

KONINKLIJK NEDERLANDS
METEOROLOGISCH INSTITUUT

DE BILT

VERSLAGEN

V-216

De invloed van de wind boven de westelijke Waddenzee
op de hoog- en laagwaterstanden te Harlingen

door

A.C. Bakker

De Bilt, 1969

Publikationsnummer: K.N.M.I. V 218-II.

Inhoud

1. Inleiding en doelstelling
2. Enkele afspraken en definities
3. Waarnemingsmateriaal
4. Het opzetverschil tussen Harlingen en Den Helder afhankelijk van de wind
 - 4.1 Enkele algemene opmerkingen
 - 4.2 Het opzetverschil afhankelijk van de windsnelheid
 - 4.3 Het opzetverschil afhankelijk van de windrichting
5. Het opzetverschil afhankelijk van de waterstand
6. Het verband tussen het opzetverschil en de wind opnieuw beschouwd
7. Spreiding
8. Samenvatting en conclusies

De invloed van de wind boven de westelijke Waddenzee
op de hoog- en laagwaterstanden te Harlingen

door

A.C. Bakker

1. Inleiding

In de "Getijtafels voor Nederland", uitgegeven door de Rijkswaterstaat, kunnen voor diverse plaatsen langs de Nederlandse kust de dagelijkse waarden van de hoogwaterstanden worden afgelezen. Tot één van de taken van het KNMI behoort het opstellen van verwachtingen omtrent eventuele afwijkingen in de hoogwaterstanden voor enkele plaatsen langs de Nederlandse kust. De afwijking in de hoogte van hoogwater voor Borkum, Den Helder en Hoek van Holland kan worden berekend met behulp van een methode, die in 1958 is opgesteld door WEENINK [1].

Voor de plaats Harlingen kan de hoogwaterstand worden berekend door uit te gaan van de berekende afwijking in Den Helder en deze afwijking te vermeerderen met een waarde, die afhangt van de wind die boven de westelijke Waddenzee ten tijde van het hoogwater te Harlingen waait.

Ten behoeve van dijkwerken langs de Friese kust alsmede voor de werken tot afsluiting van de Lauwerszee bleek het noodzakelijk dagelijks zo nauwkeurig mogelijk verwachtingen op te stellen omtrent het hoog- en laagwater te Harlingen en Oostmahorn. Na verloop van tijd werd de indruk verkregen dat de volgens de gangbare methode opgestelde hoogwaterverwachting voor Harlingen tekortkomingen vertoonde. Daar ook een methode tot het voorspellen van de laagwaterstanden geheel ontbrak, is een onderzoek ingesteld, dat beoogde voor Harlingen te komen tot zo nauwkeurig mogelijke verwachtingen van zowel hoog- als laagwaterstanden. De resultaten van dit onderzoek volgen in dit verslag.

Van een analoog onderzoek voor de waterstanden te Oostmahorn moest worden afgezien, daar wat betreft de langjarige serie waterstandswaarnemingen van Oostmahorn als gevolg van de werken in de Lauwerszee twijfel ontstond t.a.v. de homogeniteit van die waarnemingsserie.

2. Enkele afspraken en definities

De waarden van de hoog- en laagwaterstanden, die in de getijtafels staan vermeld, zullen in dit verslag "astronomische" hoog- en laagwaterstanden worden genoemd.

Onder opzet zal worden verstaan het verschil tussen de waargenomen en de overeenkomstige astronomische hoog- resp. laagwaterstand.

Onder het opzetverschil ΔO wordt verstaan de waargenomen opzet te Harlingen verminderd met de overeenkomstige waargenomen opzet te Den Helder.

Het Waddenzee-windeffect wordt gedefinieerd als het tussen Harlingen en Den Helder voorkomende opzetverschil, dat uitsluitend zijn oorzaak

vindt in de boven de Waddenzee waaiende wind. Het eerdergenoemde opzetverschil $\Delta 0$ kan men zich dus samengesteld denken uit enerzijds het Waddenzee-windeffect en anderzijds een gedeelte bestaande uit meest onbekende factoren (bijvoorbeeld factoren, die hun oorzaak vinden in de Noordzee en de Waddenzee zelf, zoals stromingen, waterdiepte, schommelingen in het water van de Noordzee e.d., voorts factoren als de opstelling van de peilschalen, fouten in de waterstandsmetingen, enz.).

Eventuele tijdsverschillen tussen de tijd van het optredende hoog- resp. laagwater en de tijd van het astronomische hoog- resp. laagwater zijn niet in de beschouwingen betrokken.

3. Waarnemingsmateriaal

Als maat voor de wind boven het westelijk Waddenzeegebied zijn gebruikt de registraties van de windmeters te Den Helder en Oost-Vlieland. Het was onjuist alleen de waarnemingen van Den Helder te gebruiken, daar de opstelling van de windmeter aldaar zodanig is, dat bij winden uit de oost-sector de aanwijzingen van de windmeter zeker niet representatief kunnen worden geacht voor het westelijke Waddenzeegebied. Hetzelfde geldt voor de waarnemingen van Vlieland ten aanzien van winden uit de west-sector. Daarom is voor wind uit de sector ZZW t/m N gebruik gemaakt van waarnemingen van Den Helder en voor wind uit de sector NNO t/m Z van waarnemingen van Vlieland. De windrichting wordt daarbij steeds aangegeven in streken, de windsnelheid in uurgemiddelden.

Als maat voor de Noordzeekustwaterstand zijn genomen de waarnemingen van de waterhoogten te Den Helder. Deze waarnemingen zijn tevens gebruikt als maat voor de hoeveelheid water in de Waddenzee.

Als bron voor de waterstandsgegevens zijn gebruikt de jaarboeken van Rijkswaterstaat, als bron voor de windgegevens eveneens de jaarboeken van Rijkswaterstaat alsmede gegevens van de Afdeling Klimatologie van het KNMI.

Het gemiddelde tijdsverschil tussen de hoogwaters te Den Helder en die te Harlingen ligt in de orde van 2 uur; voor de laagwaters ligt dit bedrag in de orde van 3 uur. De waarnemingen van hoog- en laagwater zijn daarom steeds gecorreleerd met het uurgemiddelde van de wind op een tijd die viel 1 à 2 uur vóór de tijd van hoogwater resp. laagwater te Harlingen.

Uit de volgende tijdvakken zijn de waarnemingen genomen:

- a) uit de jaren 1950 t/m 1956: alle waarnemingen, waarbij de windsnelheid 15 m/s of meer bedroeg;
- b) uit de jaren 1957 t/m 1959: alle waarnemingen, waarbij de windsnelheid 12 m/s of meer bedroeg;
- c) uit de jaren 1960 t/m 1963 + 1965: alle waarnemingen, waarbij de windsnelheid 6 m/s of meer bedroeg.

Op deze wijze kwamen de waarnemingen met windsnelheid van 15 m/s of meer uit het langste tijdvak (nl. 1950 t/m 1963 + 1965), waarmee werd bereikt dat ook voor de grotere windsnelheden een redelijk aantal waarnemingen werd verkregen.

Een uitzondering is gemaakt voor de perioden, waarin volgens opgave van de Rijkswaterstaat ijs op de Waddenzee voorkwam; deze perioden zijn niet in het onderzoek betrokken.

Het waarnemingsmateriaal is steeds gegroepeerd in klassen als volgt:

- a) voor de windrichting: 2 streken samengevoegd, en wel NNO+NO, ONO+O, enz.;
- b) voor de windsnelheid: de klassen 6 t/m 10 m/s, 11 t/m 14 m/s, 15 t/m 18 m/s en 19 m/s of meer;
- c) voor de waterstanden die van Den Helder (t.o.v. NAP):

<-150 cm	-150 t/m -126 cm	-125 t/m -101 cm
-100 t/m -76 cm	-75 t/m 0 cm	+1 t/m 50 cm
+51 t/m +100 cm	+101 t/m +150 cm	>+150 cm

4. $\Delta 0$ in afhankelijkheid van de wind

4.1 Enkele algemene opmerkingen

Het opstellen van zo betrouwbaar mogelijke verwachtingen voor hoog- en laagwater in Harlingen vereist een zo goed mogelijke schatting van $\Delta 0$.

Op fysische gronden is het aannemelijk, dat tot de grootte van $\Delta 0$ in belangrijke mate wordt bijgedragen door het Waddenzee-windeffect. In eerste instantie is daarom gezocht naar een relatie tussen $\Delta 0$ en de windrichting resp. de windsnelheid.

Daar wordt gestreefd naar een zo goed mogelijke schatting van $\Delta 0$ bij zowel hoog- als laagwater, wordt later ook aandacht besteed aan de relatie tussen $\Delta 0$ en de waterstand op de Waddenzee (zie paragraaf 5).

4.2 $\Delta 0$ afhankelijk van de windsnelheid

Gezien het verloop van de Friese kust (ongeveer noord-zuid) kan worden verwacht, dat de grootste positieve waarden van $\Delta 0$ worden gevonden bij wind uit de sector west en de grootste negatieve waarden bij wind uit de sector oost. De relatie tussen $\Delta 0$ en de windsnelheid kan dus het duidelijkst worden gevonden door waarnemingen te beschouwen bij de hiergenoemde windrichtingen.

In tabel 1 zijn voor de combinatie van 4 windrichtingsklassen en de 4 windsnelheidsklassen de gemiddelde waarden van $\Delta 0$ weergegeven. Daar een afhankelijkheid van de waterstand niet bij voorbaat kan worden uitgesloten, is nog een splitsing aangebracht in waterstanden, waarbij alleen die waterstandsklassen zijn opgenomen, waarvoor een redelijke hoeveelheid waarnemingsmateriaal aanwezig was.

Voor de windrichtings- en waterstandsklassen, waarbij een voldoende aantal waarnemingen in de verschillende windsnelheidsklassen aanwezig is, kunnen vervolgens de waarden van \bar{v} en $\overline{\Delta 0}$ op dubbel logaritmisch papier tegen elkaar worden uitgezet, waarna voor iedere figuur de regressierechte kan worden berekend. Nemen we aan dat het verband tussen \bar{v} en $\overline{\Delta 0}$ op dubbel logaritmisch papier inderdaad het beste door een rechte wordt weergegeven, dan kan worden geschreven $\Delta 0 = C \cdot v^x$, waarna uit de helling die de rechte met de log v as maakt de waarde van x kan worden bepaald. De aldus gevonden waarden van x staan eveneens genoteerd in tabel 1. Voor de windrichtingsklassen WZW+W zijn de gevonden rechten getekend in fig. 1a t/m 1c.

Tabel 1

A = aantal waarnemingen
 \bar{v} = gemiddelde windsnelheid
 $\Delta\bar{v}$ = gemiddeld opzetverschil
 x = zie tekst

windrichtings- klasse	waterstands- klasse	6 t/m 10 m/s			11 t/m 14 m/s			15 t/m 18 m/s			>18 m/s			x
		A	\bar{v}	$\Delta\bar{v}$	A	\bar{v}	$\Delta\bar{v}$	A	\bar{v}	$\Delta\bar{v}$	A	\bar{v}	$\Delta\bar{v}$	
WZW+W	+101 t/m +150	26	8.1	+6.4	42	12.4	+15.0	32	16.1	+24.6	2	20.0	+42.0	2.1
	+51 t/m +100	91	8.2	+7.6	56	12.2	+15.9	21	16.0	+28.8	2	19.5	+44.0	2.0
	+1 t/m +50	35	7.6	+6.0	18	12.8	+13.2	19	16.5	+21.4	7	20.1	+48.3	
"	-75 t/m 0	75	8.3	-0.1	66	12.3	+8.4	42	16.2	+22.2	3	21.3	+60.3	
WNW+NW	+101 t/m +150	8	9.4	+9.7	36	12.7	+16.9	22	15.9	+23.3	3	19.7	+48.0	1.8
	+51 t/m +100	54	8.3	+5.7	50	12.3	+15.0	17	16.4	+24.4	2	21.0	+54.0	2.2
	+1 t/m +50	13	8.1	+2.6	11	13.2	+15.9	9	16.3	+24.0	3	20.0	+56.3	3.4
"	-75 t/m 0	46	8.3	3.2	67	12.4	+7.3	31	15.9	+14.1	2	19.0	+52.0	
ONO+O	+51 t/m +100	20	8.0	-7.8	6	12.5	-22.8	7	15.4	-25.0				
	+1 t/m +50	93	8.3	-9.2	51	12.0	-18.6	7	15.4	-25.0				2.0
	-75 t/m 0	15	9.4	-13.9	35	12.5	-23.0	20	16.0	-29.6				
OZO+ZO	+51 t/m +100	18	8.5	-7.5	2	13.5	-18.5	3	15.7	-35.7				
	+1 t/m +50	50	8.3	-6.5	26	11.8	-12.6	4	16.8	-41.3				1.9
	-75 t/m 0	7	7.9	-11.4	9	12.8	-20.7							

Het blijkt, dat voor waterstanden beneden NAP, dus voor de laagwaters, het hiergenoemde eenvoudige verband tussen $\Delta 0$ en \bar{v} niet kan worden afgeleid. Zie de waarden van $\Delta 0$ in de waterstandsklasse -75 t/m 0 cm, die eveneens in tabel 1 is opgenomen. Bij de westelijke winden draait $\Delta 0$ bij toenemende windsnelheid van teken om. De relatie tussen $\Delta 0$ en v bij waterstanden beneden NAP zal nader worden beschouwd in paragraaf 5. We zullen ons in deze paragraaf verder beperken tot waterstanden boven NAP.

