

BESCHRIJVING VAN DE NATUURRANDVOORWAARDEN, VAN BELANG
VOOR EEN PROBABILISTISCH ONTWERP VAN EEN WATERKERING
AAN HET FRIESE WAD

W.G. de Rijke
Vakgroep Vloeistofmechanica
Technische Hogeschool Delft

Begeleider:
Prof.dr.ir. J.A. Battjes

oktober 1983

INHOUDSOPGAVE

bladzijde

1.	Inleiding	1
2.	Gebruikte rekenmethoden	3
2.1	Windeffect	3
2.1.1	Beschrijving van de methode	3
2.1.2	Verband windschuifspanning en windsnelheid	7
2.2	Golfverwachting	10
3.	Het astronomisch getij ter plaatse van het Friese Wad	11
3.1	Inleiding	11
3.2	Het gemiddeld astronomisch getij	11
3.3	Het astronomisch hoogwater	14
3.3.1	Aanpak	14
3.3.2	Verdeling van het astronomisch hoogwater te Harlingen	15
3.3.3	Verdeling van het astronomisch hoogwater te Zwarte Haan en Holwerd	16
3.4	Het astronomisch laagwater	19
3.4.1	Aanpak	19
3.4.2	Verdeling van het astronomisch laagwater te Harlingen	20
3.4.3	Verdeling van het astronomisch laagwater te Zwarte Haan en Holwerd	20
4.	De windopzet ter plaatse van het Friese Wad	23
4.1	Inleiding	23
4.2	De windopzet in de tijd	24
4.2.1	Inleiding	24
4.2.2	Analyse van het verloop van de windopzet in de tijd	24
4.2.3	Verdeling van de duur van de windopzet	25
4.3	De maximale windopzet	26
4.3.1	Inleiding	26
4.3.2	Verdeling van de maximale windopzet volgens Gumbel	30

4.3.3	De maximale windopzet als functie van de windsnelheid en de windrichting	33
4.3.3.1	Inleiding	33
4.3.3.2	Empirisch verband tussen windopzet en windsnelheid	33
4.3.3.3	Theoretisch verband tussen windeffect en windsnelheid	40
4.3.3.4	Vergelijking gemeten en berekende windopzet te Holwerd	47
4.3.3.5	Het evenwichtswindeffect ter plaatse van het Friese Wad	52
4.3.3.6	Verdeling van het windeffect over de windsnelheid	54
4.3.4	Vergelijking van methoden uit 4.3.2 en 4.3.3	55
5.	De golfgroei op de Waddenzee	64
5.1	Inleiding	64
5.2	Significante golfhoogte	64
5.3	Significante golfperiode	67
6.	De golfhoogte-waterstandsrelatie ter plaatse van het Friese Wad	69
6.1	Inleiding	69
6.2	De H_s -windsnelheidsrelatie	69
6.3	De windopzet-windsnelheidsrelatie	69
6.4	Koppeling windopzet en astronomisch hoogwater	69
6.5	Koppeling H_s en hoogwaterstand	71
6.6	Benadering van de H_s -waterstandsrelatie	74
7.	Samenvatting en conclusies	80
APPENDIX		82
LITERATUURLIJST		84
LIJST VAN SYMBOLEN		87
BIJLAGEN		

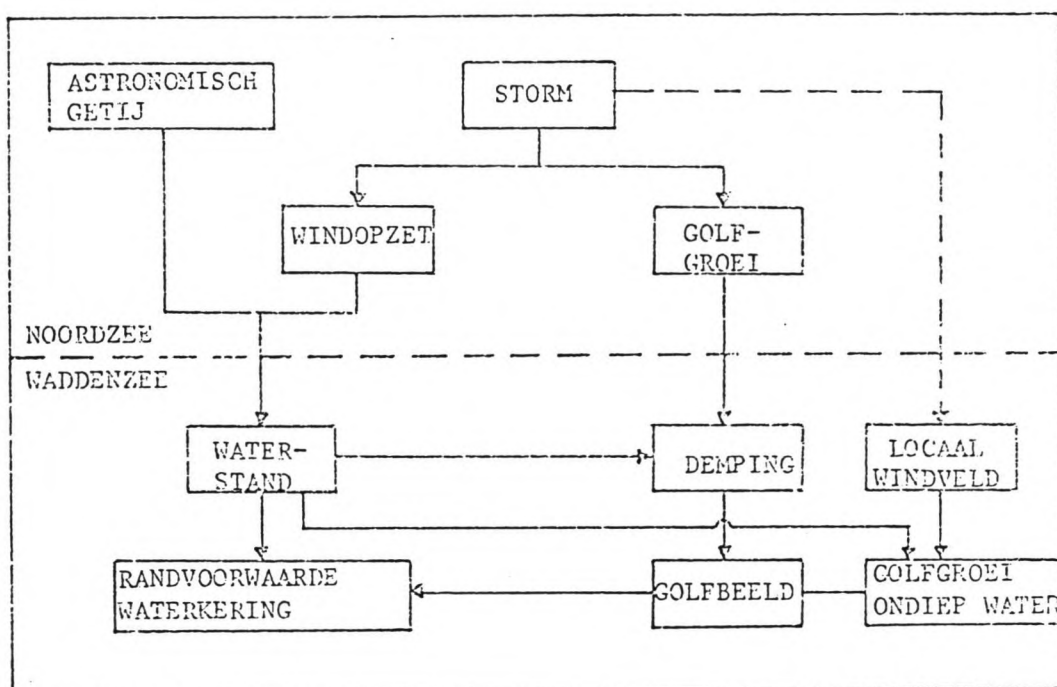
1. Inleiding

In het kader van de Deltawet dient de zeekering langs de Friese Waddenkust tussen Zwarte Haan en de veerdam te Holwerd verbeterd te worden.

Ten einde een stuk buitendijks land in te kunnen polderen, hebben Gedeputeerde Staten van Friesland besloten de waterkering volgens een tracé, weergegeven in bijlage 1, aan te leggen.

Bij het ontwerp van een waterkering in het algemeen dient men inzicht te hebben in het waterstands- en golfregime.

De fysische relaties die een rol spelen bij het ontwerp van een waterkering ter plaatse van het Friese Wad zijn weergegeven in een schema in figuur 1.1.



Figuur 1.1 Schema fysische relaties

Het doel van de beschouwingen in dit rapport is het vastleggen van de natuurrandvoorwaarden ten behoeve van het ontwerp van een zanddam ter plaatse van het Friese Wad, op een zodanige wijze, dat een probabilistische benadering mogelijk is.

Getracht is, de relevante invloeden op een probabilistische wijze te beschrijven. Helaas was het in veel gevallen niet mogelijk verder te komen dan een gemiddeld verband. Voor zover mogelijk is dan uit het meetmateriaal een spreiding geschat.

In hoofdstuk 2 wordt een algemene beschouwing gegeven van de belangrijkste rekenmethoden die gevolgd zijn in dit rapport. Van de methode, die gebruikt wordt voor de berekening van de windopzet op de Noordzee, moet opgemerkt worden dat dit een vrij oude methode betreft. Bij het K.N.M.I. is tegenwoordig een meer verfijnd rekenprogramma in gebruik. Na aanpassing blijkt de gebruikte methode goed te voldoen.

In hoofdstuk 3 wordt het astronomisch getij belicht. Vervolgens wordt in hoofdstuk 4 de windopzet ter plaatse van het Friese Wad besproken, waarna in hoofdstuk 5 de golfgroei wordt beschreven. Tenslotte wordt in hoofdstuk 6 de golfhoogte-waterstandsrelatie ter plaatse van het Friese Wad afgeleid. Een samenvatting en de belangrijkste conclusies volgt in hoofdstuk 7.

2. Gebruikte rekenmethoden

2.1 Windeffect

2.1.1 Beschrijving van de methode

Bij de berekening van het windeffect op de Waddenzee als gevolg van een windveld boven de Noordzee is gebruik gemaakt van een methode, ontwikkeld door Schalkwijk en Weenink in de jaren vijftig. (lit.19 en 24)

De methode is op theoretische wijze ontwikkeld en dient ter berekening van de invloed van de wind op de zeespiegel in een ondiepe zee die met een diepe oceaan in open verbinding staat.

De theorie is een evenwichtstheorie, aangezien wordt aangenomen, in overeenstemming met ervaringen aan de Nederlandse kust, dat het grootste deel van het windeffect bestaat uit evenwichtswindeffect. Het evenwichtswindeffect is het effect dat op zeker moment aanwezig zou zijn indien de wind, die op dat moment heerst, op alle voorgaande tijden geheerst zou hebben.

De basis van de methode is gelegd door Schalkwijk in 1947 in de vorm van grafieken waarmee uit het luchtdrukveld boven de Noordzee en het Kanaal het evenwichtswindeffect te Hoek van Holland bepaald kon worden. Weenink heeft de methode in 1958 uitgebreid met windeffectformules voor andere plaatsen langs de Nederlandse kust. Tevens heeft hij een aanzet gegeven tot het in rekening brengen van inhomogeniteiten in het windveld boven de Noordzee. De afhankelijkheid van het evenwichtswindeffect van het windveld wordt op de volgende wijze bepaald.

In een ondiepe zee met voldoende sterke getijstrooming mogen de bewegingsvergelijkingen van een verticale zuil water van bodem tot oppervlak worden gelineariseerd. In de evenwichtstoestand wordt dan de helling van het wateroppervlak bepaald door de windschuifspanning, d.i. de meeslepende kracht die de wind op het wateroppervlak uitoefent, en het volumetransport van de stroming, die een Corioliskracht en een bodemwrijvingskracht opwekt. De bodemwrijvingskracht wordt geacht lineair van het volumetransport af te hangen. Als randvoorwaarde langs de noordrand van de Noordzee wordt gesteld dat het windeffect door de Oceaan op nul wordt gehouden. Een verhoging of verlaging van de zeespiegel op een willekeurige plaats in de zee is dan te berekenen als som van:

1. een deel dat slechts van het windschuifspanningsveld afhankelijk is (het "statische" effect) en
2. een deel dat afhangt van het stroomveld (het "stroom" effect)

Het stroomtransport kan berekend worden uit het windschuifspanningsveld door middel van de differentiaalvergelijking, verkregen door de rotatie te nemen van bovengenoemde bewegingsvergelijking, in combinatie met de juiste randvoorwaarden. Wat het laatste betreft is met het oog op de Noordzee vooral van belang het geval van een zee die een opening heeft dat in geval van een stormvloed als "lek" kan fungeren (het Nauw van Calais). Het stroomtransport kan aldus samengesteld gedacht worden uit drie componenten, t.w. een rotatiestroom, een bodemhellingsstroom en een lekstroom.

Het evenwichtswindeffect kan aldus samengesteld gedacht worden uit een statisch effect, een rotatie-effect, een bodemhellings-effect en een lekeffect.

Voor zeer eenvoudige modellen van de Noordzee, zowel wat de kustconfiguratie als het diepteveld betreft, is het mogelijk de oplossing van bovengenoemde vergelijkingen analytisch te bepalen. Dit is echter zeer tijdrovend. Voor een enigszins reëel model van de Noordzee is het vrijwel ondoenlijk analytische oplossingsmethoden te gebruiken; Weenink gebruikte voor de numerieke berekeningen de door Southwell ontwikkelde relaxatiemethode. Vanwege het tijdrovende karakter van exacte berekeningen heeft Weenink in zijn berekeningen het windveld boven de Noordzee geschematiseerd in een Noordvak, een Zuidvak en een Kanaalvak. Het Zuidvak is verdeeld in drie vakken, welke in figuur 2.1. aangeduid zijn met I, II en III.



Figuur 2.1 Model van de Noordzee

In het Noordzeemodel is een cartesisch coördinatenstelsel aangebracht, dat zijn oorsprong heeft in het midden van de als x-as genomen grenslijn tussen de Noordzee en de Atlantische Oceaan. (punt E) De y-as is de verbindingslijn tussen de oorsprong en het Eierlandse Gat (punt F). De x wordt positief gerekend ten westen van de y-as en de y wordt positief gerekend ten zuiden van de x-as.

In de schematisatie bestaan de kusten van de Noordzee uit rechte lijnen.

Het diepteveld van de Noordzee is als volgt geschematiseerd:

$$d(x,y) = d_E \exp(-2,04 y/b) \quad \text{voor } 0 \leq y \leq b \quad \text{en} \quad -\frac{1}{2}a \leq x \leq \frac{1}{2}a \quad (2.1)$$

waarin

$d(x,y)$ is de diepte op punt (x,y)

d_E is de diepte langs de lijn $y=y_E=223$ m

b is de lengte van het model = 983 km

a is de breedte van het model = 575 km

Bovenstaande schematisatie, waarin de dieptelijnen van de Noordzee geacht worden evenwijdig te lopen aan de x-as, geeft een redelijk goede benadering van het werkelijke diepteverloop.

Het totale evenwichtswindeffect per vak kan nu berekend worden uit de som van het statische effect en het stroomeffect. Aangezien de betrokken vergelijkingen lineair zijn mag het totale windeffect op een bepaald punt opgebouwd gedacht worden uit de bijdragen van elk vak afzonderlijk.

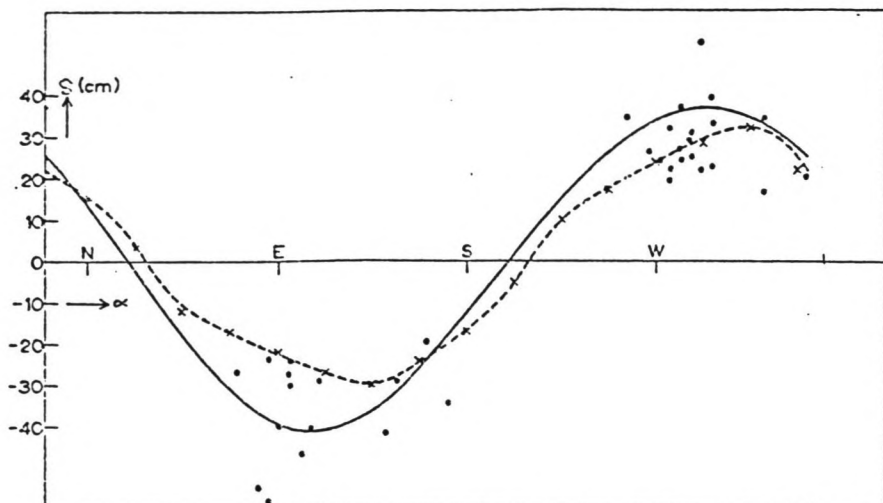
Weenink heeft voor een drietal plaatsen langs de zuidrand van het Noordzeemodel windeffectformules afgeleid, t.w. het Eierlandse Gat, Borkum en Cuxhaven. De coördinaten van deze plaatsen in het model zijn weergegeven in tabel 2.1.

plaats	coördinaten	
	x/a	y/a
Eierlandse Gat	0,00	1,71
Borkum	-0,23	1,71
Cuxhaven	-0,47	1,71

Tabel 2.1 Coördinaten zuidrand Noordzeemodel

Schalkwijk e.a. hebben aangetoond dat het windeffect aan de Nederlandse kust in grote mate afhangt van windvelden boven het zuidelijke deel van de Noordzee. Weenink constateerde een goede overeenstemming tussen gemeten windopzet en berekend windeffect te Borkum. Uitgangspunt bij de berekening was een homogeen windveld boven de zuidelijke Noordzee. In figuur 2.2. is de gemeten windopzet, uitgezet tegen het berekende windeffect te Borkum, weergegeven.

De evenwichtswindeffectformules voor het Eierlandse Gat, Borkum en Cuxhaven voor het gehele Zuidvak en de vakken I, II en III worden zonder afleiding gegeven. Voor de afleiding van onderstaande formules zij verwezen naar lit.24.



Figuur 2.2 Windeffect te Borkum t.g.v. een uniform windveld met $u_s = 10$ m/s boven vak S.

• : gemeten windopzet gedurende 35 stormen in de periode 1947-1951

-x-: windopzetbenadering volgens Tomczak

Evenwichtswindeffectformules voor het Eierlandse Gat:

$$s_I = (0,33\cos\alpha_I - 0,17\sin\alpha_I)B_I \quad (2.2)$$

$$s_{II} = (-0,14\cos\alpha_{II} - 0,22\sin\alpha_{II})B_{II} \quad (2.3)$$

$$s_{III} = (0,13\cos\alpha_{III} + 0,03\sin\alpha_{III})B_{III} \quad (2.4)$$

$$s_S = (0,32\cos\alpha_S - 0,36\sin\alpha_S)B_S \quad (2.5)$$

Evenwichtswindeffectformules voor Borkum:

$$s_I = (0,21\cos\alpha_I - 0,13\sin\alpha_I)B_I \quad (2.6)$$

$$s_{II} = (-0,11\cos\alpha_{II} - 0,15\sin\alpha_{II})B_{II} \quad (2.7)$$

$$s_{III} = (0,32\cos\alpha_{III} - 0,23\sin\alpha_{III})B_{III} \quad (2.8)$$

$$s_S = (0,42\cos\alpha_S - 0,51\sin\alpha_S)B_S \quad (2.9)$$

Evenwichtswindeffectformules voor Cuxhaven:

$$s_I = (0,15\cos\alpha_I - 0,10\sin\alpha_I)B_I \quad (2.10)$$

$$s_{II} = (-0,10\cos\alpha_{II} - 0,14\sin\alpha_{II})B_{II} \quad (2.11)$$

$$s_{III} = (0,39\cos\alpha_{III} - 0,51\sin\alpha_{III})B_{III} \quad (2.12)$$

$$s_S = (0,44\cos\alpha_S - 0,75\sin\alpha_S)B_S \quad (2.13)$$

In bovenstaande formules is α de hoek tussen de y-as in het Noordzeemodel en de windrichting.

Het statisch effect in de formules is ingesloten in de term, voorgesteld door

$$B = \frac{a \tau_s}{\rho g d_s} \quad (2.14)$$

waarin

- a is de breedte van het Noordzeemodel (m)
- τ_s is de windschuifspanning aan het wateroppervlak (N/m^2)
- ρ is de konstant veronderstelde dichtheid van het zeewater in het betrokken gebied (kg/m^3)
- g is de versnelling van de zwaartekracht (m/s^2)
- d_s is de diepte van het oppervlak tot de bodem in geval van windstilte boven de gehele zee (m)

2.1.2 Verband windschuifspanning en windsnelheid

De afgeleide formules geven het verband weer tussen de windschuifspanningsvector, voorstellende een homogeen windveld boven een beschouwd gebied, en het corresponderende evenwichtswindeffect in een bepaald punt. Echter voor praktisch gebruik dient het verband tussen de windschuifspanning en de windsnelheid op bv. 10 meter boven het wateroppervlak bekend te zijn.

De relatie tussen de windschuifspanning en de windsnelheid is erg gecompliceerd. In praktische gevallen kan bij benadering uitgegaan worden van een kwadratisch verband. De evenredigheidsfactor is geen constante, doch blijkt ondermeer af te hangen van

- . de hoogte boven het wateroppervlak
- . de thermische gelaagdheid van de atmosfeer
- . de ruwheid van het wateroppervlak

Bovendien blijkt de evenredigheidsfactor volgens sommige onderzoekers (Van Dorn, Wu, Large en Pond) van de windsnelheid af te hangen.

Onder verwaarlozing van de moleculaire viscositeit t.o.v. de Reynoldse spanning en onder aanname van een logaritmisch snelheidsprofiel kan het volgende verband tussen de schuifspanning over een horizontaal oppervlak en de windsnelheid op z meter boven het oppervlak afgeleid worden (Prandtl)

$$\tau = \rho_{\text{lucht}} \cdot \gamma_0(z)^2 \cdot u(z)^2 \quad (2.15)$$

In bovenstaande formule stelt ρ_{lucht} de luchtdichtheid in kg/m^3 voor. γ_0^2 is een dimensieloze weerstandsparameter, in de literatuur vaak aangeduid als "dragcoefficient", gedefinieerd door

$$\gamma_0(z)^2 = \frac{\kappa^2}{(\ln z/z_0)^2} \quad (2.16)$$

waarin

κ is de konstante van Von Kàrmán (= 0,4)

z is de hoogte boven het oppervlak (m)

z_0 is de ruwheid van het oppervlak (m)

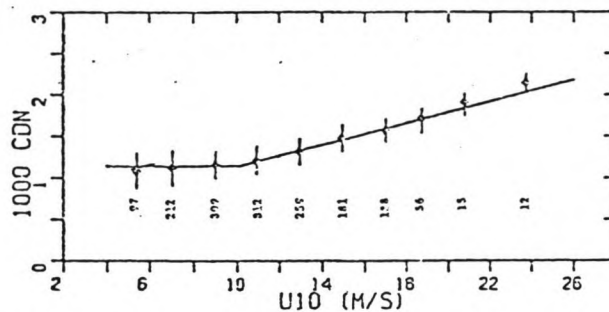
Voor windstroming over land is bovenstaand verband empirisch vastgesteld. Voor stroming over een wateroppervlak is door verschillende onderzoekers een verband tussen de dragcoëfficiënt en de windsnelheid waargenomen, hetgeen inhoudt dat van een simpel kwadratisch verband tussen de windschuifspanning en de windsnelheid boven water geen sprake is.

In dit verband wordt verwezen naar een onderzoek dat Large en Pond in 1980 verricht hebben naar de invloed van wind op de dragcoëfficiënt in diep water, (lit.11) met als resultaat het volgende verband tussen de dragcoëfficiënt onder neutrale condities en op 10 meter boven het wateroppervlak (CDN) en de windsnelheid op 10 meter boven het oppervlak ($u(10)$)

$$1000 \text{ CDN} = \begin{cases} 1,2 & \text{voor } 4 \leq u(10) < 11 \text{ m/s} \\ 0,49 + 0,065 u(10) & \text{voor } 11 \leq u(10) \leq 25 \text{ m/s} \end{cases} \quad (2.17)$$

gono $0,8 + 0,065 u(10)$ $u \neq$

Bovenstaand verband is grafisch weergegeven in figuur 2.3.



Figuur 2.3 De dragcoëfficiënt als functie van de windsnelheid volgens Large/Pond. Per meting (aangegeven met o) is de waargenomen standaarddeviatie weergegeven. De geschetste lijn geeft het verband volgens formule (2.17)

Weenink houdt bij zijn berekeningen het resultaat aan van Hunt, afgeleid uit metingen boven de Noordzee. Hij gaat uit van de dragcoëfficiënt bij een windsnelheid van 17 m/s, zijnde het gemiddelde van de windsnelheden die Schalkwijk gebruikte in zijn windeffectgrafieken voor Hoek van Holland. De gebruikte dragcoëfficiënt geldt voor noordwesterstormomstandigheden op de Noordzee. De door Weenink gebruikte (konstante) dragcoëfficiënt luidt als volgt

$$\gamma(10)^2 = 3,3 \cdot 10^{-3}$$

Met bovenstaande waarde voor de dragcoëfficiënt wordt dan de volgende relatie tussen de windschuifspanning en de windsnelheid op 10 meter boven het wateroppervlak verkregen

$$\tau_s = \rho_{\text{lucht}} \cdot 3,3 \cdot 10^{-3} \cdot u(10)^2 \quad (2.18)$$

Formeel geldt bovenstaande relatie slechts voor noordwestelijke windrichting. Volgens Schalkwijk is de spreiding in de waarde van de dragcoëfficiënt bij windrichtingen tussen Noord en West echter gering. De goede overeenstemming tussen de gemeten windopzet en het berekende effect geeft aan dat de door Weenink gebruikte waarde voor de dragcoëfficiënt voldoet. Vergelijking met het verband, gevonden door Large en Pond, leert dat Weenink een bovengrens aangehouden heeft.

2.2 Golfverwachting

Het ondiepe water van de Waddenzee beïnvloedt de golfgroei. Onder gelijke wind- en fetchomstandigheden zal in ondiep water een kleinere golfhoogte en kortere golfperiode optreden dan in diep(er) water het geval zou zijn. Er bestaat geen eenduidige theorie over de golfgroei in ondiep water, met als gevolg dat er veel voorspellingsmethoden bestaan.

De Reus heeft aangetoond dat voor de Waddenzee de Sverdrup-Munk-Bretschneider (S.M.B.-) methode goed voldoet. Met deze methode is het mogelijk als functie van de plaats in een stationair windveld, de significante golfhoogte en significante golfperiode te voorspellen.

De S.M.B.-methode is een semi-empirische golfverwachtingsmethode die gebaseerd is op de benadering dat de golfenergie op positieve wijze beïnvloed wordt door de wind en op negatieve manier door bodemwrijving en percolatie. De golfenergietoevoer door de wind wordt bepaald met de diepwatervoorspellingsrelaties welke ontwikkeld zijn door Sverdrup en Munk in 1947 en verbeterd door Bretschneider in 1951. Het energieverlies als gevolg van bodemwrijving en percolatie wordt bepaald middels dissipatieformules, ontwikkeld door Bretschneider en Reid in 1953, daarbij gebruik makend van theorieën van Putnam en Johnson. De S.M.B.-methode is in 1958, 1965 en 1970 aangepast aan nieuwe gegevens.

De S.M.B.-methode maakt gebruik van de volgende formules:

$$\frac{g H_s}{u^2} = 0,283 \tanh \left[0,530 (gd/u^2)^{0,75} \right] \tanh \left[\frac{0,0125 (gF/u^2)^{0,42}}{\tanh \left[0,530 (gd/u^2)^{0,75} \right]} \right] \quad (2.19)$$

$$\frac{g T_s}{2\pi u} = 1,2 \tanh \left[0,833 (gd/u^2)^{0,375} \right] \tanh \left[\frac{0,077 (gF/u^2)^{0,25}}{\tanh \left[0,833 (gd/u^2)^{0,375} \right]} \right] \quad (2.20)$$

waarin

H_s is de significante golfhoogte (m)

T_s is de significante golfperiode (s)

u is de windsnelheid op 10 meter boven het wateroppervlak (m/s)

F is de strijklenkte (m)

d is de waterdiepte (m)

g is de versnelling van de zwaartekracht (m/s^2)

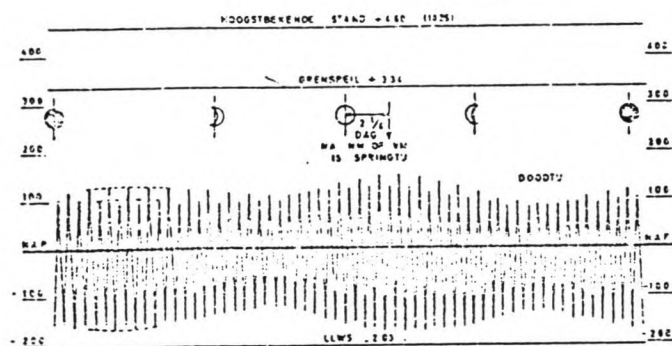
Bovenstaande formules vormen het uitgangspunt van de golfgroei-grafieken van Bretschneider, weergegeven in bijlagen 2a t/m c. De grafieken geven het verband tussen u (in zeemijlen/uur), F (in feet) en H_s (in feet) of T_s (in sec) bij konstante waterdiepte (in feet).

3. Het astronomisch getij ter plaatse van het Friese Wad

3.1 Inleiding

Het astronomisch getij op aarde wordt voor het belangrijkste deel veroorzaakt door de aantrekkingskracht die de zon en de maan op de aarde uitoefenen. De invloed van andere hemellichamen is te verwaarlozen. Deze getijverwekkende kracht kan samengesteld gedacht worden uit vele componenten, ieder met een eigen frequentie. Deze frequenties zijn gerelateerd aan de periodiciteit in de verschillende soorten bewegingen die aarde, maan en zon t.o.v. elkaar uitvoeren. Onder invloed van de rotatie van de aarde zelf zal een getij op aarde zowel enkeldaagse als halfdaagse componenten bevatten.

Aan de Nederlandse kust is het halfdaagse getij overheersend. Dit houdt in, dat aan de Nederlandse kust 2 maal per dag een hoogwater en 2 maal per dag een laagwater waargenomen wordt. De enkeldaagse componenten in het getij hebben tot gevolg dat gedurende een dag beide hoogwaters een verschillende hoogte hebben, ditzelfde geldt voor de laagwaters. In fig. 3.1 is als voorbeeld het verloop van het astronomisch getij te Delfzijl weergegeven.



Figuur 3.1 Verloop van het astronomisch getij te Delfzijl

3.2 Het gemiddeld astronomisch getij

Het astronomisch getij op een bepaald tijdstip in een punt aan de Friese Waddenkust wordt in dit verslag beschreven door de volgende formule:

$$a(t) = \frac{a_{HW} + a_{LW}}{2} + \frac{a_{HW} - a_{LW}}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{T_0} t\right) \quad (3.1)$$

waarin

$s(t)$ is het astronomisch getij op tijdstip t (m. t.o.v. N.A.P.)

s_{HW} is het astronomisch hoogwater (m. t.o.v. N.A.P.)

s_{LW} is het astronomisch laagwater (m. t.o.v. N.A.P.)

T_0 is de getijperiode = 12 uur, 25 minuten.

t is de tijd (minuten)

Voorgaande sinusbenadering wordt in de praktijk vervormd door niet-lineaire invloeden en andere frequenties.

Met de bovenstaande formule kan het gemiddelde astronomische getij aan de Friese Waddenkust benaderd worden. In de formule dient dan voor a_{HW} en a_{LW} respectievelijk het gemiddeld hoogwater en het gemiddeld laagwater ingevoerd te worden. Een indruk van het verloop van het astronomisch getij langs de Friese kust kan verkregen worden door het gemiddeld getij te Harlingen, Zwarte Haan en Holwerd te beschouwen.

De waarden voor het gemiddeld getij te Harlingen en Holwerd zijn ontleend aan lit. 4; het gemiddeld getij te Zwarte Haan is ontleend aan lit. 14. Zie tabel 3.1.

Door substitutie van de waarden uit tabel 3.1 in bovenstaande formule voor het astronomisch getij, wordt de volgende benadering van het gemiddeld getij te Harlingen, Zwarte Haan en Holwerd verkregen.

	gemiddeld hoogwater (m. t.o.v. N.A.P.)	gemiddeld laagwater (m. t.o.v. N.A.P.)
Harlingen	+ 0,88	- 0,82
Zwarte Haan	+ 0,93	- 1,15
Veerdam Holwerd	+ 0,98	- 1,36

tabel 3.1 Gemiddeld hoogwater en laagwater te Harlingen, Zwarte Haan en Holwerd.

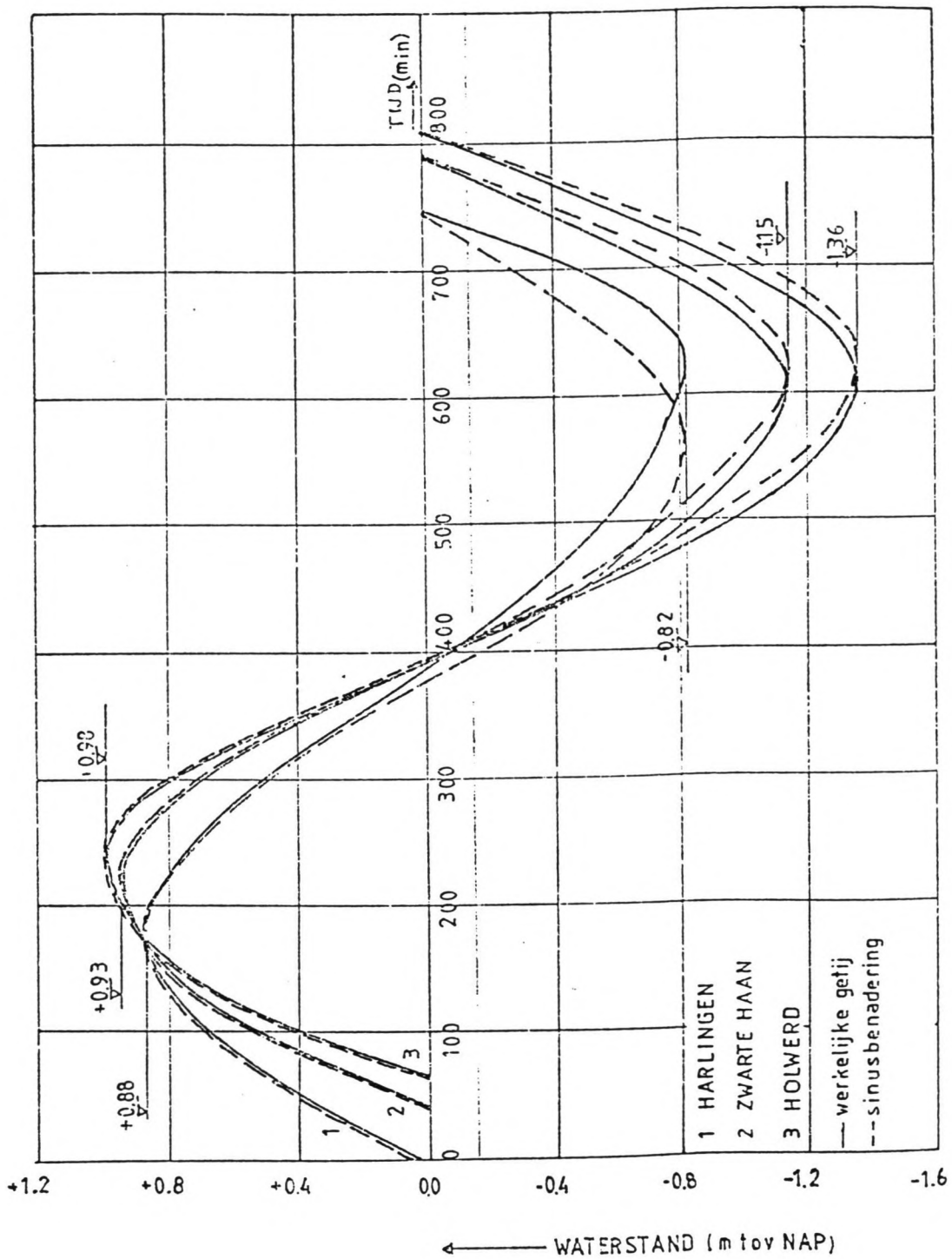
$$\text{Harlingen} \quad a(t) = + 0,03 + 0,85 \sin\left(\frac{2\pi}{T_0} \cdot t\right) \quad (3.2)$$

$$\text{Zwarte Haan} \quad a(t) = - 0,11 + 1,04 \sin\left(\frac{2\pi}{T_0} \cdot t\right) \quad (3.3)$$

$$\text{Holwerd} \quad a(t) = - 0,19 + 1,17 \sin\left(\frac{2\pi}{T_0} \cdot t\right) \quad (3.4)$$

Bovenstaande benaderende krommen zijn naast het werkelijke gemiddeld getij weergegeven in fig. 3.2.

De werkelijke getijkromme te Harlingen is ontleend aan lit. 4. De getijkrommen voor Zwarte Haan en Holwerd zijn uit die te Harlingen geconstrueerd. Daarbij zijn de volgende gegevens, eveneens ontleend aan lit. 4, gebruikt:



Figuur 3.2 Gemiddelde getijkromme te Harlingen, Zwarte Haan en Holwerd.

	Zwarte Haan	Holwerd
	(minuten)	(minuten)
hoogwater	+ 30	+ 43
laagwater	00	- 01

+ = later dan Harlingen - = vroeger dan Harlingen

Tabel 3.2 Gemiddeld tijdsverschil van het hoog- en laagwater te Harlingen met dat te Zwarte Haan en Holwerd

Het gemiddeld havengetal te Holwerd voor het hoogwater bedraagt 9 uur 30 minuten; het gemiddeld havengetal voor het laagwater bedraagt 3 uur 50 minuten.

Een vergelijking van de geschematiseerde en de werkelijke getijlijn leert dat het gemiddeld astronomisch getij aan de Friese Waddenkust redelijk tot goed benaderd kan worden met een sinusfunctie.

Als gevolg van de positie van aarde, zon en maan zal een variatie optreden van hoogwater en laagwater. Omdat de oorzakelijke factoren bekend zijn, laat het astronomische getij zich zeer goed deterministisch beschrijven. Een getijregistratie wordt dan zodanig geanalyseerd, dat hij zo goed mogelijk kan worden gereproduceerd, met als doel de voorspelling mogelijk te maken van hoogte en tijdstip van toekomstige waterstanden. Voor verschillende plaatsen aan de Nederlandse Kust (o.a. Harlingen) zijn getijtafels beschikbaar. Vanwege het ontbreken van een deterministische getijanalyse voor het Friese Wad (ter plaatse van Zwarte Haan en Holwerd) is getracht het astronomisch getij voor die locatie op stochastische wijze reproduceerbaar te maken.

3.3 Het astronomisch hoogwater

3.3.1 Aanpak

Voor de bepaling van de verdeling van een stochastische variabele, in dit geval de hoogwaterstand, zijn in het algemeen een groot aantal waarnemingen benodigd.

Er bestaan geen getijtafels voor Zwarte Haan en Holwerd. De verdeling van het hoogwater is niet direct uit berekende waterstanden te bepalen. Er zal eerst op enigerlei wijze een reeks van astronomische hoogwaters gegenereerd moeten worden, welke middels een getijberekening zou kunnen geschieden. Een getijberekening is niet uitgevoerd. In de eerste plaats omdat het ingewikkelde geulenstelsel ter plaatse een getijberekening moeilijk uitvoerbaar en tijdrovend maakt. In de tweede plaats omdat het mogelijk is om op betrekkelijk

eenvoudige wijze de verdeling van het astronomisch hoogwater te Zwarte Haan en Holwerd uit de verdeling van het astronomisch hoogwater te Harlingen af te leiden.

Daartoe dient de aanname gedaan te worden dat het astronomisch hoogwater op verschillende plaatsen langs de Friese Waddenkust dezelfde soort stochastische verdeling volgt. De vermoedelijke juistheid van deze aanname volgt uit het feit dat op verschillende plaatsen langs de Nederlandse Kust eenzelfde soort verdeling van het astronomisch hoog- en laagwater is waargenomen (lit. 23). De waargenomen verdelingen bleken goed te benaderen met een Gaussische verdeling.

Een tweede voorwaarde voor het mogelijk zijn van een stochastische aanpak is dat het astronomisch getij te Harlingen hetzelfde karakter vertoont als dat te Zwarte Haan en Holwerd. De in hoofdstuk 3.2 waargenomen overeenkomst in de vorm van de getijkromme moge aantonen dat aan de laatste voorwaarde wordt voldaan.

3.3.2 Verdeling van het astronomisch hoogwater te Harlingen

Voor de bepaling van de verdeling van het astronomische hoogwater te Harlingen is gebruik gemaakt van de getijtafel 1982.

Uit de frequentieverdeling blijkt dat het astronomisch hoogwater te Harlingen in 1982 een spreiding vertoont met een laagste waarde van 0.34 m. + N.A.P. en een hoogste waarde van 1.28 m. + N.A.P. Hieruit kan de cumulatieve frequentie en de relatieve frequentie berekend worden met de methode van Weibull, ontleend aan lit. 20. Een frequentie, berekend volgens de Weibull-methode, laat zich goed plotten op waarschijnlijkheidspapier. De relatieve cumulatieve frequentie volgens Weibull wordt voorgesteld door $\frac{m}{N+1}$.

waarin

m is het rangnummer van het hoogwater; hoogste hoogwater = 1.

N is het totaal aantal hoogwaters = 705.

De astronomische hoogwaters zijn gerangschikt naar grootte. Vervolgens is de cumulatieve frequentie en de relatieve cumulatieve frequentie volgens Weibull berekend (zie bijlage 3). Het astronomisch hoogwater is vervolgens tegen de relatieve cumulatieve frequentie uitgezet op normaal waarschijnlijkheidspapier in fig. 3.3. Daaruit blijkt dat binnen de 90% betrouwbaarheidsband de variatie van het hoogwater te Harlingen goed benaderd kan worden met een Gaussische verdeling met als parameters

1. Het gemiddelde astronomisch hoogwater $E\{a_{HW}\}$

Uit figuur 3.3 blijkt dat voor het jaar 1982 het gemiddelde astronomische hoogwater te Harlingen gelijk is aan 0.859 m. + N.A.P. In lit. 4 wordt voor het gemiddeld hoogwater te Harlingen 0.88 m. + N.A.P. aangehouden. Aangezien de laatstgenoemde waarde op een langere waarnemingsperiode berust, wordt voor het gemiddelde astronomische hoogwater te Harlingen 0.88 m. + N.A.P. aangehouden.

2. De standaarddeviatie $\sigma (a_{HW})$

De standaarddeviatie kan volgens lit. 20 grafisch bepaald worden uit de overschrijdingslijn m.b.v. de formule:

$$\sigma(\underline{a}) = a_{50\%} - a_{15,87\%} \quad (3.5)$$

waarin

$\sigma(\underline{a})$ is de standaarddeviatie van \underline{a}

$a_{50\%}$ is de waterstand die 50% van de tijd onderschreden wordt.

$a_{15,87\%}$ is de waterstand die 15,87% van de tijd onderschreden wordt.

