

KONINKLIJK NEDERLANDS
METEOROLOGISCH INSTITUUT

Wetenschappelijk Rapport W.R. 54-003 (IV-009)

G. Verploegh

Nieuwe equivalenten voor de Beaufort-
schaal geldend voor waarnemingen op zee.

De Bilt, 1954.

G. Verploegh

Nieuwe equivalenten voor de Beaufortschaal
geldend voor waarnemingen op zee.

"Long before Beaufort gave his attention to specifying the strength of the wind, sailors had evolved a rough scale with descriptive terms which were used by them in their everyday conversation. Sailors describe the strength of the wind by such words as calm, air, breeze, gale, storm and hurricane; and use such adjectives as light, gentle, moderate, fresh and strong to qualify them. A sailor could not define these terms; but he has no difficulty in recognizing the difference between an air and a breeze, a gale and a storm and a hurricane. The sailor's estimate of the strength of the wind as used in his ordinary conversation is based on its effect on his surroundings: on the waves formed on the surface of the sea, on the amount of broken water, on the sound produced as it blows through the rigging and on the way his ship can stand up to it. These terms are understood by all experienced sailors and are quite independent of any scientific definitions. The success of Beaufort's Scale is largely due to the fact that, as the result of long experience and careful observation, he was able to attach the name which a sailor would use to each of his thirteen scale numbers.The rig of ships has changed, sail has been replaced by steam, but the effect of the wind on the sea has remained, and will always remain, exactly the same. The sailor's description of the strength of the wind being based on effects independent of the rig of his ship has survived all the changes in marine transport and an air, a breeze, a gale and a hurricane mean just the same to a sailor now as they did in Beaufort's time."

G.C. Simpson (5)

Deel I. Een vergelijking van de Beaufortschaal met gemeten windsnelheden aan de hand van aan boord van enige Nederlandse lichtschepen geschatte windkrachten.

In het najaar van het jaar 1950 werden aan boord van enige Nederlandse lichtschepen contact-anemometers geplaatst in verband met een onderzoek, waarbij windsnelheden op zee en over de kust met elkaar vergeleken zouden moeten worden.

Voor een dergelijk onderzoek is het n.l. van belang te weten of windschattingen op zee na omzetting met de huidige Beaufort-aequivalentieschaal wel representatieve waarden geven voor de windsnelheid op zee.

Het hiernavolgende onderzoek is gebaseerd op de waarnemingsreeksen van de lichtschepen Terschellingerbank en Texel, respectievelijk over de perioden:

L.s. Terschellingerbank:	11 Sept. '50 - 5 April '51
(53°30'N 05°08'O)	2 Mei '51 - 21 Juni '51
	11 Juli '51 - 1 Sept. '51
L.s. Texel:	16 Nov. '50 - 10 Juli '51
(53°07'N 04°30'O)	1 Aug. '51 - 1 Sept. '51

Gedurende deze perioden werd de windkracht tijdens de drie-uurlijkse waarneming op de gebruikelijke wijze volgens kentekenen op het zeeoppervlak geschat in graden Beaufort en daarna volgens de in 1946 te Parijs internationaal aangenomen aequivalenten omgezet in zeemijlen per uur (knopen). Tevens werd het aantal contacten afgelezen, dat in een tijdvak van 10 minuten gesloten werd door de anemometer. Beide waarnemingen werden in het journaal ingevuld. Aan de waarnemer was de ijking van de anemometer niet bekend, opdat een zo groot mogelijke objectiviteit in de schattingen gewaarborgd bleef. Het bleek echter, dat men op de duur door de aanwezigheid van de anemometer onzeker werd in de schattingen en deze met behulp van vuistregel-tjes trachtte te richten naar de metingen. Vandaar dat dit onderzoek gebaseerd is op een reeks waarnemingen van ten hoogste één jaar. Het aantal waarnemingen, dat zodoende verkregen werd, n.l. van lichtschip Terschellingerbank: 2321 en van lichtschip Texel: 1996, is al voldoende groot om enige gerechtvaardigde conclusies te kunnen trekken.

Allereerst werd bepaald het gemiddelde verschil tussen gemeten en geschatte waarden per eenheid van 1 zeemijl/uur. In tabel 1 zijn deze samengevat. Hierbij werden naar W.Köppen(1) de gemeten snelheden als vaste waarden aangenomen, ten opzichte waarvan de afwijkingen der schattingen berekend werden. Zodoende is, zoals ook G.C.Simpson(4) aangaf, het gevonden verschil onafhankelijk van de frequentie, waarmee de windsnelheden voorkwamen. In tabel 1 valt direct de grote overeenstemming op tussen de waarden van beide lichtschepen. In beide verschilreeksen is de tendens zodanig, dat bij windsnelheden van ongeveer 2 tot 25 knopen de schattingen lager zijn dan de gemeten waarden. Buiten dit snelheidsinterval zijn de geschatte waarden hoger.

Om de reden van dit verschijnsel op te speuren, gaan we eerst de meetomstandigheden na.

Tabel 1

Gemiddeld verschil tussen metingen (M) en schattingen (S)
gerangschikt naar de gemeten waarden.

Lichtschip		Terschellingerbank		Texel	
Snelheidstrap		M - S in zeem/uur	Aantal	M - S in zeem/uur	Aantal
Bft.	zeem/uur				
1	0 - 1	+ 0.1	8	+ 0.7	17
	1 - 2	- 0.5	28	+ 0.2	31
	2 - 3	- 0.3	30	+ 0.1	35
2	3 - 4	- 0.8	32	- 0.5	54
	4 - 5	- 1.1	59	- 0.8	57
3	5 - 6	- 1.0	63	- 0.7	69
	6 - 7	- 1.5	82	- 1.3	79
	7 - 8	- 1.7	94	- 1.5	114
4	8 - 9	- 1.7	112	- 1.5	97
	9 - 10	- 2.2	119	- 1.9	106
	10 - 11	- 2.5	117	- 2.0	118
	11 - 12	- 2.7	119	- 2.0	114
	12 - 13	- 2.6	129	- 2.3	121
5	13 - 14	- 2.4	149	- 2.9	104
	14 - 15	- 2.6	147	- 2.2	101
	15 - 16	- 2.7	131	- 2.3	82
	16 - 17	- 2.2	117	- 2.3	85
6	17 - 18	- 1.9	112	- 2.0	83
	18 - 19	- 2.0	122	- 2.1	88
	19 - 20	- 1.7	105	- 2.1	65
7	20 - 21	- 1.1	93	- 1.4	69
	21 - 22	- 0.1	80	- 1.2	60
	22 - 23	- 0.4	81	- 0.4	51
	23 - 24	+ 0.1	59	- 0.2	43
	24 - 25	+ 1.0	50	- 0.6	40
7	25 - 26	+ 2.0	34	+ 0.3	46
	26 - 27	+ 3.7	19	+ 0.5	27
	27 - 28	+ 2.0	10	+ 1.9	14
	28 - 29	+ 3.3	4	+ 3.8	9
	29 - 30	+ 2.2	12	+ 3.5	4
	30 - 31	+ 2.0	2	+ 2.1	9
	31 - 32	+ 4.0	2	+ 3.3	4
Totaal aantal			2321		1996

De contactanemometer

Op beide lichtschepen was de anemometer geplaatst $1\frac{1}{2}$ meter boven de stuurhut, ongeveer 7 meter boven het zeeniveau. In de contactdoos bleek de bescherming tegen vocht met hoog zoutgehalte niet geheel voldoende. Hierdoor zou op de duur corrosie kunnen optreden, hetgeen een vertraging zou bewerkstelligen in de bewegende delen. De eventuele vertraging is echter over de periode, waarop de reeks waarnemingen betrekking heeft, na testing gebleken verwaarloosbaar klein te zijn.

De aflezing geschiedde in de stuurhut met behulp van een eenvoudige telefoonteller, welke tesamen met de vier voedingsbatterijen van 1,5 Volt elk gebouwd was in een metalen doos. Ook deze bleek geen voldoende bescherming te geven tegen vocht, zodat de batterijen sneller ontladen werden dan normaal. Een gevolg van een te lage spanning is, dat de teller steeds meer contacten gaat missen en zodoende een getal, overeenkomende met een te lage windsnelheid gaat aangeven. Vandaar dat de batterijen op het lichtschip Texel na 7 maanden en op het lichtschip Terschellingerbank na 8 maanden vervangen zijn door nieuwe. De fout in de windmeting op de dagen, dat de spanning te laag was geworden, is zodoende beperkt tot hoogstens één zeemijl/uur in de laatste metingen.

De opstelling van de anemometer was in zoverre niet geheel vrij, dat bij achterlijke winden de meter in de schaduw stond van de grote lichtopstand midscheeps. Nu komen achterlijke winden op een lichtschip alleen maar voor bij zeer geringe windsnelheden. Het verankerde lichtschip zwaait n.l. viermaal per dag door het getij om. Het neemt steeds een positie in die bepaald wordt door de invloed van stroom en wind tesamen. Aan boord van de lichtschepen werden ook stroommetingen verricht, waarbij tevens de koers van het schip en de windrichting werden opgegeven. Met deze waarnemingen is voor het lichtschip Terschellingerbank over de maanden Juli, Augustus en September 1951 onderstaande frequentietabel berekend van het aantal gevallen, waarbij de wind van een bepaalde kracht onder een zekere hoek vanaf de voorsteven inviel.

Tabel 2

Bft.	Invalshoek van de wind (b.b. en s.b.). Gerekend vanaf de boeg						Alle richtingen	
	0°-30°	30°-60°	60°-90°	90°-120°	120°-150°	150°-180°	%	Aantal
1	17	28	9	16	15	15	100	54
2	28	33	20	9	7	3	100	98
3	39	30	13	12	3	3	100	168
4	38	34	17	9	1	1	100	151
5	49	34	11	5	1		100	85
6-7	67	20	10	3			100	70

Frequentie in procenten van het aantal gevallen, waarin de wind op het lichtschip Terschellingerbank over bakboord en stuurboord onder verschillende invalshoeken waaide. De windkrachten 6 en 7 Bft. zijn samen genomen.

