

CONSULT ten behoeve van de Hoofddirectie van de Waterstaat

EEN WINDAFHANKELIJKE ADVIESSNELHEID VOOR HET WEGVERKEER OP DE
MOERDIJKBRUG

R-79-20

Voorburg, 1979

Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV

SAMENVATTING

Mede op basis van kennis verkregen uit het lopende SWOV-onderzoek "Windhinder voor wegvoertuigen" is advies uitgebracht onder welke windomstandigheden op de Moerdijkbrug een vastgestelde adviessnelheid van 70 km/h ingeschakeld dient te worden. Daarbij zijn niet alleen de invloed van aerodynamische storingen van natuurlijke wind en die van luchtverplaatsingen en afscherming van wind door voornamelijk vrachtwagens en bussen betrokken, maar ook de mogelijke reacties van bestuurders en voertuigen, zodanig dat geen dwarsverplaatsingen groter dan 0,8 m optreden. Een hoogte van de benodigde windmeter in het midden van de brug van ca. 12 m verdient de voorkeur. De resultaten kunnen niet zonder meer worden toegepast op situaties waar de windstoring duidelijk deterministische componenten bevat, terwijl andere vormen van oplossingen dan het geven van een snelheidsadvies hier buiten beschouwing zijn gebleven.

INHOUD

Samenvatting

Voorwoord

1. Beschrijving van de probleemsituatie
 - 1.1. Algemeen
 - 1.2. Aerodynamische storingen
 - 1.2.1. Natuurlijke wind
 - 1.2.2. Luchtverplaatsingen
 - 1.3. Het voertuig
 - 1.4. De bestuurder
2. Uitgangspunten en veronderstellingen
3. Berekening van voertuigdwarsverplaatsingen
4. Het advies
5. Discussie

Afbeeldingen 1 t/m 9

Literatuur

Bijlagen 1 t/m 4

VOORWOORD

De vraag die aan dit consult ten grondslag ligt, wordt in de brief aan de Directeur-Generaal van de Rijkswaterstaat WVI 46828 als volgt geformuleerd (zie Bijlage 1):

"Bij welke windsnelheid, onder welke windhoek en gedurende welke tijd zou een nader te bepalen adviessnelheid in een automatisch werkend verdwijnbord* kunnen worden getoond, teneinde ongevallen ten gevolge van uit de koers raken (buiten de rijstrook geraken) van motorvoertuigen bij harde windstoten op de Moerdijkbrug te voorkomen."

In gesprekken met de heer R.T. Overakker (Afdeling Veiligheid Wegen van de Hoofddirectie van de Rijkswaterstaat) en de heer Ir. J. Klijnhout (Dienst Verkeerskunde van de Rijkswaterstaat), kwam hierop nadere toelichting. De vraagstelling bleek zich alleen op windhinder te richten en niet op combinaties van windhinder en andere storende omstandigheden zoals zichtbeperkingen, gladheid e.d. Eventuele andersoortige of extra maatregelen buiten die van een snelheidsadvies zouden buiten beschouwing dienen te blijven. De adviessnelheid zou uitsluitend een vaste waarde kunnen krijgen en wel van 70 km/h.

Samenvattend zijn de belangrijkste elementen uit de vraagstelling omtrent het vaststellen van kritische windsnelheden en -richtingen daarom voor wat betreft:

- het doel: het veilig koers kunnen houden bij windhinder door bestuurder/voertuigcombinaties;
- de doelgroep: de bestuurders van de groepen motorvoertuigen: vrachtwagens en bussen, personen- en bestelauto's, motoren en scooters;
- het criterium voor onveiligheid: overschrijden van de rijstrookbegrenzing;

* Onder een verdwijnbord wordt een verkeersbord verstaan, waarvan de aanduiding al dan niet zichtbaar kan worden gemaakt.

- de storing: windhinder ter plekke van de autosnelweg op de Moerdijkbrug;
- het middel: het adviseren van een rijsnelheid van 70 km/h.

Het verzoek: "de gevraagde criteria op basis van de huidige kennis terzake, voor 4 september a.s. (4-9-1978) mede te delen", heeft gevolgen gehad voor de wijze van uitbrengen en de inhoud van het consult.

De Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV werkt in haar nog lopende onderzoek "Windhinder voor wegvoertuigen" samen met het Instituut voor Wegtransportmiddelen TNO. Dit onderzoek is ondermeer gericht op soortgelijke problematiek als waarin sprake is in de eerder vermelde vraagstelling. Beide instellingen beschikken over kennis betreffende deze materie en deze kennis ligt deels in elkaars verlengde. Het werd daarom door de SWOV nodig geacht IW-TNO in te schakelen bij het uitbrengen van het consult (zie Bijlage 2).

Dit consult is dan ook gebaseerd op de beschikbare kennis die is verkregen uit het hiervoor genoemde, overigens nog niet afgesloten onderzoek en uit de, veelal buitenlandse, literatuur. In een aanvulling daarop dienden daarom een aantal veronderstellingen gemaakt te worden, onder andere betreffende de situatie rond de Moerdijkbrug, en voor wat de toepassing betreft van literatuurgegevens omtrent het Nederlandse voertuigenpark.