Uit de grafiek is af te lezen: $a_{50\%} = 0.859 \text{ m.} + \text{N.A.P.}$

$$a_{15,87\%} = 0.655 \text{ m.} + \text{N.A.P.}$$

Ingevuld in bovenstaande formule wordt een standaarddeviatie verkregen van $\sigma(\underline{a}_{\text{HW}}) = 0.204 \text{ m.}$

Resumerend kan gesteld worden dat het astronomische hoogwater te Harlingen benaderd kan worden met een Gaussische verdeling met een verwachtingswaarde $E\{\underline{a}_{\text{HW}}\} = 0.880 \text{ m.} + \text{N.A.P.}$ en een standaarddeviatie $\sigma(\underline{a}_{\text{HW}}) = 0.204 \text{ m.}$

3.3.3 Verdeling van het astronomisch hoogwater te Zwarte Haan en Holwerd

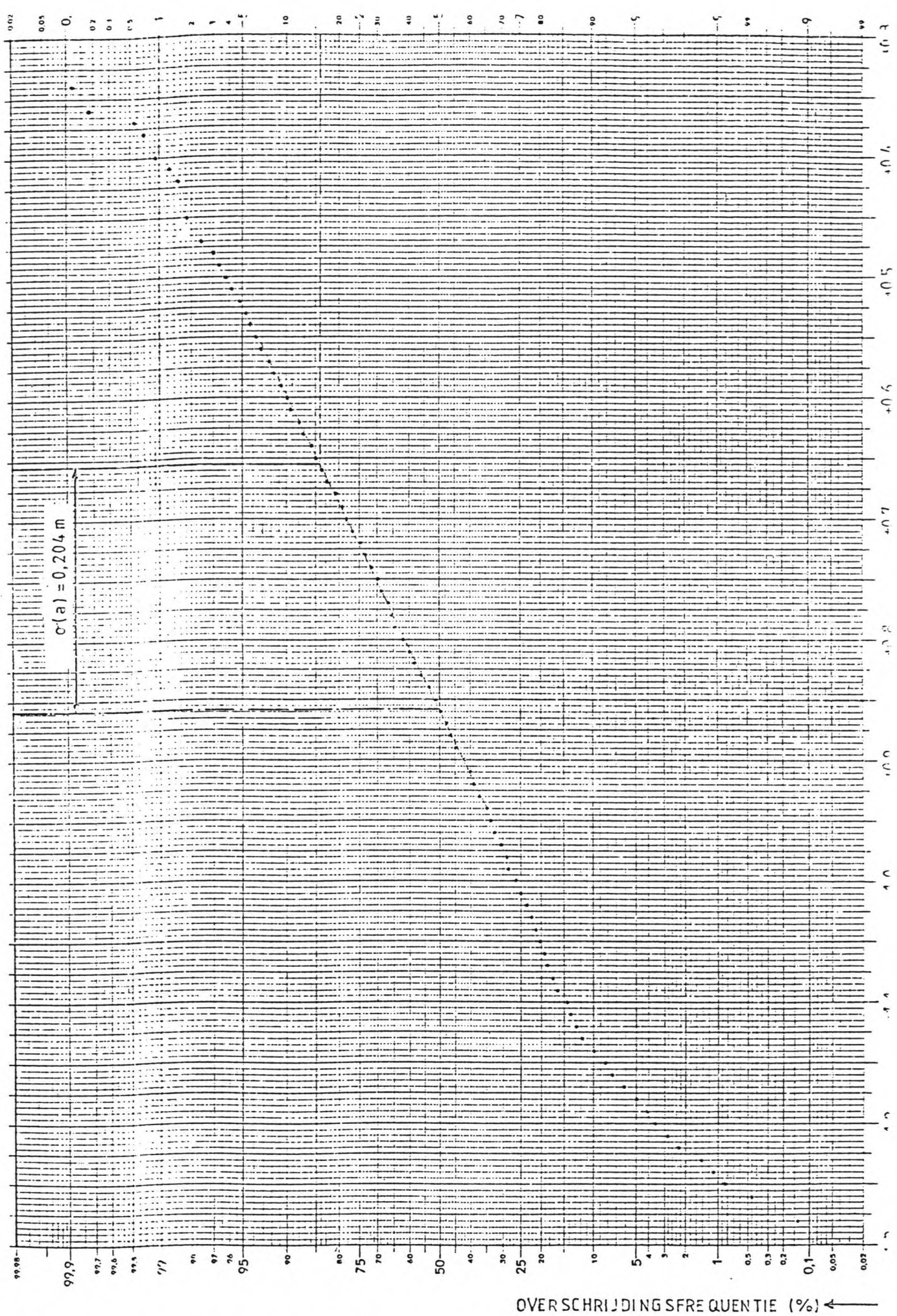
Het astronomisch hoogwater te Harlingen is bij benadering Gaussisch verdeeld. Aangenomen wordt dat het astronomisch hoogwater te Zwarte Haan en Holwerd eveneens Gaussisch verdeeld is. De verwachtingswaarden $E\{\underline{a}_{\text{HW}}\}$ van de verdelingen voor Zwarte Haan en Holwerd zijn ontleend aan lit. 4 en lit. 14.

$$E\{\underline{a}_{\text{HW}}\} \text{ Zwarte Haan} = 0.93 \text{ m.} + \text{N.A.P.}$$

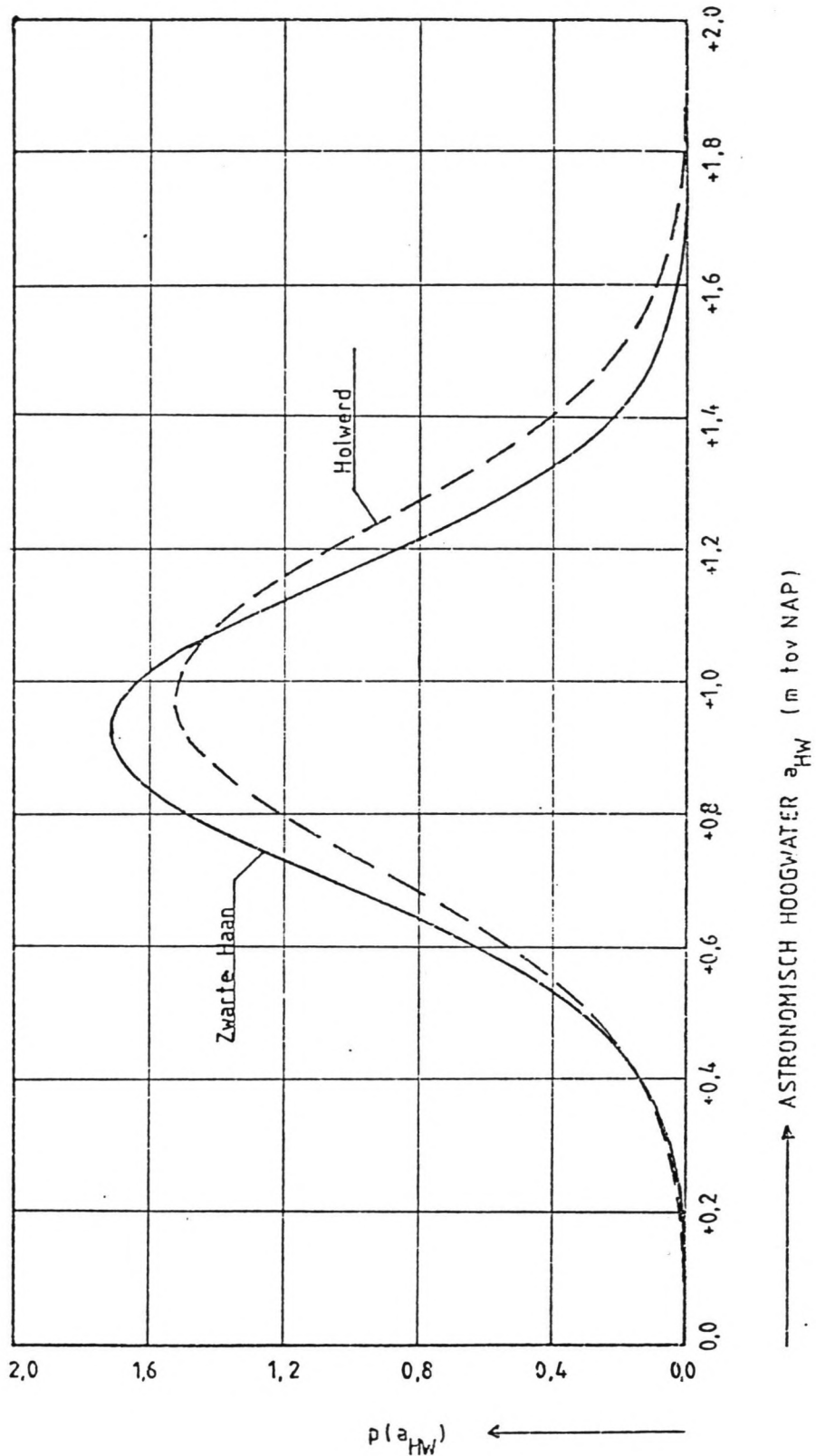
$$E\{\underline{a}_{\text{HW}}\} \text{ Holwerd} = 0.98 \text{ m.} + \text{N.A.P.}$$

De standaarddeviatie $\sigma(\underline{a}_{\text{HW}})$ kan afgeleid worden uit de verdeling voor Harlingen op de volgende wijze: In hoofdstuk 3.2 is aangetoond dat de amplitude van het gemiddelde getij groter wordt van Harlingen naar Holwerd toe. Wanneer aangenomen wordt dat de standaarddeviatie in dezelfde verhouding verandert als de amplitude van het gemiddelde getij, dan kan de standaarddeviatie van de verdeling voor Zwarte Haan en Holwerd op de volgende manier bepaald worden:

$$\sigma(\underline{a}_{\text{HW}})^{\text{ZH}} = \frac{[E\{a_{\text{HW}}\} - E\{a_{\text{LW}}\}]^{\text{ZH}}}{[E\{a_{\text{HW}}\} - E\{a_{\text{LW}}\}]^{\text{Ha}}} \cdot \sigma(\underline{a}_{\text{HW}})^{\text{Ha}} \quad (3.6)$$



Figuur 3.3 Overschrijdingslijn van het astronomisch hoogwater te Harlingen.



Figuur 3.4 Kansdichtheidsfunctie van het astronomisch hoogwater te Zwarte Haan en Holwerd.

$$\sigma(\underline{a}_{HW})^{Ho} = \frac{[E\{\underline{a}_{HW}\} - E\{\underline{a}_{LW}\}]^{Ho}}{[E\{\underline{a}_{HW}\} - E\{\underline{a}_{LW}\}]^{Ha}} \cdot \sigma(\underline{a}_{HW})^{Ha} \quad (3.7)$$

Ho = Holwerd

ZH = Zwarte Haan

Ha = Harlingen

De waarden van $E\{\underline{a}_{HW}\}^{Ha}$ en $E\{\underline{a}_{LW}\}^{Ha}$ zijn ontleend aan lit. 4.
De waarde van $\sigma(\underline{a}_{HW})^{Ha}$ is bepaald in hoofdstuk 3.3.2.

$$E\{\underline{a}_{HW}\}^{Ha} = 0.88 \text{ m.} + \text{N.A.P.}$$

$$E\{\underline{a}_{LW}\}^{Ha} = 0.94 \text{ m.} - \text{N.A.P.}$$

$$\sigma(\underline{a}_{HW})^{Ha} = 0.204 \text{ m.}$$

$$E\{\underline{a}_{HW}\}^{ZH} = 0.93 \text{ m.} + \text{N.A.P.}$$

$$E\{\underline{a}_{LW}\}^{ZH} = 1.15 \text{ m.} - \text{N.A.P.}$$

$$E\{\underline{a}_{HW}\}^{Ho} = 0.98 \text{ m.} + \text{N.A.P.}$$

$$E\{\underline{a}_{LW}\}^{Ho} = 1.36 \text{ m.} - \text{N.A.P.}$$

Bovenstaande gegevens ingevuld in formule (3.6) en (3.7) levert op:

$$\sigma(\underline{a}_{HW})^{ZH} = 0,233 \text{ m.} \text{ en } \sigma(\underline{a}_{HW})^{Ho} = 0,262 \text{ m.}$$

Resumerend kan gesteld worden dat het astronomisch getij te Zwarte Haan en Holwerd benaderd kan worden met een Gaussische verdeling met een verwachtingswaarde $E\{\underline{a}_{HW}\} = 0.93 \text{ m.} + \text{N.A.P.}$ resp. $0.98 \text{ m.} + \text{N.A.P.}$ en een standaarddeviatie $\sigma(\underline{a}_{HW}) = 0,233 \text{ m.}$ resp. $0,262 \text{ m.}$

De kansdichtheidsfuncties van het astronomisch hoogwater te Zwarte Haan en Holwerd zijn weergegeven in fig. 3.4.

3.4 Het astronomisch laagwater

3.4.1 Aanpak

Bij de bepaling van de verdeling van het astronomisch laagwater is dezelfde werkwijze gevolgd als bij de bepaling van de verdeling van het astronomische hoogwater. In het hiernavolgende zal op overeenkomstige wijze de verdeling van het laagwater te Zwarte Haan en Holwerd uit de verdeling van het laagwater te Harlingen bepaald worden. Voor de aannames waaronder dit gedaan wordt, zij verwezen naar hoofdstuk 3.3.1.

3.4.2 Verdeling van het astronomisch laagwater te Harlingen

De laagwaters zijn wederom ontleend aan de getijtafel voor Harlingen 1982 (lit.4).

Uit de frequentieverdeling is de cumulatieve frequentie berekend en de relatieve cumulatieve frequentie volgens de Weibull-methode (zie 3.3.2) zie bijlage 4. Hieruit blijkt dat het astronomisch laagwater te Harlingen in 1982 een spreiding vertoont met een kleinste waarde 0.71 m.- N.A.P. en een grootste waarde 1.26 m. - N.A.P.

In fig. 3.5 is de relatieve cumulatieve frequentie tegen de laagwaterstand uitgezet op normaal waarschijnlijkheidspapier. Uit de verkregen puntenverzameling is m.b.v. de kleinste kwadratenmethode de meest waarschijnlijke rechte berekend. De correlatiecoëfficiënt van 0.9944 geeft aan dat het astronomische laagwater te Harlingen benaderd kan worden met een Gaussische verdeling met een verwachtingswaarde gelijk aan het gemiddelde laagwater = 0.82 m. - N.A.P. De standaarddeviatie van de normale verdeling kan grafisch bepaald worden volgens:

$$\sigma(\underline{a}_{LW}) = a_{50\%} - a_{15,87\%} = 0,108 \text{ m}$$

Resumerend kan gesteld worden dat het astronomische laagwater te Harlingen benaderd kan worden met een Gaussische verdeling met een verwachtingswaarde $E\{\underline{a}_{LW}\} = 0,82 \text{ m.}$ - N.A.P. en een standaarddeviatie $\sigma(\underline{a}_{LW}) = 0,108 \text{ m.}$

3.4.3 Verdeling van het astronomisch laagwater te Zwarte Haan en Holwerd

De verwachtingswaarden van het normaal verdeelde laagwater te Zwarte Haan en Holwerd zijn gelijk aan de gemiddelde laagwaters, ontleend aan lit. 4, resp. 1,15 m. - N.A.P. en 1,36 m. - N.A.P.

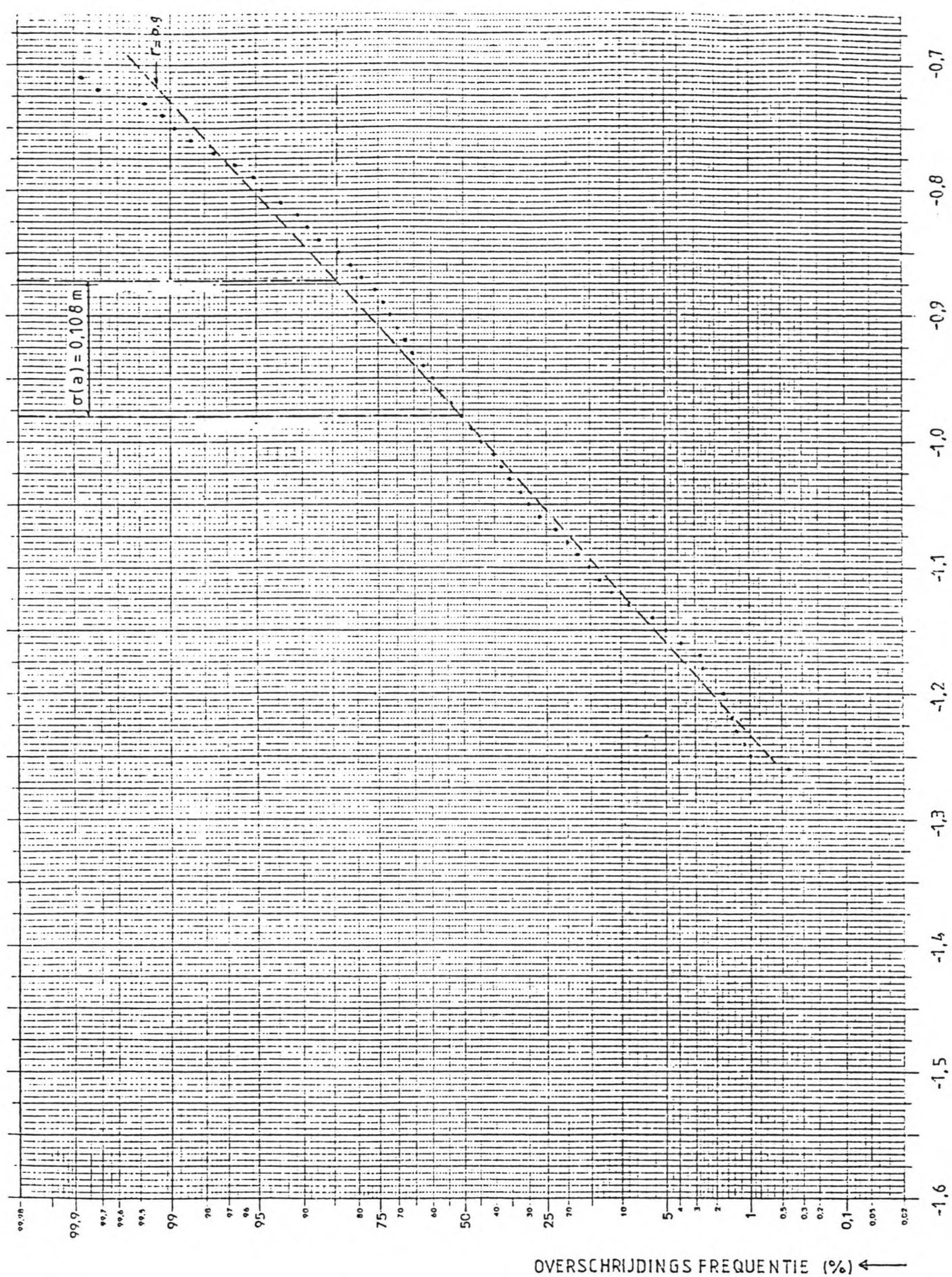
De standaarddeviatie wordt op de volgende wijze berekend:

$$\sigma(\underline{a}_{LW})^{ZH} = \frac{[E\{a_{HW}\} - E\{a_{LW}\}]^{ZH}}{[E\{a_{HW}\} - E\{a_{LW}\}]^{Ha}} \cdot \sigma(\underline{a}_{LW})^{Ha} \quad (3.8)$$

$$\sigma(\underline{a}_{LW})^{Ho} = \frac{[E\{a_{HW}\} - E\{a_{LW}\}]^{Ho}}{[E\{a_{HW}\} - E\{a_{LW}\}]^{Ha}} \cdot \sigma(\underline{a}_{LW})^{Ha} \quad (3.9)$$

Uit substitutie van formule (3.8) en (3.9) volgt voor de standaarddeviatie van het normaal verdeelde laagwater te Zwarte Haan en Holwerd resp. 0,123 m. en 0,139 m.

Kesumerend kan gesteld worden dat het astronomische laagwater te Zwarte Haan en Holwerd benaderd kan worden met een Gaussische verdeling met een verwachtingswaarde $E\{a_{\underline{LW}}\} = 1,15$ m. - N.A.P. resp. 1,36 m. - N.A.P. en een standaarddeviatie $\sigma(a_{\underline{LW}}) = 0,123$ m. resp. 0,139 m.



Figuur 3.5 Overschrijdingslijn van het astronomische laagwater te Harlingen.

4. De windopzet ter plaatse van het Friese Wad

4.1 Inleiding

Op zeeën en meren kunnen windvelden de waterstanden aanzienlijk beïnvloeden door opstuwing van het water. Deze opstuwing wordt windopzet genoemd. Uit onderzoek is gebleken (lit. 23) dat de windopzet als functie van de tijd benaderd kan worden door de volgende formule:

$$s(t) = s_{\max} \cos^2\left(\frac{\pi t}{D}\right) \quad \text{voor} \quad -\frac{1}{2}D \leq t \leq +\frac{1}{2}D \quad (4.1)$$

waarin

$s(t)$ is de windopzet als functie van de tijd (m)

s_{\max} is de maximale windopzet tijdens de storm (m)

D is de duur van de windopzet (uren)

De bovenstaande formule voor de windopzet is grafisch weergegeven in fig. 4.1.

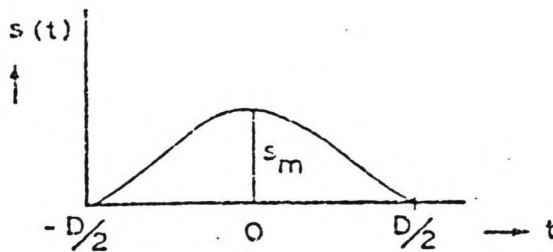


fig. 4.1. Geschematiseerde windopzet als functie van de tijd.

In bovenstaand onderzoek werd geen correlatie geconstateerd tussen de maximale windopzet en de duur van de windopzet.

In hoofdstuk 4.2. zal worden onderzocht of voorgaande relatie geldig is voor de Friese Waddenkust. Tevens wordt in dat hoofdstuk de verdeling bepaald van de duur van de windopzet op de Waddenzee.

In hoofdstuk 4.3. wordt een onderzoek gedaan naar de maximale windopzet op het Friese Wad. Hierbij is getracht langs 2 ver-

schillende wegen tot een beschrijving van de maximale windopzet te komen te weten via:

1. De statistiek van de windopzetten zelve.
2. De statistiek van de windsnelheden.

De eerste weg wordt behandeld in hoofdstuk 4.3.2 en de tweede manier in hoofdstuk 4.3.3.

Beide benaderingsmethoden worden vergeleken in 4.3.4.

4.2 De windopzet in de tijd

4.2.1 Inleiding

Ten einde de windopzet in de tijd te kunnen bestuderen, zijn waterstandgegevens benodigd. Het meest representatieve station aan het Friese Wad is Holwerd, waar aan de Veerдам sinds 1969 een peilschrijver gestationeerd is. Echter door het droogvallen van de voorliggende platen is de laagwaterregistratie erg onbetrouwbaar. Gecombineerd met de korte registratieperiode maakt dit Holwerd tot een minder geschikt station.

In een beperkt gebied als de Waddenzee zal het verloop van een storm en daarmee het verloop van de windopzet in de tijd niet veel van plaats tot plaats verschillen. Dit maakt het mogelijk waterstandgegevens van een naburig (beter geschikt) station te gebruiken. Een station, dat door de lange waarnemingsreeks bijzonder geschikt is, is Harlingen. Een bijkomend voordeel van het gebruik van Harlingen is dat voor dit station het astronomisch getij middels getijtafels reproduceerbaar is.

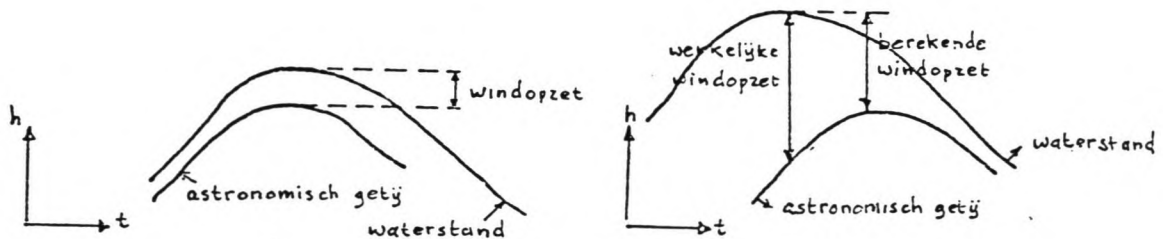
Met behulp van de waterstandregistratie te Harlingen wordt in hoofdstuk 4.2.2. een analyse gemaakt van het verloop van de windopzet in de tijd. Deze analyse vormt het uitgangspunt van het in 4.2.3. beschreven onderzoek naar de verdeling van de duur van de windopzet op de Waddenzee.

4.2.2 Analyse van het verloop van de windopzet in de tijd

Voor 38 stormen in de periode 1946-1979 is het verloop van de windopzet te Harlingen berekend. Daarbij was een bepaling van het continue verloop van de windopzet niet mogelijk, daar van het gemeten getij en het astronomisch getij slechts de hoog- en laagwaterstanden beschikbaar waren. De windopzet is dientengevolge slechts bekend ten tijde van een hoogwater of een laagwater, en is berekend als het verschil tussen het gemeten hoogwater, respectievelijk laagwater en het astronomische hoogwater, respectievelijk laagwater.

Opgemerkt dient te worden dat vooral bij grote windopzet tijdens een storm de berekende opzet af kan wijken van de werkelijke opzet als gevolg van het optreden van een tijdsverschil tussen het gemeten getij en het astronomisch getij. Bij hoogwater bijvoorbeeld treedt een vervroeging op t.o.v. het astronomische hoogwater, dat tot

gevolg heeft dat de berekende opzet kleiner is dan de werkelijke opzet tijdens hoogwater. Dit wordt geïllustreerd in figuur 4.2.



Figuur 4.2.

- a. Tijdstip van gemeten hoogwater en astronomisch hoogwater ongeveer gelijk
- b. Gemeten hoogwater treedt vroeger op dan astronomisch hoogwater.

Bij grote windopzet wordt dus de berekende windopzet onnauwkeurig. Deze onnauwkeurigheid heeft echter weinig invloed op het totale verloop en de duur van de windopzet, zodat ze verder buiten beschouwing gelaten wordt.

Voor de 38 stormen is de windopzet als verschil tussen het gemeten getij (ontleend aan lit.7) en het astronomisch getij (ontleend aan lit.4) te Harlingen berekend en grafisch uitgezet tegen de tijd in de bijlagen 5.

Vervolgens is getracht door middel van variatie in de windopzetduur per storm de best mogelijke benadering volgens formule 4.1 te verkrijgen. Gebleken is, dat voor de Waddenzee het verloop van de windopzet in de tijd redelijk tot zeer goed benaderd kan worden door formule 4.1.

4.2.3 Verdeling van de duur van de windopzet

Door schatting van de beste \cos^2 -fit is voor iedere storm een bepaalde waarde van de duur verkregen. In bijlage 6 is voor 38 stormen de aldus gevonden duur getabelleerd.

Ter bepaling van de verdeling van de duur van de windopzet wordt eerst de waarnemingsreeks homogeen gemaakt, door de stormen van 29 september 1969 en 2 april 1973 uit te sluiten. De overige 36 stormen vallen in het winter-halfjaar oktober t/m maart. M.b.v. de Weibull-methode zijn uit de frequentie van voorkomen van een bepaalde duur, de cumulatieve frequentie en de relatieve cumulatieve frequentie bepaald en vermeld in tabel 4.1.

duur windopzet (uren)	frequentie	cumulatieve frequentie	relatieve cum. frequentie (%)
70	2	2	5,41
60	3	5	13,51
58	1	6	16,22
55	6	12	32,43
52	2	14	37,84
50	3	17	45,95
48	1	18	48,65
47	1	19	51,35
45	3	22	59,46
42	2	24	64,86
40	4	28	75,68
35	3	31	83,78
34	1	32	86,49
32	3	35	94,59
25	1	36	97,30

Tabel 4.1 Frequentie van de windopzetduur op de Waddenzee.

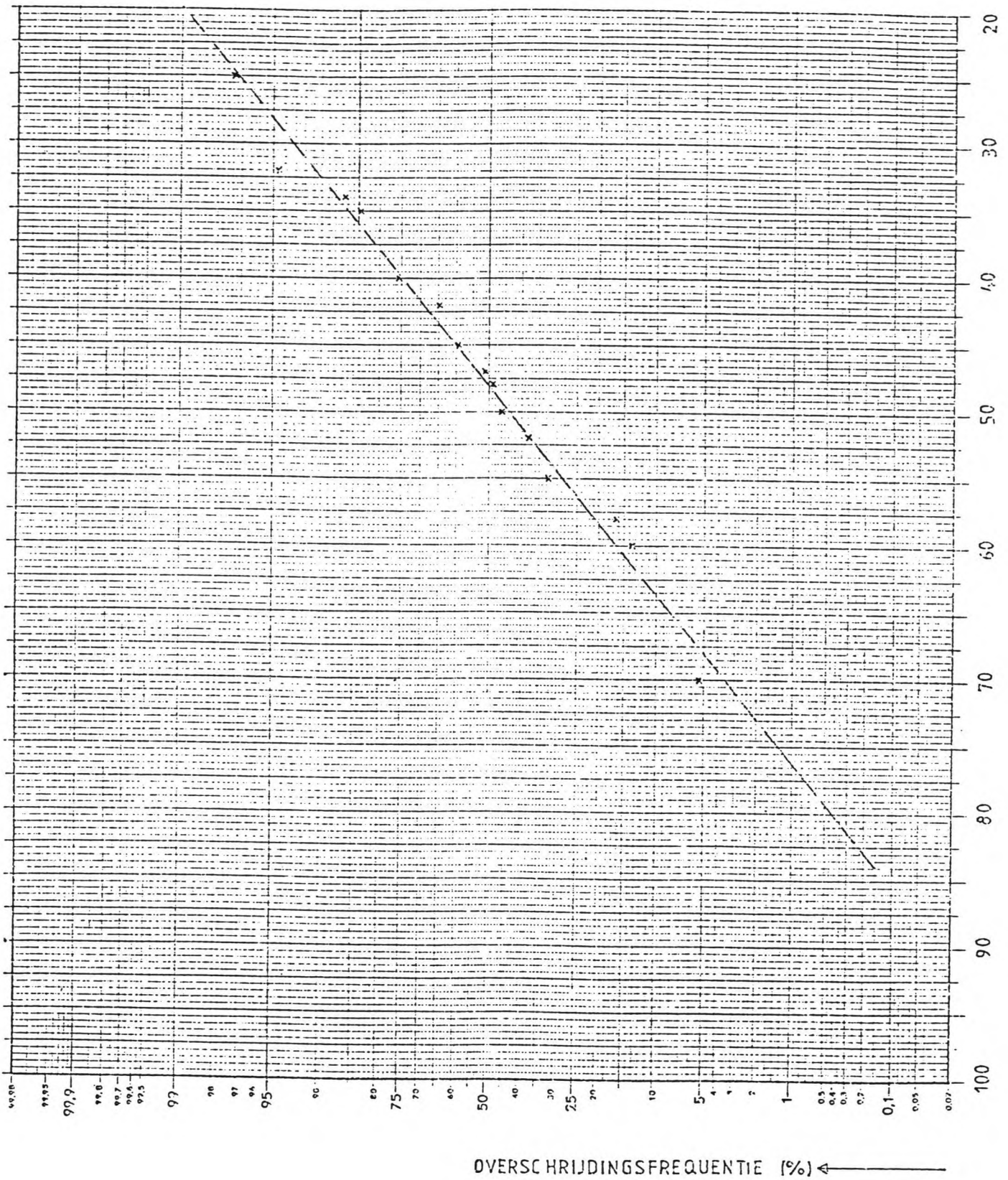
De relatieve cumulatieve frequentie is tegen de duur van de windopzet uitgezet op normaal waarschijnlijkheidspapier in fig. 4.3. De rechte lijn door de puntenverzameling is berekend m.b.v. de kleinste kwadraten-methode. De correlatiecoëfficiënt van 0,9924 geeft aan dat de duur van de windopzet goed benaderd kan worden met een Gaussische verdeling met een verwachtingswaarde $E\{D\} = D_{50\%} = 48$ uur en een standaarddeviatie $\sigma(D) = D_{50\%} - D_{15,87\%} = 12$ uur.

De kansdichtheidsfunctie van de duur is grafisch weergegeven in fig. 4.4.

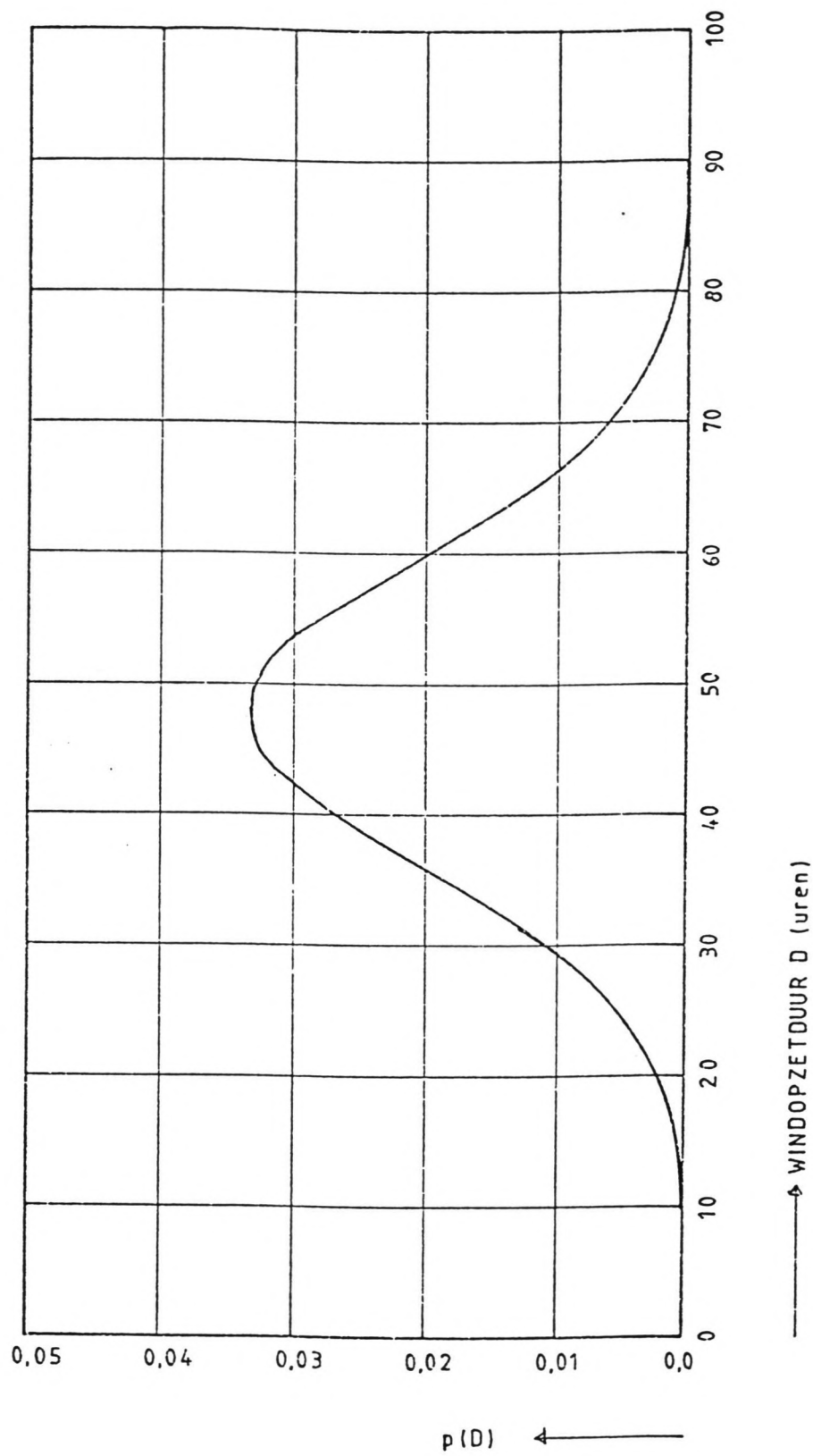
4.3 De maximale windopzet

4.3.1 Inleiding

In hoofdstuk 4.1. werd reeds aangegeven dat de problematiek van de maximale windopzet op het Friese Wad op 2 manieren aangepakt kan worden, te weten via de statistiek van de windopzetten zelfe en via de statistiek van de windsnelheden.

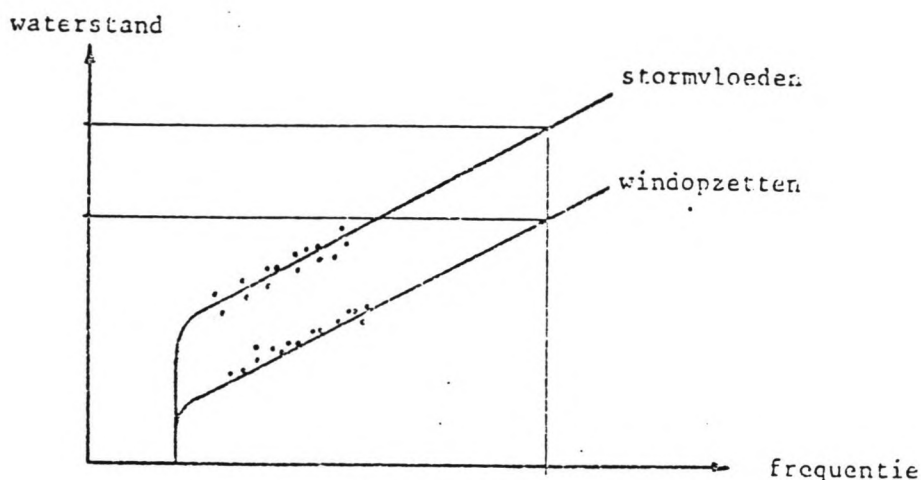


Figuur 4.3 Overschrijdingslijn van de duur van de windopzet op de Waddenzee.



Figuur 4.4 Kansdichtheidsfunctie van de duur van de windopzet op de Waddenzee.

Bij de statistiek van de windopzetten zelve wordt als volgt te werk gegaan. Op stormvloeden, de combinatie van astronomisch getij en windopzet, blijkt de extreme-waarden verdeling van Gumbel van toepassing te zijn (lit. 1 en lit. 5). Volgens Agema (lit. 1) kan dan op grafische wijze de verdeling van de windopzetten bepaald worden door te veronderstellen dat de verdeling van stormvloeden op een afstand gelijk aan het gemiddeld hoogwater boven die der windopzetten ligt, zie fig. 4.5.



Figuur 4.5 Verdeling van Gumbel voor stormvloeden en windopzetten.

Een beperking van deze methode is, dat slechts informatie wordt verkregen over de maximum windopzet in het Noord-west-kwadrant, omdat dit de overheersende windrichting is bij stormvloeden aan de Friese Waddenkust. In hoofdstuk 4.3.2. wordt de Gumbel-verdeling van de maximum windopzet op het Friese Wad bepaald.

Via de statistiek van de windsnelheden kan meer informatie over de maximum windopzet verkregen worden. De verdeling van de windsnelheid is afhankelijk van de windrichting. Wanneer de relatie bekend is tussen de windopzet en de windsnelheid, kan de verdeling van de windopzet in afhankelijkheid van de windrichting bepaald worden.

In hoofdstuk 4.3.3. wordt dit uitgewerkt voor het Friese Wad. Tenslotte worden in hoofdstuk 4.3.4 de beide benaderingsmethoden met elkaar vergeleken.

4.3.2 Verdeling van de maximale windopzet volgens Gumbel

De verdeling van de maximale windopzet per storm wordt grafisch afgeleid uit de verdeling van de hoogwaterstanden, zoals beschreven in de inleiding.

Op stormvloedstanden blijkt de extreme-waarden verdeling van Gumbel van toepassing te zijn. Ten einde een homogene waarnemingsreeks te verkrijgen, dienen de jaarmaxima van de stormvloedstanden beschouwd te worden (lit. 5).

In het navolgende onderzoek zijn de stormvloedstanden te Nieuw-Bildt beschouwd, ontleend aan lit. 7.

Waterstaandgegevens zijn beschikbaar vanaf 1868. Echter omdat op 28 mei 1932 de Zuiderzee werd afgesloten, zijn slechts de waterstanden vanaf 1933 bruikbaar.

De geregistreeerde jaarmaxima te Nieuw-Bildt zijn verzameld in bijlage 7. Voor de jaren 1937, 1957, 1961, 1963-1965 en 1968 zijn geen gegevens beschikbaar. Voor de jaren 1971, 1975 en 1978 is het jaarmaximum geschat uit de waterstand te Holwerd.

Teneinde uit de geregistreeerde jaarmaxima de verdeling te kunnen bepalen, zijn de maxima gerangschikt naar grootte. Met behulp van de Weibull-methode is de overschrijdingsfrequentie van ieder maximum bepaald in tabel 4.2.

In fig. 4.6 is de maximale waterstand uitgezet tegen de overschrijdingsfrequentie op Gumbel-papier. Een Gumbel-verdeling geeft op dit papier een rechte lijn. Door de punten is een regressie rechte berekend. De correlatie-coëfficiënt van 0,995 geeft aan dat de jaarmaxima van de stormvloedstanden te Nieuw-Bildt bij benadering Gumbel-verdeeld zijn. De overschrijdingslijn van de maximale windopzet wordt vervolgens bepaald door de gevonden rechte lijn over een afstand, gelijk aan het gemiddeld hoogwater te Nieuw-Bildt, te verschuiven. Het gemiddeld hoogwater te Nieuw-Bildt is gelijk aan 0.95 m. + N.A.P. (lit. 4). In fig. 4.6 wordt de overschrijdingslijn voor de maximale windopzet te Nieuw-Bildt voorgesteld door lijn 2. De kansdichtheidsfunctie van de maximale windopzet wordt gegeven door:

$$p(\underline{s}_{\max}) = \alpha \exp \left[-\alpha (s_{\max} - \beta) - \exp \{ -\alpha (s_{\max} - \beta) \} \right] \quad (4.2)$$

waarin

$p(\underline{s}_{\max})$ is de kansdichtheid van s_{\max}

α en β kunnen geschat worden uit de vergelijking van de overschrijdingslijn $y_{\text{red}} = \alpha (s_{\max} - \beta)$

y_{reduced} wordt weergegeven door de onderste horizontale as in fig. 4.6.

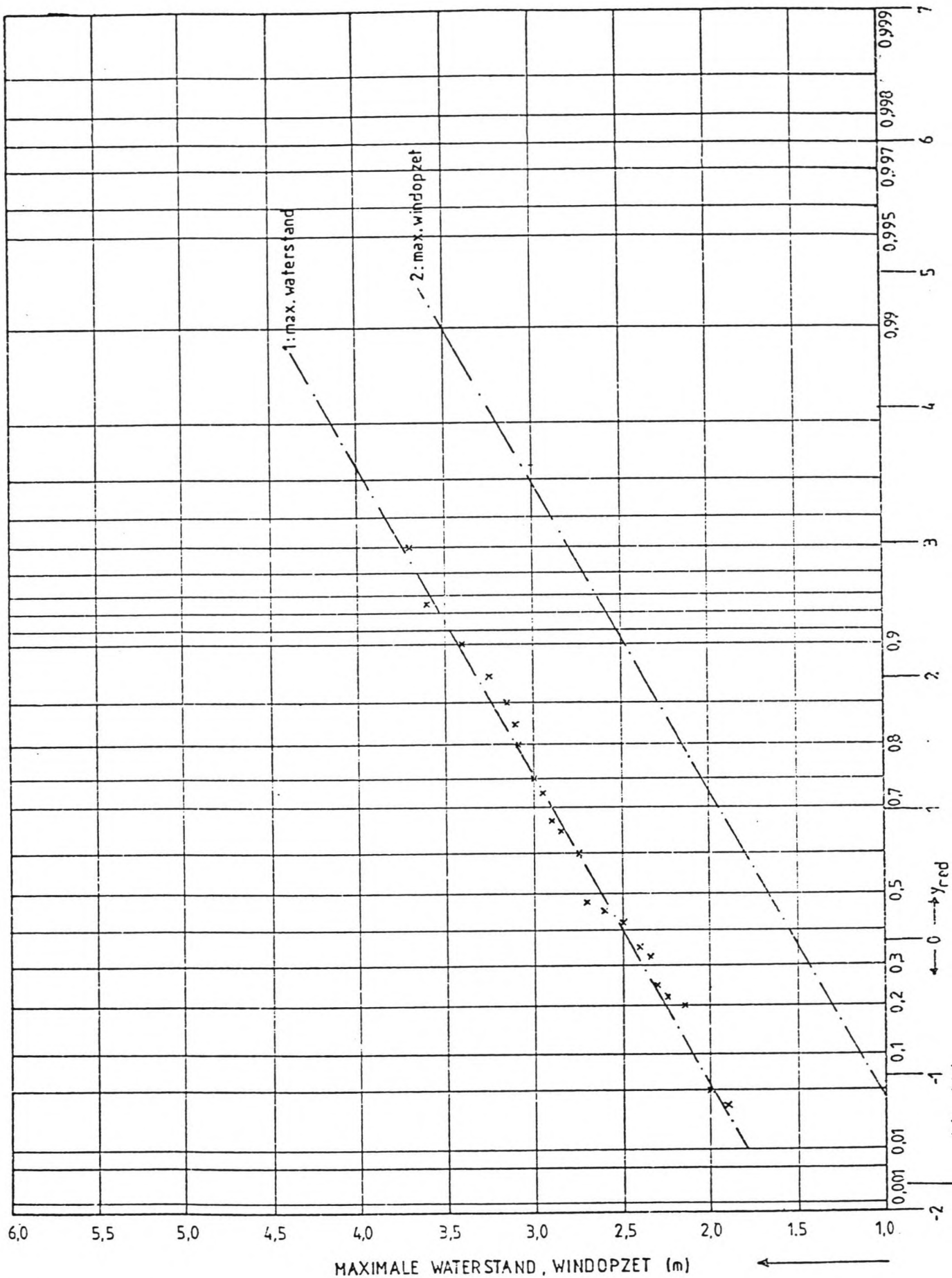
De overschrijdingslijn kan naar grotere windopzetten geëxtrapoleerd worden. Enige voorzichtigheid daarbij is geboden. Als gevolg van de

<u>S.V. stand</u>	<u>frequentie</u>	<u>cumulatieve</u> <u>freq.</u>	<u>overschrijdings-</u> <u>frequentie</u>
(m + N.A.P.)		(m)	(m/N+1)
3,70	2	2	0,050
3,60	1	3	0,075
3,40	1	4	0,100
3,25	1	5	0,125
3,15	1	6	0,150
3,10	1	7	0,175
3,08	1	8	0,200
3,00	2	10	0,250
2,95	1	11	0,275
2,90	2	13	0,325
2,85	1	14	0,350
2,75	2	16	0,400
2,70	5	21	0,525
2,60	1	22	0,550
2,50	1	23	0,575
2,40	3	26	0,650
2,35	1	27	0,675
2,30	3	30	0,750
2,25	1	31	0,775
2,15	1	32	0,800
2,00	6	38	0,950
1,90	1	39	0,975

N = aantal maxima = 39

Tabel 4.2 Overschrijdingsfrequentie van de jaarmaxima van de hoogwaterstanden te Nieuw-Bildt.

bepaalde waarnemingsperiode (39 jaar) kan de werkelijke overschrijdingsfrequentie afwijken van de in tabel 4.2 berekende frequentie. Eventuele afwijkingen komen het sterkst naar voren in de extreem lage en extreem hoge jaarmaxima. De laagste waterstanden zullen relatief een grotere overschrijdingsfrequentie hebben en de hoogste waterstanden relatief een kleinere frequentie.



Figuur 4.6 Overschrijdingslijn van de jaarmaxima van de waterstand en de windopzet te Nieuw-Bildt.

4.3.3 De maximale windopzet als functie van de windsnelheid en de windrichting

4.3.3.1 Inleiding

De windopzet ter plaatse van het Friese Wad is opgebouwd uit twee componenten, te weten een Noordzee-component, als gevolg van de windvelden boven de Noordzee, en een locale component, veroorzaakt door windvelden boven de Waddenzee.

