

DE EVALUATIE VAN HET WINDWAARSCHUWINGSSYSTEEM MOERDIJKBRUG

Conclusies en aanbevelingen

R-84-31

Drs. P.I.J. Wouters

Leidschendam, 1984

Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV

SAMENVATTING

In aansluiting op het ontwikkelen en plaatsen van een windwaarschuwings-systeem voor het verkeer over de Moerdijkbrug is een evaluatie-onderzoek uitgevoerd. Het systeem geeft weggebruikers een snelheidsadvies van 70 km/uur wanneer windomstandigheden optreden die zijdelingse voertuig-uitwijkingen van 0,80 m kunnen veroorzaken indien de wettelijk toegestane rij snelheden van 80 km/uur voor o.a. vrachtverkeer en 100 km/uur voor o.a. personenauto's aangehouden zouden worden. Het evaluatie-onderzoek beoogde na te gaan of de in werkelijkheid optredende uitwijkingen in het gebied van de kritische waarde overeenstemmen met de voorspelde uitwijkingen. Voor deze voorspellingen is een rekenmodel opgesteld dat als inganggegevens de gedurig te meten snelheid en richting van de op het voertuig inwerkende heersende wind hanteert. Omdat deze windgegevens niet ter plekke van het voertuig gemeten kunnen worden, is in het onderzoek tevens nagegaan in hoeverre de gegevens "op afstand", namelijk nabij het zuidelijke bruggehoofd, nauwkeurig te bepalen zijn. Tenslotte is het windprofiel over de lengterichting van de brug en in het bijzonder rond de bruggehoofden onderzocht, teneinde te bepalen van welke windomstandigheden het systeem dient uit te gaan.

De voornaamste algemene conclusies en aanbevelingen van het onderzoek zijn:

- Op plaatsen met extra grote inwerking van wind op het verkeer, en waar de luchtstroming overigens geen sterke deterministische componenten bevat, vormt het passeren van vrachtwagens en bussen aan hun lijzijde de meest gevaarlijke windhindersituatie.
- Voor deze situatie kan een geoptimaliseerde versie van het rekenmodel de optredende zijdelingse uitwijkingen met een standaarddeviatie van 0,18 m voorspellen.
- Bij verdere toepassing van het systeem dient steeds nagegaan te worden of de systeemwindmeter de op voertuigen inwerkende wind correct vaststelt.
- Een naar rijrichting onderscheiden gebruik van het systeem verdient de voorkeur.

Specifiek voor de Moerdijkbrug geldt dat:

- de windomstandigheden van het brugmidden als uitgangspunt genomen

dienen te worden en dat deze omstandigheden door de op het zuidelijke landhoofd geplaatste windmeter voldoende nauwkeurig bepaald worden;

- het gebruiken van het geoptimaliseerde rekenmodel binnen het systeem en het naar rijrichting onderscheiden toepassen van het systeem aanbevolen wordt.

INHOUD

Voorwoord

1. Overzicht van de onderwerpen van evaluatie
2. De wind die op het voertuig inwerkt
3. De waargenomen en de voorspelde voertuiguitwijkingen
4. Windmeting op het zuidelijk landhoofd
5. De invloed van het landhoofd op de luchtstroming
6. Conclusies en aanbevelingen

Literatuur

Afbeeldingen A t/m E

Tabellen A t/m C

Bijlagen

VOORWOORD

In 1979 is het consult "Een windafhankelijke adviessnelheid voor het wegverkeer op de Moerdijkbrug" (lit. 1) uitgebracht aan de Hoofddirectie van de Waterstaat. Het bevatte een verantwoording van de geadviseerde instelwaarden van een door Rijkswaterstaat op deze brug geïnstalleerd windwaarschuwingssysteem. Ondermeer omdat het consult voor een belangrijk deel op theoretische kennis berustte en soms bij ontbreken van literatuurgegevens met schattingen volstaan moest worden, werd een evaluatieonderzoek in de praktijk aanbevolen. Op verzoek van de Dienst Verkeerskunde werd daartoe een onderzoekopzet (lit. 2) opgesteld. Dit leidde ertoe dat door het Instituut voor Wegtransportmiddelen TNO een veldonderzoek uitgevoerd werd, waarvan de resultaten vastgelegd zijn in het rapport "De metingen ten behoeve van de evaluatie van het windwaarschuwingssysteem Moerdijkbrug" (lit. 3).

Deze nota bevat de conclusies en aanbevelingen welke de Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeerveiligheid SWOV op grond van genoemde metingen verbindt aan de evaluatie van het waarschuwingssysteem.

De nota is samengesteld door drs. P.I.J. Wouters (Afdeling Pre-crash onderzoek SWOV).

Prof.ir. E. Asmussen,

Directeur Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeerveiligheid SWOV

1. OVERZICHT VAN DE ONDERWERPEN VAN EVALUATIE

Dit hoofdstuk beoogt in het kort aan te geven welke onderwerpen, en waarom, in de evaluatie aan de orde gekomen zijn. Dit teneinde een navolgende bespreking van de meetresultaten te situeren. Een uitvoerige behandeling hiervan, de onderzoekopzet en de gevolgde werkwijzen is te vinden in de reeds genoemde stukken (lit. 1, 2 en 3).

In het consult (afgekort) "Moerdijkbrug" (lit. 1) vormt een onderzoek van Weir e.a. (lit. 4) een belangrijke component. In feite was dit namelijk de enige studie waarin gegevens voorkwamen over de dwarsverplaatsingen van voertuigen in die windhindersituaties, welke door de SWOV op grond van de probleemanalyse omtrent de omstandigheden op de Moerdijkbrug het meest relevant werden geacht. Die situatie is te omschrijven als: het bij harde wind aan de lijzijde passeren van een vrachtwagen of bus door een windgevoelig voertuig. Het onderzoek van Weir e.a. betrof overigens een combinatie van windtunnelmetingen aan schaalmodellen, simulaties met behulp van mathematische modellen van zgn. mens/machine-systemen en een beperkt aantal veldmetingen.

De uit dit onderzoek komende gegevens werden zodanig verwerkt dat voor een willekeurige windsnelheid en windhoek waarden voor de uitwijking geschat konden worden. Effecten van kop- en staartwind werden daarbij verdisconteerd. Het een en ander voor passeersnelheden van 20 km/uur en voor een voertuig met ongeveer de aerodynamische eigenschappen van een VW-busje, bestuurd door een "modale" bestuurder. Dit nu leidde tot een model voor de berekening van een voertuigdwarsverplaatsing, op grond waarvan instelwaarden voor het windwaarschuwingssysteem op de Moerdijkbrug afgeleid zijn.

In genoemd model wordt gebruik gemaakt van de snelheid en de hoek van de heersende (ook wel "ware") wind die op het voertuig inwerkt. De windomstandigheden kunnen in de praktijk niet ter plekke van elk passerend voertuig ter hoogte van zijn aerodynamisch drukpunt gemeten worden. In de uitvoering van het windwaarschuwingssysteem worden de windomstandigheden gemeten met behulp van een op het zuidelijk landhoofd aan een mast bevestigde windmeter. Deze locatie is vooral om praktische redenen gekozen, verband houdend met aanleg- en onderhoudskosten, bereikbaarheid, enz.

In de probleemanalyse uit het consult "Moerdijkbrug" (lit. 1) kwam naar voren dat de landhoofden bij bepaalde windrichtingen de luchtstroming mogelijk sterk kunnen beïnvloeden. Het zou daarom wenselijk kunnen zijn de daar heersende windomstandigheden tot uitgangspunt te kiezen in plaats van die midden op de brug, waar theoretisch de hoogste windsnelheden te verwachten zijn.

De hiervoor op hoofdpunten weergegeven achtergronden leidden tot de volgende onderzoeksvragen en -onderwerpen, waartoe het evaluatie-onderzoek werd ingericht.

- Als de windsnelheid en -hoek ter plekke van het passerende voertuig (= VW-bus) bekend zijn, voorspelt het opgestelde model dan correct de voertuiguitwijkingen?

De activiteiten en resultaten uit het evaluatie-onderzoek die met de beantwoording van deze vraag van doen hebben worden (in het IW-rapport (lit. 3) en hierna) aangeduid met: de verificatiemetingen.

- In hoeverre kunnen "op afstand" de windsnelheid en -hoek ter plekke van het passerende voertuig ter hoogte van zijn drukpunt correct bepaald worden? Deze vraagstelling is in twee delen gesplitst:

o Hoe verhouden de windomstandigheden op de weg (op 1 m, 1,60 m, 2,20 m en 2,80 m aan de westelijke brugzijde) zich tot die (op 13,5 m boven het midden van de brug) door de meter van IW-TNO vastgesteld?

o Hoe verhouden de windomstandigheden gemeten door de windmeter van DVK op het zuidelijke landhoofd zich tot die van de 13,5 m hoge IW-meter?

De hiermee verband houdende activiteiten en resultaten worden aangeduid met: het correlatie-onderzoek en (deels) de windprofielmetingen.

- Hoe variëren de windomstandigheden in lengterichting over de brug?

Gezien ervaringen opgedaan in de loop van het onderzoek, zijn de hiervoor uit te voeren metingen geconcentreerd op het noordelijk deel van de brug rond het bruggehoofd.

Deze activiteiten worden aangegeven met: (het overige deel van) de windprofielmetingen.

Tenslotte zij vermeld dat het er in het consult "Moerdijkbrug" (lit. 1) met nadruk op gewezen is dat het daarin voorgestelde windwaarschuwingssysteem niet zonder meer toegepast kan worden in situaties waar de windstoring duidelijk deterministische componenten bevat. De metingen ten

behoefte van het evaluatie-onderzoek zijn alle verricht op en rond de Moerdijkbrug, een plaats waar dit soort storingen niet voorkomt. Waar derhalve in het volgende ingegaan wordt op de generaliseerbaarheid van de bevindingen, blijft dit aspect dan ook uitdrukkelijk buiten beschouwing.

2. DE WIND DIE OP HET VOERTUIG INWERKT

De snelheid en de richting van de heersende wind die op het lichtere (inhalende) voertuig inwerkt, vormen de variabelen in de functie waarmee de tijdens het passeren optredende dwarsverplaatsingen van dit voertuig berekend worden. De nauwkeurigheid waarmee deze variabelen vastgesteld (kunnen) worden, bepaalt daarom mede de juistheid van de uitkomsten van die berekeningen. De windsnelheid en -richting worden echter niet ter plekke van het voertuig gemeten, zodat een afwijking in hun waarden geïntroduceerd wordt. Kennis van deze afwijking is van belang bij de waardering van de resultaten van de verificatiemetingen. Anderszijds vormt het een gegeven in het onderwerp van de locatie van de permanent te stationeren windmeter van het waarschuwingssysteem.

In voornoemd kader zijn gelijktijdig ter plekke van het midden van de brug ter onderlinge vergelijking windmetingen verricht op 13,5 m hoogte en op 1 m, 1,60 m, 2,20 m en 2,80 m hoogte gerekend vanaf het wegdek, terwijl tevens de meetgegevens van de op het zuidelijke landhoofd geplaatste DVK-meter geregistreerd werden. De metingen op 13,5 m (ca. 30 m boven NAP) worden daarbij als metingen aan de "ongestoorde" luchtstroming beschouwd en als vergelijkingsmaatstaf gehanteerd.

In dit hoofdstuk wordt alleen ingegaan op het verband tussen de meetresultaten van de ongestoorde luchtstroming en die in de buurt van het wegdek. In een volgend hoofdstuk komt het onderwerp van de locatie van de systeemwindmeter aan de orde.

In termen van gemiddelde waarden en spreidingen daar omheen nu eerst het onderwerp: windsnelheid

De bovenste helft van tabel 3 uit lit. 3 (zie Bijlage 2.3) geeft een overzicht van de analyseresultaten (gebaseerd op de cumulatieve frequentiediagrammen en histogrammen van fig. 65 t/m 72 uit lit. 3). Wanneer de mediaanwaarden van de windsnelheid op 13,5 m hoogte uit deze tabel op 100% gesteld worden, kan het percentage dat de mediaan op een lagere hoogte hiervan heeft, berekend worden. De uitkomsten (met toevoeging van het punt 0 m hoogte, waar de windsnelheid 0 m/s is) zijn getekend in Afbeelding A.

De stippellijn daarin geeft het vermoedelijke verloop van de windsnelheidsmediaan met de hoogte aan.

Het volgende valt nu te constateren:

- Het geschetste beeld komt kwalitatief overeen met hetgeen uit in de meteorologie gebruikte formules als de zogenoemde machtwet of het logaritmisches windprofiel (zie lit. 1) zou voortkomen. Opmerkelijk is evenwel dat de 100%-waarde overschreden wordt, en wel beginnend rond de 2,20 m hoogte en oplopend op 2,80 m hoogte tot circa 119%. Een plausibele verklaring daarvoor lijkt te liggen in een verhoging van de windsnelheid als gevolg van opstuwung van wind, veroorzaakt door de aanwezigheid van het bruglichaam in het stromingsveld.