De beschikbare tijd was beperkt aangezien het automatisch werkende verdwijnbord bij de opening van de brug in werking diende te zijn. Teneinde de beantwoording van de gestelde vraag gedeeltelijk parallel te laten verlopen aan de door RWS te verzorgen praktische uitvoering, is in overleg met betrokken functionarissen van de overheid het volgende gedaan:

Op 1 september 1978 is aan DVK-RWS dusdanige informatie verschaft dat met het ontwikkelen van de benodigde elektronica kon worden aangevangen. Tevens werd een advies uitgebracht over de plaats van opstelling van de windmeetapparatuur.

Op 22 september 1978 is advies uitgebracht over de zgn. instelwaarden en de insteltijd voor het inschakelen van het verdwijnbord.

De schriftelijke verantwoording van het een en ander zou dan op een later tijdstip kunnen volgen.

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

1. BESCHRIJVING VAN DE PROBLEEMSITUATIE

1.1. Algemeen

Aerodynamische krachten oefenen invloed uit op de bewegingen van eraan blootgestelde wegvoertuigen. Als gevolg kunnen afwijkingen in positie en/of koers van dit voertuig ontstaan, welke tot besturingsactiviteit noden. De uiteindelijke voertuigbewegingen worden hiermee resultante van bewegingen onder invloed van aerodynamische krachten en ingrijpen daarop door de bestuurder. Ze zijn daarmee te beschouwen als prestaties van een bestuurder-voertuigstelsel.

Deze uiteindelijke voertuigbewegingen dienen binnen zekere grenswaarden te blijven, zoals in laatste instantie gesteld door de beschikbare ruimte (op de weg en ten opzichte van overig verkeer). Overschrijden ervan kan leiden tot verkeersonveiligheid. Oorzaak van een overschrijden ligt in de karakteristieken van de aerodynamische storing in relatie tot die van het systeem, m.a.w. van de componenten (bestuurder en voertuig) daarbinnen, en de wisselwerkingen er tussen.

In het volgende wordt aandacht besteed aan aspecten van de aerodynamische storingen, het voertuig en de bestuurder. Dit toegepast op de situatie rond de Moerdijkbrug.

1.2. Aerodynamische storingen

Ten aanzien van luchtstromingen welke de aerodynamische inwerking veroorzaken, is een onderscheid in te voeren naar

- natuurlijke wind
- . beïnvloed door een homogene omgeving
- . beïnvloed door discontinuïteiten in de omgeving
- kunstmatige luchtverplaatsingen, en wel in het bijzonder die welke worden veroorzaakt door rijdende voertuigen.

1.2.1. Natuurlijke wind

Natuurlijke wind in de voor het wegverkeer relevante zone boven het aardoppervlak vertoont de kenmerken van een zogenaamde grenslaagstroming. Dit houdt ondermeer in dat de invloed van (de structuur van) het aardoppervlak merkbaar is in de eigenschappen van de stroming. Hierover kan het volgende worden opgemerkt:

A. De grenslaagstroming is vrijwel altijd turbulent. Van natuurlijke wind zijn daarom niet alleen de gemiddelde waarden van windsnelheid en -richting van belang, maar ook de fluctuaties in de windsnelheid (vlagerigheid) en in de richting. De mate van turbulentie hangt samen met de ruwheid van het aardoppervlak. Voor de in landschappelijke zin als homogeen te beschouwen omgevingen, aangeduid als: "open zee", "zeer vlak, open land", "weiland, akkerbouw, heggen", "boomgroepen, verspreide huizen", enz. zijn zogenaamde ruwheidsparameters bepaald. Bij hogere parameterwaarden wordt enerzijds als gevolg van meer wrijving de wind meer afgeremd zodat de gemiddelde windsnelheid lager komt te liggen, terwijl anderzijds een grotere vlagerigheid (met andere woorden sterkere windstoten) optreedt.

B. De gemiddelde windsnelheid neemt met de hoogte toe. Dit effect, naast dat van de oppervlakteruwheid, is te schatten met behulp van de formule van het zogenaamde logaritmisch windprofiel en van die van de zogenaamde machtwet. Bij voldoende harde wind (vanaf ca. 8 m/s) geldt namelijk resp.:

$$\bar{u}(z) = \frac{u^*}{\kappa} \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad \text{en} \quad \bar{u}(z) = \bar{u}(h) \left(\frac{z}{h}\right)^\alpha$$

Hierbij is:

$$\begin{aligned} \bar{u}(z) &\stackrel{\text{DEF}}{=} \text{de gemiddelde windsnelheid } [1 \cdot t^{-1}] \text{ ter hoogte van } z [1] \\ u^* &\stackrel{\text{DEF}}{=} \text{de schuifspanningssnelheid } [1 \cdot t^{-1}] = \sqrt{r/\rho} \\ &\text{met } r \stackrel{\text{DEF}}{=} \text{de schuifspanning } [m \cdot 1^{-1} \cdot t^{-2}] \\ &\quad \rho \stackrel{\text{DEF}}{=} \text{de luchtdichtheid } [m \cdot 1^{-3}] \\ \kappa &\stackrel{\text{DEF}}{=} \text{de constante van Von Kármán } [\approx 0,4; \text{ numeriek}] \\ z_0 &\stackrel{\text{DEF}}{=} \text{de ruwheidsparameter } [1] \end{aligned}$$

$\bar{u}(h)$ DEF de gemiddelde windsnelheid $[1.t^{-1}]$ op de referentiehoogte h $[1]$
 α DEF een ruweidsafhankelijke, empirisch bepaalde coëfficiënt $[1]$
 $[numeriek]$

Zie voor literatuur hierover bijvoorbeeld: Davenport, 1965; Plate, 1971; Rijkoort, 1970.

