

KONINKLIJK NEDERLANDS  
METEOROLOGISCH INSTITUUT

Wetenschappelijk Rapport W.R. 55-009 (IV-010)

G. Verploegh en P. Groen

De uitwerking van de wind over de Groningse Waddenzee  
op de hoogwaterstanden van Delfzijl

The effect of the wind over the eastern part of the Dutch Wadden Sea  
on the height of High Water at Delfzijl (Eems estuary).

De Bilt, 1955.

All Rights Reserved.

Nadruk zonder toestemming van het K.N.M.I. is verboden.

G. Verploegh en P. Groen

De uitwerking van de wind over de Groningse Waddenzee  
op de hoogwaterstanden van Delfzijl

The effect of the wind over the eastern part of the Dutch Wadden Sea on the height of High Water at Delfzijl (Eems estuary).

Inleiding

De verwachtingen van de op te treden waterhoogten langs de Nederlandse kust worden voor het gebied van de Waddenzee gegeven voor de twee referentiestationen Harlingen en Delfzijl. De verwachtingsmethodiek berust op de berekening van de waterhoogten op een paar plaatsen aan de buitenkant van de Waddenzee (het z.g. Noordzee-effect), op basis van het verwachte windveld op de Noordzee, en daarnaast een verwachting van de additionele opzet in de westelijke Waddenzee en in het mondingsgebied van de Eems, op basis van de "locale" windinvloed, om zodoende uit de som van deze twee effecten, het Noordzee-effect en het locale effect, tot een te verwachten waterhoogte in elk der beide referentiestationen te komen.

In het volgende wordt een verslag gegeven van het onderzoek naar het locale effect in het gebied tussen Borkum en Delfzijl.

1. In het oostelijke Waddengebied loopt de hoofdgeul van het Eemsestuarium in WNW-lijke richting tussen de eilanden Borkum en Rottumeroog door. Aan de oostzijde van deze geul worden regelmatig de waterhoogten aan een peilschaal, welke in de haven van Borkum is opgesteld, gemeten. Gewoonlijk wordt aangenomen dat de waterstanden langs de Waddeneilanden wat betreft het atmosferisch effect uitsluitend bepaald worden door de windverdeling op de Noordzee; de correcties, die op dit ietwat vereenvoudigde beeld moeten worden toegepast om tot de werkelijke toestand te komen, zijn bij de meest voorkomende gevallen van een orde van grootte, die binnen de nauwkeurigheidsgrenzen van de verwachtingsmethodiek van het "Noordzee-effect" liggen.

Anders evenwel staat het met het atmosferisch effect op de waterstanden in Delfzijl. Het Eemsestuarium heeft dusdanige afmetingen, dat bij een verwachting van een waterhoogte in Delfzijl wel degelijk rekening moet worden gehouden met de "locale" windinvloed op dit watergebied. In de praktijk is men vooral gebaat bij een verwachting van de extrema der waterstanden en wel in de eerste plaats van het komende hoogwater (HW). Derhalve is bij dit onderzoek alleen de aandacht op het laatste gericht geweest, waarbij in eerste instantie eventuele tijdsverschillen tussen het HW volgens de getijtafel en het werkelijk optredende HW buiten de beschouwing zijn gelaten.

Als maat voor het locale windeffect tussen Borkum en Delfzijl op de verticale waterbeweging is het verschil in opzet,  $\Delta O$  genoemd, tussen de overeenkomstige hoogwaters van beide genoemde plaatsen genomen. Onder de opzet wordt verstaan het verschil tussen de hoogte van het opgetreden HW en de overeenkomstige berekende HW-stand volgens de getijtafel. Bij deze definitie wordt dus afgezien van het eventueel opgetreden tijdsverschil tussen deze twee HW-standen.

Volgens de z.g. "Zuiderzee"-formule, opgesteld door de Staatscommissie-Lorentz en gebaseerd op een onderzoek van het windeffect op de voormalige Zuiderzee, bleek de opstuwing door de wind aldaar o.a. evenredig te zijn met  $V^2$  ( $V$  = windsnelheid) en omgekeerd evenredig met de diepte van het bekken.