Uit tabel 1 blijkt verder, dat de waarde van x varieert tussen 1,8 en 2,2; slechts de combinatie WNW+NW en + t/m 50 cm levert een x van 3,4, doch deze x -waarde is gebaseerd op zeer weinig waarnemingen. We zullen voor het gemak verder met één waarde van x werken; fysisch is immers ook aannemelijk dat x slechts één waarde heeft. We stellen daarom $x = 2,0$.

Opgemerkt moet worden, dat SCHALKWIJK [2] voor de Oosterschelde een exponent $x = 2,0$ gebruikt. HAYFORD voor Amerikaanse meren een exponent 2,4 heeft gevonden (zie Schalkwijk, blz. 9) en VERPLOEGH en GROEN [3] bij de analyse van de waterstanden te Delfzijl waarden tussen 2,3 en 2,5 vonden.

4.3 $\Delta 0$ afhankelijk van de windrichting

Voor de waterstanden boven NAP kunnen we nu uitgaan van het eenvoudige verband $\Delta 0 = C(d) v^2$. De waarde van de evenredigheidsfactor C , afhankelijk van de windrichting d , kan nu op twee verschillende manieren worden afgeleid: enerzijds door voor alle paren waarnemingen $\Delta 0$, v uit één windrichtingsklasse het quotiënt $\frac{\Delta 0}{v^2}$ te berekenen en daarna het gemiddelde van al deze quotiënten te bepalen; anderzijds door voor iedere windrichtingsklasse $\overline{\Delta 0}$ en \bar{v}^2 te berekenen, waarna $\overline{C(d)}$ volgt uit $\overline{\Delta 0}/\bar{v}^2$. Deze laatste methode is hier toegepast. De resultaten volgen in tabel 2. (A = het aantal waarnemingen, dat voor de berekening van $\overline{C(d)}$ beschikbaar was).

Tabel 2 Waarden van $\overline{C(d)}$ (in $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^2$) afhankelijk van de windrichting en bij waterstanden boven NAP.
 A = aantal waarnemingen.

windrichtings- klasse	waterstandsklasse					
	+1 t/m +50		+51 t/m 100		+101 t/m 150	
	A	$\overline{C(d)}$	A	$\overline{C(d)}$	A	$\overline{C(d)}$
<u>NNO+NO</u>	57	-0,15	18	-0,12	-	-
<u>ONO+O</u>	151	-0,14	26	-0,14	-	-
<u>OZO+ZO</u>	79	-0,10	20	-0,12	-	-
<u>ZZO+Z</u>	124	-0,06	59	-0,05	-	-
<u>ZZW+ZW</u>	80	+0,02	156	+0,03	18	+0,03
<u>WZW+W</u>	79	+0,10	170	+0,12	102	+0,10
<u>WNW+NW</u>	36	+0,08	123	+0,10	69	+0,11
<u>NNW+N</u>	43	+0,03	62	+0,05	44	+0,09

Hierna is het mogelijk de gevonden C(d) waarden op millimeterpapier tegen de windrichting uit te zetten. Indien daarna een lijn door deze punten wordt getrokken, kan voor iedere windrichting de bijbehorende waarde van C(d) worden afgelezen. Tenslotte kan een tabel worden samengesteld waarin de waarden van $\overline{\Delta O}$ afhankelijk van windrichting en windsnelheid staan aangegeven.

Tijdens het verdere verloop van het onderzoek traden enkele feiten aan het licht waardoor de factoren C(d) een geringe wijziging ondergingen. De definitieve versie van bovengenoemde tabel met ΔO waarden zal daarom niet in deze paragraaf, doch in paragraaf 6 worden afgeleid.

5. ΔO afhankelijk van de waterstand

In paragraaf 4 is gebleken (tabel 1) dat voor een bepaalde klasse van windrichting en windsnelheid $\overline{\Delta O}$ ook nog afhangt van de waterstand. Deze afhankelijkheid willen we thans nader beschouwen.

Voor de 8 windrichtingsklassen volgen in tabel 3a de waarden van $\overline{\Delta O}$, berekend voor 2 windsnelheidsklassen en verdeeld volgens de in paragraaf 3 gedefinieerde waterstandsklassen.

Tabel 3a

A = aantal waarnemingen

\bar{z} = gemiddelde waterstand in de betreffende waterstandsklasse

$\overline{\Delta O}$ = gemiddeld opzetverschil

waterstandsklasse	NNO+NO						ONO+O					
	6 t/m 10 m/s			11 t/m 14 m/s			6 t/m 10 m/s			11 t/m 14 m/s		
	A	\bar{z}	$\overline{\Delta O}$	A	\bar{z}	$\overline{\Delta O}$	A	\bar{z}	$\overline{\Delta O}$	A	\bar{z}	$\overline{\Delta O}$
+ 51 t/m +100	13	+ 64	- 7.2	5	+ 56	-11.4	20	+ 60	- 7.8	6	+ 61	-22.8
+ 1 t/m + 50	44	+ 28	-10.3	11	+ 21	-17.9	93	+ 28	- 9.2	51	+ 28	-18.6
0 t/m - 75	3	- 11	- 9.0	2	- 56	-27.0	15	- 15	-13.9	35	- 18	-23.0
- 76 t/m -100	23	- 91	- 9.7	4	- 88	-13.0	51	- 89	-10.0	8	- 91	-11.4
-101 t/m -125	32	-111	- 4.3	2	-103	- 8.0	52	-112	- 4.0	28	-113	- 8.9
-126 t/m -150	13	-134	+ 6.8	7	-132	- 2.6	13	-134	+ 6.2	30	-135	- 0.9
<-150	-			-			3	-159	+16.7	8	-158	+ 5.9
	OZO+ZO						ZZO+Z					
	6 t/m 10 m/s			11 t/m 14 m/s			6 t/m 10 m/s			11 t/m 14 m/s		
	A	\bar{z}	$\overline{\Delta O}$	A	\bar{z}	$\overline{\Delta O}$	A	\bar{z}	$\overline{\Delta O}$	A	\bar{z}	$\overline{\Delta O}$
+ 51 t/m +100	18	+ 64	- 7.5	2	+ 71	-18.5	45	+ 67	-2.8	11	+ 63	- 6.8
+ 1 t/m + 50	50	+ 31	- 6.5	26	+ 23	-12.6	92	+ 30	-3.8	27	+ 29	- 8.2
0 t/m - 75	7	- 47	-11.4	9	- 23	-20.7	40	- 63	-7.0	14	- 47	- 5.6
- 76 t/m -100	17	- 91	- 3.9	3	- 95	- 7.3	40	- 86	-2.9	9	- 88	- 3.1
-101 t/m -125	32	-110	- 1.8	7	-114	- 2.4	47	-110	+3.2	17	-112	+ 4.7
-126 t/m -150	5	-133	+ 9.4	12	-139	+ 8.3	8	-135	+9.4	8	-135	+15.5
<-150	5	-165	+20.8	3	-170	+20.3	-			-		

Tabel 3a (vervolg)

waterstands- klasse	ZZW+ZW						WZW+W					
	6 t/m 10 m/s			11 t/m 14 m/s			6 t/m 10 m/s			11 t/m 14 m/s		
	A	\bar{z}	$\Delta\bar{0}$	A	\bar{z}	$\Delta\bar{0}$	A	\bar{z}	$\Delta\bar{0}$	A	\bar{z}	$\Delta\bar{0}$
>+150	-			-			3	+152	+5.7	3	+167	+13.3
+101 t/m +150	5	+106	+2.6	6	+112	+8.0	26	+113	+6.4	42	+117	+15.0
+ 51 t/m +100	72	+ 68	+0.9	48	+ 75	+4.8	91	+ 73	+7.6	56	+ 77	+15.9
+ 1 t/m + 50	44	+ 36	-1.0	20	+ 34	+2.1	35	+ 41	+6.0	18	+ 21	+13.2
0 t/m - 75	26	- 60	-4.8	36	- 55	+3.5	75	- 50	-0.1	66	- 40	+8.4
- 76 t/m -100	55	- 83	-0.9	18	- 85	+4.8	25	- 82	+1.5	10	- 84	+13.3
-101 t/m -125	13	-111	+7.6	12	-107	+12.3	5	-101	+5.8	1	-109	+30.0
	WNW+NW						NNW+N					
	1 t/m 3 m/s			7 t/m 9 m/s			11 t/m 14 m/s			15 t/m 19 m/s		
	A	\bar{z}	$\Delta\bar{0}$	A	\bar{z}	$\Delta\bar{0}$	A	\bar{z}	$\Delta\bar{0}$	A	\bar{z}	$\Delta\bar{0}$
>+150	1	+180	+7.0	7	+173	+19.3	-			-		
+101 t/m +150	8	+120	+9.7	36	+116	+16.9	11	+108	+5.2	15	+124	+14.1
+ 51 t/m +100	54	+ 71	+5.7	50	+ 79	+7.9	35	+ 70	+0.7	22	+ 80	+7.6
+ 1 t/m + 50	13	+ 39	+2.6	11	+ 17	+5.9	19	+ 39	-0.4	8	+ 27	+0.9
0 t/m - 75	46	- 55	-3.2	67	- 42	+7.3	26	- 50	-6.5	26	- 43	+0.2
- 76 t/m -100	15	- 85	-2.3	11	- 83	+7.8	26	- 87	-4.1	3	- 89	-2.3
-101 t/m -125	-			-			13	-110	+0.5	-		

Het is ook mogelijk gevallen te beschouwen, waarbij de meteorologische invloed zoveel mogelijk is uitgeschakeld. Daartoe zijn over de jaren 1961 t/m 1965 $\Delta\bar{0}$ waarden berekend voor alle situaties waarbij de windsnelheid 0 t/m 3 m/s bedroeg. De aldus gevonden waarden van $\Delta\bar{0}$ zijn weer-gegeven in tabel 3b.

Tabel 3b

Als tabel 3a, maar nu voor windsnelheid 0 t/m 3 m/s, ongeacht windrichting.

	0 t/m 3 m/s		
	A	\bar{z}	$\Delta\bar{0}$
- 51 t/m +100	157	+ 64	0.0
+ 1 t/m + 50	271	+ 33	-1.0
0 t/m - 75	83	- 65	-8.5
- 76 t/m -100	199	- 89	-4.7
-101 t/m -125	129	-110	+2.3
-126 t/m -150	6	-130	+8.2

Bij een beschouwing van tabel 3a en 3b blijkt, dat $\Delta\bar{0}$ in de verschillende waterstandsklassen inderdaad nogal varieert. Alle kolommen vertonen echter wel hetzelfde patroon; gaan we in gedachten nl. van de hoge naar de lage waterstanden, dan zien we $\Delta\bar{0}$ eerst dalen tot een zeker minimum bij de klasse 0 t/m -75 cm, daarna stijgt $\Delta\bar{0}$ weer.

De vraag kan worden gesteld of er een zekere wetmatigheid bestaat tussen $\Delta\bar{0}$ en de waterstand z en zo ja of hiervoor een verklaring kan worden gegeven.

Daar uit een globale beschouwing van de waarnemingen reeds blijkt, dat het verband tussen $\Delta 0$ en z bij de verschillende windrichtingen volgens eenzelfde patroon verloopt, zal eerst worden getracht dit patroon zo goed mogelijk vast te leggen. Daartoe zijn van enkele windrichtingsklassen de waarden van $\Delta 0$ uit overeenkomstige waterstandsklassen gemiddeld. Gezien het voorkomen van waarnemingen in de laagste waterstandsklassen, zijn de windrichtingen ONO t/m ZO gebruikt voor het vaststellen van het profiel van $\Delta 0, z$ in het waterstandsinterval -150 t/m +100 cm. Gezien het voorkomen van waarnemingen in de hoogste waterstandsklassen, zijn de windrichtingen WZW t/m NW gebruikt voor het vaststellen van het profiel in het waterstandsinterval -100 t/m >150 cm. De aldus berekende waarden van $\Delta 0$ volgen in tabel 4 en zijn in fig. 2 met resp. stippen en kruisjes aangegeven.

Tabel 4 \bar{z} = gemiddelde waterstand in de betreffende waterstandsklassen.

$\overline{\Delta 0}$ = gemiddeld opzetverschil.

waterstands- klasse	ONO t/m ZO		WZW t/m NW	
	\bar{z}	$\overline{\Delta 0}$	\bar{z}	$\overline{\Delta 0}$
>150			+168	+11.3
+101 t/m +150			+117	+12.0
+ 51 t/m +100	+ 64	-14.2	+ 75	+ 9.3
+ 1 t/m + 50	+ 27	-12.7	+ 20	+ 6.9
0 t/m - 75	- 26	-17.3	- 47	+ 3.1
- 76 t/m -100	- 92	- 8.2	- 84	+ 5.1
-101 t/m -125	-112	- 4.3		
-126 t/m -150	-135	+ 5.8		
<-150	-163	+15.9		

Voorts zijn in fig.2 met open bolletjes aangegeven de waarden van $\overline{\Delta 0}$ in de gevallen van zeer weinig wind (tabel 3b).