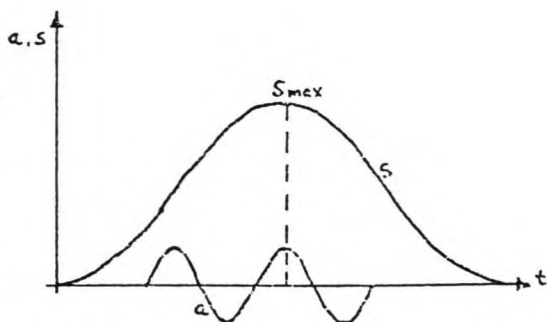
In dit hoofdstuk wordt getracht een relatie te vinden tussen de windopzet en de windgegevens langs 2 wegen. In 4.3.3.2 wordt onderzocht of er een verband afgeleid kan worden tussen de windopzet, berekend uit waterstandgegevens te Holwerd, en de windsnelheid gemeten op West-Terschelling. Vervolgens wordt in 4.3.3.3 op theoretische wijze een relatie bepaald tussen de windopzet en de windsnelheid te Holwerd. In 4.3.3.4 worden de gevonden resultaten met elkaar vergeleken. In 4.3.3.5 wordt het verband tussen de windopzet en de windsnelheid op het Friese Wad vastgelegd. Tenslotte wordt in 4.3.3.6 de verdeling van de windopzet over de windsnelheid uit de metingen afgeleid.

4.3.3.2 Empirisch verband tussen windopzet en windsnelheid

Getracht is een verband te bepalen tussen de maximale windopzet per storm te Holwerd en de windsnelheid boven de Waddenzee. Gegevens omtrent de windsnelheid en windrichting zijn ontleend aan waarnemingen t.p.v. station West-Terschelling. Aangenomen is dat de waarnemingen op West-Terschelling representatief zijn voor het windbeeld boven de Noordzee en de Waddenzee. Onderzoek heeft inderdaad aangetoond dat er een sterke correlatie bestaat tussen locale windvelden boven de Waddenzee en de Zuidelijke Noordzee (lit. 19). Verder is uit recent verricht onderzoek gebleken dat de windsnelheidsverticaal over 10-40 km. boven de Waddenzee voldoende gelegenheid krijgt zich wederom aan te passen, zodat aan het Friese Wad dezelfde maximale uurgemiddelde windsnelheden bereikt kunnen worden als boven de Noordzee (lit. 16).

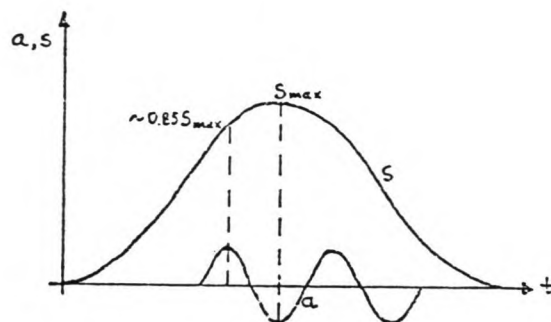
De maximale windopzet per storm kan berekend worden uit waterstandgegevens door de gemeten maximale waterstand te scheiden van het astronomisch getij.

De waterstandgegevens te Holwerd zijn ontleend aan lit. 7. Zoals reeds in hoofdstuk 4.2 aan de orde kwam, zijn slechts de hoogwaterstanden te Holwerd bekend. In het navolgende wordt dientengevolge de maximale windopzet berekend als het verschil tussen het gemeten maximale hoogwater en het astronomische hoogwater. Uiteraard dient dan het maximale hoogwater in de buurt van de maximale opzet te liggen. Dit wordt geïllustreerd in fig. 4.7 op schematische wijze.



Figuur 4.7^a

astr. hoogwater ongeveer ten
tijde van max. windopzet.



Figuur 4.7^b

astr. laagwater ongeveer ten
tijde van max. windopzet.

Uit fig. 4.7 blijkt dat in geval van samenvallen van een astronomisch laagwater en maximale windopzet, de berekening van de maximale opzet, als verschil van het gemeten maximale hoogwater en het astronomisch hoogwater, een kleinere waarde geeft dan in werkelijkheid het geval is. Voor een windopzet met gemiddelde duur bedraagt het verschil ongeveer 15%. Deze mogelijke onnauwkeurigheid is te elimineren door slechts die windopzet te beschouwen, waarbij het maximum ongeveer samenvalt met het astronomisch hoogwater. Dit samenvallen is gecontroleerd aan de hand van waterstandmetingen te Harlingen. Wanneer uit berekening blijkt dat de maximale windopzet te Harlingen samenvalt met een astronomisch hoogwater, dan wordt aangenomen dat dit voor Holwerd ook geldt, aangezien het astronomisch hoogwater te Holwerd slechts 43 minuten later optreedt dan dat te Harlingen.

Van het astronomisch getij te Holwerd zijn geen tafels beschikbaar. Een manier om de waarde van het astronomisch hoogwater te Holwerd te reproduceren, is deze af te leiden uit het astronomisch hoogwater te Harlingen, waarvan wel tafels beschikbaar zijn.

Volgens Schalkwijk (lit. 19) treedt bij windsnelheden tot 3 m/s geen windeffect van betekenis op. Een eventueel gemeten verhoging of verlaging van de waterspiegel onder die omstandigheden is een gevolg van barometrische invloeden. Wanneer de barometrische invloed voor Harlingen en Holwerd tijdens een windstille periode gelijk verondersteld wordt, dan kan direct uit het gemeten hoogwater het astronomisch hoogwater te Harlingen en Holwerd bepaald worden. In de periode 1969-1979 zijn 22 windstille perioden van 6 uur of meer geselecteerd. De bijbehorende gemeten hoogwaterstanden en daaruit afgeleide astronomisch hoogwaters te Harlingen en Holwerd, zijn vermeld in bijlage 8.

Een correlatie-berekening, uitgevoerd tussen het astronomisch hoogwater te Harlingen en het astronomisch hoogwater te Holwerd geeft als resultaat:

$$\langle a_{HW} \rangle^{\text{Holwerd}} = 0.929 \langle a_{HW} \rangle^{\text{Harlingen}} + 21.768 \quad (4.3)$$

a_{HW} in cm +N.A.P.

(correlatie-coëfficiënt = 0.981)

Met behulp van bovenstaande formule is het mogelijk het astronomisch hoogwater te Holwerd af te leiden uit de getijtafel voor Harlingen. Van een storm kan nu de maximale windopzet te Holwerd benaderd worden, welke vervolgens gecorreleerd kan worden met een maatgevende windsnelheid. De maatgevende windsnelheid is niet gelijk aan het maximale uurgemiddelde van de windsnelheid, welke gedurende een storm bereikt wordt. Orrt en Dines (lit. 19) hebben aangetoond dat, als gevolg van het niet-stationair zijn van een windveld en de traagheid van de watermassa, het maximum in de opzet in het algemeen later zal plaatsvinden dan het windsnelheidsmaximum. Zie fig. 4.8.

Voor de Noordzee werd een "time-lag" van ca. 6 uur gevonden. Deze "time-lag" treedt alleen op bij windvelden boven de Noordzee; bij locale windvelden is deze te verwaarlozen.

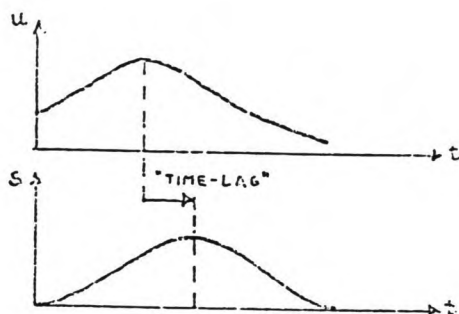
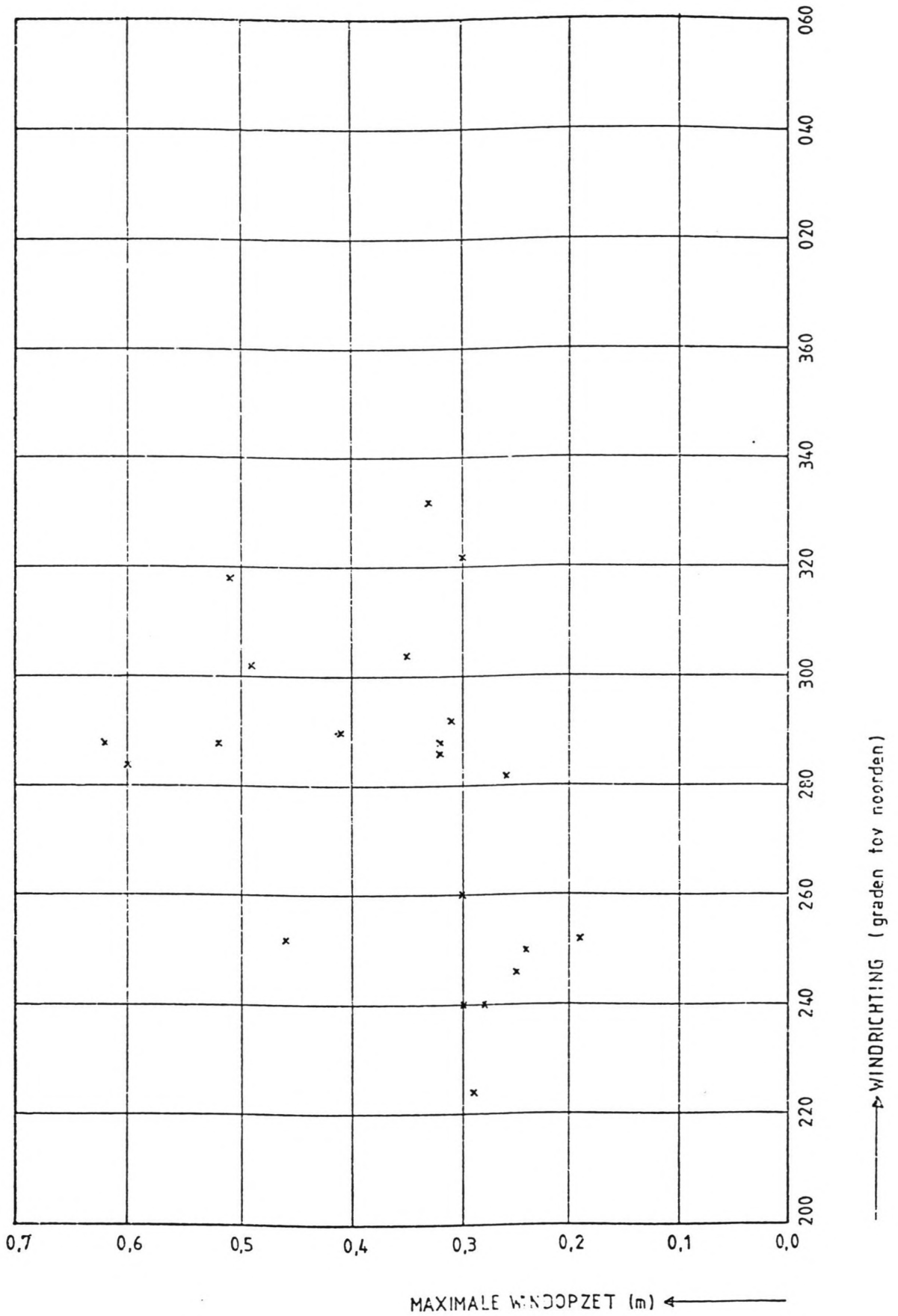


fig. 4.8. Tijdsverschil in optreden maximum opzet en maximum windsnelheid.

Aangezien windvelden boven de Zuidelijke Noordzee de belangrijkste oorzaak zijn van windopzet aan de Waddenkust (zie hoofdst. 2.1) zal ook hier sprake zijn van een "time-lag". Schalkwijk heeft aangetoond dat het grootste deel van de windopzet aan de Nederlandse kust bestaat uit evenwichtsupzet. De wind dient over voldoende lange tijd over het wateroppervlak te strijken om de bijbehorende evenwichtsupzet te veroorzaken. In het Deltarapport (lit. 12) wordt de vereiste duur op 5 à 6 uur geschat. Als maatgevend wordt in het navolgende onderzoek de 5-uurs gemiddelde windsnelheid aangehouden. De windsnelheidsgegevens van station West-Terschelling zijn ontleend aan lit. 7.

Voor 21 stormen in de periode 1969-1979 is de maximale windopzet te Holwerd gecorreleerd met de 5-uurs gemiddelde windsnelheid, zoals geregistreerd door station West-Terschelling (zie bijlage 9).



Figuur 4.9 Maximale windopzet te Holwerd t.g.v. een 5-uurs gemiddelde windsnelheid van 10 m/s als functie van de windrichting.

Zowel empirisch als theoretisch onderzoek heeft aangetoond dat er een kwadratisch verband bestaat tussen de windsnelheid en de evenwichtswindopzet aan de Nederlandse kust (lit. 19). Onder deze aanname kan de in bijlage 9 vermelde windopzet herleid worden tot een windopzet horende bij één bepaalde windsnelheid. In tabel 4.3 is de windopzet gereduceerd tot windopzet horende bij een, arbitrair gekozen, windsnelheid van 10 m/s volgens

$$s(10) = \left(\frac{10}{u_5} \right)^2 s(u_5) \quad (4.4)$$

waarin

$s(10)$ is de maximale windopzet als gevolg van een 5-uurs gemiddelde windsnelheid van 10 m/s.

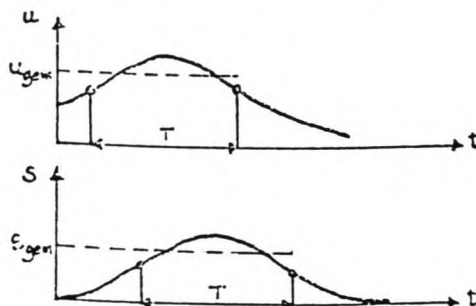
u_5 is de 5-uurs gemiddelde windsnelheid

$s(u_5)$ is de maximale windopzet als gevolg van een windsnelheid u_5

In fig. 4.9 is de windopzet horende bij een windsnelheid van 10 m/s uitgezet tegen de windrichting. Uit deze figuur blijkt dat de spreiding in de metingen te groot is om een significant verband te kunnen afleiden. Deze grote spreiding is een gevolg van:

- Onnauwkeurigheden in de berekende windopzet.
Als uitgangspunt is de maximale windopzet tijdens een storm genomen. Als gevolg van het niet-stationair zijn van een windveld kan er een zgn. "opzweep-effect" optreden, waardoor de maximale windopzet afwijkt van de evenwichtswindopzet.
- Onnauwkeurigheden in de windsnelheid. De windsnelheid, geregistreerd op Terschelling, wijkt mogelijk af van de windsnelheid op de Noordzee.

Bovengenoemde onnauwkeurigheden kunnen verkleind worden door de windopzet en de windsnelheid te middelen over de tijd. De gemiddelde windopzet gedurende een storm wordt dan gecorreleerd met de gemiddelde windsnelheid en windrichting op de manier zoals geïllustreerd in figuur 4.10.



Figuur 4.10 Middeling over de windsnelheid en de windopzet.

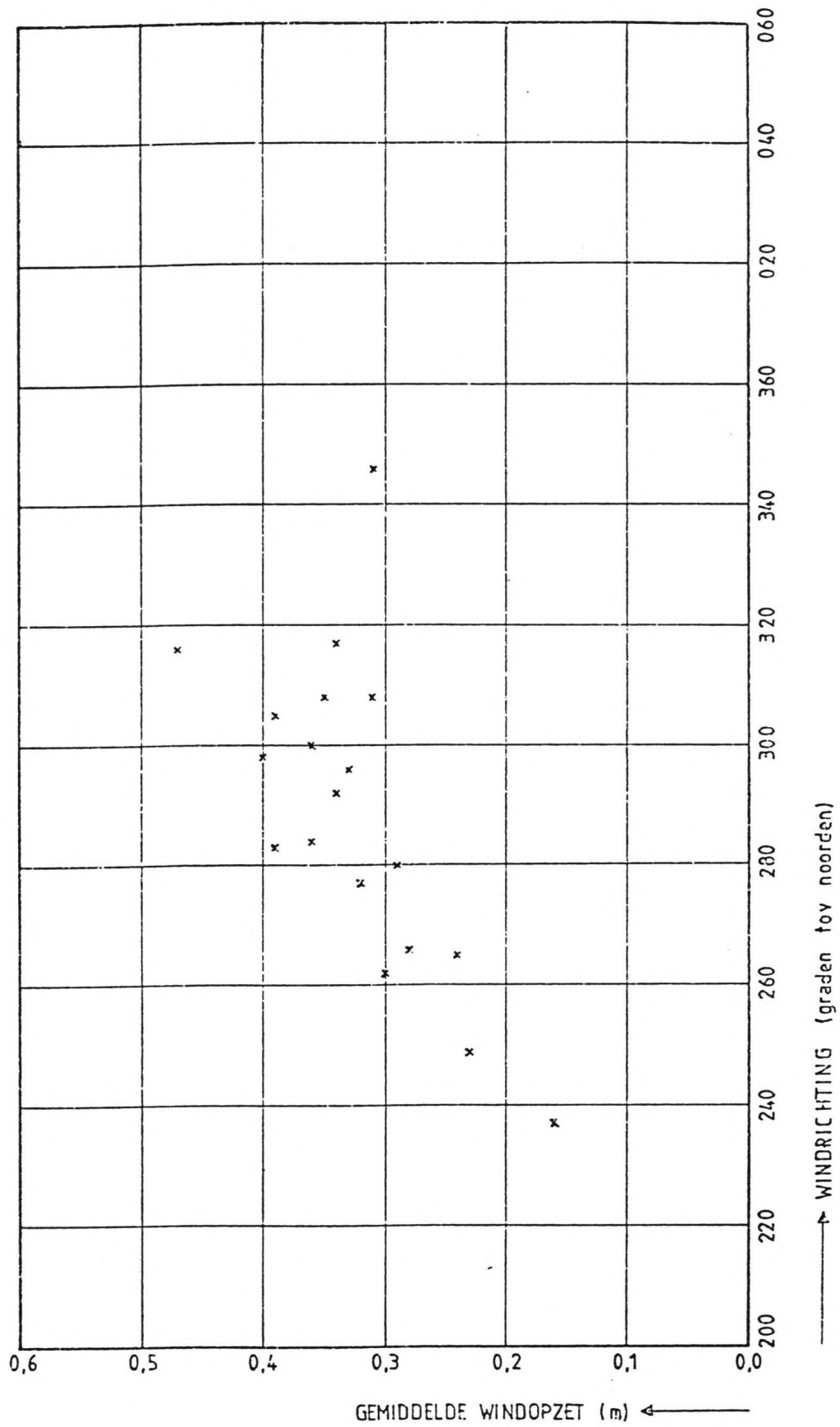
windrichting ($^{\circ}$)	u_5 (m/s)	$s(u_5)$ (m)	$(10/u_5)^2$	$s(10)$ (m)
224	16,1	0,75	0,386	0,29
240	17,3	0,85	0,334	0,28
240	21,2	1,34	0,222	0,30
246	18,8	0,88	0,283	0,25
250	19,8	0,96	0,255	0,24
252	19,0	0,90	0,277	0,19
252	14,0	0,69	0,510	0,46
260	21,4	1,39	0,218	0,30
282	21,8	1,25	0,210	0,26
284	15,4	1,42	0,422	0,60
286	20,8	1,37	0,231	0,32
288	20,0	1,18	0,250	0,52
288	13,8	2,07	0,525	0,32
288	13,8	0,61	0,525	0,62
290	17,4	1,24	0,330	0,41
292	19,6	1,19	0,260	0,31
302	11,5	0,78	0,756	0,59
304	20,0	1,39	0,250	0,35
318	18,8	1,80	0,283	0,51
322	19,2	1,12	0,271	0,30
332	21,7	1,56	0,212	0,33

Tabel 4.3 Maximum windopzet te Holwerd t.g.v. een windveld met $u_5 = 10$ m/s als functie van de windrichting.

19 Stormen uit de periode 1969-1979 zijn op bovenstaande manier verwerkt in bijlage 10.

De gevonden gemiddelde opzetten zijn omgerekend naar gemiddelde opzetten, behorende bij een gemiddelde windsnelheid van 10 m/s. Deze zijn vermeld in tabel 4.4.

In figuur 4.11 is de gemiddelde windopzet horende bij een gemiddelde windsnelheid van 10 m/s tegen de windrichting uitgezet. De gevonden puntenverzameling duidt op een significant verband tussen de evenwichts-windopzet, de windsnelheid en -richting ter plaatse van het Friese Wad. In de volgende paragraaf wordt de puntenverzameling vergeleken met het meer theoretische verband, verkregen middels de evenwichts-windopzetformules van Weenink.



Figuur 4.11 Gemiddelde windopzet te Holwerd t.g.v. een gemiddelde windsnelheid van 10 m/s als functie van de windrichting.

windrichting ($^{\circ}$)	\bar{u} (m/s)	$\bar{s}(\bar{u})$ (m)	$(10/\bar{u})^2$	$\bar{s}(10)$ (m)
237	14,3	0,32	0,489	0,16
249	12,3	0,35	0,661	0,23
262	13,4	0,54	0,557	0,30
265	15,1	0,55	0,439	0,24
266	10,0	0,28	1,000	0,28
277	15,6	0,77	0,411	0,32
280	15,8	0,73	0,401	0,29
283	14,5	0,83	0,476	0,39
284	10,1	0,37	0,980	0,36
292	16,9	0,97	0,350	0,34
296	13,3	0,58	0,565	0,33
298	15,2	0,92	0,433	0,40
300	14,3	0,74	0,489	0,36
305	11,1	0,48	0,812	0,39
308	23,7	1,73	0,178	0,31
308	13,3	0,62	0,565	0,35
316	12,5	0,74	0,640	0,47
317	14,6	0,73	0,469	0,34
346	19,8	1,23	0,255	0,31

Tabel 4.4 Gemiddelde windopzet te Holwerd t.g.v. een windveld met $u = 10$ m/s als functie van de windrichting.

4.3.3.3 Theoretisch verband tussen windeffect en windsnelheid

De windopzet ter plaatse van het Friese Wad bestaat uit een component uit de zuidelijke Noordzee en een locale component. De Noordzee component kan berekend worden met een methode, ontwikkeld door Schalkwijk in 1947 en verbeterd en uitgebreid door Weenink in 1958. Voor een beschrijving van deze methode wordt verwezen naar hoofdstuk 2.1. In dit hoofdstuk zal slechts gebruik gemaakt worden van de resulterende formules.

De locale component betreft de windopzet als gevolg van een windveld boven de Waddenzee. Voor de berekening ervan wordt gebruik gemaakt van een empirische formule, afgeleid door Verploegh en Groen, uit metingen op de Oostelijke Waddenzee.

Schalkwijk en Weenink hebben een methode opgesteld ter berekening van het windeffect. Numeriek kan voor elk punt aan de Nederlandse Kust het evenwichtswind-effect, als gevolg van een stationair windveld op de Noordzee, berekend worden.

Een goede benadering voor het evenwichtswind-effect ter plaatse van het Zeegat van Ameland (Borndiep) kan op grafische wijze verkregen worden. Daartoe wordt gebruik gemaakt van de formules die Weenink afgeleid heeft voor de locaties Eierlandse Gat, Borkum en Cuxhaven. In het door Weenink opgestelde model van de Noordzee hebben bovengenoemde plaatsen de volgende coördinaten:

	<u>x (km)</u>	<u>y (km)</u>
Eierlandse Gat	0,00	983,25
Borkum	-132,25	983,25
Cuxhaven	-270,25	983,25

Zie figuur 4.12. Het Borndiep blijkt ongeveer op één lijn te liggen met de plaatsen Eierlandse Gat, Borkum en Cuxhaven. In het navolgende wordt verondersteld dat het Borndiep op één lijn ligt met de bovengenoemde locaties. De daardoor veroorzaakte fout in de berekening werkt in ongunstige zin door in het eindresultaat; met andere woorden, er wordt een grotere verhoging berekend. Het verschil is echter klein.

De in hoofdstuk 2.1. beschreven evenwichts-windeffectformules voor het Zuidvak (S) van de Noordzee zijn van de vorm:

$$s_s = (A_s \cos \alpha_s + C_s \sin \alpha_s) \cdot B_s \quad (4.5)$$

waarin

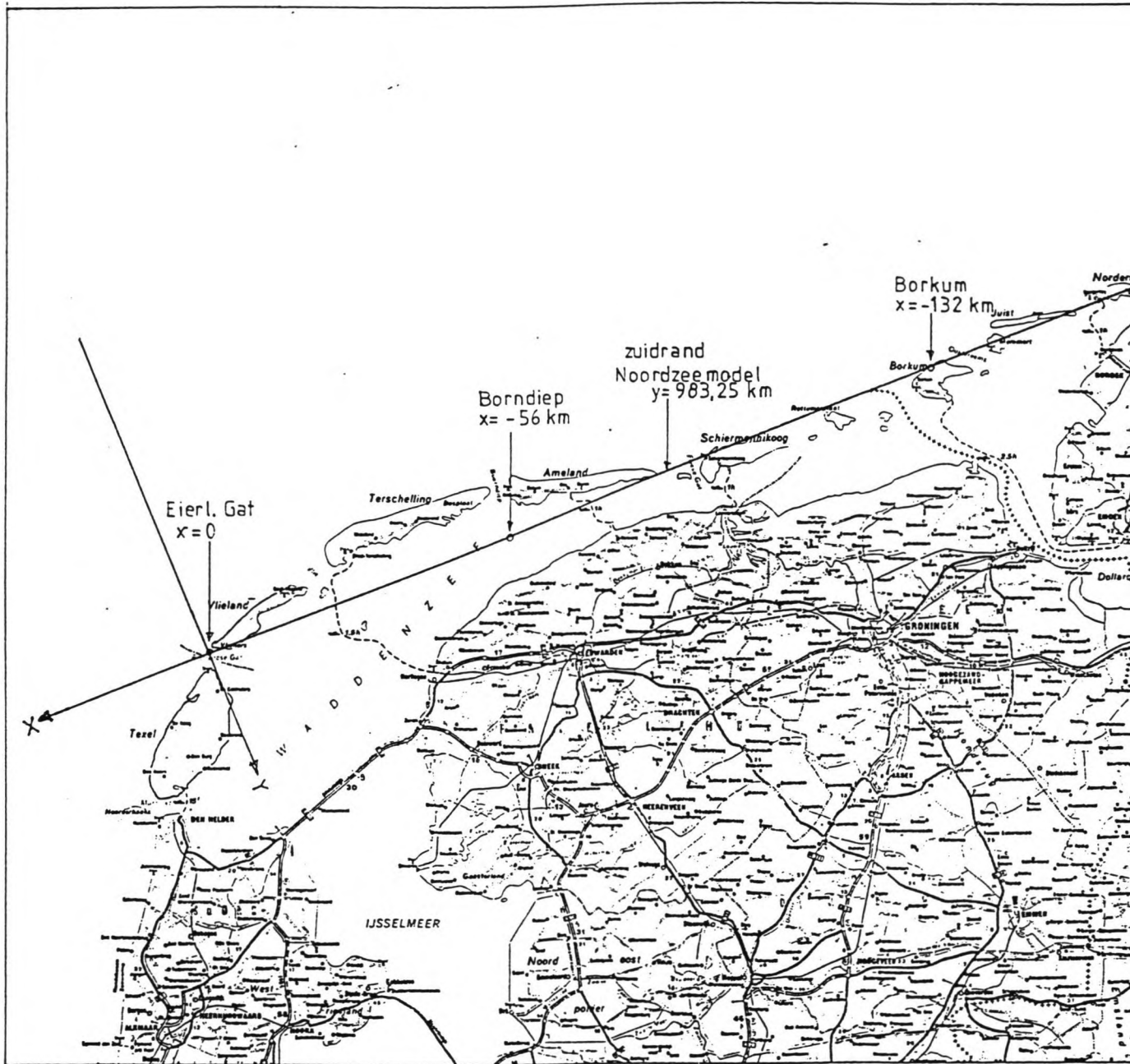
s_s is het evenwichtswindeffect t.g.v. stat. windveld boven vak S

α_s is de hoek tussen y-as van model en windrichting

C_s A_s zijn de coëfficiënten, afhankelijk van de plaats

B_s is een coëfficiënt, afhankelijk van de windsnelheid

Het zuidvak van de Noordzee S is onderverdeeld in de vakken I, II en III, zie figuur 2.1. Voor elk van deze vakken heeft Weenink een formule van bovenstaande vorm berekend. De coëfficiënten A en C voor het gehele vak S kunnen uit de coëfficiënten van de afzonderlijke velden berekend worden door sommatie.



Figuur 4.12 Overzichtskaartje zuidrand van Noordzeemodel.

Voor de locaties Eierlandse Gat, Borkum en Cuxhaven zijn de coëfficiënten A en C per vak bekend (zie hoofdstuk 2.1.). A en C variëren slechts met de plaats. Aangezien de y-coördinaat van bovengenoemde plaatsen constant blijkt, zijn A en C dientengevolge slechts afhankelijk van de x-coördinaat. De variatie A en C per vak is in figuur 4.13 en 4.14 uitgezet tegen de variatie van de x-coördinaat. De waarde van A en C voor de locatie Borndiep (met x-coördinaat = -56 km) kan vervolgens grafisch geschat worden met als resultaat:

$$\begin{array}{ll} A_I & = + 0,27 & C_I & = - 0,15 \\ A_{II} & = - 0,12 & C_{II} & = - 0,18 \\ A_{III} & = + 0,23 & C_{III} & = - 0,08 \end{array}$$

Dit geeft voor het gehele vak S:

$$A_s = A_I + A_{II} + A_{III} = + 0,38$$

$$C_s = C_I + C_{II} + C_{III} = - 0,41$$

Bovenstaande coëfficiënten ingevuld in de windeffect-formule leidt tot:

$$s_s \text{ (Borndiep)} = (0,38 \cos \alpha_s - 0,41 \sin \alpha_s) \cdot B_s \quad (4.6)$$

$$\text{waarin } B_s = \frac{a \tau_s}{\rho g d_s} = \frac{a \rho_L \cdot 0.0033 \cdot u(10)^2}{\rho g d_s} \quad (\text{zie hfdst. 2.1.2.}) \quad (4.7)$$

waarin

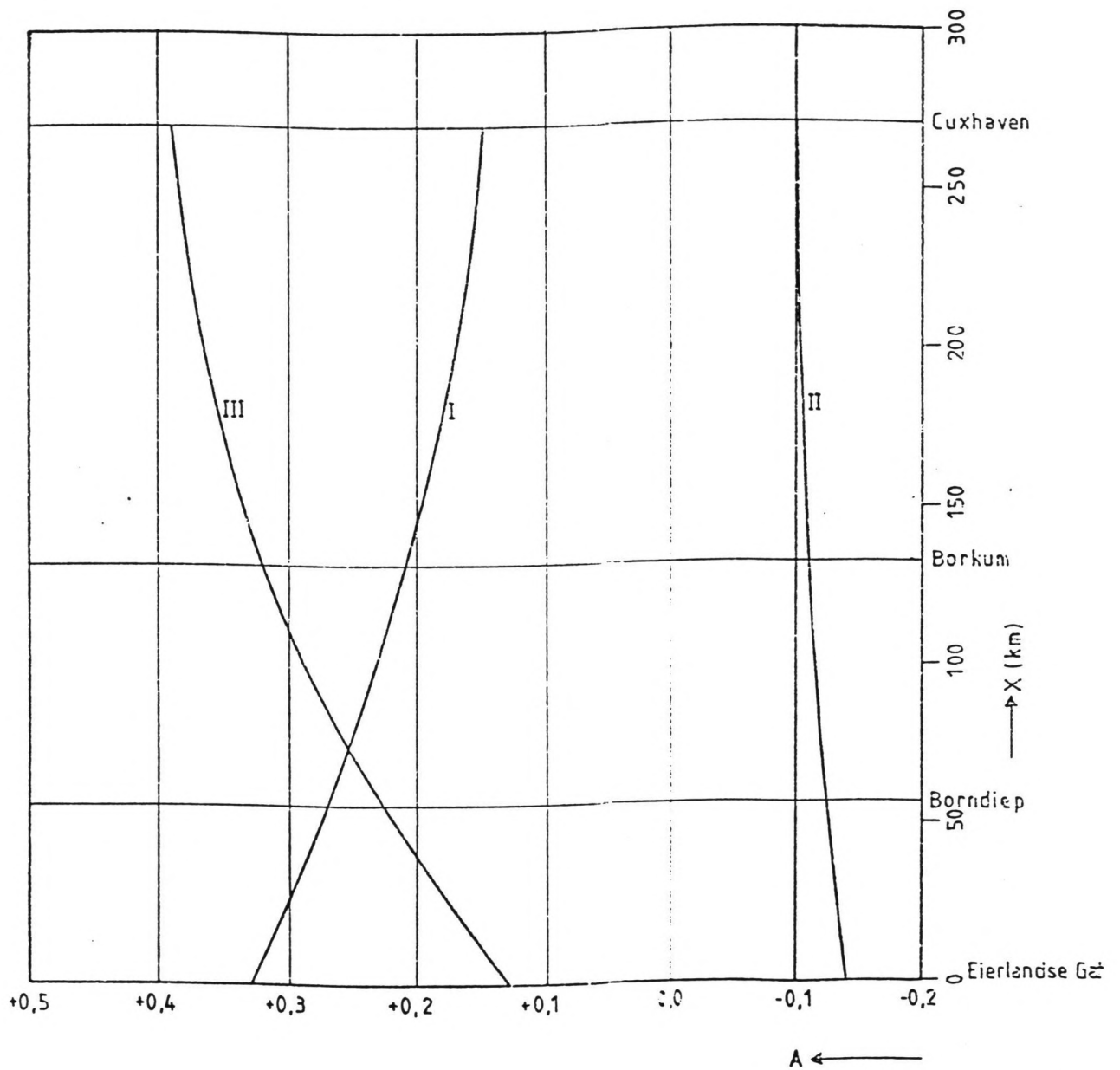
a is de breedte van de Noordzee in het model (m)

ρ is de dichtheid van het zeewater (kg/m^3)

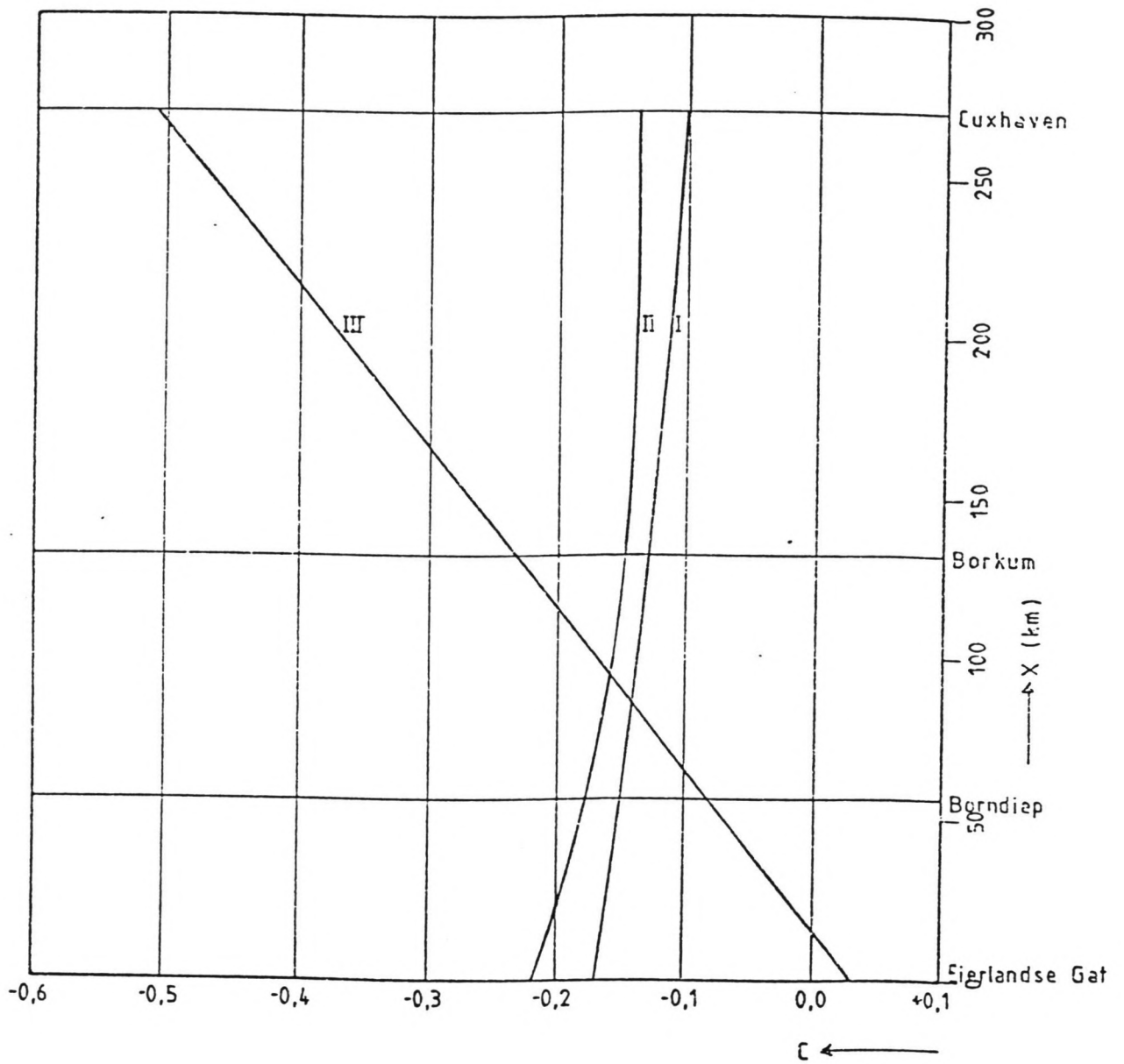
ρ_L is de luchtdichtheid (kg/m^3)

g is de versnelling van de zwaartekracht (m/s^2)

d_s is de harmonische diepte van de Zuidelijke Noordzee (m)



Figuur 4.13 Coefficiënt A als functie van de plaatscoördinaat x .



Figuur 4.14 Coëfficiënt C als functie van de plaatscoördinaat x .

$u(10)$ is de windsnelheid op 10 meter boven het zee-oppervlak (m/s)

α_s is de hoek tussen y-as van het model en de windrichting. De y-as van het model maakt een hoek van -20° met het Noorden.

M.b.v. bovenstaande formule kan het evenwichts-windeffect ter plaatse van het Borndiep als gevolg van een stationair windveld op de Zuidelijke Noordzee benaderd worden.

Om tot de totale waterstandsverhoging ter plaatse van het Friese Wad te komen, dient het Noordzee-effect gesommeerd te worden met het lokale effect.

Verploegh en Groen (lit. 22) constateerden dat het verband tussen de windopzet en de windsnelheid op de Waddenzee niet kwadratisch is, zoals op de Noordzee, maar beter beschreven kan worden met de relatie:

$$\Delta s = C(\alpha) \cdot u(10)^{2,4} \quad (4.8)$$

waarin

Δs is de additionele opzet (m)

$C(\alpha)$ is de evenredigheidsfactor

$u(10)$ is de windsnelheid op 10 meter boven zee-oppervlak (m/s)

Een dergelijk verband werd ook gevonden bij onderzoek op de grote Amerikaanse meren (lit. 19)

De evenredigheidsfactor bleek afhankelijk te zijn van de strijklengte, de diepte en de windrichting, op de volgende wijze:

$$C(\alpha) = \frac{b \cdot F}{d} \cos(\alpha - \alpha_0) \quad (4.9)$$

waarin

F is de strijklengte (km)

d is de harmonisch gemiddelde diepte (m)

b is de evenredigheidsfactor

α is de windrichting t.o.v. Noorden (graden)

α_0 is de richting van het maximale effect t.o.v. het Noorden (graden)

Voor de evenredigheidsfactor werd empirisch de waarde $1 \cdot 10^{-7} \text{ m (m/s)}^{-2,4}$

gevonden.

4.3.3.4 Vergelijking gemeten en berekende windopzet te Holwerd

De metingen kunnen met de theorie vergeleken worden door m.b.v. de formules (4.6) en (4.8) de windopzet als gevolg van een windsnelheid van 10 m/s te Holwerd te bepalen.

Het evenwichtswindeffect ter plaatse van het Borndiep, zijnde het Noordzee-effect, kan worden berekend met m.b.v. formule:

$$s_s = (0,38 \cos \alpha_s - 0,41 \sin \alpha_s) \frac{a \rho_L 0,0033 u(10)^2}{\rho g d_s} \quad (4.10)$$

waarin

$$a = 575 \cdot 10^3 \text{ m}$$

$$u(10) = 10 \text{ m/s}$$

$$\rho = 1030 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_L = 1,25 \text{ kg/m}^3$$

$$g = 9,8 \text{ m/s}^2$$

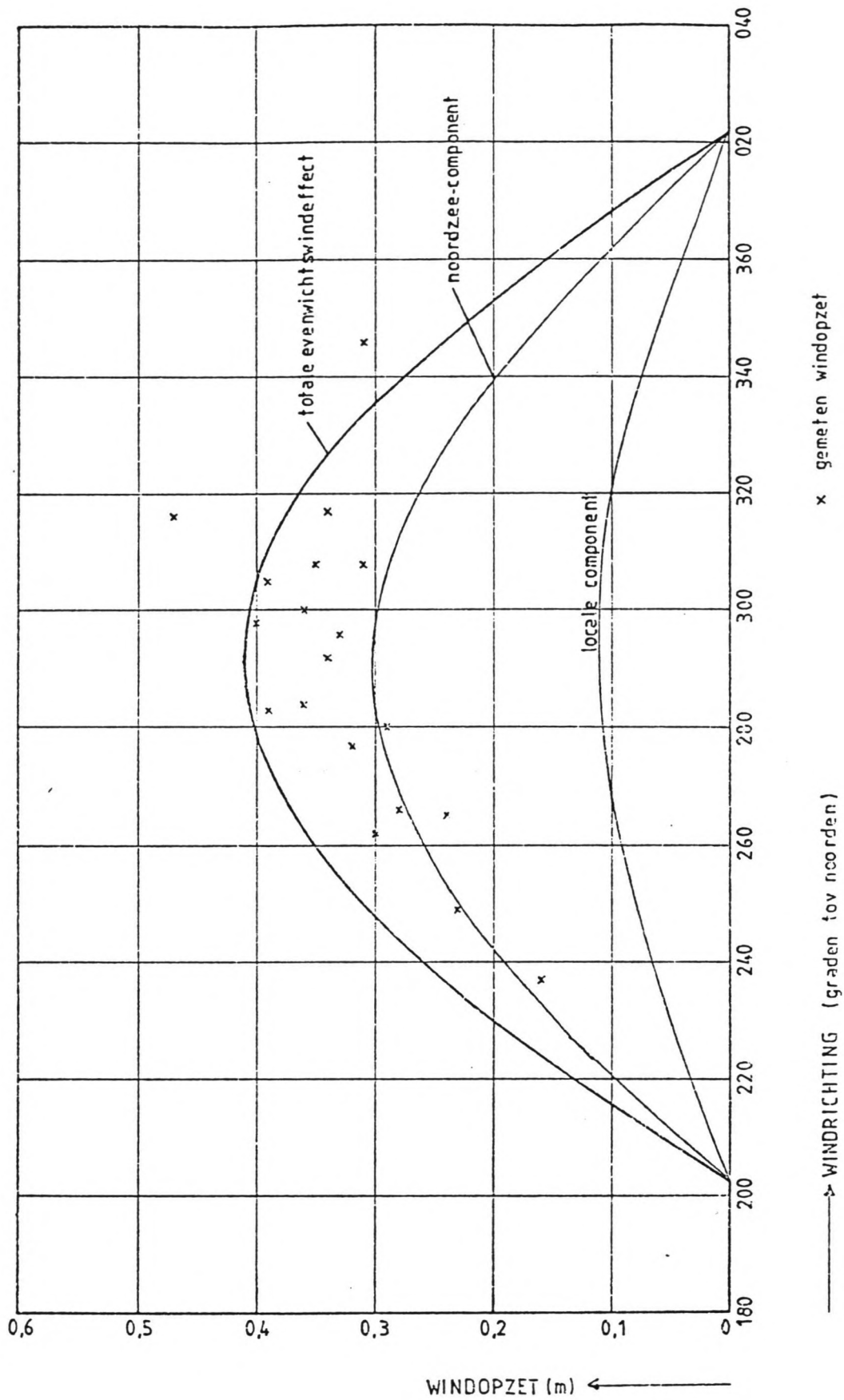
$$d_s = 43 \text{ m (uit lit. 24)}$$

Gebruik van bovenstaande formule levert het evenwichtseffect ter plaatse van het Borndiep op als functie van de hoek tussen de windrichting en de y-as van het Noordzee-model, α_s .

Het evenwichtseffect als functie van de windrichting t.o.v. het Noorden wordt verkregen door de eerder verkregen kromme over 20° te verschuiven. De laatstgenoemde kromme is grafisch weergegeven in figuur 4,15.

