

De berekening van deze energiebalans wordt in een aantal stappen van 100 m uitgevoerd en leidt tot een golfhoogteverloop zoals in figuur B.2 is weergegeven.



figuur B.2. Verloop golfhoogte t.g.v. breking en bodemwrijving.

Na 15 km wad is de golfhoogte afgenomen tot ca. 0.56 m. De verdieping van de Waddenzee vlak voor de Afsluitdijk leidt tot een verdere verlaging van de golfhoogte. De energie balans luidt nu:

$$P_{diep} = P_{ondiep} \quad (B.12)$$

$$Enc_{diep} = Enc_{ondiep} \quad (B.13)$$

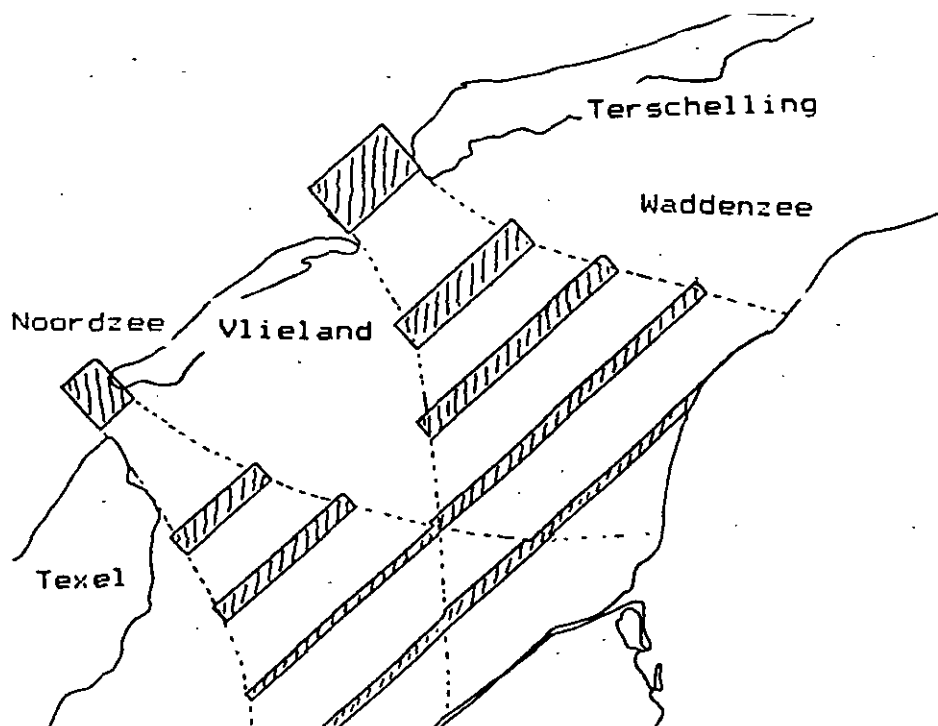
Hieruit volgt een golfhoogte op dieper water:

$$H_{\text{diep}} = H_{\text{ondiep}} \cdot \sqrt{\left(\frac{n_{\text{c}}}{n_{\text{d}}} \right)} \quad (\text{B.14})$$

De golfhoogte wordt dan 0.5 m.

De golfhoogte wordt nog verder beïnvloed door diffractie en refractie. Achter de Waddeneilanden zullen de golven gediffrakteerd worden. De berekening van de diffractie is echter niet zinvol omdat er na ca. 30 km weinig tot niets meer over is van een diffractie patroon, met het oog op de afstand/golflengte verhouding. Een andere benadering van deze invloed kan wel enig inzicht verschaffen in het golfhoogte verloop. Hierbij wordt bekeken hoeveel golfenergie de Waddenzee kan binnendringen en kan verspreiden over de breedte van de golffronten.

Wanneer we uitgaan van behoud van golfenergie, dan kan worden aangenomen dat de inkomende golfenergie over de loop van het traject zich gaat herverdelen over de breedte van het golffront. Na een afstand van ca. 30 km zal de golfenergie min of meer gelijkmatig verdeeld zijn over de breedte. Figuur B.3 geeft een schetsmatig beeld van dit verloop.



figuur B.3. Herverdeling van golfenergie.

De golfhoogte kan nu worden afgeschat uit:

$$\frac{H_2}{H_1} = \sqrt{\frac{X_1}{X_2}} \quad (B.15)$$

Globaal geldt voor Kornwerderzand: $\frac{X_1}{X_2} = 1/3$.

zodat de golfhoogte verhouding wordt:

$$\frac{H_2}{H_1} = \sqrt{1/3} = 0.60 \quad (B.16)$$

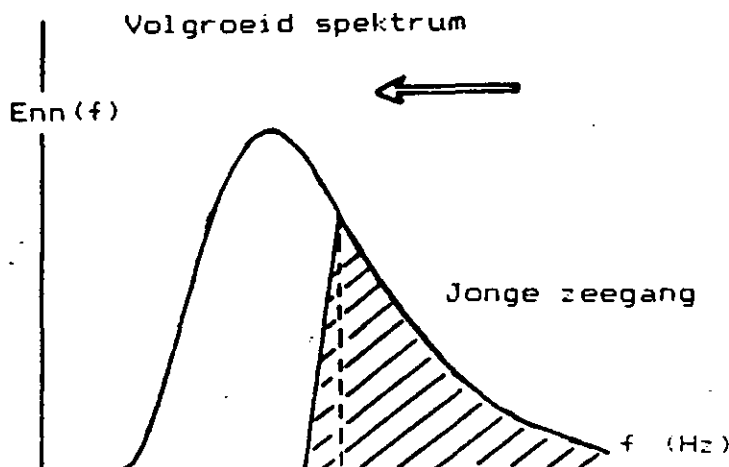
Voor de Afsluitdijk zal de overgebleven golfhoogte daarom ongeveer $0.60 \cdot 0.50 = 0.30$ m bedragen.

Voor de analyse van dit probleem zijn de drie invloeden globaal en onafhankelijk van elkaar gekwantificeerd. Er wordt geen aandacht besteedt aan de vraag of deze benadering niet kan worden verbeterd, daar het doel, een indruk krijgen van de grootte-orde van de golf, wel bereikt is.

BIJLAGE 2. SPEKTRALE BENADERING VAN DE GOLFENERGIE.

Voor een eventuele spektrale analyse volgen hieronder enkele opmerkingen over de opbouw van het golfspektrum bij jonge zeegang.

Het energie spektrum wordt bij jonge zeegang opgevuld vanuit het hoogfrequent gedeelte. Zie figuur B.4.



figuur B.4. Spektrum jonge zeegang.