Door de punten van fig. 2 is hierna op het oog een lijn getrokken, waarbij als eis werd gesteld dat het verloop van de drie krommen in het gemeenschappelijke waterstandsinterval (-80 t/m +80 cm) gelijk moest zijn. Aangezien het slechts om de vorm van de kromme $\Delta 0, z$ gaat, wordt het uiteindelijke profiel verkregen door de krommen door verticale verschuiving aan elkaar te koppelen (fig. 3).

Is het nu mogelijk een verklaring voor deze vorm van het verband tussen $\Delta 0$ en z te geven?

Volgens het rapport van de Staatscommissie Lorentz uit 1926 was uit onderzoekingen naar het windeffect op de voormalige Zuiderzee gebleken, dat $\Delta 0$ omgekeerd evenredig is met de waterdiepte. Dit zou betekenen, dat bij een toename van z bij winden met een W-component ($\Delta 0$ positief) de kromme in fig. 2 zou moeten dalen en bij winden met een O-component ($\Delta 0$ negatief) de kromme zou moeten stijgen. Binnen het in ons geval beschouwde waterdiepteinterval (weergegeven door waterstandswaarden niet groter dan 150 cm boven NAP) blijkt deze regel niet te bestaan.

Bedacht moet worden, dat de Waddenzee qua waterdiepte een zeer grillige opbouw heeft. Uitgestrekte gebieden met een bodemligging op omstreeks NAP worden doorsneden door diepe geulen. De waterbeweging als gevolg van eb en vloed vindt vrijwel uitsluitend door deze geulen plaats. Blijkbaar zijn de mate en uitgestrektheid van de ondiepten alsmede het feit dat de

waterbeweging in hoofdzaak via de geulen plaatsvindt, er oorzaak van dat de voor de Zuiderzee gevonden wetmatigheid hier niet geldt. Vermoedelijk zou zij gelden bij een waterdiepte die enkele meters groter is, wanneer de waterbeweging homogener over het Waddengebied zou kunnen plaatsvinden. Uiteraard is geen waarnemingsmateriaal beschikbaar om dit na te gaan.

Waardoor kan dan wel de vorm van de kromme in fig. 3 worden veroorzaakt? Misschien kan de volgende redenering een verklaring geven.

Volgens metingen van Rijkswaterstaat en Koninklijke Marine wordt de westelijke Waddenzee bij elk getij in hoofdzaak gevuld en geledigd via het Marsdiep en de Vliestroom (tussen Vlieland en Terschelling). Het is aannemelijk dat de hoeveelheid water in de Waddenzee, en dus de waterstand te Harlingen, mede afhankelijk is van de doorstroomcapaciteit van de hier genoemde geulen.

De getijtafels van Harlingen en Den Helder zijn samengesteld aan de hand van langjarige gemiddelden van waterstanden in het verleden. De waarden in de getijtafels zijn daarom niet zuiver astronomisch, doch bevatten een klimatologisch windeffect, nl. volgens de wind, die gemiddeld over lange tijd in het Noordzee- of Waddengebied waait. De gemiddelde waarde van HW bedraagt voor Den Helder omstreeks +50 cm. Bij deze gemiddelde waarde van HW, gecombineerd met de boven het Waddengebied klimatologisch bestaande gemiddelde windvector, zou moeten worden verwacht dat ΔO gemiddeld de waarde 0 heeft. Bij deze waterstand van +50 cm, maar nu gecombineerd met vrijwel geen wind, moet men dus een kleine negatieve ΔO waarde verwachten. Dit is in overeenstemming met de waarnemingen (in fig. 2 is bij $z = +50$ cm $\Delta O = -2$ cm). Gaat men uit van een hogere waterstand, zeg +100 cm, en overigens gelijke omstandigheden (geen wind), dan is de enige wijziging dat de "instroomcapaciteit" van de geulen groter is, daardoor komt er bij vloed meer water in de Waddenzee, de waterstand te Harlingen wordt hoger en ΔO is groter (minder negatief) in vergelijking tot ΔO bij de gemiddelde HW-stand. Analoog kan worden beredeneerd dat bij een lagere HW-stand dan het gemiddelde (zeg 0 cm) ΔO een grotere negatieve waarde zal hebben, nu als gevolg van een t.o.v. het gemiddelde kleinere "instroomcapaciteit".

De gemiddelde waarde van LW bedraagt te Den Helder -85 cm. Bij weinig wind wordt nu de waarde van ΔO bepaald door de "uitstroomcapaciteit" van de geulen. Is de waterstand te Den Helder zeg -50 cm, dan is de "uitstroomcapaciteit" groter, de waterstand te Harlingen dus lager, ΔO dus meer negatief; is de waterstand te Den Helder zeg -100 cm, dan is de "uitstroomcapaciteit" kleiner, de waterstand te Harlingen hoger, ΔO dus minder negatief.

Het volgens deze redenering afgeleide verloop van ΔO met de waterstand is in overeenstemming met wat uit de waarnemingen in fig. 2 werd gevonden.

Men kan het resultaat ook nog anders formuleren. Aldus: bij afwezigheid van wind wordt de waarde van ΔO bepaald door de mate waarin een opzet te Den Helder zich, afhankelijk van de waterstand op de Waddenzee, tot aan Harlingen kan voortplanten.

Gaat men ervan uit dat de doorstroomcapaciteit van de geulen slechts afhankelijk is van de waterstand (hier als maat die te Den Helder) en niet afhankelijk van de wind, dan kan men verwachten dat voor alle windrichtingsklassen het grafische verband $\Delta O, z$ volgens hetzelfde profiel zal verlopen.

Tenslotte is het mogelijk voor elke combinatie van windrichtings- en windsnelheidsklasse het gevonden profiel door de waargenomen punten te leggen. Enkele voorbeelden zijn weergegeven in fig. 4.

6. Het verband tussen $\Delta 0$ en de wind opnieuw beschouwd

In paragraaf 4.2 werd een beschouwing gewijd aan de afhankelijkheid van $\Delta 0$ van de windsnelheid. Hierbij werd stilzwijgend aangenomen, dat $\Delta 0$ bij afwezigheid van wind en ongeacht de waterstand de waarde 0 zou hebben. Voor waterstanden boven NAP kon een relatie tussen $\Delta 0$ en v^2 worden afgeleid.

In paragraaf 5 is gebleken, dat bij zeer zwakke wind $\Delta 0$ ongelijk 0 is en bovendien afhankelijk van de waterstand z . Het in 4.2 gevonden verband tussen $\Delta 0$ en v zullen we daarom nu iets anders schrijven, nl.

$$\Delta 0 = C(d) v^x + \alpha(z) \quad (1)$$

waarbij $\alpha(z)$ gelijk is aan de gemiddelde waarde van $\Delta 0$ bij afwezigheid van wind.

Strikt genomen zou $\alpha(z)$ bepaald moeten worden door over een groot aantal jaren $\Delta 0$ waarden te berekenen bij situaties met windstilte. Wegens de zeldzaamheid van windstillen zullen we deze weg niet bewandelen, doch aannemen dat $\alpha(z)$ zeer goed benaderd is door de middelste kromme van fig. 2. Daar was immers uitgegaan van windsnelheden ≤ 3 m/s ongeacht de windrichting. Uit formule (1) volgt bij $v=3$, $x=2$ en de grootstewaarde die $C(d)$ kan hebben, nl.: $0,12$ (blijkt later in fig. 7), dat $\Delta 0 - \alpha(z) = 1,1$ cm. Bedenkt men voorts dat er is gemiddeld over waarnemingen met $v = 0, 1, 2$ en 3 m/s, terwijl $C(d)$ waarden kan aannemen tussen $-0,12$ en $+0,12$, dan is duidelijk dat de middelste kromme in fig. 2 inderdaad een zeer goede benadering is voor $\alpha(z)$.

Vervolgens is, analoog aan de werkwijze in paragraaf 4, nagegaan of er - wat betreft de hoogwaters - aanleiding is de gevonden waarde van de exponent x te wijzigen. Hiertoe zijn per windrichtings- en windsnelheidsklasse de waarden van $\Delta 0 - \alpha(z)$ en \bar{v} berekend, waarbij is gemiddeld over alle beschikbare waarnemingen bij waterstanden boven NAP. We krijgen tabel 5 (A is weer het aantal beschikbare waarnemingen).

Tabel 5 Afleiding van de exponent x uit de relatie $\Delta 0 = C(d) v^x + \alpha(z)$ bij waterstanden boven NAP.

wind- richting	6 t/m 10 m/s			11 t/m 14 m/s			15 t/m 18 m/s			> 18 m/s			x
	A	\bar{v}	$\Delta 0 - \alpha(z)$	A	\bar{v}	$\Delta 0 - \alpha(z)$	A	\bar{v}	$\Delta 0 - \alpha(z)$	A	\bar{v}	$\Delta 0 - \alpha(z)$	
NNO+NO	57	8.0	-6.2	16	11.3	-11.8	2	16.0	-29.0				-
ONO+O	113	8.2	-5.4	57	12.0	-15.3	7	15.4	-20.0				2.1
OZO+ZO	68	8.3	-3.9	28	11.9	-8.8	3	15.7	-32.0				2.5
ZZO+Z	137	8.3	-0.4	38	12.3	-4.5	8	15.8	-9.5				-
ZZW+ZW	121	8.1	+1.3	74	12.4	+5.5	54	16.2	+10.2	5	20.0	+9.8	-
WZW+W	155	8.0	+7.8	119	12.4	+15.5	86	17.8	+24.5	14	19.8	+44.4	1.9
WNW+NW	76	8.5	+6.6	104	12.6	+14.8	63	16.3	+24.6	15	20.5	+50.3	2.2
NNW+N	65	7.9	+2.4	48	12.5	+8.8	46	16.2	+17.2	6	20.8	+30.0	-

De x -waarden zijn weer berekend voor dezelfde windrichtingsklassen als in 4.2; de resultaten staan in de laatste kolom van tabel 5.

We kunnen nu eveneens nagaan welke waarde aan x gegeven kan worden in de situaties met waterstanden beneden NAP. Daartoe zijn evenals voor tabel 5 de waarden van \bar{v} en $\Delta O - \alpha(z)$ berekend, waarbij nu is gemiddeld over alle beschikbare waarnemingen bij waterstanden beneden NAP. De resultaten volgen in tabel 6.

Tabel 6 Afleiding van de exponent x uit de relatie $O = c(d) v^x + \alpha(z)$ bij waterstanden beneden NAP.

wind- richting	6 t/m 10 m/s			11 t/m 14 m/s			15 t/m 18 m/s			>18 m/s			x
	A	\bar{v}	$\Delta O - \alpha(z)$	A	\bar{v}	$\Delta O - \alpha(z)$	A	\bar{v}	$\Delta O - \alpha(z)$	A	\bar{v}	$\Delta O - \alpha(z)$	
NNO+NO	73	8.2	-6.4	16	11.6	-12.4	7	16.0	-22.5				-
ONO+O	134	8.4	-6.7	109	12.4	-13.1	40	15.7	-22.5				1.9
OZO+ZO	66	8.0	-3.2	34	12.0	-7.1	9	16.5	-27.9				2.8
ZZO+Z	135	8.1	+0.6	49	12.2	+2.2	5	15.4	+3.8				-
ZZW+ZW	94	7.9	+3.9	65	12.1	+11.3	55	16.0	+19.0	7	20.0	+33.0	-
WZW+W	105	8.1	+8.2	77	12.3	+18.0	42	16.2	+31.8	3	21.3	+70.0	2.0
WNW+NW	61	8.2	+4.8	78	12.3	+16.1	32	15.9	+23.0	2	19.0	+60.0	2.4
NNW+N	65	7.8	+0.5	31	12.7	+8.3	15	15.7	+15.2				-

De waarde van x bij de windrichtingsklasse OZO+ZO valt steeds uit de toon; zij is echter steeds gebaseerd op het kleinste aantal waarnemingen. Overigens lopen de x -waarden zo weinig uiteen, dat is besloten zowel voor de waterstanden boven als beneden NAP met één waarde, nl. $x = 2.0$ verder te werken.

Ter illustratie zijn in fig. 5 en 6 voor de windrichtingen WZW+W en WNW+NW en de waterstanden boven resp. beneden NAP de waarden van \bar{v} en $\Delta O - \alpha(z)$ en de berekende regressierechte aangegeven.

Met de gevonden relatie $\Delta O = C(d) v^2 + \alpha(z)$ als basis, zijn vervolgens op een wijze analoog aan die beschreven in 4.3 de evenredigheidsfactoren $C(d)$ berekend. De resultaten volgen in tabel 7.