Uit deze tabel 2 blijkt duidelijk de invloed van de wind op de ligging van het schip. Naarmate de winden krachtiger zijn, komen ze meer van voren in.

Behalve bij zwakke winden is daarom de invloed van de lichtopstand op de gemiddelde windsnelheid gering. Toch staat de anemometer onmiskenbaar in de door het schip gestoorde luchtstroming. Winden van 1 en 2 Bft. zullen afhankelijk van de invalshoek soms versneld en soms vertraagd de anemometer bereiken. De vertraging, die winden van grotere kracht algemeen zullen ondervinden, zal bij voorlijke wind iets groter zijn dan bij dwarswind door de storende invloed van de radiomast en tuigage op het voorschip.

De juiste grootte van deze vertraging is bij gebrek aan objectief vergelijkingsmateriaal niet te berekenen. Uit metingen van dergelijke aard, welke tijdens de Meteor-expeditie in 1925-1927 zijn gedaan en door E.Kuhlbrodt(12) nader uitgewerkt, valt af te leiden, dat de fout in de gemiddelde windmetingen in 't algemeen hoogstens -1 zm/uur bedraagt. Bij windkrachten van 5 Bft. en hoger wordt deze fout groter en neemt naar schatting toe tot -2 à -3 zm/uur bij een windkracht van 7 Bft. Bij deze hoge windsnelheden wordt ook door de bouw van de anemometer een vertraging in de aanwijzingen bewerkstelligd. Dit kan geïllustreerd worden aan de hand van tabel 3, waarin van de voorgekomen perioden met grote windkracht de geschatte- en gemeten windsnelheden naast elkaar zijn gezet. Het blijkt, dat de anemometer-aanwijzingen niet boven een zekere grenswaarde uitkomen, afhankelijk

Tabel 3

Miswijzingen bij hoge windsnelheden

Lichtschip		Terschellingerbank			Texel				
Datum	Tijd GMT	Windsnelheid in zeem/uur		Verschil (1)-(2)	Wind-richting	Windsnelheid in zeem/uur		Verschil (1)-(2)	Wind-richting
		geschat	gemeten			geschat	gemeten		
		(1)	(2)			(1)	(2)		
1950									
17/9	03	29	28	+ 1	180				
"	06	39	28	+11	180				
"	09	38	29	+ 9	180				
"	12	35	28	+ 7	160				
"	15	35	27	+ 8	220				
"	18	34	27	+ 7	230				
"	21	36	27	+ 9	230				
18/9	00	35	27	+ 8	240				
"	03	34	27	+ 7	240				
"	06	34	25	+ 9	240				
"	09	27	20	+ 7	250				
"	12	27	22	+ 5	250				
"	15	27	23	+ 4	250				
"	18	27	23	+ 4	260				
"	21	26	22	+ 4	270				
19/9	00	27	25	+ 2	250				
"	03	26	22	+ 4	260				
"	06	26	22	+ 4	280				
"	09	24	22	+ 2	280				
"	12	21	19	+ 2	280				
30/11	21	30	28	+ 2	240	32	29	+ 3	250
1/12	00	37	28	+ 9	230	33	30	+ 3	250
"	03	37	28	+ 9	250	33	32	+ 1	250
"	06	37	29	+ 8	240	33	31	+ 2	250
"	09	37	29	+ 8	220	31	30	+ 1	240
"	12	39	31	+ 8	220	38	31	+ 7	240
"	15	09	11	- 2	260	19	14	+ 5	270
"	18	17	21	- 4	290	23	22	+ 1	270
"	21	22	21	+ 1	270	24	25	- 1	270
2/12	00	25	23	+ 2	260	27	27	0	270
"	03	40	32	+ 8	250	30	29	+ 1	260
"	06	39	31	+ 8	270	42	30	+12	270
"	09	42	33	+ 9	290	41	28	+13	270
"	12	32	26	+ 8	290	30	--	--	270
"	15	20	19	+ 1	290	21	19	+ 2	270
1951									
7/1	06	24	23	+ 1	220	28	26	+ 2	260
"	09	34	33	+ 1	240	28	31	- 3	280
"	12	52	33	+19	240	37	35	+ 2	270
"	15	54	36	+18	260	43	32	+11	290
"	18	48	33	+15	250	40	33	+ 7	290
"	21	44	27	+17	270	28	31	+ 3	280
8/1	00	14	21	- 7	260	17	15	+ 2	310
"	03	09	06	+ 3	230	09	08	+ 1	250
"	06	10	13	- 3	180	11	--	--	230

van de opgetreden windkracht. Bij hoge omloopsnelheden van de schalen geschiedt n.l. het sluiten van de contacten onregelmatig, daar een geringe vervuiling door ingedrongen vocht en zout al een te grote weerstand vormt bij contacten van zeer korte duur. Deze waarnemingen zijn wegens hun nadelige beïnvloeding van het resultaat niet in tabel 1 opgenomen.

Tenslotte geven schommelingen van het schip volgens metingen van E. Kuhlbrodt een verwaarloosbare fout in deze opstelling, terwijl de anemometer op een hoogte is opgesteld, waarop volgens de Petersen-schaal ook de windschattingen betrekking hebben.

Kritische beschouwing van de windschattingen

Het goede schatten van de windkracht naar het aanzien van het zeeoppervlak vereist veel ervaring en blijft altijd een persoonlijk karakter behouden. Het is daarom aan te bevelen bij een onderzoek als dit zoveel mogelijk ervaren waarnemers te betrekken. Op het lichtschip Terschellingerbank wisselden elf waarnemers elkaar af gedurende de beschouwde perioden; op het lichtschip Texel bedroeg dit aantal tien. Deze aantallen zijn voldoende groot om in het gemiddelde resultaat het persoonlijk karakter tot een verwaarloosbare invloed te reduceren, al blijft het altijd wel aanwezig. Het volgende onderzoekje geeft een aardige indruk van de individualiteit der waarnemingen. Er is n.l. nagegaan, of er voorrang bestond bij het schatten in een even of oneven aantal knopen. Daartoe is voor elke (nu geschatte!) graad Beaufort het aantal even en oneven knopen geteld, waarin deze graad Bft. was omgezet. In tabel 4 is nu in procenten opgegeven het aantal even waarden, dat meer of minder voorkwam dan te verwachten was bij een evenredige verdeling.

Tabel 4

Bft. geschat	Even aantal: overschot (+) of tekort (-)		
	Tersch.bank	Texel	Beiden
1	+ 17%	+ 42%	+ 30%
2	+ 18%	- 13%	+ 2%
3	+ 5%	- 15%	- 4%
4	+ 19%	- 8%	+ 8%
5	+ 8%	- 42%	- 16%
6	+ 35%	+ 9%	+ 26%
7	+ 57%	+ 17%	+ 35%
Gemidd.	+ 17%	- 11%	+ 4%

Aantal even knopen-waarden, dat meer (+) of minder(-) voorkwam in procenten t.o.v. het bij evenredige verdeling te verwachten aantal.

Uit de tabel blijkt, dat behoudens een gezamenlijke tendens tengevolge van de aard van de Beaufortschaal (zoals een duidelijke voorkeur voor even waarden bij 1, 6 en 7 Bft. en een neiging voor oneven waarden bij 3 en 5 Bft.) de waarnemers op het lichtschip Tersch.bank overwegend in even waarden en die op het lichtschip Texel overwegend in oneven waarden schatten. Een beïnvloeding van de waarnemers onderling komt hiermee wel tot uitdrukking, hoe klein deze ook is.

Voor de nauwkeurigheid in de schattingen kan als maatstaf gelden de standaardafwijking van het verschil tussen de geschatte- en de gemeten windsnelheid. Deze standaardafwijkingen zijn ondergebracht in tabel 5; de waarden zijn hierin gerangschikt naar Beaufort klassen van de gemeten windsnelheid en opgegeven in graden Bft.

Tabel 5

Lichtschip	Terschellingerbank		Texel	
	Aantal	Stand.afwijking	Aantal	Stand.afwijking
		Bft.		Bft.
1	66	0.29	83	0.37
2	154	0.47	180	0.43
3	407	0.33	396	0.38
4	792	0.30	640	0.37
5	549	0.52	390	0.52
6	323	0.48	267	0.57
7	30	0.44	40	0.70
Gemidd.	2321	0.40	1996	0.44

Standaardafwijking van het verschil tussen de geschatte en de gemeten windsnelheden.

Het verloop van deze nauwkeurigheid met toenemende windkracht is voor beide lichtschepen hetzelfde voor windkrachten onder 6 Bft. Het schatten van de wind blijkt bij 2 Bft. moeilijker te zijn dan bij 4 Bft., waar de standaardafwijking een minimum waarde heeft. Bij 5 Bft. neemt de spreiding in de schattingen plotseling zeer toe; voor hogere windkrachten blijft deze toename doorgaan bij het lichtschip Texel, terwijl bij het andere lichtschip de waarden dan juist kleiner worden. De gemiddelde

standaardafwijking is 0.4 Bft. Dit betekent, dat de gemiddelde misschatting bij alle windkrachten voor tweederde der voorkomende gevallen maximaal 0.4 Bft. kan bedragen.

Deze waarde voor de standaardafwijking is in goede overeenstemming met de waarde van 0.3 Bft., die Gallé(11) voor de gemiddelde afwijking vond in de door meerdere schepen gelijktijdig verrichte schattingen in de Rode Zee.