Het lag voor de hand om voor het Eemsgebied voor elke windrichting eenzelfde relatie te bepalen tussen het bovengenoemde verschil in opzet  $\Delta O$  en  $V^2$ . De diepte van de hoofdgeul tussen Borkum en Delfzijl bedraagt gemiddeld 10-11 m; daar de veranderingen hierin door het optreden van hoge en lage hoogwaters en ten gevolge van de plaatselijke verhoging of verlaging van de waterstand onder invloed van de wind in de regel geen groot percentage uitmaken van de diepte (in zeer extreme gevallen kan de verhoging te Delfzijl echter 25 % worden), leek het met het oog op de te bereiken nauwkeurigheid, of m.a.w. gezien de grote spreiding in het waarnemingsmateriaal, gerechtvaardigd om in eerste instantie de diepte als een constante grootheid te laten fungeren, zodat volstaan werd met het bepalen van een relatie tussen  $\Delta O$  en  $V^2$ .

2. Als maat voor de locale wind over het Eemsestuarium konden de registraties van de Dines-anemograaf op Rottumeroog dienen. De anemometer stond midden op het eilandje boven op een schuur, ongeveer 500 m van de zee verwijderd. De windvaan bevond zich 12.5 m boven zeeniveau.

In januari 1950 is deze windmeter naar Schiermonnikoog overgebracht, alwaar hij op de vuurtoren op een hoogte van 40 m boven zeeniveau werd opgesteld. De vuurtoren staat op het duin langs de NW-lijke kust van het eiland.

Nu is het waarnemingsmateriaal voor 't grootste deel over de jaren 1947 tot en met 1951 genomen. De tussentijdse verplaatsing van de anemometer van Rottumeroog naar Schiermonnikoog gaf daarbij aan het materiaal een ongewenst heterogene samenstelling. In de puntenwolk op een  $\Delta O - V^2$ -diagram bleken echter bij vele windrichtingen de punten, die op de wind op Schiermonnikoog betrekking hadden, geheel temidden van de punten te liggen, die de wind op Rottumeroog representeerden en die het grote merendeel van de verzameling uitmaakten. Een systematisch verschil tussen de windmetingen op beide eilanden, zo dit mocht bestaan, bleek derhalve in orde van grootte binnen de spreiding van de afzonderlijke punten t.o.v. een gemiddelde betrekkinglijn te liggen.

Op grond van dit resultaat van indirecte vergelijking zijn in de gevallen dat voor een bepaalde windrichting het aantal waarnemingen, betrekking hebbend op Rottumeroog, te gering was de registraties van Schiermonnikoog mede gebruikt.

3. De waarnemingsreeks, die zoals gezegd over de jaren 1947 tot en met 1951 is genomen en met enkele vroegere en latere stormperiodes is uitgebreid, heeft alleen betrekking op die situaties, waarbij de windsnelheid gedurende enige tijd minstens 10 m/sec was. Voor de uitvoering van deze selectie zijn de registraties van Vlieland gebruikt en wel omdat het onderzoek van de westelijke Waddenzee reeds eerder was aangepakt. Periodes waarin de windsnelheid gedurende slechts enkele

uren een hoge waarde bereikte werden buiten beschouwing gelaten; zoveel mogelijk werd ernaar gestreefd die situaties uit te zoeken, waarbij de wind enkele uren vóór en ook tijdens het tijdstip van H.W. te Harlingen, zowel in richting als in sterkte constant was of anders een gering en gelijkmatig gemiddeld verloop had. Daar het H.W. in Delfzijl slechts twee uur na dat in Harlingen optreedt is gemakshalve, behoudens enkele uitzonderingen, aangenomen dat deze keuze ook voor Delfzijl kan gelden.

Voor elk H.W., waarbij de omstandigheden aan de gestelde eisen voldeden, werd genoteerd:

Tijdstip en waterstand	van het opgetreden H.W. te Borkum,
" " "	" " " " " Delfzijl,
" " "	" " H.W. te Borkum volgens de getijtafel
" " "	" " " van het D.H.I. (Hamburg)
" " "	" " H.W. te Delfzijl volgens de getijtafel
" " "	" " " van de Rijkswaterstaat

en de gemiddelde windsnelheid en -richting op Rottumercog (c.o.g. Schiermonnikoog) over een periode van twee uren vóór het optreden van H.W. te Delfzijl.