Tabel 7 Waarden van $C(d)$ (in $cm \cdot m^{-2} \cdot s^2$) afhankelijk van de windrichting en bij diverse waterstandsklassen.

wind- richting	+1 t/m +50 cm						+51 t/m +100 cm					
	A	\bar{z}	$\alpha(z)$	ΔO	\bar{v}	$C(d)$	A	\bar{z}	$\alpha(z)$	ΔO	\bar{v}	$C(d)$
NNO+NO	57	+26	-4.5	-12.5	9.0	-0.10	18	+61	-1.5	-8.4	8.5	-0.10
ONO+O	151	+28	-4.0	-13.1	9.8	-0.10	26	+60	-1.5	-11.3	9.1	-0.12
OZO-ZO	79	+29	-4.0	-9.6	9.7	-0.06	20	+65	-1.0	-8.6	8.5	-0.11
ZZO+Z	124	+29	-4.0	-5.1	9.5	-0.01	59	+67	-1.0	-3.9	9.3	-0.03
ZZW+ZW	80	+34	-3.5	+1.8	10.5	+0.05	156	+71	-1.0	+4.2	11.6	+0.04
WZW+W	79	+30	-4.0	+15.1	12.0	+0.13	170	+76	-0.5	+13.4	10.6	+0.12
WNW+NW	36	+28	-4.0	+13.4	12.7	+0.11	123	+77	-0.5	+12.8	11.1	+0.11
NNW+N	43	+34	-3.5	+3.8	11.6	+0.05	62	+75	-0.5	+4.8	10.2	+0.05

Tabel 7 (vervolg)

wind- richting	0 t/m -75 cm						-76 t/m -100 cm					
	A	\bar{z}	$\alpha(z)$	$\overline{\Delta 0}$	\bar{v}	$\overline{C(d)}$	A	\bar{z}	$\alpha(z)$	$\overline{\Delta 0}$	\bar{v}	$\overline{C(d)}$
NNO+NO	7	-25	-9.5	-19.1	11.1	-0.08	27	-91	-3.0	-10.2	8.8	-0.09
ONO+O	70	-18	-8.5	-22.9	12.8	-0.09	61	-89	-3.5	-11.0	8.6	-0.10
OZO+ZO	20	-29	-9.5	-21.6	11.7	-0.09	21	-91	-3.0	-6.3	8.9	-0.04
ZZO+Z	57	-59	-9.0	-6.7	9.3	+0.02	51	-86	-4.0	-2.7	9.1	+0.02
ZZW+ZW	107	-54	-9.0	+5.2	13.1	+0.08	87	-83	-4.5	+2.6	9.9	+0.07
WZW+W	186	-37	-9.5	+8.9	12.5	+0.12	35	-83	-4.5	+4.9	8.9	+0.12
WNW+NW	146	-43	-9.5	+6.0	13.0	+0.09	27	-84	-4.5	+2.4	9.6	+0.08
NNW+N	66	-43	-9.5	-1.0	11.7	+0.06	30	-87	-3.5	-3.9	8.1	-0.01
-101 t/m -125 cm						-126 t/m -150 cm						
NNO+NO	35	-110	+2.5	-4.4	8.8	-0.09	22	-133	+11.0	+1.3	9.7	-0.10
ONO+O	84	-113	+4.0	-6.1	10.0	-0.10	47	-135	+11.5	+0.6	11.6	-0.08
OZO+ZO	39	-111	+3.0	-1.9	8.5	-0.07	18	-137	+12.5	+7.6	10.9	-0.04
ZZO+Z	64	-110	+2.5	+3.6	9.3	+0.01	16	-135	+11.5	+12.5	10.4	+0.01
ZZW+ZW	28	-109	+2.5	+10.4	10.6	+0.07	-	-	-	-	-	-
WZW+W	6	-102	+0.5	+9.8	8.2	+0.14	-	-	-	-	-	-
WNW+NW	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NNW+N	15	-109	+2.5	+0.7	7.9	-0.03	-	-	-	-	-	-

Het zou nu mogelijk zijn voor alle waterstandsklassen de waarden van C(d) op millimeterpapier uit te zetten tegen de windrichting. Omdat het op fysische gronden het meest waarschijnlijk is, dat de lijn door de C(d) waarden ongeveer sinusvormig zal moeten zijn (bijv. een sinus + eerste hogere harmonische), kan hierna voor iedere waterstandsklasse een Fourier-aanpassing worden berekend. Uit de gevonden waarden van C(d) is op het oog echter al te zien, dat voor de verschillende waterstandsklassen de Fourier-aanpassingen zeer weinig zullen verschillen. Daarom is ter vereenvoudiging en ter vermindering van rekenwerk voor iedere windrichtingsklasse één gemiddelde C(d) waarde bepaald, die dus zal gelden voor alle waterstandsklassen. Deze waarden staan in tabel 8.

Tabel 8 Gemiddelde waarden van de evenredigheidsfactor C(d)

windrichtings- klasse	C(d)	C(d) uit formule (2)	windrichtings- klasse	C(d)	C(d) uit formule (2)
NNO+NO	-0.09	-0.080	ZZW+ZW	+0.06	+0.064
ONO+O	-0.10	-0.108	WZW+W	+0.12	+0.115
OZO+ZO	-0.07	-0.065	WNW+NW	+0.10	+0.108
ZZO+Z	0.00	-0.002	NNW+N	+0.03	+0.020

De waarden van C(d) uit tabel 8 zijn in fig. 7 uitgezet tegen de windrichting. De uit deze waarden berekende Fourier-aanpassing ziet er uit als volgt:

$$C(d) = 0,006 - 0,112 \sin \frac{\pi}{4} k + 0,011 \cos \frac{\pi}{4} k - 0,015 \sin \frac{\pi}{2} k + 0,003 \cos \frac{\pi}{2} k \quad (2)$$

Met behulp van deze formule is de lijn door de punten in fig. 7 getrokken; de berekende waarden van C(d) bij k = 1 t/m 8 staan eveneens in tabel 8 vermeld.

Aan de hand van formule (1) kunnen nu voor diverse waterstanden, windrichtingen en windsnelheden de bijbehorende waarden van ΔO worden berekend. Zie hiervoor de Appendix aan het einde van dit verslag.

7. Spreading

Het doel van het onderhavige onderzoek was het opstellen van een zo betrouwbaar mogelijke schatting van ΔO . Nu in de vorige paragrafen een verband tussen ΔO en de wind is afgeleid, kan de vraag worden gesteld hoe nauwkeurig de schatting van ΔO kan worden genoemd, indien we van een gegeven wind uitgaan.

Als maat voor deze nauwkeurigheid kan worden aangenomen de fout $\sigma_{\xi} = \sqrt{\frac{\sum(\Delta O_m - \Delta O_w)^2}{A}}$, waarin ΔO_m de waarde berekend met de in paragraaf 6 afgeleide methode en ΔO_w het waargenomen opzetverschil.

Gezien de grote hoeveelheid rekenwerk, is ervan afgezien σ_{ξ} te berekenen voor alle combinaties van windrichtingen, windsnelheden en waterstanden. Daarom is deze berekening slechts uitgevoerd voor de windrichtingen WZW+W en ONO+O. Zie resp. tabel 9a en 9b.

Tabel 9a

σ_{ξ} bij windrichting WZW+W;
A = aantal waarnemingen.

waterstands- klasse	6 t/m 10 m/s		11 t/m 14 m/s		15 t/m 18 m/s		> 18 m/s	
	A	σ_{ξ} (cm)	A	σ_{ξ} (cm)	A	σ_{ξ} (cm)	A	σ_{ξ} (cm)
>+150	3	-	3	-	14	12.4	3	-
+101 t/m +150	26	7.3	42	8.9	32	12.7	2	-
+ 51 t/m +100	91	6.2	56	7.7	21	12.4	2	-
+ 1 t/m + 50	35	6.7	18	9.6	19	16.0	7	-
0 t/m - 75	75	4.7	66	9.2	42	14.8	2	-
- 76 t/m -100	25	6.0	10	-	-	-	-	-
-101 t/m -125	5	-	1	-	-	-	-	-
alle water- standen samen	260	6.1	196	8.6	128	13.7	17	19.0

Tabel 9b

σ_{ξ} bij windrichting ONO+O;
A = aantal waarnemingen.

waterstands- klasse	6 t/m 10 m/s		11 t/m 14 m/s		15 t/m 18 m/s	
	A	σ_{ξ} (cm)	A	σ_{ξ} (cm)	A	σ_{ξ} (cm)
+ 51 t/m +100	20	5.8	6	-	-	-
+ 1 t/m + 50	93	7.2	51	8.8	7	-
0 t/m - 75	15	-	35	8.2	20	11.6
- 76 t/m -100	51	4.0	8	-	2	-
-101 t/m -125	52	6.0	28	8.9	4	-
-126 t/m -150	13	-	30	8.7	4	-
<-150	3	-	8	-	10	-
alle water- standen samen	247	6.4	166	8.4	47	10.1

De vraag kan ook gesteld worden, hoe nauwkeurig de schatting van $\Delta 0$ is in de gevallen dat er vrijwel geen wind aanwezig is. Een indruk van deze nauwkeurigheid kan worden verkregen door σ_{ξ} te berekenen van alle $\Delta 0$ waarden bij windstilte of een wind van slechts 1 m/s. Voor een splitsing in de diverse waterstandsklassen is het aantal waarnemingen te klein, daarom is slechts onderscheid gemaakt tussen waarnemingen bij waterstanden beneden en die boven NAP. Zie tabel 10.

Tabel 10 σ_{ξ} bij een windsnelheid van 0 of 1 m/s

waterstanden	A	σ_{ξ} (cm)
beneden NAP	126	5,2
boven NAP	114	6,0

8. Samenvatting en conclusies

In dit verslag wordt een methode afgeleid om de hoogte van zowel hoog- als laagwater in Harlingen te bepalen afhankelijk van de opzet te Den Helder en een additionele opzet ten gevolge van de lokale wind boven de Waddenzee.

De additionele opzet blijkt het beste te kunnen worden benaderd volgens de formule $\Delta 0 = C(d) v^2 + \alpha(z)$, waarin $\Delta 0$ de additionele opzet, $C(d)$ een evenredigheidsconstante afhankelijk van de windrichting d , v de windsnelheid en $\alpha(z)$ een grootte is, gelijk aan de additionele opzet bij afwezigheid van wind boven de Waddenzee.

Voor de exponent x werd de waarde 2,0 gevonden, terwijl voor de diverse windrichtingen de bijbehorende waarden van $C(d)$ werden berekend.

Volgens de gevonden benaderingsformule kan men zich de additionele opzet samengesteld denken uit een gedeelte, dat afhangt van de lokale wind boven de Waddenzee, en een gedeelte dat in grote mate afhangt van de mate waarin een opzet aan de Noordzeekust zich, afhankelijk van de waterstand, via de Waddenzee tot aan Harlingen kan voortplanten.

Enkele tabellen, waaruit de additionele opzet te Harlingen, afhankelijk van windrichting, windsnelheid en waterstand kan worden afgelezen, zijn in dit verslag opgenomen.

Als maat voor de nauwkeurigheid van de volgens boven aangegeven methode berekende waarden van $\Delta 0$ is gebruikt σ_{ξ} . Deze fout hangt af van de windsnelheid; zij neemt toe van omstreeks 6 cm bij een windsnelheid van omstreeks 8 m/s tot 10 à 15 cm bij een windsnelheid van omstreeks 18 m/s. Bij afwezigheid van wind blijkt σ_{ξ} 5 à 6 cm te bedragen.

Literatuur

- [1] M.P.H. Weenink. A theory and method of calculation of windeffects on sea levels in a partly enclosed sea, with special application to the southern coast of the North Sea. Med. en Verh. KNMI, 1958.
- [2] W.F. Schalkwijk. A contribution to the study of storm surges on the Dutch coast. Med. en Verh. KNMI, 1947.
- [3] G. Verploegh en P. Groen. De uitwerking van de wind over de Groningse Waddenzee op de hoogwaterstanden van Delfzijl. Wet. Rapport KNMI, 1955.