C. De in snelheid en richting fluctuerende wind, en de krachten als gevolg van wind uitgeoefend op wegvoertuigen, zijn te beschouwen als een stationair stochastische storing. De grootte van de storing neemt daarbij af voor toenemende frequenties, zoals bijvoorbeeld ook blijkt uit Afbeelding 1, waar het vermogenspectrum van de windsnelheid als functie van de frequentie wordt gegeven. Het spectrum is berekend uit windsnelheidsmetingen verricht op verschillende plekken op een autosnelweg, waarvan de omgeving homogeen was (zie bijvoorbeeld: Hayashi & Furusho, 1966; Werkgroep Windenergie TH Eindhoven, 1974).

D. De grenslaagstroming kan plaatselijk beïnvloed worden door alleenstaande obstakels of samenstellen daarvan, zoals bouwwerken, aanplantingen, dijklichamen enz. Als gevolg daarvan wordt op de stochastische storing van wind een deterministische storing gesuperponeerd. Dergelijke deterministische storingen kunnen a-periodiek zijn, bijvoorbeeld in het geval van een enkel bouwsel gelegen naast de weg, of periodiek, bijvoorbeeld sinus- of blokvormig bij op regelmatige afstand aangeplante struiken langs de weg. De inwerking van zgn. discontinuïteiten op de luchtstroming is veelal aanzienlijk (zie bijvoorbeeld Feis, 1976; Jurksch, 1973; Plate, 1966; Smith, 1973).

Naar aanleiding van het voorgaande wordt over de situatie op de Moerdijkbrug opgemerkt:

1. Als gevolg van het hoogteverschil tussen brugdek en aanvoerwegen is de gemiddelde windsnelheid op de brug hoger dan op de toevoerwegen. Als gevolg van de invloed van verschillende oppervlakte-ruwheden op wind, aanstromend over land, danwel over zee,

is de gemiddelde windsnelheid op de brug voor windrichtingen parallel aan het Hollandsch Diep hoger dan op de aanvoerwegen.

Een eerste indruk over de mate waarin op de Moerdijkbrug van verhoogde windinwerking sprake is, is te verkrijgen uit bijvoorbeeld de berekening volgens het logaritmisch windprofiel. Bij de aannamen dat het aerodynamisch drukpunt van voertuigen rijdend op de brug op ongeveer 15 m hoogte en voor voertuigen rijdend op de toevoerwegen op ongeveer 5 m hoogte boven het maaiveld ligt en dat de ruwheidsparameter van de één kilometer brede watervlakte van het Hollandsch Diep de orde grootte van 10^{-3} m en die van het omringende land de orde grootte van 10^{-1} m heeft, resulteren de volgende $\ln(z/z_0)$ -waarden:

Windinrichting	Brugdek	Toevoerwegen
Hollandsch Diep	9,62	3,91
⊥ Hollandsch Diep	5,01	3,91

Uit de verhoudingen van deze waarden blijkt dan dat voor wind evenwijdig aan de brug de gemiddelde windsnelheid op de brug ca. 1,3 maal hoger ligt dan die op de toevoerwegen en voor wind dwars op de brug 2,5 maal hoger. Ook bij een geringer verschil in de grootte van de ruwheidsparameters voor water en land ter plaatse, is de toename van de gemiddelde windsnelheid nog fors. Bij $z_0 = 10^{-2}$ m voor het water is bijvoorbeeld de windsnelheid op de brug voor windrichtingen parallel aan het Hollandsch Diep nog 1,9 maal hoger dan op de toevoerwegen.

2. Als gevolg van verschillen in oppervlakte-ruwheden, zal de zgn. vlagerigheid op de brug geringer zijn dan op de toevoerwegen voor windrichtingen parallel aan het Hollandsch Diep. Het blijkt echter dat vooral de hogere frequenties uit het vermogenspectrum verdwijnen. De lagere frequenties echter, waar zoals Afbeelding 1 aangeeft, de hoogste amplitudo's optreden, worden slechts weinig beïnvloed.

3. De landhoofden vormen voor windrichtingen niet parallel aan het Hollandsch Diep omgevingsdiscontinuïteiten, die de luchtstroming beïnvloeden. Gezien de vormgeving van het dwarsprofiel van de brug (de zijkant bijvoorbeeld heeft een dikte van 60 cm) is te veronderstellen dat dwars op de brug aanstromende wind boven het brugdek slechts in geringe mate door de brug beïnvloed wordt. Dit kan leiden tot verschillen in windsterktes op de overgangen van brug en landhoofd.

Grootte en aard van de hiervoor genoemde, op grond van de literatuur te verwachten effecten, zijn onbekend.

1.2.2. Luchtverplaatsingen

Rijdende voertuigen veroorzaken luchtverplaatsingen. Hierbij is het stromingsveld van de lucht rond zo'n voertuig opgebouwd te denken uit een "steady" - of een met het voertuig meebewegende, onveranderlijke - component en een "transient" - of in (korte) tijd variërende - component. Als storing voor passerende of gepasseerde voertuigen is vooral de "steady" component van belang.