- Op 1,60 m hoogte - met andere woorden, op een hoogte om en nabij het aerodynamisch drupunt van de hier in beschouwing genomen voertuigen - heeft de windsnelheidsmediaan een waarde van circa 75% van die op 13,5 m hoogte. Dit is vastgesteld voor een windrichting van de ongestoorde wind van circa 55°, een windrichting die relevant is voor de windhinder in passeersituaties.

Wat de variabiliteit van de windsnelheid rond zijn gemiddelde betreft, geven de frequentiediagrammen (van fig. 65 t/m 72 uit lit. 3) de indicatie dat deze met het oog op het soort gebruik van de windgegevens voldoende gering is. Zo valt op te merken dat de curven in deze diagrammen nagenoeg gelijk oplopen. In kwantitatieve zin kan ook als volgt - en hierna voor de metingen op 1,60 m hoogte (fig. 67 en 68 uit lit. 3, zie Bijlage 2.6 en 2.7) uitgewerkt - het resultaat beschouwd worden. Wanneer de onderste en bovenste kwartielen weggelaten worden, met andere woorden, als de 50% van de populatie tussen de kwartielen als maatstaf voor de spreiding gehanteerd worden, dan blijkt voor de variatie rond de mediaan uit fig. 67 (resp. fig. 68):

hoogte:	mediaan:	variatie:
1,60 m	6,8 m/s (6,7 m/s)	5,2 - 8,0 m/s (5,2 - 8,0 m/s)
13,5 m	8,5 m/s (8,4 m/s)	7,5 - 9,1 m/s (7,4 - 9,1 m/s)

Kortom, op lagere hoogte varieert, zoals te verwachten is, de windsnelheid wat meer, namelijk 2,8 m/s (2,8 m/s) tegen 1,6 m/s (1,7 m/s) op 13,5 m, maar dit verschil is voor het gebruiksdoel alleszins acceptabel.

Als tweede punt van beschouwing nu, en weer in termen van gemiddelde waarden en spreiding: hoe verhoudt de windrichting gemeten in de buurt van het wegdek zich tot die van de "ongestoorde" luchtstroming.

De onderste helft van tabel 3 (zie Bijlage 2.3) (en fig. 73 t/m 80 uit lit. 3) geven voor de mediaanwaarden van de windrichting op lage hoogten de volgende verschillen te zien met die van de metingen op 13,5 m hoogte (N.B. de conventie die het IW-rapport voor de windrichting hanteert, wordt hier gevolgd):

hoogte :	1 m	1,60 m	2,20 m	2,80 m
verschil:	-50°	-19°	-7°	-6°

Deze waarden geven het beeld van een luchtstroming die "schroefvormig" naar de uiteindelijke op grote hoogte waargenomen windrichting toedraait. Dit niet voorziene verschijnsel werd reeds tijdens de uitvoering van de metingen geconstateerd. Het trad op zowel in aan- als afwezigheid van verkeer. Instrumentele fouten werden niet gevonden; menselijke waarnemingen stemden overeen met instrumentele. De genoemde draaiing gaat tegen de rijrichting van het verkeer in, zodat verklaringen niet gezocht kunnen worden in een door het verkeer "meesleuren" van de luchtstroom. Het ziet er derhalve naar uit dat de oorzaak ervan gelegen zal zijn in de invloed die bruglichaam en "wegmeubilair" op de luchtstroming uitoefenen.

Teneinde verschillen in de windomstandigheden over de lengterichting van de brug te leren kennen, zijn aan de noordzijde een aantal metingen van de windsnelheid en -richting verricht. Dit op 2,80 m hoogte boven het brugoppervlak. Verscheidene meetpunten waren redelijk ver van het bruggehoofd op de brug gesitueerd. De meetresultaten hiervan zijn in tabel 5 uit lit. 3 (zie Bijlage 2.5) samengevat. Op te merken valt dat voor een sterk verschillende windhoek van de ongestoorde luchtstroming, namelijk van rond de -123° (in plaats van -53°) ook hier een verschil in de mediaanwaarden op 2,80 m hoogte van -10° à -7° geconstateerd wordt.

Voornoemde gegevens overziende, valt aan te nemen dat op 2,20 m en 2,80 m hoogte de windrichting circa -7° verschilt van die op 13,5 m hoogte.

In Hoofdstuk 4 worden windmetingen vergeleken van de op het zuidelijk landhoofd geplaatste DVK-meter en die van 13,5 m hoogte. Voor zeer uiteenlopende windrichtingen zal dan tussen beide metingen gemiddeld een verschil van -6,5° blijken op te treden. Behalve dat dit resultaat de aanname van een benodigde correctie van -7° tenminste niet tegenspreekt, wordt het bestaan van een systematische fout in de meetresultaten wel erg waarschijnlijk. Zo'n fout kan gemakkelijk het gevolg zijn van onnauwkeurigheden in de uitrichting van de windmeter.

Ook al wordt nu deze correctie tevens op de uitkomsten van de metingen op 1 m en 1,60 m hoogte toegepast, dan blijft het verschil in windrichting groot. De mate waarin variaties in de windrichting optreden is op die hoogten eveneens groot. Op grotere hoogten vallen de resultaten evenwel gunstiger uit. Als weer de centrale 50% van de populatie als spreidingsmaat genomen wordt, dan blijkt bijvoorbeeld voor de metingen op 2,20 m uit fig. 77 (resp. fig. 78) van lit. 3 (zie Bijlage 2.8, resp. 2.9):

hoogte:	mediaan:	variatie:
2,20 m	-50° (-40°)	$-58^{\circ} \leftrightarrow -39^{\circ}$ ($-46^{\circ} \leftrightarrow -31^{\circ}$).
13,5 m	-53° (-52°)	$-54^{\circ} \leftrightarrow -51^{\circ}$ ($-53^{\circ} \leftrightarrow -49^{\circ}$).

Na het aanbrengen van de zo juist besproken correctie van -7° , blijkt derhalve dat het spreidingsgebied rond de mediaanwaarde van de 2,20 m metingen die van de 13,5 m metingen omsluit. Uit de 13,5 m metingen is daarom de windhoek op 2,20 m hoogte boven de weg af te leiden, zij het dat een marge in rekening gebracht moet worden. Anderzijds is op te merken dat genoemde mate van spreiding een foutenbron vormt bij het voorspellen van voertuiguitwijkingen. Gegeven de U-vorm van de inschakelwaarden is deze bron vooral van belang bij kleine en grote windhoeken, d.w.z. bij kop- en staartwind. Bij de tussenliggende hoeken, d.w.z. bij dwarswind, of te wel de windrichtingen die in de windhindersituatie het meest relevant zijn, is deze bron echter minder van belang.

Uit de omstandigheid dat de windrichting op lage hoogten zowel gemiddeld als in mate van spreiding afwijkt van die op grotere hoogte, wordt opge-
maakt dat er sprake is van het optreden van turbulentie. Er staan alleen meetgegevens ter beschikking van een enkele locatie: de westelijke vluchtstrook, het midden van de brug, op circa 1 m afstand van de geleideconstructie. Aannemelijk lijkt dat deze turbulentie plaatselijk optreedt, en niet bijvoorbeeld over de volle breedte van de brug. Vandaar dat hier volstaan wordt met een enkele correctie van -7° . Zonder aanvullende metingen is zekerheid omtrent deze aanname echter niet te verkrijgen.

3. DE WAARGENOMEN EN DE VOORSPELDE VOERTUIGUITWIJKINGEN

Als de snelheid en de richting van de heersende wind die op het lichtere voertuig inwerkt, bekend zijn, hoe goed kunnen dan de in de werkelijkheid optredende zijdelingse uitwijkingen van dit voertuig tijdens het passeren voorspeld worden door het daartoe opgestelde rekenmodel? Deze vraagstelling vormt het onderwerp van dit hoofdstuk.

In voornoemd kader zijn door IW-TNO 37 zogenoemde verificatiemetingen verricht, waarvan de uitkomsten in tabel 1 uit lit. 3 samengevat zijn (zie Bijlage 2.1). De in deze tabel onder de kolom "zijdelingse uitwijking model 1 (m)" opgenomen waarden zijn berekend uitgaande van de windgegevens afkomstig van de op 13,5 m hoogte aangebrachte windmeter. Op grond van de in het vorige hoofdstuk besproken resultaten zijn deze waarden hier herberekend met toepassing van een correctie op de windsnelheidswaarden van -25% en op de windhoeken van -7° ten opzichte van de overeenkomstige meetgegevens van de 13,5 m meting. Correcties en berekeningsresultaten zijn gegeven in Tabel A.

De genoemde 37 metingen zijn overigens zodanig in vier groepen verdeeld dat naar windsnelheid en -richting voldoende spreiding naar windomstandigheden verkregen is, voorzover met het oog op een verificatie van het model gewenst. Dit moge blijken uit Afbeelding B, waarin de ligging van de meetpunten ten opzichte van de zgn. U-vormige kromme van instelwaarden aangegeven wordt.

De resultaten van de verificatiemetingen worden hierna vanuit twee verschillende gezichtspunten bezien, namelijk:

- een vanuit de generaliseerbaarheid van het rekenmodel: in hoeverre is dit model ruimer toepasbaar enz.; en
- een vanuit de optimalisatie van het model voor de specifieke locatie van de Moerdijkbrug: in hoeverre is het model zo goed mogelijk bij te stellen voor het gebruik in het windwaarschuwingssysteem van de brug.

De resultaten uit Tabel A feitelijk overziende, blijkt dat van de 37 waarnemingen er 21 (nagenoeg) geheel overeenstemmen met de berekende uitwijkingen. In 10 gevallen levert het model te hoge en in 6 te lage waarden. Gemiddeld geeft het model 0,08 m te hoge waarden, met een standaardafwijking van 0,20 m.

Wanneer met behulp van lineaire regressie getracht wordt een rechte te vinden die hoort bij zo klein mogelijke verschillen tussen waarneming en berekening (zgn. curve fitting) ontstaat het beeld van Afbeelding C. Daarbij hoort een correlatiewaarde van $R = 0,62$, m.a.w. er is sprake van een duidelijke relatie tussen de waarnemingen en de voorspellingen, zij het dat er verschillen blijven bestaan die niet door het model verklaard worden. De waarde van $R^2 = 0,39$ houdt namelijk in dat een kleine 40% van de variantie verklaard wordt. Bij de waardering van deze uitkomsten moet overwogen worden hoe voor het windwaarschuwingssysteem van het model gebruik gemaakt wordt. Uit het model zijn namelijk zogenoemde instelwaarden van kritische windsnelheden en -richtingen afgeleid. Deze waarden zijn in het systeem geïmplementeerd. Het systeem vergelijkt de instelwaarden met die van de gedurig gemeten, in werkelijkheid optredende wind. Een belangrijk facet bij dit vergelijken is nu dat het waarschuwingssysteem (vrijwel) direct geactiveerd wordt zodra instelwaarden voor de eerste maal overschreden worden. Het geven van het snelheidsadvies blijft vervolgens over een zekere tijdsspanne gehandhaafd. Met andere woorden, in de systeemwerking is enerzijds het fluctuerende karakter van natuurlijke wind verdisconteerd dat ook momentaan tot gevaarlijke situaties aanleiding kan geven. Anderzijds reageert het systeem bij een eerste overschrijding, terwijl dan de "gemiddelde" windomstandigheden nog duidelijk onder de kritieke grens kunnen liggen. Bij een dergelijke wijze van gebruik van het rekenmodel, is de nauwkeurigheid van zijn uitkomsten, zoals die in de waarden van R en R^2 tot uitdrukking komt, bevredigend te achten.

Tenslotte zij opgemerkt dat, zou het model zodanig aangepast worden dat de berekende uitwijkingen 0,12 m hoger uitvallen, 84% van de waarnemingen binnen de uit het model afgeleide grenswaarden voor het instellen van het snelheidsadvies (de U-vormige kromme) vallen.

Teneinde na te gaan in hoeverre zijdelingse uitwijkingen voorspeld kunnen worden als ofwel alléén de windsnelheid of wel alléén de windrichting als variabele gebruikt zou worden, is eenzelfde lineaire regressieberekening als boven omschreven uitgevoerd. De resultaten, weergegeven in Afbeeldingen D en E, geven aan dat de voorspellingen dan drastisch verslechteren.

Gegeven het voorgaande moet opgemerkt worden dat in dit evaluatie-onderzoek duidelijk een geringere mate van overeenstemming vastgesteld is tussen analytisch en in veldexperimenten verkregen resultaten dan in het rapport van Weir e.a. (lit. 4) het geval lijkt. Dit kan het gevolg zijn van verschillende oorzaken. Genoemd is reeds de spreiding in de windhoek. Een ander punt is dat op het moment dat de vrachtwagen ingehaald wordt al mee- of tegengestuurd kan worden teneinde de inwerking van de heersende wind te compenseren. De stand van het stuur, c.q. de tijd nodig om een andere stuurstand te bewerken, beïnvloedt uiteraard de grootte van de dwarsverplaatsing. Ook de vlagerigheid van natuurlijke wind kan een rol gespeeld hebben. Zo zullen met name variaties in windsterkte op het moment dat het inhalende voertuig uit de windschaduw van de vrachtwagen komt zodra deze gepasseerd is, de zijdelingse uitwijkingen beïnvloeden. Tenslotte zij opgemerkt dat verschillen tussen voertuigbestuurders en in de handelingen van één en dezelfde bestuurder zeker een rol gespeeld hebben. Behalve dat in het onderzoek van Weir e.a., de windtunnelmetingen en de mens/machine-simulaties uiteraard onder laboratoriumomstandigheden uitgevoerd zijn, konden de veldexperimenten ook wat de windomstandigheden betreft onder gecontroleerde condities verricht worden. Genoemde problemen zullen in dit onderzoek dan ook van geringe betekenis geweest zijn.