Opzetverschil Harlingen-Den Helder in cm bij wind gemeten te Oost-Vlieland (sector 020° t/m 180°) of Den Helder (sector 200° t/m 360°)

Waterstand te Den Helder: +150 cm $\alpha(z) = +2.0$ cm

wind-snelheid m/s	windrichting																	
	20°	40°	60°	80°	100°	120°	140°	160°	180°	200°	220°	240°	260°	280°	300°	320°	340°	360°
7½	-1	-3	-4	-4	-3	-2	-1	+2	+2	+4	+6	+7	+8	+9	+8	+6	+4	+2
10	-3	-7	-8	-9	-7	-5	-3	+1	+3	+6	+9	+11	+13	+14	+13	+10	+6	+2
12½	-6	-11	-14	-15	-13	-10	-5	0	+4	+9	+12	+17	+20	+21	+20	+15	+8	+1
15	-9	-17	-22	-23	-19	-15	-8	-1	+5	+16	+23	+28	+31	+30	+28	+20	+10	+1
17½	-13	-24	-30	-32	-27	-21	-12	-3	+7	+25	+37	+48	+52	+52	+48	+34	+16	0
20	-18	-32	-40	-42	-36	-28	-16	-4	+8	+30	+46	+60	+65	+65	+60	+43	+20	0
22½	-23	-41	-51	-54	-46	-36	-21	-6	+10	+36	+55	+73	+80	+80	+73	+52	+24	-1
25	-29	-51	-63	-67	-57	-45	-26	-7	+11	+41	+63	+89	+97	+97	+89	+63	+28	-1
27½	-36	-62	-77	-81	-70	-55	-32	-9	+13	+49	+77	+105	+115	+115	+105	+74	+34	-2
30	-43	-74	-93	-97	-84	-65	-39	-11	+15	+58	+91	+128	+155	+155	+145	+105	+58	-2

Waterstand te Den Helder: +100 cm $\alpha(z) = +0.5$ cm

wind-snelheid m/s	windrichting																	
	20°	40°	60°	80°	100°	120°	140°	160°	180°	200°	220°	240°	260°	280°	300°	320°	340°	360°
7½	-2	-4	-5	-6	-6	-4	-2	0	+1	+3	+4	+6	+7	+7	+7	+5	+2	0
10	-5	-8	-10	-11	-9	-7	-4	-1	+2	+5	+7	+10	+12	+13	+12	+9	+4	0
12½	-7	-13	-16	-17	-14	-11	-7	-2	+3	+7	+10	+15	+18	+20	+18	+13	+6	0
15	-11	-19	-23	-24	-21	-16	-10	-3	+4	+14	+22	+30	+38	+42	+36	+25	+8	-1
17½	-15	-26	-32	-32	-29	-22	-13	-4	+5	+18	+28	+38	+47	+50	+47	+33	+11	-1
20	-20	-33	-42	-44	-38	-30	-17	-5	+6	+23	+36	+48	+59	+64	+59	+41	+15	-2
22½	-25	-42	-53	-55	-48	-38	-22	-7	+8	+29	+44	+60	+72	+79	+72	+51	+18	-2
25	-31	-53	-65	-69	-59	-46	-28	-9	+10	+35	+53	+72	+87	+95	+87	+61	+22	-3
27½	-37	-64	-79	-84	-71	-56	-34	-11	+12	+41	+63	+86	+104	+113	+104	+72	+27	-3
30	-45	-76	-94	-99	-85	-67	-40	-13	+14	+49	+77	+104	+132	+141	+132	+94	+32	-4

$\alpha(z) = -2.0 \text{ cm}$

Waterstand te Den Helder: +50 cm

wind- snelheid m/s	windrichting																	
	20°	40°	60°	80°	100°	120°	140°	160°	180°	200°	220°	240°	260°	280°	300°	320°	340°	360°
7½	-5	-7	-8	-8	-7	-6	-4	-2	-2	0	+2	+3	+4	+5	+4	+2	0	-2
10	-7	-11	-12	-13	-11	-9	-7	-3	-1	+2	+5	+7	+9	+10	+9	+6	+2	-2
12½	-10	-15	-18	-19	-17	-14	-9	-4	0	+5	+9	+13	+16	+17	+16	+10	+4	-3
15	-13	-21	-26	-27	-23	-19	-12	-5	+1	+8	+14	+19	+24	+26	+24	+16	+6	-3
17½	-17	-28	-34	-35	-31	-25	-16	-7	+3	+12	+19	+27	+33	+36	+33	+23	+9	-4
20	-22	-36	-44	-46	-40	-32	-20	-8	+4	+16	+26	+36	+44	+48	+44	+30	+12	-4
22½	-27	-45	-55	-58	-50	-40	-25	-10	+6	+21	+33	+46	+56	+61	+56	+39	+16	-5
25	-33	-55	-68	-71	-61	-49	-30	-11	+7	+26	+42	+57	+70	+76	+70	+48	+20	-5
27½	-40	-66	-81	-85	-74	-59	-36	-13	+9	+32	+51	+70	+85	+93	+85	+59	+24	-6
30	-47	-78	-97	-101	-88	-69	-42	-15	+11	+38	+61	+83	+101	+111	+101	+70	+30	-6

$\alpha(z) = -7.0 \text{ cm}$

Waterstand Den Helder: 0 cm

7½	-10	-12	-13	-13	-12	-11	-9	-7	-7	-4	-3	-2	0	0	0	-2	-5	-7
10	-12	-16	-17	-18	-16	-15	-11	-6	-6	-2	0	+2	+4	+5	+4	+1	-3	-7
12½	-15	-20	-23	-24	-22	-19	-14	-5	-5	0	+4	+8	+11	+12	+11	+6	-1	-8
15	-18	-26	-31	-32	-28	-24	-17	-4	-4	+3	+9	+14	+19	+21	+19	+11	+1	-8
17½	-22	-33	-39	-41	-36	-30	-21	-2	-2	+7	+14	+22	+28	+31	+28	+18	+4	-9
20	-27	-41	-49	-51	-45	-37	-25	-1	-1	+11	+21	+31	+39	+43	+39	+25	+7	-9
22½	-32	-50	-60	-63	-55	-45	-30	+1	+1	+16	+28	+41	+51	+56	+51	+34	+11	-10
25	-38	-60	-73	-76	-66	-54	-35	+2	+2	+21	+37	+52	+65	+71	+65	+43	+15	-10
27½	-45	-71	-86	-90	-79	-64	-41	+4	+4	+27	+46	+65	+80	+88	+80	+54	+19	-11
30	-52	-83	-102	-106	-93	-74	-47	+6	+6	+34	+56	+78	+97	+106	+97	+65	+25	-11

$\alpha(z) = -9.0 \text{ cm}$

Waterstand Den Helder: -50 cm

wind- snelheid m/s	windrichting																	
	20°	40°	60°	80°	100°	120°	140°	160°	180°	200°	220°	240°	260°	280°	300°	320°	340°	360°
7½	-12	-14	-15	-15	-14	-13	-11	-9	-9	-6	-5	-4	-2	-2	-2	-4	-7	-9
10	-14	-18	-19	-20	-18	-16	-13	-10	-8	-4	-2	0	+2	+4	+2	-1	-5	-9
12½	-17	-22	-25	-26	-24	-21	-16	-11	-7	-2	+2	+6	+9	+11	+9	+4	+3	-10
15	-20	-28	-33	-34	-30	-26	-19	-13	-6	+1	+7	+12	+17	+19	+17	+9	-1	-10
17½	-24	-35	-41	-43	-38	-32	-23	-14	-4	+5	+12	+20	+26	+29	+26	+16	+2	-11
20	-29	-43	-51	-53	-47	-39	-27	-15	-3	+9	+19	+29	+37	+41	+37	+23	+5	-11
22½	-34	-52	-62	-65	-57	-47	-32	-17	-1	+14	+26	+39	+49	+54	+49	+32	+9	-12
25	-40	-62	-75	-77	-68	-56	-37	-18	0	+19	+35	+50	+63	+69	+63	+41	+13	-12
27½	-47	-73	-88	-92	-81	-66	-43	-20	+2	+25	+44	+63	+78	+86	+78	+51	+17	-13
30	-54	-85	-104	-108	-95	-76	-49	-22	+4	+32	+54	+77	+95	+104	+95	+63	+23	-13

$\alpha(z) = -0.5 \text{ cm}$

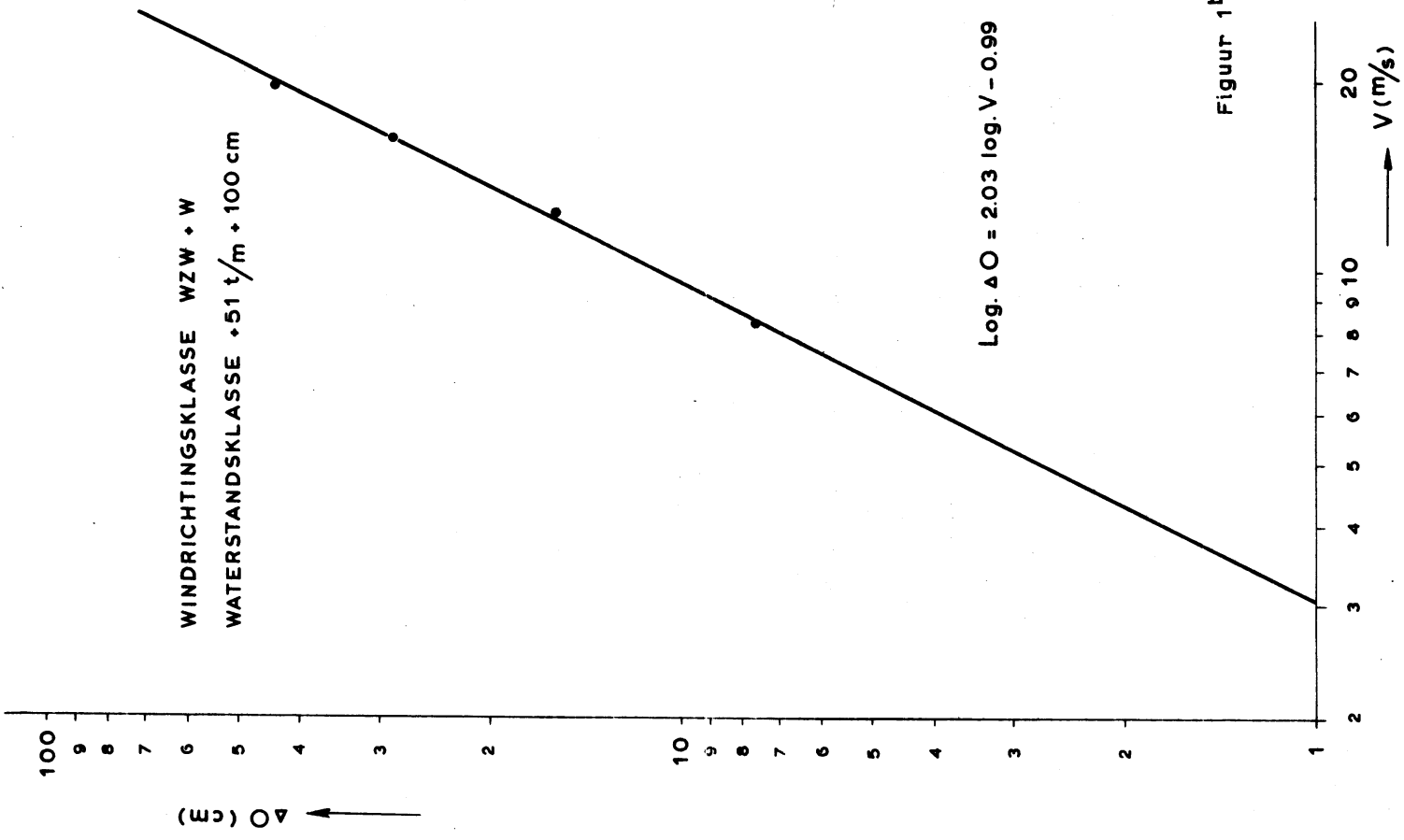
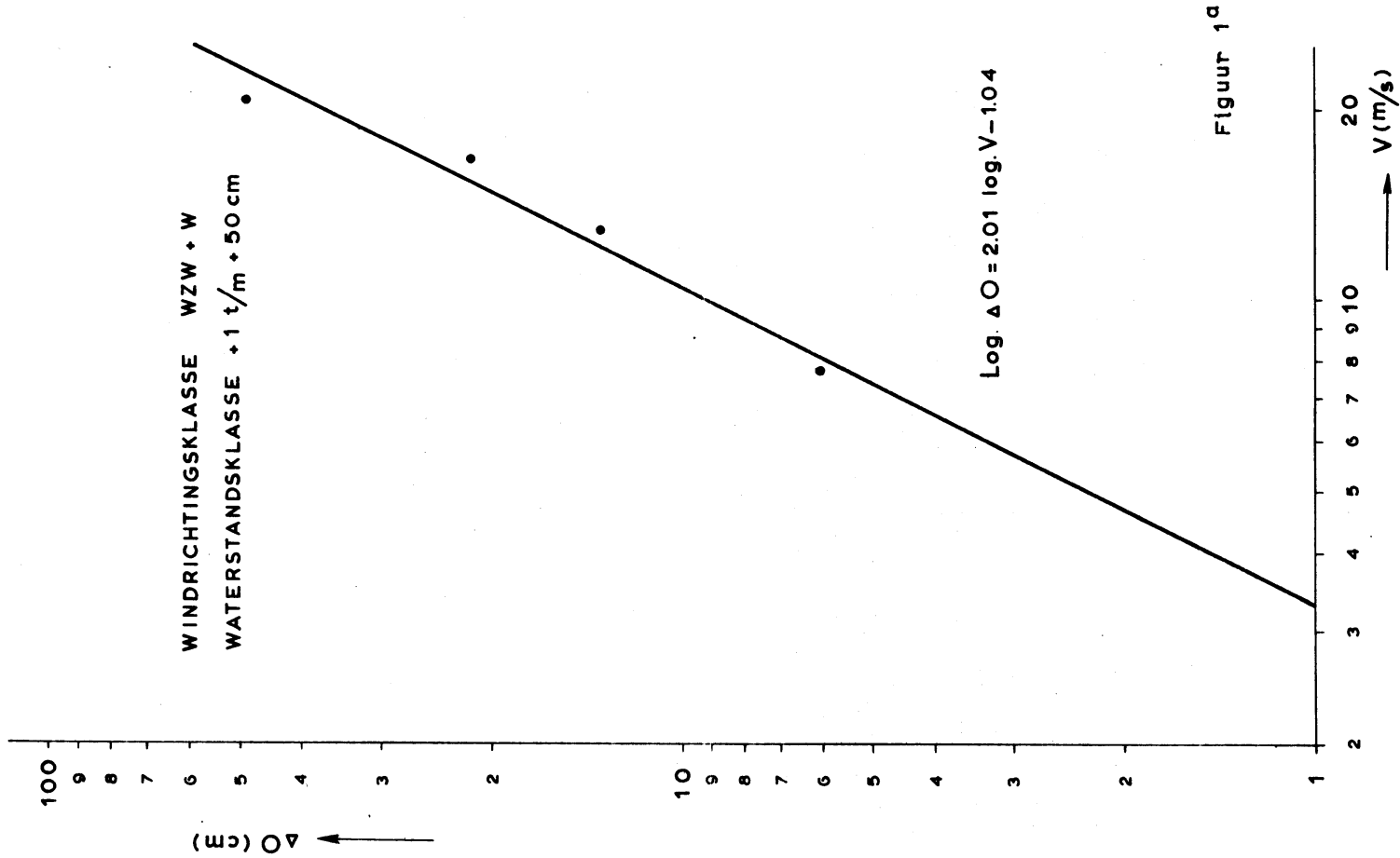
Waterstand Den Helder: -100 cm