De vorm van de hoogfrequent flank, welke door de wind wordt veroorzaakt, wordt beschreven door:

$$\propto f^{-5} \quad (B.17)$$

Het laagfrequent gedeelte kan lineair worden aangenomen, volgend uit het opvullen van het spektrum vanuit de hoogfrequent zijde. In formulevorm kan het spektrum worden geschreven als:

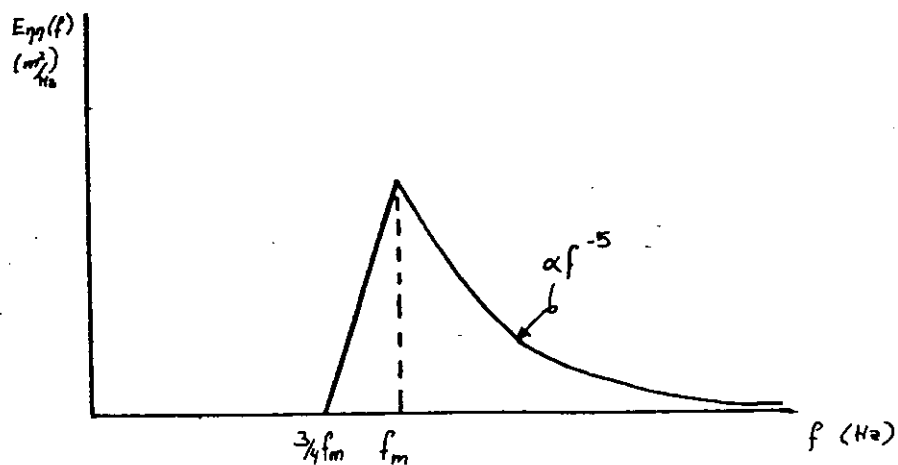
$$\begin{aligned} 0 &< f < 0.75 \cdot f_m & : E_{yy}(f) &= 0 \\ 0.75 \cdot f_m &< f < f_m & : E_{yy}(f) &= 4A f_m (f - 0.75 \cdot f_m)^{-6} \\ f_m &< f < \infty & : E_{yy}(f) &= A f^{-5} \end{aligned} \quad (B.18)$$

Figuur B.5 geeft de spectrumvorm weer. Hier bovenop zou nog een gedempt spektrum vanuit de Noordzee kunnen worden gesuperponeerd.

De waarde van A volgt uit de oplossing van de onderstaande integraal:

$$\int_0^{\infty} E_{nn}(f) df = H_s^2 / 16 \quad (B.19)$$

Waarbij H_s bekend wordt verondersteld, volgens uit de Bretschneider-Sanders formule.



figuur B.5. Energiespektrum bij jonge zeegang.

BIJLAGE 3. GOLFHOOGTE VERDELING.

De verdeling van individuele golfhoogten verloopt op ondiep water niet geheel volgens de Rayleigh distributie. Een fysische bovengrens van de golfhoogte, veroorzaakt door een brekingskriterium, leidt tot een ietwat andere vorm van de verdeling, een aangepaste Rayleigh verdeling. Door Glukhovskiy (1965) is een voorstel gedaan hieromtrent.

Battjes (1986) heeft dit voorstel geanalyseerd en getoets aan door WL uitgevoerde proefnemingen. De diepte-afhankelijke Rayleigh verdeling luidt nu:

$$\Pr(H_{st} > H \mid \bar{H}, d) = \text{EXP}(-\pi/4 \cdot A(\bar{H}/H)^k) \quad (\text{B.20})$$

met:

$$A = (1 + \tilde{d}(2 \cdot \pi)^{-0.5 - 1})$$

$$k = k(\tilde{d}) = 2(1 - \tilde{d})^{-1}$$

$$\tilde{d} = \bar{H}/d = 0.63 \cdot H_s/d$$

Voor grote diepten reduceert dit tot de Rayleigh verdeling. Of het in de berekening van het Afsluitdijkprobleem relevant is om deze aangepaste versie te gebruiken hangt af van de golfhoogte/waterdiepte verhouding. Battjes vindt dat de metingen van WL inderdaad volgens Glukhovskiy verlopen en dat deze aanpassing zin heeft voor $H_s/d > 0.2$, ofwel $d < 5 \cdot H_s$.

Tijdens een superstorm met een HW-stand van ca. 5.80 + NAP en een bodemhoogte van 5 m - NAP ontstaat een significante golfhoogte van ca. 2.5 m. Deze grenssituatie maakt een aanpassingen volgens Glukhovskiy niet geheel nuttig. Daarom wordt in de eerste instantie gekozen voor de verdeling volgens Rayleigh.

De verdeling van de golfhoogten gedurende de storm wordt bepaald door het aantal golven dat optreedt tijdens de storm. De storm zal een duur hebben van ca. 3 uur. Gedurende dit tijdsinterval zullen ca. $3 \cdot 3600/5 = 2150$ golven optreden.

De verdelingsfunctie zal dan volgens de logaritme van dit aantal worden verschoven:

$$\ln(2150) = 7.68$$

zodat de uiteindelijke verdelingsfunctie luidt:

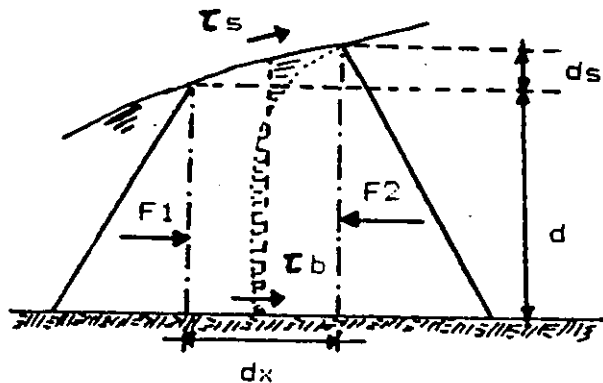
$$F(H_{st}) = \text{EXP}[-\text{EXP}(-2(H/H_s)^2 + 7.68)] \quad (\text{B.21})$$

BIJLAGE 4. WINDOPZET IJSSSELMEER.

De afwaaiing op het IJsselmeer achter de Afsluitdijk wordt beheerst door een differentiaalvergelijking voor de berekening van de windopzet:

$$ds/dx = 1/(g(d+s)) \cdot (\tau_s + \tau_b) \quad (B.22)$$

Doordat een circulerende stroming ontstaat ten gevolge van het opduwen van het oppervlak door de wind, zal zich een zeer geringe bodemschuifspanning manifesteren. Zie figuur B.6.



figuur B.6. Definitieschets

Er wordt echter verondersteld dat deze bodemschuifspanning kan worden verwaarloosd ten opzichte van de windschuifspanning. De differentiaalvergelijking reduceert dan tot:

$$ds/dx = 1/(g(d+s)) \cdot \tau_s \quad (B.23)$$

Voor τ_s geldt:

$$\tau_s = \delta \cdot U^2 \quad (B.24)$$

waarbij δ een nader te bepalen konstante is.