De resultaten van de verificatie nu ten aanzien van het gezichtspunt van generaliseerbaarheid samenvattend, kan gezegd worden dat:

- het opgestelde rekenmodel voor het soort van windhinderomstandigheden waarvoor het ontwikkeld is, thans het meest geschikte voorhanden zijnde hulpmiddel is voor het met een redelijke mate van nauwkeurigheid berekenen van de zijdelingse uitwijkingen van voertuigen;
- het model gemiddeld op enigszins te hoge (circa 0,08 m) waarden uitkomt, waarvoor te compenseren valt;
- het model een spreiding in zijn uitkomsten van ongeveer 0,20 m te zien geeft, waarmee bij toepassingen van het model rekening gehouden dient te worden;
- het model circa 40% van de variantie tussen waarnemingen en voorspellingen verklaart en dat, gezien onder meer wisselvalligheden in windomstandigheden, verschillen tussen en binnen bestuurders, enz., zoals die in de praktijk voorkomen, hieraan door wijzigingen aan te brengen in het model waarschijnlijk relatief weinig te verbeteren valt.

Wat de optimalisatie van het rekenmodel voor de situatie van de Moerdijk-brug betreft, zijn door IW-TNO berekeningen verricht, beschreven par. 5.1 van lit. 3. Resultaten hiervan worden (onder meer) gegeven in tabel 1 (zie Bijlage 2.1) van genoemd rapport. De kolom "model 2 [m]" geeft de lineair geoptimaliseerde waarden voor zijdelingse uitwijkingen uitgaande van de windgegevens van de meter op 13,5 m hoogte middenbrug, terwijl voor de uitkomsten onder "model 3 [m]" uitgegaan is van de gegevens van de DVK-meter op het landhoofd. De optimalisatie is derhalve gebaseerd op windgegevens waarop geen correctie toegepast zijn. Het blijkt nu dat:

- met optimalisatie de standaarddeviatie van het verschil tussen waargenomen en berekende zijdelingse uitwijkingen enigszins te verkleinen en wel tot 0,18 m;
- de U-vormige kromme van instelwaarden wat verschuift. Lag de centrale as voorheen op circa 80° , dit wordt nu circa 70° . De bestaande asymmetrie in de U-kromme wordt daardoor van meer belang. Hiermee dient rekening gehouden te worden bij het instellen van het snelheidsadvies in geval van verschillende rijrichtingen;
- het resultaat van de optimalisatie voor de verschillende gebruikte windgegevens nauwelijks verschillen vertoont. Op een verklaring hiervoor en de consequenties hiervan wordt nog teruggekomen bij de bespreking van de correlatiemetingen met de DVK-meter.

4. WINDMETING OP HET ZUIDELIJKE LANDHOOFD

Plaatsing van de systeemwindmeter op het landhoofd heeft om praktische redenen verre de voorkeur. De afstand tussen plaats van meten en van de uiteindelijke windinwerking op het verkeer, verschillen in omgevings-eigenschappen, zoals bijvoorbeeld de "oppervlakteruwheid", tussen beide locaties enz. kunnen evenwel de meetnauwkeurigheid van de voor het verkeer relevante windomstandigheden nadelig beïnvloeden. Teneinde hierin meer inzicht te verkrijgen zijn metingen van de op het zuidelijke landhoofd geplaatste DVK-windmeter en de 13,5 m hoge IW-meter op het midden van de brug voor onderlinge vergelijking gedurende een aantal perioden en bij verschillende windrichtingen geregistreerd. De achterliggende gedachting bij de analyse van dit materiaal is de volgende. Als enerzijds het verband tussen de 13,5 m metingen en die vlak boven het wegdek bekend is (besproken in Hoofdstuk 2) en anderzijds tussen de 13,5 m metingen en die op het zuidelijke landhoofd, dan ontstaat daarmee inzicht in de relatie tussen de landhoofdmetingen en de voor het verkeer van belang zijnde windomstandigheden op de brug. Bij het een en ander worden de 13,5 m metingen (circa 30 m NAP) aan de "ongestoorde" luchtstroming weer als vergelijkingsmaatstaf beschouwd.

De resultaten van de correlatiemetingen (in de vorm van tijdsignalen: fig. 19 t/m 26; histogrammen: fig. 27 t/m 34 uit lit. 3) staan in tabel 2 van lit. 3 samengevat (zie Bijlage 2.2). Bovendien is hier in Tabel B een aantal resultaten vermeld uit een tussentijds door IW-TNO uitgebracht verslag.

Wat de windsnelheid aangaat blijkt in tabel 2 uit lit. 3 dat de mediaanwaarden van de 13,5 m meter resp. 1%, 17% (gemiddeld) en 7% hoger liggen dan de DVK-meter. Worden alle resultaten samen genomen, m.a.w. die van tabel 2 uit lit. 3 (Bijlage 2.2) en die van Tabel B, dan vallen de medianen van 13,5 m meter circa 22% hoger uit. In Hoofdstuk 2 werd geconstateerd dat de 13,5 m meter ongeveer 25% hoger aangeeft dan op hoogten nabij het wegdek gemeten werd. Bij dit op zich bevredigende resultaat dient evenwel opgemerkt te worden dat de spreiding in de uitkomsten groot is: de standaarddeviatie bedraagt circa 17%. De variatie in windsnelheid nabij het wegdek is overigens ook groter dan die op 13,5 m hoogte (zoals

besproken is in Hoofdstuk 2). Genoemde medianen zijn bepaald over een zeker tijdbestek. Uit een aantal verificatiemetingen zijn momentane waarden van de windsnelheid en -richting bekend, zie Tabel C. Hieruit is enige indicatie te verkrijgen - die overigens van beperkte betekenis is - hoe op een zeker moment de windsnelheidswaarden van beide meters kunnen verschillen. Een hieruit berekende correlatiecoëfficiënt van 0,58 bevestigt het beeld dat beide groepen meetgegevens duidelijk overeenstemming vertonen, zij het dat vrij grote onderlinge verschillen kunnen optreden.

Bij de beschouwing van de resultaten voor de windrichting moet een vast verschil van 20° in rekening gebracht worden. De 13,5 m windmeter is namelijk georiënteerd op de lengte-as van de brug. Deze maakt een hoek van 20° met de noord-zuid richting, welke de DVK-meter als referentierichting aanhoudt. Voor de gegevens van tabel 2 uit lit. 3 en de reeds genoemde Tabel B gezamenlijk, blijkt tussen beide verzamelingen windmeetgegevens een verschil van $-6,5^{\circ}$ te bestaan, terwijl voor het verschil tussen de 13,5 m meter en wegdekhoogte in hoofdstuk 2 een verschil van -7° aangenomen werd. Uit de momentane windrichtingswaarden van Tabel C volgt overigens een correlatiecoëfficiënt van 0,93.

Uit het voorgaande volgt derhalve dat met behulp van de DVK-windmeter op het zuidelijke landhoofd de windsnelheid op de brug redelijk nauwkeurig en de windrichting goed vast te stellen is. Deze constatering wordt bevestigd door het resultaat van de in hoofdstuk 3 besproken optimalisaties van het rekenmodel voor zijdelingse voertuiguitwijkingen. Er bleek immers nauwelijks verschil in resultaat vast te stellen, wanneer bij de optimalisatie van de 13,5 m gegevens, dan wel van de landhoofdgegevens uitgegaan werd.

5. DE INVLOED VAN HET LANDHOOFD OP DE LUCHTSTROMING

Oorspronkelijk vormde de vraag hoe het windprofiel over de lengterichting van de brug zich wijzigt, onderwerp in de opzet van het evaluatie-onderzoek. Tijdens de uitvoering van het onderzoek bleek uit waarnemingen van IW-TNO dat de windomstandigheden over de brug geleidelijk ten opzichte van die van het midden van de brug veranderen, maar dat in de buurt van de landhoofden de luchtstroming bijzondere kenmerken vertoont. Vandaar dat besloten is de profielmetingen geconcentreerd rondom de plaats van het landhoofd uit te voeren. Gegeven het meestentijds voorkomen van wind uit zuidwestelijke richtingen kwam het noordelijke landhoofd als onderzoeklocatie het meest in aanmerking. Hier werden op 2,80 m hoogte windmetingen verricht, terwijl ter onderlinge vergelijking tevens de overeenkomende gegevens van de 13,5 m hoge meter geregistreerd werden.

De resultaten staan in de tabellen 4 en 5 van lit. 3 (zie Bijlage 2.4 en 2.5) samengevat.

Wat de windsnelheid betreft blijkt uit de verhouding van de medianen dat het op het bruggehoofd aanzienlijk minder hard waait dan midden op de brug. Als één van de resultaten die met een verhouding van 2,10 een uitkomst heeft die ongeveer met het gemiddelde over alle uitkomsten overeenstemt, als voorbeeld nader bekeken wordt, dan blijkt de mediaan van de 13,5 m metingen op 13,0 m/s uit te komen en die van 2,20 m op 6,2 m/s. Als de 13,5 m metingen zo'n 25% te hoog zijn ten opzichte van wegdekhoogte op het midden van de brug (volgens Hoofdstuk 2), dan bedraagt de mediaan van de windsnelheid op het landhoofd circa 64% van die van het midden van de brug.

De variaties in de windrichting blijken, zoals ook in de IW-rapportage opgemerkt wordt, twee tot driemaal zo groot als die op het midden van de brug. Dergelijke variaties kunnen de koers van voertuigen beïnvloeden. Gegeven evenwel de lagere windsnelheid waarbij de variaties optreden, blijft de windhindersituatie waar het rekenmodel vanuit gaat en waarbij de windgegevens van het brugmidden gebruikt worden, toch als meest kritische te beschouwen.

6. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

Op plaatsen met extra grote inwerking van wind op het verkeer, zoals op hoog gelegen wegvakken op bruggen, dammen, dijken enz. in een vlakke omgeving, en waar de luchtstroming overigens geen sterke deterministische componenten bevat als bijvoorbeeld windschaduwten achter bouwsels, beplanting e.d., vormt het passeren van vrachtwagens e.d. aan hun zijzijde de voor het verkeer meest kritische windhindersituatie. Voor deze situatie is een rekenmodel ontwikkeld waarmee de zijdelingse voertuigafwijkingen van inhalende voertuigen met minder gunstige zijwindgevoelheidseigenschappen en bestuurd door "modale" bestuurders geschat kunnen worden. Dit model blijkt in het gebied van in verband met rijstrook overschrijding gevaarlijk te achten zijdelingse voertuiguitwijkingen van om en nabij de 0,80 m de in werkelijkheid optredende uitwijkingen met een standaarddeviatie van minder dan 0,20 m te kunnen voorspellen. De uit het model voortvloeiende windsnelheids- en -richtingswaarden die in een dwarsverplaatsing van 0,80 m resulteren zijn geïmplementeerd in een windwaarschuwingssysteem. Gelet ook op de inschakelcriteria van dit systeem, die onder meer gebaseerd zijn op een uit gedurig meten van de windomstandigheden verkregen inzicht in de voor het ontstaan van voertuiguitwijkingen meest ongunstige combinatie van windsnelheid en -hoek, is een dusdanige nauwkeurigheid van de schattingen als voldoende te beschouwen voor het in principe gebruiken van het rekenmodel en het systeem waarin zijn uitkomsten verwerkt zijn.

Het verdient evenwel de voorkeur bij verdere toepassingen in de praktijk gebruik te maken van een naar aanleiding van het evaluatieonderzoek enigszins geoptimaliseerde versie van het model. Met deze versie wordt een standaarddeviatie van 0,18 m verkregen. De hiermee analytisch bepaalde voertuiguitwijkingen komen bovendien over de gehele lijn 0,08 m lager te liggen; de waarde die het huidige model gemiddeld te hoog aangeeft. Hierbij zij opgemerkt dat uit overwegingen van geloofwaardigheid een onnodig vroeg instellen van de adviessnelheid zoveel mogelijk vermeden dient te worden. Tenslotte verschuift in deze versie de U-vormige kromme van instelwaarden, zodat de curve meer asymmetrisch rond de centrale as van 90° komt te liggen. Dit maakt een onderscheiden toepassing van de instelwaarden voor de verschillende rijrichtingen meer gewenst. Aan een naar rijrichting onderscheiden toepassing is de voorkeur te geven boven

een waarbij een U-vormige curve opgesteld wordt, samengesteld uit tweemaal het linkerdeel van de U-vormige kromme gespiegeld om de 90° -as. Dit opnieuw vanwege de genoemde geloofwaardigheid.