Uit deze gegevens werd vervolgens de opzet in Borkum en die in Delfzijl berekend, alsmede voor beide plaatsen het tijdsverschil tussen het in de getijtafel voorspelde en het werkelijk opgetreden H.W.

Het locale windeffect op de water-beweging is uiteindelijk vastgelegd met de twee volgende grootheden:

- (a) "de additionele opzet"  $\Delta O$  = het verschil in opzet tussen Delfzijl en Borkum;  $\Delta O$  wordt positief gerekend als de opzet in Delfzijl de grootste van de twee is;
- (b) de verandering van het tijdsverschil tussen de hoogwaters t.o.v. het volgens de getijtafel op te treden tijdsverschil tussen de beide stations;  $\Delta t$  is positief indien sprake is van een vertraging.

Van deze twee grootheden is dus hier alleen de additionele opzet verder onderzocht.

4. Voor de windrichtingen N, NNW en NW, die verwacht konden worden een positieve additionele opzet in Delfzijl te geven, werden de bij elkaar behorende waarden van  $\Delta O$  en V in een tabel naast elkander gezet. Het merkwaardige verschijnsel deed zich toen voor, dat bij dezelfde windsnelheden uit een bepaalde richting zowel vrij grote positieve als vrij grote negatieve waarden van  $\Delta O$  optraden. Dit kan natuurlijk niet kloppen en ergens moest wel een fout in de gegevens schuilen. Na een overleg met de Alg. Dienst van de Rijkswaterstaat werd gevonden dat deze fout moest schuilen in de Duitse getijtafel van Borkum. Er bestaat n.l. een nagenoeg rechtlijnig verband tussen de overeenkomstige waargenomen H.W.-standen van beide plaatsen, als er weinig wind is over het Eemsgebied. De spreiding van de punten ten opzichte van de "betrekkingslijn", die opgesteld was voor de werkelijk opgetreden hoogwaters, bleek voor enige zomermaanden, wanneer over het algemeen slechts zwakke winden heersen, zeer klein te zijn; de grootste afwijkingen zijn van de orde van 5 à 10 cm. In het diagram, waarin de overeenkomstige in de getijtafels voorspelde standen tegen elkaar werden uitgezet, bleek de spreiding ten opzichte van de gemiddelde betrekkingslijn veel groter te zijn, ja, soms lag een aantal punten wel 20 en zelfs 30 cm buiten de lijn. Daar de Rijkswaterstaat de getijtafels voor Delfzijl op diverse gronden voldoende betrouwbaar achtte, moet de conclusie wel zijn, dat in die van Borkum fouten zijn geslopen; welke deze fouten zijn, is hier niet van belang. Een andere belangrijke uitkomst is geweest, dat het mogelijk bleek om met behulp van een dergelijke betrekkingslijn uit de getijtafel van Delfzijl die van Borkum te berekenen, wat de standen (niet de tijden) van H.W. betreft.

Het ging er dus nu om, zo nauwkeurig mogelijk een betrekkinglijn tussen de opgetreden H.W.'s te bepalen, waarbij zo goed mogelijk de locale windinvloed moest worden uitgeschakeld.

Voor elf zomermaanden in de jaren 1947 tot en met 1950 werden in een diagram de overeenkomstige hoogwaterstanden uitgezet. Voor elke maand werd zo goed mogelijk door het 60-tal punten een rechte lijn getrokken en uit deze elf rechten een gemiddelde betrekkinglijn bepaald. Bij deze methode is de windgesteldheid niet in beschouwing genomen; het zou kunnen zijn, dat de aldus berekende gemiddelde lijn niet algemeen geldt, b.v. omdat gedurende de zomer de wind in overwegende mate uit een bepaalde hoek waait.

Om dit te testen zijn voor het jaar 1950 de windregistraties nog eens bekeken en de dagen uitgezocht, waarop de windsnelheid gedurende minstens een etmaal niet boven de 5 m/sec uitkwam. De desbetreffende hoogwaters, waarbij die van de zomermaanden nu werden uitgesloten, leverden een 80-tal punten in het diagram op, tussen welke een betrekkinglijn gevonden werd, die geheel samen bleek te vallen met de reeds eerder bepaalde gemiddelde lijn; d.w.z. het mogelijke verschil tussen de beide rechten was statistisch bezien niet van enige betekenis.