De additionele windopzet op de Waddenzee kan worden berekend m.b.v. formule

$$\Delta s = -\frac{b F}{d} u(10)^{2,4} \cos (\alpha - \alpha_0) \quad (4.11)$$



Figuur 4.15 Evenwichtswindeffect te Holwerd t.g.v. een windsnelheid van 10 m/s als functie van de windrichting.

waarin

$$b = 1 \cdot 10^{-7} \text{ m}/(\text{m}/\text{s})^{2,4} \text{ (zie hfdst. 4.3.3.3.)}$$

$$F = 9 \cdot 10^3 \text{ m}$$

$$u(10) = 10 \text{ m}/\text{s}$$

De hoek α geeft de richting van het maximale effect t.o.v. het noorden aan. Aangenomen wordt dat de richting van het maximale effect op de Waddenzee gelijk is aan de richting van het maximale effect op de Noordzee, als gevolg van de grote correlatie tussen windvelden op de Zuidelijke Noordzee en het lokale windveld. Uit formule (4.10) volgt dat de richting van het maximale effect gelijk is aan 293° t.o.v. het Noorden. De strijklengte F in deze richting is gelijk aan 9 km. De gemiddelde diepte van de Waddenzee wordt gelijk genomen aan de diepte bij gemiddeld hoogwater, gesommeerd met de opzet vanuit de Noordzee.

Het uitgestrekte platengebied tussen Ameland en de Friese Kust ligt gemiddeld op 0.70 m - N.A.P. Het gemiddeld hoogwater te Holward is gelijk aan 0.98 m + N.A.P. Een windsnelheid van 10 m/s heeft een evenwichtsofzet van 0.30 m in het Borndiep tot gevolg. De gemiddelde diepte van de Waddenzee tussen Ameland en Holward is diensgevolge gelijk aan $0,98 + 0,70 + 0,30 = 1,98 \text{ m}$. Bovenstaande gegevens ingevuld in formule (4.11) geeft een additionele opzet gelijk aan:

$$\Delta s = 0,11 \cos (\alpha - 293) \quad (4.12)$$

zie fig. 4.15.

In dezelfde figuur is tevens de totale windopzet als som van het Noordzee-effect en het lokale effect uitgezet tegen de windrichting t.o.v. het Noorden. Een vergelijking met de gemeten opzet leert dat er globaal wel enige overeenkomst is. De gemeten opzet geeft echter over het algemeen lagere waarden te zien dan het berekende windeffect.

Een verklaring hiervoor zou kunnen zijn dat in het bovenstaande windeffect vergeleken wordt met windopzet:

De gemeten waarden zijn windopzet. Dit werd verkregen door het verschil te berekenen tussen het gemeten hoogwater en het astronomisch hoogwater.

Voor de Zuidelijke Noordzee is het windeffect berekend. Dit is het verschil tussen het waargenomen hoogwater en het astronomisch getij op hetzelfde tijdstip. Zie figuur 4.16.

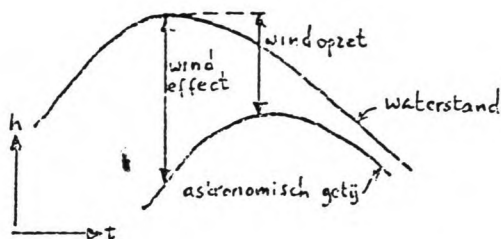


Fig. 4.16 Verschil windeffect en windopzet

In het algemeen treedt bij grote verhoging een vervroeging van het hoogwater op. Uit figuur 4.16 blijkt dat dan de gemeten windopzet kleiner zal zijn dan het berekende windeffect. De gemeten opzet stelt echter de gemiddelde windopzet tijdens een stormperiode voor. Bij kleinere verhogingen van de waterspiegel zal er nauwelijks sprake zijn van een vervroeging, m.a.w. het windeffect zal dan overeenkomen met de windopzet. Als gevolg van de middeling zal het verschil tussen windopzet en windeffect gering zijn, zodat het verschil tussen theorie en meting hiermee niet volledig verklaard kan worden.

Een tweede verklaring ligt in de berekende windrichting van het maximale effect.

M.b.v. de windeffect-formules, opgesteld door Weenink, is berekend dat het maximale windeffect in het Borndiep optreedt bij een windrichting van 293° t.o.v. het noorden. Voor andere plaatsen langs de Nederlandse Kust berekende Weenink een maximaal windeffect van ongeveer 300° t.o.v. het noorden (lit. 24). De resultaten van Weenink werden in 1960 overgenomen door de Deltacommissie, die in haar rapport (lit. 12) adviseerde tijdens een superstorm uit te gaan van een windrichting van 300° t.o.v. het noorden.

Echter uit windrichtingen, gemeten op het lichtschip Terschellingerbaak c.q. lichtschip Texel in de periode gedurende ca. 3 uur voor hoogwater bij stormvloed met een windopzet tijdens hoogwater van meer dan 2 m. te Harlingen in de periode 1953 t/m januari 1976 (zie bijlage 11), blijkt dat vrijwel steeds een noordwestelijke windrichting is waargenomen op het voorgelegen gebied van de Noordzee. Deze wat noordelijke windrichting zou kunnen worden veroorzaakt door de wat grotere kromming van de isobaren en het grote coriolis-effect t.g.v. de hogere breedte. Mede dientengevolge bevestigd C.O.W. (lit. 6) een windrichting bij superstorm aan van 315° t.o.v. het noorden.

De door Weenink opgestelde windeffect-formules zijn, althans voor het Waddengebied, blijkbaar niet geheel juist. Een wiskundige aanpassing van de formules valt buiten het kader van dit onderzoek. Omdat de grootte van het berekende windeffect wel goed overeen lijkt te stemmen met de gemeten waarden (lit. 24) (zie ook figuur (2.2)), wordt hier volstaan met het verschuiven van de windeffectkromme, zodat het maximum bij een windrichting 315° t.o.v. het noorden ligt. (zie fig. 4.17)

De additionele opzet als gevolg van een lokaal windveld boven de Waddenzee dient vervolgens opnieuw berekend te worden. De strijklengte in noordwestelijke richting is namelijk kleiner dan die in de richting 293° t.o.v. het noorden.

Uit bijlage 1 blijkt dat de strijklengte in noordwestelijke windrichting gelijk is aan ca. 5,5 km.

De additionele windopzet wordt berekend m.b.v. formule (4.11). Na substitutie van de volgende waarden:

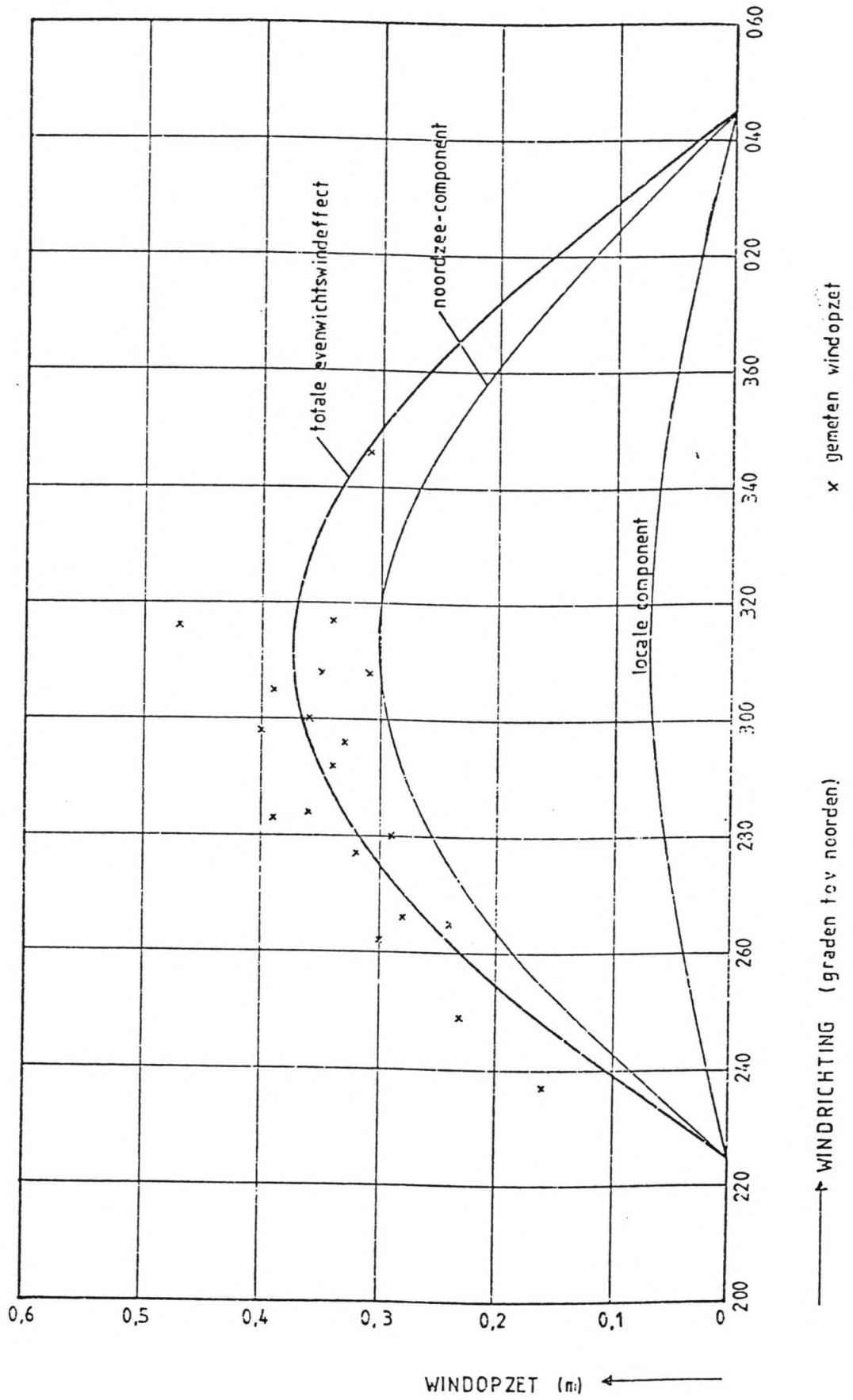
$$b = 1 \cdot 10^{-7} \text{ m (m/s)}^{-2,4}$$

$$F = 5,5 \cdot 10^3 \text{ m}$$

$$d = 1,98 \text{ m}$$

$$\alpha_0 = 315^{\circ}$$

$$u(10) = 10 \text{ m/s}$$



Figuur 4.17 Evenwichtswindeffect te Holwerd t.g.v. een windsnelheid van 10 m/s als functie van de windrichting (verbeterde versie)

leidt dit tot de volgende vergelijking:

$$\Delta s = 0,07 \cos (\alpha - 315^{\circ}) \quad (4.13)$$

In fig. 4.17 is als functie van de windrichting t.o.v. het noorden het gecorrigeerde Noordzee-effect, de lokale opzet en het resulterende effect weergegeven.

Een vergelijking met de gemeten waarde leert dat er een goede overeenstemming bestaat met het berekende windeffect ter plaatse van Holwerd. De berekende kromme lijkt een gemiddeld verband te geven. In hoofdstuk 4.3.3.6 wordt getracht een schatting te geven van de spreiding in het windeffect.

4.3.3.5 Het evenwichtswindeffect ter plaatse van het Friese Wad

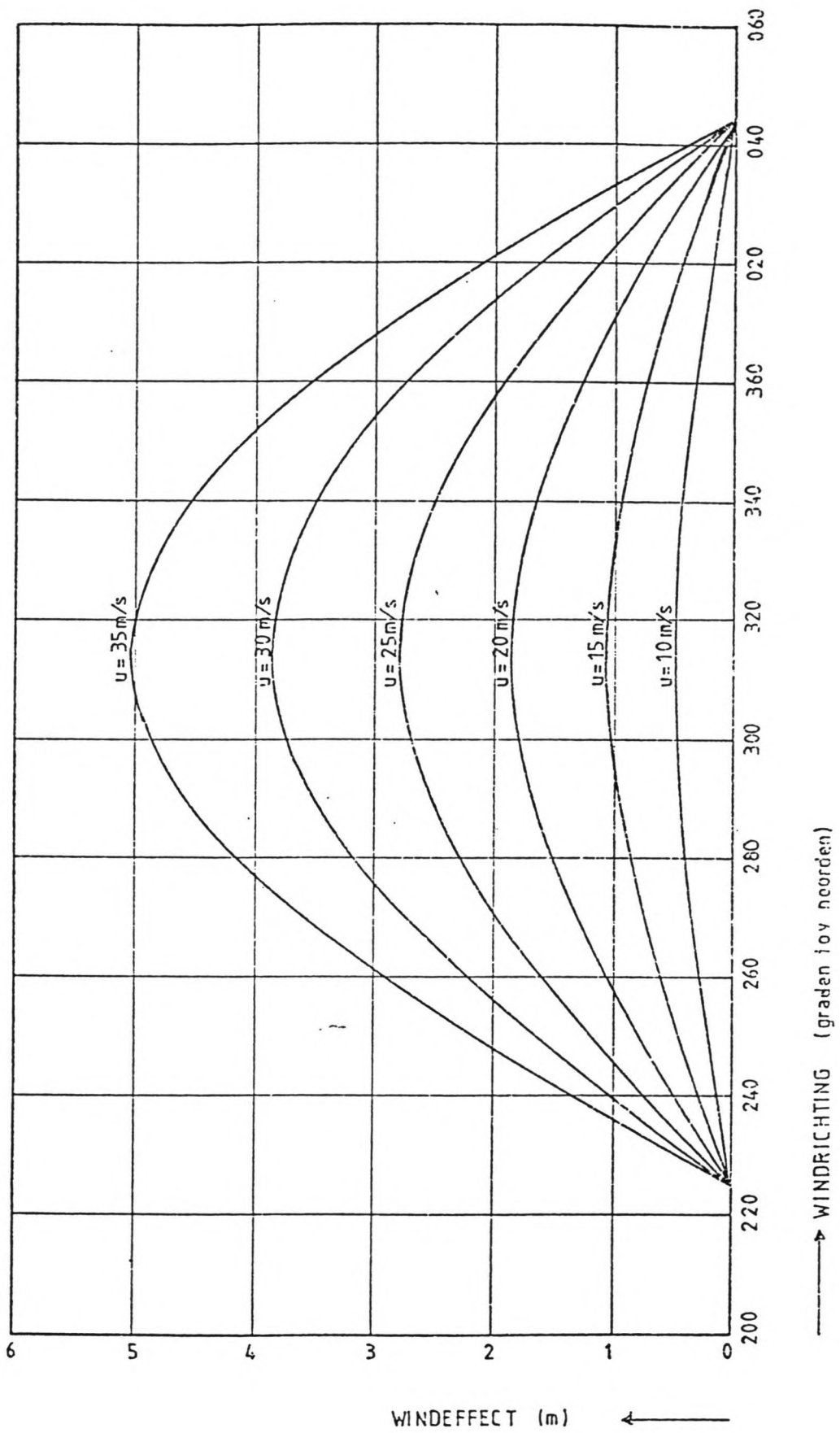
Uitgaande van de formules (4.10) en (4.11) kan vervolgens het evenwichtswindeffect ter plaatse van het Friese Wad berekend worden als functie van de windsnelheid en de windrichting t.o.v. het noorden. Daarbij dient in de formules voor het Noordzee-effect en het lokale effect een strijklengte van 15 km gesubstitueerd te worden, zijnde de maatgevende afstand in noordwestelijke richting tussen Ameland en het Friese Wad (zie kaartje bijlage 1).

In bijlage 12 is voor windsnelheden van 0-35 m/s het maximale evenwichtseffect (in noordwestelijke richting) getabelleerd.

In fig. 4.18 is het evenwichtswindeffect als functie van de windrichting en de windsnelheid weergegeven.

Ten aanzien van het berekende Noordzee-effect gelden de volgende opmerkingen:

1. Het berekende windeffect is een evenwichtswindeffect. De storm in zijn hevigste vorm dient voldoende lang te heersen om het water de tijd te laten deze stand te bereiken. Het Delta-rapport schat de vereiste duur van de "optimale" situatie 5 à 6 uur. Dientengevolge dient in de windeffect-formules de windsnelheid, die gedurende 5 uur bereikt of overschreden wordt, gesubstitueerd te worden.
2. Een effect, dat rechtstreeks met de mate van stabiliteit van de lucht samenhangt, is het verschijnsel van bui-oscillaties. Dit zijn verhogingen of verlagingen van het evenwichtseffect van de orde van enkele decimeters met een tijdsduur van 15 à 30 minuten.
3. Een eventuele schommeling van de Noordzee zou het effect met nog enkele decimeters kunnen verhogen



Figuur 4.18 Evenwichtswindeffect ter plaatse van het Friese Wad als functie van de windsnelheid en windrichting.

Ten aanzien van het locale effect kan nog het volgende opgemerkt worden:

1. Het effect wordt verondersteld omgekeerd evenredig te zijn met de gemiddelde waterdiepte. Voor de berekening van de waterdiepte werd uitgegaan van de gemiddelde ligging van de uitgestrekte platen in de Waddenzee. Hiermee is voor een bovengrens gekozen, daar een grotere waterdiepte in een kleiner effect resulteert.
2. In tegenstelling tot het Noordzee-effect reageert het locale effect vrijwel direct op de locale weersomstandigheden. In de formule van het locale effect (4.11) dient daarom de maximale uurgemiddelde windsnelheid boven de Waddenzee ingevuld te worden. Uitgaande van een time-lag van 5 uur, een gemiddelde vervroeging van het hoogwater onder stormomstandigheden van 1 uur en een hoge correlatie tussen windvelden boven de Waddenzee en de zuidelijke Noordzee, is de windsnelheid die gedurende 5 uur bereikt of overschreden wordt, een goede benadering van de maximale locale windsnelheid ten tijde van het optreden van het maximale Noordzee-effect. M.a.w. in de formules (4.10) en (4.11) kan dezelfde waarde voor de windsnelheid ingevoerd worden.

4.3.3.6 Verdeling van het windeffect over de windsnelheid

Uit hoofdstuk 4.3.3.4 blijkt dat er sprake is van een zekere spreiding van de metingen rond de berekende kromme.

Deze spreiding wordt geanalyseerd door het gemeten windeffect bij een windsnelheid van 10 m/s uit te zetten tegen het berekende windeffect. (zie figuur 4.19)

Wanneer aangenomen wordt dat het windeffect Gaussisch verdeeld is rond een gemiddelde waarde, die gelijk is aan het berekende effect, dan kunnen betrouwbaarheidsbanden bepaald worden.

De 95% betrouwbaarheidslijn ligt op een afstand $\pm t \cdot Sy'$ van het gemiddelde. Sy' is de standaard deviatie en kan volgens lit. 20 berekend worden uit de variantie Sy'^2 op de volgende wijze:

$$Sy'^2 = \frac{\sum_{j=1}^{j=N} (\dot{y}_j - \dot{y}_j')^2}{N - n - 1} \quad (4.14)$$

waarin

Sy'^2 is de variantie in de metingen

y_j is j-de gemeten waarde
 y_j' is j-de berekende waarde
j is 1,2 N aantal metingen
N is het totaal aantal metingen
n is het aantal onafhankelijke variabelen

t kan bepaald worden als functie van $\nu = N-n-1$ en $\alpha (= 0,05)$ met behulp van bijlage 13.
Berekening leert dat $Sy'^2 = 0,0022 \text{ m}^2$, waaruit volgt dat de standaard-deviatie Sy' van het windeffect bij een windsnelheid van 10 m/s gelijk is aan 0,046 m. Met $t = 2,11$ volgt dat de 95% betrouwbaarheidslijnen zich op een afstand van plm. 0,1 m. van het gemiddelde bevinden.

De 68% betrouwbaarheidslijnen zijn m.b.v. formule (4.14) bepaald op een afstand van plm. 0,05 van de gemiddelde waarde.

De aanname van een Gaussische verdeling is vervolgens gecontroleerd door het aantal metingen binnen de betrouwbaarheidsbanden te tellen. Gebleken is dat de 95% band alle metingen omsluit en binnen de 68%-band blijken 13 van de 19 metingen te vallen, overeenkomende met ca. 68%. Op grond hiervan wordt geconcludeerd dat het windeffect bij een windsnelheid van 10 m/s bij benadering Gaussisch verdeeld is, met een standaard-deviatie van 0,05 m.

Onder aanname van een kwadratisch verband zijn de metingen herleid naar windsnelheden van 20,30 en 35 m/s en uitgezet tegen de berekende waarden in de figuren 4.20 t/m 4.22.

Op identieke wijze wordt bij benadering een Gaussische verdeling gevonden met standaard-deviatie van resp. 0,31 m, 0,53 m en 0,63 m. Opgemerkt dient te worden dat de spreiding onafhankelijk aangenomen is van de windrichting. Onderzoek naar een eventueel verband bleek niet mogelijk i.v.m. de beperkte verdeling van de metingen over de windrichting. De meeste metingen liggen in het West en Noordwest-kwadrant.

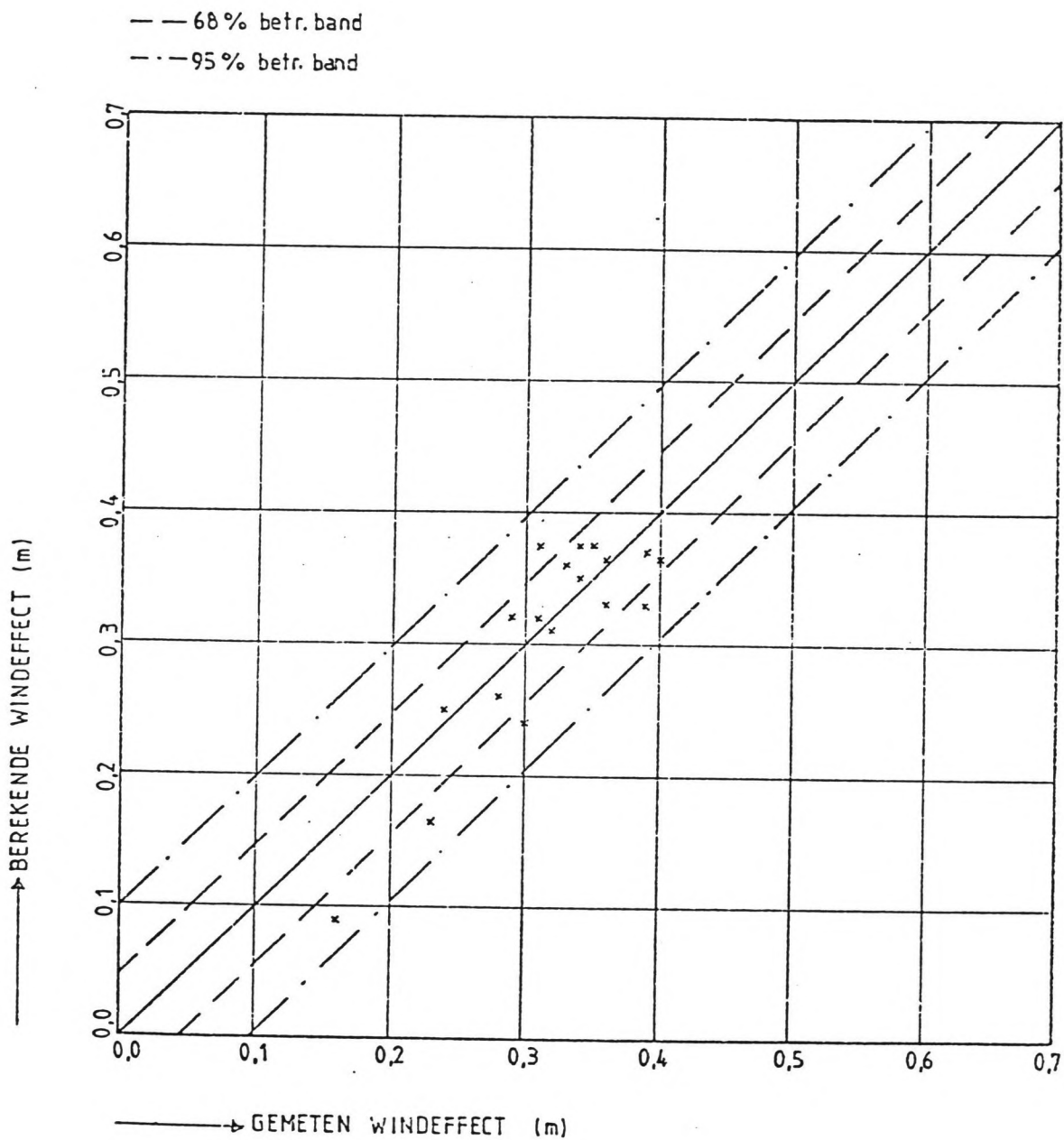
In figuur 4.23 is een indruk gegeven van de verdeling van het maximale windeffect in Noordwestelijke richting over de windsnelheid op 10 m boven het wateroppervlak.

4.3.4 Vergelijking van methoden uit 4.3.2 en 4.3.3

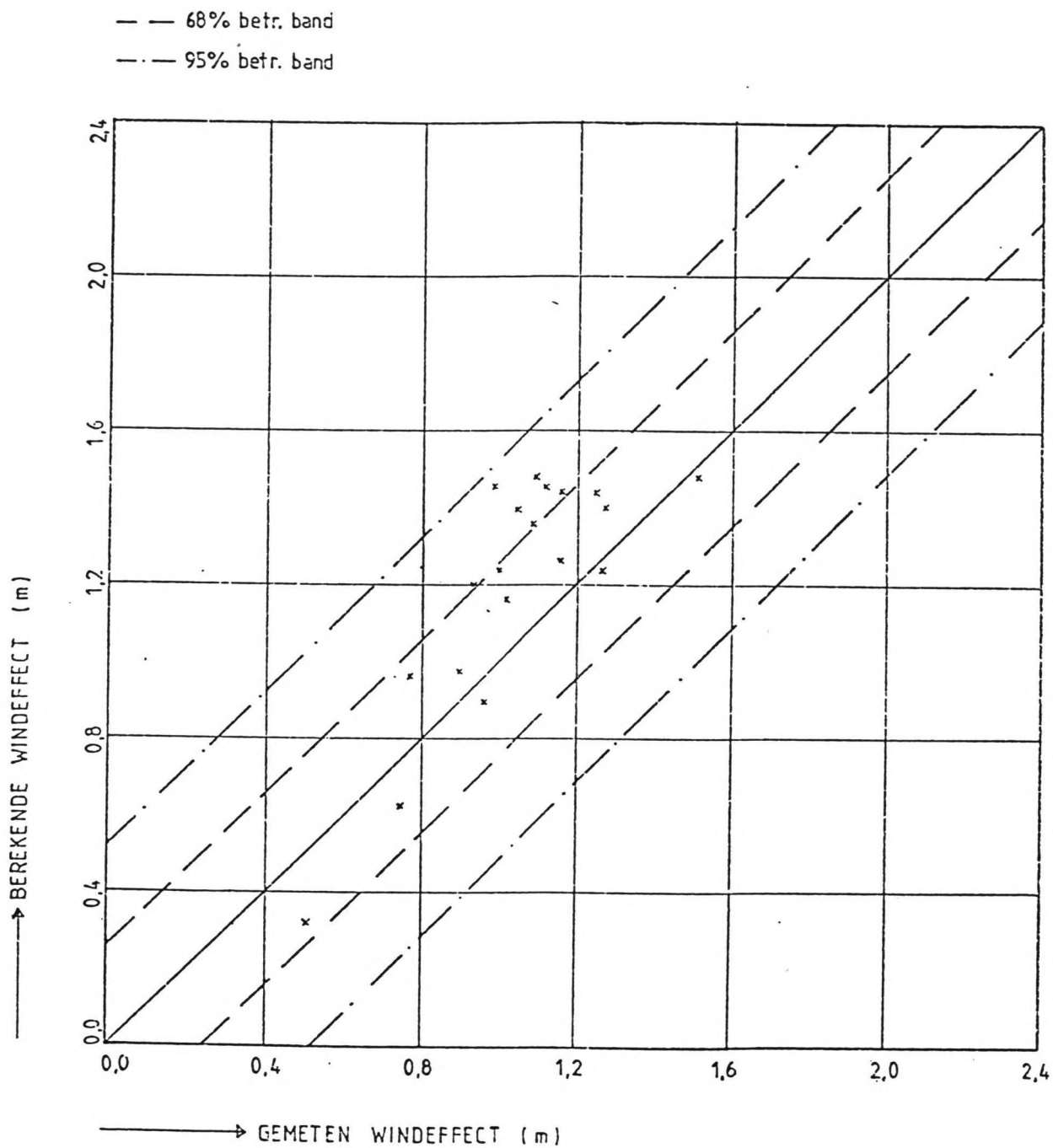
In hoofdstuk 4.3 is de maximale windopzet per storm ter plaatse van het Friese Wad op 2 manieren afgeleid, te weten via de statistiek van de windopzetten zelve (hoofdstuk 4.3.2) en via de methode van Weenink (hoofdstuk 4.3.3).

De eerste methode gaat er van uit dat op stormvloed de extreme waardenverdeling van Gumbel toepasbaar is. In de praktijk betekent dit dat statistische informatie over maximum windopzetten in het Noordwest-kwadrant verkregen wordt.

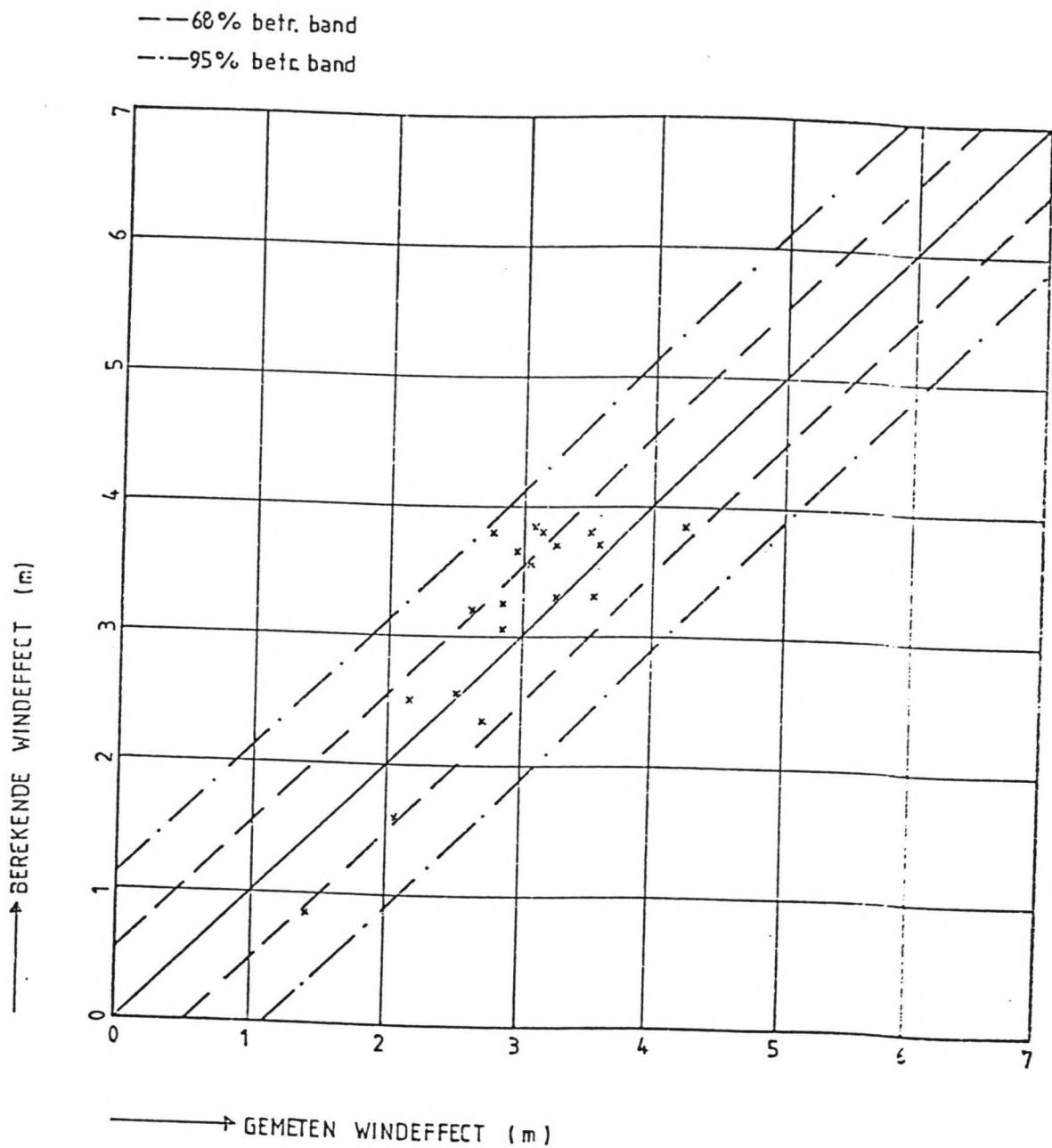
Via de methode van Weenink wordt een beschrijving van het maximale windeffect in afhankelijkheid van de windsnelheid en windrichting verkregen. Door het maximale windeffect in Noordwestelijke windrichting te correleren met windstatistieken kan een vergelijking gemaakt worden met de eerste methode.



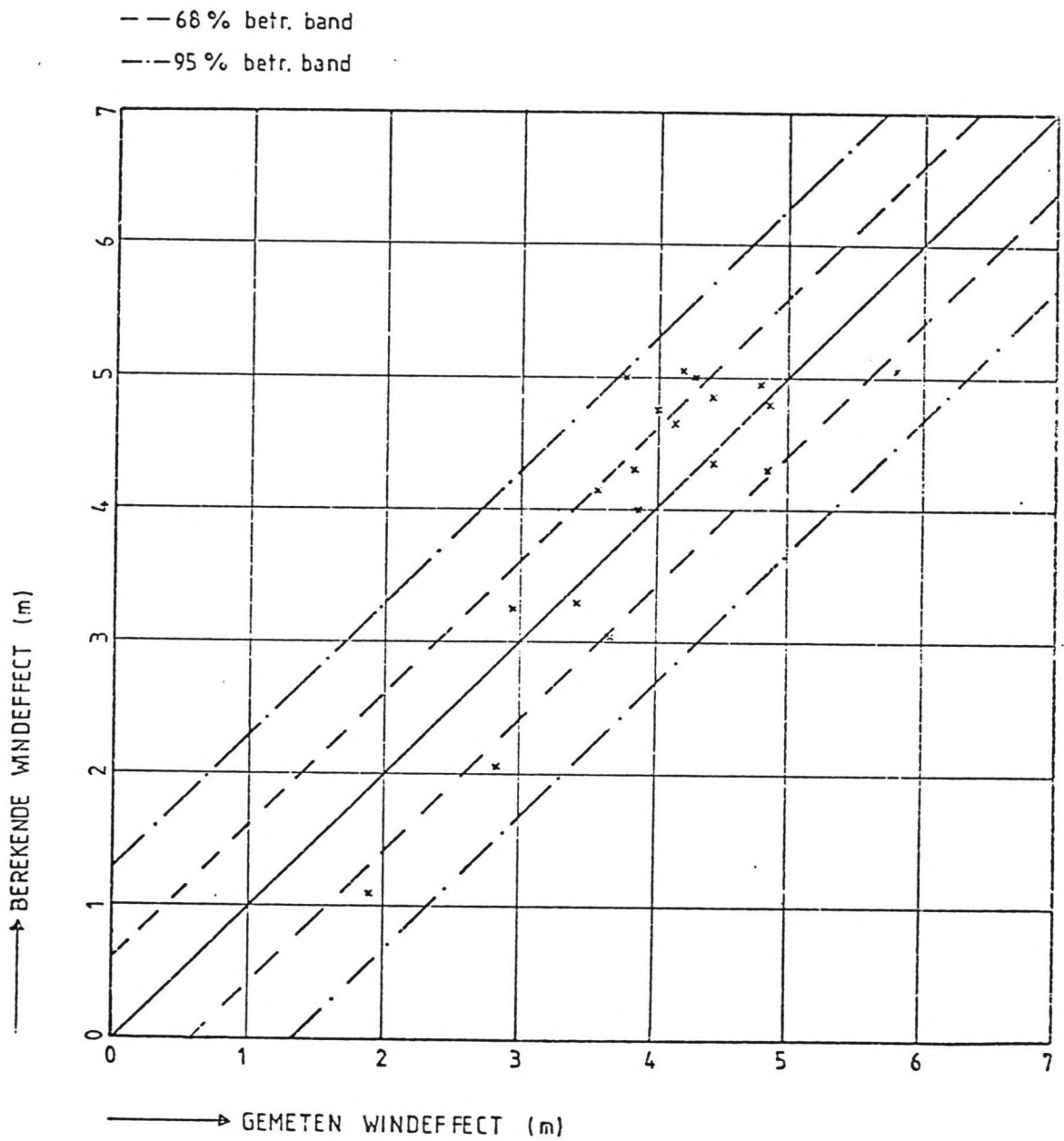
Figuur 4.19 Berekende en gemeten windeffect te Holwerd t.g.v. een windsnelheid van 10 m/s.



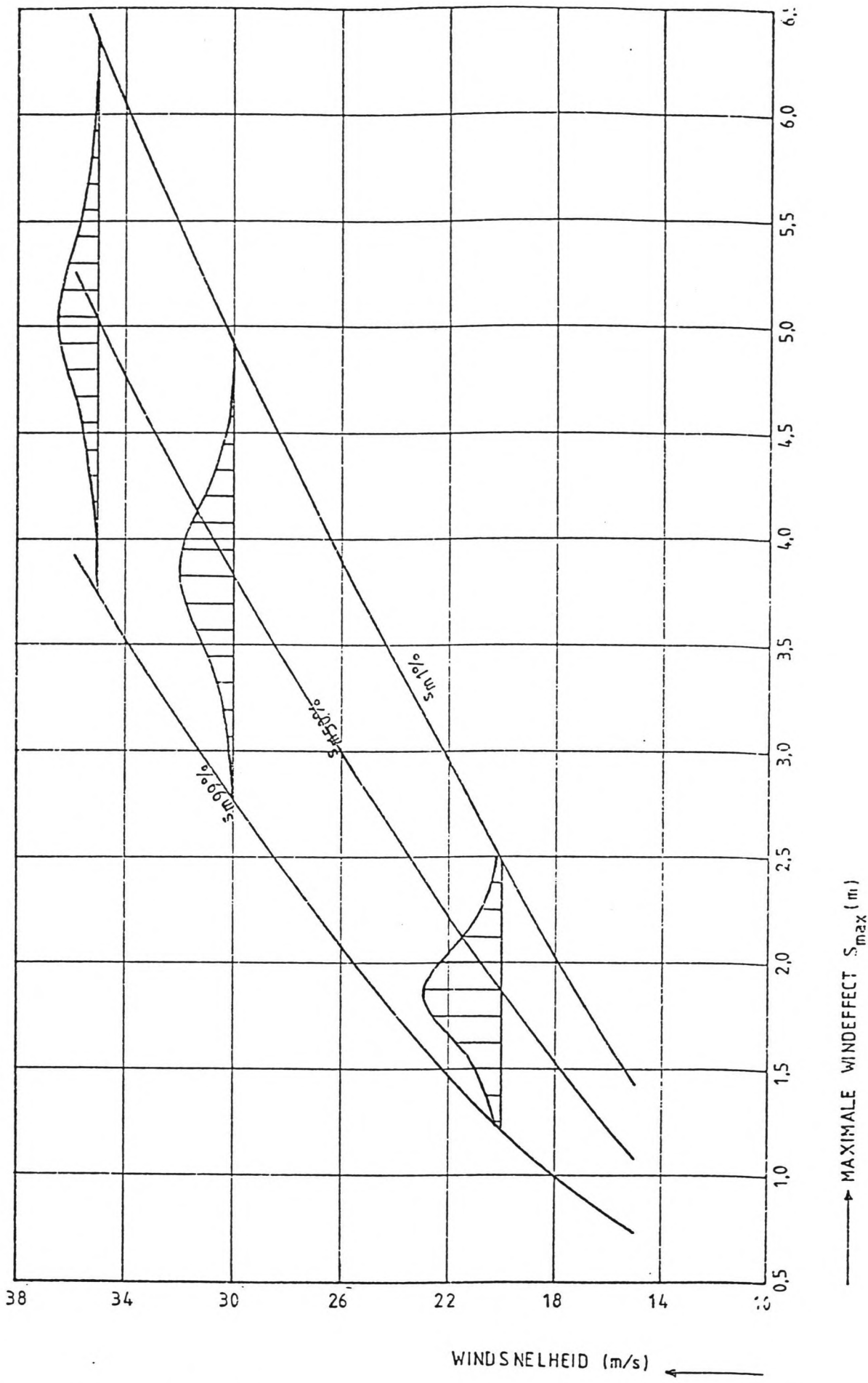
Figuur 4.20 Berekende en gemeten windeffect te Holwerd t.g.v. een windsnelheid van 20 m/s.



Figuur 4.21 Berekende en gemeten windeffect te Holwerd t.g.v. een windsnelheid van 30 m/s.



Figuur 4.22 Berekende en gemeten windeffect te Holwerd t.g.v. een windsnelheid van 35 m/s.



Figuur 4.23 Verdeling van het maximale windeffect t.p.v. het Friese Wad over de windsnelheid.

De te gebruiken windstatistiek dient representatief te zijn voor het windbeeld boven de Waddenzee en de zuidelijke Noordzee. Daarbij is vooral lange-termijn informatie benodigd over windsnelheden tijdens stormen.

Anno 1983 zijn er geen kuststations in de nabijheid van de Waddenzee die informatie over maximale uurgemiddelden van de windsnelheid kunnen verschaffen.

Voor dit onderzoek is dan ook gebruik gemaakt van windstatistieken van het station Leeuwarden.