Als oorzaken van het verschil tussen de geschatte- en de overeenkomstige ~~gemeten~~ waarde kunnen genoemd worden:

1°) Traagheid in het volgen van windkrachtveranderingen. De traagheid bij schattingen, vooral na stormperioden, laat zich aardig aantonen in tabel 3. Na elke storm worden zwakkere winden, die normaal gemiddeld 0.5 tot 2 zm/uur te laag worden geschat, nu enige zm/uur te hoog geschat. Dit verschijnsel vindt zijn oorzaak in het nog onrustige aanzien van het zeeoppervlak na een storm; deze reden is te meer waarschijnlijk, daar in tabel 3 de waarnemingen door verschillende personen om de drie uur uitgevoerd zijn met ten hoogste twee waarnemingen achtereenvolgens door één man. Ook treedt een traagheid op doordat in de praktijk een waarnemer meestal in zekere mate zijn eigen schatting met die van zijn voorganger vergelijkt.

2°) Overschatting bij zeer zwakke winden. Zoals ook Gallé opmerkte, behoeft een zelfde windkracht niet steeds hetzelfde golfeffect teweeg te brengen. Vooral bij zwakke winden krijgen de andere invloeden, als de uitgestrektheid van het zeeoppervlak en de duur, waarover de wind waait, getijstromingen, de nabijheid van kustgebieden en de deining steeds meer de overhand. De grote standaardafwijking bij 2 Bft. is hier al een aanwijzing voor. Een tweede oorzaak is te vinden in het feit, dat het aantal mogelijkheden om te laag te schatten kleiner is dan dat om te hoog te schatten. De relatief grote spreiding in de schattingen maakt daardoor de gemiddelde waarde iets te hoog.

Het gevonden verband tussen Beaufortschaal en windsnelheid

De eenvoudigste manier, om uit de berekende verschillen tussen gemeten en geschatte windsnelheidswaarden tot een verband tussen Beaufortschaal en een schaal in zm/uur te komen, is die langs grafische weg. De omzetting van de geschatte windkrachten in zeem/uur berust n.l. op de in 1946 internationaal aangenomen aequivalenten der Beaufortschaal. In grafiek 1 is dit ver-

band grafisch uitgezet. Vervolgens werd punt voor punt uit de berekende verschillen van tabel 1 de nieuwe equivalentiekromme bepaald, voor beide lichtscheperen afzonderlijk. De beide krommen vallen practisch samen en op 't eerste gezicht vormen ze tussen 1 en 6 Bft. nagenoeg een rechte lijn.

Het aldus gevonden verband is op verschillende wijzen in een analytische betrekking om te zetten. Dit zou b.v. kunnen geschieden door een rechte lijn te vinden, die zoveel mogelijk langs de gemiddelde curve valt of als tweede benadering een parabool van de vorm:

$$v = c_1 + c_2 B + c_3 B^2$$

waarin $c_{1,2,3}$ constanten zijn, v de windsnelheid en B het aantal Beaufort-graden.

Beide betrekkingen hebben echter het nadeel, dat de aldus bepaalde rechte of kromme de abscis snijdt. Dit komt niet overeen met de definitie van de Beaufortschaal, welke zo gesteld is, dat bij een naar nul afnemende windsnelheid ook het schaalcijfer tot nul nadert en wel zou de kromme de abscis bij het schaalcijfer nul moeten raken. Evenwel behoeft voor zover het schattingen betreft dit raakpunt niet noodzakelijk in de oorsprong te liggen. In het interval van de windkracht nul graden Beaufort, dat loopt van 0 Bft. tot 0,5 Bft. kan het gemiddelde der schattingen door de in dit bereik naar onder begrensde spreiding in de schattingen niet op 0 Bft., maar iets hoger vallen. De eenvoudigste betrekking, die ook aan deze voorwaarde voldoet is van de vorm:

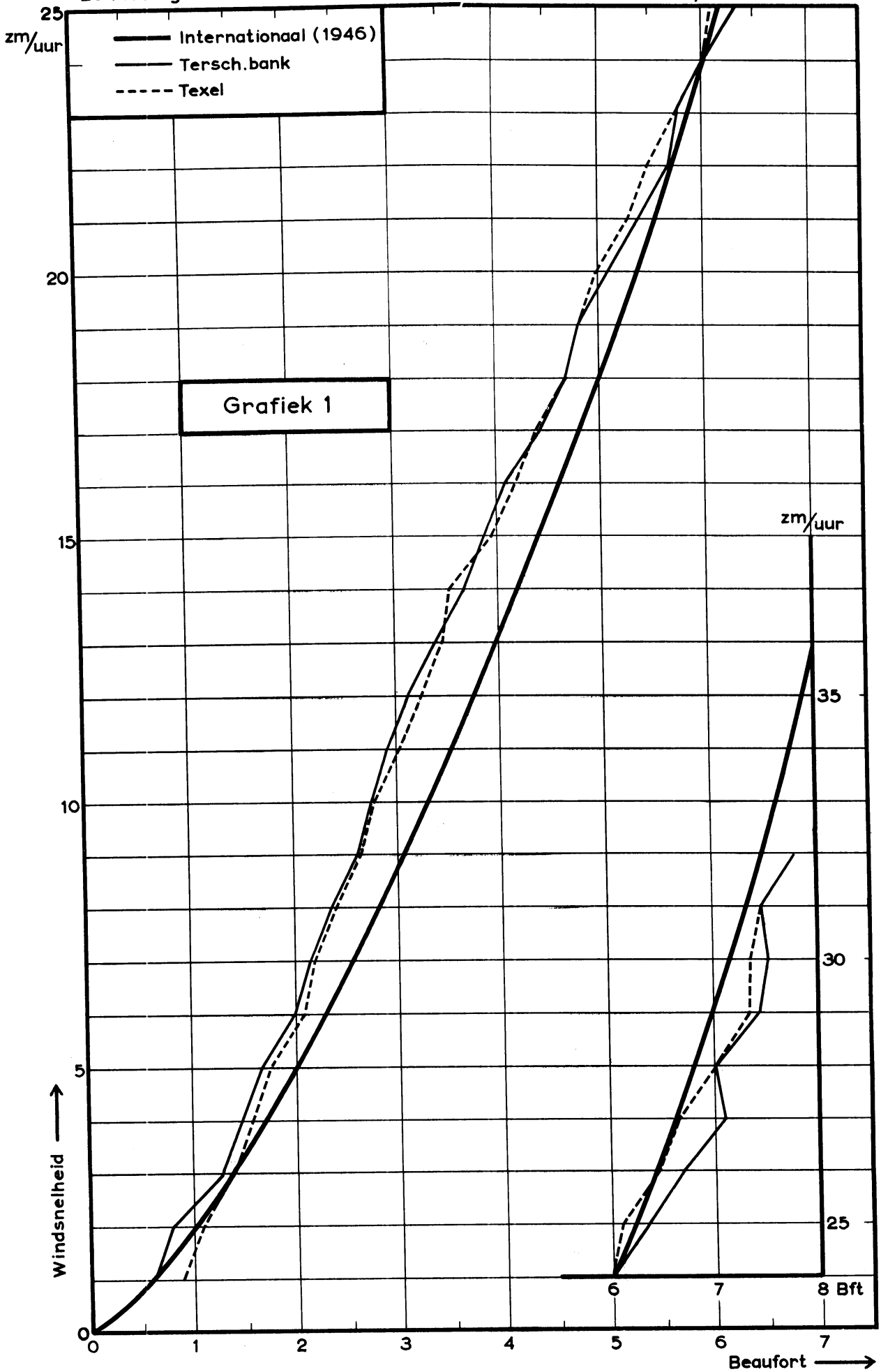
$$v = c_1 (B + c_2)^{c_3}$$

waarin de $c_{1,2,3}$ weer constanten zijn.

In het volgende zal de windsnelheid in meters per sec. opgegeven worden om een vergelijking met andere onderzoekingen te vereenvoudigen.

De vorm van het aangenomen functionale verband leidt er toe de gemeten windsnelheden op dubbel-logarithmisch papier grafisch uit te zetten tegen de overeenkomstige gemiddelde schattingen. Dit is in grafiek 2 geschied. Hierop blijken de punten overeenkomend met schattingen van 1, 2 en 3 Bft. mooi op een rechte te liggen, evenals de punten dit doen die bij de schattingen hoger dan 3 Bft. behoren. Beide rechten snijden elkaar juist in het punt van 3 Bft.; daar treedt dus een discontinuïteit op in het verband tussen windsnelheid en schatting.

Betrekking tussen schaaldelen Beaufort en windsnelheid in zm/uur



De betrekkingen, gegeven door de twee rechten, luiden resp.:
 voor schattingen ≤ 3 Bft.:

$$v = 1.007 B^{1.571} \text{ m/sec.}$$

voor schattingen ≥ 3 Bft.:

$$v = 1.794 B^{1.074} \text{ m/sec.}$$

waarin v = windsnelheid

B = geschatte windkracht in graden Beaufort.

In onderstaande tabellen 6 en 7 zijn de ware, uit de waarnemingen gevonden, aequivalenten vergeleken met die, welke uit de bovenstaande formules volgen.

Tabel 6

Beaufort		0.2	0.8	1.0	1.3	1.5	1.7	2.0	3.0	4.0
Windsnelh. in m/sec.	Met formule	0.0	0.7	1.0	1.5	1.9	2.3	3.0	5.7	8.9
	Ware	-	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	5.8	7.9
Verschil		-	0.0	0.0	0.0	-0.1	-0.2	0.0	-0.1	+1.0

Tabel 7

Beaufort		0	1	2	3	4	5	6	7	8
Windsnelh. in m/sec.	Met formule	0	1.8	3.8	5.8	7.9	10.1	12.3	14.5	16.7
	Ware	-	1.0	3.0	5.8	7.9	10.2	12.4	14.4	16.8
Verschil		-	+0.8	+0.8	0.0	0.0	-0.2	-0.1	+0.1	-0.1

Hoewel in werkelijkheid de waargenomen snelheden niet tot 8 Bft. reiken, is in deze tabel een geëxtrapoleerde waarde opgegeven om de tendens in het verschil te kunnen nagaan.