Tenslotte zij opgemerkt dat voor een juiste werking van een windwaarschuwingssysteem als het onderhavige een correct vaststellen van de windsnelheid en de windrichting noodzakelijk is. Uit het evaluatie-onderzoek is naar voren gekomen dat bij eventuele verdere toepassingen steeds een controle uitgevoerd dient te worden op verschillen, c.q. het verband tussen de gebruikte systeemwindmeterwaarden en de waarden van de werkelijke, op het verkeer inwerkende winden. Een van de belangrijkste redenen waarom het model naar alle waarschijnlijk niet verder is te optimaliseren, is overigens gelegen in de omstandigheid dat de precieze windcondities voor het verkeer slechts bij benadering vastgesteld kunnen worden.

Uit de metingen aan het windprofiel over de Moerdijkbrug is vastgesteld dat de hoogste windsnelheden in het brugmidden voorkomen. Bij de landhoofden komen sterke fluctuaties in windrichting voor die, ondanks de daar optredende veel lagere windsterkten, de koers van voertuigen kunnen beïnvloeden. De passeersituatie bij de meest sterke zijwind van het brugmidden dient evenwel als meest kritische windhinderomstandigheid op deze brug beschouwd te worden. Genoemd effect van de windrichtingsfluctuaties maakt het overigens wenselijk windwaarschuwingen reeds te geven voordat de brug opgereden wordt.

De thans functionerende en op het zuidelijke landhoofd geplaatste DVK-windmeter blijkt binnen het systeem bevredigend te functioneren. Dit wordt voornamelijk geconstateerd op grond van de omstandigheid dat de optimalisatie van het rekenmodel voor de Moerdijkbrug tot resultaten van nagenoeg gelijke nauwkeurigheid leidde als wordt uitgegaan van de windmeetgegevens van de 13,5 m hoge IW-meter, als van die van de DVK-meter. Vergelijkingen overigens tussen windmetingen op voertuighoogte middenbrug en 13,5 m enerzijds en tussen DVK-meter en 13,5 hoge meter anderzijds gaven soms relatief grote verschillen te zien. In dit verband wordt vermeld dat laag boven het wegdek, namelijk op 1 m en 1,60 m hoogte, duidelijke discrepanties in de windrichting met die van 2,20 m, 2,80 m en 13,5 m hoogte vastgesteld zijn. Op grond van een aantal overwegingen is gekozen de op grotere hoogten gemeten windrichtingswaarden te hanteren. Hoewel op dit punt onzekerheid blijft bestaan, lijkt dit een gelukkige

keuze, onder meer omdat geen tegenspraak gevonden is met andere meetresultaten, zoals bijvoorbeeld die van de DVK-windmeter.

Tenslotte wordt aanbevolen ook voor de Moerdijkbrug over te gaan op het toepassen van de geoptimaliseerde versie van het rekenmodel voor zijdelingse voertuigafwijkingen, waarbij dan tevens onderscheid wordt gemaakt naar rijrichting. De uit het model voortkomende instelwaarden zijn als bijlage aan deze nota toegevoegd.

Afsluitend nog enkele kanttekeningen bij een eventueel op ruimere schaal toepassen van windwaarschuwingssystemen à la die van de Moerdijkbrug. De oplossing voor windhinderproblemen zoals geboden door dit systeem is er een die gericht is op specifieke locaties waar sprake is van extra grote windinwerking op het verkeer. In principe dienen zich voor dergelijke locaties een aantal alternatieven voor maatregelen en voorzieningen aan, die ieder hun eigen mogelijkheden en beperkingen kennen en die afzonderlijk of in combinatie met elkaar getroffen kunnen worden. Een inventarisatie van de alternatieven is overigens te vinden in lit. 5. Vooraleer gekozen wordt voor een bepaalde oplossing is derhalve een onderlinge afweging van alternatieve mogelijkheden gewenst. Daarbij is een probleemanalyse vereist, omdat een oplossing afgestemd dient te zijn op de probleemsituatie. Wat deze afstemming betreft is samenvattend over de oplossing van een windwaarschuwingssysteem te vermelden:

- het systeem is ontworpen voor situaties waarbij natuurlijke wind zonder deterministische componenten het verkeer beïnvloedt, inhalen van vrachtwagens en bussen (rijksnelheid 80 km/uur) door personenauto's e.d. (rijksnelheid 100 km/uur) optreedt, voor het rijden over rechte of flauw gebogen wegvakken en voor een rijstrookbreedte (3,60 m) waar uitwijkingen van 0,80 m niet tot rijstrookoverschrijdingen zullen leiden;
- het aan het systeem ten grondslag liggende model is in principe aan te passen voor (enigszins) andere rijksnelheden en toelaatbare uitwijkingen;
- geen rekening is gehouden met een samengaan van windstoringen met andere het rijden bemoeilijkende omstandigheden als bijvoorbeeld zichtbeperkingen of gladheid;
- onbekend is in hoeverre verkeersdeelnemers het snelheidsadvies al dan niet opvolgen en hoe e.e.a. doorwerkt op de homogeniteit van de verkeersstroom.

LITERATUUR

- (1) SWOV (Drs. P.I.J. Wouters) (1979). Een windafhankelijke adviessnelheid voor het wegverkeer op de Moerdijkbrug. Consult ten behoeve van de Hoofddirectie van de Waterstaat. R-79-20. SWOV, 1979.
- (2) Wouters, Drs. P.I.J. (1980). Onderzoekopzet met betrekking tot "Een evaluatie van het windwaarschuwingssysteem Moerdijkbrug". R-80-56. SWOV, 1980.
- (3) Elink Schuurman, R. (1984). De metingen ten behoeve van de evaluatie van het windwaarschuwingssysteem Moerdijkbrug. Rapport nummer 700460409. Instituut voor Wegtransportmiddelen TNO, Delft, 1984.
- (4) Weir, D.H., Hoh, R.H., Heffley, R.K. & Teper, G.L. (1972). An experimental and analytical investigation of the effect of bus-induced aerodynamic disturbances on adjacent vehicle control and performance. STI TR-1016-1. Systems Technology Inc., Hawthorne, California, 1972.
- (5) Wouters, drs. P.I.J. (1982). Windhinder voor het wegverkeer. Consult ten behoeve van de Rijkswaterstaat, Dienst Verkeerskunde. R-82-24. SWOV, 1982.

AFBEELDINGEN A T/M E

Afbeelding A. Mediaan van de windsnelheid in % van de mediaan van de windsnelheid op 13,5 m hoogte.

Afbeelding B. Windomstandigheden waaronder de verificatiemetingen zijn verricht (ongecorrigeerde meetpunten en oorspronkelijke U-vormige kromme).

Afbeelding C. Lineaire regressie van de gemeten en berekende zijdelingse uitwijkingen.

Afbeelding D. U berekend - U gemeten als functie van $|v|$, alsmede de lineaire regressie voor deze waarden.

Afbeelding E. U berekend - U gemeten als functie van Δv , alsmede de lineaire regressie van deze waarden.

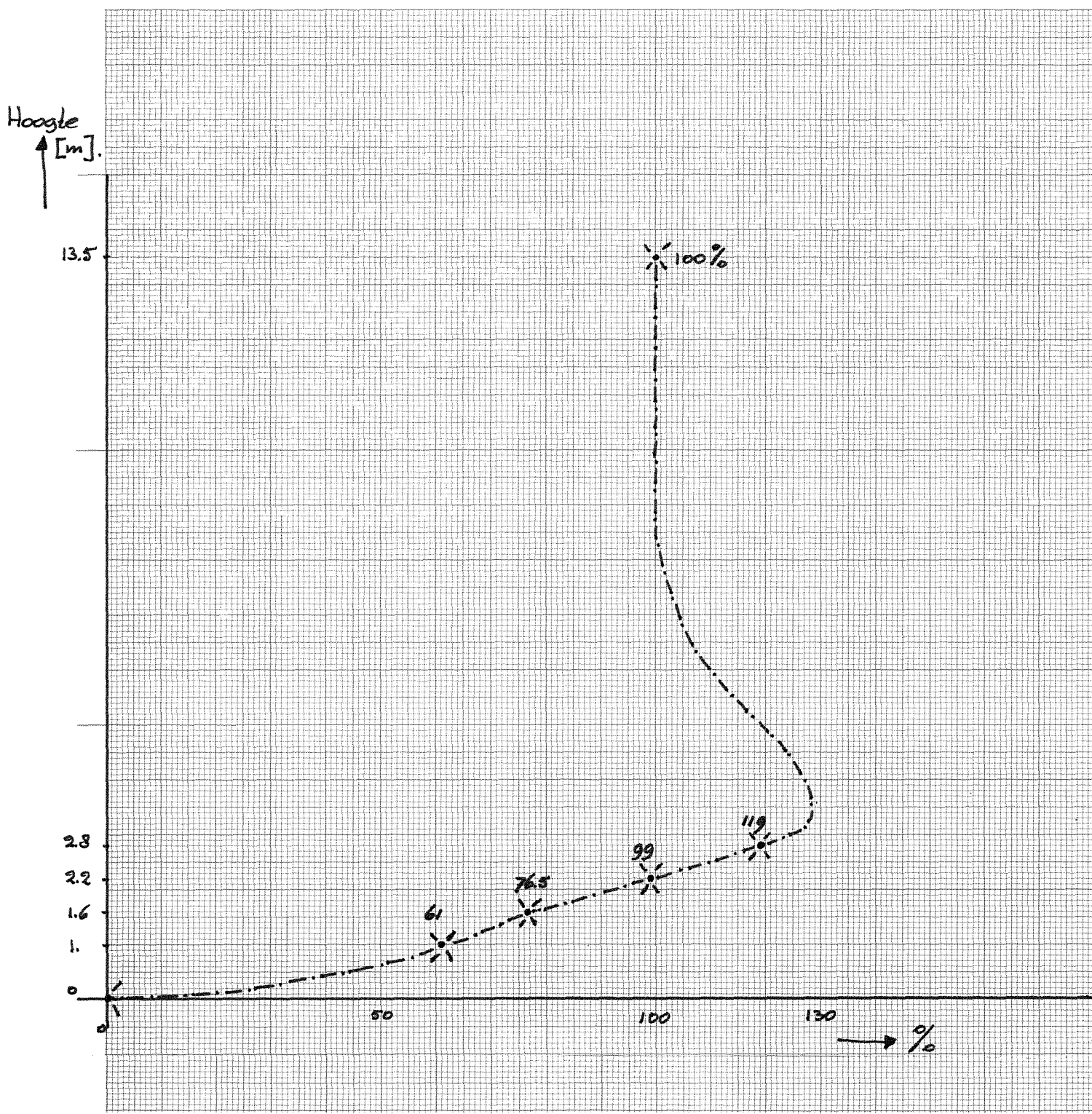
TABELLEN A T/M C

Tabel A. Gecorrigeerde windmeetgegevens ($|v|$: -25% en Δv : -7° t.o.v. tabel 1 uit lit. 3, zie ook Bijlage 2.1) en berekende voertuiguitwijkingen versus gemeten voertuiguitwijkingen.