De gevonden betrekking luidt:

$$B = 0.93 D - 13.3 \text{ cm}$$

waarin: B = hoogwaterstand in Borkum, betrokken op Normal-Null (= N.A.P.)  
en D = hoogwaterstand in Delfzijl, betrokken op N.A.P.

Na een herberekening van  $\Delta \emptyset$  m.b.v. de herziene gegevens van Borkum bleken de waarden nu een bevredigend resultaat op te leveren; negatieve  $\Delta \emptyset$ -waarden traden bij de genoemde windrichtingen niet meer op.

5. Het materiaal werd tenslotte naar de windrichting gesorteerd en per richting werden in een grafiek de waarden van  $\Delta \emptyset$  tegen  $V^2$  uitgezet. Zowel bij dit materiaal als bij het onderzoek naar de additionele opzet in Harlingen werden echter aanwijzingen gevonden, dat althans voor de Waddenzee de quadratische windwet niet de beste weergave van het verband tussen wind en water is.

Beter leek een hogere macht van V te voldoen. Wegens de aanwezigheid van zovele onberekenbare factoren, die op  $\Delta \emptyset$  invloed hebben, zoals de niet-stationnaire effecten en de verwaarlozing van de variaties in de diepte, welke laatste grootheid op de keper beschouwd zelf weer een functie van  $\Delta \emptyset$  is, kon op grond van dit materiaal alleen niet zonder meer besloten worden de quadratische windwet te verlaten en een andere ervoor in de plaats te stellen.

Er zijn inmiddels, op grond van Amerikaanse onderzoeken betreffende de waarde van de schuifspanning als functie van de windsnelheid, aanwijzingen dat een samenstelling van een quadratische en een derde-machts-windwet meer waarschijnlijk moet worden geacht. In een materiaal, waarin de windsnelheden van laag naar hoog variëren, zou dan gemiddeld een betrekking moeten gelden, waarin de exponent van V tussen 2 en 3 ligt.

Derhalve werd voor vier windrichtingen met de grootste aantallen waarnemingen  $\Delta \emptyset$  op dubbel logaritmisch papier tegen V uitgezet en op dit diagram de regressierechte van  $\log \Delta \emptyset$  op  $\log V$  getrokken. Immers, daar  $\Delta \emptyset$  de afhankelijke variabele van de twee is, geeft deze rechte het gezochte verband. De gevonden exponenten van V lagen bij deze

richtingen tussen 2.3 en 2.5. Aangenomen werd een exponent van 2.4, een waarde, die ook reeds eerder in de literatuur vermeld staat <sup>\*</sup>). We nemen dus aan:

$$\Delta O = C \cdot v^{2.4} .$$

Derhalve werd nu in een grafiek voor elke windrichting  $\Delta O$  tegen  $v^{2.4}$  uitgezet. Op elke grafiek werden voor enige klassen van  $\Delta O$  de zwaartepunten berekend en het bleek dan dat door het puntenmateriaal een rechte door de oorsprong getrokken kon worden, die binnen de statistische spreiding aansloot aan de zwaartepunten. De aldus afgeleide waarden van C zijn in bijgaande figuur grafisch tegen de windrichting uitgezet. Voor de richtingen NO, OZO, ZO en ZZO was het aantal waarnemingen met een behoorlijk opzet-verschil te gering om C met voldoende nauwkeurigheid te bepalen; voor deze richtingen zijn de waarden van C door kringetjes aangeduid, voor de andere als stippen. De gevonden waarden zijn als volgt:

Windrichting:	N	NNO	NO	ONO	O	OZO	ZO	ZZO	
C x 10 <sup>3</sup> :	+28	+24	(+15)	+16	-13	(-40)	(-22)	(-27)	cm(m/sec) <sup>-2.4</sup>
Windrichting:	Z	ZZW	ZW	WZW	W	WNW	NW	NNW	
C x 10 <sup>3</sup> :	-21	-22	-15	- 2	+ 9	+13	+18	+30	cm(m/sec) <sup>-2.4</sup>