De vorm van het IJsselmeer wordt in het model vrij globaal benaderd door voor het meer een trapeziumvorm te kiezen. De breedte van het meer neemt af, gaand van NW naar ZO. Ruwweg is de breedte van het meer als volgt in formulevorm te brengen:

$$B = B_0 - 0.5 \cdot x \cdot B_0 / L \quad (B.25)$$

met:

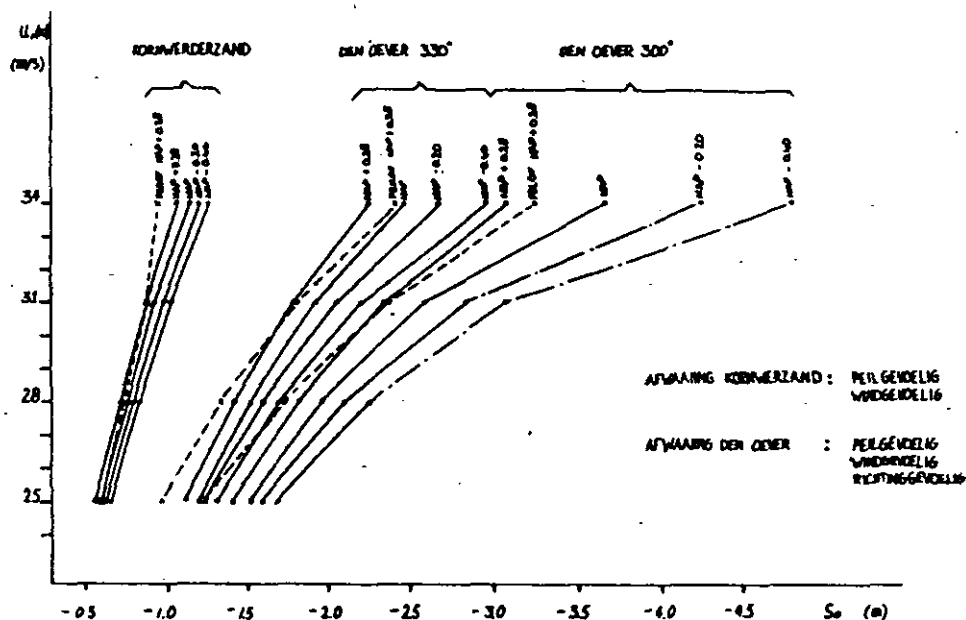
L = lengte IJsselmeer
 x = coördinaat langs lengte richting
 B0 = breedte ter plaatse van Afsluitdijk

In het model wordt de opzet berekend en wordt achteraf gecontroleerd of de hoeveelheid afgewaaid water gelijk is aan de hoeveelheid opgezet water.

De afwaaiing is volgens de modellering afhankelijk van waterdiepte en windsnelheid. Uit PEILOF berekeningen met het WAQUA model blijkt ook een sterke windrichtingsgevoeligheid in de afwaaiing voor te komen. Bovendien verschillen de waarden van de afwaaiing ter plaatse van de sluizen aanzienlijk, hetgeen ook aannemelijk is, gezien de geometrie van het IJsselmeer. Er zijn PEILOF berekeningen beschikbaar voor het geval W (volgens methode M en W), bij een meerpeil van NAP + 0.28 m. Het zelf ontwikkelde model is hieraan geijkt, uitgaand van twee windrichtingen, 300° en 330°. Vervolgens is de diepte-afhankelijkheid van de afwaaiing bestudeerd met het zelf ontwikkelde model. Op deze wijze is een beeld gekregen van de afwaaiing, welke een functie is van:

- lokatie
- windsnelheid
- windrichting
- waterdiepte

Figuur B.7 brengt deze functie in beeld.



figuur B.7. Afwaaiing IJsselmeer

Het in figuur B.7 weergegeven beeld is in formulevorm geschreven op de volgende wijze:

$$S_0 = -a \cdot U^n \quad (B.26)$$

met:

S_0 = afwaaiing t.p.v. Afsluitdijk
 a, n = diepte- en windrichting-afhankelijke faktor
 U = windsnelheid

De factoren a en n zijn voor Den Oever en Kornwerderzand afzonderlijk bepaald.

De onzekerheid, die in deze modellering schuilt, wordt gevat in een ingevoerde storingsvariabele, $opzet_st$, welke een NORMALE VERDELING heeft met:

$$\begin{aligned} E(opzet_st) &= 1 \\ \sigma(opzet_st) &= 0.1 \end{aligned}$$

BELASTING DEN OEVER

Datum: 18/ 2/1987

ONTWERPBELASTING = 631854 N/M
 Beta = 2.330
 Overschrijdingskans = 9.9E-003

NAAM	TYPE	A	B	C	MU	SI	X	Alfa	n
astro_st	N	0.000	0.000	0.000	0.635	0.174	0.697	0.023	-86871.73
smax_st	G	2.370	0.308	0.000	2.012	0.760	3.601	0.805	-602511.15
error_st	N	0.000	0.000	0.000	0.000	2.500	1.253	0.046	-15289.16
faktor_st	U	0.600	1.130	0.000	0.898	0.149	1.017	0.117	-329352.30
buiamp_st	N	0.000	0.000	0.000	0.250	0.050	0.255	0.002	-28875.50
laagw_st	N	0.000	0.000	0.000	-0.350	0.050	-0.351	0.000	-9106.24
rayl_st	R	3.840	0.500	0.000	2.006	0.148	2.021	0.002	-89297.32
opzet_st	N	0.000	0.000	0.000	1.000	0.100	1.013	0.003	-82724.15
hoek_st	U	300.000	330.000	0.000	314.994	11.919	313.881	0.002	149736.42
zeesp_st	N	0.000	0.000	0.000	0.100	0.025	0.101	0.000	-11470.16
golf_st	N	0.000	0.000	0.000	0.000	0.200	0.000	0.000	0.00
phi_st	U	-6.000	6.000	0.000	-0.000	4.787	-0.000	0.000	-3.00

Aantal iteraties = 7

Rekenduur = 50.09 s.

ONTWERPBELASTING = 6.3E+005 N/M
 GETIJ WADDENZEE = 0.70 M T.O.V. NAP
 OPZET WADDENZEE = 3.59 M
 BUISTOOT WADDENZEE = 0.25 M
 BEREKENDE NAP-DALING = 0.10 M
 LAAGWATERSTAND MEER = -0.35 M T.O.V. NAP
 WINDSNELHEID MEER = 27.76 M/S
 AFWAAIING IJSSELMEER = -2.06 M
 LOKALE WATERSTAND MEER = -2.41 M T.O.V. NAP
 SIGNIFIKANTE GOLFHOOGTE = 1.72 M
 GOLFHOOGTE IN HAVEN = 1.72 M
 GOLFKRACHT = 8.9E+004 N/M
 VERVAL AFSLUITDIJK = 7.06 M
 VERVALKRACHT = 5.4E+005 N/M

BELASTING DEN OEVER

Datum: 18/ 2/1987

ONTWERPBELASTING = 754043 N/M

Beta = 3.091

Overschrijdingskans = 1.0E-003

NAAM	TYPE	A	B	C	MU	SI	X	Alfa	n
astro_st	N	0.000	0.000	0.000	0.635	0.174	0.704	0.017	-91086.83
saax_st	B	2.370	0.308	0.000	1.479	0.975	4.300	0.876	-718761.30
error_st	N	0.000	0.000	0.000	0.000	2.500	1.301	0.028	-15270.46
faktor_st	U	0.600	1.130	0.000	0.907	0.139	1.022	0.072	-342826.08
buiamp_st	N	0.000	0.000	0.000	0.250	0.050	0.255	0.001	-30798.31
laagw_st	N	0.000	0.000	0.000	-0.350	0.050	-0.351	0.000	-7781.90
rayl_st	R	3.840	0.500	0.000	2.005	0.149	2.026	0.002	-107687.98
opzet_st	N	0.000	0.000	0.000	1.000	0.100	1.016	0.003	-91401.25
hoek_st	U	300.000	330.000	0.000	314.991	11.893	313.610	0.001	172645.64
zeesp_st	N	0.000	0.000	0.000	0.100	0.025	0.101	0.000	-12222.53
golf_st	N	0.000	0.000	0.000	0.000	0.200	0.000	0.000	0.00
phi_st	U	-6.000	6.000	0.000	-0.000	4.787	-0.000	0.000	-0.00

Aantal iteraties = 7

Rekenduur = 49.33 s.