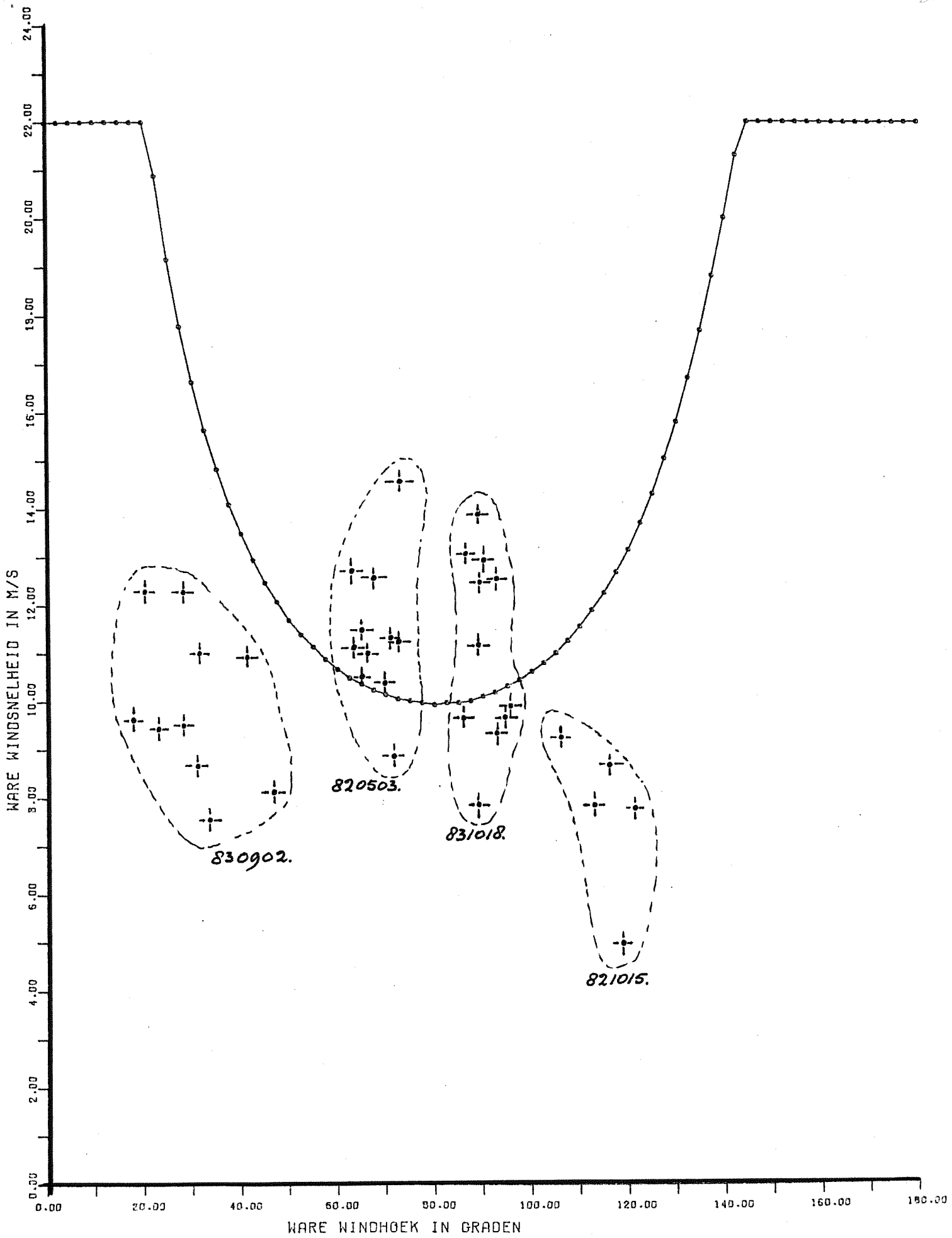
Tabel B.1. Windsnelheden in m/s (Bron: IW-TNO).

Tabel B.2. Windhoeken in graden (Bron: IW-TNO).

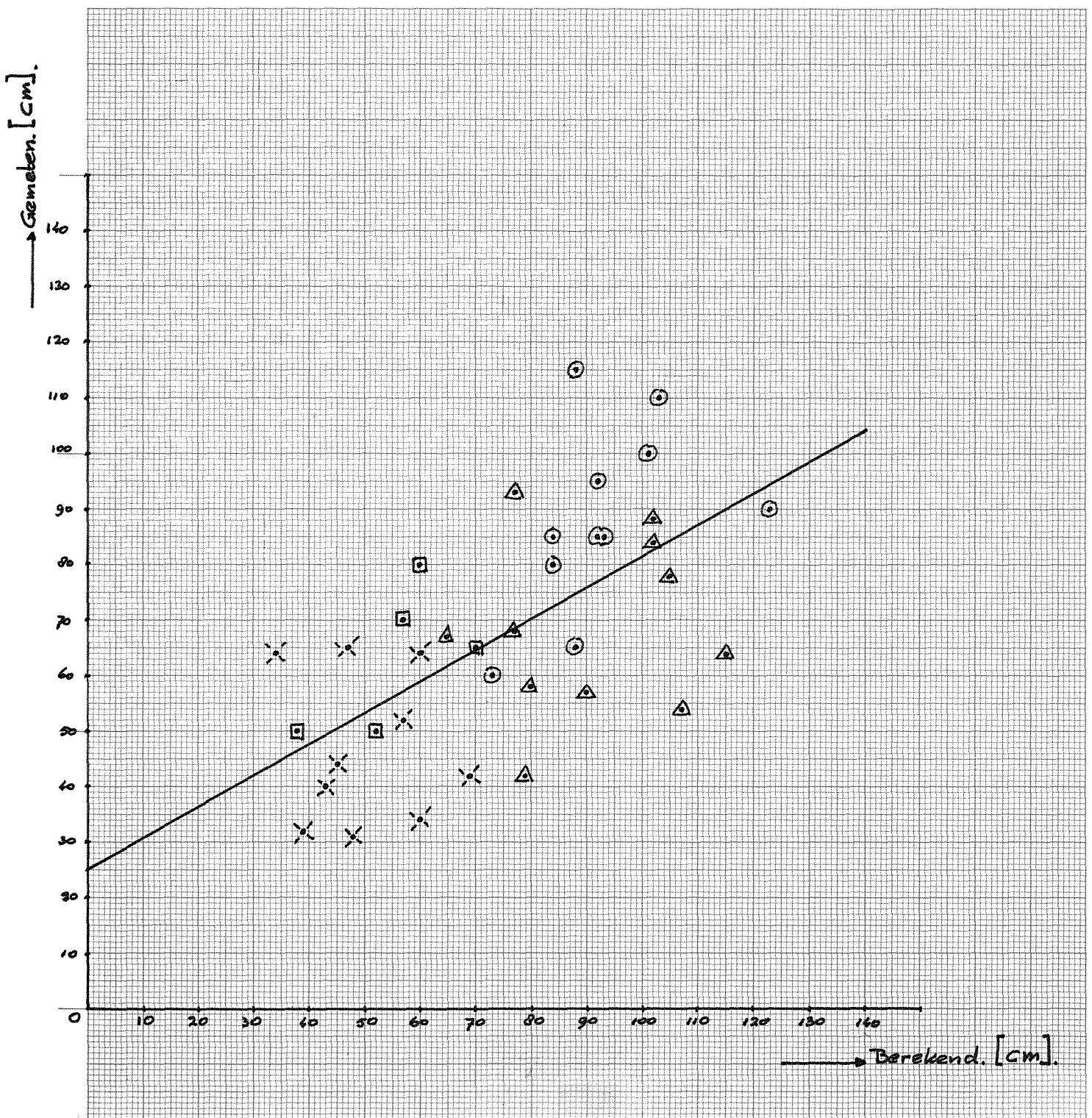
Tabel C. Windsnelheden en windrichtingen volgens IW 13,5 m windmeter en DVK-meter.



Afbeelding A. Mediaan van de windsnelheid in % van de mediaan van de windsnelheid op 13,5 m hoogte.

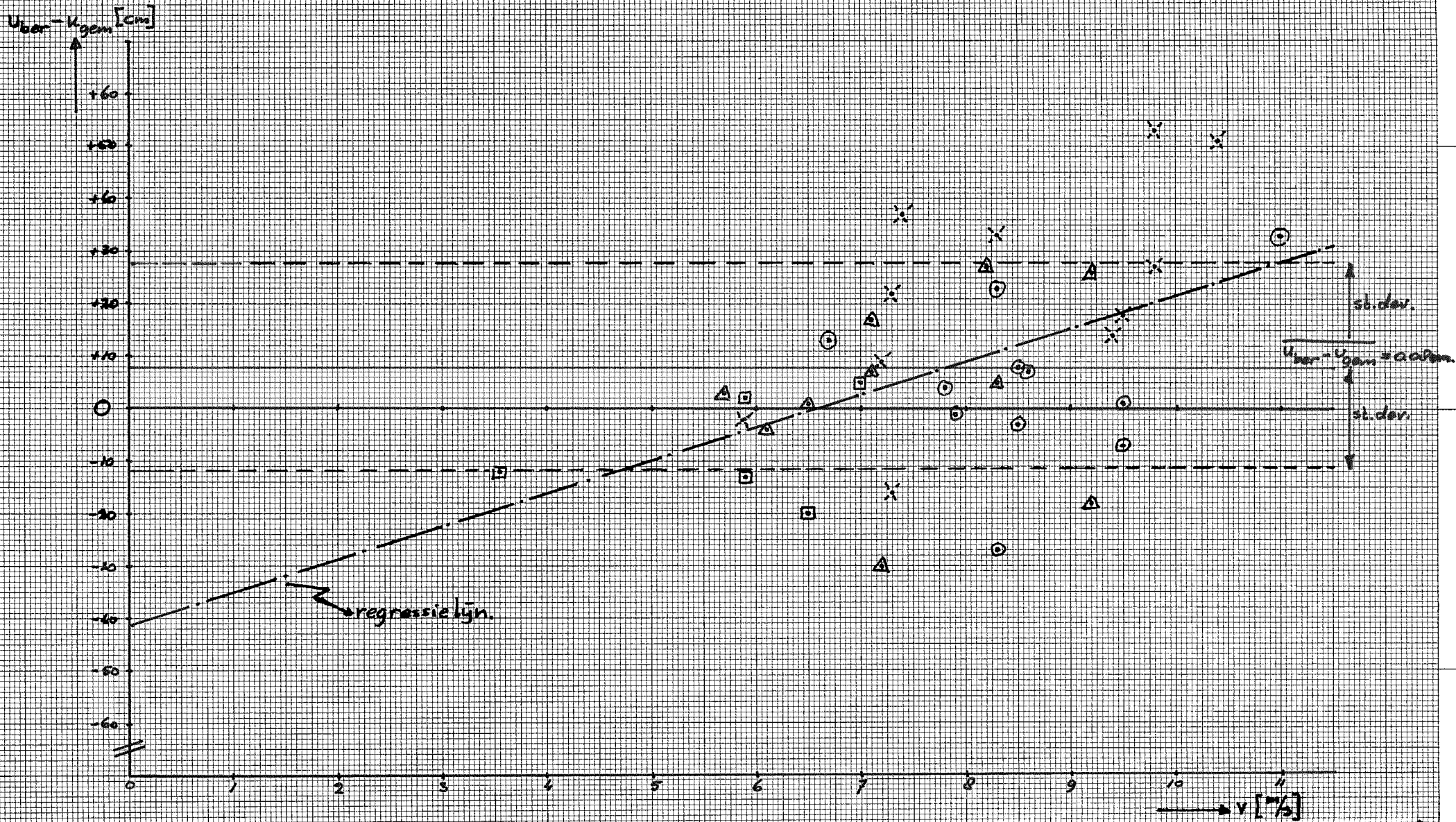


Afbeelding B. Windomstandigheden waaronder de verificatiemetingen zijn verricht (ongecorrigeerde meetpunten en oorspronkelijke U-vormige kromme).



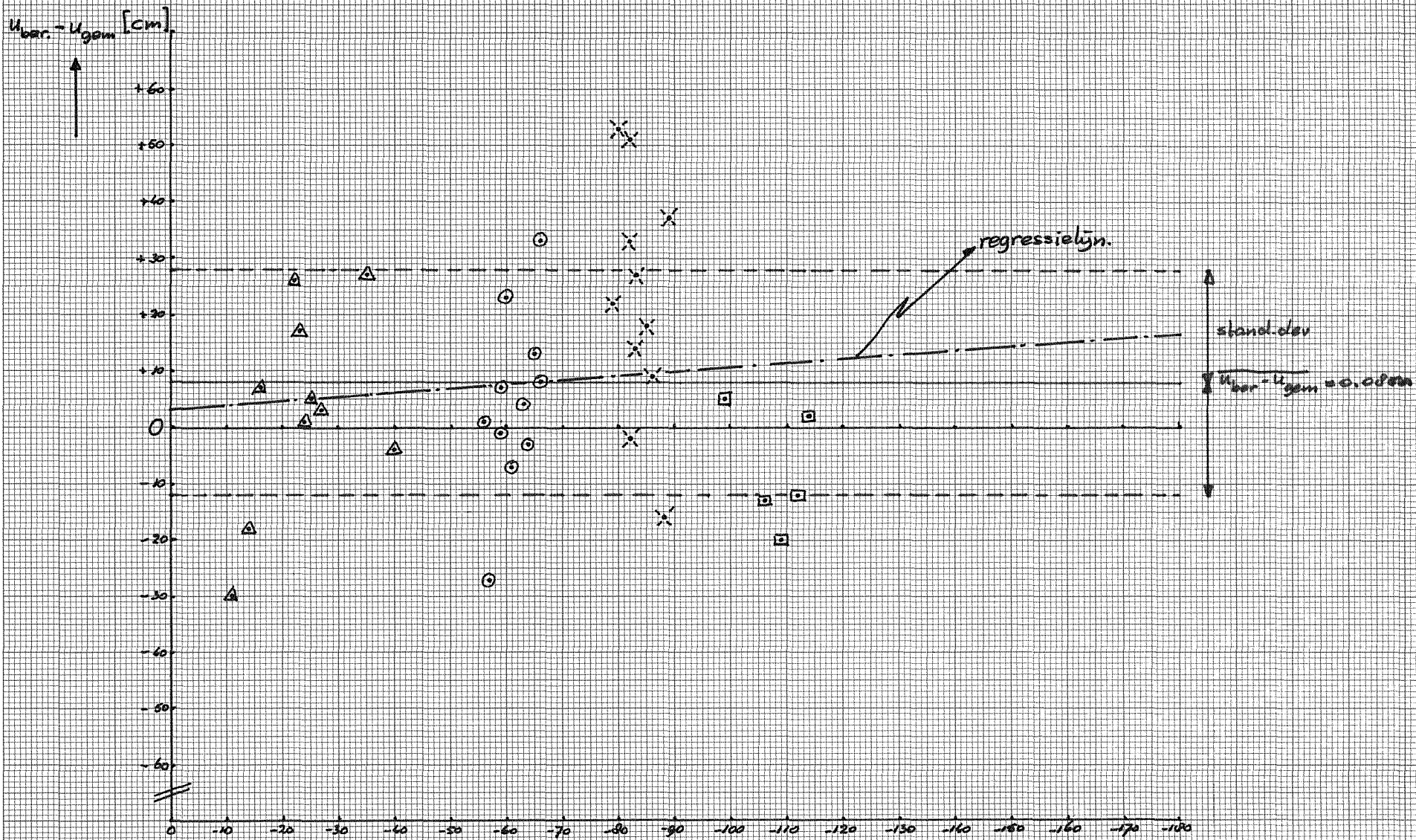
37 metingen, 13,5 m meter met correcties van -25% t.o.v. $|\sqrt{v}|$ en -7° t.o.v. Δv .
 $R = 0,62$; $R^2 = 0,39$; $y = 0,2494 + 0,5657 x$
 Gemiddeld $(U_{\text{berekend}} - U_{\text{gemeten}}) = 0,0792$ m.
 Standaard deviatie (idem) = $0,1978$ m.