Uit gemeten maxima van de uurgemiddelde windsnelheid op 10 meter hoogte boven open terrein, ontleend aan lit.13, is de overschrijdingslijn van de uurgemiddelde windsnelheid u_5 op 10 meter boven zee afgeleid. Deze overschrijdingslijn is weergegeven in figuur 4.24. Bij de afleiding zijn de volgende aannamen gedaan:

1. De maximale uurgemiddelde windsnelheid en de uurgemiddelde windsnelheid u_k zijn gerelateerd volgens een verband (Rijkoort, lit.23):

$$u_{\max} = u_k \left[1 + \left(\frac{k}{26.8} \right)^{1.2} \right] \quad (4.15)$$

waarin

u_{\max} is de maximale uurgemiddelde windsnelheid

k is het aantal uren, waarin de uurgemiddelde windsnelheid u_k bereikt of overschreden wordt

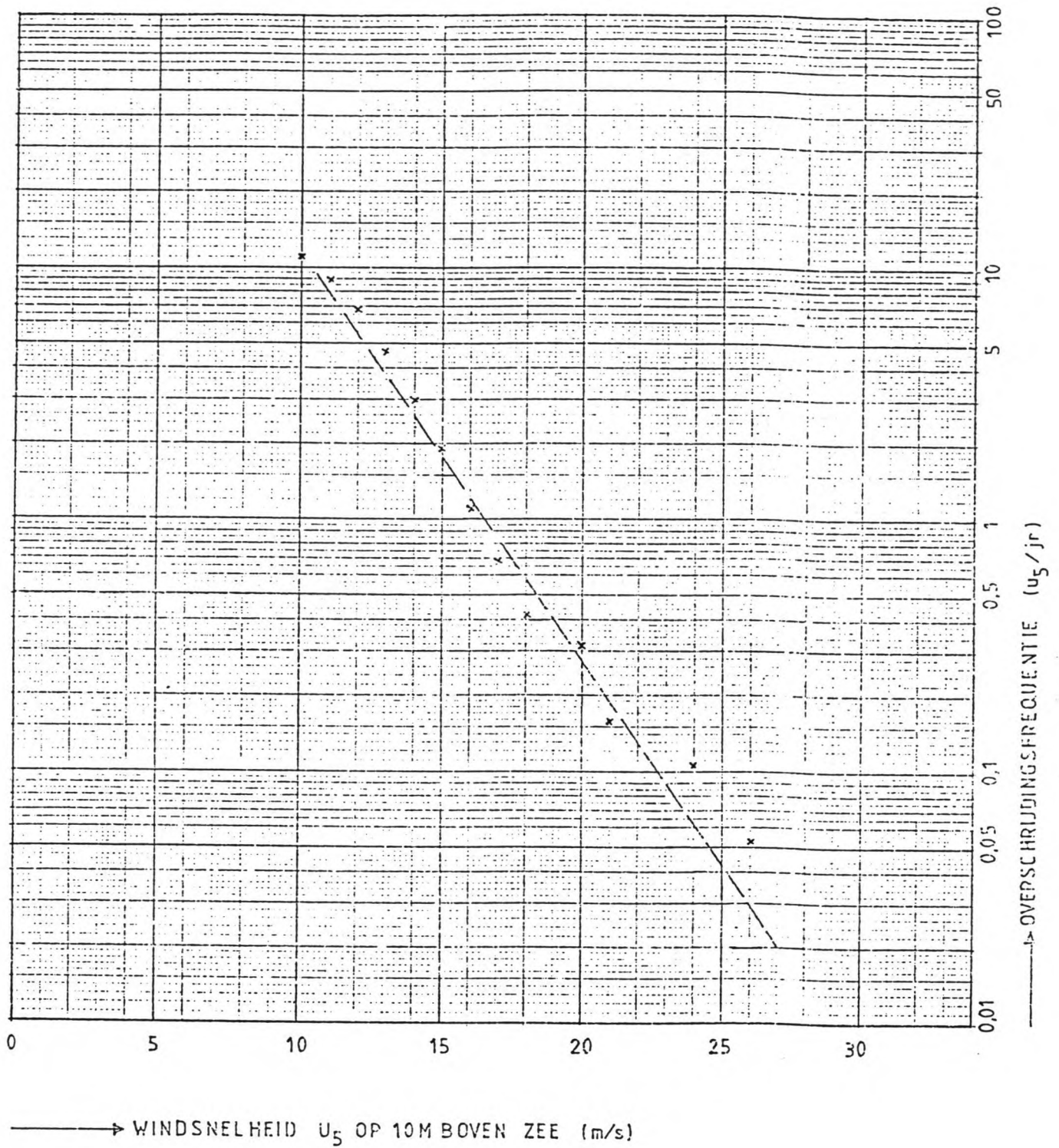
Wanneer $k=5$ uur, volgt uit formule (4.15): $u_{\max} = 1.13u_k$

2. De windsnelheid op 10 meter boven open terrein kan middels een transformatiefactor herleid worden naar 10 meter boven zee. Volgens Wieringa (lit.13 en 25) geldt

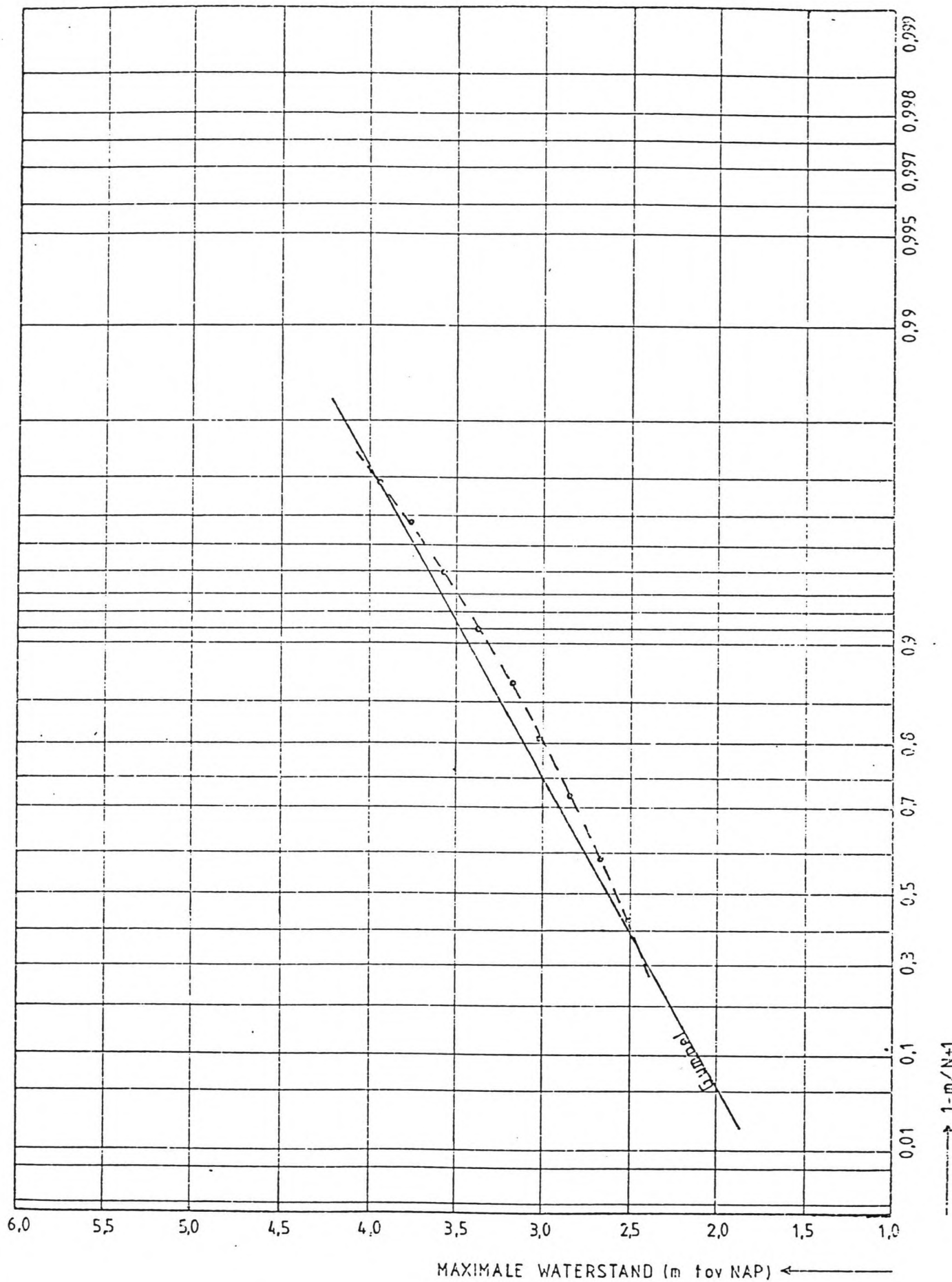
$$u_{10 \text{ m boven zee}} = 1.12 u_{10 \text{ m boven open terrein}}$$

Combineren we 1. en 2. dan volgt daaruit dat de maximale uurgemiddelde windsnelheid op 10 meter boven open terrein bij benadering overeenkomt met de windsnelheid u_5 op 10 meter boven zee.

De verkregen overschrijdingslijn is op arbitraire wijze geëxtrapoleerd naar hoge windsnelheden. Vervolgens is voor verschillende waarden van u_5 de hoogwaterstand te Nieuw-Bildt bepaald met behulp van de windopzetformules (4.10) en (4.11) en uitgaande van een gemiddeld astronomisch hoogwater. De aldus verkregen hoogwaterstand is tegen de overschrijdingsfrequentie uitgezet in figuur 4.25. In dezelfde figuur is de Gumbel-overschrijdingslijn, bepaald in hoofdstuk 4.3.2., weergegeven. Uit figuur 4.25 blijkt dat de bepaalde overschrijdingslijn enigszins afwijkt van de Gumbellijn. Een oorzaak hiervan kan zijn dat de toegepaste windstatistiek niet voldoende representatief is voor de windsnelheden boven de zuidelijke Noordzee. Wanneer we de gebruikte schematisaties in aanmerking nemen, is de overeenstemming met de Gumbel-overschrijdingslijn redelijk goed.



Figuur 4.24 Overschrijdingslijn van de windsnelheid op 10 meter boven zee, die gedurende 5 uur bereikt of overschreden wordt.



Figuur 4.25 Overschrijdingslijn van de maximale waterstand te Nieuw-Bildt.

5. Golfgroei op de Waddenzee

5.1 Inleiding

Het golfbeeld in de Waddenzee vertoont in het algemeen twee componenten, te weten een component met een langere periode, afkomstig uit de Noordzee, en een component met een kortere periode, opgewekt door een lokaal windveld boven de Waddenzee. Uit golfmetingen heeft men afgeleid dat ter plaatse van het Friese Wad de deiningscomponent vrijwel geheel uitgedempt is (lit. 9). Men hoeft diensgevolge daar slechts rekening te houden met lokaal opgewekte golven.

In dit hoofdstuk wordt gebruik gemaakt van golfmetingen en golfverwachtingsmethoden.

Er bestaan verscheidende methoden die de golfgroei in een ondiep water, zoals de Waddenzee, beschrijven. De Reus (lit. 18) heeft aangetoond dat de golfgroei in de Waddenzee goed beschreven kan worden door de Sverdrup-Munk-Bretschneider (SMB) methode.

In dit hoofdstuk worden voor de significante golfhoogte (hoofdstuk 5.2) en de significante golfperiode (5.3) diagrammen m.b.v. de SMB-methode afgeleid. Tevens worden de berekende waarden vergeleken met golfmetingen, verricht door de studiedienst Hoorn in het vaarwater van de Zwarte Haan in 1967-1970. Deze metingen zijn ontleend aan lit. 18 en vermeld in bijlage 53. De positie van de golfmeetpaal is weergegeven in bijlage 1. De SMB-methode is beschreven in hoofdstuk 2.2. Voor de gebruikte formules wordt daar naar verwezen.

5.2 Significante golfhoogte

De significante golfhoogte in ondiep water wordt benaderd met behulp van formule (2.19) uit hoofdstuk 2.2. Deze formule vormt het uitgangspunt van de golfgroefgrafiek van Bretschneider, waarin het verband tussen de windsnelheid, de strijklengte en de diepte beschreven wordt.

Wat betreft de windsnelheid beveelt COW aan (lit. 6) onder superstormomstandigheden een windsnelheid van 35 m/s aan te houden. Onderzoek van de Deltadienst en het KNMI heeft aangetoond dat de windsnelheidsverticaal over de Waddenzee voldoende gelegenheid krijgt zich aan te passen na het passeren van de eilanden (zie ook appendix).

In het ondiepe Wadden-gebied zullen de golven zich binnen één uur aangepast hebben aan de heersende weersomstandigheden.

Zoals uit bijlage 1 blijkt is de aanwezige strijklengte richtingsafhankelijk. In tabel 5.1 is de Fetch ter plaatse van het Friese Wad in afhankelijkheid van de windrichting weergegeven. Hierbij is rekening gehouden met een schaduwwerking van ca. 1 km door de Waddeneilanden.

In de appendix wordt beschreven hoe tot deze schatting werd gekomen.

windrichting t.o.v. noorden (graden)	strijklengte (km)
250	48
260	40
270	35
280	22
290	15
300	15
310	15
320	14
330	8
340	8
350	8
360	9
010	9
020	9
030	11
040	12

Tabel 5.1 Strijklengte t.p.v. het Friese Wad als functie van de windrichting.

De bodem van de Waddenzee wordt op 0.70 m-N.A.P. aangehouden, zijnde de gemiddelde ligging van de platen (lit. i8).

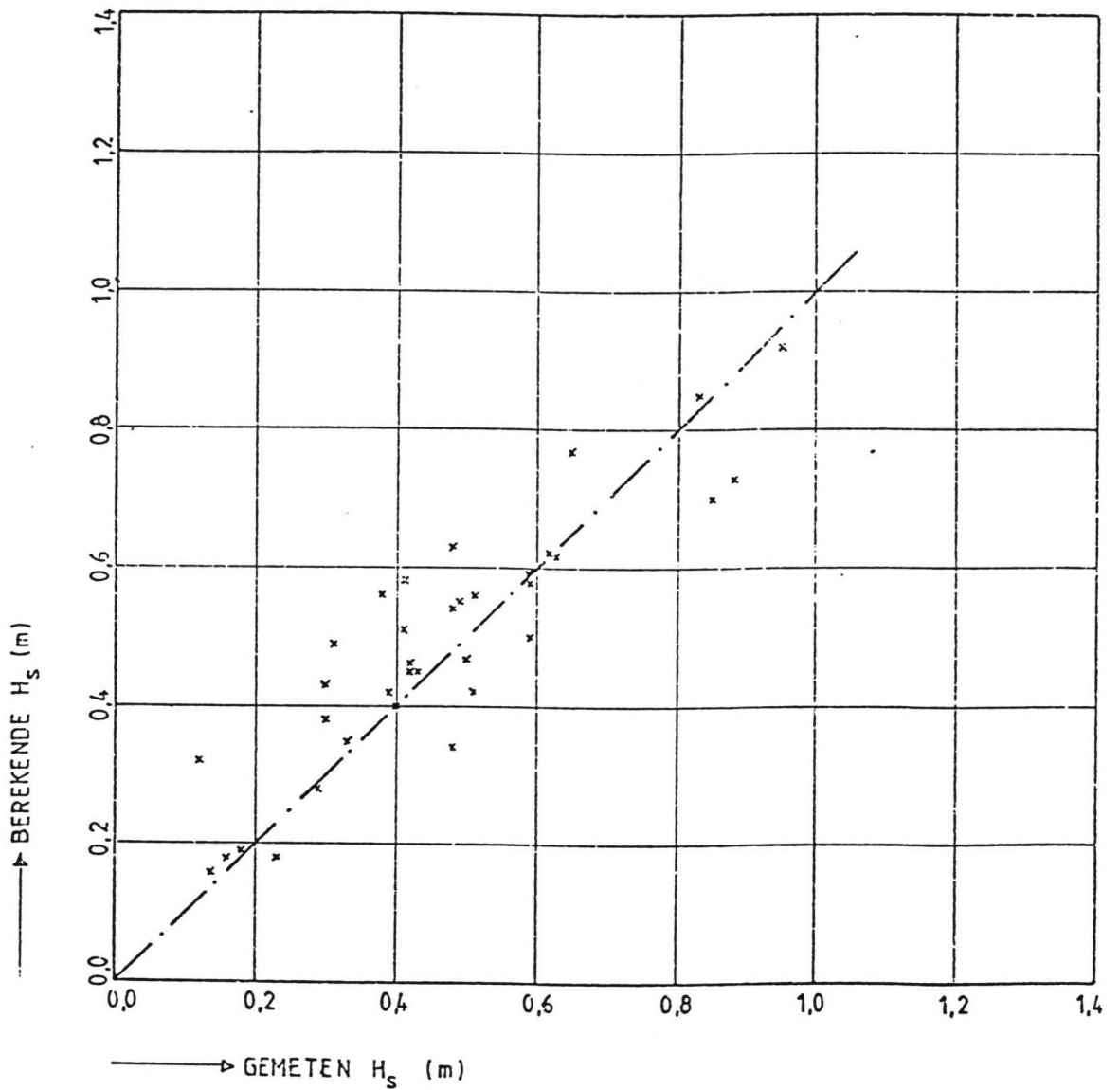
Met behulp van de de golfgroei-grafieken van Bretschneider uit bijlage 2a t/m c zijn golfhoogtediagrammen voor het Friese Wad samengesteld. Deze zijn weergegeven in de bijlagen 14 a-d. Met behulp van deze diagrammen kan per richtingssector, windklasse en waterdiepte de verwachte significante golfhoogte bepaald worden.

In de periode 1967-1970 zijn ter plaatse van het Friese Wad (vaarwater van de Zwarte Haan) golfmetingen verricht. In bijlage 16 wordt de gemeten Hs in het Noordwest-kwadrant vergeleken met de Hs volgens Bretschneider, bepaald met behulp van het golfdiagram voor de richtingssector 285° - 325° (bijlage 14b)

In figuur 5.1 is de gemeten Hs en de Hs volgens Bretschneider grafisch tegen elkaar uitgezet.

Gemiddeld blijkt de Bretschneider-relatie goed te voldoen.

Als gevolg van de beperkte hoeveelheid metingen kan geen exacte uitspraak gedaan worden omtrent de spreiding in de significante golfhoogte. Voor windsnelheden rond 20 m/s ligt deze in de orde van 0,1 m.



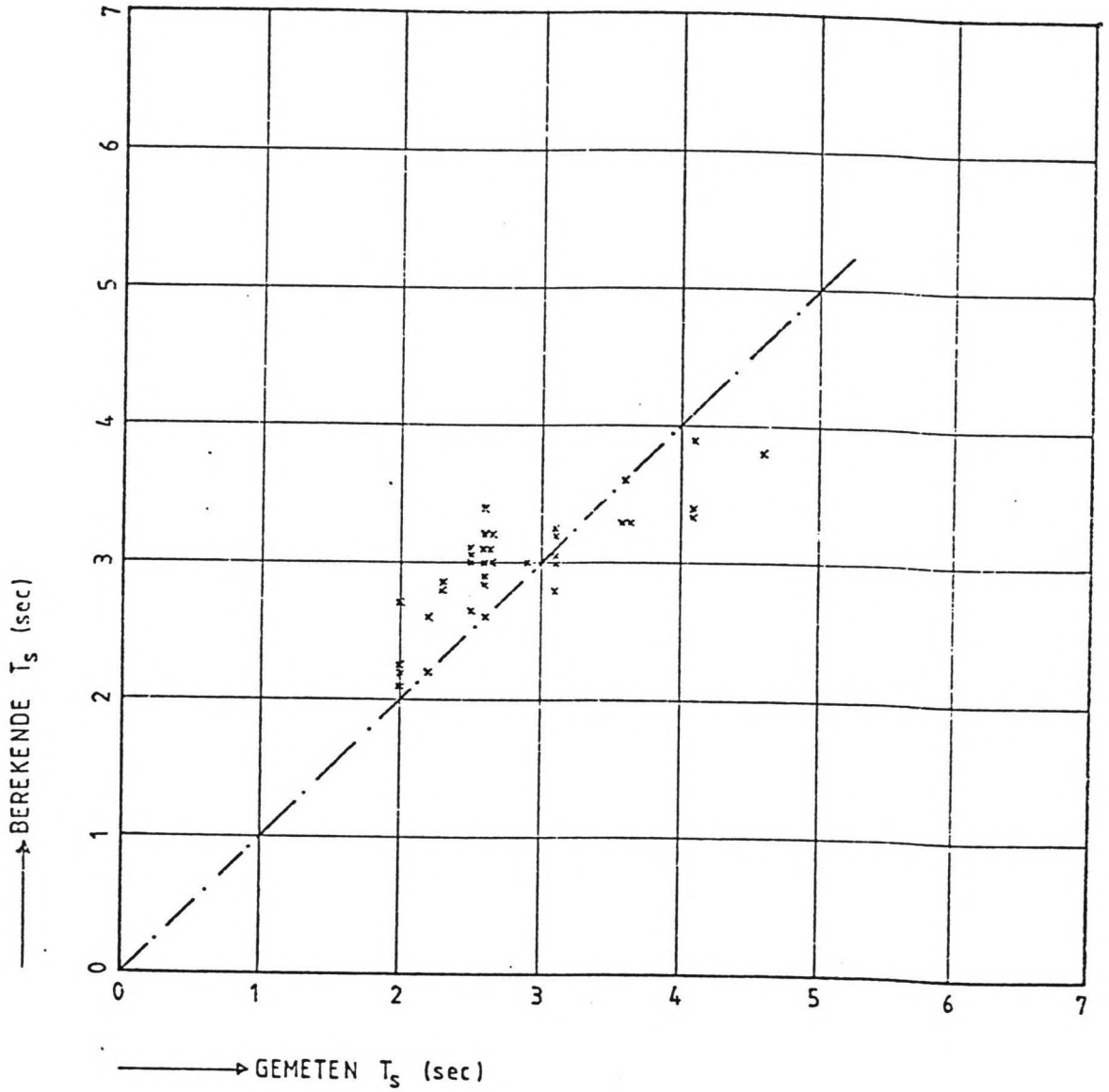
Figuur 5.1 Gemeten en berekende significante golfhoogte in het Noordwestkwadrant (windsnelheid groter dan 15 m/s).

5.3 Significante golfperiode

De significante golfperiode in ondiep water wordt benaderd met behulp van formule (2.20) uit hoofdstuk 2.2. Op identieke wijze als in hoofdstuk 5.2 zijn golfperiode-diagrammen samengesteld. Deze diagrammen zijn weergegeven in bijlage 15 en geven de te verwachten significante golfperiode per richtingssector, windklasse en waterdiepte aan.

In bijlage 16 en fig. 5.12 worden de gemeten golfperiode en de periode volgens Bretschneider met elkaar vergeleken. De significante golfperiode blijkt met behulp van de Bretschneiderrelatie gemiddeld goed te benaderen.

De spreiding in de significante golfperiode als gevolg van windsnelheden rond 20 m/s ligt in de orde van 0.5 sec.



Figuur 5.2 Gemeten en berekende significante golfperiode in het Noordwestkwadrant (windsnelheid groter dan 15 m/s).

6. De golfhoogte-waterstandsrelatie ter plaatse van het Friese Wad

6.1 Inleiding

Voor het beoordelen van de veiligheid van een waterkering langs de Waddenkust speelt de combinatie van de verwachte golfhoogte en waterstand tijdens een extreme stormvloed een belangrijke rol. In dit hoofdstuk wordt getracht de golfhoogte-waterstandsrelatie ter plaatse van het Friese Wad af te leiden.

Daarbij komen de volgende aspecten aan de orde:

- de H_s -windsnelheidsrelatie (6.2)
- de windopzet-windsnelheidsrelatie (6.3)
- de koppeling van de windopzet met het astronomisch hoogwater (6.4)
- de koppeling van de H_s met de hoogwaterstand via de windsnelheid (6.5)

Tenslotte wordt in hoofdstuk 6.6 de berekende golfhoogte-waterstandsrelatie benaderd met een Gaussische verdeling.

Aangenomen wordt dat extreme stormvloed alleen kunnen optreden ten gevolge van windvelden uit de richting Noordwest tot Noord. Immers alleen stormen uit deze sector zullen in staat zijn hoge windopzetten en extreem hoge golfhoogten voor de Nederlandse kust te geven. In dit hoofdstuk wordt daarom slechts de sector NW-N in beschouwing genomen.

6.2 De H_s -windsnelheidsrelatie

De H_s -windsnelheidsrelatie wordt beschreven in hoofdstuk 5. Voor windrichtingen uit de sector NW-N zijn de golfdiagrammen, weergegeven in bijlage 14 b en c, bruikbaar.

6.3 De windopzet-windsnelheidsrelatie

De windopzet-windsnelheidsrelatie wordt beschreven in hoofdstuk 4.3.3. Voor dit onderzoek wordt gebruik gemaakt van de relatie tussen het maximale windeffect en de windsnelheid u_5 , weergegeven in figuur 4.23.

6.4 De koppeling windopzet-astronomisch hoogwater

Een bepaalde maximale waterstand tijdens een stormvloed wordt veroorzaakt door een combinatie van astronomisch getij en windopzet. Het astronomisch getij en de windopzet worden onafhankelijk van elkaar verondersteld, in die zin dat voorbijgegaan wordt aan de mogelijke beïnvloeding van de grootte en de fase van de getijcomponenten als gevolg van de verhoogde zeestand tijdens een stormvloed. Het faseverschil tussen astronomisch hoogwater en de maximale windopzet tijdens een storm blijkt uniform verdeeld te zijn tussen $t = -\frac{1}{2}T_0$ en $t = +\frac{1}{2}T_0$. T_0 is de periode van het astronomisch getij.

Uit hoofdstuk 4.2 blijkt dat de windopzet een duur heeft die beduidend groter is dan de periode van het astronomisch getij. Daarom zal de hoogste waterstand tijdens een storm voorkomen op of vlakbij het moment van astronomisch hoogwater. Hier wordt aangehouden dat de top van de windopzet samenvalt met het astronomisch hoogwater.

Omdat de windopzet en het astronomisch getij onafhankelijk van elkaar beschouwd worden, lijkt het aannemelijk te veronderstellen dat de meest waarschijnlijke maximale waterstand tijdens een storm zal zijn opgebouwd uit het gemiddelde astronomisch hoogwater a_{gem} en de gemiddelde windopzet s_{gem} , dus

$$h_{gem} = a_{gem} + s_{gem}$$

Een bovengrens aan de maximale waterstand kan verkregen worden door de windopzet met een overschrijdingsfrequentie van 1% te combineren met springtij, dus

$$h_{max} = a_{spring} + s_{1\%}$$

De waarden van de windopzet s kunnen grafisch bepaald worden in figuur 4.23.

De waarde van a_{gem} te Holwerd is gelijk aan 0.98 m +N.A.P. Voor de waarde van het springtij kan de HHWS (=hooghoogwaterspring) aangehouden worden. Deze wordt berekend als het meerjarig gemiddelde van het hoogste springhoogwater van elke maand. Jaarlijks wordt de HHWS dus nog in 50% van de gevallen overschreden, zodat de HHWS een overschrijdingsfrequentie heeft van 6x per jaar. Uitgaande van het voorkomen van 705 hoogwaters per jaar komt dit overeen met een overschrijdingsfrequentie van ca. 1%. De waarde van het springtij is dus bij benadering gelijk aan de waarde van het hoogwater met een overschrijdingsfrequentie van 1%. Uit hoofdstuk 3.3 volgt dat $a_{1\%}$ gelijk is aan 1.58 m +N.A.P.

Een ondergrens aan de maximale waterstand kan verkregen worden door de windopzet met een overschrijdingsfrequentie van 99% te combineren met het astronomisch hoogwater met een overschrijdingsfrequentie van 99%, dus

$$h_{min} = a_{99\%} + s_{99\%}$$

De waarde van $s_{99\%}$ volgt uit figuur 4.23. De waarde van $a_{99\%}$ is volgens hoofdstuk 3.3 gelijk aan 0.38 m +N.A.P.

In tabel 6.1 is voor verschillende waarden van de windsnelheid u_5 de waarden van h_{min} , h_{gem} en h_{max} weergegeven.

Vrijling (lit.3) geeft aan dat de uurgemiddelde windsnelheid die gedurende 9 uur wordt overschreden met een Weibull-verdeling kan worden benaderd. Dit leidt dan tot de volgende kansdichtheidsfunctie per hoogwaterstandsklasse (voor $h > 2.5$ m)

$$p(u_9 | \underline{h}=h) = \frac{1.6}{u_{top} - u_{min}} \left(\frac{u_9 - u_{min}}{u_{top} - u_{min}} \right)^{1.6} \exp \left[- \frac{1.6}{2.6} \left(\frac{u_9 - u_{min}}{u_{top} - u_{min}} \right)^{2.6} \right] \quad (6.1)$$

waarin

u_{min} is de minimale windsnelheid u_9 bij $\underline{h}=h$

u_{top} is de windsnelheid t.p.v. de maximale kansdichtheid van de verdeling

Voor dit onderzoek is echter de verdeling van de windsnelheid die gedurende 5 uur wordt overschreden, de u_5 , benodigd.

Het lineaire verband tussen u_9 en u_5 (zie formule (4.15)) geeft aan dat de u_5 eveneens bij benadering een Weibull-verdeling zal volgen. Vanwege het ontbreken van metingen is onderzoek naar de waarde van de parameters van de verdeling niet mogelijk. Wel kan nagegaan worden of formule (6.1) na substituering van u_5 voor u_9 voor ons onderzoek voldoet.

Het criterium hierbij is of de kansdichtheidsfunctie redelijk binnen de grenzen van u_{min} en u_{max} ligt.

De waarden van u_{min} , u_{top} en u_{max} kunnen grafisch bepaald worden in figuur 6.1; bij een bepaalde waterstand kunnen de waarden van u_{min} , u_{top} en u_{max} afgelezen worden uit respectievelijk de lijnen voor h_{min} , h_{top} en h_{max} . In tabel 6.2 is voor verschillende hoogwaterstanden de waarde van u_{min} , u_{top} en $u_{top} - u_{min}$ weergegeven.

Met behulp van de waarden uit tabel 6.2 is de kansdichtheidsfunctie volgens formule (6.1) berekend en grafisch weergegeven in figuur 6.1.

Uit de figuur blijkt dat de berekende kansdichtheidsfunctie van de windsnelheid u_5 goed binnen de grenzen van u_{min} en u_{max} valt, zodat er geen reden is de aangehouden functie te verwerpen.

6.5 Koppeling H_s en hoogwaterstand

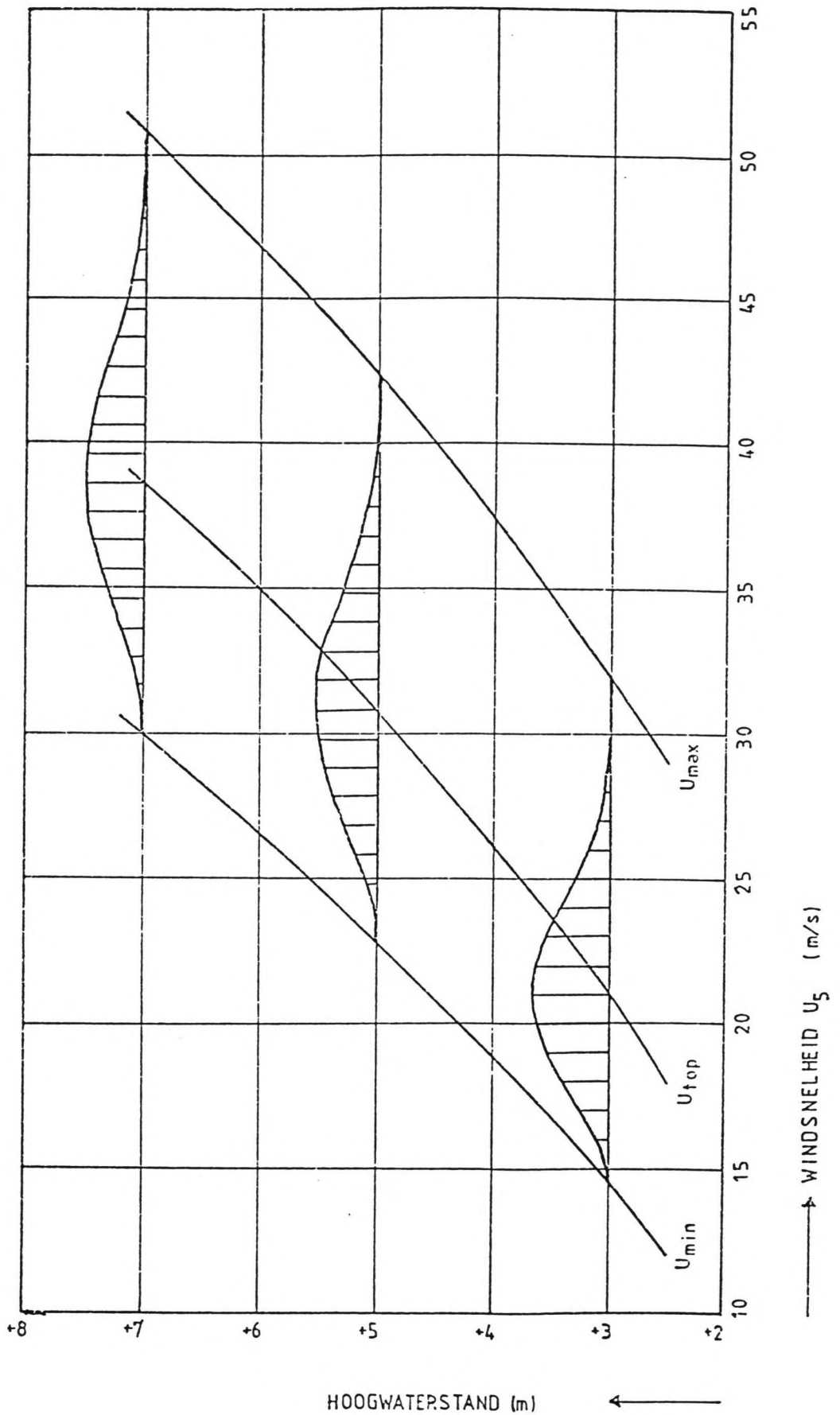
Voor iedere hoogwaterstand h kan vervolgens voor alle windsnelheden $u_5 > u_{min}$ met behulp van de Bretschneiderrelatie de significante golfhoogte H_s bepaald worden.

De voorwaardelijke kansdichtheidsfunctie $p(H_s | h)$ is dan gelijk aan de som van de kansen van optreden van u en F combinaties die resulteren in een bepaalde H_s bij een bepaalde hoogwaterstand:

$$p(H_s | h) = \iint_{H_s} p(u_5 | h) p(F) du_5 dF \quad (6.2)$$

hierbij wordt aangenomen dat u en F onafhankelijk zijn.

De kansdichtheidsfunctie $p(u_5 | h)$ wordt in hoofdstuk 6.4 beschreven. De strijklengte F is richtingsafhankelijk (zie tabel 5.1). Eerder aangenomen werd dat hoogwaterstanden, groter dan een zekere waarde, alleen ontstaan kunnen zijn door windvelden uit NW-N, dus



Figuur 6.1 Hoogwaterstand op het Friese Wad als functie van de uurgemiddelde windsnelheid, die gedurende 5 uur wordt bereikt of overschreden.

u_5 (m/s)	h_{\min} (m + N.A.P.)	h_{gem} (m + N.A.P.)	h_{\max} (m + N.A.P.)
10	0,71	1,46	2,20
12	0,81	1,68	2,49
14	0,93	1,93	2,87
16	1,06	2,20	3,32
18	1,19	2,50	3,81
20	1,36	2,84	4,31
22	1,55	3,19	4,81
24	1,78	3,57	5,33
26	2,05	3,97	5,86
28	2,35	4,39	6,41
30	2,68	4,83	6,98
32	3,01	5,29	7,58
34	3,38	5,78	8,20

Tabel 6.1 Mogelijke hoogwaterstand t.g.v. een windveld met windsnelheid u_5 .

h (m)	u_{top} (m/s)	u_{\min} (m/s)	$u_{\text{top}} - u_{\min}$ (m/s)
2.5	18.0	12.0	6.0
3.0	21.0	14.6	6.4
3.5	23.7	16.8	6.9
4.0	26.1	18.8	7.3
4.5	28.5	20.8	7.7
5.0	30.8	22.7	8.1
5.5	32.9	24.6	8.3
6.0	34.9	26.5	8.4
6.5	36.8	28.3	8.5
7.0	38.7	30.0	8.7
7.5	40.5	31.7	8.8
8.0	42.3	33.3	9.0

Tabel 6.2 Parameters van de Weibull-verdeling als functie van de hoogwaterstand.

$$p(\theta|h > 2.5m) = 1 \quad \text{voor } \theta \in \text{NW-N}$$

$$= 0 \quad \text{elders}$$

In hoofdstuk 5.2 zijn golfdiagrammen afgeleid voor de richtingssectoren $285^\circ-325^\circ$ en $325^\circ-25^\circ$. Voor de bepaling van $p(H_s|h)$ worden deze diagrammen gebruikt.

Daartoe dient eerst bepaald te worden hoe groot de kans is dat tijdens een stormvloed de wind in de sector $285^\circ-325^\circ$ resp. $325^\circ-25^\circ$ ligt. Uit windmetingen op Terschelling blijkt dat er een lichte voorkeur bestaat voor windrichtingen uit de sector $325^\circ-25^\circ$; de voorkomkans van wind uit de sectoren $285^\circ-325^\circ$ en $325^\circ-25^\circ$ bedraagt resp. 0.4 en 0.6.

De voorwaardelijke kansdichtheidsfunctie $p(H_s|h)$ kan nu bepaald worden door bij een bepaalde hoogwaterstand de bijdragen van $p(H_s)$ uit de golfdiagrammen te sommeren.

De bijdrage van $p(H_s)$ uit een richtingssector wordt verkregen door voor een bepaalde H_s -klasse in het golfdiagram door middel van interpolatie de bijbehorende windsnelheidsklasse te bepalen en vervolgens de voorkomkans van de windsnelheidsklasse te vermenigvuldigen met de voorkomkans van de richtingssector. De voorkomkans van de windsnelheidsklasse is gelijk aan de integraal van formule (6.1) binnen de klassegrenzen.

Voor verschillende hoogwaterstanden is de kansdichtheidsfunctie $p(H_s|h)$ berekend en grafisch weergegeven in de figuren 6.2A en 6.2B.

6.6 Benadering van de H_s -waterstandsrelatie

Uit oogpunt van reproduceerbaarheid wordt getracht de in hoofdstuk 6.5 berekende verdeling te benaderen met een bekende kansdichtheidsfunctie.

Daartoe is voor de verschillende hoogwaterstanden de overschrijdingslijn van de H_s berekend en weergegeven op normaal waarschijnlijkheidspapier in figuur 6.3. Uit de figuur blijkt dat de berekende verdeling goed benaderd kan worden met een Gaussische verdeling.

De verwachtingswaarde en de standaarddeviatie van de Gaussische verdeling zijn grafisch bepaald in figuur 6.3 en vermeld in tabel 6.3.

De Gaussische benadering is tevens weergegeven in de figuren 6.2A en 6.2B. Uit deze figuren blijkt dat de benadering voor waarden van $H_s > H_s^{\text{stop}}$ beter is dan voor $H_s < H_s^{\text{stop}}$. Dit wordt veroorzaakt door het verschil in bereik van de berekende en benaderende verdeling; de Gaussische verdeling is gedefinieerd van $-\infty$ tot $+\infty$, terwijl voor een bepaalde minimale waarde van H_s de berekende kansdichtheidsfunctie nul is.

De parameters van de Gaussische benadering blijken bij benadering lineair afhankelijk te zijn van de hoogwaterstand h :

$$E\{H_s\} = 0.244 h + 0.117 \quad \text{voor } 2.5m \leq h \leq 6.5m$$

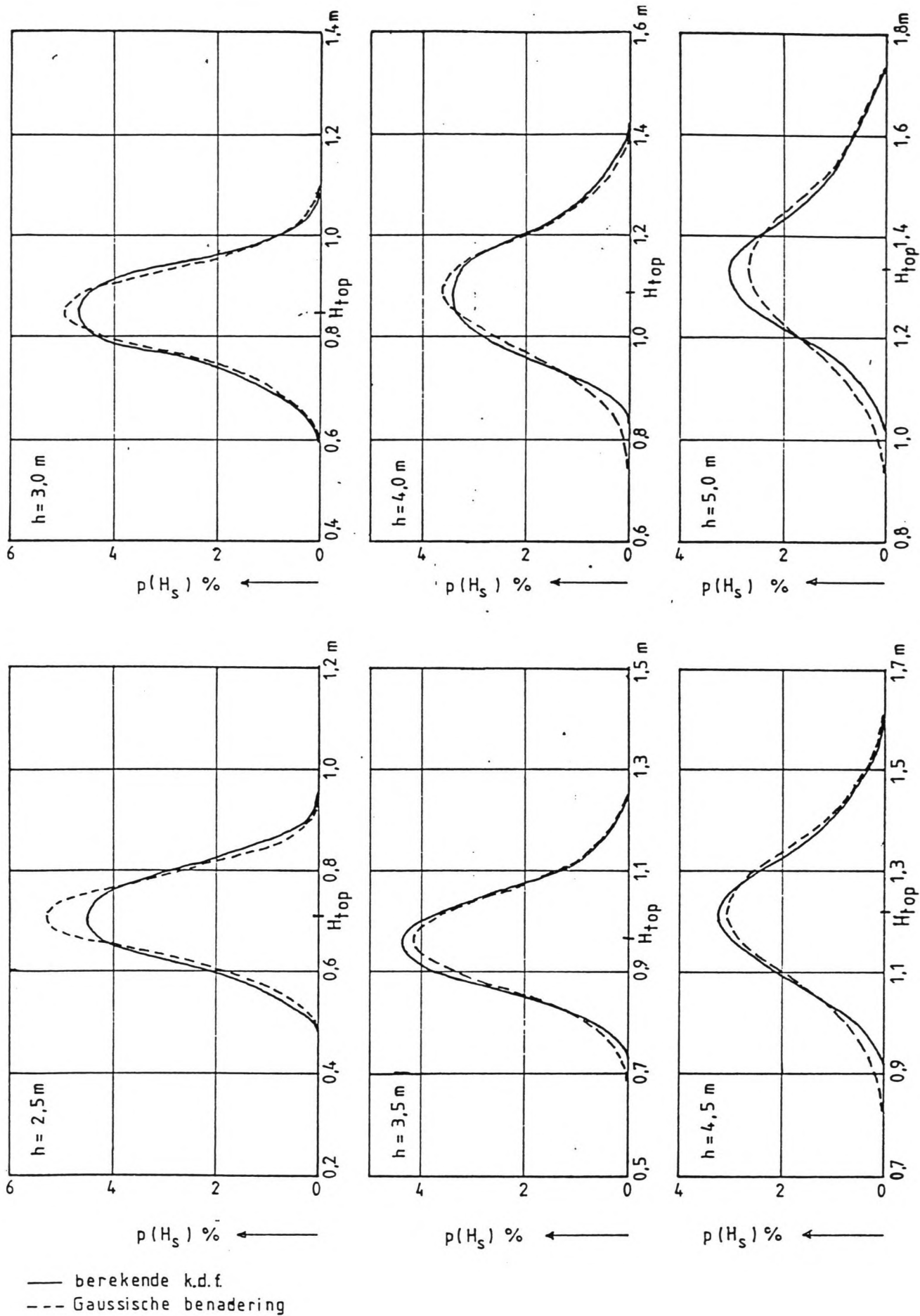
$$\sigma(H_s) = 0.04 h - 0.05 \quad \text{voor } 4.0m \leq h \leq 6.5m \quad (6.3)$$

In figuur 6.4 is voor verschillende hoogwaterstanden de $p(H_s|h)$ volgens de Gaussische benadering weergegeven.