ONTWERPBELASTING = 7.5E+005 N/M
 GETIJ WADDENZEE = 0.70 M T.O.V. NAP
 OPZET WADDENZEE = 4.28 M
 BUISTOOT WADDENZEE = 0.26 M
 BEREKENDE NAP-DALING = 0.10 M
 LAAGWATERSTAND MEER = -0.35 M T.O.V. NAP
 WINDSNELHEID MEER = 30.60 M/S
 AFWAALING IJSSELMEER = -2.70 M
 LOKALE WATERSTAND MEER = -3.05 M T.O.V. NAP
 SIGNIFIKANTE GOLPHOOGTE = 1.91 M
 GOLPHOOGTE IN HAVEN = 1.91 M
 GOLFKRACHT = 1.1E+005 N/M
 VERVAL AFSLUITDIJK = 8.39 M
 VERVALKRACHT = 6.5E+005 N/M

BELASTING DEN OEVER

Datum: 18/ 2/1987

ONTWERPBELASTING = 878566 N/M
 Beta = 3.718
 Overschrijdingskans = 1.0E-004

NAAM	TYPE	A	B	C	MU	SI	X	Alfa2	n
astro_st	N	0.000	0.000	0.000	0.635	0.174	0.708	0.013	-100692.13
smax_st	B	2.370	0.308	0.000	0.895	1.159	4.999	0.908	-898939.47
error_st	N	0.000	0.000	0.000	0.000	2.500	1.366	0.022	-17568.04
faktor_st	U	0.600	1.130	0.000	0.918	0.128	1.027	0.052	-401833.14
buiamp_st	N	0.000	0.000	0.000	0.250	0.050	0.255	0.001	-32527.34
laagw_st	N	0.000	0.000	0.000	-0.350	0.050	-0.351	0.000	-6515.22
rayl_st	R	3.840	0.500	0.000	2.005	0.150	2.029	0.002	-127107.51
opzet_st	N	0.000	0.000	0.000	1.000	0.100	1.015	0.002	-91686.20
hoek_st	U	300.000	330.000	0.000	314.992	11.897	313.681	0.001	170902.70
zeesp_st	N	0.000	0.000	0.000	0.100	0.025	0.101	0.000	-12905.97
golf_st	N	0.000	0.000	0.000	0.000	0.200	0.000	0.000	0.00
phi_st	U	-6.000	6.000	0.000	-0.000	4.767	-0.001	0.000	-0.00

Aantal iteraties = 11

Rekenduur = 77.50 s.

ONTWERPBELASTING = 8.8E+005 N/M
 GETIJ WADDENZEE = 0.71 M T.O.V. NAP
 OPZET WADDENZEE = 4.96 M
 BUISTOOT WADDENZEE = 0.26 M
 BEREKENDE NAP-DALING = 0.10 M
 LAAGWATERSTAND MEER = -0.35 M T.O.V. NAP
 WINDSNELHEID MEER = 33.31 M/S
 AFWAAIING IJSSELMEER = -3.40 M
 LOKALE WATERSTAND MEER = -3.75 M T.O.V. NAP
 SIGNIFIKANTE GOLFHOOOGTE = 2.11 M
 GOLFHOOOGTE IN HAVEN = 2.11 M
 GOLFKRACHT = 1.3E+005 N/M
 VERVAL AFSLUITDIJK = 9.78 M
 VERVALKRACHT = 7.5E+005 N/M

BELASTING HORNWERDERZAND

Datum: 19/ 2/1987

ONTWERPBELASTING = 557843 N/M -
 Beta = 2.324
 Overschrijdingskans = 1.0E-002

NAAM	TYPE	A	B	C	MU	SI	X	Alfa2	n
astro_st	N	0.000	0.000	0.000	0.805	0.195	0.900	0.044	-114761.25
swax_st	B	2.260	0.308	0.000	1.835	0.791	3.573	0.893	-507463.22
error_st	N	0.000	0.000	0.000	0.000	2.500	0.595	0.010	-2897.30
faktor_st	U	0.600	1.130	0.000	0.872	0.188	0.965	0.045	-129160.56
buiamp_st	N	0.000	0.000	0.000	0.250	0.050	0.256	0.002	-29248.60
laagw_st	N	0.000	0.000	0.000	-0.350	0.050	-0.353	0.001	-21442.57
rayl_st	R	3.840	0.500	0.000	2.006	0.147	2.018	0.001	-59140.86
opzet_st	N	0.000	0.000	0.000	1.000	0.100	1.007	0.001	-36219.81
hoek_st	U	300.000	330.000	0.000	315.009	11.888	316.383	0.002	-157413.75
zeesp_st	N	0.000	0.000	0.000	0.100	0.025	0.101	0.001	-11605.48
golf_st	N	0.000	0.000	0.000	0.000	0.200	0.000	0.000	0.00
phi_st	U	-6.000	6.000	0.000	-0.000	4.727	-0.001	0.000	-0.00

Aantal iteraties = 3

- Rekenduur = 21:59 s.

ONTWERPBELASTING = 5.6E+005 N/M
 GETIJ WADDENZEE = 0.90 M T.O.V. NAP
 OPZET WADDENZEE = 3.58 M
 BUISTOOT WADDENZEE = 0.26 M
 BEREKENDE NAP-DALING = 0.10 M
 LAAGWATERSTAND MEER = -0.35 M T.O.V. NAP
 WINDSNELHEID MEER = 25.46 M/S
 AFWAAIING IJSSELMEER = -0.67 M
 LOKALE WATERSTAND MEER = -1.03 M T.O.V. NAP
 SIGNIFIKANTE GOLFHOOSTE = 1.44 M
 GOLFHOOSTE IN HAVEN = 1.44 M
 GOLFKRACHT = 5.9E+004 N/M
 VERVAL AFSLUITDIJK = 5.86 M
 VERVALKRACHT = 5.0E+005 N/M

BELASTING KORNWERDERZAND

Datum: 18/ 2/1987

ONTWERPBELASTING = 663281 N/M
 Beta = 3.088
 Overschrijdingskans = 1.0E-003

NAAM	TYPE	A	B	C	MU	SI	X	Alfa	n
astro_st	N	0.000	0.000	0.000	0.805	0.195	0.907	0.028	-123760.82
smax_st	6	2.260	0.306	0.000	1.290	1.002	4.265	0.924	-644963.13
error_st	N	0.000	0.000	0.000	0.000	2.500	0.674	0.008	-3714.38
faktor_st	U	0.600	1.130	0.000	0.878	0.178	0.979	0.034	-158819.27
buiamp_st	N	0.000	0.000	0.000	0.250	0.050	0.256	0.001	-31121.41
laagw_st	N	0.000	0.000	0.000	-0.350	0.050	-0.353	0.000	-21266.42
rayl_st	R	3.840	0.500	0.000	2.006	0.148	2.021	0.001	-73607.20
opzet_st	N	0.000	0.000	0.000	1.000	0.100	1.009	0.001	-44248.07
hoek_st	U	300.000	330.000	0.000	315.015	11.848	316.710	0.002	-195222.29
zeesp_st	N	0.000	0.000	0.000	0.100	0.025	0.101	0.000	-12339.99
golf_st	N	0.000	0.000	0.000	0.000	0.200	0.000	0.000	0.00
phi_st	U	-6.000	6.000	0.000	-0.000	4.767	-0.000	0.000	0.00

Aantal iteraties = 4

Rekenduur = 26.28 s.