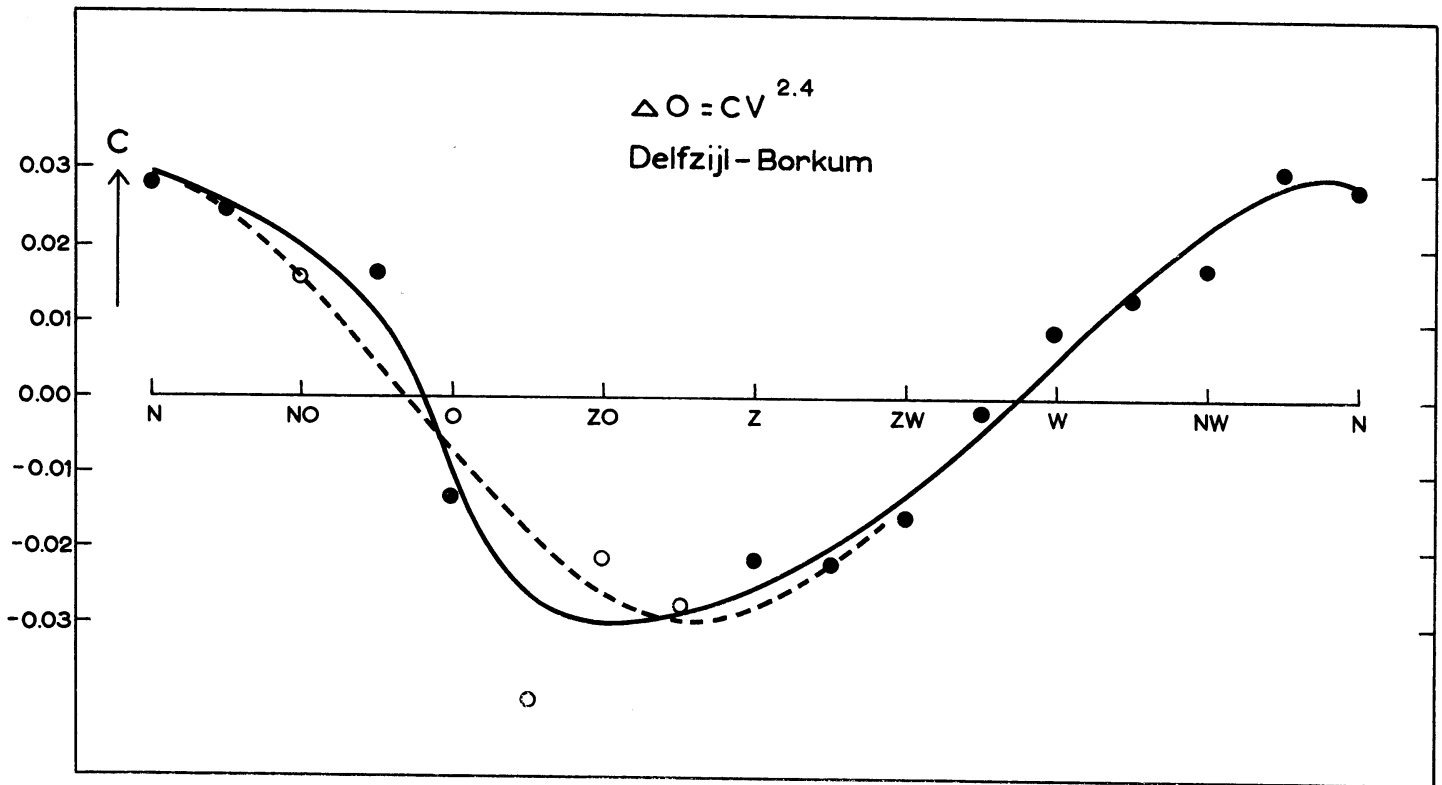
Om een indruk te geven van de spreiding van de punten rond de getrokken rechten, is voor de twee richtingen NNW en zuid, waarbij een variatie van windrichting geen grote verandering in de coëfficiënt C (dus in de additionele opzet) teweegbrengt, de standaardafwijking  $\sigma$  berekend van alle in het waarnemingsmateriaal opgetreden  $\Delta O$ -waarden ten opzichte van de voor de bijbehorende windsnelheden berekende waarden. Deze waren:

$$\begin{aligned} \text{NNW: } \sigma &= 3.9 \text{ cm} \\ \text{Z: } \sigma &= 3.8 \text{ cm} \end{aligned}$$

In de grafische voorstelling van C (zie figuur) is het mogelijk langs de verkregen punten een enigszins gladgestreken kromme te trekken, die het waarschijnlijke verloop van C met de richting weergeeft. Uitbijters zijn vooral de empirische punten voor de richtingen OZO en ZO, die echter, zoals wij zagen, ook op slechts weinig waarnemingen berusten.