Als er nu eerst vanuit gegaan wordt dat er geen wind is, dan worden de karakteristieken van de "steady" component voornamelijk bepaald door de rijsnelheid en daarnaast door de vormgeving van het de lucht verstorende voertuig. Vooral de luchtverplaatsingen van snel rijdende vrachtwagens en bussen zijn van belang voor een nadere beschouwing.

Het patroon van de luchtdrukverschillen van de "steady" component is enigszins te beschrijven als "een onregelmatige sinusvorm", waarvan de zogenaamde boeggolf aan de kop of voorkant en het zogenaamde kielzog aan de staart of achterkant van het voertuig de grootste amplitudo hebben, en wel van een tegengestelde richting. Karakteristieke voorbeelden van dit patroon geeft Afbeelding 2 waarin de resultaten zijn weergegeven van in overleg met de SWOV door de HTS Voertuigtechniek te Apeldoorn uitgevoerde proefmetingen van de drukken die optreden in dergelijke luchtverplaatsingen.

Een passerend of gepasseerd voertuig wordt aan de kop van de

vrachtwagen van deze "weggeduwd" en aan de staart naar deze "toegezogen". In passeersituaties is de relatieve snelheid, met andere woorden het snelheidsverschil tussen verstorend en verstoord voertuig, bepalend voor de tijd waarin het patroon doorlopen wordt. Daarmee is de relatieve snelheid van invloed op de door het gestoorde voertuig ondervonden frequenties van de luchtverplaatsingsstoring.

Kunstmatige luchtverplaatsingen en (harde) natuurlijke wind kunnen tegelijkertijd optreden. Dan zijn er twee gevallen te onderscheiden: de richting van de wind komt overeen (of nagenoeg overeen) met de rijrichting van de vrachtwagen ofwel er is sprake van zijwind.

In het eerste geval leidt kopwind tot een verhoging en staartwind tot een verlaging van het effect van luchtverplaatsingsstoringen. Dit, omdat er dan sprake is van veranderingen in de "effectieve" rijwind die, zoals eerder reeds is opgemerkt, één van de belangrijke factoren is die de amplitudo's van het "sinusvormige patroon" bepalen. Onder effectieve zijwind wordt verstaan de som van de rijwind en de langscomponent van de ware wind (zie Afbeelding 3). In het tweede geval kan niet alleen een verandering van de "effectieve" rijwind ontstaan met het hiervoor beschreven gevolg, maar aan de lijzijde van de vrachtwagen wordt ook de dwarswindcomponent afgeschermd. Dit levert een nieuwe vorm van aerodynamische storing. Ter hoogte van de kop en de staart van de vrachtwagen ontstaat namelijk een abrupt drukverschil in de lucht. Vooral de combinatie van het kielzogeffect van de luchtverplaatsing en de verschillen in luchtdruk aan de staart van de vrachtwagen ten gevolge van afscherming van de heersende wind, kan, nu beide effecten in dezelfde richting werken, de bewegingen van aan lijzijde rijdende voertuigen substantieel beïnvloeden (zie bijvoorbeeld: Brown, 1973; Friesz e.a., 1973; Friesz & Trentacoste, 1973; Johnson e.a., 1973; Weir e.a., 1973).

In 1.2.1. werd onder andere reeds gewezen op de omstandigheid dat bij de Moerdijkbrug sprake is van een verhoogde inwerking op het

wegverkeer door natuurlijke wind en wel vooral bij windrichtingen dwars op de rijrichting van dit verkeer. Juist in dergelijke omstandigheden vormt het passeren van (of door) vrachtwagens, bussen e.d. voor aan hun lijzijde rijdende andere voertuigen de meest kritische windhindersituatie. Dergelijke situaties zullen op de Moerdijkbrug relatief veelvuldig optreden.

1.3. Het voertuig

Onder inwerking van de luchtstroming worden de bewegingen van een voertuig beïnvloed.

De bewegingen van een vast lichaam kunnen in het algemeen in drie translaties en drie rotaties ontbonden worden. Voor de positie en de koers van een voertuig op de weg zijn van belang translaties in een richting dwars op de rijrichting: veranderingen in de laterale positie, en rotaties rond een verticaal, gedacht door het zwaartepunt van het voertuig: veranderingen in de gierhoek. Deze translaties en rotaties bepalen de baan van het voertuig op de weg.

Het mechanisme van de inwerking van de luchtstroming op de positie- en koersbepalende voertuigbewegingen is als volgt te beschrijven: Indien de richting van de schijnbare wind - dat is de vectorsom van ware- en rijwindsnelheid - niet samenvalt met de rijrichting, veroorzaakt de dwarscomponent van $\bar{v}_{sch.wind}$ (zie Afbeelding 3) een dwarskracht op het voertuig. Indien het aangrijpingspunt van deze kracht: het zogenaamde aerodynamisch drukpunt, geprojecteerd op de centrale lengteas van het voertuig, niet samenvalt met de op die as gelegen positie van het zwaartepunt, ontstaat er bovendien een moment: het zogenaamde giermoment.