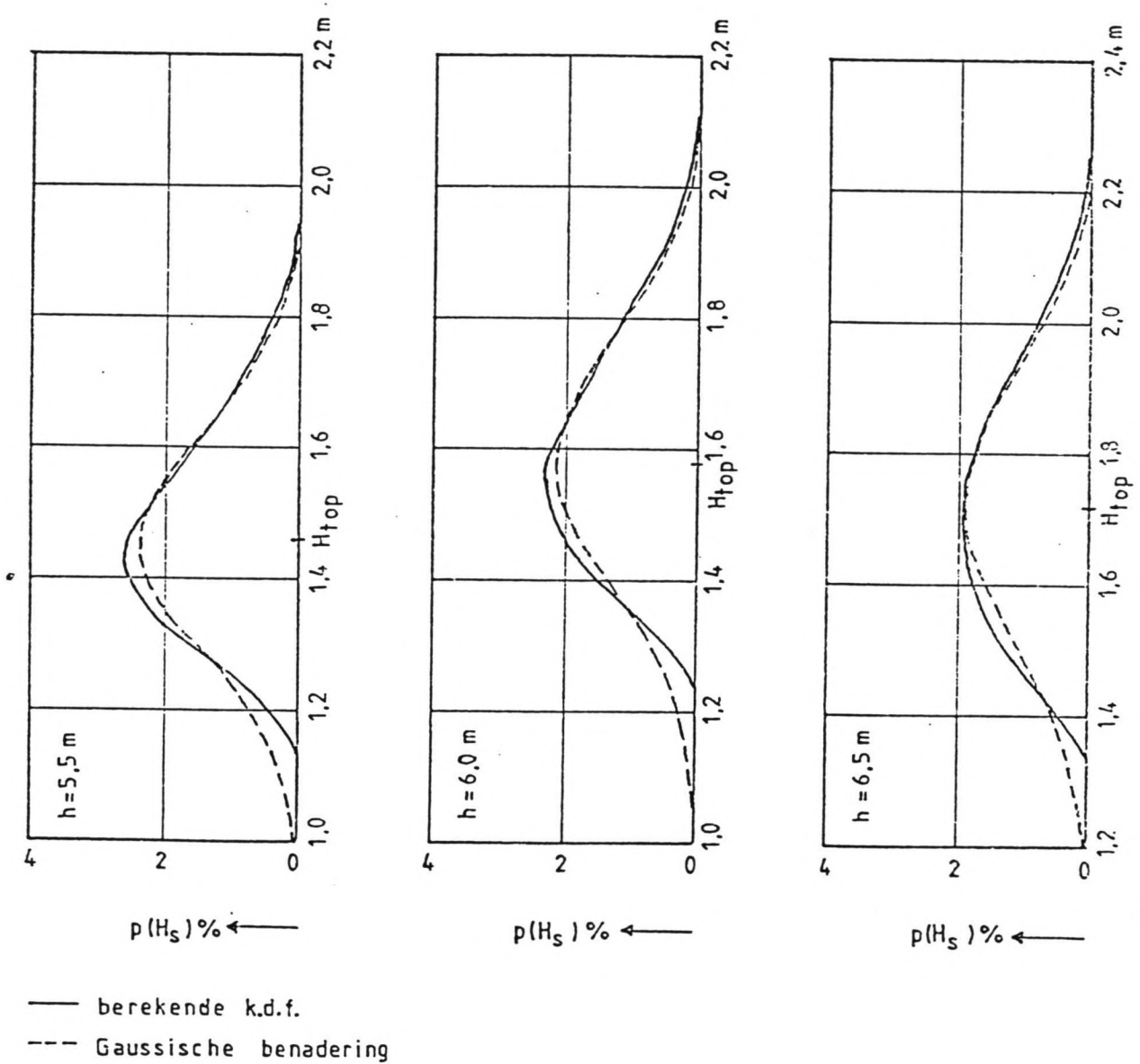
In de figuur is de H_s^{gem} , de $H_s^{1\%}$ en de $H_s^{99\%}$ lijn weergegeven. De laatstgenoemde lijnen geven aan dat voor een bepaalde hoogwaterstand h de significante golfhoogte zich met een kans van 98% zal bevinden tussen de $H_s^{1\%}$ en de $H_s^{99\%}$.

h m + N.A.P.	$\sigma (H_s)$ m	H_s 99% m	H_s 50% m	H_s 1% m
2,5	0,075	0,54	0,73	0,88
3,0	0,08	0,66	0,85	1,04
3,5	0,095	0,75	0,97	1,19
4,0	0,11	0,83	1,09	1,35
4,5	0,13	0,92	1,22	1,52
5,0	0,15	0,99	1,34	1,69
5,5	0,17	1,06	1,46	1,86
6,0	0,19	1,14	1,58	2,02
6,5	0,21	1,23	1,70	2,21

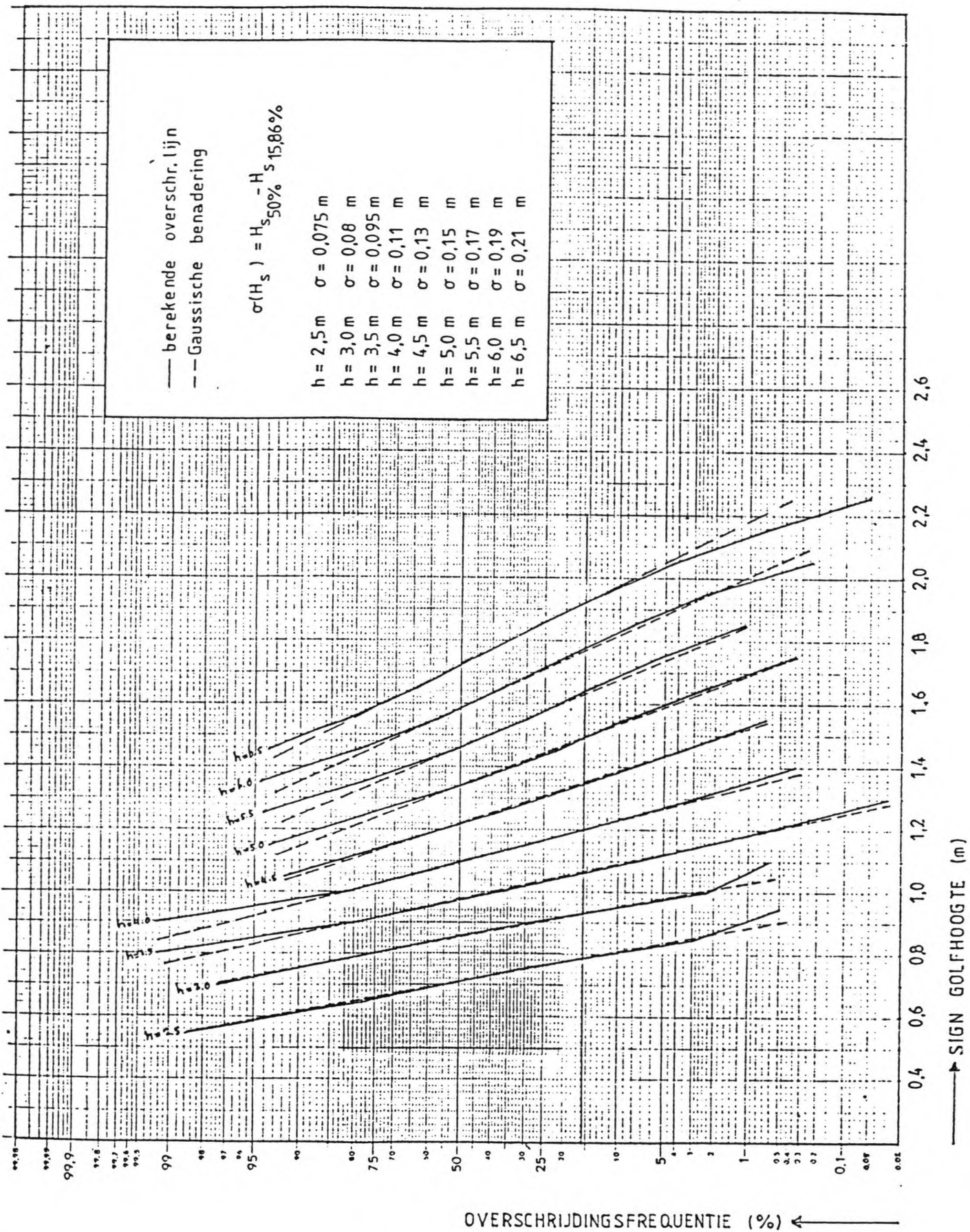
Tabel 6.3 Gaussische benadering van de waterstand-golfhoogte-relatie.



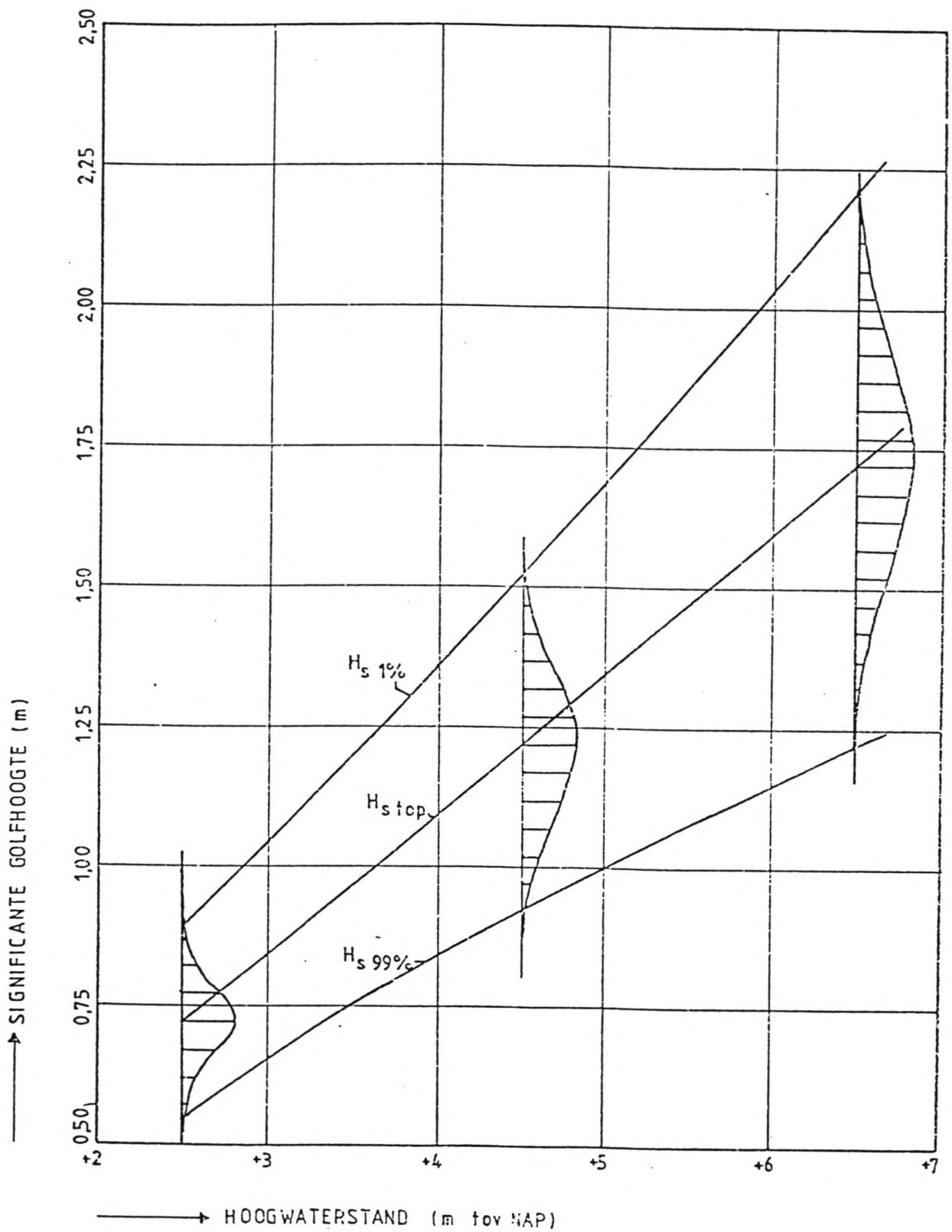
Figuur 6.2A Berekende en benaderende kansdichtheidsfunctie van de
 significante golfhoopte t.p.v. het Friese Wad.



Figuur 6.2B Berekende en benaderende kansdichtheidsfunctie van de
 significante golfhoogte t.p.v. het Friese Wad.



Figuur 6.3 Berekende en benaderende overschrijdinglijn voor de significante golfhoogte t.p.v. het Friese Wad.



Figuur 6.4 Significante golfhoogte-waterstandrelatie ter plaatse van het Friese Wad.

6. Samenvatting en Conclusies

In dit rapport wordt een onderzoek beschreven naar de natuurrandvoorwaarden, die van belang zijn voor het probabilistisch ontwerp van een zanddam ter plaatse van het Friese Wad.

Achtereenvolgens worden het astronomisch getij, de windopzet, de golfgroei en de golfhoogte-waterstandsrelatie, voor zover mogelijk, statistisch beschreven.

Na een beschrijving van de gemiddelde getijkromme voor het Friese Wad, wordt uit de verdeling van het astronomische hoog- en laagwater te Harlingen de verdeling te Zwarte Haan en Holwerd geschat.

De verdeling van het astronomisch hoog- en laagwater te Zwarte Haan en Holwerd blijkt bij benadering Gaussisch te zijn, met als parameters

Zwarte Haan: $E \{ \bar{a}_{HW} \} = 0.93 \text{ m} + \text{N.A.P.}$

$\sigma (\bar{a}_{HW}) = 0.23 \text{ m}$

$E \{ \bar{a}_{LW} \} = 1.15 \text{ m} - \text{N.A.P.}$

$\sigma (\bar{a}_{LW}) = 0.11 \text{ m}$

Holwerd: $E \{ \bar{a}_{HW} \} = 0.98 \text{ m} + \text{N.A.P.}$

$\sigma (\bar{a}_{HW}) = 0.26 \text{ m}$

$E \{ \bar{a}_{LW} \} = 1.36 \text{ m} - \text{N.A.P.}$

$\sigma (\bar{a}_{LW}) = 0.13 \text{ m}$

Beschouwing van 38 stormen in het tijdvak 1946-1979 te Harlingen leert dat de variatie van de windopzet in de tijd goed beschreven kan worden met de betrekking

$$s(t) = s_{\max} \cos^2 \left(\frac{\pi t}{D} \right)$$

hierin is s_{\max} de maximale windopzet tijdens de storm en D is de duur van de windopzet.

Uit bovengenoemd onderzoek blijkt verder dat de duur van de windopzet bij benadering Gaussisch verdeeld is met een verwachtingswaarde gelijk aan 48 uur en een standaarddeviatie van 12 uur.

De maximale windopzet tijdens een storm is op twee manieren benaderd, t.w. via de statistiek van de windopzet zelve en via de statistiek van de windsnelheid.

In het eerste geval is gebruik gemaakt van de waterstandsregistratie te Nieuw-Bildt over het tijdvak 1933-1979. De verdeling van de jaar-maxima van de hoogwaterstanden blijkt bij benadering Gumbel-verdeeld te zijn.

In het tweede geval wordt de windopzet ter plaatse van het Friese Wad gedacht te zijn opgebouwd uit twee componenten, een zgn. Noordzeecomponent en een locale component.

De Noordzeecomponent is berekend met behulp van het theoretische Noordzeemodel, opgesteld door Weenink. Voor de locale component wordt van een empirische formule, opgesteld door Verploegh en Groen, gebruik gemaakt.

Het aldus verkregen windeffect is vergeleken met gemeten windopzet te Holwerd. De gebruikte windeffectformules blijken het gemiddeld verband goed weer te geven, na een correctie voor de richting van het maximale effect. De verdeling van het windeffect over de windsnelheid is Gaussisch aangenomen. De grootte van de spreiding blijkt te variëren met de windsnelheid.

Uit windmetingen van station Leeuwarden is de overschrijdingslijn van de uurgemiddelde windsnelheid u_5 boven zee afgeleid. Vervolgens is met behulp van de windeffectformules de overschrijdingslijn van de hoogwaterstanden te Nieuw-Bildt bepaald.

Vergelijking van deze lijn met de Gumbel-overschrijdingslijn van de jaarmaxima van de hoogwaterstanden leert dat beide methoden goed overeenstemmende resultaten geven.

De golfgroei op de Waddenzee blijkt goed benaderd te kunnen worden met de grafieken van Bretschneider voor ondiep water.

Met behulp van deze grafieken zijn golfdiagrammen voor het Friese Wad samengesteld, waarmee als functie van de windsnelheid en de waterdiepte, per richtingssector, de verwachte significante golfhoogte en -periode bepaald kan worden.

De golfdiagrammen geven een gemiddeld verband.

Met behulp van de diagrammen is de golfhoogte-waterstandsrelatie ter plaatse van het Friese Wad bepaald.

De berekende verdeling van de significante golfhoogte H over de hoogwaterstand h blijkt goed te benaderen met een Gaussische verdeling met parameters, die lineair afhankelijk zijn van de waterstand op de volgende wijze:

$$E \{ \underline{H}_s \} = 0.244 h + 0.117 \quad \text{voor } 2.5\text{m} \leq h \leq 6.5\text{m}$$

$$\sigma (\underline{H}_s) = 0.04 h - 0.05 \quad \text{voor } 4.0\text{m} \leq h \leq 6.5\text{m}$$

In de appendix wordt op theoretisch wijze nagegaan in hoeverre een beïnvloeding van de windsnelheid door de Waddeneilanden doorberekend kan worden in de strijkengte van de wind boven de Waddenzee.

APPENDIX Beïnvloeding van de windsnelheid door de Waddeneilanden

Als gevolg van een verandering in de oppervlakteruwheid zal de windsnelheidsvertikaal enigszins door de Waddeneilanden beïnvloed worden. Een theoretische benadering van dit fenomeen wordt gegeven door Jensen (1977).

Jensen beschrijft de verandering in oppervlakte-schuifspanningssnelheid u_x als gevolg van een verandering in de oppervlakteruwheid z_0 . Uitgaande van een logaritmisch snelheidsprofiel geeft hij aan dat de afstand x , waarover aanpassing wordt verkregen na een verandering in de oppervlakteruwheid, geschat kan worden met de volgende formule:

$$x = z_+ \left[0.2 \text{Ro}_+ / \ln(\text{Ro}_+) \right]^{5/4} \quad (\text{A1})$$

waarin

z_+ is de oppervlakteruwheid benedenstrooms van de verandering (m)

Ro_+ is het oppervlakte Rossbygetal benedenstrooms van de verandering

Het Rossbygetal is te berekenen met $\text{Ro}_+ = g/z_+ f$

hierin is g de versnelling van de zwaartekracht en f is de Coriolisparameter = $116.44 \cdot 10^{-6}$.

De oppervlakteruwheid wordt indirect beïnvloed door de windsnelheid via de golfhoogte. Hoe hoger de golven, hoe groter de ruwheid. Theoretisch is het volgende verband afgeleid:

$$z_0 = 10 \exp \left[\frac{-u(10) \cdot \kappa}{\{ \text{CDN } u(10)^2 \}^{1/2}} \right] \quad (\text{A2})$$

waarin

$u(10)$ is de windsnelheid op 10 meter boven het wateroppervlak

κ is de konstante van Von Karman = 0.4

CDN is de dragcoëfficiënt volgens Large (lit.11)

Met behulp van de bovenstaande formules kan de aanpassing van de windsnelheidsvertikaal geschat worden. Daarbij worden de volgende aannamen gedaan:

1. De windsnelheidsvertikaal boven de Noordzee is volledig aangepast aan de heersende oppervlakteruwheid.
2. De oppervlakteruwheid van de Noordzee en de Waddenzee worden gelijk verondersteld, zijnde $z_0 = 0.005 \text{ m}$ (Wieringa, lit.25).
3. De oppervlakteruwheid van een Waddeneiland wordt geschat op 0.10 m , naar een indeling volgens Davenport (1960).
4. De windsnelheidsvertikaal kan beschreven worden door een logaritmisch verband volgens:

$$\bar{u}(z) = u_x / \kappa \ln(z/z_0) \quad (\text{A3})$$

5. De aanpassing van de windsnelheid op 10 meter hoogte verloopt lineair met de afstand.

In het volgende getallenvoorbeeld wordt bekeken in hoeverre een wind met een snelheid van 35 m/s op 10 meter boven de Noordzee door een Waddeneiland afgeremd wordt. Vervolgens wordt de afstand berekend die de wind nodig heeft om op 10 meter boven de Waddenzee wederom een snelheid van 35 m/s te bereiken.

In de evenwichtstoestand geldt boven de Noordzee:
 $z_+ = 0.005\text{m}$ en $u(10) = 35\text{m/s}$

De evenwichtstoestand boven een Waddeneiland met $z_+ = 0.1\text{m}$ kan berekend worden met de transformatiefactor. Volgens Wieringa (lit.25) is dan de windsnelheid boven het eiland $u(10) = 0.87 u(10)_{\text{boven zee}} = 31\text{m/s}$.

Substitutie van bovenstaande waarden in formule (A1) geeft een aanpassingslengte van ca. 13 km.

De breedte van Ameland of Terschelling is hooguit 6 km. Uitgaande van een lineaire aanpassing betekent dit dat aan de waddenzijde van het eiland de windsnelheid op 10 meter hoogte is afgeremd tot ca. 33 m/s.

Boven de Waddenzee treedt een groei van de windsnelheid op als gevolg van de verminderde oppervlakteruwheid.

Na substitutie van $z_+ = 0.005\text{m}$ volgt nu voor de aanpassingslengte 22 km. Dit betekent dat voor de overgang van de evenwichtstoestand boven het eiland ($u = 31\text{ m/s}$) naar de evenwichtstoestand boven de Waddenzee ($u = 35\text{ m/s}$) een afstand van 22 km benodigd is.

Echter de windsnelheid aan de waddenzijde van het eiland is 33 m/s, zodat nu slechts 11 km benodigd is om de evenwichtstoestand boven de Waddenzee te bereiken.

De windsnelheid neemt dus toe van 33 tot 35 m/s over een afstand van 11 km. De gemiddelde windsnelheid over deze afstand is dan 34 m/s. Uit de Bretschneider-golfgroeigrafiek blijkt dat de H_s bij $u = 34\text{ m/s}$ en $F = 11\text{ km}$ dezelfde waarde heeft als bij $u = 35\text{ m/s}$ en $F = 10\text{ km}$. Door een reductie van 1 km in de strijklengte toe te passen kan dus bij benadering toegekomen worden aan een verdiscontering van de "schaduwwerking" van de Waddeneilanden.

LITERATUURLIJST

1. Agema, J.F.
Waterkeringen, collegediktaat
Afdeling der Civiele Techniek, T.H.Delft, 1982
2. Battjes, J.A.
Windgolven, collegehandleiding
Afdeling der Civiele Techniek, T.H.Delft, 1982
3. Bruinsma, J. en Van de Graaff, J
Golfhoogte-waterstandsrelatie nabij Hoek van Holland
notitie WWKZ-826259
Rijkswaterstaat, Den Haag, 1982
4. Getijtafels voor Nederland
Rijkswaterstaat, dir. W&W, Den Haag, div. jaargangen
5. Huisman, P.
Extreme waarden en Decisieproblemen
Afdeling der Civiele Techniek, T.H.Delft, 1966
6. Inventarisatie van methoden voor de berekening van de
kruinhoogten van zeedijken
nota S-75.039a
C.O.W., Den Haag, 1978
7. Jaarboek der waterhoogten
Rijkswaterstaat, dir.W&W, Den Haag, div. jaargangen
8. Jensen, N.O.
Change of surface roughness and the planetary boundary layer
Quart.J.R.Met.Soc 1978 no.104, pag.351-356
9. Koning, J.C.F.M.
Golfbeweging Waddenzee bij Ameland
nota 72.2
Rijkswaterstaat, adviesdienst Hoorn, 1972

10. Koning, J.C.F.M. en Kreuk, J.J.N.
De golfbeweging nabij het Amelanders Wantij
Nota 74.8
Rijkswaterstaat, Adviesdienst Hoorn, 1974
11. Large, W.G. en Pond, S.
Open Ocean momentum flux measurement in moderate to strong winds
Journal of Physical Oceanography, maart 1981, pagina 324 - 336
12. Meteorologische en Oceanografische aspecten van stormvloed op de
Nederlandse kust
Bijdrage tot het rapport van de Delta Commissie
K.N.M.I., Den Haag, 1960
13. Oemraw, B.
Stationsbeschrijving windwaarneming Leeuwarden periode 1949 - 1980
K.N.M.I. technisch rapport T.R.-28, De Bilt, 1982
14. Omtrent de kruinhoogte van de Waddenzeedijk
Zwarte Haan -- Amelanders Veer
Nota 75 -7a
Rijkswaterstaat, directie Noord-Holland, 1975
15. Otto, L. en Visser M.P.
Het K.N.M.I. en de zee
Publikatie no 157
De Bilt, 1980
16. Philipse, L.
Versterken van Friese Zeedijken
Provinciale Waterstaat Friesland, 1978
17. Rakhorst, H.D.
Stroming veroorzaakt door wind, deel I, theorie
Nota WWKZ - 80.H.004
Rijkswaterstaat, Adviesdienst Hoorn, 1981

18. Reus, J. de
Toetsing van golfvoorspellingsmethoden aan gemeten waarden, afkomstig van golfmetingen in ondiep water
Afstudeerrapport, vakgroep Vloeistofmechanica
Afdeling der Civiele Techniek, TH-Delft 1977
19. Schalkwijk, W.F.
A contribution to the study of storm surges on the Dutch Coast
K.N.M.I., mededelingen en verhandelingen B 7, De Bilt 1947
20. Seyhan, E.
Application of statistical methods to Hydrology
Institution of Earth Sciences, V.U. Amsterdam, 1980
21. Shore Protection Manual
U.S. Army, Coastal Engineering Research Center
Volume I, 1977
22. Verploegh, G. en Groen, P.
De uitwerking van de wind over de Groningse Waddenzee op de hoogwaterstanden van Delfzijl
K.N.M.I., wetenschappelijk rapport, De Bilt, 1955
23. Vrijling, J.K. en Bruinsma, J.
Hydraulic Boundary Conditions
Symposium on hydraulic aspects of coastal structures
Rijkswaterstaat, Delft University Press, 1980
24. Weenink, M.P.H.
A theory and method of calculation of wind effects on sea levels in a partly enclosed sea
Proefschrift, Den Haag, 1958
25. Wieringa, J.
Representativeness of wind observations at Airports
Bulletin of the American Meteorological Society, september 1980
pagina 962 - 971

LIJST VAN SYMBOLEN

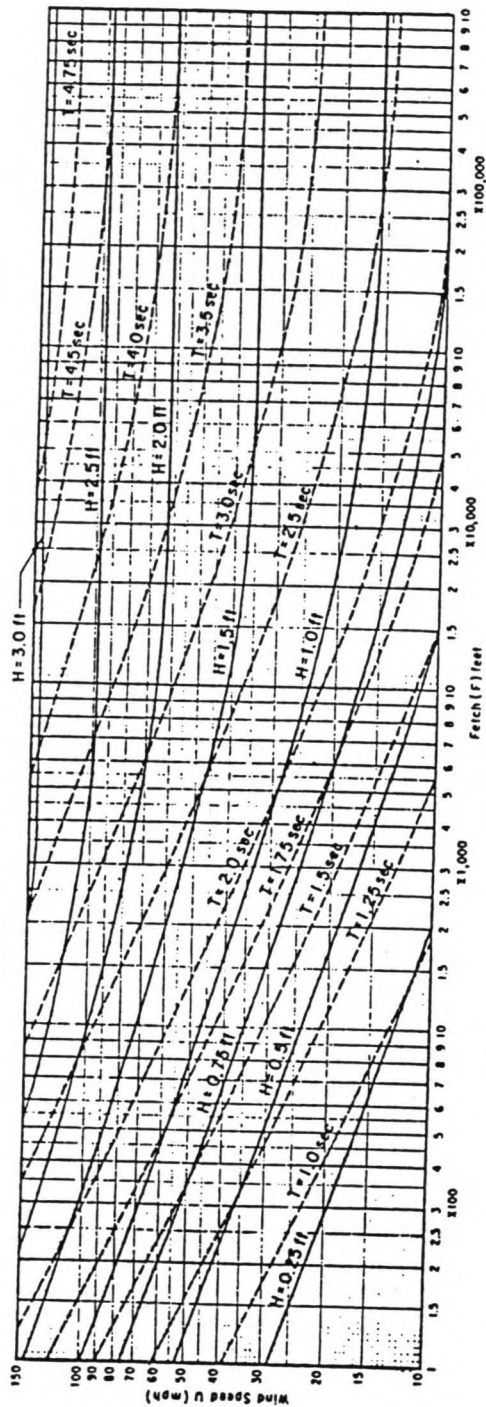
<u>Symbool</u>	<u>Omschrijving</u>	<u>Dimensie</u>
a	breedte Noordzeemodel	(m)
a(t)	astronomisch getij op tijdstip t	(m t.o.v.NAP)
a _{HW}	astronomisch hoogwater	(m +NAP)
a _{LW}	astronomisch laagwater	(m -NAP)
a _{spring}	springtij	(m +NAP)
a _{gem}	gemiddeld hoogwater	(m +NAP)
a _{1%}	hoogwater met overschrijdingsfrequentie van 1%	(m +NAP)
a _{99%}	hoogwater met overschrijdingsfrequentie van 99%	(m +NAP)
A	coefficient	
b	lengte Noordzeemodel	(m)
b	evenredigheidsfactor	
B	statisch windeffect	(m)
C	coefficient	
CDN	dragcoefficient volgens Large en Pond	(-)
d	diepte	(m)
D	duur van de windopzet	(uur)
f	coriolisparameter	(sec ⁻¹)
F	strijklengte (Fetch)	(m)
g	versnelling van de zwaartekracht	(m/s ²)
h	waterstand	(m t.o.v.NAP)
h _{min}	ondergrens aan waterstand	(m t.o.v.NAP)
h _{gem}	gemiddelde waterstand	(m t.o.v.NAP)
h _{max}	bovengrens aan waterstand	(m t.o.v.NAP)
H _s	significante golfhoogte	(m)
H _s 1%	H _s met overschrijdingsfrequentie van 1%	(m)
H _s top	H _s t.p.v. de maximale kansdichtheid van de verdeling	(m)
H _s 99%	H _s met overschrijdingsfrequentie van 99%	(m)
m	rangnummer	(-)
n	totaal aantal onafhankelijke variabelen	(-)
N	totaal aantal metingen	(-)
Ro ₊	oppervlakte Rossbygetal benedenstrooms van een verandering in oppervlakteruwheid	(-)

<u>Symbool</u>	<u>Omschrijving</u>	<u>Dimensie</u>
s	windopzet (-effect)	(m)
$s(t)$	windopzet als functie van de tijd	(m)
s_{\max}	maximale windopzet	(m)
\bar{s}	gemiddelde windopzet	(m)
Δs	additionele windopzet	(m)
$S_y'^2$	variantie	
t	tijd	(uren)
T_o	getijperiode	(u.min)
T_s	significante golfperiode	(sec)
u	windsnelheid	(m/s)
\bar{u}	gemiddelde windsnelheid	(m/s)
u_{\min}	ondergrens aan windsnelheid	(m/s)
u_{top}	windsnelheid t.p.v. maximale kansdichtheid van de verdeling	(m/s)
u_{\max}	bovengrens aan windsnelheid	(m/s)
u_k	uurgemiddelde windsnelheid die in k uur bereikt of overschreden wordt	(m/s)
$u(z)$	windsnelheid op z meter boven het oppervlak	(m/s)
x	horizontale coördinaat	
y	horizontale coördinaat	
y_{red}	parameter	(-)
y_j	j de gemeten waarde	(-)
y_j'	j de berekende waarde	(-)
z	vertikale coördinaat	
z_0	oppervlakteruwheid	(m)
z_+	oppervlakteruwheid benedenstrooms van een verandering	(m)
z_-	oppervlakteruwheid bovenstrooms van een verandering	(m)
$p(x)$	kansdichtheidsfunctie van een variabele x	
$E\{x\}$	verwachtingswaarde van een stochastische variabele x	
$\sigma(x)$	standaarddeviatie van een stochastische variabele x	

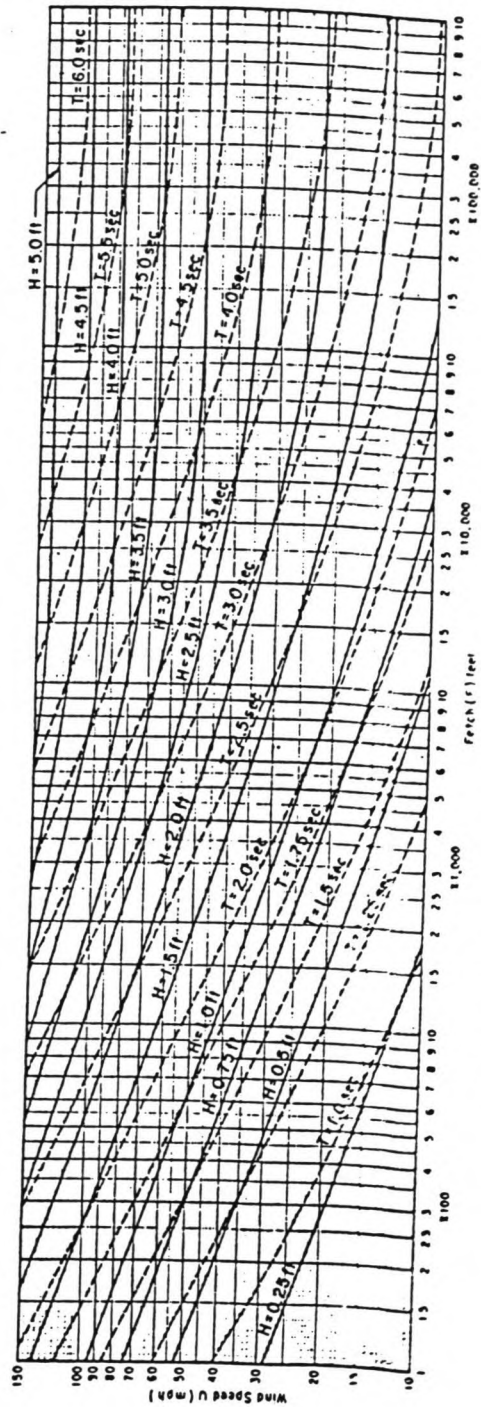
<u>Symbool</u>	<u>Omschrijving</u>	<u>Dimensie</u>
α	windrichting t.o.v. het Noorden	(graden)
α_0	richting van het maximale effect t.o.v. het Noorden	(graden)
α_s	hoek tussen de y-as van het Noordzeemodel en de windrichting	(graden)
α	parameter	
β	parameter	
ρ	dichtheid van zeewater	(kg/m ³)
ρ_1	dichtheid van lucht	(kg/m ³)
$\gamma^2(z)$	dragcoëfficiënt op z meter boven het oppervlak	
κ	konstante van Von Kármán	
τ_s	windschuifspanning	(N/m ²)



Bijlage 1. Overzichtskaart van de Westelijke Waddenzee.

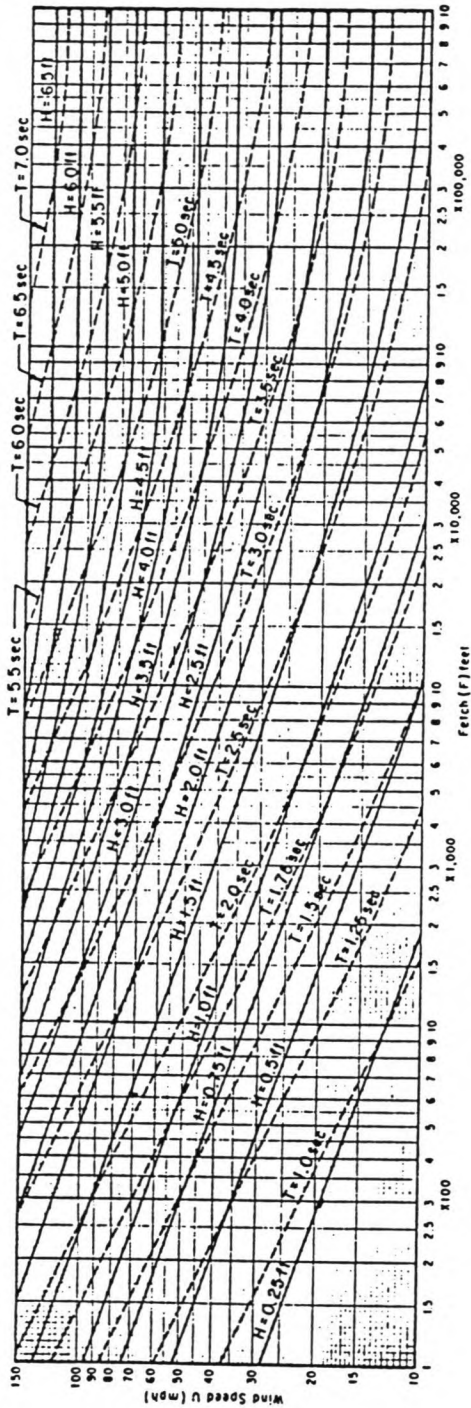


Forecasting Curves for Shallow-Water Waves. Constant Depth = 5 feet.

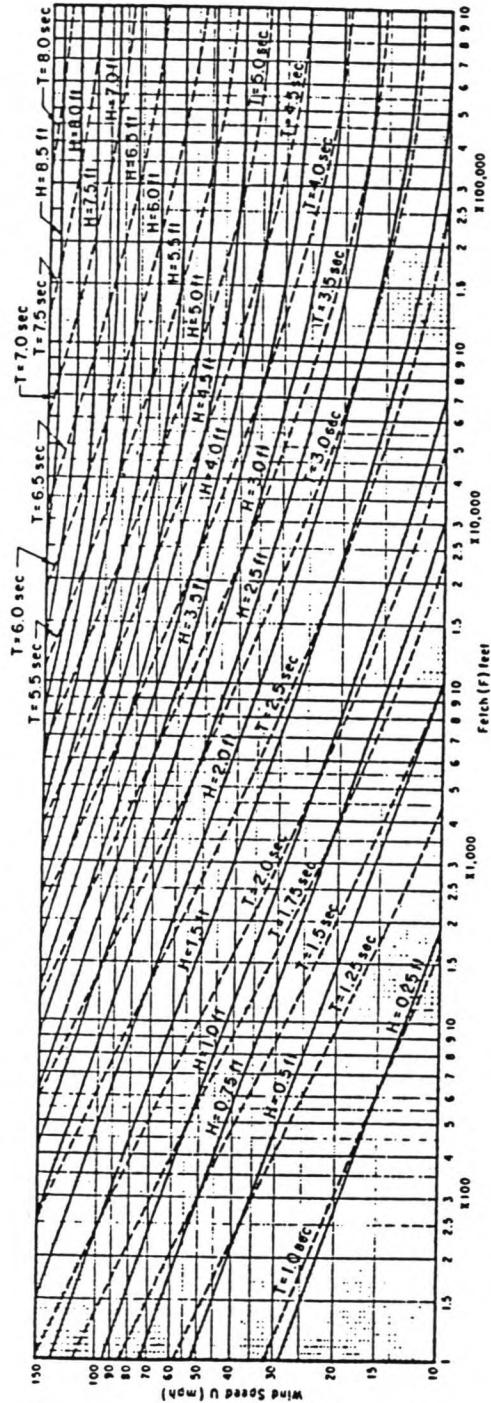


Forecasting Curves for Shallow-Water Waves. Constant Depth = 10 feet.

Bijlage 2a. Golfgroeigrafieken van Bretschneider voor ondiep water (diepte = 5,10 ft), ontleend aan lit. 21.

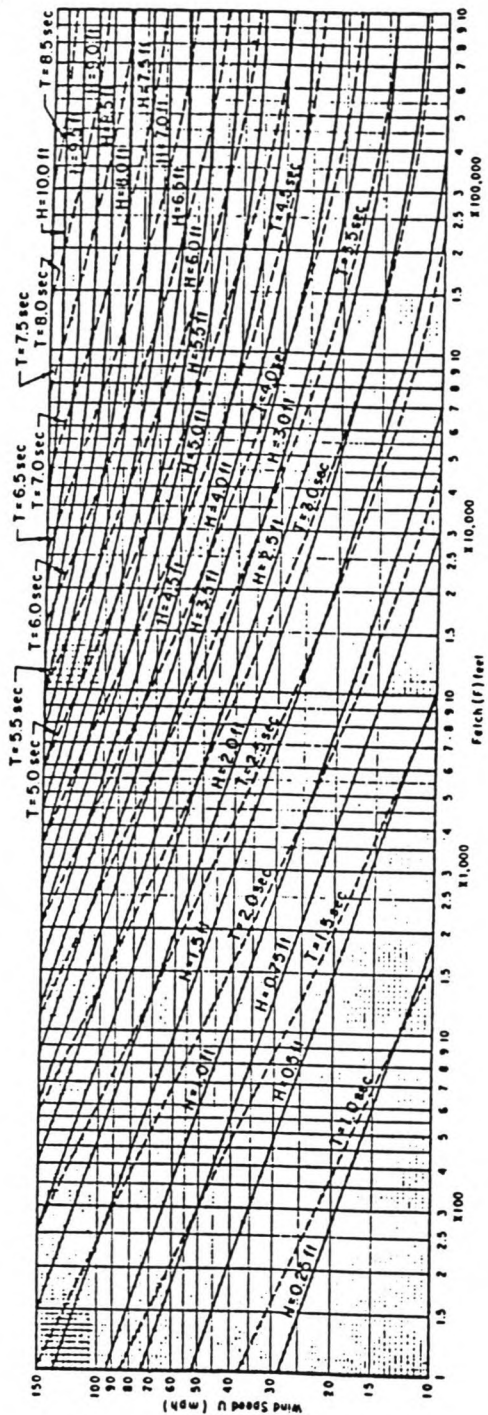


Forecasting Curves for Shallow-Water Waves. Constant Depth = 15 feet.

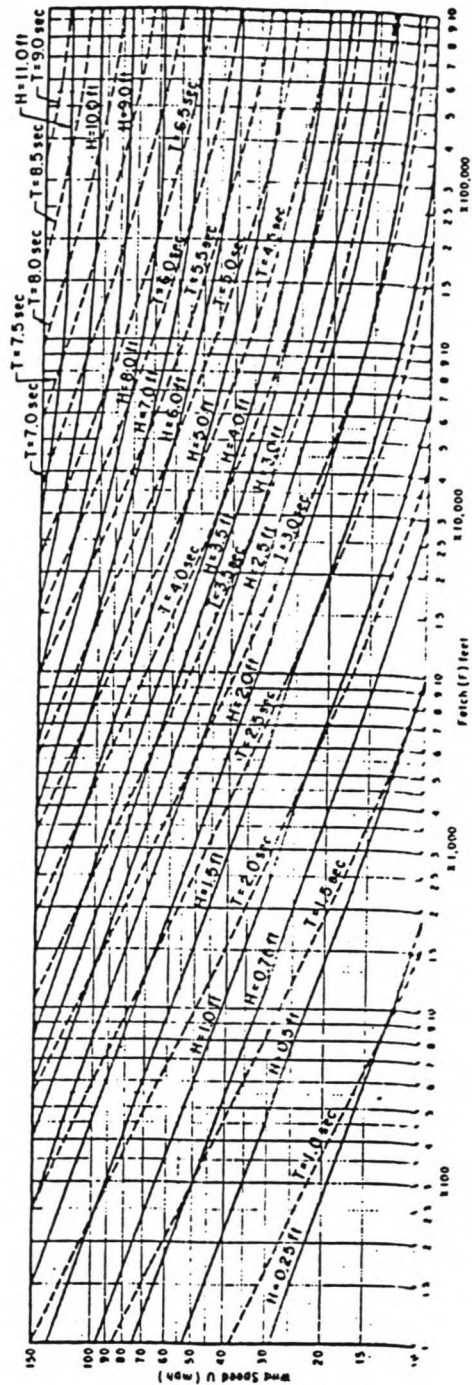


Forecasting Curves for Shallow-Water Waves. Constant Depth = 20 feet.

Bijlage 2b. Golfgroeigrafieken van Bretschneider voor ondiep water (diepte = 15,20 ft), ontleend aan lit.21.



Forecasting Curves for Shallow-Water Waves. Constant Depth = 25 feet.



Forecasting Curves for Shallow-Water Waves. Constant Depth = 30 feet.