---

<sup>\*</sup>) Zie W.F. Schalkwijk, K.N.M.I. Med. en Verhand. B nr. 7, 1947, blz. 9.



Uit de getrokken kromme zijn voor de verschillende windrichtingen de bijbehorende waarden van C afgelezen en de aldus gevonden waarden van C zijn gebruikt om een tabel samen te stellen van de bij gegeven windrichtingen en snelheden te verwachten waarden van  $\Delta O$ ; zie Appendix.

De gegevens van deze tabel zijn tevens in een diagram verwerkt, dat door de Afd. Weerdienst wordt gebruikt.

## 6. Discussie

Opvallend is ook bij de gladgestreken kromme een zekere asymmetrie. De nulrichtingen liggen wel tegengesteld (WtZ en OtN) en de maximum-richting maakt wel een hoek van ongeveer  $90^\circ$  hiermede, doch tussen ZZO en N is een duidelijke anomalie te zien t.o.v. een min of meer sinusoidaal verloop, zoals door de stippellijn is aangeduid. De oorzaak van deze afwijking moet wel gezocht worden in het vrij uitgestrekte ondiepe waddengebied ten oosten van de hoofdgeul. Bij een wind uit noordoostelijke richtingen geeft dit gebied door zijn geringere diepte een vergroting van de additionele opwaaiing bij Delfzijl, terwijl het bij winden uit oostzuidwestelijke richtingen een vergroting van het negatieve verschil tussen Delfzijl en Borkum geeft. Weliswaar zou men bij zuidwestelijke en westnoordwestelijke winden het omgekeerde kunnen verwachten, doch bij eerstgenoemde windrichting is de wind hier aflandig, dus minder ontwikkeld dan de anemometer op de eilanden aangeeft, en in het tweede geval is het algemene waterpeil in deze hoek van de Noordzee verhoogd, het bedoelde Waddengebied dus minder ondiep, het effect dus geringer. Op soortgelijke wijze als in het laatste geval is het wellicht ook te verklaren dat de maximale verlaging en de maximale verhoging ongeveer even groot zijn, ondanks het feit dat bij verlaging de wind aflandig is, dus over een deel van het betrokken watergebied minder sterk ont-



wikkeld zal zijn dan met de anemometeraanwijzing overeenkomt, terwijl bovendien de ruwheid van het zeeoppervlak geringer zal zijn; deze invloeden kunnen gecompenseerd worden door de geringere gemiddelde waterdiepte bij afluende wind, die een vergrotende uitwerking op het locale windeffect heeft.

Stellen wij het verloop van de C-kromme, afgezien van de genoemde anomalie, door een sinusofide voor en stellen we het effect bovendien op de gebruikelijke wijze evenredig met de strijklengte L en omgekeerd evenredig met een harmonisch gemiddelde (effectieve) diepte D tussen de beide betrokken punten, dan kunnen we dus schrijven:

$$C(d) = \frac{bL}{D} \cos(d - d_0)$$

waarin d de windrichting en  $d_0$  de richting van het maximale effect, t.o.v. de noordrichting, aanduiden. Door een harmonische analyse vinden we:

$$C(d) = 0,029 \cos(d - 346^\circ) \text{ cm (m/sec)}^{-2.4}$$

De richting  $d_0 = 346^\circ$  komt ongeveer overeen met de gemiddelde richting van de hoofdgeul van de Eems, die vanaf Delfzijl tussen Borkum en Rottumeroog door loopt. Stellen we volgens de kaart  $L = 35 \text{ km}$  en  $D = 12\frac{1}{2} \text{ m}$ , dan vinden we, uit het empirische verloop van C, voor b een waarde:

$$b = 1.0 \times 10^{-5} \text{ cm (m/sec)}^{-2.4}$$

Dit betekent onder meer dat, als de schuifspanning van de wind door  $a V^{2.4}$  voorgesteld wordt, de coëfficiënt a de waarde  $a = b \rho g = 0,010 \text{ gcm}^{-1} \text{ sec}^{-2} (\text{m/sec})^{-2.4}$  zou hebben.