Dwarskracht F_{IJ} en giermoment N zijn gegeven door resp.:

$$F_{IJ} = C_{IJ} \cdot A \cdot \frac{1}{2} \rho v_{sch.wind}^2$$

en

$$N = C_N \cdot A \cdot l \cdot \frac{1}{2} \rho v_{sch.wind}^2$$

waarbij:

C_{IJ} = dwarskrachtcoëfficiënt

C_N = giercoëfficiënt

A = oppervlakte van de grootste voertuigdwarsdoorsnede [l^2]

l = wielbasis [l]

$\frac{1}{2}\rho v_{sch.wind}^2$ = stuwdruk [$m.l^{-1}.t^{-2}$]

De coëfficiënten voor dwarskracht en giermoment verdisconteren de aerodynamische eigenschappen van een voertuig. Hun waarden hangen af van de aanstroomrichting van de schijnbare wind. In het kader van het onderzoek "Windhinder voor wegvoertuigen", zijn C_N - en C_{IJ} -waarden van de in Nederland meest voorkomende personen- en bestelauto's en busjes door het Instituut voor Wegtransportmiddelen TNO, geïnterpreteerd, zie Afbeelding 4.

Uit bovenstaande vergelijkingen volgen de grootte van de als gevolg van windstoringen op voertuigen uitgeoefende krachten en momenten. De aard van deze krachten en momenten hangt af van de aard van de windstoring: stochastisch, deterministisch of gemengd (zie 1.2.1. en 1.2.2.), het effect ervan op de voertuigbewegingen hangt af van voertuigdynamische eigenschappen als traagheden en bandstijfheden. Een groter traagheidsmoment bijvoorbeeld zal eventuele hogere frequenties uit de windstoring gemakkelijker "uitfilteren" (zie bijvoorbeeld: Mitschke, 1972, of andere standaardwerken).

Van overige door luchtstromingen beïnvloede voertuigbewegingen wordt hier alleen de aerodynamisch veroorzaakte rolbeweging genoemd, een rotatie rond een lengteas van het voertuig. Deze beweging is vooral van belang voor tweewielers en kan van betekenis zijn voor caravans en vrachtwagens. De tweewieler met zijn relatief geringe massa ondervindt in vergelijking met andere voertuigtypen hinder van windstoringen, zowel van geringere intensiteit als tot hogere frequenties. Daarbij komt dat het een instabiel voertuig is en dat bij het passeren van of door vrachtwagens afscherming van het perifere gezichtsveld en schrikeffecten kunnen optreden (zie bijvoorbeeld Eaton, 1973; Godthelp & Wouters, 1978;

Sharp, 1971). Overigens zijn motorfietsen, scooters e.d. veelal in de gelegenheid een ruime (laterale) afstand tot vrachtwagens te bewaren. Dat is gunstig, omdat de inwerking van de luchtverplaatsing afneemt (waarschijnlijk evenredig met het kwadraat van die afstand). Voorzover bekend ontbreekt literatuur over de inwerking van gecombineerde zijwind en luchtverplaatsingen op motoren en scooters.

Tenslotte zij opgemerkt dat van de gelede voertuigen in het bijzonder personenauto-caravancombinaties een apart probleem vormen. Vooral bij een ongunstige gewichtsverdeling tussen auto en caravan, kan in passeersituaties met vrachtwagens de druk op het relatieve grote caravanoppervlak de combinatie ernstig doen slingeren (Wojcik & Mellinger, 1971).

1.4. De bestuurder

De bestuurder dient de als gevolg van windhinder ontstane afwijkingen in de positie en/of koers van zijn voertuig te ondervangen. Dit deel van de rijtaak wordt veelal aangeduid met "regelen" (control). De regelactiviteiten van een bestuurder hangen samen met de aard van de voertuigbewegingen, die weer, zoals in 1.3. is opgemerkt, afhangen van de aard van windstoring: stochastisch, deterministisch of gemengd.

Stochastische storingen (zoals die van natuurlijke wind) zijn voor een bestuurder onvoorspelbaar. Voor deterministische (zoals die van zgn. discontinuïteiten in de omgeving) is het mogelijk dat een bestuurder, op grond van kennis, ervaring of training, visueel, auditief of anderszins tijdig gewaarschuwd, erop anticipeert, of wel snel en adequaat reageert. Periodieke deterministische storingen, die tot "opslingeren" in de koersafwijking kunnen leiden, kunnen bij voldoende lang voorkomen ervan tot een leereffect bij bestuurders aanleiding geven. Passeren van of door vrachtwagens bij zijwind vormt een gemengde storing. Omdat de bestuurder van het aan storingen onderhevige voertuig veelal gewaarschuwd is, kan zijn reactietijd korter zijn. Een adequate stuurreactie blijft evenwel moeilijk, omdat de storing slecht te voorspellen is, c.q.