De vraag dringt zich nu op of een dergelijk discontinu verband wel reëel is. Om deze vraag te beantwoorden gaan we eerst eens na of er ook bepaalde invloeden zijn aan te wijzen die op systematische wijze op de metingen inwerken.

Uit de voorgaande bespreking over de opstelling van de anemometer is gebleken, dat de gemeten waarden bij hoge windsnelheden 2 à 3 zm/uur = 1 à $1\frac{1}{2}$ m/sec. te laag kunnen zijn.

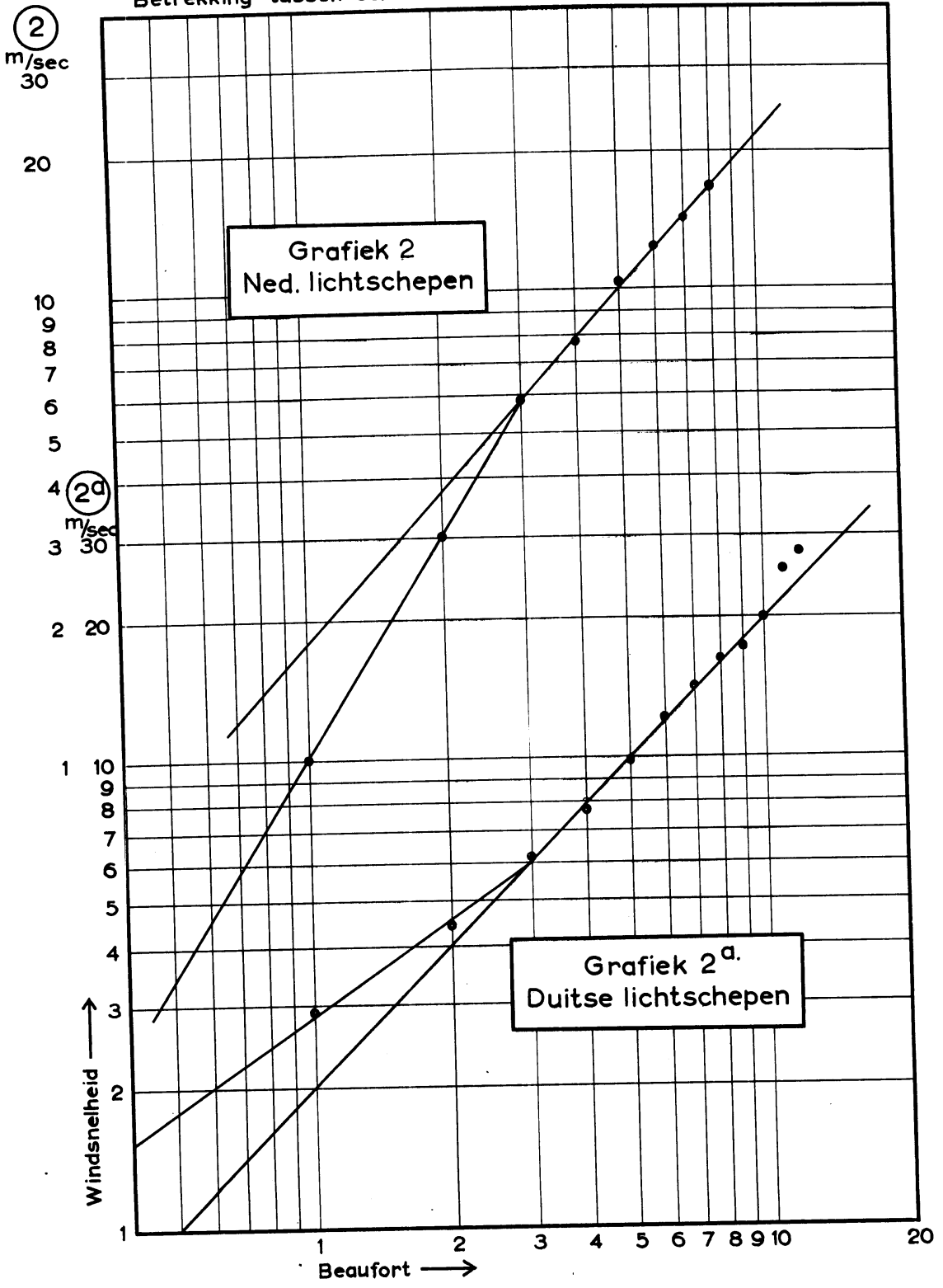
We hoeven hierbij alleen de meetomstandigheden onder de loupe te nemen, daar wegens het grote aantal waarnemers (21 in totaal) de gemiddelde windschatting karakteristiek genoemd mag worden voor windwaarnemingen op de Noordzee in het algemeen.

Bij de metingen in het lagere snelheidsinterval gaat de hoogte van de opstelling boven zeeniveau een rol spelen. Het blijkt n.l. (Roll (16)) dat gemiddeld de windsnelheidstoename met de hoogte geringer wordt bij toenemende windkracht. Daardoor zal een hoge opstelling van de anemometer vooral bij geringe windkrachten gemiddeld hogere aequivalente snelheden opleveren dan een lage opstelling. Bij windmetingen op een hoogte, welke groter is dan de hier gebruikte opstelling van 7 meter, zal de "knik" bij 3 Bft. in het op grafiek 2 getrokken verband minder scherp tot uitdrukking komen of zelfs van richting veranderen. Als illustratie hiervan is een dergelijke grafiek op dubbel-log.papier (grafiek 2a) bijgevoegd van de waarnemingen van 5 Duitse lichtscheepen. De gemiddelde hoogte van de anemometerschalen boven zeeniveau bedroeg hier 20 meter; op deze hoogte hebben ook de opgegeven windsnelheden betrekking. Terwijl voor windkrachten groter dan 3 Bft. de punten mooi op een rechte liggen, waarvan de ligging met een zeer goede benadering overeenkomt met die gevonden voor de Nederlandse lichtscheepen^z blijken de punten overeenkomend met schattingen lager dan 3 Bft. nu juist boven deze rechte te liggen, in tegenstelling tot de situatie bij de Ned.lightscheepen. Dit verschillende gedrag van de beide overigens gelijksoortige stellen waarnemingen van resp. de Nederlandse en Duitse lichtscheepen kan niet verklaard worden met een verschil in de wijze van schatten; de oorzaak moet wel voor een belangrijk deel gezocht worden in de bovengenoemde invloed van de meethoogte op de snelheidsmetingen.

Welk gedrag is nu normaal te noemen? Hierbij moeten we ons houden aan de internationaal vastgestelde meethoogte van 10 meter boven zeeniveau. Aannemende, dat het verschil in ligging van de overeenkomstige punten op de twee grafieken uitsluitend een gevolg is van het verschil in meethoogte, kan onder aanname van een logaritmisch snelheid-hoogte profiel een schatting gemaakt worden van het verloop van het rechte lijnige verband bij lage windkrachten voor een meethoogte van 10 meter. Bij windkrachten groter dan 3 Bft. blijkt het genoemde verschil in meethoogte practisch geen invloed meer op de metingen uit te oefenen.

^zDe aequivalente snelheid voor het schaalcijfer 11 Bft. valt buiten de betrekking, ongetwijfeld een gevolg van de geringe nauwkeurigheid in deze gemiddelde waarde.

Betrekking tussen schaaldelen Beaufort en windsnelheid in m/sec



Voor de geschatte windkrachten van 1 en 2 Bft. blijken dan de overeenkomstige snelheden resp. 1.3 en 3.2 m/sec. te zijn.

Samenvattend kan de vraag naar de realiteit van de discontinuïteit in het verband snelheid-Beaufort als volgt beantwoord worden.

Voor zover het een verband betreft tussen schattingen en windsnelheden, gemeten op 10 m hoogte of lager boven zee, is deze discontinuïteit als reëel aan te merken. De oorzaak hiervoor moet waarschijnlijk gezocht worden in een verschil in aard van het zeeoppervlak, dat bij windsnelheden onder ongeveer 6 m/sec. zich als "glad" en bij hogere snelheden als "ruw" oppervlak gedraagt ((8); zie ook (9)). De overgang tussen deze twee toestanden van het oppervlak blijkt in de Petersen-schaal, volgens welke de schattingen verricht zijn, gemiddeld juist bij het schaalcijfer 3 Bft. te liggen. Naarmate de anemometer hoger staat, wordt de discontinuïteit minder duidelijk om tenslotte opnieuw, maar dan in tegengestelde vorm, tot uitdrukking te komen. Dan treedt dus een tweede effect op, n.l. de afhankelijkheid van de snelheidstoename met de hoogte van de windsnelheid.

Het is hierbij wel van belang op te merken dat men uit deze formules niet zonder meer kan komen tot het verband tussen de windsnelheid "v" en de ware windkracht "W", die op het zeeoppervlak werkt. Hiervoor zou men de functie $W = f(B)$ moeten kennen; daar een waarnemer zich echter bij de schatting niet alleen laat leiden door het gezichtszintuig maar ook door het gevoel (de grotere onzekerheid, die de waarnemer voelt bij het schatten van de hogere windsnelheden en die o.a. duidelijk tot uitdrukking komt in de grote toename van de standaardafwijking bij 5 Bft., is mede toe te schrijven aan de irwerking van de afwisselende windvlagen op het gevoel) zou voor het opstellen van een dergelijke functie een geheel apart onderzoek benodigd zijn.

Tenslotte toont tabel 8 het gemiddelde verband tussen de schattingen in Beaufort en de windsnelheid in zm/uur voor de beide lichtscheperen. De gemiddelde waarden zijn voor windkracht 1 en 2 Bft. omgerekend tot een meethoogte van 10 meter boven zeeniveau.

Tabel 8

Verband schaalcijfers Beaufort - zm/uur op de lichtscheperen.