De eerdergenoemde "Zuiderzeeformule" berustte op een schuifspanning  $\alpha V^2$ . Nemen we voor  $\alpha$ , als een gemiddelde der in de literatuur opgegeven waarden,  $\alpha = 0,030 \text{ gcm}^{-1} \text{ sec}^{-2} (\text{m/sec})^{-2}$ , dan wordt de uitkomst van beide formules dezelfde voor  $V = 16 \text{ m/sec}$ .

De snijding van de twee schuifspanningscurven bij deze vrij grote windsnelheid duidt op een goede overeenstemming van de hier gevonden empirische waarden met vroegere resultaten, daar de bepaling van  $\alpha$  in het algemeen betrekking heeft gehad op situaties met niet te kleine windsnelheden, evenals onze bepaling van a.

#### Appendix

Additionele opzet (cm) tussen Borkum en Delfzijl bij winden gemeten op Rottumeroog (c.q. Schiermonnikoog), zie de tabel.

Opzet-verschil Delfzijl-Borkum (in cm)

bij winden gemeten op Rottumeroog (c.q. Schiermonnikoog)

1000 C = +28.5	25	19.5	10.5	-10.5	-26.5	-30	-28.5	-25	-19.5	-13	-4	+ 5	14.5	22.5	28.5
Wind (m/sec)	N	NNO	NO	ONO	O	OZO	ZO	ZZO	Z	ZZW	ZW	W	WNW	NW	NNW
7.5	+ 4	3	2	1	- 1	- 3	- 4	- 4	- 3	- 2	- 1	+ 1	2	3	4
10	+ 7	6	5	3	- 3	- 7	- 8	- 7	- 6	- 3	- 1	+ 1	4	6	7
12.5	+ 12	11	8	5	- 5	- 11	- 13	- 12	- 11	- 6	- 2	+ 2	6	10	12
15	+ 19	17	13	7	- 7	- 18	- 20	- 19	- 17	- 9	- 3	+ 3	10	15	19
17.5	+ 27	24	19	10	- 10	- 26	- 29	- 27	- 24	- 13	- 4	+ 5	14	22	27
20	+ 38	33	26	14	- 14	- 35	- 40	- 38	- 33	- 17	- 5	+ 7	19	30	38
22.5	+ 50	44	34	18	- 18	- 47	- 53	- 50	- 44	- 23	- 7	+ 9	26	40	50
25	+ 65	57	44	24	- 24	- 60	- 68	- 65	- 57	- 29	- 9	+ 11	33	51	65
27.5	+ 81	71	55	30	- 30	- 75	- 85	- 81	- 71	- 37	- 11	+ 14	41	64	81
30	+100	88	68	37	- 37	- 93	-105	-100	- 88	- 46	- 14	+ 18	51	79	100

The effect of the wind over the eastern part of the Dutch Wadden Sea  
on the height of High Water at Delfzijl (Eems estuary)

Summary.

The wind effect on the height of High Water (H.W.) at a place on the continental coast of the Dutch Wadden Sea may be thought of as being composed of a "North Sea effect" and an additional "Wadden Sea effect". For Delfzijl, on the Eems estuary, the Wadden Sea effects during periods of sufficiently high winds of the years 1947 through 1951 have been determined by subtracting the wind effect on the height of H.W. as observed at Borkum from the wind effect on the height of H.W. as observed at Delfzijl. The differences  $\Delta O$ , thus found, have been correlated with the direction  $d$  and the velocity  $V$  of the wind of the preceding two hours, as measured at Rottum or Schiermonnikoog. The dependence of  $\Delta O$  on the wind may be fairly well described by the formula:  $\Delta O = C (d) V^{2.4}$ . Probable values of  $C$  for various wind directions have been determined and the form of the function  $C (d)$  has been discussed briefly.