Afbeelding C. Lineaire regressie van de gemeten en berekende zijdelingse uitwijkingen.



37 metingen, 125m meter met correcties van -25% Δv en $-7^\circ \Delta v$.
 $R = 0,49$; $R^2 = 0,24$; $y = -0,4141 + 0,0628x$.
 Gemiddeld ($u_{\text{berekend}} - u_{\text{gemeten}}$) = 0,0792 m; standaard deviatie (idem) = 0,1978.

Afbeelding D. $U_{\text{berekend}} - U_{\text{gemeten}}$ als functie van $|v|$, alsmede de lineaire regressie voor deze waarden.



37 metingen, 13,5 m meter met correcties van -25% b.o.v. |v| en -7° l.o.v. Δv .

$R = 0,11$; $R^2 = 0,01$; $y = 0,0326 + 0,0007x$.

Gemiddeld ($U_{berekend} - U_{gemeten}$) = $0,0792m$; stand. dev. (idem) = $0,1978$

Afbeelding E. U berekend - U gemeten als functie van Δv , alsmede de lineaire regressie van deze waarden.

Meting nummer	$ v $ [m/s]	Δv [$^{\circ}$]	Uitwijking berekend [m]	Uitwijking gemeten [m]
2	7,8	-63	0,84	0,80
3	8,6	-59	0,92	0,85
4	7,9	-59	0,84	0,85
5	6,7	-65	0,73	0,60
6	8,3	-60	0,88	0,65
7	8,3	-57	0,88	1,15
8	8,5	-64	0,92	0,95
9	9,5	-56	1,01	1,00
10	9,5	-61	1,03	1,10
11	11,0	-66	1,23	0,90
12	8,5	-66	0,93	0,85
21	5,9	-114	0,52	0,50
22	3,8	-112	0,38	0,50
23	6,5	-109	0,60	0,80
24	5,9	-106	0,57	0,70
25	7,0	-99	0,70	0,65
2	5,7	-27	0,43	0,40
3	8,2	-35	0,69	0,42
4	6,1	-40	0,60	0,64
5	7,2	-11	0,34	0,64
6	7,1	-16	0,39	0,32
7	9,2	-14	0,47	0,65
8	6,5	-24	0,45	0,44
9	9,2	-22	0,60	0,34
10	8,3	-25	0,57	0,52
11	7,1	-23	0,48	0,31

Tabel A. Gecorrigeerde windmeetgegevens ($|v|$: -25% en Δv : -7° t.o.v. tabel 1 lit. 3, zie ook Bijlage 2.1) en berekende voertuiguitwijking versus gemeten voertuiguitwijking.

Meting nummer	$ v $ [m/s]	Δv [°]	Uitwijking berekend [m]	Uitwijking gemeten [m]
2	5,9	-82	0,65	0,67
3	7,2	-86	0,77	0,68
5	7,3	-79	0,80	0,58
6	7,4	-89	0,79	0,42
7	7,3	-88	0,77	0,93
8	9,8	-80	1,07	0,54
9	9,7	-83	1,05	0,78
10	9,5	-85	1,02	0,84
11	9,4	-83	1,02	0,88
12	8,3	-82	0,90	0,57
13	10,4	-82	1,15	0,64

Tabel A. (vervolg) Gecorrigeerde windmeetgegevens ($|v|$: -25% en Δv : -7° t.o.v. tabel 1 lit. 3, zie ook Bijlage 2.1) en berekende voertuiguitwijking versus gemeten voertuiguitwijking.

Meetdag	Windsnelheid 50%		
	IW-TNO	DVK	verhouding
811219	2,0	1,9	1,05
811220	8,0	5,9	1,35
811230	7,6	4,9	1,51
820330-1	10,7	7,8	1,37
820330-2	11,6	8,3	1,41
820503	12,4	9,9	1,25

} gemiddeld 1,39

Tabel B.1. Windsnelheden in m/s (Bron: IW-TNO)

Meetdag	Windhoek 50%		
	IW-TNO	DVK	verschil
811219	-152	-123	-29
811220	48	77	-29
811230	15	41	-26
820330-1	135	159	-24
820330-2	130	156	-26
820503	-68	-46	-22

} gemiddeld -25

Tabel B.2. Windhoeken in graden (Bron IW-TNO)

Meting Nummer	Wind- snelheid 13,5 m [m/s]	Wind- snelheid DVK [m/s]	Wind- richting 13,5 m [°]	Wind- richting DVK [°]
Meetdag 820503				
2	10,4	10,6	-70	-80
3	11,5	10,0	-66	-66
4	10,5	9,7	-66	-71
5	8,9	9,2	-72	-73
6	11,0	10,2	-67	-80
7	11,1	10,5	-64	-80
8	11,3	9,8	-71	-83
Meetdag 830802				
2	7,6	7,6	-34	-45
3	10,9	9,1	-42	-57
4	8,1	8,9	-47	-52
5	9,6	8,3	-18	-30
6	9,4	9,0	-23	-37
7	12,3	8,4	-21	-44
8	8,7	9,0	-31	-43
9	12,3	9,3	-29	-34
10	11,0	10,7	-32	-47
11	9,5	10,8	-30	-13
Meetdag 831018				
2	7,9	8,3	-89	-77
3	9,6	6,9	-93	-77
5	9,7	6,3	-86	-81
6	9,9	9,8	-96	-91
7	9,7	9,1	-95	-91
8	13,0	12,8	-87	-80
9	12,9	12,7	-90	-86
10	12,6	10,0	-92	-91
11	12,5	11,0	-90	-91
12	11,1	9,4	-89	-83
13	13,9	9,6	-89	-78

Tabel C. Windsnelheden en windrichtingen volgens IW 13,5 m windmeter en DVK-windmeter

GEOPTIMALISEERDE INSTELWAARDEN VOOR HET WINDWAARSCHUWINGSSYSTEEMMOERDIJKBRUG

De waarden in onderstaande tabel en bijgaande afbeelding zijn zo berekend dat de gemeten uitwijkingen op de brug optimaal voorspeld worden uitgaande van de door de windmeter van de Dienst Verkeerskunde op het zuidelijke landhoofd gemeten windsnelheid en windrichting. De waarden van de windhoek dienen gelezen te worden als de hoek die de wind maakt met de lengte-as van de weg.

Voor de rijbaan in zuidelijke richting komt 160 kompasgraden overeen met nul graden windhoek.

Voor de rijbaan in noordelijke richting komt 340 kompasgraden overeen met nul graden windhoek.

Wind- hoek [°]	Wind- snelheid [m/s]	Wind- hoek [°]	Wind- snelheid [m/s]	Wind- hoek [°]	Wind- snelheid [m/s]	Wind- hoek [°]	Wind- snelheid [m/s]
0,0	22,0	45,0	12,2	90,0	11,2	135,0	21,1
2,5	22,0	47,5	11,9	92,5	11,3	137,5	22,0
5,0	22,0	50,0	11,6	95,0	11,5	140,0	22,0
7,5	22,0	52,5	11,4	97,5	11,8	142,5	22,0
10,0	22,0	55,0	11,2	100,0	12,0	145,0	22,0
12,5	22,0	57,5	11,1	102,5	12,3	147,5	22,0
15,0	21,7	60,0	11,0	105,0	12,6	150,0	22,0
17,5	20,0	62,5	10,8	107,5	13,0	152,5	22,0
20,0	18,6	65,0	10,7	110,0	13,4	155,0	22,0
22,5	17,4	67,5	10,7	112,5	13,9	157,5	22,0
25,0	16,5	70,0	10,7	115,0	14,4	160,0	22,0
27,5	15,6	72,5	10,7	117,5	15,0	162,5	22,0
30,0	14,9	75,0	10,7	120,0	15,6	165,0	22,0
32,5	14,3	77,5	10,7	122,5	16,4	167,5	22,0
35,0	13,7	80,0	10,7	125,0	17,2	170,0	22,0
37,5	13,2	82,5	10,8	127,5	18,0	172,5	22,0
40,0	12,8	85,0	10,9	130,0	19,0	175,0	22,0
42,5	12,5	87,5	11,0	132,5	20,0	177,5	22,0
						180,0	22,0

Windsnelheid [m/s]

Meetdag	sig	5%	50%	95%	A90%	R90%	verhouding
831208	TNO	6.6	8.4	10.5	3.9	0.46	1.01
	DVK	6.2	8.3	10.9	4.7	0.57	
8312091	TNO	7.8	9.6	12.0	4.2	0.44	1.19
	DVK	5.5	8.1	11.0	5.5	0.68	
8312092	TNO	6.6	8.0	9.7	3.1	0.39	1.16
	DVK	5.1	6.9	8.5	3.4	0.49	
840107	TNO	9.9	12.5	16.1	6.2	0.50	1.07
	DVK	9.1	11.7	15.0	5.9	0.50	

Windhoek [deg]

Meetdag	sig	5%	50%	95%	A90%	verschil
831208	TNO	-57	-53	-48	9	-28
	DVK	-39	-25	-12	25	
8312091	TNO	-52	-40	-18	34	-20
	DVK	-37	-20	-6	31	
8312092	TNO	-36	-27	-17	19	-19
	DVK	-94	-8	60	154	
840107	TNO	-132	-122	-109	23	-32
	DVK	-99	-90	-78	21	

tabel 2

meetdag 831208

Windsnelheid [m/s]

Tape sig 5% 50% 95% A90% R90% verhouding

T1A	TNO	6.3	8.1	9.5	3.2	0.40	1.65
	WEG	2.9	4.9	7.5	4.6	0.94	
T1B	TNO	6.6	8.9	11.0	4.4	0.49	1.62
	WEG	3.1	5.5	8.0	4.9	0.89	
T2A	TNO	6.6	8.5	10.5	3.9	0.46	1.25
	WEG	3.7	6.8	9.8	6.1	0.90	
T2B	TNO	6.4	8.4	10.3	3.9	0.46	1.25
	WEG	3.5	6.7	9.7	6.2	0.93	
T3A	TNO	6.6	8.5	10.3	3.7	0.44	1.00
	WEG	4.1	8.5	11.5	7.4	0.87	
T3B	TNO	6.2	8.1	10.4	4.2	0.52	1.03
	WEG	4.3	7.9	11.4	7.1	0.90	
T4A	TNO	6.9	8.6	10.5	3.6	0.42	0.88
	WEG	6.0	9.8	12.5	6.5	0.66	
T4B	TNO	6.8	8.4	10.6	3.8	0.45	0.81
	WEG	6.5	10.4	13.1	6.6	0.63	

Windhoek [deg]

Tape sig 5% 50% 95% A90% verschil

T1A	TNO	-58	-53	-21	37	-50
	WEG	-45	-3	32	77	
T1B	TNO	-58	-54	-51	7	-50
	WEG	-41	-4	33	74	
T2A	TNO	-57	-53	-48	9	-22
	WEG	-51	-31	8	59	
T2B	TNO	-58	-54	-49	9	-17
	WEG	-61	-37	10	71	
T3A	TNO	-57	-53	-48	9	-3
	WEG	-69	-50	-7	62	
T3B	TNO	-56	-52	-47	9	-12
	WEG	-55	-40	-7	48	
T4A	TNO	-56	-52	-48	8	-9
	WEG	-54	-43	-24	30	
T4B	TNO	-54	-50	-46	8	-3
	WEG	-59	-47	-33	26	

tabel 3

meetdag 831209

Windsnelheid [m/s]