(subjectief) door hem daardoor als stochastisch ervaren wordt en verwerkt. De regelactiviteiten van bestuurders op storingen van stochastische aard zijn wiskundig te beschrijven, bijvoorbeeld volgens de zogenaamde beschrijvende functiemodellen en het zogenaamde cross-overmodel, met andere woorden voor storingen van natuurlijke wind en van passeren van vrachtwagens bij zijwind, voorzover dit bij de bestuurder als stochastisch overkomt. Uitgaande van dergelijke beschrijvingen kan het volgende gezegd worden over de eigenschappen van de bestuurder:

1. Het frequentiebereik van de regelhandelingen van een bestuurder loopt globaal tot maximaal circa 1 Hz. Dat betekent dat voertuigbewegingen met deze frequenties in principe door een bestuurder gecorrigeerd kunnen worden. Voertuigbewegingen als gevolg van windhinder met frequenties boven de 1 Hz en van voldoende hoge amplitudo zijn niet te verwachten (zie 1.2.1., 1.2.2. en 1.3.).
2. Voor de lage tot middelhoge frequenties, bijvoorbeeld tot ongeveer $\frac{1}{2}$ Hz, kunnen storingen goed tot redelijk door een bestuurder ondervangen worden.
3. Voor de middelhoge en hoge frequenties, bijvoorbeeld van ongeveer $\frac{1}{2}$ Hz tot 1 Hz, wordt met het toenemen van de frequentie een snellere reactie (kortere reactietijd) van een bestuurder geëist. Voor de middelhoge frequenties is voor een goede storingsonderdrukking van de daar nog optredende grotere amplitudo's van de voertuigbewegingen een sterke stuurcorrectie (hoge versterkingsfactor) nodig. Wordt hieraan niet voldaan dan zullen relatief geringe afwijkingen in positie/koers van het voertuig bij hogere rijksnelheden snel toenemen en tot overschrijding van de rijstrook leiden. Zoals opgemerkt hangen reactietijd en stuurcorrectie deels samen met ervaring, gewaarschuwd zijn, motivatie, enz. Corrigeren van voertuigbewegingen uit dit interval tussen $\frac{1}{2}$ en 1 Hz kan in het bijzonder bij onervaren bestuurders leiden tot onnodig vaak compenseren of overcompenseren, hetgeen slechtere rijprestaties veroorzaakt (zie bijvoorbeeld McRuer & Weir 1969; Mitschke & Nieman, 1972, Mitschke, 1974; Weir e.a., 1972).

Voor wat de Moerdijkbrug betreft zij opgemerkt dat de vormgeving van de autosnelweg ter plaatse weinig indicaties biedt dat men over een brug rijdt. Als een bestuurder al het besef heeft dat de windsterkte op een dergelijke hoge, boven open water gelegen brug sterk kan toenemen en dat bij harde wind passeren van vrachtwagens extra problemen kan opleveren, zal hij daarvoor veelal niet gewaarschuwd zijn.

2. UITGANGSPUNTEN EN VERONDERSTELLINGEN

De in het vorige hoofdstuk gegeven beschrijving van de probleemsituatie leidt tot het kiezen van een aantal uitgangspunten voor de beantwoording van de in de Inleiding geformuleerde vraagstelling. In de beschrijving worden tevens onderwerpen genoemd, waarover de beschikbare kennis te kort schiet. Aanvullend moeten hier veronderstellingen gemaakt worden en uitgangspunten bijgesteld. Ook vanuit praktische overwegingen zijn dergelijke aanvullingen in enkele gevallen wenselijk.

Als kritische windhindersituatie op de Moerdijkbrug is het gelijktijdig voorkomen te beschouwen van harde wind en luchtverplaatsingen en afscherming van wind van met name vrachtwagens en bussen. Bij nog sterkere wind, bijvoorbeeld wind waarin windstoten met snelheden van zo'n 22 m/s en meer voorkomen, mag aangenomen worden dat alleen al de inwerking van dergelijke wind problemen veroorzaakt voor bestuurder-voertuigcombinaties. De invloed van de landhoofden op de luchtstroming bij bepaalde windrichtingen is, naar vooralsnog verondersteld wordt, niet al te groot. Windhinder is het meest van invloed op voertuigen als tweewielige motorrijtuigen, personenauto-caravancombinaties en minibusjes. Zowel het aantal als het gebruik van de eerste twee genoemde voertuigsoorten is relatief gering. De wettelijk toegestane maximum rijsnelheid voor personenauto-caravancombinaties is 80 km/h. Hun gevoeligheid voor aerodynamische inwerkingen is vrijwel alleen kwalitatief bekend. Voor minibusjes is die gevoeligheid wel kwantitatief bekend. Deze blijkt hoger te liggen dan die van de gangbare modellen personenauto's (zie Afbeelding 4). Door nu uit te gaan van de aerodynamische eigenschappen van deze busjes, wordt rekening gehouden met de beperkte groep van meest gevoelige voertuigen en ontstaat er voor de in meerderheid voorkomende groep van overige voertuigen enige marge.

Bij de verdere berekening zal ervan worden uitgegaan dat de verkeersdeelnemers de wettelijk toegestane maximum rijsnelheden aanhouden: 80 km/h voor onder andere vrachtwagens en 100 km/h voor onder andere minibusjes.

Onervarenheid, niet gewaarschuwd zijn, enz., is er oorzaak van dat bestuurders slechtere rijprestaties leveren. Onderzoekresultaten over rijprestaties betreffen veelal die van ervaren en alerte proefpersonen. Dit geldt zeker voor de resultaten waarvan hier voor de verdere berekeningen gebruik gemaakt gaat worden. Problemen met de onderlinge vergelijkbaarheid van onderzoeken maken verwerken van deze invloeden in de gegevens over rijprestaties moeilijk.