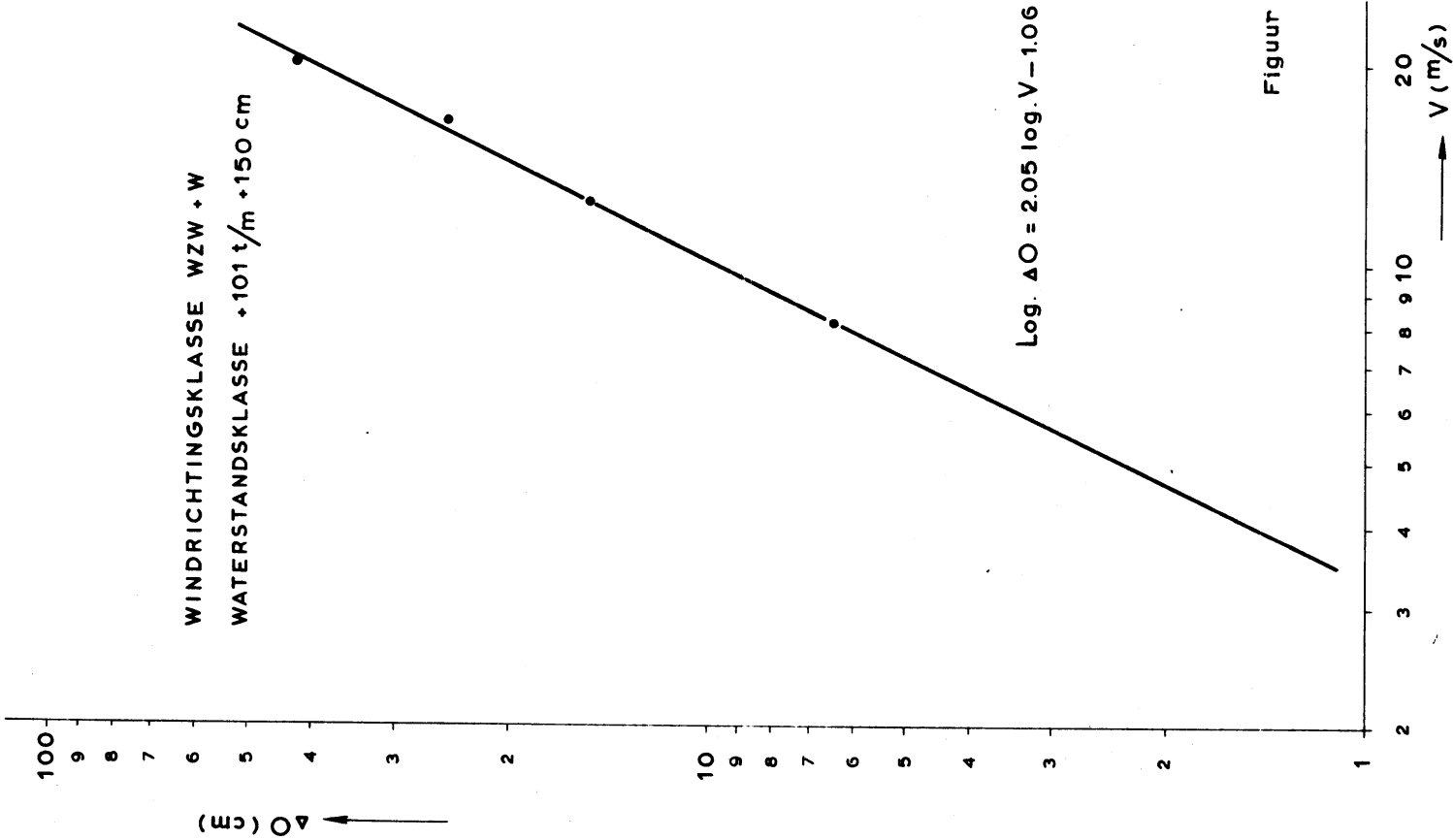
7½	-3	-5	-6	-7	-6	-5	-3	-1	0	+2	+3	+5	+6	+7	+6	+4	+1	0
10	-6	-9	-11	-11	-10	-8	-5	-2	+1	+4	+7	+9	+11	+12	+11	+8	+3	-1
12½	-8	-14	-17	-17	-15	-12	-7	-3	+2	+7	+10	+14	+17	+19	+17	+12	+5	-1
15	-12	-20	-24	-25	-22	-17	-11	-4	+3	+10	+15	+21	+25	+28	+25	+18	+7	-2
17½	-16	-26	-33	-34	-29	-23	-14	-5	+4	+13	+21	+29	+35	+38	+35	+24	+10	-2
20	-20	-34	-43	-44	-38	-30	-18	-6	+5	+17	+27	+38	+46	+49	+46	+32	+13	-3
22½	-26	-43	-54	-56	-48	-38	-23	-8	+7	+22	+35	+48	+58	+63	+58	+40	+17	-3
25	-32	-54	-66	-69	-60	-47	-29	-10	+9	+28	+43	+59	+71	+78	+71	+50	+21	-4
27½	-38	-65	-80	-84	-72	-57	-35	-12	+11	+34	+52	+71	+87	+94	+87	+60	+26	-4
30	-45	-77	-95	-99	-86	-68	-41	-14	+13	+40	+62	+85	+103	+112	+103	+72	+31	-5

Waterstand Den Helder: -150 cm

$\alpha(z) = +17$ cm

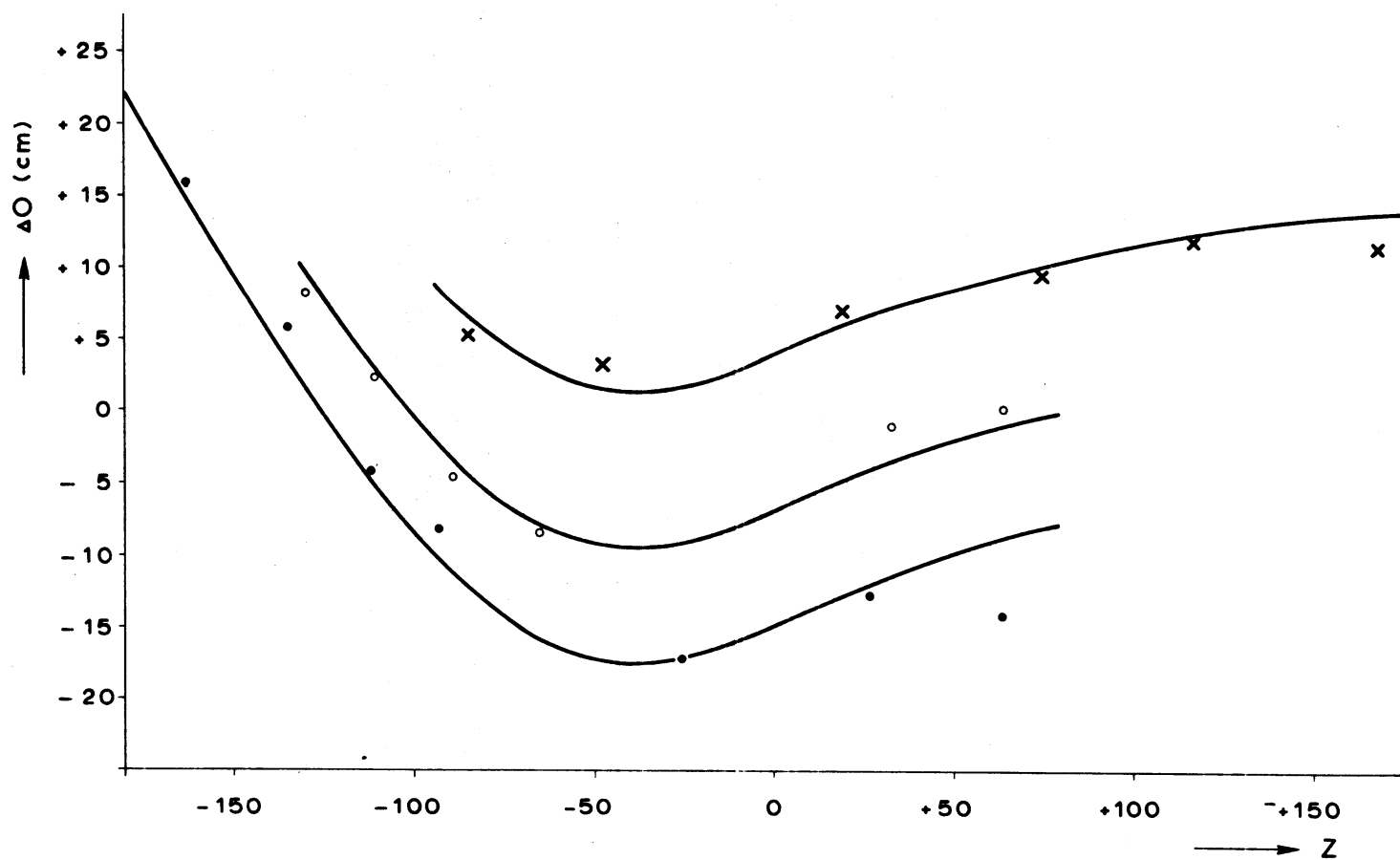
wind- snelheid m/s	windrichting																	
	20°	40°	60°	80°	100°	120°	140°	160°	180°	200°	220°	240°	260°	280°	300°	320°	340°	360°
7½	+14	+12	+11	+11	+12	+13	+14	+17	+17	+19	+21	+22	+23	+24	+23	+21	+19	+17
10	+12	+8	+6	+6	+7	+10	+12	+16	+18	+21	+24	+26	+28	+29	+28	+25	+20	+17
12½	+9	+4	+1	0	+2	+5	+10	+15	+19	+24	+28	+32	+35	+36	+35	+29	+23	+16
15	+6	-2	-7	-8	-4	0	+7	+14	+20	+27	+33	+39	+43	+45	+43	+37	+25	+16
17½	+2	-9	-15	-17	-12	-6	+3	+12	+22	+31	+38	+46	+52	+55	+52	+41	+28	+15
20	-3	-17	-25	-27	-21	-13	-1	+11	+23	+35	+45	+55	+63	+67	+63	+49	+31	+15
22½	-8	-26	-36	-39	-31	-21	-6	+9	+25	+40	+52	+65	+75	+80	+75	+57	+35	+14
25	-14	-36	-49	-52	-42	-30	-11	+8	+26	+45	+61	+76	+89	+95	+89	+67	+39	+14
27½	-21	-47	-62	-66	-55	-40	-17	+6	+28	+51	+70	+89	+104	+112	+104	+77	+43	+13
30	-28	-59	-78	-82	-68	-51	-23	+3	+30	+57	+80	+102	+120	+130	+120	+89	+49	+13