Tape sig 5% 50% 95% A90% R90% verhouding

T1A	TNO	7.2	8.8	10.9	3.7	0.42	1.96
	WEG	2.7	4.5	7.1	4.4	0.98	

T1B	TNO	8.2	9.6	11.1	2.9	0.30	2.29
	WEG	2.4	4.2	7.0	4.6	1.10	

T2A	TNO	8.2	9.6	11.7	3.5	0.36	2.53
	WEG	1.9	3.8	6.6	4.7	1.24	

T2B	TNO	7.9	9.9	12.1	4.2	0.42	2.30
	WEG	2.0	4.3	7.6	5.6	1.30	

T3A	TNO						
	WEG	3.6	7.0	10.7	7.1	1.01	

T3B	TNO						
	WEG	3.2	6.4	10.1	6.9	1.08	

T4A	TNO						
	WEG	4.4	7.5	9.5	5.1	0.68	

T4B	TNO	6.6	8.2	9.8	3.2	0.39	1.21
	WEG	4.1	6.8	8.6	4.5	0.66	

Windhoek [deg]

Tape sig 5% 50% 95% A90% verschil

T1A	TNO	-55	-44	-33	22	14
	WEG	-86	-58	-24	62	

T1B	TNO	-47	-38	-30	17	12
	WEG	-81	-50	-11	70	

T2A	TNO	-45	-35	-26	19	-23
	WEG	-78	-12	86	164	

T2B	TNO	-48	-38	-28	20	-21
	WEG	-80	-17	74	154	

T3A	TNO					
	WEG	-64	-34	14	78	

T3B	TNO					
	WEG	-69	-38	18	87	

T4A	TNO					
	WEG	-54	-36	-8	46	

T4B	TNO	-36	-27	-19	17	2
	WEG	-42	-29	-3	39	

tabel 4

meetdag 840107

Windsnelheid [m/s]

Tape sig 5% 50% 95% A90% R90% verhouding

T1A	TNO	12.1	14.4	17.2	5.1	0.35	2.53
	WEG	3.5	5.7	9.2	5.7	1.00	
T1B	TNO	12.4	14.8	17.3	4.9	0.33	2.55
	WEG	3.6	5.8	9.1	5.5	0.95	
T2A	TNO	11.0	13.0	14.8	3.8	0.29	2.10
	WEG	3.7	6.2	9.6	5.9	0.95	
T2B	TNO	11.7	13.5	15.9	4.2	0.31	2.18
	WEG	3.9	6.2	9.3	5.4	0.87	
T3A	TNO	10.2	12.3	15.1	4.9	0.40	2.24
	WEG	3.2	5.5	8.7	5.5	1.00	
T3B	TNO	9.6	11.0	12.9	3.3	0.30	2.20
	WEG	3.5	5.0	7.0	3.5	0.70	
T4A	TNO	9.9	11.3	12.9	3.0	0.27	1.82
	WEG	4.4	6.2	8.2	3.8	0.61	
T4B	TNO	9.2	10.8	12.4	3.2	0.30	1.69
	WEG	4.5	6.4	8.3	3.8	0.59	

Windhoek [deg]

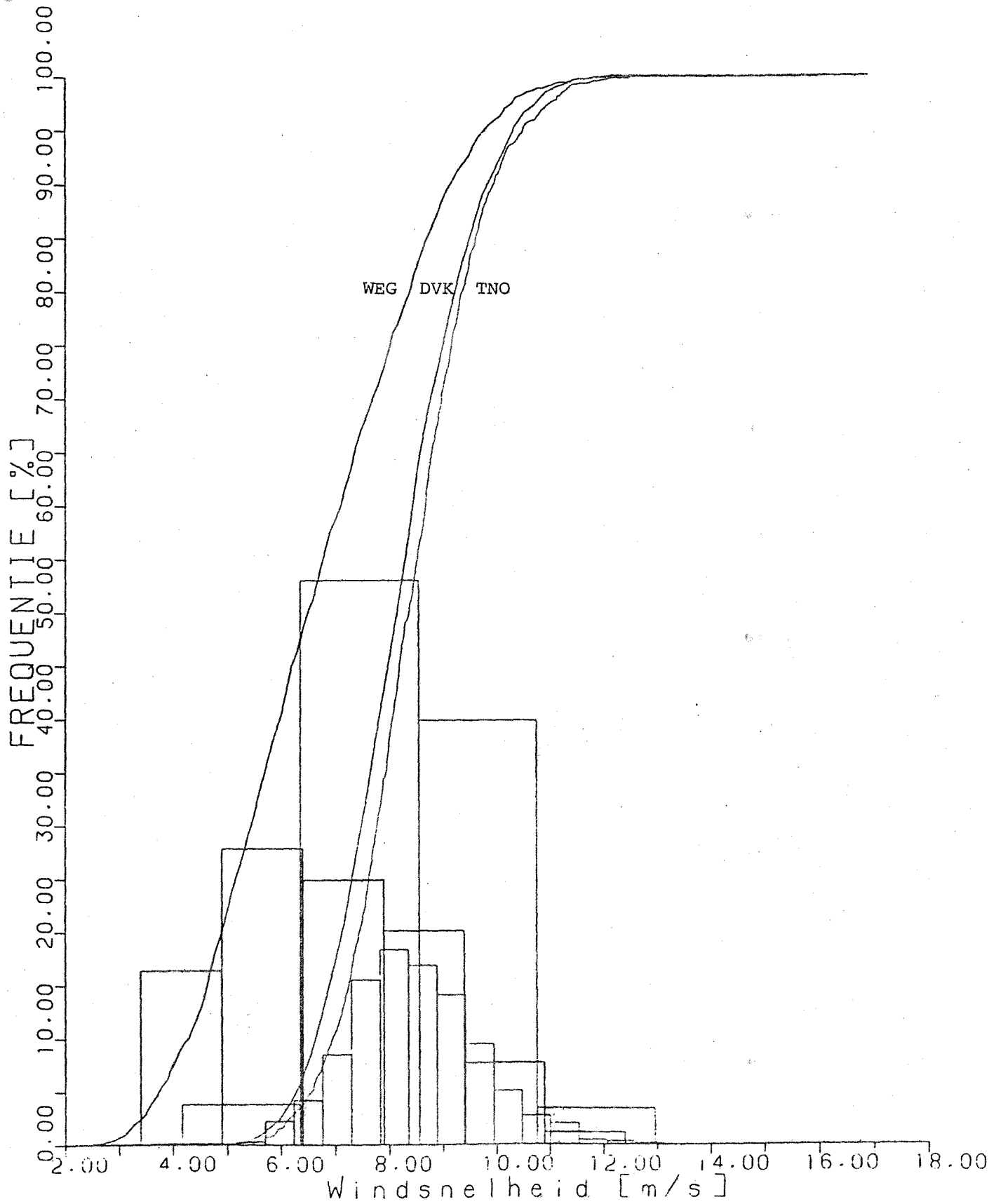
Tape sig 5% 50% 95% A90% verschil

T1A	TNO					
	WEG					
T1B	TNO	-130	-123	-115	15	-1
	DVK	-142	-122	-103	39	
T2A	TNO	-137	-128	-120	17	-2
		-144	-126	-103	41	
T2B	TNO	-136	-127	-120	16	2
	WEG	-147	-129	-101	46	
T3A	TNO	-133	-125	-117	16	-10
	WEG	-136	-115	-97	39	
T3B	TNO	-133	-125	-117	16	-10
	WEG	-137	-115	-95	42	
T4A	TNO	-130	-123	-116	14	-7
	WEG	-132	-116	-99	33	
T4B	TNO	-129	-121	-114	15	-7
	WEG	-131	-114	-99	32	

tabel 5

FILE: 831208T2A.
FILE: 831208T2A.
FILE: 831208T2A.RWS

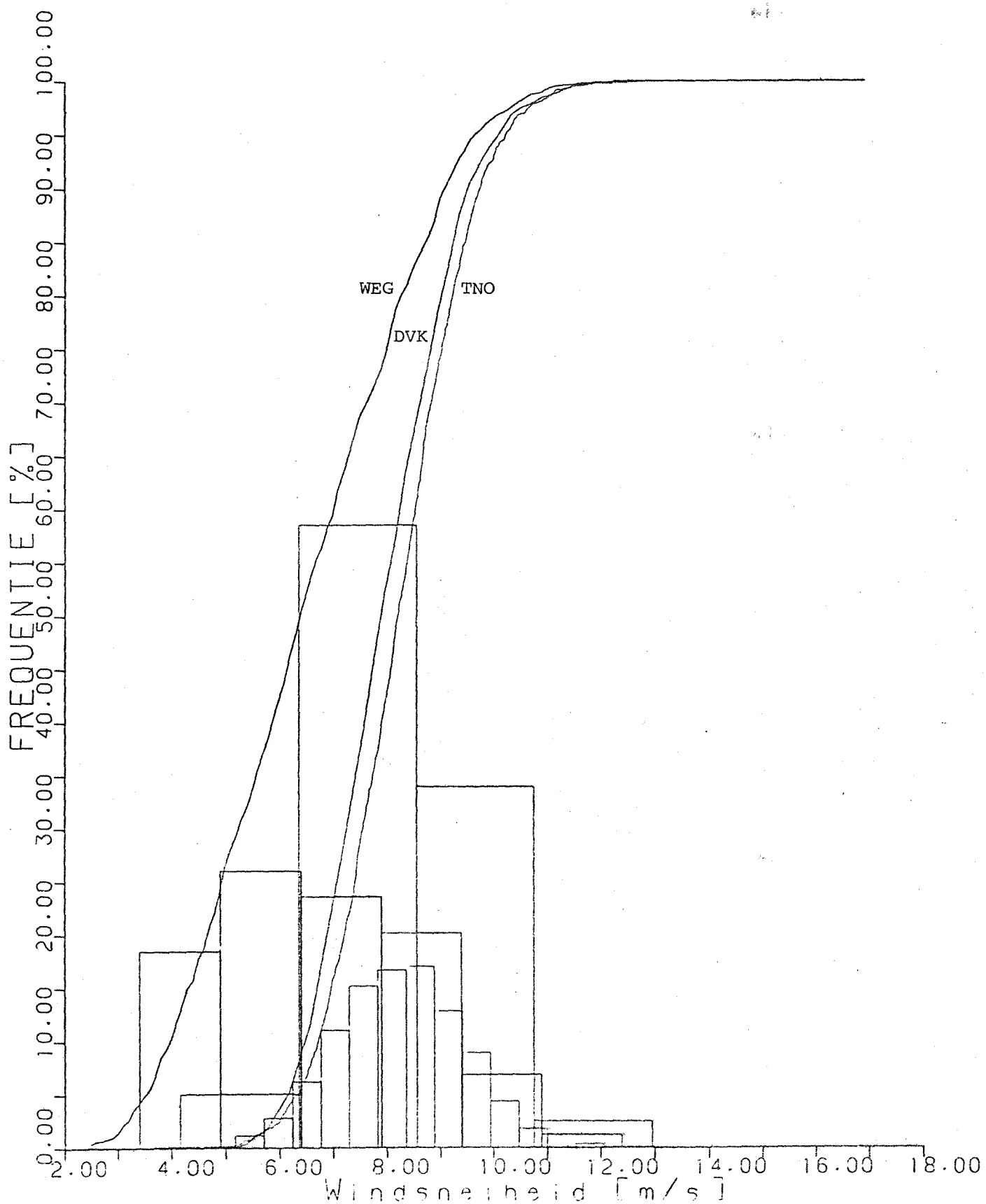
CHANNEL NR.: 1
CHANNEL NR.: 3
CHANNEL NR.: 1