Om nu met de mogelijk slechtere rijprestaties van bestuurders rekening te houden, is gekozen voor een volgende oplossing. Zoals in hoofdstuk 4 besproken zal worden, wordt geadviseerd de windmeter in langsrichting gezien midden op de Moerdijkbrug te plaatsen op circa 12 m boven het wegdek. De windmeter geeft dan een waarde voor de windsnelheid aan die hoger is dan de windsnelheid onderhouden door het wegverkeer. Dit verschil in de windsnelheid is bovendien afhankelijk van de windrichting. Uit de vergelijking van het logaritmisch windprofiel is te schatten dat voor windrichtingen van evenwijdig aan tot haaks op de brug de windmeter van 5 tot 10% hogere waarden aangeeft dan die ter hoogte van het aerodynamisch drukpunt van voertuigen gelden. Door nu dit verschil niet te corrigeren, wordt voor de mogelijk geringere rijprestaties een marge gecreëerd, die toeneemt met de ernst van de storingsomstandigheden. Vanwege het procentuele karakter van het verschil, wordt namelijk deze marge met het toenemen van de windsnelheid groter. Gezien het hogere percentage, neemt de marge bij zijwind extra toe. Een praktisch voordeel van deze oplossing is nog dat het, bij gebleken noodzaak daartoe, eenvoudig bijstellen toelaat.

Gegeven rijstrook- en voertuigbreedtes, is er in eerste instantie van uit te gaan dat bestuurder-voertuigcombinaties zowel ter linker- als ter rechterzijde een ruimte van circa 0,8 meter ter beschikking staat alvorens buiten de rijstrook te geraken.

3. BEREKENING VAN VOERTUIGDWARSVERPLAATSINGEN

Doel van de hierna beschreven berekening is het bepalen van de windsnelheid en -richting, waarbij een (bestuurd) busje een maximale uitwijking van 0,8 meter ondervindt tijdens het met 100 km/u (27,8 m/s) snelheid passeren van een 80 km/u (22,2 m/s) rijdende vrachtwagen of bus. Dit voor windsnelheden onder de 22 m/s.

Bij de berekening wordt gebruik gemaakt van resultaten uit Weir e.a., 1972. In dit onderzoek zijn in een combinatie van experimentele (waaronder veldmetingen in praktijksituaties) en analytische onderzoeken de dwarsverplaatsingen van een reeks bestuurder/voertuigcombinaties bepaald bij het passeren van vrachtwagens en bussen. Afbeelding 5 geeft de maximale uitwijking aan (in ft) van een voertuig dat in aerodynamische eigenschappen overeenkomt met een minibusje, voor de hoek van de schijnbare wind (Ψ_w in $^{\circ}$). Afbeelding 5 behoeft enige toelichting. Een negatieve waarde van Ψ_w duidt erop dat het minibusje aan de lijzijde van de vrachtwagen of bus rijdt. Een positieve waarde van de uitwijking geeft aan dat het minibusje een verplaatsing naar de vrachtwagen toe ondergaan heeft. De uitwijking is hier de resultante van positie- en koersveranderingen. Een gevolg van het toepassen van resultaten uit windtunnelmetingen waarbij schaalmodellen van de voertuigen onder hoeken met de luchtstromingsrichting van de windtunnel geplaatst werden, is dat in de afbeelding de schijnbare wind geen constante is, maar afhangt van de hoek Ψ_w . Een ander gevolg hiervan is dat er geen langwindcomponent van de ware wind is en er derhalve alleen sprake is van een dwarswindcomponent van de ware wind. In bijvoorbeeld het "vehicle 60 (mph), bus 50 (mph)"-geval komt daardoor een $\Psi_w = -20^{\circ}$ overeen met een $v_{\text{dwarswind}}$ van $50 \text{ tg } 20^{\circ} = 18,2 \text{ mph}$ en een $v_{\text{sch.wind}}$ van $\sqrt{50^2 + (18,2)^2} = 53,2 \text{ mph}$ enz.

De gegevens van de maximale uitwijkingen voor negatieve hoeken uit Afbeelding 5 (m.a.w. het tweede kwadrant) zijn in dit consult voor alle vier de kwadranten gebruikt. Bij verkeer uit twee richtingen kan namelijk, zoals Afbeelding 6 illustreert, het aan lijzijde passeren van vrachtwagens door minibusjes voor alle windrichtingen optreden. Tevens werd de curve van het "60/50 mph geval" gelineari-

seerd tot een rechte, waarvan de hellingshoek (3,27 cm per °) en het snijpunt met de x-as (-3,5°) te bepalen is. Zoals hiervoor opgemerkt is, betreffen de waarden van de maximale dwarsverplaatsingen uit Afbeelding 5 die bij het alleen voorkomen van een dwarswindcomponent. Dit betekent dat invloeden van eventuele $v_{\text{langswind}}$ -componenten van de ware wind (zie Afbeelding 3) niet verdisconteerd worden. Met andere woorden bij kopwind zal de dwarsverplaatsing groter en bij staartwind kleiner zijn dan Afbeelding 5 aangeeft. Om met dit effect rekening te houden wordt vermenigvuldigd met de ratio's van de door de beide voertuigen ondervonden schijnbare wind en hun rijwind (in km/u).