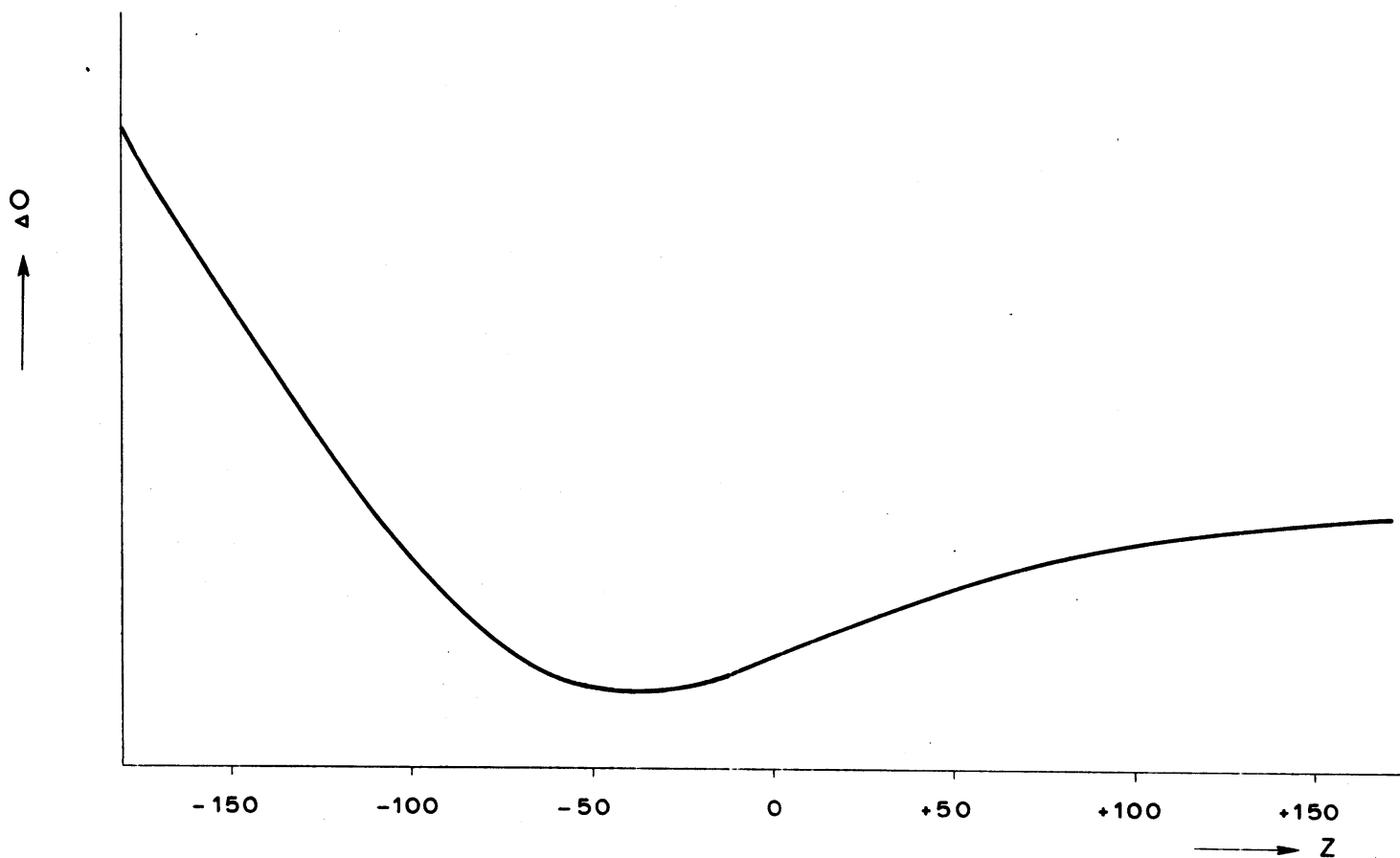
Figuur 1c

VERBAND TUSSEN ΔO EN DE WATERSTAND

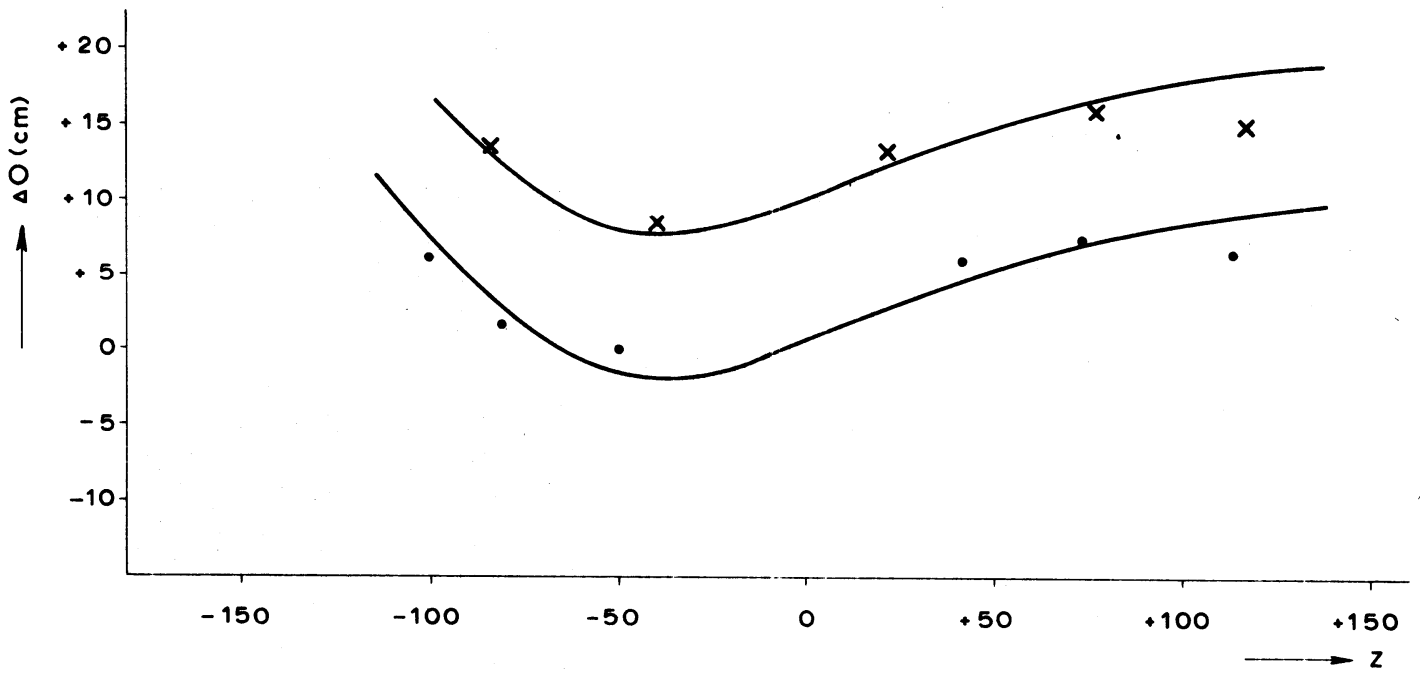


- x Wind met een West-component
- Wind met een Oost-component
- o Zwakke wind (0 t/m 3 m/s)

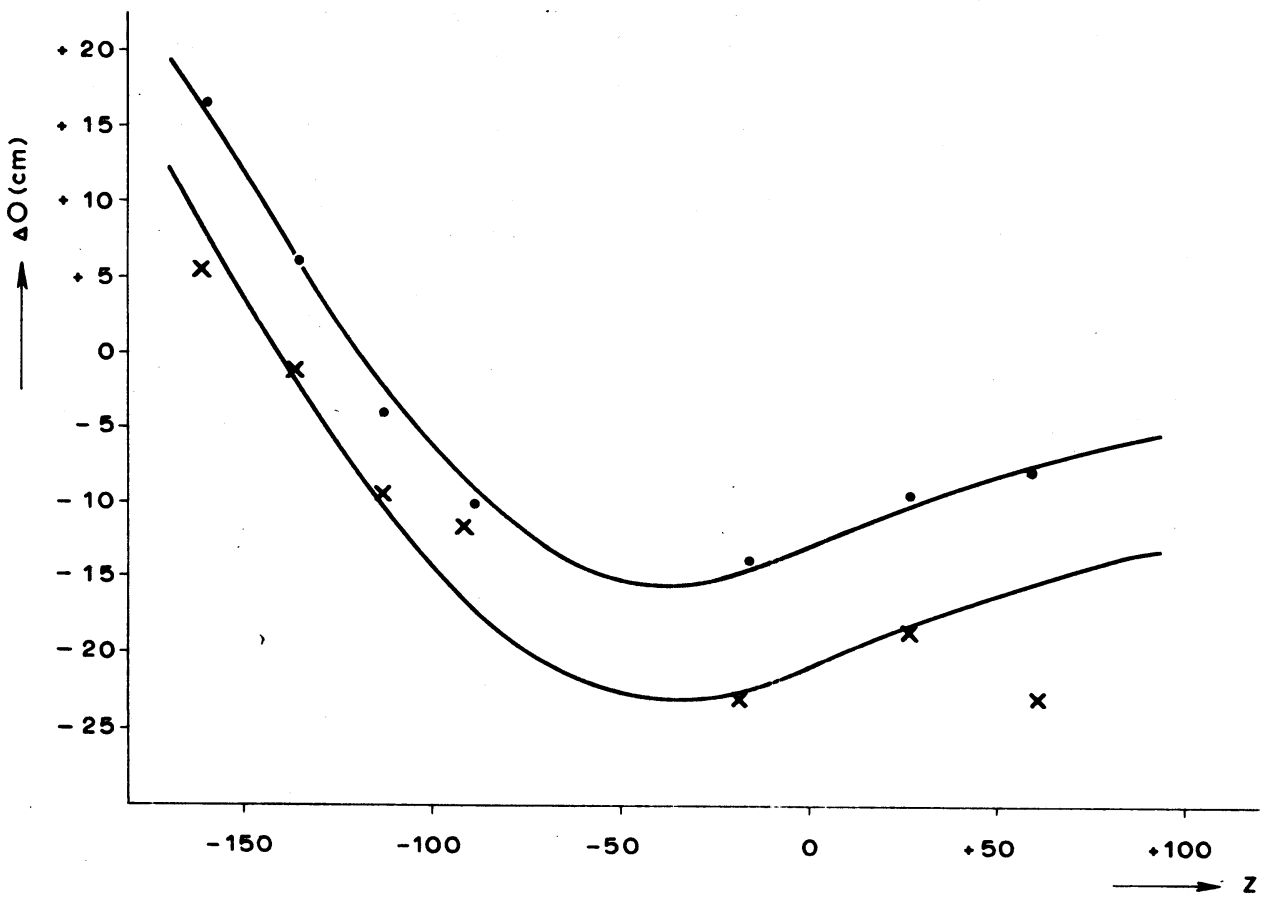
DE VORM VAN DE KROMME, DIE HET VERBAND WEERGEeft TUSSEN ΔO EN DE WATERSTAND