Beaufort	0	1	2	3	4	5	6	7	8
L.s. Texel (7 meter)	-	1.6	5.8	10.9	15.3	20.1	24.0	28.0	(32.8)
L.s. Tersch.bank (7 meter)	-	2.5	6.0	11.5	15.6	19.7	24.0	26.9	(32.8)
Gemidd. (op 10 meter)	-	2.5	6.3	11.2	15.4	19.9	24.0	27.8	(32.8)

De aequivalentiekromme, welke bepaald werd uit de waarnemingen op de lichtschepen is geheel verschillend van de internationale. Geheel onbewust blijken de waarnemers een andere opvatting te hebben over de omzetting van graden Beaufort tot een windsnelheid in zm/uur, een opvatting welke karakteristiek genoemd mag worden voor het klimaat langs de Ned.kust. De afwijking van de internationale kromme is echter zo groot, dat men wel eerst de waarde van deze vastgestelde aequivalenten zal moeten onderzoeken, alvorens tot een uitspraak te komen over de oorzaak hiervan. In 't kort zal derhalve worden overgegaan tot een bespreking van de oorsprong van het internationale verband en van de vroeger gevonden resultaten op dit gebied, waarbij getracht zal worden op grond van deze resultaten te komen tot een nieuwe aequivalentie-reeks.

Deel II. De oorsprong van de internationale aequivalenten.

De door de C.S.W.I. te Parijs in 1946 internationaal vastgestelde aequivalenten van de Beaufortschaal zijn ontstaan uit een voortzetting van de gedachtengang, welke in 1926 geleid heeft tot de eerste aanname van internationaal algemeen gebruikte aequivalenten. Het was niet de twijfel aan de juistheid van de eerste internationale waarden, die tot deze verandering aanleiding gaf; doordat echter de van obstakels vrije hoogte, waarop de windmetingen dienen te geschieden, op de genoemde conferentie gebracht werd van 6 meter op 10 meter, moesten de aequivalenten in overeenkomstige mate gewijzigd worden.

De waarden die in 1946 zijn aangenomen, zijn gelijk aan die, welke vanaf 1906 tot 1926 door het Meteorological Office werden gebruikt en die berusten op de door G.C.Simpson (4) bewerkte waarnemingen van Engelse kust- en landstations. Met deze aanname is een belangrijke phase afgesloten in de geschiedenis van de Beaufort-aequivalenten; echter heeft men hiermee in zekere zin een stap in de ontwikkeling teruggezet, een stap, waarvoor wetenschappelijk gezien geen aanleiding bestond, doch die zo kort na de oorlog klaarblijkelijk onder de drang van het ogenblik gezet moest worden om zo snel mogelijk te komen tot een of andere oplossing. En deze was niet gemakkelijk, daar ook de vroegere internationale reeks in feite een noodoplossing was (evenwel in tegenstelling met de nieuwe aanname na een zorgvuldig onderzoek opgesteld) en nog steeds veel critiek ondervond.

Het is daarom van belang in 't kort de geschiedkundige ontwikkeling na te gaan.

De eerste door de verschillende landen in gebruik genomen aequivalenten verschilden vrij veel van elkaar, maar omstreeks 1913 hadden twee reeksen de meeste ingang gevonden, te weten een reeks in 1898 door W.Köppen(1) opge-

steld uit enige series waarnemingen verricht op schepen en op Engelse, Noorse en Duitse kuststations en de reeds genoemde reeks van het Met.Office. De eerste werd door de Seewarte en langzamerhand eveneens op het overige vaste land van West-Europa gebruikt, de tweede vanaf 1915 ook door Rusland. De z.g. Met.Office-reeks is geen oorspronkelijke reeks, hij is tot stand gekomen door de rechtstreeks berekende waarden van Simpson met behulp van een benaderde formule "glad te strijken". Beide reeksen worden hieronder in tabel 9 gegeven.

Tabel 9

Aequivalenten in meters per sec.

Beaufort	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Seewarte	0	1.7	3.1	4.8	6.7	8.8	10.7	12.9	15.4	18.0	21.0
Met. Office	0	0.8	2.4	4.3	6.7	9.4	12.3	15.5	18.9	22.6	26.4

Voor de synoptische meteorologie, die dank zij de snelle ontwikkeling van het telegrafische verkeer in het begin van deze eeuw tot grote ontplooiing kwam, was dit meten met twee maten zeer onbevredigend. Vandaar dat in 1912 door de "International Commission for Weather Telegraphy" een subcommissie benoemd werd, waarin o.a. Prof. W. Köppen zitting had, om deze kwestie nader te onderzoeken. Köppen's voorstel, in 1913 bij de I.M.C. ingediend, werd na hevige discussies evenwel niet aangenomen, voornamelijk omdat hij bij de hogere Beaufort-schaalcijfers de snelheidsintervallen overlappend had gemaakt. De zaak werd weer naar de subcommissie voor verder onderzoek terugverwezen. De eerste wereldoorlog echter werd ook hierin spelbreker en pas in 1921 werd opnieuw door de I.M.C. een resolutie aangenomen, waarin ditmaal aan G.C. Simpson het onderzoek werd opgedragen. Het voorstel van Simpson, dat uiteindelijk op de vergadering van de I.M.C. te Wenen in 1926 onveranderd werd aangenomen omvatte een compromis in de wetenschappelijke strijd tussen Köppen en Simpson, die ging over de vraag, welke van de twee reeksen nu het meest de werkelijkheid benaderden.

De gevoerde discussies wierpen een helder licht op de relatieve waarde van beide reeksen.

Zo heeft Köppen bij de samenstelling van de Seewarte-reeks een zeer diepgaande bespreking gewijd aan de waarde van de toenmaals bekende rijen. Men verkrijgt hieruit wel een zeer goede indruk van de grote moeilijkheid, die in die tijd (1898) bestond bij het scheppen van enige eenheid in de diverse bestaande metingen. Het is de grote verdienste van Köppen dat hij door zijn minutieus onderzoek vele factoren aan het licht bracht, die een zuivere bepaling ongunstig kunnen beïnvloeden. Hierdoor konden nog verschillende oudere bepalingen ver-

beterd worden, die anders later met het etiket "onbetrouwbaar" verworpen zouden zijn geworden. De omstandigheden, waaronder de diverse vergelijkende metingen waren verricht, liepen zeer uiteen en vooral voor de kuststations waren de berekeningen achteraf uitgevoerd aan zeer heterogeen materiaal. Zo goed en zo kwaad als het ging trachtte Köppen door toepassing van verschillende correcties de storende invloedende elimineren. Zo werden correcties aangebracht voor de ten tijde van de meting nog onvoldoend bekende waarden van de anemometerconstanten, voor de door Köppen onjuist geachte methode van het middelen, waarbij men aanvankelijk de gemeten snelheden rangschikte naar de schattingen (op zijn verzoek hebben toen verscheidene auteurs hun oorspronkelijk materiaal opnieuw bewerkt), en soms liet hij waar hij beslag kon leggen op oorspronkelijk materiaal de meest onbetrouwbare waarnemingen weg.

Uiteindelijk verkreeg hij 11 basisrijen, die hij in 4 groepen splitste. De rijen in de eerste groep (metingen op de oceaan) en de tweede groep (Duitse kuststations) begonnen en eindigden bij verschillende Beaufortcijfers. Van elke groep werd een gemiddelde reeks bepaald, waarbij sommige rijen met een meervoudig gewicht in rekening werden gebracht. Door deze 4 reeksen lineair met gelijk gewicht te middelen verkreeg Köppen de Seewarte-reeks. Nu zijn in deze reeks in het interval 1-5 Bft. enige rijen opgesloten, die niet in het interval 6-10 Bft. voorkomen en omgekeerd. Hierdoor vertoont de reeks niet een regelmatige opklimming, maar vooral op de grens tussen de beide Bft. intervallen bevindt zich een anomalie.

De hoogte van de anemometers boven de omringende obstakels varieerde bij deze waarnemingen van 1-10 meter.

De oorspronkelijke reeks van Simpson bestond eveneens uit een heterogeen materiaal. Van de 5 basisrijen eindigden twee afkomstig van landstations bij 8 Bft. Hierbij werd de windkracht o.a. ook naar de omloopsnelheid van de anemometerschalen geschat. De rijen van de kuststations Yarmouth en Holyhead eindigden bij 9 Bft. In Holyhead werd de windkracht pas vanaf 6 Bft. naar het uiterlijk van het zeeoppervlak geschat. In de rij van Yarmouth vooral zijn vele neven-effecten verdisconteerd. Op dit station stond de anemometer 30 zeemijlen verder landinwaarts dan de plaats -Eddystone-, vanwaar de windkracht werd geschat. Curtiss (6) vond, dat de resulterende aequivalenten sterk afhingen van de windrichting, een verschijnsel dat ook bij andere kuststations optreedt (zie o.a. G.Pogadi(7)) en dat hier nog versterkt tot uitdrukking kwam door de grote afstand tussen de anemometer en de plaats, vanwaar werd geschat. Simpson nam naar aanleiding van het onderzoek van Curtiss alleen de waarnemingen bij Oostenwind.

Köppen gebruikte eveneens deze beide laatste rijen, maar achtte ze vrij onbetrouwbaar en paste derhalve verschillende correcties toe. De vijfde rij is afkomstig van het station op Scilly en bevat nog vier waarnemingen bij 10 Bft. Uit deze vijf rijen werd een gemiddelde reeks bepaald door bij elk schaalcijfer Beaufort alle waarnemingen samen te voegen en hieruit een gemiddelde aequivalente windsnelheid te berekenen. Bij lagere windkrachten overheerst het aantal waarnemingen van de landstations sterk, vanaf 5 Bft. dat van de kuststations. Bij de drie kuststations stond de anemometer 22 meter boven zeeniveau en 10 tot 13 meter boven de grond in een volkomen vrije opstelling.