ONTWERPBELASTING = 6.6E+005 N/M
 GETIJ WADDENZEE = 0.91 M T.O.V. NAP
 OPZET WADDENZEE = 4.26 M
 BUISTOOT WADDENZEE = 0.26 M
 BEREKENDE NAP-DALING = 0.10 M
 LAAGWATERSTAND MEER = -0.35 M T.O.V. NAP
 WINDSNELHEID MEER = 28.39 M/S
 AFWAAIING IJSSELMEER = -0.85 M
 LOKALE WATERSTAND MEER = -1.20 M T.O.V. NAP
 SIGNIFIKANTE GOLFHOOGTE = 1.63 M
 GOLFHOOGTE IN HAVEN = 1.63 M
 GOLFKRACHT = 7.4E+004 N/M
 VERVAL AFSLUITDIJK = 6.73 M
 VERVALKRACHT = 5.9E+005 N/M

BELASTING KORNWERDERZAND

Datum: 18/ 2/1987

ONTWERPBELASTING = 774516 N/M
 Beta = 3.717
 Overschrijdingskans = 1.0E-004

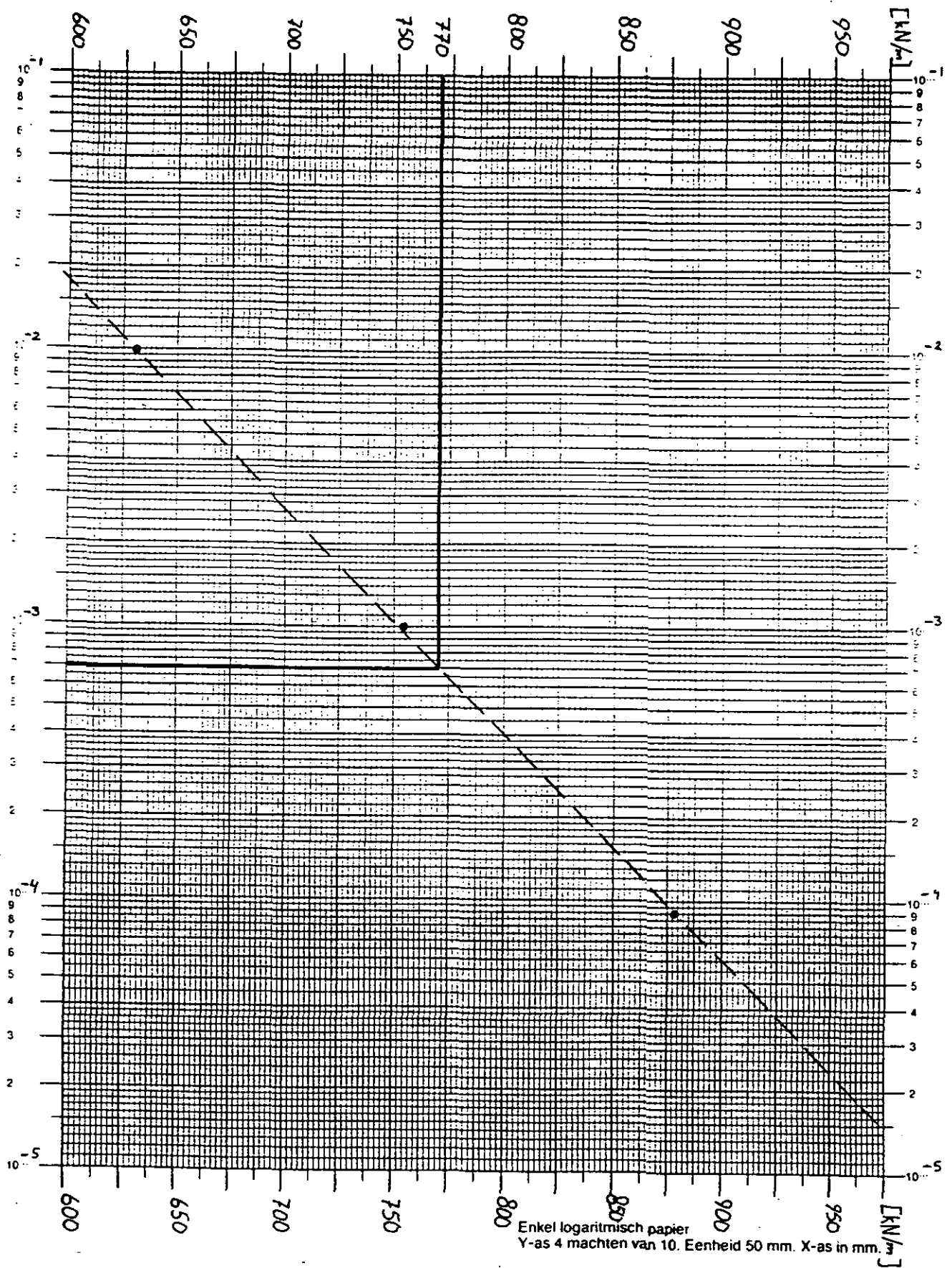
NAAM	TYPE	A	B	C	MU	SI	X	Alfa3	n
astro_st	N	0.000	0.000	0.000	0.805	0.195	0.910	0.021	-130152.08
smax_st	S	2.250	0.308	0.000	0.697	1.183	4.957	0.938	-783225.10
error_st	N	0.000	0.000	0.000	0.000	2.500	0.755	0.007	-4732.73
faktor_st	U	0.600	1.130	0.000	0.884	0.168	0.991	0.029	-194118.56
buiamp_st	N	0.000	0.000	0.000	0.250	0.050	0.256	0.001	-31977.42
laagw_st	N	0.000	0.000	0.000	-0.350	0.050	-0.353	0.000	-21059.96
rayl_st	R	3.840	0.500	0.000	2.006	0.149	2.024	0.001	-89587.06
opzet_st	N	0.000	0.000	0.000	1.000	0.100	1.010	0.001	-52079.27
hoek_st	U	300.000	330.000	0.000	315.023	11.800	317.026	0.002	-236784.65
zeesp_st	N	0.000	0.000	0.000	0.100	0.025	0.102	0.000	-12678.32
golf_st	N	0.000	0.000	0.000	0.000	0.200	0.000	0.000	0.00
phi_st	U	-6.000	6.000	0.000	-0.000	4.787	-0.000	0.000	0.00