Bijlage 2c. Golfgroefgrafieken van Bretschneider voor ondiep water (diepte = 25,30 ft), ontleend aan lit.21.

astronomisch hoogwater (m +N.A.P.)	frequentie	cumulatieve frequentie	rel.cum. frequentie (%)
1,28	1	1	0,1416
1,26	2	3	0,4249
1,25	3	6	0,8498
1,24	2	8	1,133
1,23	2	10	1,416
1,22	6	16	2,266
1,21	4	20	2,833
1,20	5	25	3,541
1,19	4	29	4,108
1,18	6	35	4,958
1,17	9	44	6,232
1,16	9	53	7,507
1,15	5	59	8,357
1,14	11	70	9,915
1,13	13	83	11,76
1,12	7	90	12,75
1,11	7	97	13,74
1,10	5	102	14,45
1,09	13	115	16,29
1,08	7	122	17,28
1,07	9	131	18,56
1,06	4	135	19,12
1,05	8	143	20,25
1,04	6	149	21,10
1,03	7	156	22,10
1,02	10	166	23,51
1,01	11	177	25,07
1,00	9	186	26,35
0,99	14	200	28,33
0,98	3	203	28,75

Bijlage 3. Overschrijdingsfrequentie van het astronomisch hoogwater te Harlingen gedurende januari-december 1982.

astronomisch hoogwater (m +N.A.P.)	frequentie	cumulatieve frequentie	rel.cum. frequentie (%)
0,97	14	217	30,74
0,96	13	230	32,58
0,95	7	237	33,57
0,94	9	246	34,84
0,93	17	263	37,25
0,92	12	275	38,95
0,91	8	283	40,08
0,90	13	296	41,93
0,89	20	316	44,76
0,88	11	327	46,32
0,87	10	337	47,73
0,86	12	349	49,43
0,85	12	361	51,13
0,84	17	378	53,54
0,83	18	396	56,09
0,82	16	412	58,36
0,81	12	424	60,06
0,80	14	438	62,04
0,79	16	454	64,31
0,78	7	461	65,30
0,77	8	469	66,43
0,76	14	483	68,41
0,75	10	493	69,83
0,74	14	507	71,81
0,73	10	517	73,23
0,72	11	528	74,79
0,71	14	542	76,77
0,70	10	552	78,19
0,69	6	558	79,04
0,68	12	570	80,74
0,67	13	583	82,58
0,66	9	592	83,85
0,65	8	600	84,99

Bijlage 3 (vervolg)

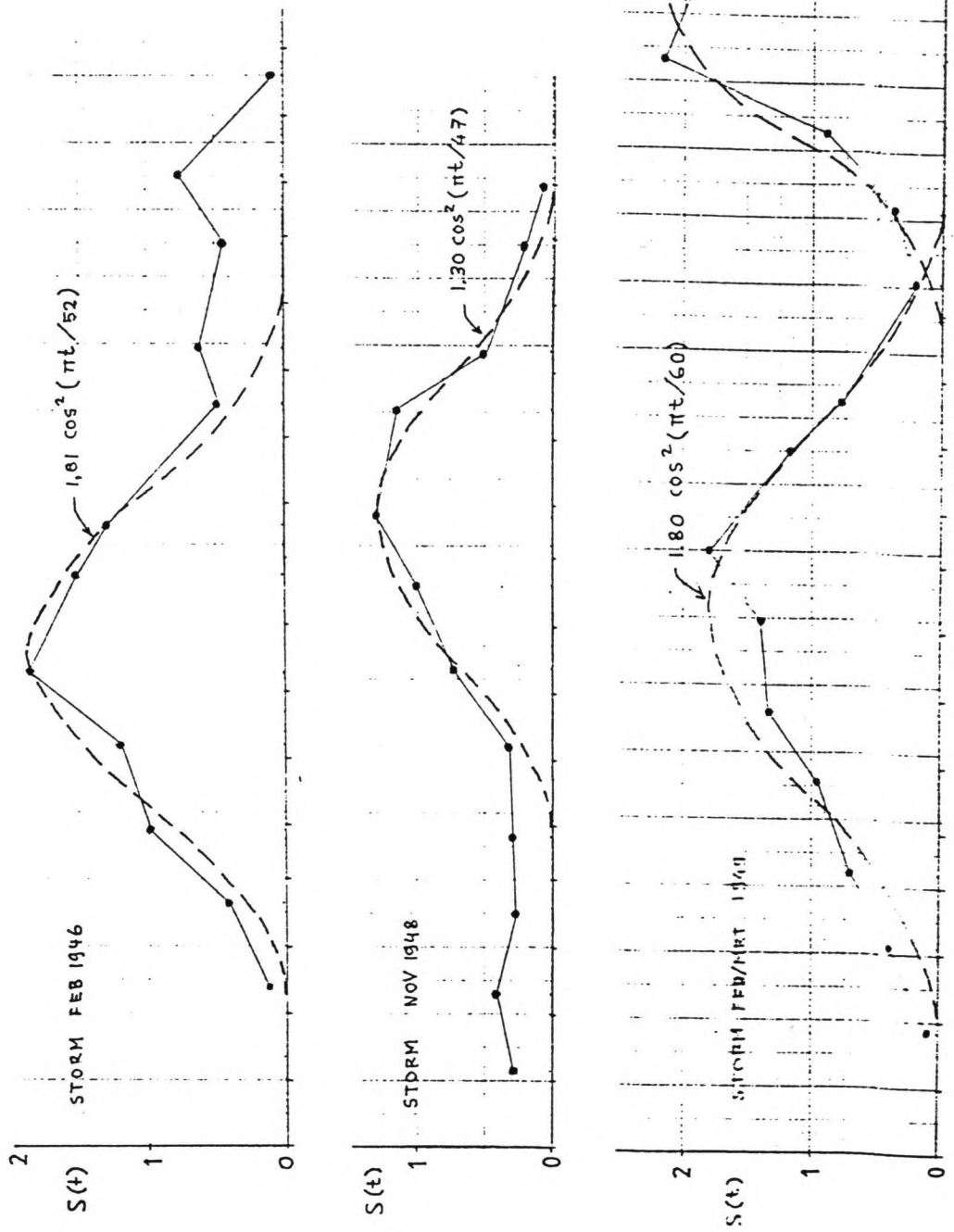
astronomisch hoogwater (m +N.A.P.)	frequentie	cumulatieve frequentie	rel.cum. frequentie (%)
0,64	5	605	85,69
0,63	10	615	87,11
0,62	6	621	87,96
0,61	9	630	89,24
0,60	4	634	89,80
0,59	6	640	90,65
0,58	7	647	91,64
0,57	4	651	92,21
0,56	6	657	93,06
0,55	4	661	93,63
0,54	4	665	94,19
0,53	3	668	94,62
0,52	4	672	95,18
0,51	4	676	95,75
0,50	3	679	96,18
0,49	3	682	96,60
0,48	2	684	96,88
0,47	5	689	97,59
0,45	4	693	98,16
0,42	2	695	98,44
0,41	2	697	98,73
0,40	2	699	99,00
0,38	2	701	99,29
0,37	1	702	99,43
0,36	2	704	99,71
0,34	1	705	99,85

Bijlage 3 (vervolg)

astronomisch laagwater (m -N.A.P.)	frequentie	cumulatieve frequentie	rel.cum. frequentie (%)
1,26	3	3	0,4249
1,25	4	7	0,9915
1,24	1	8	1,13
1,23	1	9	1,27
1,22	1	10	1,42
1,20	2	12	1,70
1,18	6	18	2,55
1,17	1	19	2,69
1,16	8	27	3,82
1,15	8	35	4,96
1,14	9	44	6,23
1,13	18	62	8,78
1,12	18	80	11,33
1,11	14	94	13,31
1,10	13	107	15,16
1,09	16	123	17,42
1,08	17	140	19,83
1,07	20	160	22,66
1,06	28	188	26,63
1,05	22	210	29,75
1,04	16	226	32,01
1,03	23	249	35,27
1,02	18	267	37,82
1,01	17	284	40,23
1,00	29	313	44,33
0,99	21	334	47,31
0,98	23	357	50,57
0,97	20	377	53,40
0,96	25	402	56,94
0,95	17	419	59,35
0,94	20	439	62,18
0,93	22	461	65,30
0,92	16	477	67,56

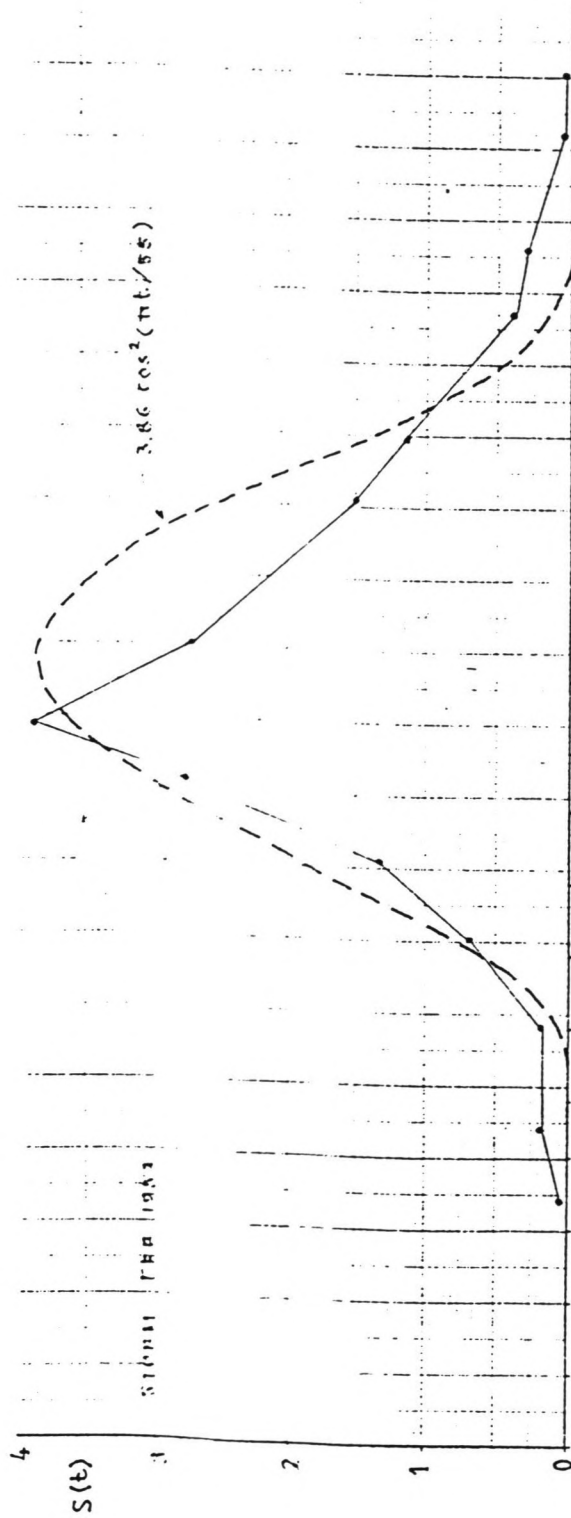
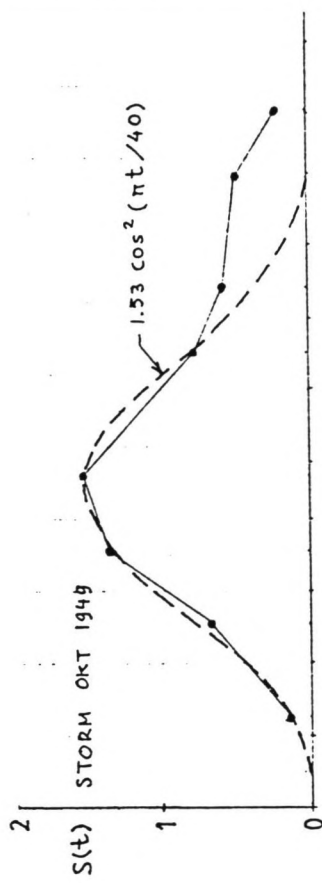
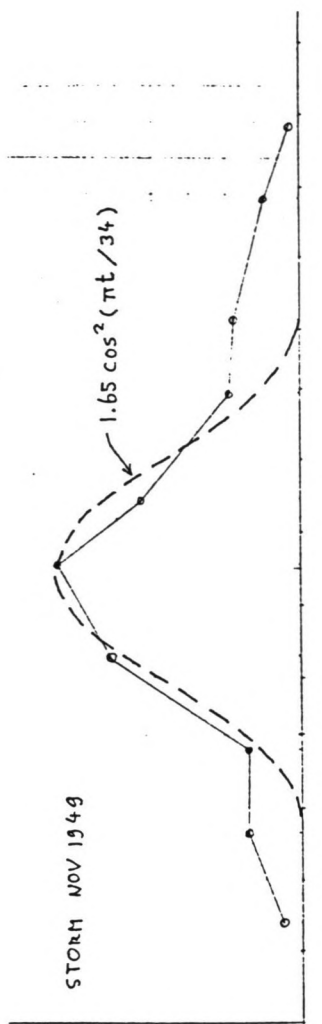
Bijlage 4. Overschrijdingsfrequentie van het astronomisch laagwater te Harlingen gedurende januari-december 1982.

astronomisch laagwater (m -N.A.P.)	frequentie	cumulatieve frequentie	re.cum. frequentie (%)
0,91	15	492	69,69
0,90	14	506	71,67
0,89	13	519	73,51
0,88	16	535	75,78
0,87	17	552	78,19
0,86	23	575	81,44
0,85	17	592	83,85
0,84	24	616	87,25
0,83	13	629	89,09
0,82	10	639	90,51
0,81	15	654	92,63
0,80	14	668	94,62
0,79	5	673	95,33
0,78	8	681	96,46
0,77	8	689	97,59
0,76	6	695	98,44
0,75	3	698	98,87
0,74	2	700	99,150
0,73	2	702	99,433
0,72	2	704	99,717
0,71	1	705	99,858

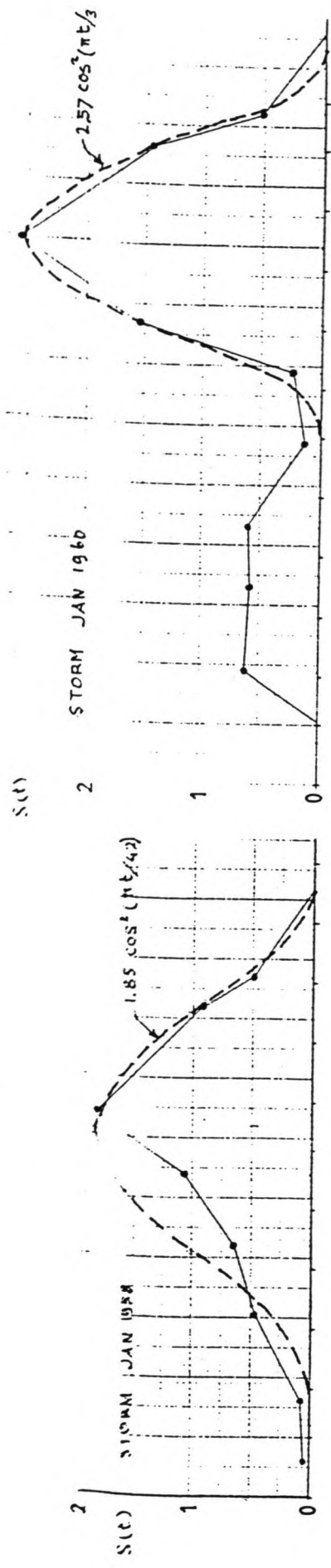
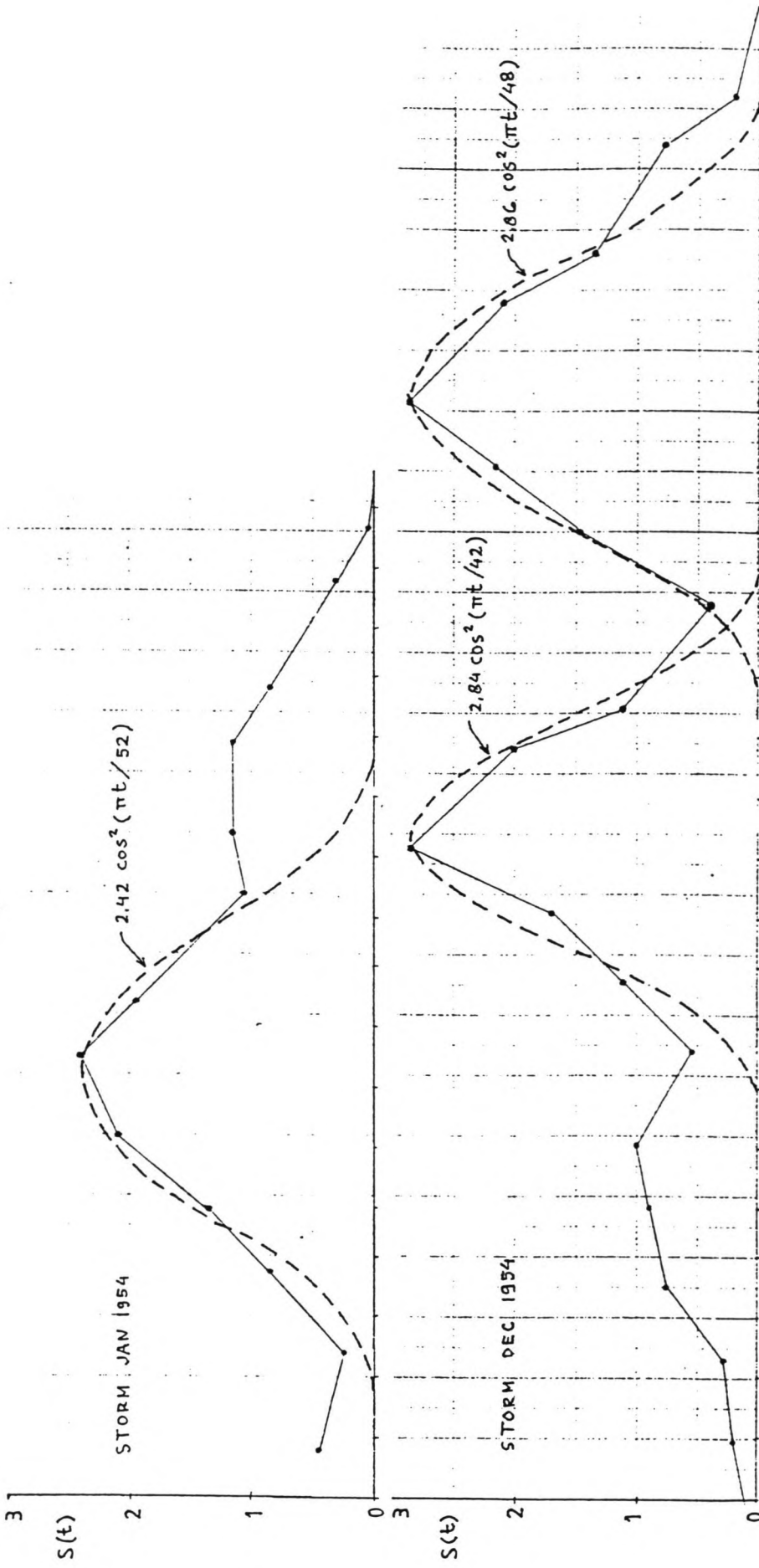


Bijlage 5. Windopzet op de Waddenzee als functie van de tijd gedurende 38 stormen in de periode 1946-1979.

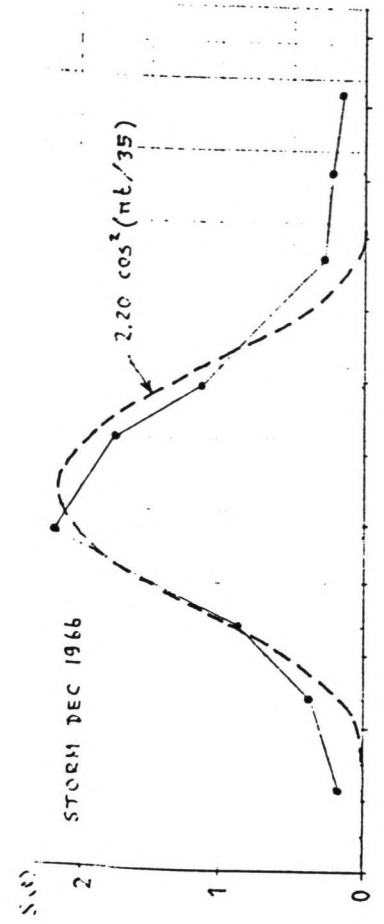
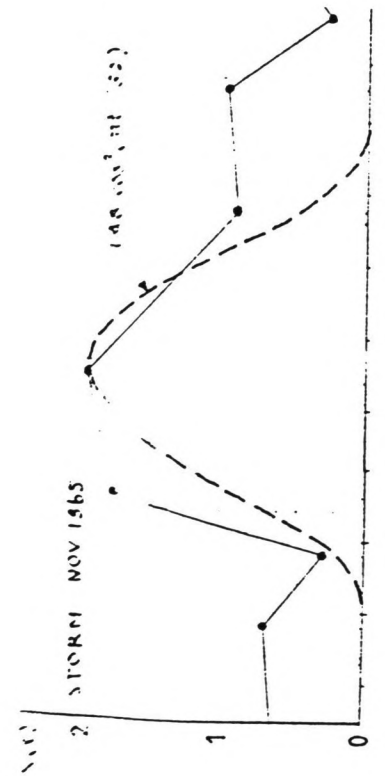
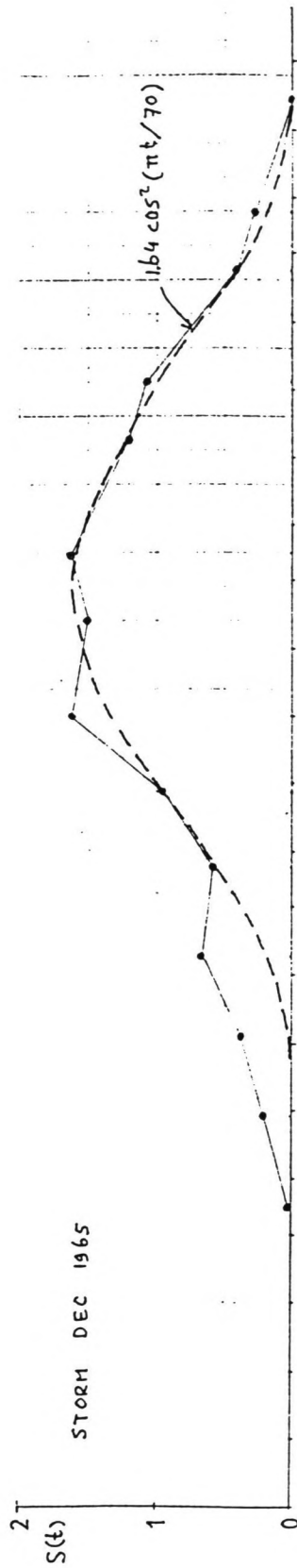
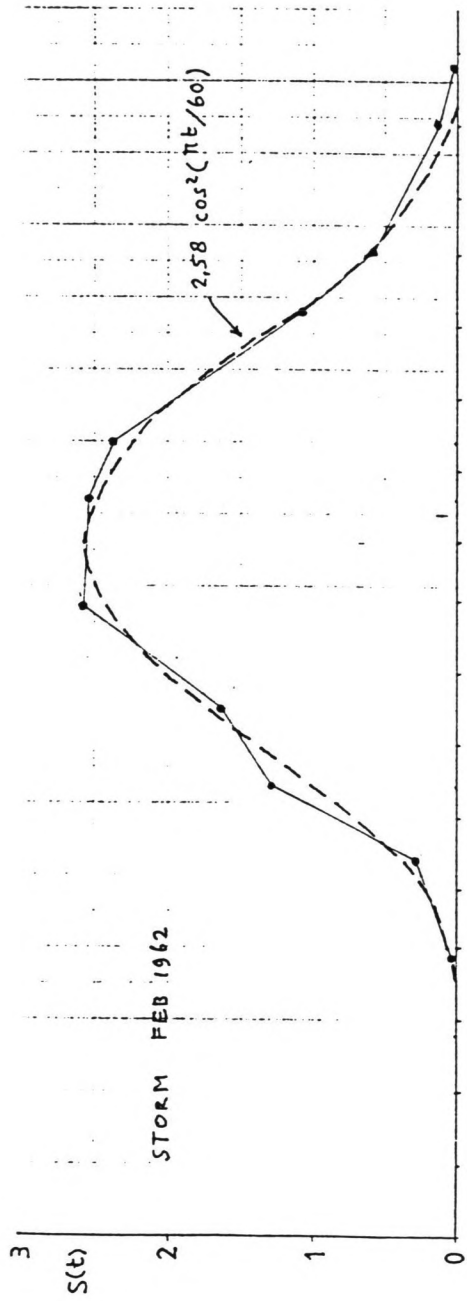
- gemeten windopzet te Harlingen
- windopzet volgens de benadering $s(\tau) = s_{\max} \cos^2(\pi \tau / D)$

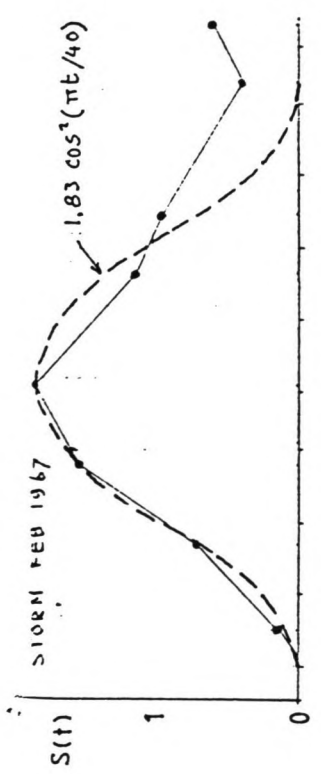
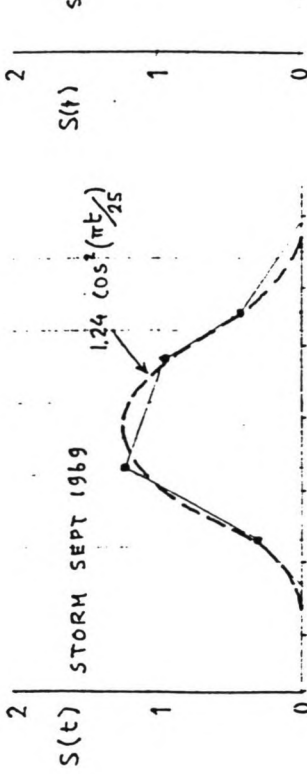
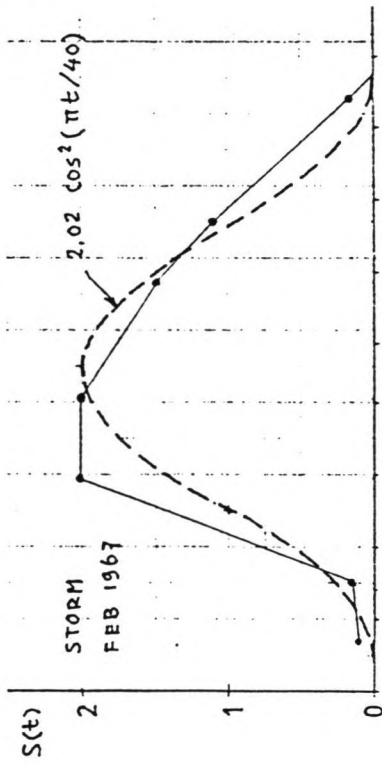
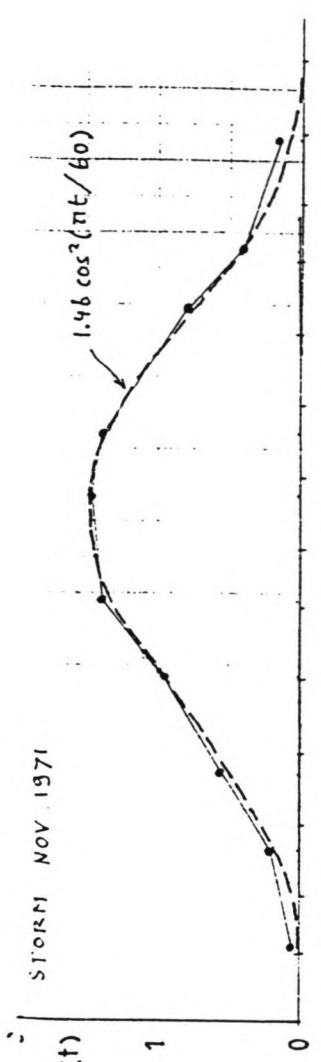
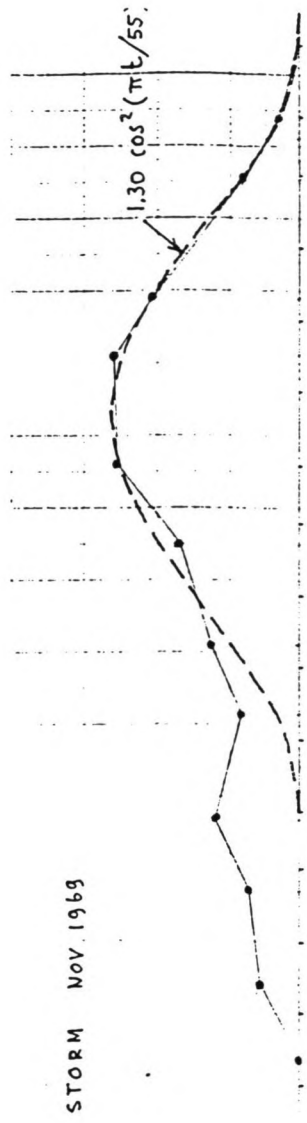
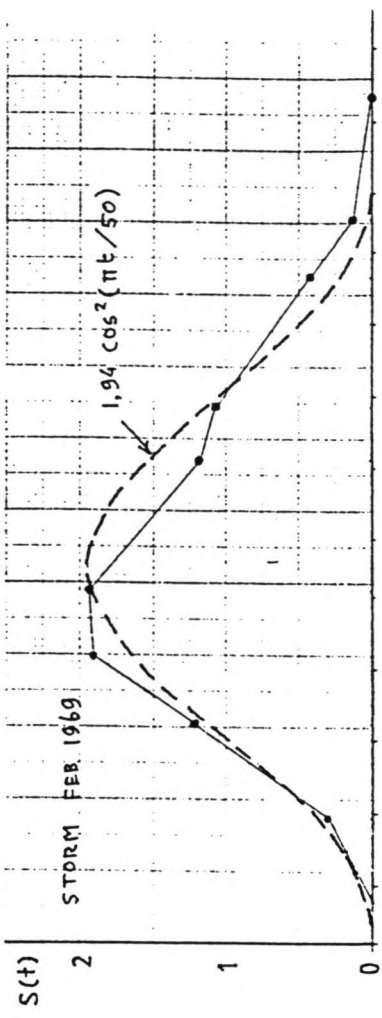


Bijlage 5 (vervolg)

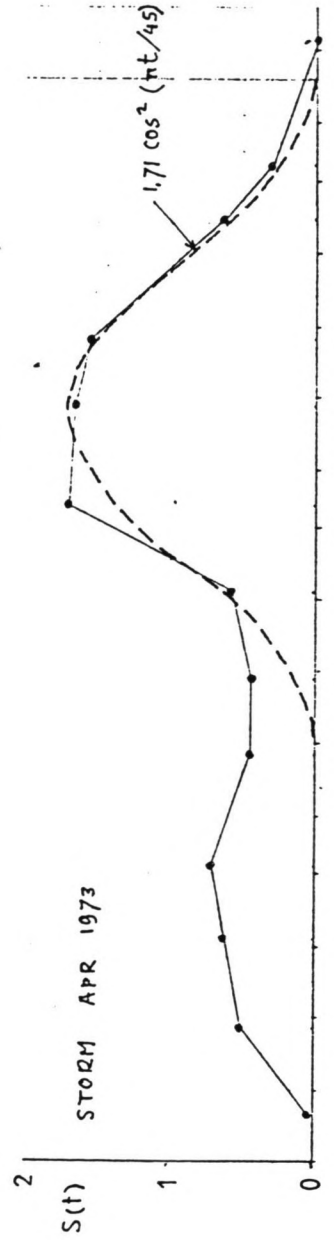
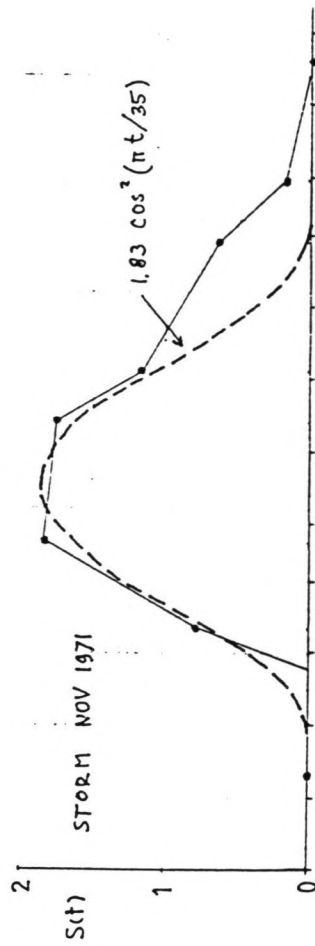
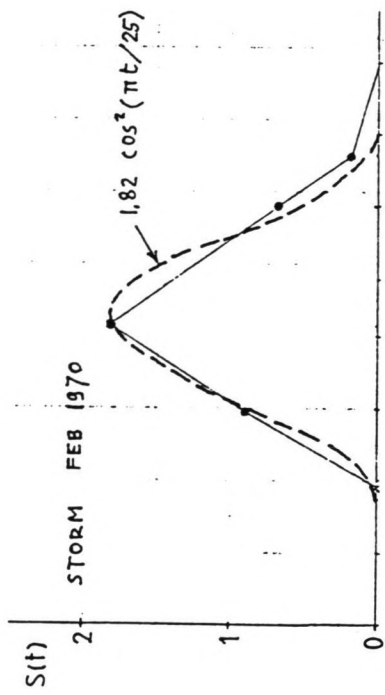
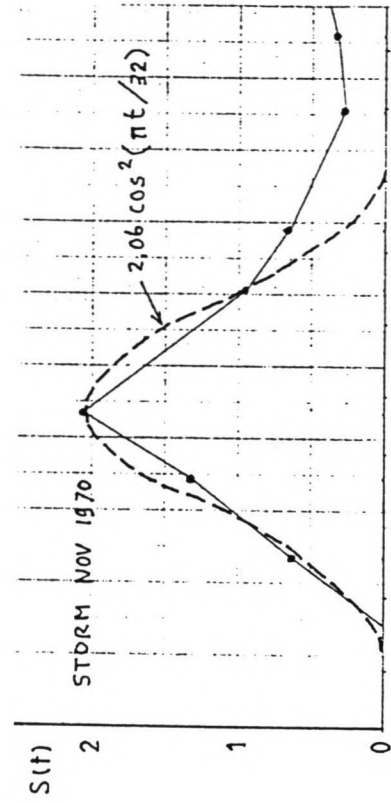


Bijlage 5 (vervolg)

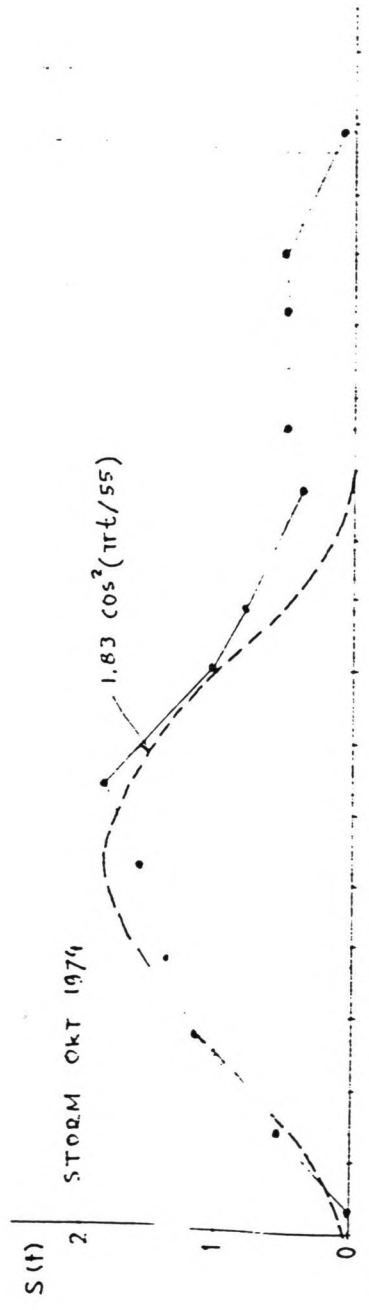
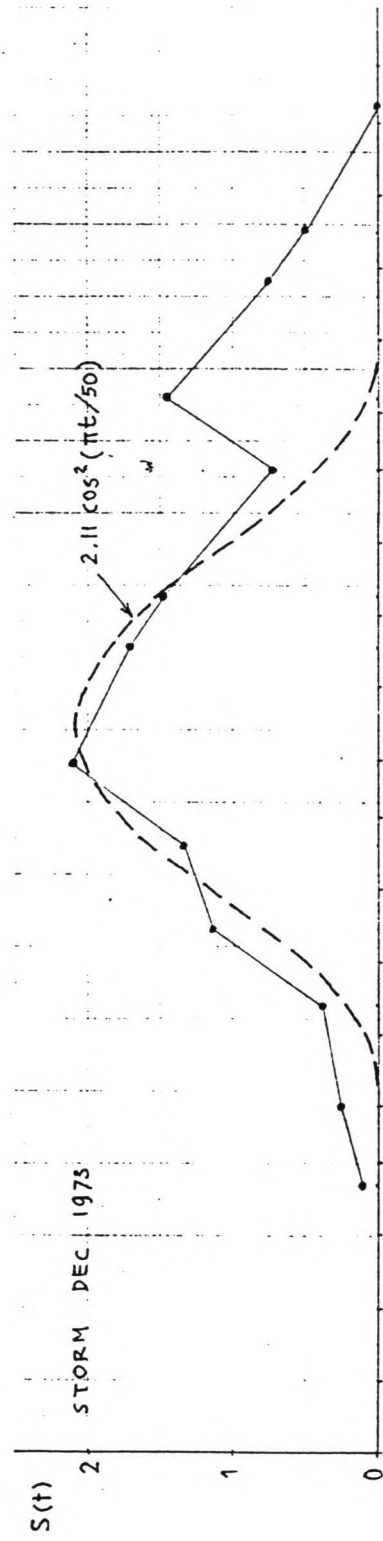
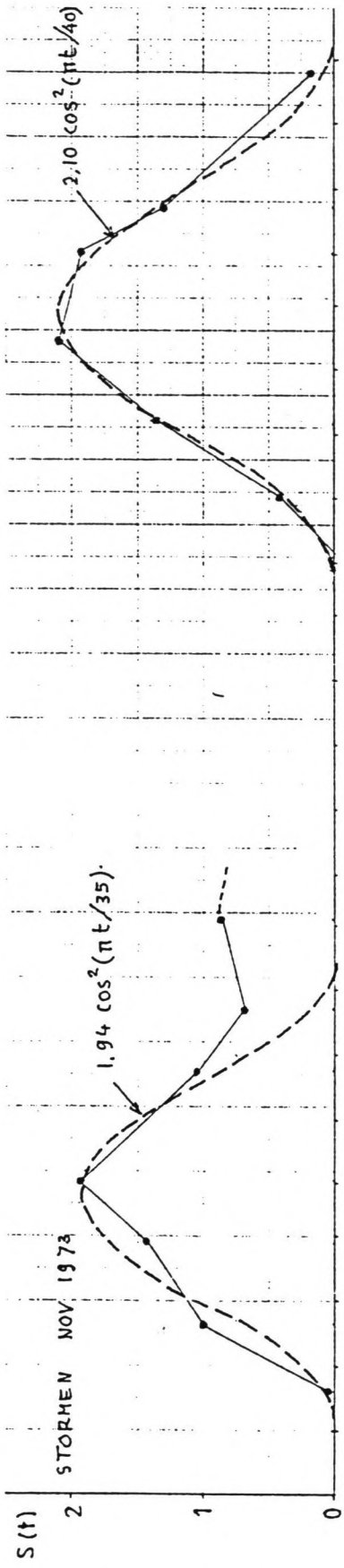




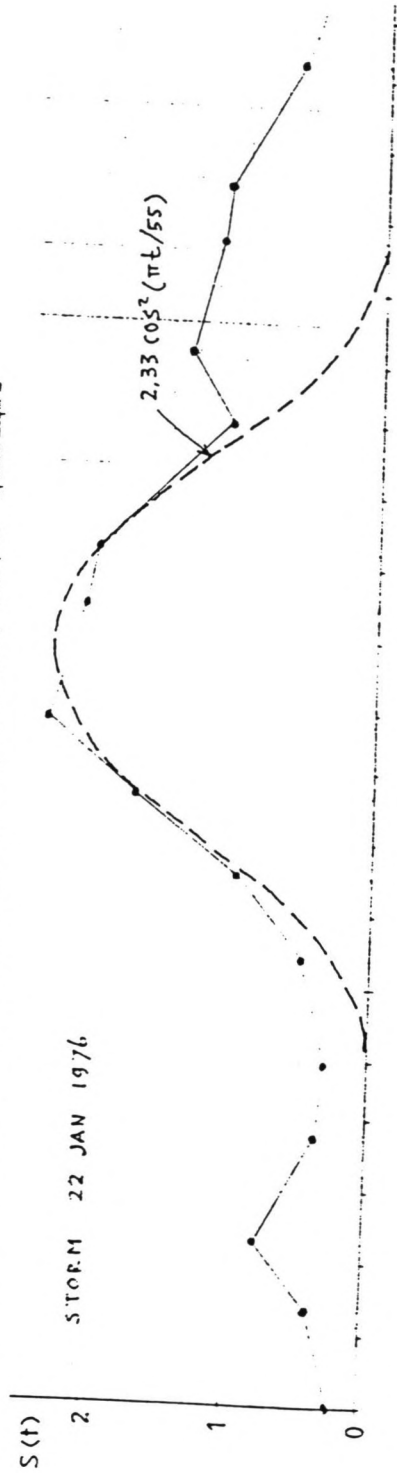
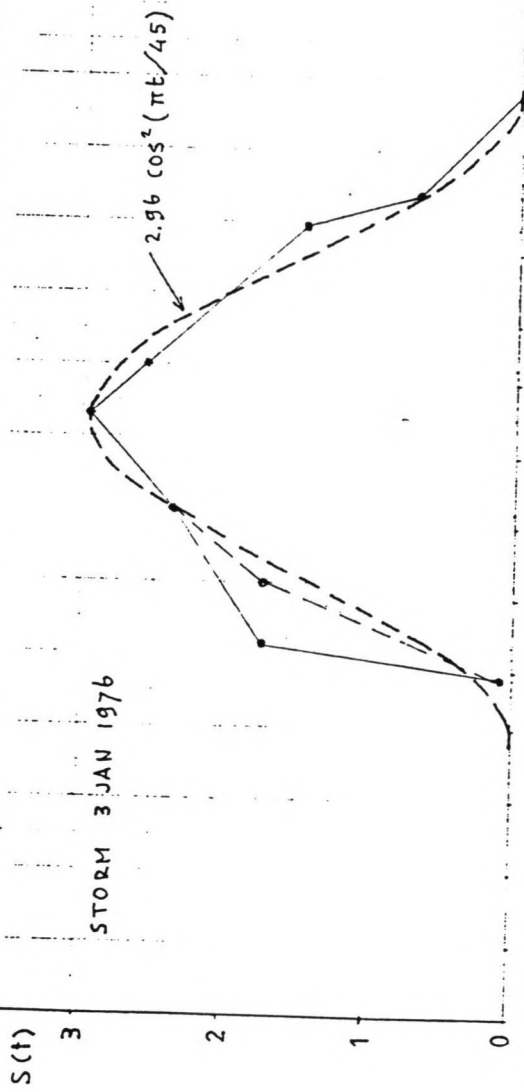
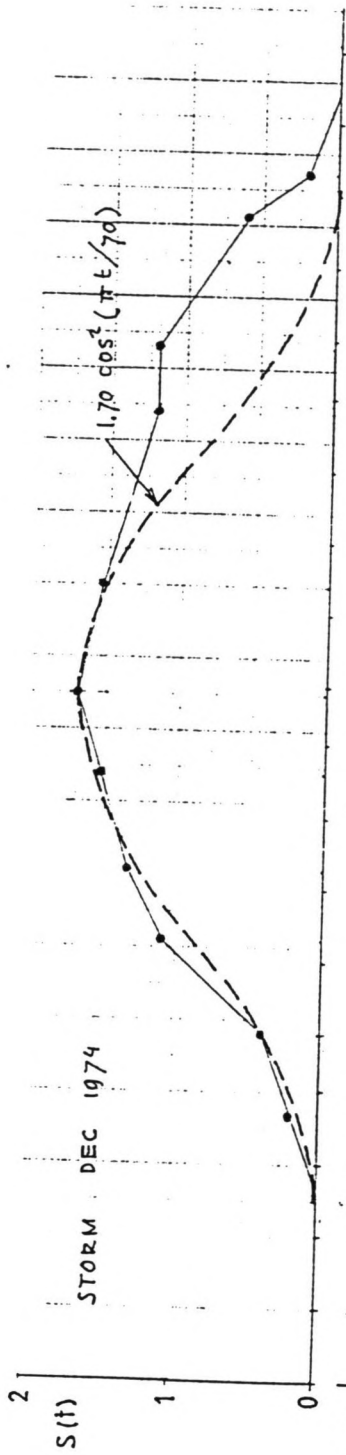
Bijlage 5 (vervolg)



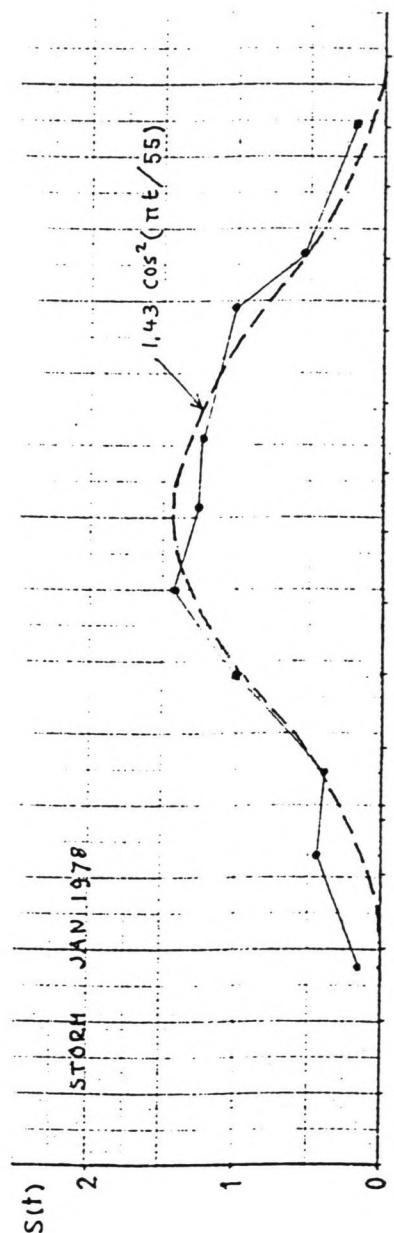
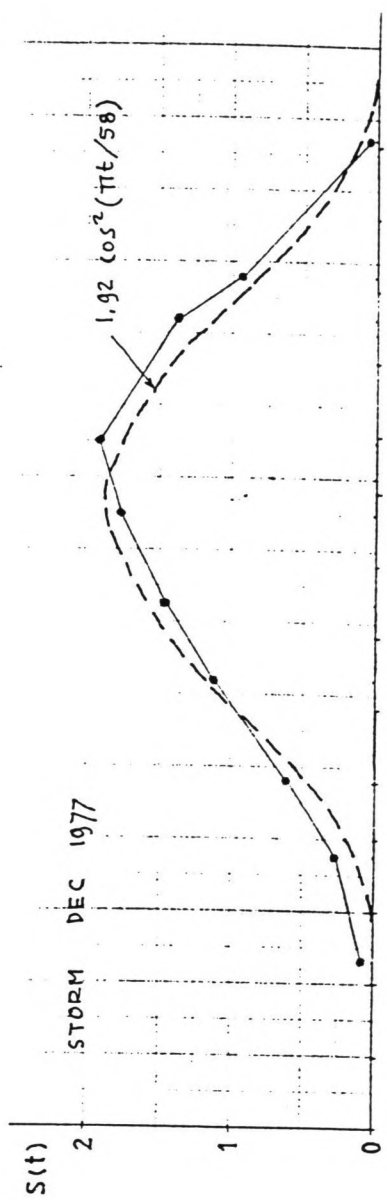
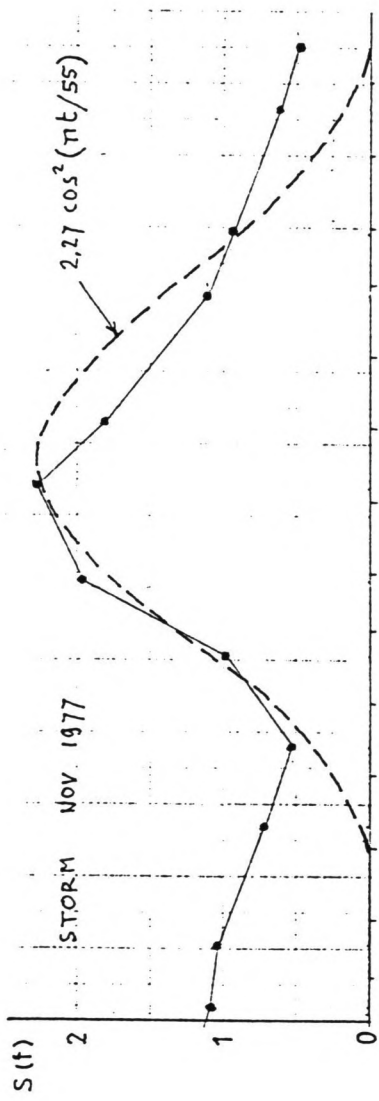
Bijlage 5 (vervolg)



Bijlage 5 (vervolg)



Bijlage 5 (vervolg)



Bijlage 5 (vervolg)

datum storm	duur van de windopzet (uren)
20-02-1946	52
05-11-1948	47
27-02-1949	60
01-03-1949	50
26-10-1949	40
13-11-1949	34
31-12-1953	55
15-01-1954	52
22-12-1954	42
23-12-1954	48
09-01-1958	42
20-01-1960	32
16-02-1962	60
02-11-1965	32
10-12-1965	70
30-11-1966	35
23-02-1967	40
01-03-1967	40
02-02-1969	50
29-09-1969	25
29-11-1969	55
20-02-1970	25
03-11-1970	32
17-11-1971	60
21-11-1971	35
02-04-1973	45
16-11-1973	35
19-11-1973	40
13-12-1973	50
28-10-1974	55
17-12-1974	70
03-01-1976	45
20-01-1976	55
15-11-1977	55
30-12-1977	58
03-01-1978	55
17-11-1978	45
18-12-1979	45

Bijlage 6. Windopzetduur op de Waddenzee voor 38 stormen in de periode 1946-1979.

datum (maand:jaar)	max. waterstand (m +N.A.P.)
feb 1934	2.00
feb 1935	2.50
dec 1936	3.00
jan 1938	2.70
nov 1939	2.30
dec 1940	2.40
nov 1941	2.00
dec 1942	2.70
apr 1943	2.30
feb 1944	3.00
jan 1945	2.70
feb 1946	2.40
nov 1947	2.00
okt 1948	2.15
mrt 1949	2.75
okt 1950	2.00
dec 1951	2.00
nov 1952	2.30
jan 1953	3.60
dec 1954	3.70
jan 1955	2.60
jan 1956	2.40
jan 1958	2.90
okt 1959	2.00
jan 1960	2.70
feb 1962	3.25
nov 1966	2.95
feb 1967	3.10
feb 1969	2.90
nov 1970	3.08
nov 1971	2.70 1)
nov 1972	1.90
dec 1973	3.40
okt 1974	2.75
nov 1975	2.25 1)
jan 1976	3.70
dec 1977	3.15
jan 1978	2.35 1)
dec 1979	2.85

1) maximale waterstand geschat uit registratie te Holwerd.