De punten van de Simpson-reeks blijken in een dubbel-logaritmisch diagram met een goede benadering op een rechte lijn te liggen. Voor dit rechtlijnige verband werd door het Met.Office officieel aangenomen:

$$v = 0.836 B^{3/2} \text{ m/sec.}$$

De mooi afgeronde exponent van $3/2$ doet echter wat verdacht aan, en daarom is bij dit onderzoek opnieuw zo goed mogelijk een rechte lijn getrokken op het dubbel-logaritmische diagram. Nu volgt als betrekking:

$$v = 1.000 B^{1.418} \text{ m/sec.}$$

In onderstaande tabel 10 worden de verschillende waarden met elkaar vergeleken.

Tabel 10
Aequivalente windsnelheden in m/sec.

Beaufort	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Gemeten	0.9	2.7	4.7	7.2	9.8	12.5	15.4	18.8	22.4	26.4	-
I: $v=0.836 B^{3/2}$	0.8	2.4	4.3	6.7	9.4	12.3	15.5	18.9	22.6	26.4	30.5
II: $v=B^{1.418}$	1.0	2.7	4.7	7.1	9.8	12.7	15.8	19.1	22.5	26.2	30.0

De betrekking I voldoet alleen vanaf 7 Bft., bij lagere schaalcijfers treden belangrijke afwijkingen op (behalve bij 1 Bft.). Bij betrekking II treden de grotere afwijkingen op bij 6-8 Bft. Ondanks deze afwijkingen moet II geprefereerd worden, daar deze betrekking nauwkeurig aansluit in dat windkracht-interval, waarin de meeste waarnemingen zijn verricht. Het merkwaardige is nu, dat terwijl Köppen in zijn discussies steeds de oorspronkelijke reeks van Simpson nam, Simpson zelf de z.g. "adopted values" van de Met.Office gebruikte, zonder dat hij ergens een twijfel uitdrukte over de juistheid van deze aanname. Wellicht is dit te wijten aan het grote gezag dat de Met.Office-reeks in de loop van de 20 jaren tussen 1906 en 1926 in Engeland verkregen had, een gezag waaraan waarschijnlijk de magische schoon-

heid van de eenvoudige exponentiële waarde van $3/2$ niet vreemd was. Hierop duiden de vele speculaties die hierover zijn gehouden (4).

In de toelichting van zijn voorstel aan het I.M.C. trachtte Simpson(5) aan te tonen, dat de grotere waarden van het Met.Office bij matige en sterke winden verklaard konden worden met een verschil in hoogte van de gebruikte anemometers. Het tegengestelde teken van het verschil bij lage windkrachten kon door hem niet verklaard worden; Köppen had echter in 1898 (1) en later nog eens in 1916 (2) als oorzaak hiervoor al genoemd het naar Engels gebruik niet opnemen van de wrijving in de anemometerconstanten.

Om tenslotte tot een eenheid te komen nam Simpson een gemiddelde aan tussen de beide reeksen. Hierbij ging hij als volgt te werk. Van elke reeks equivalenten nam hij de verschillen tussen telkens twee opeenvolgende getallen en zette deze grafisch uit tegen de opeenvolgende Beauforttrappen. Op het oog trok hij vervolgens een "gemiddelde" kromme en bepaalde hieruit weer een nieuwe reeks equivalenten. De hoogte, waarop de met deze reeks berekende equivalenten windsnelheden betrekking zouden hebben, stelde hij vast op 6 meter vrij boven de grond. Hierbij maakte hij gebruik van de empirische formule van Hellmann voor de verandering van de windsnelheid met de hoogte. Met het oog op de nog later te leveren critiek is het van belang op te merken, dat hij deze formule alleen toepaste op de respectievelijke equivalenten snelheden bij 8 Bft.

De conclusie, waarop Simpson zijn nieuw voorstel grondde, luidde:

"Thus, normally, anemometer exposures will be at least as good as those represented by the Seewarte equivalents and not better than those represented by the Meteorological Office equivalents. Hence the curves for all anemometers which have not obviously exceptional exposures will fall between the curves for the Seewarte and Meteorological Office equivalents".

Deze conclusie is klaarblijkelijk door de C.S.W.I. in 1946 als uitgangspunt genomen bij het zoeken naar die equivalenten windsnelheden, welke zouden gelden voor een vrije hoogte van 10 meter boven de grond. Volgens deze commissie voldeed dus de vroegere Met.Office-reeks het meest aan de gestelde voorwaarde.

De bezwaren, die men kan laten gelden tegen de Met.Office equivalenten, vooral wanneer deze toegepast worden op waarnemingen op zee, zijn de volgende:

1) Om de persoonlijke instelling van de waarnemers bij de schattingen zoveel mogelijk te elimineren, is een groot aantal waarnemingen van verscheidene ervaren waarnemers benodigd. Van de Engelse reeks is het aantal waarnemingen zeer groot, doch elke rij berustte slechts op de waarnemingen van één persoon (in totaal dus 5 waarnemers).

2) Er was geen correctie toegepast voor de wrijving in de anemometers. Deze twee bezwaren werden door Köppen (3) genoemd.

3) De schattingen hebben betrekking gehad op kentekenen zowel op land als op zee. Daar ongeveer de helft van de waarnemingen berust op schattingen naar landkenmerken (North Shields, Oxford en Holyhead tot 6 Bft.) kan de reeks niet representatief geacht worden voor uitsluitend zeewaarnemingen.

4) De Met.Office aequivalenten zijn niet de beste aanpassing aan de oorspronkelijk door Simpson berekende waarden. Vooral in het snelheidsgebied met de meeste waarnemingen zijn de verschillen vrij groot.

5) De boven aangehaalde conclusie van Simpson houdt in, dat de verandering van de windsnelheid met de hoogte groter wordt bij toenemende windsnelheid. Berekent men nl. de quotienten van de aequivalenten van Simpson gedeeld door de overeenkomstige waarden van Köppen, dan vindt men een factor, die met de windsnelheid toeneemt. Braak (17) heeft uit metingen van Lako (Gelderse Vallei -1908) en Köppen (zendmasten Eilveze bij Hannover - 1915) enige factoren berekend, die van de windsnelheid afhangen. Hij vond, dat bij een overgang van 6 op 10 meter de factor varieerde van 1.08 bij 2 m/sec. tot 1.04 bij 20 m/sec. Deze experimentele uitkomst is te begrijpen uit een toename van de turbulentie en daarmee een toename in de uitwisseling van impuls bij groter wordende windsnelheden. Met deze metingen, die dus geheel overeenstemmen met onze verwachting op dit punt, is het gedrag van het quotient tussen de aequivalenten van Simpson en Köppen geheel in tegenspraak. Maar dan zou volgen, dat het verschil tussen de reeksen van Simpson en Köppen niet voor het grootste gedeelte toegeschreven mag worden aan een hoogteverschil in opstelling van de wederzijds gebruikte anemometers.

Uit de bespreking van Simpson bij zijn voorstel van de (nu oude) internationale aequivalenten is derhalve nog in het geheel niet de juistheid van zijn oorspronkelijke waarden komen vast te staan, te meer daar hij zich alleen maar beperkt heeft tot een onderzoek naar de invloed van de hoogteverschillen in de wederzijds gebruikte anemometeropstellingen.

Deel III Een nieuwe reeks aequivalenten.

Het heterogene en in sommige opzichten onbetrouwbare materiaal, waarmee Köppen en Simpson moesten werken, is niet erg geschikt om in zijn geheel als basis te blijven dienen voor de vaststelling van Beaufort-aequivalenten. Beide auteurs waren zich hiervan wel bewust en drongen aan op hernieuwde onderzoekingen.

Inderdaad zijn sedertdien verscheidene nieuwe metingen verricht. Bij de samenstelling van een nieuwe gemiddelde reeks maken we eveneens gebruik van enige series metingen uit de reeksen van Simpson en van Köppen.

We beperken ons nu uitsluitend tot waarnemingen verricht op zee of op kuststations (w.o. lichtschepen). Van de Engelse waarnemingen zijn die van Scilly het meest betrouwbaar. In tabel 11 zijn onder I de door Simpson berekende en door Köppen voor de wrijving in de anemometer gecorrigeerde waarden gegeven (zie Köppen (3)).

Van de Seewarte-reeks nemen we slechts twee series metingen over. De eerste betreft waarnemingen, verricht op het Duitse oorlogs- en onderzoekingschip "Gazelle" op de reis van 1894; deze werden met een handanemometer verricht, waardoor niet zulke betrouwbare resultaten verkregen worden als met een aan de mast bevestigde windmeter. Krümmel(5) heeft uit een keur van de meest betrouwbare waarnemingen opnieuw aequivalenten voor de Beaufort-cijfers berekend. Tot en met 4 Bft. nam hij uitsluitend de waarnemingen bij een stilliggende positie. In tabel 11 wordt deze reeks onder II gegeven.

De andere rij is afkomstig van F.Waldo(10), die tijdens een reis over de Atlantische Oceaan op het ss. "Ohio" in 1882 windmetingen heeft verricht. Hij gebruikte drie anemometers, waarvan in de berekening hoofdzakelijk die op het stuurhuis (hoogte 9 m) en aan de grote mast (hoogte 26 m) opgenomen zijn. De aequivalenten, welke op Köppen's verzoek opnieuw zijn berekend, staan in de tabel onder III.

In later jaren zijn nog enige belangrijke onderzoekingen naar de aequivalentie van de Beaufortschaal verricht. Hiervan volgt een korte bespreking, waarbij voor een meer diepgaande studie verwezen wordt naar de desbetreffende publicaties. Al in 1914 heeft Gallé (11) uit windmetingen tijdens twee reizen over de Atlantische Oceaan een nieuwe reeks samengesteld. De aequivalente windsnelheid heeft voor de ene reis betrekking op een hoogte van 12 m, voor de andere reis op 7 m.