Aantal iteraties = 4

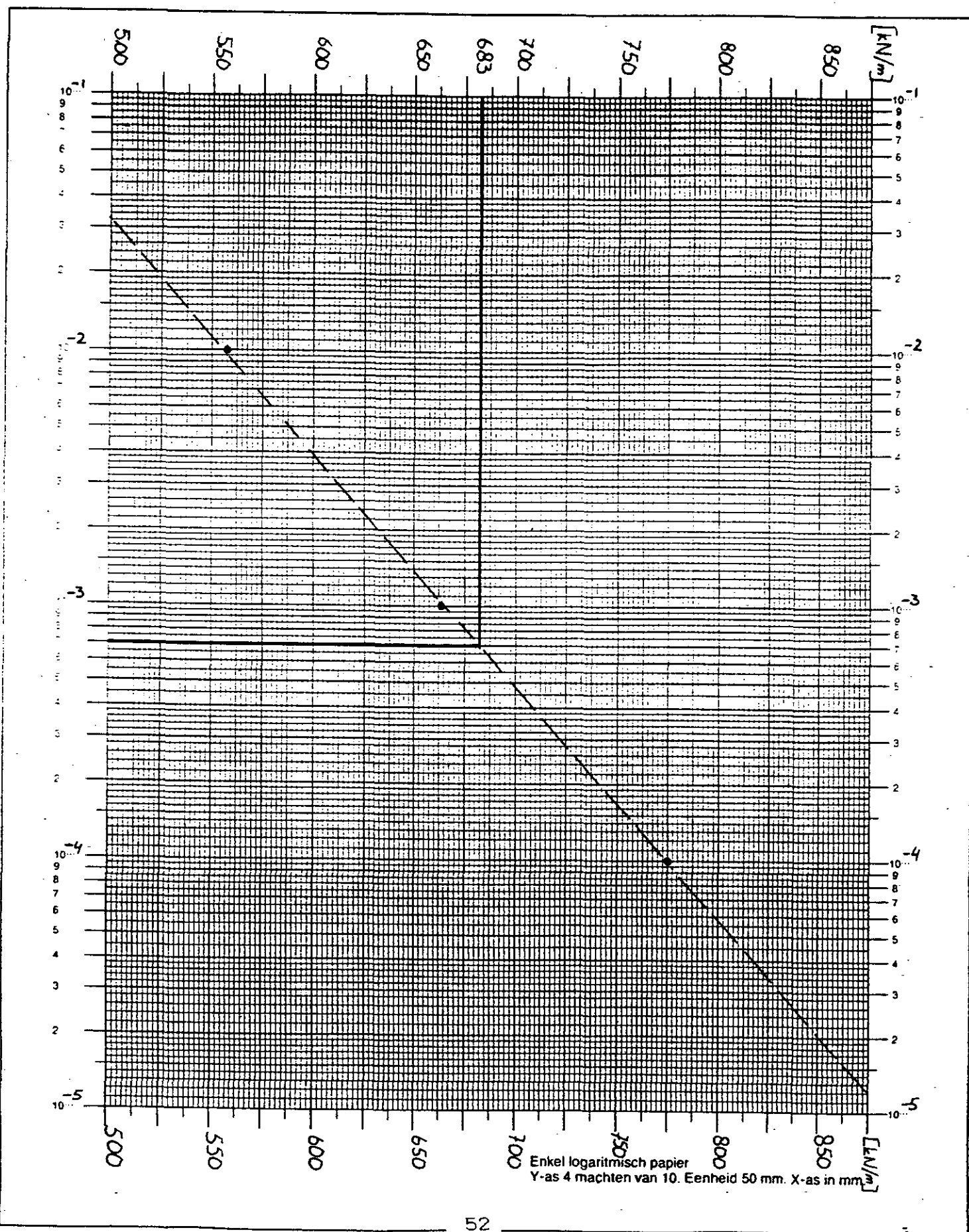
Rekenduur = 28.34 s.

ONTWERPBELASTING = 7.7E+005 N/M
 GETIJ WADDENZEE = 0.91 M T.O.V. NAP
 OPZET WADDENZEE = 4.95 M
 BUISTOOT WADDENZEE = 0.26 M
 BEREKENDE NAP-DALING = 0.10 M
 LAAGWATERSTAND MEER = -0.35 M T.O.V. NAP
 WINDSNELHEID MEER = 31.15 M/S
 AFWAAIING IJSSELMEER = -1.04 M
 LOKALE WATERSTAND MEER = -1.39 M T.O.V. NAP
 SIGNIFIKANTE GOLFHOOOGTE = 1.81 M
 GOLFHOOOGTE IN HAVEN = 1.81 M
 GOLFKRACHT = 9.0E+004 N/M
 VERVAL AFSLUITDIJK = 7.61 M
 VERVALKRACHT = 6.8E+005 N/M

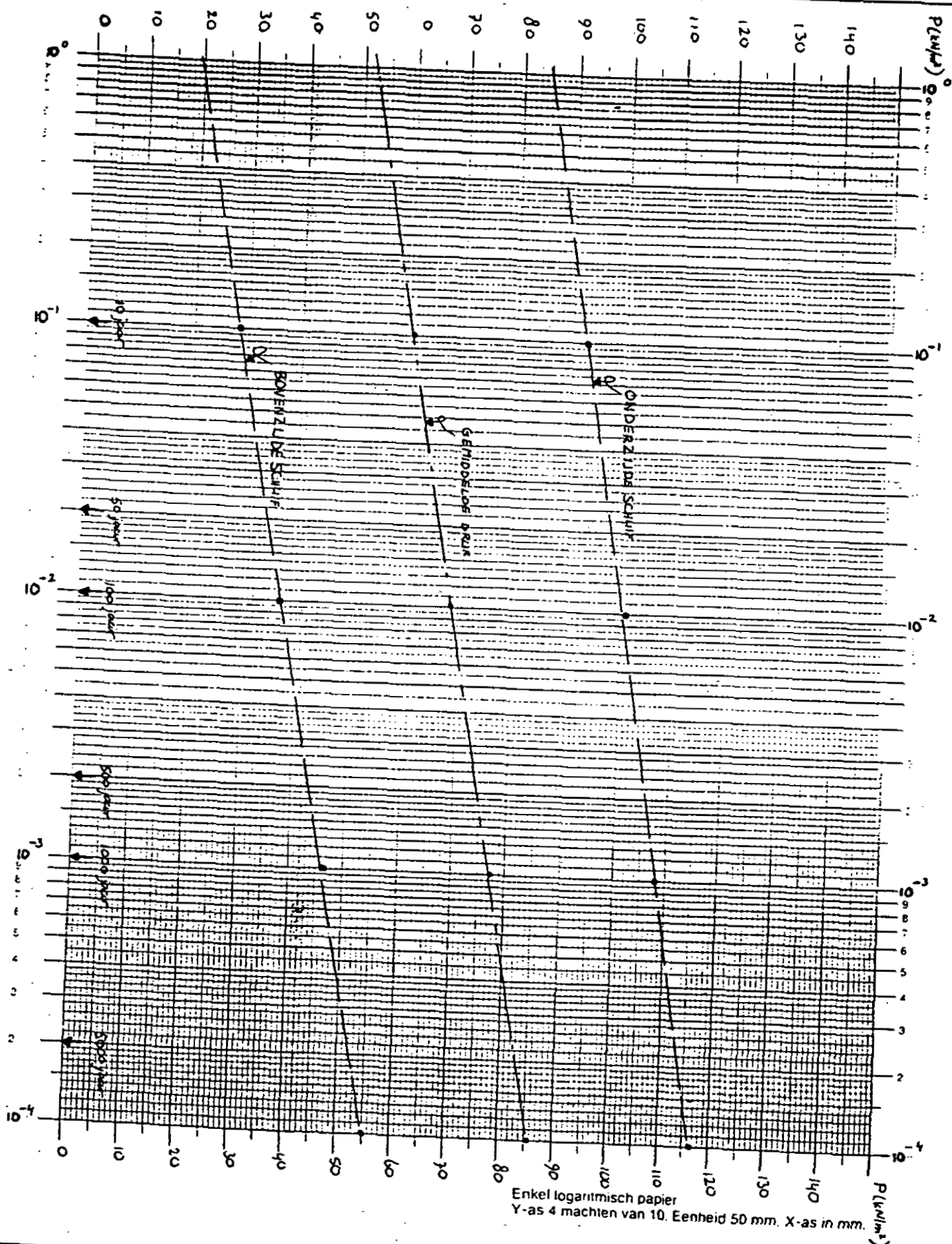
OVERSCHRIJDINGSLIJN BELASTING DEN OEVER



OVERSCHRIJDINGSLIJN BELASTING KORNWERDERZAND



VERDELING TOTALE DRUK OP DE SCHUIVEN (DEN OEVER)