figuur 67

FILE: 831208T29.
FILE: 831208T29.
FILE: 831208T29.RWS

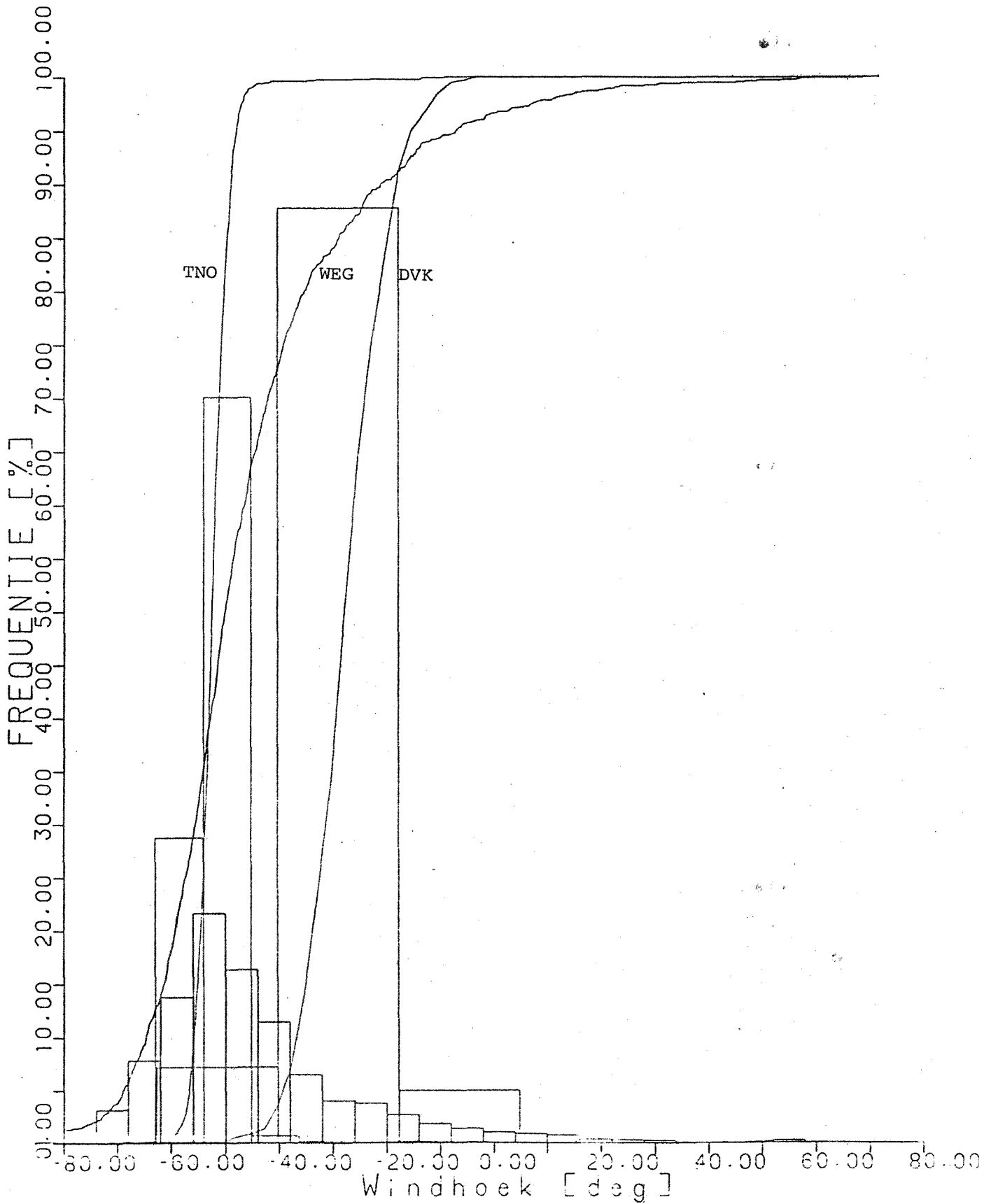
CHANNEL NR.: 1
CHANNEL NR.: 3
CHANNEL NR.: 1



figuur 68.

FILE: 831208T3A.
FILE: 831208T3A.
FILE: 831208T3A.RWS

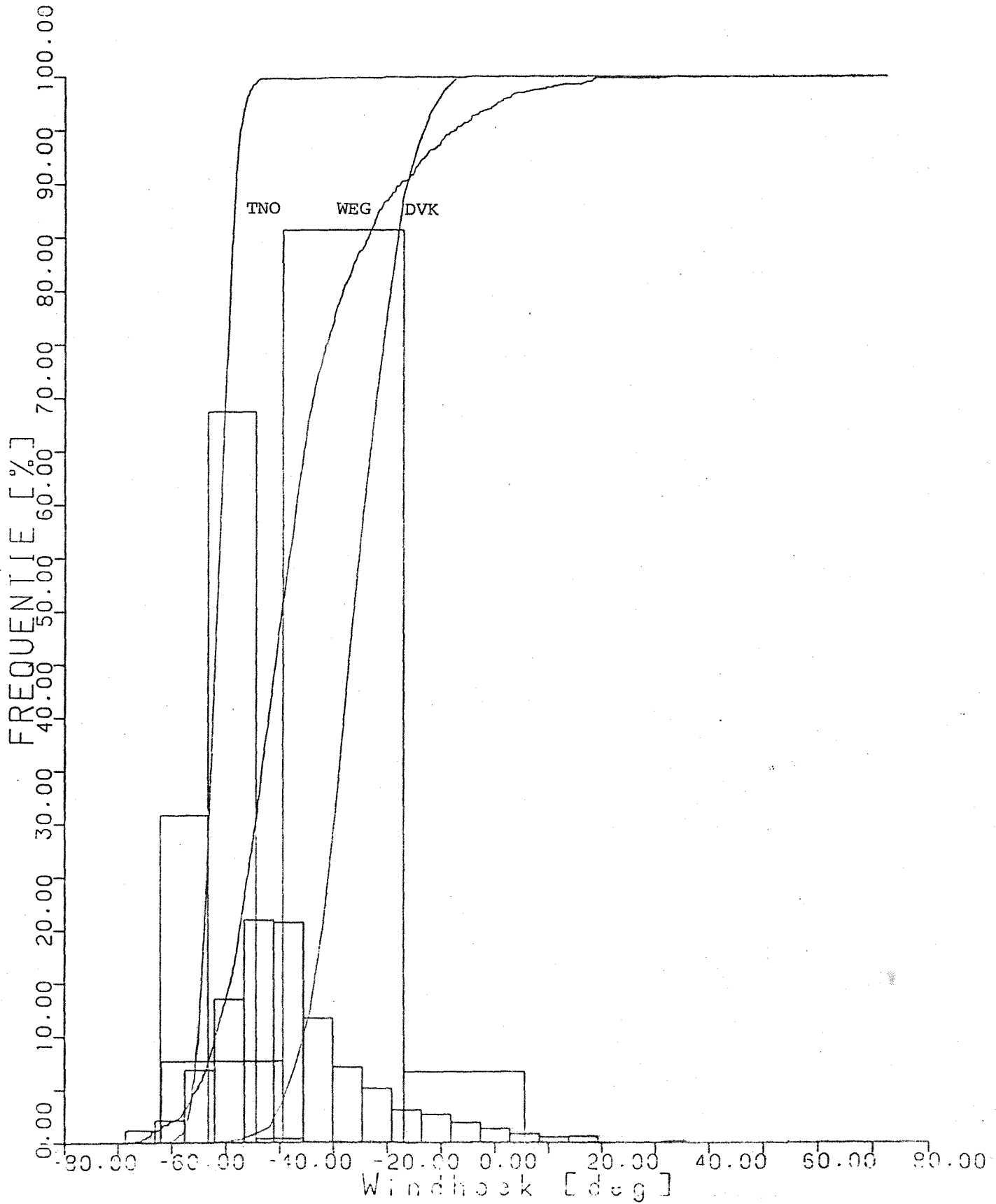
CHANNEL NR.: 2
CHANNEL NR.: 4
CHANNEL NR.: 2



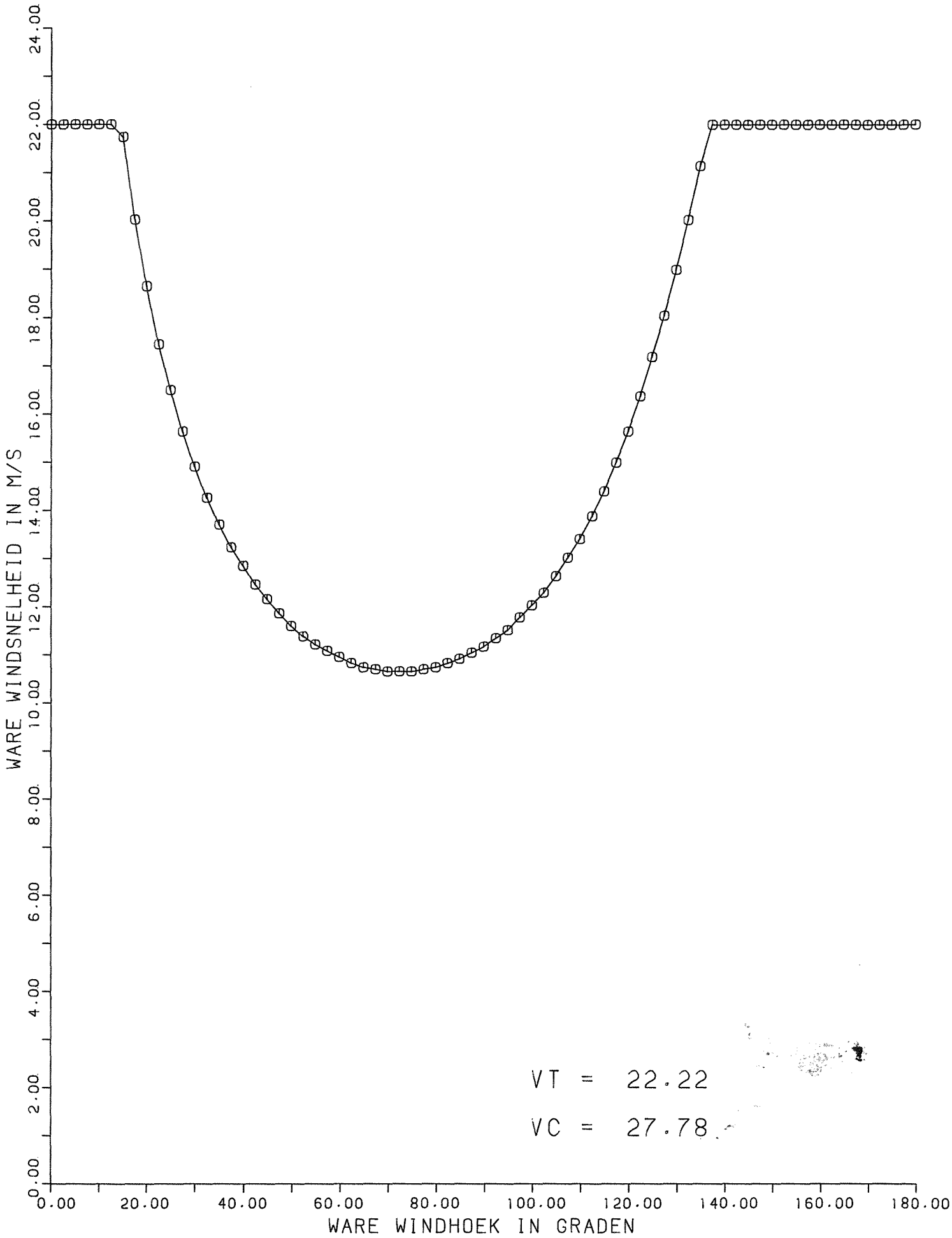
figuur 77

FILE: 831208T38.
FILE: 831208T38.
FILE: 831208T38.RWS

CHANNEL NR.: 2
CHANNEL NR.: 4
CHANNEL NR.: 2



figuur 78



nr	wind-	wind-	crit	Aan/ Uit	zijdelingse			uitwijking
	snelheid [m/s]	hoek [deg]			gemeten [m]	modell1 [m]	modell2 [m]	
Meetdag 820503								
2	10.4	-70	44	A	0.80	0.90	0.73	0.78
3	11.5	-66	42	A	0.85	1.01	0.81	0.73
4	10.5	-66	23	A	0.85	0.90	0.74	0.71
5	8.9	-72	24	A	0.60	0.74	0.62	0.67
6	11.0	-67	38	A	0.65	0.96	0.77	0.75
7	11.1	-64	48	A	1.15	0.95	0.78	0.77
8	11.3	-71	36	A	0.95	1.01	0.80	0.71
9	12.7	-63	63	A	1.00	1.14	0.90	0.88
10	12.6	-68	62	A	1.10	1.15	0.90	0.87
11	14.6	-73	64	A	0.90	1.43	1.06	1.04
12	11.3	-73	24	A	0.85	1.01	0.79	0.77
Meetdag 821015								
21	7.8	-121			0.50	0.46	0.37	
22	5.0	-119			0.50	0.35	0.32	
23	8.7	-116			0.80	0.56	0.44	
24	7.9	-113			0.70	0.52	0.42	
25	9.3	-106			0.65	0.69	0.53	
meetdag 830902								
2	7.6	-34	0	U	0.40	0.35	0.44	0.47
3	10.9	-42	12	A	0.42	0.71	0.68	0.63
4	8.1	-47	0	U	0.64	0.52	0.53	0.59
5	9.6	-18	0	U	0.64	0.22	0.41	0.40
6	9.4	-23	2	U	0.32	0.30	0.45	0.50
7	12.3	-21	0	U	0.65	0.40	0.55	0.51
8	8.7	-31	2	U	0.44	0.38	0.48	0.54
9	12.3	-29	0	A	0.34	0.58	0.65	0.49
10	11.0	-32	11	A	0.52	0.55	0.61	0.70
11	9.5	-30	10	A	0.31	0.41	0.51	0.32
meetdag 831018								
2	7.9	-89	10	A	0.67	0.64	0.53	0.60
3	9.6	-93	0	U	0.68	0.80	0.62	0.50
5	9.7	-86	0	A	0.58	0.83	0.65	0.45
6	9.9	-96	35	A	0.42	0.81	0.62	0.68
7	9.7	-95	14	A	0.93	0.80	0.62	0.63
8	13.0	-87	45	A	0.54	1.21	0.88	0.98
9	12.9	-90	64	A	0.78	1.18	0.86	0.95
10	12.6	-92	61	A	0.84	1.13	0.82	0.70
11	12.5	-90	55	A	0.88	1.13	0.83	0.78
12	11.1	-89	45	A	0.57	0.98	0.74	0.68
13	13.9	-89	6	A	0.64	1.31	0.94	0.71

tabel 1