Een zeer uitgebreid onderzoek is verricht tijdens de Meteor-expeditie in 1926. Hierbij zijn door E.Kuhlbrodt (12) de windschattingen vergeleken met de aanwijzingen van de anemometer aan de mast op 32 m hoogte boven zeeniveau. De waarnemingen werden verricht op veertien verschillende routes. Daar de hoge opstelling van de anemometer door de windtoename met de hoogte en door slingeringen van de mast aanleiding gaf tot een te grote waarde voor de windsnelheid, zijn de Meteor-aequivalenten, berekend uit waarnemingen in tropische streken met 0.5 m/sec. en die, geldend voor de hogere Zuidelijke breedten met 1.0 m/sec. gereduceerd. Uit het verschil tussen beide stellen aequivalenten

trekt Kuhlbrodt een belangrijke conclusie. De tweede reeks berust n.l. op waarnemingen, verricht op reizen met de overheersende Westenwind mee. De schattingen blijken hier t.o.v. die op andere reizen alle aan de lage kant te zijn. Kuhlbrodt wijt dit aan het wennen der waarnemers aan een zekere klimatologische gesteldheid, in dit geval aan overwegend sterke windsnelheden. Volgens hem zijn de schattingen dan ook afhankelijk van het klimaat, waarin ze verricht worden.

Van meer recente datum stammen de onderzoeken van H.Regula(13)(14) over windmetingen op de schepen "Schwabenland" en "Friesenland" resp. in 1936 en 1937. De schattingen zijn hierbij vergeleken met windmetingen op resp. 35 m en 40 m hoogte. Als criterium voor de nauwkeurigheid van de gemeten windsnelheid heeft Regula bij metingen op de "Schwabenland" deze vergeleken met de gradiëntwind, die op open zee al op geringe hoogte wordt bereikt.

Op het schip de "Friesenland" zijn de waarnemingen verricht voor een onderzoek naar de toename van de windsnelheid met de hoogte in resp. koude en warme massa. Hierbij werd gevonden, dat de windsnelheid in een warme massa sneller met de hoogte toeneemt dan in koude massa. De aequivalente waarden, die Regula hierbij geeft, zijn zodanig berekend, dat ze zouden gelden wanneer even veel waarnemingen in koude als in warme massa verricht zijn. In tabel 11 is onder VII de gemiddelde waarde opgegeven van de "Schwabenland"- en "Friesenland"-resultaten, waarbij nog een reductie van 0.3 m/sec. is toegepast om de waarden te betrekken op een hoogte nabij het zeeoppervlak.

Opm. De toepassing van een voor alle windsnelheden constante correctie voor de hoogte van de anemometer is eigenlijk niet in overeenstemming met de experimenteel geverifieerde aanname van een logaritmisch snelheid-hoogte-profiel. Er is echter nog te weinig bekend over de werkelijke vorm van dit profiel, zodat voor de diverse auteurs niets anders overbleef dan voor een eerste benadering een constante reductiefactor toe te passen.

H.Seilkopf(15) doet melding van een reeks, die uit waarnemingen van het lichtschip "Borkumriff" door E.Kuhlbrodt en J.Wittenbecher is berekend. Ofschoon ook op deze waarden een constante correctie van 0.5 m/sec. voor de hoge opstelling van de anemometer werd toegepast bleken de resulterende aequivalenten veel hoger uit te vallen dan de waarden, die in 1953 door J.Richter (Seewetteramt), uit waarnemingen van 5 Duitse lichtschepen (4 op de Noordzee en 1 op de Oostzee) zijn berekend. Deze laatste waarden, die aan de schrijver persoonlijk zijn meegedeeld, stemmen zeer goed overeen met de uitkomsten van de Nederlandse lichtschepen. De gemiddelde hoogte van de anemometerschalen boven zeeniveau bedroeg bij de laatstgenoemde Duitse lichtschepen 20 meter (3 meter boven de lichtopstand).

Daar de meetomstandigheden op het lichtschip "Borkumriff" niet bekend zijn en de uit deze waarnemingen berekende aequivalenten onbetrouwbaar aandoen vergeleken bij de uitkomsten van Richter, is de eerstgenoemde reeks niet in tabel 11 opgenomen.

Van de tweede reeks zijn de waarden voor 1 en 2 Bft. gereduceerd voor een anemometerhoogte van 20 m tot 10 m (zie deel I).

De in tabel 11 ondergebrachte aequivalenten blijken goed met elkaar overeen te stemmen. Bij het schaalcijfer 1 Bft. vallen de aequivalente snelheden van varende schepen hoger uit dan die op de stilliggende stations; hier speelt de invloed van de vaartwind op de schattingen een overwegende rol. De iets lagere waarden van de Gazelle-reeks zijn waarschijnlijk te verklaren door de meting met een handanemometer, terwijl voor de algemeen hogere waarden van de 2e Meteor-reeks het onderzoek van Kuhlbrodt een afdoende verklaring geeft.

Ook de veel bediscussieerde waarnemingen van Scilly blijken na de bewerkingen van Simpson en Köppen een goed kloppend resultaat te geven.

In de laatste kolom van de tabel is voor elke meting de vrije hoogte van de anemometer opgegeven. De anemometer op Scilly stond 10 meter boven de hoogste top van een klein eiland en 39 meter boven zeeniveau. Bekijken we nu de diverse aequivalenten in samenhang met de opstelling van de anemometers, dan is het in het algemeen wel mogelijk de onderlinge verschillen in de aequivalente snelheden terug te brengen op een hoogteverschil van de anemometers. Het effect blijkt echter klein te zijn en van dezelfde orde van grootte als de andere effecten, die bij de samenstelling van een dergelijke reeks gemiddelde waarden een rol spelen. (Zo scheen b.v. volgens eigen waarneming van Curtiss⁽⁶⁾ de vuurtorenwachter van Scilly de neiging te hebben om de hogere windkrachten wat te laag te schatten, terwijl men in de tropen, waar grote windkrachten vrij zeldzaam zijn, juist de tegenovergestelde neiging heeft).

Van de 9 reeksen is een gemiddelde reeks opgesteld door de overeenkomstige waarden lineair te middelen. Hierbij zijn de tussen haakjes geplaatste aequivalenten, die door de resp. auteurs tengevolge van een gering aantal waarnemingen als minder betrouwbaar zijn opgegeven, niet in het gemiddelde opgenomen. Daar de reeksen niet alle even lang zijn, mag verwacht worden, dat bij windkrachten vanaf 8 Bft. de gemiddelde waarden niet meer een regelmatige opeenvolging bezitten. Het is daarom des te meer opmerkelijk, dat dit wel het geval is.

In de gemiddelde waarden voor 1 Bft. zijn de aequivalenten van varende schepen niet opgenomen.

Tabel 11

Aequivalente snelheden in m/sec.

Bron (met lit.verw.)	Beaufortschaal											hoogte in m. van anemometers boven zeeniveau
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
I Scilly (Simpson 1906 met correctie van Köppen)	1.6	3.5	5.6	7.9	10.4	13.1	16.0	19.1	22.4	25.9		39 (10)
II Krümmel (Gazelle)	(1)	3.2	4.9	6.8	9.3	11.0	14.1	16.7	19.9	23.4		± 6
III Waldo (1888)	(10)	2.2	3.1	5.4	7.3	10.2	13.3	15.5	17.0	19.2		9 en 26
IV Gallé (1914)	(11)	2.2	3.5	5.5	7.8	10.1	12.2	14.4				7 en 12
V "Meteor"(tropen)(1926) Georr.met -0.5 m/sec.	(12)		3.6	5.6	7.7	9.9	11.9	(13.8)				32
VI "Meteor"(hogere Zuid.br)(12) Georr.met -1.0 m/sec.	(12)		(3.0)	6.5	9.0	11.6	14.4	17.3	20.1	22.5		32
VII "Schwaberland"- "Friesen-land" (1936/37). Georr.(14) met -0.3 m/sec.	(13)	2.6	4.3	6.1	7.9	10.0	11.7	(13.5)				?
VIII "Terxel"- "Tersch. bank" (1951)	(14)	1.3 [±]	3.2 [±]	5.8	7.9	10.3	12.4	14.4	(16.8)			7
IX Duitse Lichtschepen (1953)	(15)	1.3 [±]	3.2 [±]	6.1	7.8	9.9	12.1	14.1	16.3	17.9	20.1	25.8
Gemiddelden	(1.4)	3.4	5.7	7.8	10.2	12.4	15.1	17.8	20.4	23.1	25.8	
V = 1.514 B 1.183	1.5	3.4	5.6	7.8	10.2	12.6	15.1	17.7	20.4	23.1	25.8	

[±] gereduceerd tot een snelheid op 10 m hoogte.

De tussen haakjes staande aequivalenten zijn niet in de gemiddelden van 7 en 8 Bft. opgenomen.

Tabel 12

A
Gemiddelde overeenkomstige windsnelheden recht-
streeks uit waarnemingen op zee.