PROCEDURE ZFUNKTIE(BELASTING:REAL; X:ARY; VAR Z:REAL; VAR UIT:ARY);

```
(      AANZET TOT DE PROBABILISTISCHE BEREKENING      )
(      VAN DE BELASTING OP DE SLUIZEN IN DE AFSLUITDIJK  )
(      DOOR: B.J. KOUWENHOVEN                          )
```

CONST

```
g      = 9.81;           (VERSN. ZWAARTEKRACHT )
fetch = 50000.;         (STRIJKLENSTE MEER )
sluisb = 6.5;           (HOOGTE SL.BODEM -NAP )
rozoet = 1000;          (DICHTHEID ZOET WATER )
rozout = 1025;          (DICHTHEID ZOUT WATER )
d      = 5;             (BODEM IJSSELMEER -NAP)
hsluis = 7.00;          (SLUISHOOGTE + NAP )
```

VAR

```
astro_st,           (ASTRONOMISCH GETIJ )
snax_st,            (MAXIMUM WINDOPZET )
error_st,           (STORINGSVARIABELE )
alfa_st,            (STORINGSTERM OPZET_IJ)
faktor_st,          (VERM.FAKTOR WINDSN. )
hoek_st,            (HOEK VAN INVAL GOLVEND)
buiamp_st,          (AMPLITUDE BUISTOOT )
laagw_st,           (LAAGWATER IJSSELMEER )
rayl_st,            (RAYLEIGH WAARDE )
opzet_st,           (STORINGSVAR. OPZET )
zeesp_st,           (ZEESPIEGELDALING )
golf_st,            (STORING GOLFHOOGE )
PHI_ST,             (FASEVERSCHUIVING GET.)
F,                  (STRIJKLENSTE MAD )
BODEM,              (GEM. BODEMLIGGING MAD)
ALFA,               (UIT RELATIE U - S )
N,                  (UIT RELATIE U - S )
GEMS,               (GEM OPZET MAD )
Hs,                 (SIGN. GOLFHOOGE )
Hgolf,              (EXTREME GOLFHOOGE )
H_overslag,         (GOLFHOOGE IN HAVEN )
L,                  (GOLFLENGTE )
LO,                 (DIEPWATER GOLFLENGTE )
Tp,                 (PIEKPERIODE GOLF )
wind_1,             (1 UURS WINDSNELHEID )
wind_5,             (5 UURS WINDSNELHEID )
diepte,             (WATERDIEPTE )
DIEPTE_M,           (WATERDIEPTE IJSSELM. )
HW,                 (WATERSTAND + NAP )
SO,                 (WINDOPZET IJSSELMEER )
hbuiten,            (WATERKOLDM BUITEN )
Fbuiten,            (HYDR. KRACHT BUITEN )
hbinnen,            (WATERKOLDM BINNEN )
Fbinnen,            (HYDR. KRACHT BINNEN )
Fverval,            (VERVALKRACHT )
Fgolf,              (GOLFKRACHT )
KEUZE,              (DENDEVER-KORNWERDER. )
```

NN,AA,
REDUCER,
red:REAL;

(UIT REDUKTE GOLFKR.)
(REDUKTIE GETIJFASE)
(REDUKTIE GOLFKRACHT)

PROCEDURE Interface;

BEGIN

astro_st := X[1];
smax_st := X[2];
error_st := X[3];
faktor_st := X[4];
buiamp_st := X[5];
laagw_st := X[6];
rayl_st := X[7];
opzet_st := X[8];
hoek_st := X[9];
zeesp_st := X[10];
golf_st := X[11];
PHI_ST := X[12];
F := X[13];
BODEM := X[14];
ALFA := X[15];
N := X[16];
KEUZE := X[17];
GEMS := X[18];

END;

PROCEDURE golfgroei(U,H,F:real;var Hs,Tp:real);

CONST

beta = 0.28;

VAR

U_2,dia_U,dia_H,dia_F,alfa,gamma,delta,groEIFase,hulp1,hulp2:real;

BEGIN

U_2 := SQR(U);
dia_U := U_2/g;
dia_H := g*H/U_2;
dia_F := g*F/U_2;
hulp1 := 0.53*power(dia_H,0.75);
hulp2 := 0.0125*power(dia_F,0.42);
hulp2 := tanh(hulp2/tanh(hulp1));
groEIFase := SQR(tanh(hulp1)*hulp2);
alfa := ((2120*groEIFase-4482)*groEIFase+2551)/4200;
gamma := ((-360*groEIFase+386)*groEIFase+457)/700;
delta := SQR(SQR(alfa*(3-2*gamma)))/beta/2);
Tp := 2*pi*groEIFase*U/(delta*g);
Hs := beta*SQR(groEIFase*U)/g;

END;

```
PROCEDURE windopzet(W,D,L:real; var S0:real);
```

```
VAR
```

```

dx,                                (stapgrootte in x-richting)
s,                                (windopzet )
ds,b0,b1,bgem,faktor,            (windopzetstap )
deling,hulp,y,start,x,x1,sum,sumtot:REAL;
i,ii:INTEGER;
```

```
BEGIN
```

```
start := -8.5E-4*sqr(w);
```

```
REPEAT
```

```
  x := 0;
```

```
  x1 := 500;
```

```
  b0 := 30000;
```

```
  s := start;
```

```
  dx := 500;
```

```
  sum := 0;
```

```
  sumtot := 0;
```

```
  hulp := s;
```

```
  WHILE (SUM <= 0) AND (x < 1) DO
```

```
    BEGIN
```

```
      ds := 5.55E-7*dx*w*w/(d+s);
```

```
      b1 := b0 - 0.5*b0*x1/1;
```

```
      faktor := b0/b1;
```

```
      bgem := (b0 + b1)/2;
```

```
      ds := ds*faktor;
```

```
      s := s + ds;
```

```
      sum := sum + bgem*((hulp + s)/2)*dx;
```

```
      sumtot := sumtot + bgem*(abs(hulp + s)/2)*dx;
```

```
      hulp := s;
```

```
      IF ds < 5E-6*dx THEN dx := dx*dx*5E-6/ds;
```

```
      IF (1 - x) < dx THEN dx := (1 - x);
```

```
      x := x + dx;
```

```
      x1 := x1 + dx;
```

```
      b0 := b1;
```

```
      DELING := SUM/SUMTOT;
```

```
    END;
```

```
  IF (x < 1) AND (sum > 0) THEN start := start + start*(1 - (1 - x)/1)
```

```
  ELSE
```

```
  begin
```

```
  IF abs(deling) > 0.001 THEN
```

```
  begin
```

```
  start := start+0.4*deling*start;
```

```
  end;
```

```
  end;
```

```
UNTIL (abs(deling) <= 0.005) AND (x = 1);
```

```
S0 := start;
```

```
END;
```

```
{-----}
```

```

PROCEDURE golflengte(L0,          ( L0 = golflengte op diep water )
                   D:REAL;        ( D = waterdiepte )
```