Bijlage 7. Jaarmaxima van de waterstand te Nieuw-Bildt gedurende de periode 1933-1979.

gemeten hoogwater Harlingen (m +NAP)	barometrisch effect 1) (m)	gemeten hoogwater Holwerd (m +NAP)	astr.hoogwater Holwerd 2) (m +NAP)
0.89	-0.02	1.08	1.10
0.86	-0.03	1.08	1.11
0.71	-0.03	0.89	0.92
0.63	-0.02	0.80	0.82
0.60	+0.08	0.74	0.66
0.66	0	0.87	0.87
0.75	-0.05	0.85	0.90
0.68	+0.01	0.90	0.89
1.11	-0.03	1.24	1.27
0.71	-0.02	0.89	0.91
1.07	-0.01	1.15	1.16
0.81	-0.02	0.96	0.98
1.24	+0.07	1.38	1.31
1.04	0	1.22	1.22
0.56	0	0.74	0.74
1.05	-0.02	1.21	1.23
1.13	-0.02	1.27	1.29
0.70	-0.05	0.84	0.89
0.84	+0.02	0.99	0.97
1.07	-0.05	1.20	1.25
0.88	+0.03	0.96	0.93
0.84	-0.03	1.01	1.04

- 1) afgeleid uit verschil tussen gemeten hoogwater en astronomisch hoogwater (getijtafel) te Harlingen.
- 2) astronomisch hoogwater = gemeten hoogwater - barometrisch effect.

Bijlage 8. Gemeten en astronomisch hoogwater te Harlingen en Holwerd gedurende 22 windstille perioden.

gemeten hoogwater (m+NAP)	astronomisch hoogwater ¹⁾ (m+NAP)	maximale windopzet (m)	wind- snelheid ²⁾ (m/s)	wind- richting ²⁾ (graden)
1.87	1.02	0.85	17.3	240
2.56	1.22	1.34	21.2	240
2.16	0.98	1.18	13.8	288
1.93	1.18	0.75	16.1	224
2.63	1.21	1.42	15.4	284
2.03	1.13	0.90	14.0	252
2.72	1.16	1.56	21.7	332
1.96	1.18	0.78	11.5	302
2.02	1.33	0.69	19.0	252
2.51	1.12	1.39	20.0	304
2.26	1.07	1.19	19.6	292
2.59	1.22	1.37	20.8	286
2.05	0.80	1.25	21.8	282
3.40	1.33	2.07	20.0	288
2.19	1.07	1.12	19.2	322
1.54	0.93	0.61	13.8	283
2.40	1.16	1.24	17.4	290
2.56	1.17	1.39	21.4	260
1.95	0.99	0.96	19.8	250
3.05	1.25	1.80	18.8	318
1.68	0.80	0.88	18.8	246

1) afgeleid uit het astronomisch hoogwater te Harlingen z.b.v. formule 4.3.

2) 5-uursgemiddelde

Bijlage 9. Maximale windopzet te Holwerd t.g.v. een windveld, gekarakteriseerd door de 5-uurs gemiddelde windsnelheid, van 21 geselecteerde stormen in de periode 1969-1979.

gemiddelde windopzet	gemiddelde windsnelheid	gemiddelde windrichting
(m)	(m/s)	(graden)
0.37	10.1	284
0.83	14.5	283
0.74	12.5	316
0.54	13.4	262
0.48	11.1	305
0.58	13.3	296
0.92	15.2	298
1.23	19.8	346
0.35	12.3	249
0.28	10.0	266
0.32	14.3	237
0.73	14.6	317
0.97	16.9	292
0.73	15.8	280
1.73	23.7	308
0.62	13.3	308
0.55	15.1	265
0.74	14.3	300
0.77	15.6	277

Bijlage 10. Gemiddelde windopzet te Holwerd t.g.v. een windveld, gekarakteriseerd door een gemiddelde windsnelheid, van 19 geselecteerde staven in de periode 1969-1979.

datum stormvloed	windrichting	stormvloed te Harlingen (m+NAP)	opwaaiing te Harlingen (m)
31- 1-1953	W-NW ¹⁾	3.66	2.76
1- 2-1953	NNW ¹⁾	3.34	2.69
22-12-1954	NW	3.71	2.86
23-12-1954	NW	3.73	2.93
20- 1-1960	NW	3.21	2.58
16- 2-1962	NW	3.44	2.62
17- 2-1962	NW	2.95	2.43
23- 2-1967	W-WNW	2.99	2.01
4 -11-1970	WNW	3.06	2.07
14-11-1973	WNW-W	2.97	2.04
19-11-1973	NW	2.75	2.12
6 -12-1973	WNW-W	2.68	2.12
13-12-1973	NW	3.30	2.14
3 - 1-1976	NW	3.17	2.36
3 - 1-1976	NNW	3.70	2.57
21- 1-1976	WNW	3.52	2.32

1) Vlieland

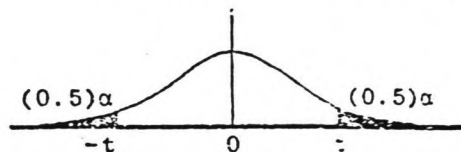
Bijlage 11. Windrichting, gemeten op het lichtschip Terschellingerbank c.q. lichtschip Texel in de periode gedurende ca. 3 uur voor hoogwater te Harlingen in de periode 1953-1976 (ontleend aan lit.16).

windsnelheid (m/s)	noordzee component (m)	locale component (m)	totale windeffect (m)
2	NIHIL	NIHIL	NIHIL
3	NIHIL	NIHIL	NIHIL
4	0.05	0.02	0.07
5	0.08	0.03	0.11
6	0.11	0.06	0.17
7	0.15	0.08	0.23
8	0.19	0.11	0.30
9	0.25	0.14	0.39
10	0.30	0.18	0.48
11	0.37	0.21	0.58
12	0.44	0.26	0.70
13	0.51	0.30	0.81
14	0.60	0.35	0.95
15	0.68	0.39	1.07
16	0.78	0.44	1.22
17	0.88	0.49	1.37
18	0.98	0.54	1.52
19	1.10	0.59	1.69
20	1.22	0.64	1.86
21	1.34	0.69	2.03
22	1.47	0.74	2.21
23	1.61	0.79	2.40
24	1.75	0.84	2.59
25	1.90	0.89	2.79
26	2.06	0.93	2.99
27	2.22	0.98	3.20
28	2.38	1.03	3.41
29	2.56	1.07	3.63
30	2.74	1.11	3.85
31	2.92	1.15	4.07
32	3.11	1.20	4.31
33	3.31	1.24	4.55
34	3.52	1.28	4.80
35	3.73	1.32	5.05

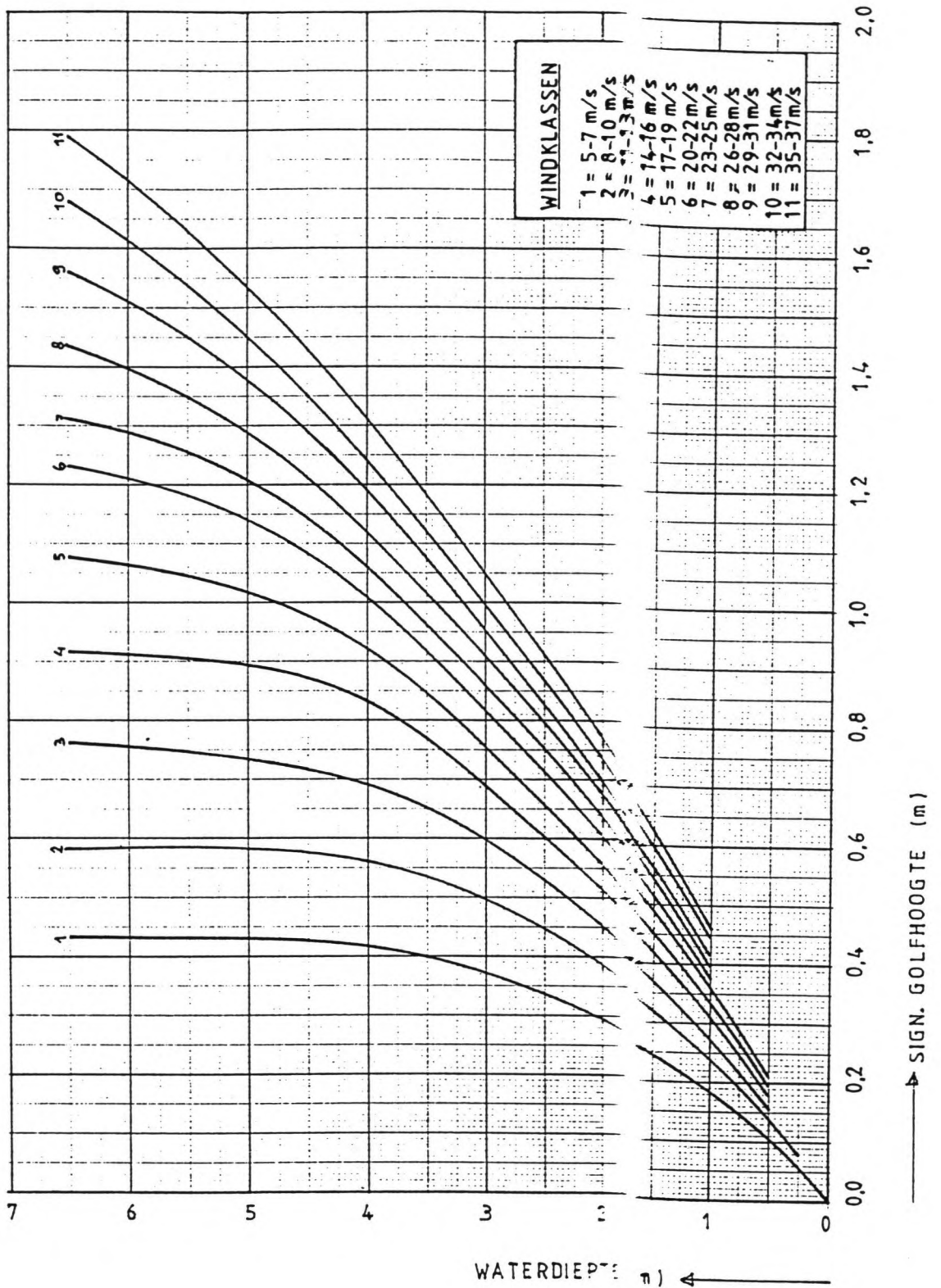
Bijlage 12. Maximale evenwichtswindeffect t.p.v. het Friese Wad als functie van de windsnelheid.

Degrees of freedom ν	Probability α			
	0.10	0.05	0.01	0.001
1	6.314	12.706	63.657	636.657
2	2.920	4.303	9.925	31.598
3	2.353	3.182	5.841	12.941
4	2.132	2.776	4.604	8.610
5	2.015	2.571	4.032	6.859
6	1.943	2.447	3.707	5.959
7	1.895	2.365	3.499	5.405
8	1.860	2.306	3.355	5.041
9	1.833	2.262	3.250	4.781
10	1.812	2.228	3.169	4.587
11	1.796	2.201	3.106	4.437
12	1.782	2.179	3.055	4.318
13	1.771	2.160	3.012	4.221
14	1.761	2.145	2.977	4.140
15	1.753	2.131	2.947	4.073
16	1.746	2.120	2.921	4.015
17	1.740	2.110	2.898	3.965
18	1.734	2.101	2.878	3.922
19	1.729	2.093	2.861	3.883
20	1.725	2.086	2.845	3.850
21	1.721	2.080	2.831	3.819
22	1.717	2.074	2.819	3.792
23	1.714	2.069	2.807	3.767
24	1.711	2.064	2.797	3.745
25	1.708	2.060	2.787	3.725
26	1.706	2.056	2.779	3.707
27	1.703	2.052	2.771	3.690
28	1.701	2.048	2.763	3.674
29	1.699	2.045	2.756	3.659
30	1.697	2.042	2.750	3.646
40	1.684	2.021	2.704	3.551
60	1.671	2.000	2.660	3.460
120	1.658	1.980	2.617	3.373
>	1.645	1.960	2.576	3.291

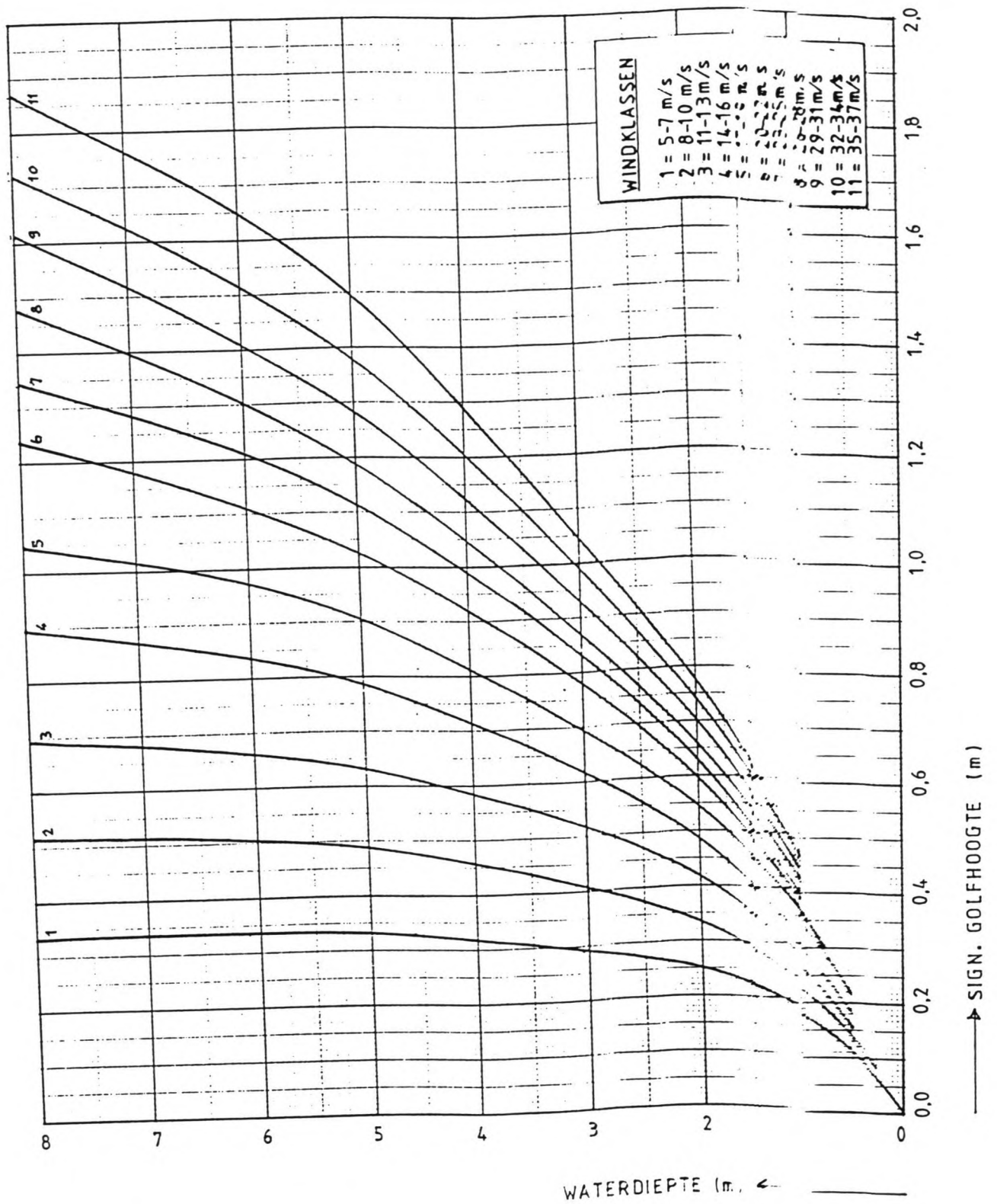
t -values for a two-tail test. For a one-tail test, the t -value is obtained for $\alpha/2$.



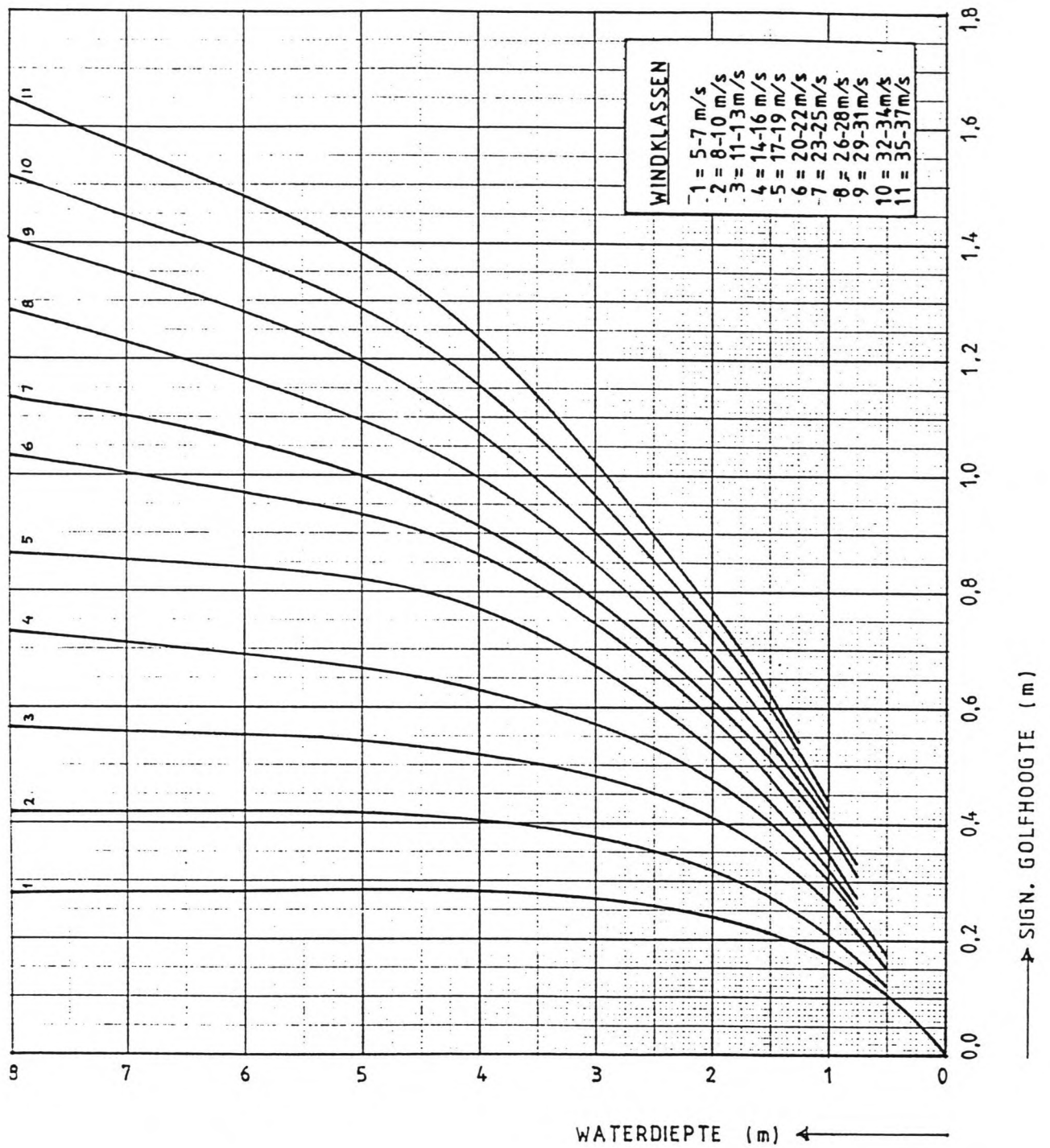
Bijlage 13. t -waarden voor de bepaling van Gaussische betrouwbaarheidsbanden (ontleend aan lit.20).



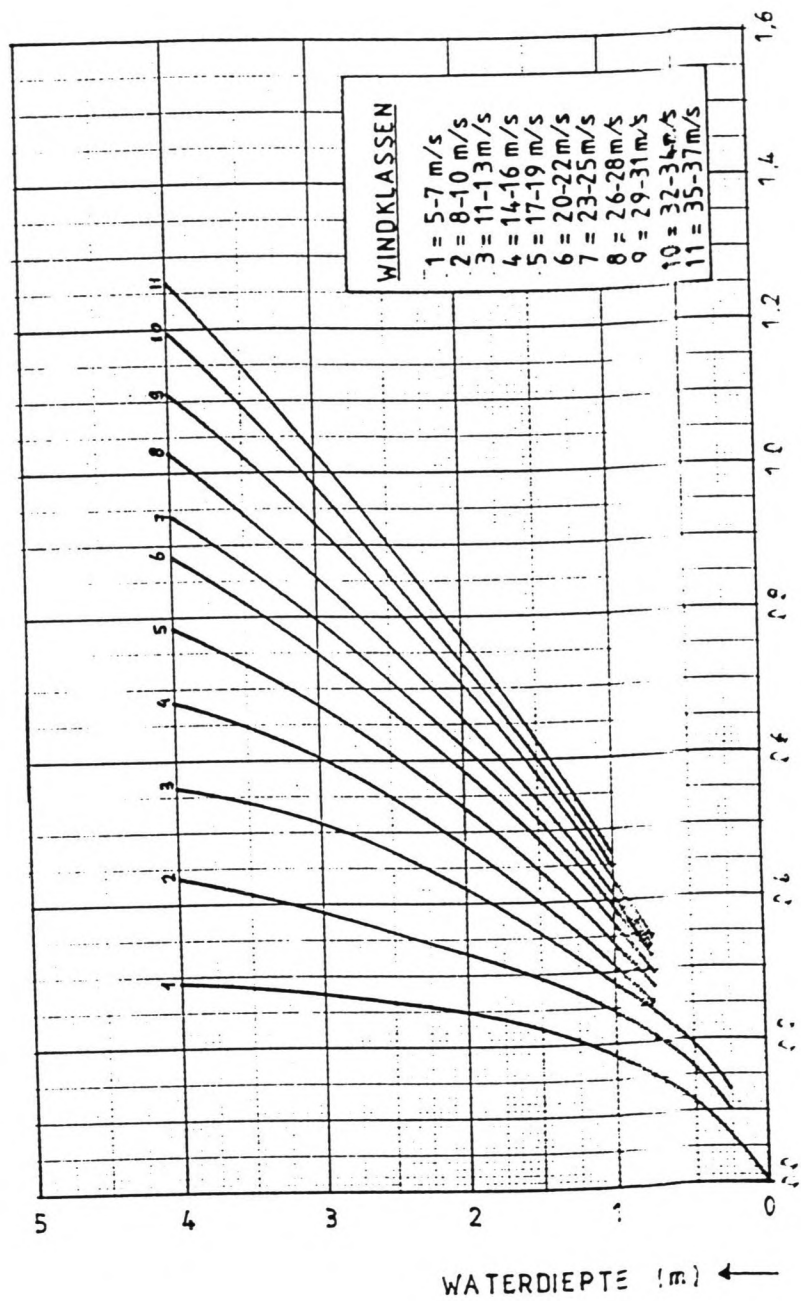
Bijlage 14a. H_s op het Friese Wad als functie van de waterdiepte voor de richtingssector $245^\circ - 285^\circ$.



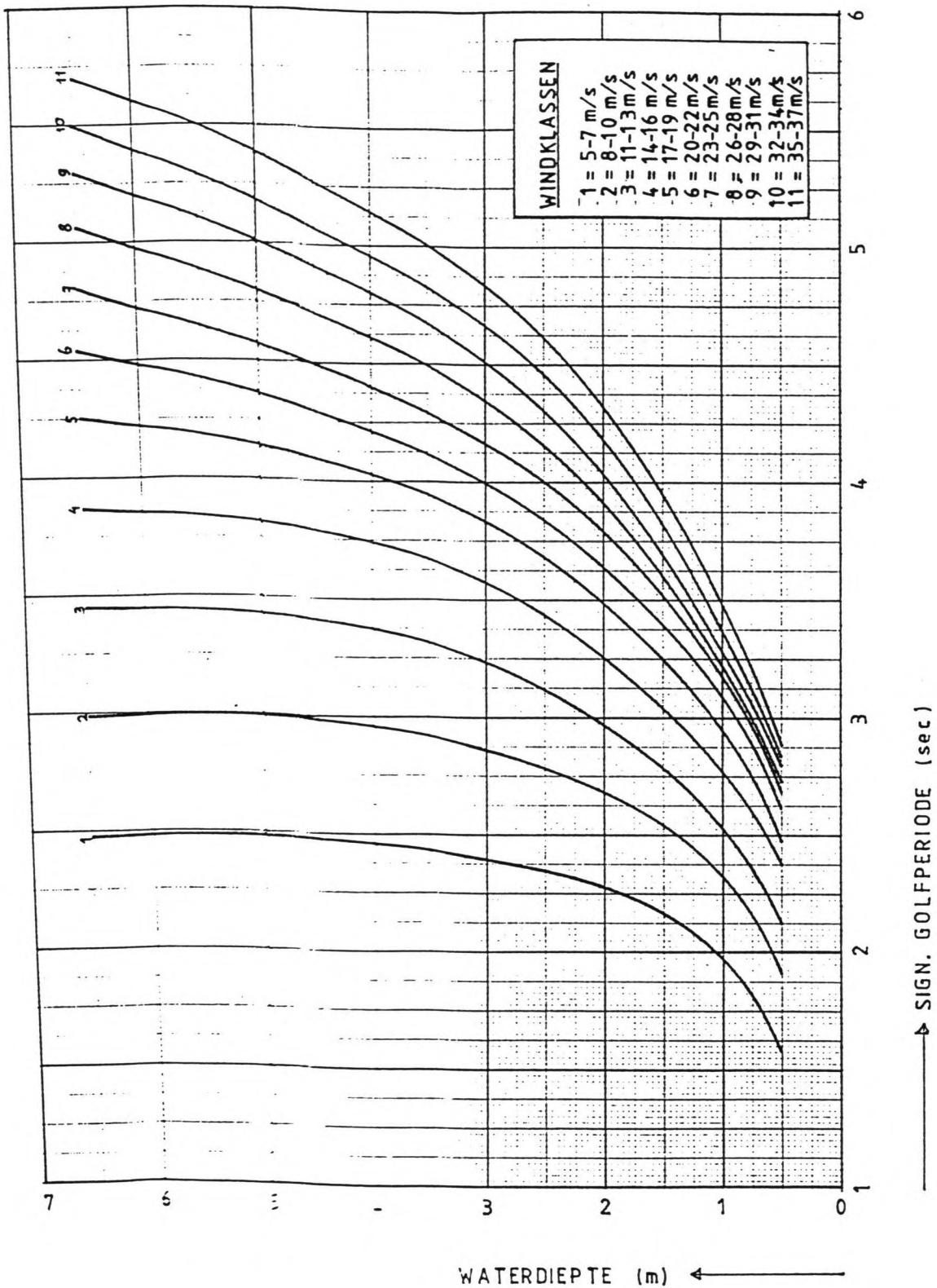
Bijlage 14b. H op het Friese Wad als functie van de waterdiepte voor de richtingssector 285° - 325°.



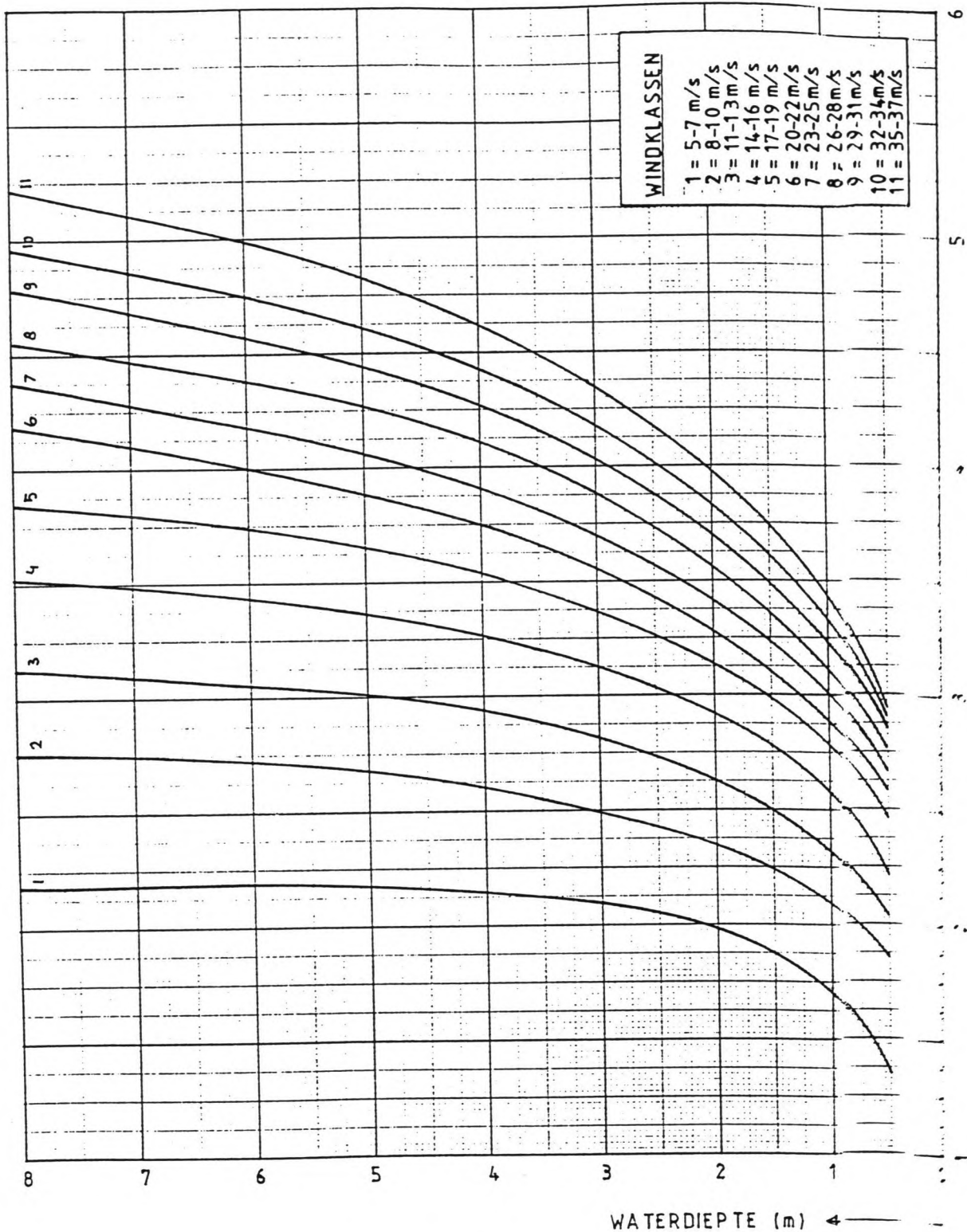
Bijlage 14c. H_s op het Friese Wad als functie van de waterdiepte voor de richtingssector $325^\circ - 025^\circ$.



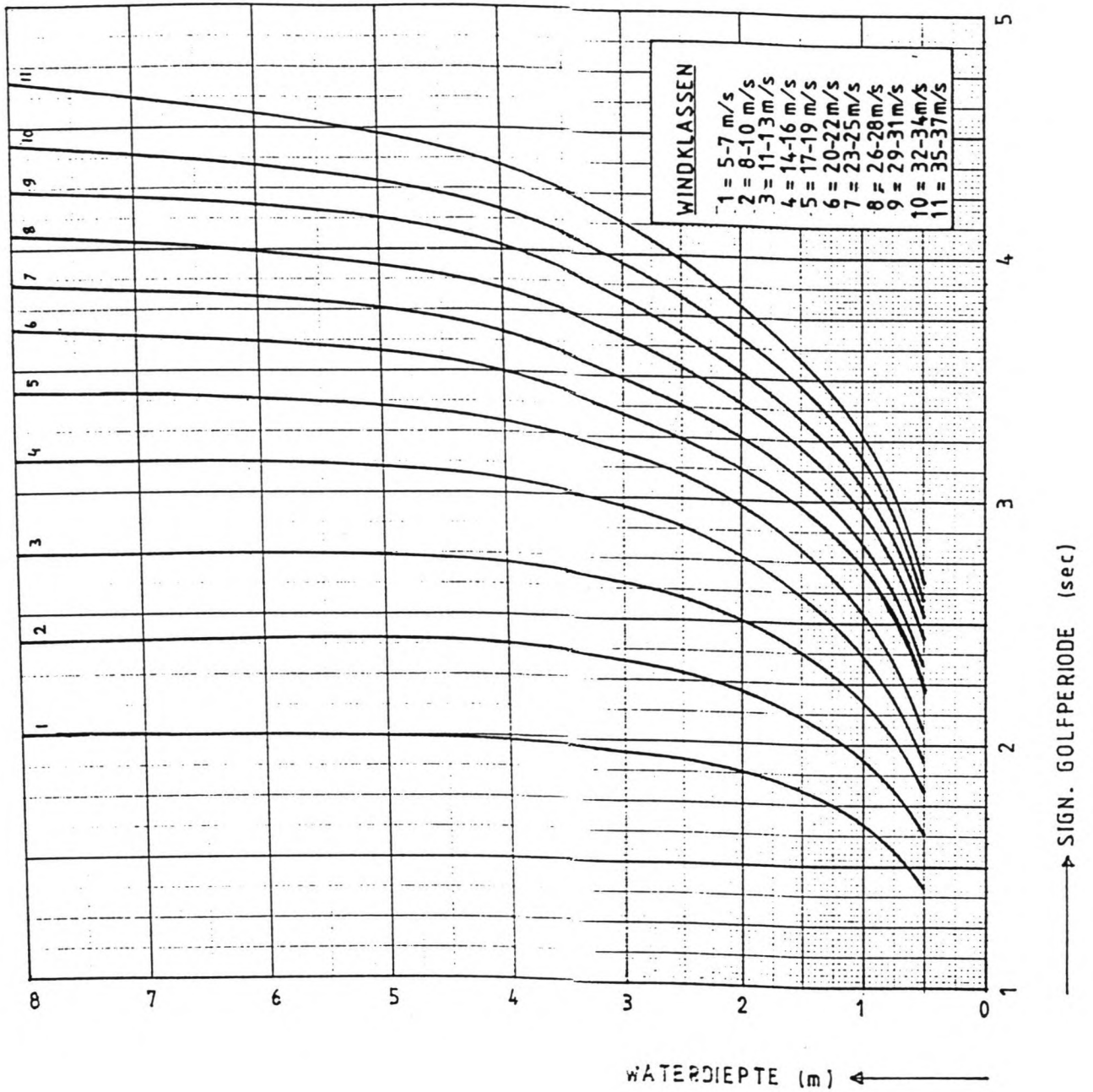
Bijlage 14d. H_s op het Friese Wad als functie van de waterdiepte voor de richtingssector $025^\circ - 045^\circ$.



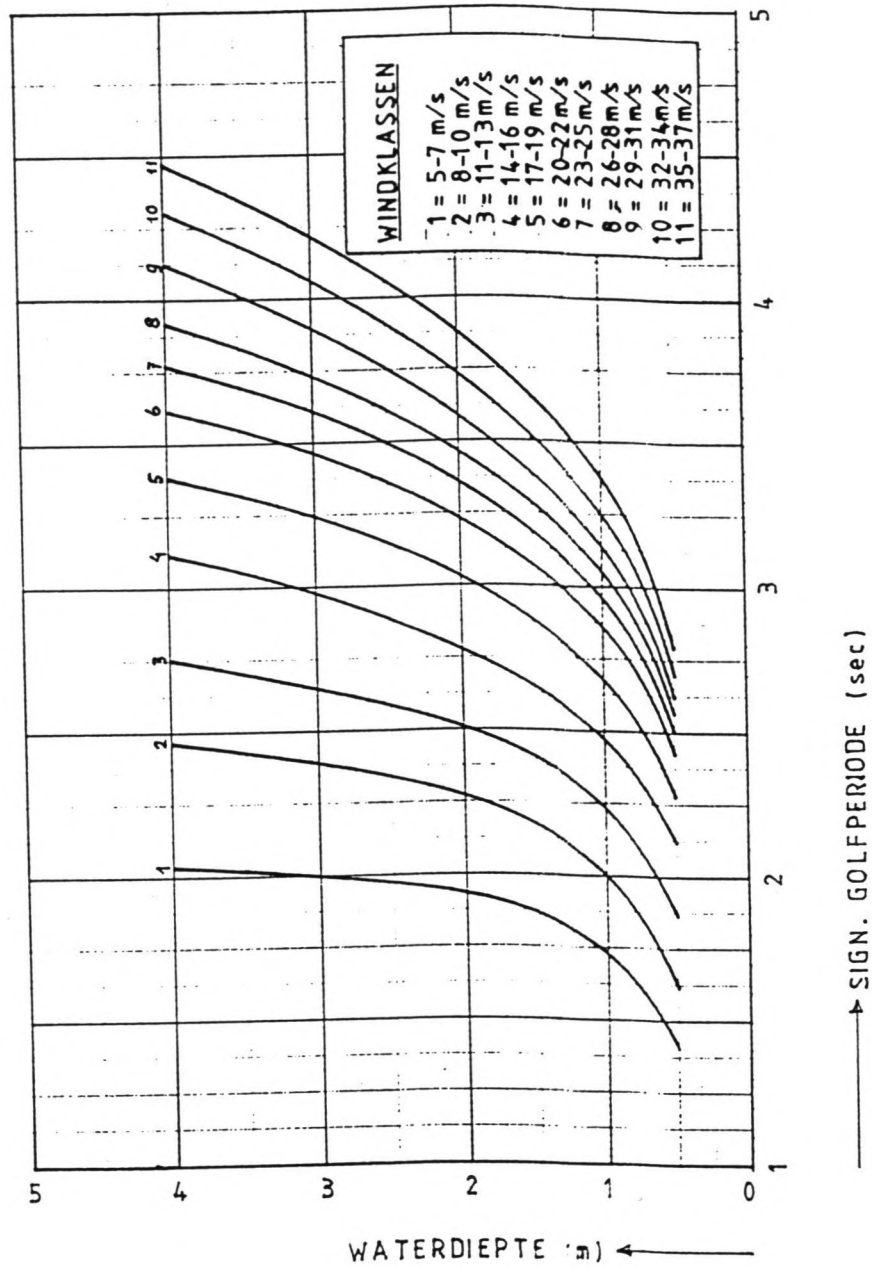
Bijlage 15a. T_p op het Eiland van als functie van de waterdiepte voor de richtingssector 135° - 225°.



Bijlage 15b. T op het Friese Wad als functie van de waterdiepte voor de richtingssector 285° - 325°.



Bijlage 15c. T_s op het Friese Wad als functie van de waterdiepte voor de richtingssector $325^\circ - 325^\circ$.



Bijlage 15d. T_s op het Friese Wad als functie van de waterdiepte voor de richtingssector $025^\circ - 045^\circ$.

windsnelheid	waterdiepte	H _s gemeten	H _s Bretsch	T _s gemeten	T _s Bretsch
(m/s)	(m)	(m)	(m)	(sec)	(sec)
15	1.68	0.30	0.43	2.3	2.8
15	1.23	0.33	0.35	2.5	2.7
15	1.20	0.48	0.34	2.6	2.7
15	1.78	0.43	0.45	2.6	2.9
15	2.52	0.51	0.56	3.1	3.1
15	1.59	0.51	0.42	3.1	2.8
15	2.40	0.48	0.54	2.6	3.0
15	0.46	0.23	0.16	2.2	2.2
15	0.55	0.18	0.19	2.0	2.2
15	0.46	0.14	0.16	2.0	2.2
16	0.53	0.16	0.19	2.0	2.2
17	1.73	0.59	0.50	3.1	3.1
17	1.78	0.41	0.51	2.6	3.1
17	0.88	0.12	0.32	2.0	2.7
17	0.72	0.29	0.28	2.2	2.6
18	2.22	0.41	0.58	2.6	3.2
18	3.30	0.88	0.73	4.1	3.4
18	2.10	0.38	0.56	2.5	3.1
18	1.53	0.42	0.46	2.6	3.0
18	3.07	0.85	0.70	4.1	3.4
18	1.60	0.50	0.47	2.9	3.0
19	1.12	0.30	0.38	2.3	2.8
19	1.48	0.42	0.44	2.6	3.0
20	1.78	0.49	0.55	2.6	3.2
20	1.50	0.31	0.49	2.5	3.1
20	1.92	0.59	0.58	3.1	3.1
21	1.20	0.39	0.42	2.5	3.0
21	2.10	0.62	0.62	3.6	3.3
22	1.95	0.59	0.59	3.1	3.2
23	2.00	0.48	0.63	2.6	3.4
25	2.68	0.65	0.77	3.6	3.6
25	3.50	0.95	0.92	4.6	3.8
27	2.90	0.83	0.85	4.1	3.9
28	1.01	0.40	0.40	2.6	3.1

Bijlage 16. Gemeten golfhoogte en-periode in het Vaarwater van de Zwarte Haan (ontleend aan lit.18) en golfhoogte en -periode, bepaald m.b.v. het golfdiagram in bijlage 14b en 15b.