Schaal- cijfer Beaufort	meters per sec.		zeewijlen per uur		
	gemiddeld	grenzen	gemiddeld	vuistregel	grenzen
0	0	≤ 0.6	0		< 1
1	1.5	0.7- 2.3	3	4xB-1	1- 4
2	3.4	2.4- 4.4	7	4xB-1	5- 8
3	5.6	4.5- 6.6	11	4xB-1	9-12
4	7.8	6.7- 8.9	15	4xB-1	13-16
5	10.2	9.0-11.3	19	4xB-1	17-21
6	12.6	11.4-13.8	24	4xB	22-26
7	15.1	13.9-16.4	29	4xB+1	27-31
8	17.7	16.5-19.0	34	4xB+2	32-36
9	20.4	19.1-21.7	39	4xB+3	37-41
10	23.1	21.8-24.5	45	4xB+5	42-47
11	25.8	24.6-27.3	51	4xB+6	48-53
12	-	> 27.3	-		> 53

B
Internationaal 1946

zeewijlen per uur	
gemiddeld	grenzen
0	< 1
2	1- 3
5	4- 6
9	7-10
13	11-16
18	17-21
24	22-27
30	28-33
37	34-40
44	41-47
52	48-55
60	56-63
	> 63

De gemiddelde waarden zijn eens op dubbel-logarithmisch papier uitgezet; op dit $\log v - \log B$ diagram blijken alle punten met zeer goede benadering op een rechte lijn te liggen. Uit dit rechtlijnig verband is een formule afgeleid, waarvan de resulterende snelheidswaarden ook in tabel 11 zijn opgenomen. Zoals men ziet is de overeenstemming praktisch volkomen. De betrekking: $v = 1.514 B^{1.183}$ m/sec.

waarin v = windsnelheid en

B = schaalcijfer Beaufort

geeft derhalve het gemiddelde algemene verband weer tussen de schatting van de windkracht op zee en de windsnelheid op een hoogte, die men zou kunnen stellen op ongeveer 10 meter vrij boven het zeeoppervlak.

Uiteindelijk geeft tabel 12 de nieuwe gemiddelde aequivalenten met de grenzen van elk Beaufortschaaldeel zowel in m/sec. als in zeem/uur. De tegenwoordige internationale schaal is ter vergelijking ernaast gezet. De grotere verschillen tussen beide reeksen treden vooral tussen 1 en 5 Bft. op, waar de nieuwe schaal wat hogere aequivalente snelheden geeft, en bij windkrachten groter dan 7 Bft., waar de nieuwe schaal belangrijk geringere snelheden aanwijst.

Samenvatting en conclusies.

- 1) De aequivalenten berekend uit de waarnemingen van Nederlandse lichtschepen komen zeer goed overeen met de overeenkomstige waarden van de Duitse lichtschepen. Het verschil bij lagere windkrachten tussen de beide reeksen kan verklaard worden uit een hoogteverschil in opstelling van de anemometers.
- 2) Er bestaat een duidelijke aanwijzing, dat het verschil in "glad" oppervlak en "ruw" oppervlak op zee bij windkrachten van resp. lager en hoger dan 3 Bft. tot uitdrukking komt in de reeks aequivalenten van de Beaufortschaal, welke berekend zijn uit waarnemingen waarbij de windmetingen verricht worden op een hoogte van minder dan 10 meter boven zee.
- 3) De aequivalenten resp. berekend uit waarnemingen op de Zuid-, Midden- en Noord-Atlantische Oceaan, benevens die op de Noordzee, stemmen onderling zeer goed overeen. Van een storende klimaatsinvloed is alleen sprake op de Zuid-Atlantische Oceaan, waar in de Westenwindgordel de bestendigheid van de wind over lange tijd zeer groot is.
- 4) De gemiddelde reeks aequivalenten voor windschattingen op zee kan weergegeven worden met de formule:

$$v = 1.514 B^{1.183} \text{ m/sec.}$$

waarin v = windsnelheid en

B = schaalcijfer Beaufort.

- 5) De in tabel 12 onder A gegeven reeks aequivalenten, welke ontstaan is als een gemiddelde uit 9 afzonderlijke reeksen, kan geacht worden algemeen op zee te gelden. De resulterende windsnelheden gelden dan voor een hoogte van ongeveer 10 meter vrij boven het zeeoppervlak. Voor praktisch gebruik zijn de resp. waarden, omgezet in de eenheid van zeem/uur gemakkelijk te onthouden. In de tabel wordt hiervoor een vuistregeltje gegeven. Op varende schepen zal de aequivalente snelheid voor een windkracht van 1 Bft. iets hoger (nl. 4 zeem/uur) zijn wegens de invloed van de vaartwind op de schatting.
- 6) De internationale reeks, vastgesteld te Parijs in 1946, blijkt aan verschillende bezwaren onderhevig te zijn, waarvan de belangrijkste zijn:
- a) hij is berekend met een formule, die niet de beste benadering geeft tot de oorspronkelijke meetresultaten.
 - b) Het eraan ten grondslag liggende waarnemingsmateriaal heeft voor de helft geen betrekking op de toestand van de zee, terwijl een groot gedeelte van de waarnemingen, die dit wel hebben, moeilijk tot betrouwbare resultaten aanleiding kan geven.
- 7) Voor oceanografisch werk is het van groot belang dat spoedig nieuwe, verbeterde aequivalenten internationaal worden ingevoerd. In deze sector bestaat n.l. nog dezelfde toestand als algemeen vóór 1926 heerste, daar verscheidene landen, o.a. Engeland, Duitsland en Nederland, ieder voor zichzelf een eigen reeks gebruiken, welke om nu begrijpelijke redenen afwijkt van de tegenwoordige internationale reeks.

Tot slot spreekt de schrijver gaarne zijn dank uit aan Prof.Dr.P.Groen en de Heer J.A. van Duijnen Montijn voor critische discussies over dit onderwerp.

S u m m a r y

In 1950 en 1951 the windvelocity near the Dutch coast has been measured with anemometers erected on board of two Netherlands lightvessels. These measurements have been compared with simultaneous estimates in degrees Beaufort of the windforce. The equivalent windvelocities computed from these observations appear to be identical for both lightvessels. They are also in close agreement with the corresponding values resulting from ship-observations in the South- tropical- and North Atlantic Ocean as well with those from German lightvessels in the North and Baltic sea. They differ however essentially with the equivalents accepted for international use in 1946.

A study into the origin of the international equivalents revealed that these values cannot be considered representative for wind observations at sea, the main objections being: they are computed with help of a formula which does not represent the best approximation to the original measurements, while only half of the basic observational material is related to the state of the sea surface in connection with windforce.

Therefore a new set of equivalents based exclusively on observations made at sea has been proposed for further international use. It is hoped that a general acceptance of this new set will also bring unity in international oceanographical work since in this section various nations are now using their own sets differing more or less from each other.

From the Netherlands observations an important feature of the Beaufort scale has been discovered. It appears that the different behaviour of the sea surface, i.e. "smooth" at low winds and "rough" at higher windforces, is reflected in the series of Beaufort-equivalents, such that the transition from one to the other occurs at a mean windforce of three Beaufort. This feature can be found only from observations with the windvelocity measured at a height of less than 30 feet above the sea surface.

=====

LITTERATUURLIJST

- 1) W.Köppen Neuere Bestimmungen über das Verhältnis zwischen Windgeschwindigkeit und Beaufortskala, aus dem Arch. Seewarte Hamburg, XXI, 1898, No.5.
- 2) W.Köppen Beaufortskala und Windgeschwindigkeit, Meteor.Z., 1916, S.88/89.
- 3) W.Köppen Über geschätzter Windstärke und gemessene Windgeschwindigkeiten, Ann.Hydr.u.Mar.Meteor., 1926, S.362/366.
- 4) G.C.Simpson The Beaufort scale of windforce, Report of Dir.of Met.Off., No. 180, 1906.
- 5) G.C.Simpson The velocity equivalents of the Beaufort scale, Proff. Notes No.44, Met.Off., Vol.IV, No.4, 1926.
- 6) R.H.Curtiss An attempt to determine the velocity equivalents of windforces estimated by Beaufort scale, Qu.J.Roy.Meteor.Soc., 1897, 24-61.
- 7) G.Pogadi Die Abhängigkeit der Windstärke von der Windrichtung bei "Adler"grund-Feuerschiff, Ann.Hydr. 1937, 65, S.133.
- 8) H.U.Sverdrup Oceanography for meteorologists, London 1945.
- 9) H.U.Roll Gibt es eine "kritische Windgeschwindigkeit" für Prozesse an der Grenzfläche Wasser-Luft?, Geof.pura e appl., 1952, 21.
- 10) F.Waldo Vergleich von Beaufortskala und Windgeschwindigkeit, Meteor.Z., 1888, S.239/240.
- 11) P.H.Gallé Waarnemingen in de Noord-Atlantische Oceaan in Mei 1914, hoofdzakelijk ter vergelijking van gemeten en geschatte windkracht en -richting, K.N.M.I. No.102; Meded. en Verh. No.19, 1915.
- 12) E.Kuhlbrodt Vergleich geschätzter Windstärke mit gemessenen Windgeschwindigkeiten auf See, Ann.Hydr.u.Mar.Meteor., 1936, S.14/23.
- 13) H.Regula Bodenwindbeobachtungen und Höhenwindmessungen auf M.S. "Schwabenland", Ann.Hydr.u.Mar.Meteor., 1937, S.307.
- 14) H.Regula Geschwindigkeitsverteilung in Warm- und Kaltluftströmungen über See, Ann.Hydr.u.Mar.Meteor., 1937, S.310.
- 15) H.Seilkopf Handbuch d. Fliegerwetterkunde, Bd.II (Maritieme Meteorologie), Berlin 1939; S.44.
- 16) H.U.Roll Zur Reduktion der Windgeschwindigkeitsmessungen am Bord auf 10 m Höhe (Vorl.Mitt.), Ann.d.Meteor., 1951, S.410.
- 17) C.Braak Het klimaat van Nederland, K.N.M.I., No.102, Meded. en Verh. 32, 1929 p.27.
- 18) K.N.M.I. Handleiding voor het verrichten van Meteorologische waarnemingen op zee, K.N.M.I., No.118a, 1949.

I N H O U D S O P G A V E

	blz.
Deel I	
Windmetingen en -schattingen aan boord van Nederlandse lichtschepen	1
De contactanemometer	3
Kritische beschouwing van de windschattingen	5
Het gevonden verband tussen Beaufortschaal en windsnelheid	7
Deel II	
De oorsprong van de internationale aequivalenten.	12
Deel III	
Een nieuwe reeks aequivalenten	17
Samenvatting en conclusies	21
Litteratuurlijst	

=====