VAR L1:REAL;

VAR

T,L2,X,A : REAL;

BEGIN

T := SQRT(L0/1.56);

IF D > L0/2 THEN L1 := L0

ELSE IF D < L0/25 THEN L1 := T*SQRT(G*D) ELSE

BEGIN

L1:=L0;

A:=2*PI*D;

WHILE ABS(L1-L2)>0.01 DO

BEGIN

X:=A/L1;

L2:=TANH(X)*L0;

L1:=(2*L2+L1)/3;

END;

END;

END; (g1file)

```

PROCEDURE F_golf(Hin,      ( Hin = inkomende golfhoogte)
                L,        ( L  = golflengte      )
                HW,       ( HW  = stilwaternivo   )
                P_kering, (      bovenkant kering )
                P_bodem,  (      onderkant kering )
                rho_water: REAL;
                VAR Fgolf : REAL );

```

VAR

d,k,F1,F,kd,Zb,HULP1:REAL;

BEGIN

d:=HW + P_bodem; (d=waterdiepte, HW=buitenwaterstand)

k:=2*PI/L;

kd:=k*d;

F1:=rho_water*G*Hin/(k*COSH(kd));

F:=F1*SINH(kd); (golfkracht onder waterlijn)

HULP1:=(P_kering - HW);

IF HULP1>0 THEN

BEGIN

IF Hin>HULP1 THEN Zb:=HULP1 ELSE Zb:=Hin;

F1:=rho_water*G*(-Zb*Zb/2+Hin*Zb); (golfkracht boven waterlijn)

END

ELSE F1 :=0;

Fgolf:=F+F1; (totale golfkracht)

END; (F_golf)

PROCEDURE SPECTRUM(Hs,Tp,HN,sluisb,hsluis:REAL; VAR F_spectrum:REAL);

```

CONST
  Hg      = 1;
  Aantal  = 50;
  rozout  = 1025;

VAR
  teller           : INTEGER;
  T,Fgolf,
  freq,L1,
  Overdracht,
  Oppervlak,
  Totaal,alfa,
  stap,Fn,M0,
  Waterdiepte      : REAL;
  Golfbel,Energie  : ARRAY [0..Aantal] OF REAL;

FUNCTION ENERGIED(f,alfa,Fn:REAL):REAL;
BEGIN
  IF f < 0.75*Fn THEN ENERGIED := 0 ELSE
  IF f < Fn THEN ENERGIED := 4*alfa*power(Fn,-6)*(f - 0.75*Fn) ELSE
  ENERGIED := alfa*power(f,-5);
END;

BEGIN
  Fn := 1/Tp;
  alfa := SQR(Hs)*SQR(SQR(Fn))/6;
  Golfbel[0] := 0;
  Energie[0] := 0;
  stap := 1/aantal;
  FOR teller := 1 TO Aantal DO
  BEGIN
    Freq := teller*stap;
    T := 1/Freq;
    L0 := 1.56*SQR(T);
    Waterdiepte := Hw + sluisb;
    golfengte(L0,waterdiepte,L1);
    F_golf(Hg,L1,Hw,hsluis,sluisb,rozout,Fgolf);
    Overdracht := SQR(Fgolf);
    Energie[teller] := ENERGIED(Freq,alfa,Fn);
    Golfbel[teller] := Energie[teller]*Overdracht;
  END;
  Totaal := (Golfbel[0] + golfbel[aantal])/2;
  M0 := (Energie[0] + energie[aantal])/2;
  FOR teller := 1 TO (aantal -1) DO
  BEGIN
    Totaal := Totaal + Golfbel[teller];
    M0 := M0 + Energie[teller];
  END;
  Oppervlak := Totaal*stap;
  M0 := M0*stap;
  Fspectrum := 4*sqrt(oppervlak)/Hg;
END;
(=====HOOFDPROGRAMMA=====)

```

BEGIN

Interface;

wind_5 := error_st + (13.6*power(smax_st,0.5));

wind_1 := faktor_st*wind_5;

IF PHI_ST < 0 THEN REDUCER := 1

ELSE

REDUCER := COS(2*PI*PHI_ST/12.4);

diepte := bodem + astro_st*REDUCER + smax_st*gem5;

DIEPTE_M := D + LAAGW_ST;

Golfgroei(wind_1,diepte,F,Hs,Tp);

IF KEUZE = 0 THEN

BEGIN

NN := 0.0559*DIEPTE_M + 1.8699;

AA := -2.5534E-4*DIEPTE_M + 1.8656E-3;

SO := -AA*POWER(WIND_1,NN);

END

ELSE

BEGIN

NN := (-2.967E-3*HDEK_ST + 0.508)*DIEPTE_M + 7.933E-3*HDEK_ST + 2.199;

AA := (8.5443E-6*HDEK_ST - 2.3024E-3)*DIEPTE_M -
3.715E-5*HDEK_ST + 1.0137E-2;

SO := -AA*POWER(WIND_1,NN);

END;

red := 1E-2*(ALFA/hoek_st + N);

hbuiten := astro_st*REDUCER + smax_st + sluisb + buiamp_st + zeesp_st;

hbinnen := laagw_st + sluisb + SO;

Fbuiten := 0.5*rozoet*g*SQR(hbuiten);

Fbinnen := 0.5*rozoet*g*SQR(hbinnen);

Fverval := Fbuiten - Fbinnen;

Hw := hbuiten - sluisb;

IF hbuiten > 9 + 0.92857*Hs THEN H_overslag := Hs ELSE

IF hbuiten < 9 - 1.21427*Hs THEN H_overslag := 0 ELSE

H_overslag := 0.5*Hs*(1 + sin(2*pi/(4.28568*Hs)*
(hbuiten - 9 + 0.14375*Hs)));

H_overslag := H_overslag + golf_st;

IF H_overslag > Hs THEN H_overslag := Hs;

spectrum(Hs,Tp,Hw,sluisb,hsluis,Fgolf);

Fgolf := red*Fgolf*rayl_st;

Z := belasting - (Fverval + Fgolf);

UIT[1] := BELASTING;

UIT[2] := ASTRO_ST;

UIT[3] := SMAX_ST;

UIT[4] := BUIAMP_ST;

UIT[5] := ZEESP_ST;

UIT[6] := LAAGW_ST;

UIT[7] := WIND_1;

UIT[8] := SO;

UIT[9] := HBINNEN - SLUISB;

UIT[10] := HS;

UIT[11] := H_OVERSLAG;

UIT[12] := FGOLF;

UIT[13] := HBUITEN - HBINNEN;

UIT[14] := FVERVAL;

END;