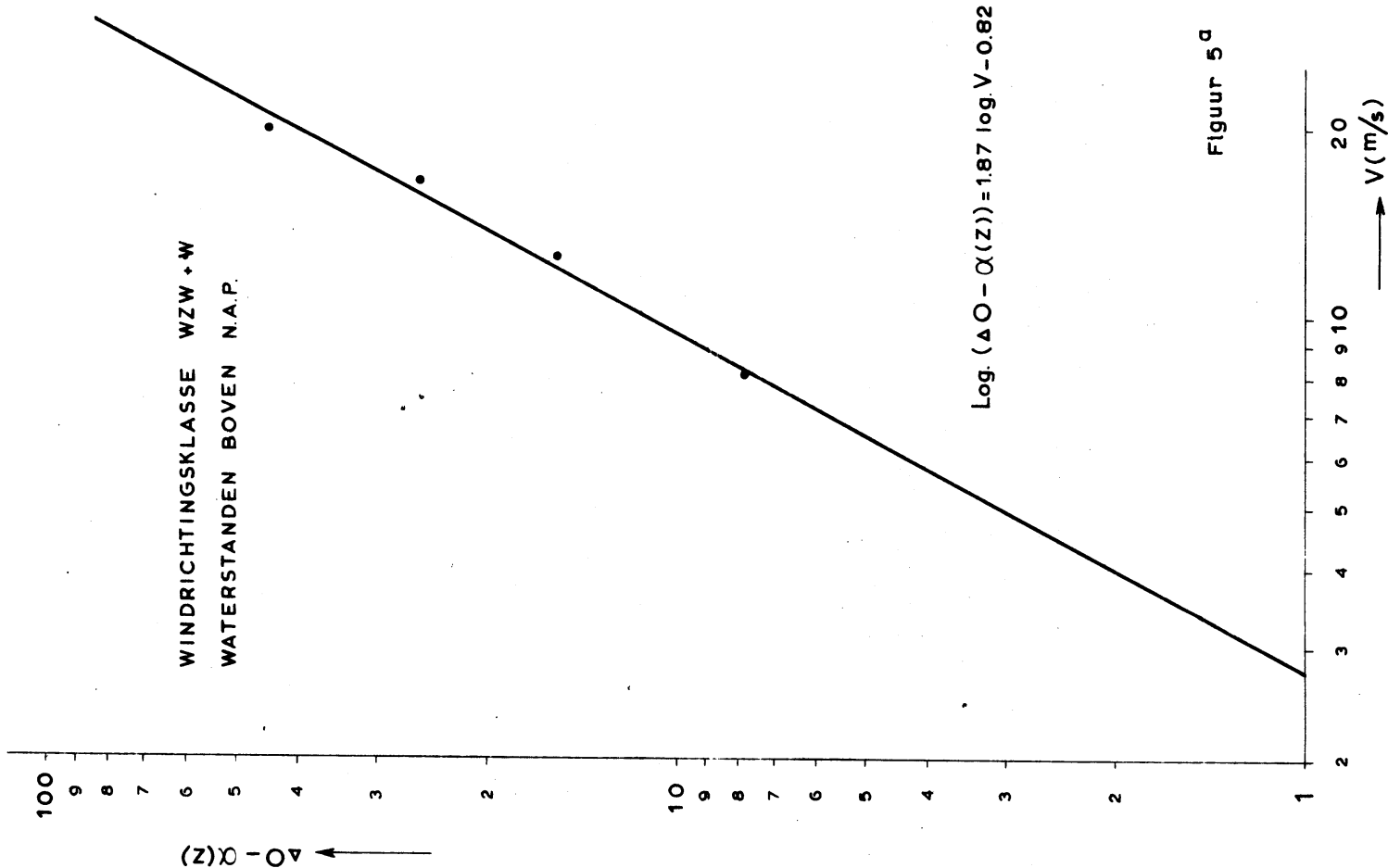
VERBAND TUSSEN ΔO EN DE WATERSTAND Z BIJ EEN WESTELIJKE EN EEN OOSTELIJKE WIND



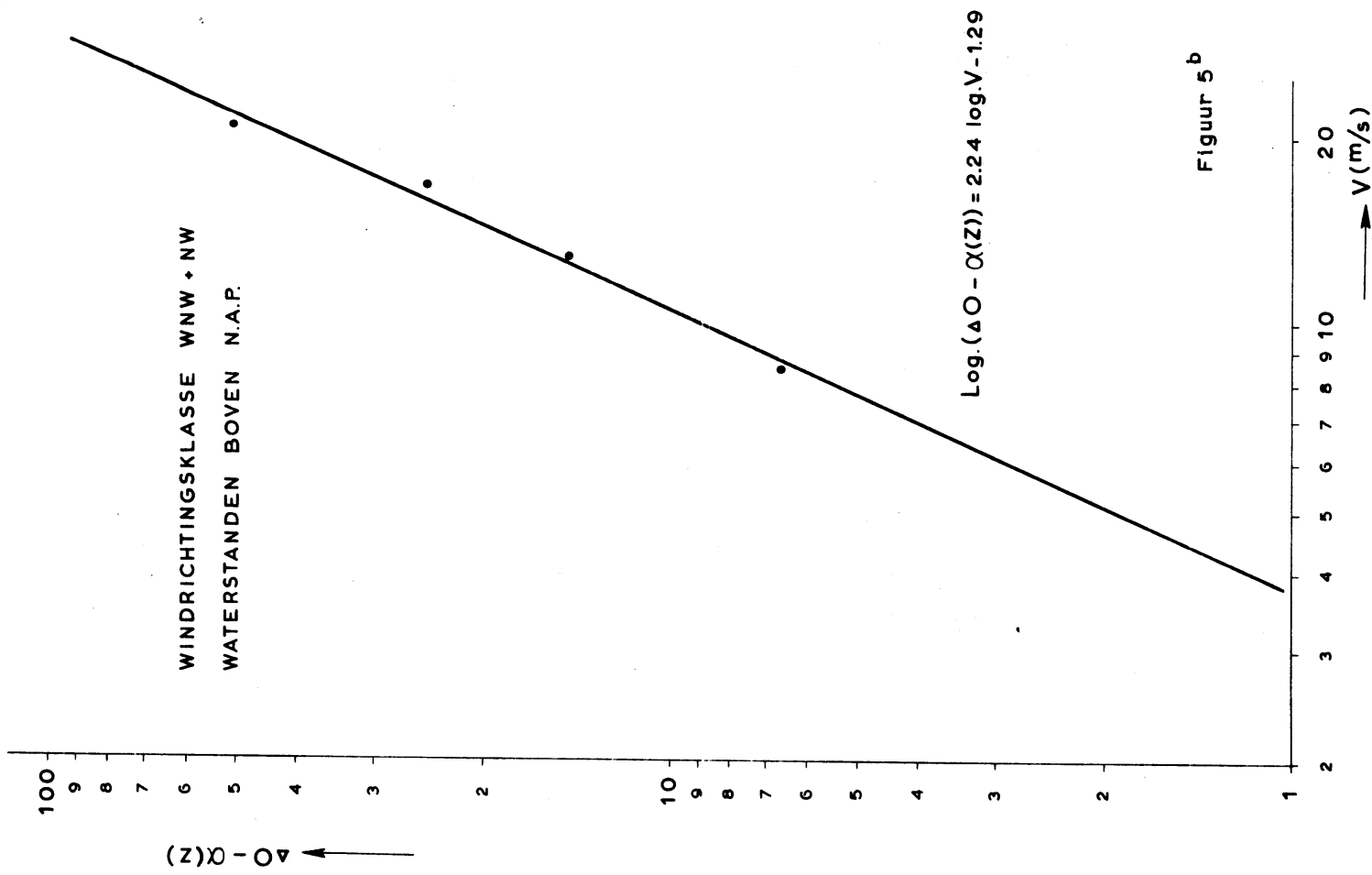
Windrichtingsklasse WZW + W
 • 6 t/m 10 m/s
 x 11 t/m 14 m/s



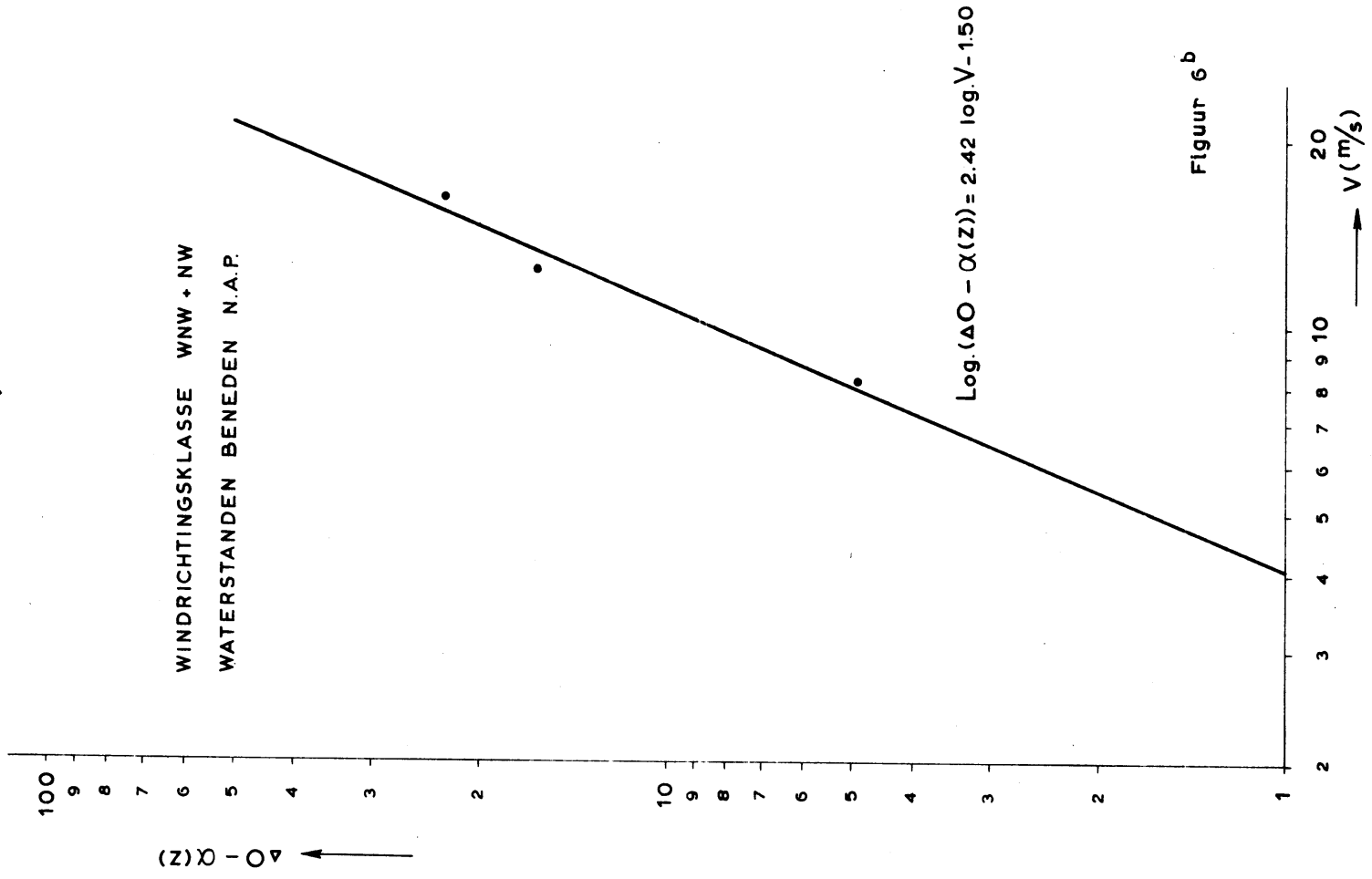
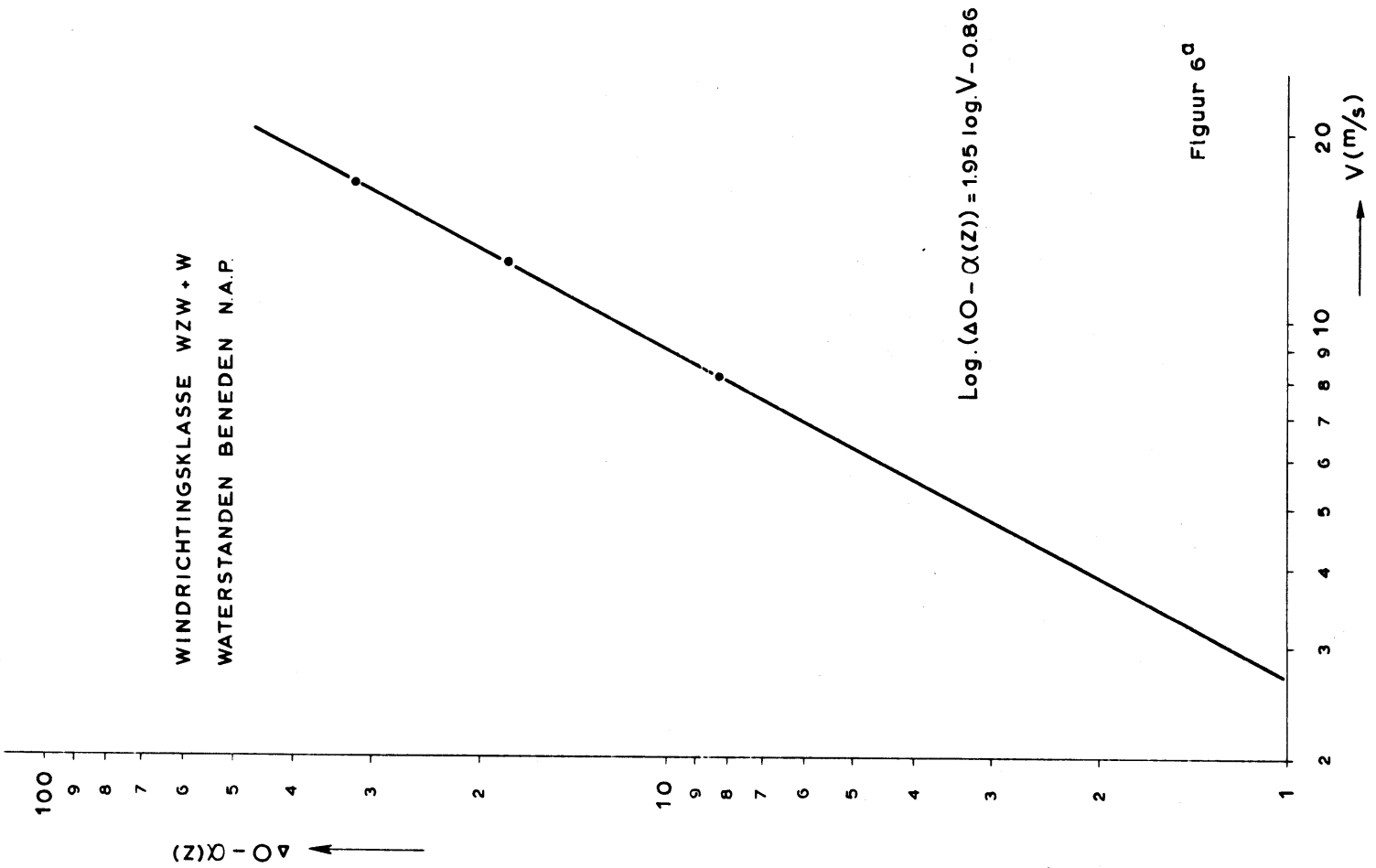
Windrichtingsklasse ONO + O
 • 6 t/m 10 m/s
 x 11 t/m 14 m/s



Figuur 5^a



Figuur 5^b



DE EVENREDIGHEIDSFACOR C(d) AFHANKELUK VAN DE WINDRICHTING