Als nu $\alpha \equiv$ hoek van de ware wind (in °) en $v \equiv$ de snelheid van de ware wind (in km/u) - beide gemeten op de brug - dan wordt, gegeven het voorgaande, $ij \equiv$ de maximale uitwijking (in cm) als volgt berekend:

$$ij = \left\{ \arctg \frac{v \sin \alpha}{80,45 + v \cos \alpha} - 3,5 \right\} * 3,27 * \frac{\sqrt{\{(96,54 + v \cos \alpha)^2 + (v \sin \alpha)^2\} * \{(80,45 + v \cos \alpha)^2 + (v \sin \alpha)^2\}}}{96,54 * 80,45}$$

Met behulp van een computerprogramma werd hiermee de uitwijking bepaald voor de verschillende hoeken van de ware wind bij toenemende snelheden van de ware wind. Afbeelding 7 geeft hiervan het resultaat. Vermeld zij dat de gradenverdeling georiënteerd is op de langsrichting van de Moerdijkbrug. Een hoek van 90° bijvoorbeeld betekent dat de ware wind loodrecht op de brug staat.

Gezien de limiet gesteld aan de maximale uitwijking, namelijk 0,8 meter, is nu vast te stellen voor welke windsnelheid en -richting buiten de rijstrook geraken te verwachten is. Deze windsnelheden en -richtingen zijn gegeven in Afbeelding 8, met de bijbehorende tabel.

4. HET ADVIES

Met het oog op veilig koers kunnen houden is besproken welke windhinderomstandigheden voor de situatie op de Moerdijkbrug het meest kritisch en welke bestuurder-voertuigcombinaties daarvoor het meest gevoelig zullen zijn. De omstandigheden zijn het gelijktijdig voorkomen van natuurlijke wind en luchtverplaatsingen en afscherming van wind door vrachtwagens en bussen waarbij het gestoorde voertuig aan de lijzijde van de vrachtwagen of bus rijdt, dan wel natuurlijke wind waar in vlagen snelheden boven de 22 m/s optreden. Voor wat de bestuurder-voertuigcombinaties betreft zijn het voertuigen met aerodynamische eigenschappen, vergelijkbaar met die van minibusjes en bestuurders die wat slechtere rijprestaties leveren, bijvoorbeeld als gevolg van niet-gewaarschuwd zijn voor de windhinder op de brug. Bij het voorgaande zij aangetekend dat genoemde condities in de praktijk niet zeldzaam zullen zijn.

Wanneer onder deze windhinderomstandigheden de koersafwijkingen van deze bestuurder-voertuigcombinaties voldoende beperkt blijven, kan gezegd worden dat de in de opdracht geformuleerde doelstelling voor de gehele doelgroep bereikt is. Als voldoende beperkt - m.a.w. het criterium voor veiligheid - kan een positie- en koersafwijking van maximaal 0,8 m beschouwd worden.

In Hoofdstuk 3 is berekend voor welke samenstellen van de snelheid en de richting van natuurlijke wind bij de hiervoor aangegeven condities een uitwijking van 0,8 m te verwachten is. Het resultaat hiervan is gegeven in Afbeelding 8, met de bijbehorende tabel.

Zodra nu ter hoogte van het aerodynamische drukpunt van deze voertuigen (ruwweg 1 meter boven het wegdek) windsnelheden en -richtingen voorkomen, waarvan de coördinaten een punt vormen gelegen boven de curve van Afbeelding 8, resp. boven de tabelwaarden, wordt het veiligheids criterium overschreden. Instellen van de adviessnelheid van 70 km/u is dan in principe wenselijk. Het rijden met deze lagere snelheid moet voorkomen dat een gevaarlijke situatie ontstaat. Bij een lagere rijnsnelheid neemt de gevoeligheid van een voertuig voor windinwerking af. Bovendien worden de frequenties van de voertuigbewegingen lager en daardoor voor een

bestuurder gemakkelijker te corrigeren. Tevens krijgt de bestuurder meer tijd om te reageren.

In 1.2.1. is vermeld dat de invloed op de windsnelheid van de hoogte van en, mede afhankelijk van de windrichting, van de afwijkende ruwheidsparameters voor open zee en land, aanzienlijk is. Op het hoogste punt van de brug, resp. midden boven het water, zijn de grootste windsnelheden te verwachten. Windsnelheid en -richting dienen daarom in langsrichting gezien ter hoogte van het midden van de Moerdijkbrug bepaald te worden. Van metingen op het land of in de omgeving van de landhoofden is geen getrouw beeld van de situatie op het midden van de brug te verwachten, noch gemakkelijk via berekeningen te verkrijgen. Meting van windsnelheid en -richting dient uiteraard plaats te vinden in een omgeving die vrij is van obstakels die plaatselijk de luchtstroming beïnvloeden. Te denken valt hierbij aan verkeersborden en dergelijke, maar ook aan door vrachtwagens veroorzaakte luchtverplaatsingen. Om inwerkingen van laatstgenoemd type te vermijden, is het gewenst de meetinstrumenten enkele malen de hoogte van een vrachtwagen, bijv. ca. 12 m, boven het wegdek te plaatsen. Als gevolg van het hoogteverschil tussen meetpunt en aerodynamisch drukpunt zal een windmeter, zoals in Hoofdstuk 2 opgemerkt wordt, afhankelijk van de windrichting 5 à 10% te hoge waarden aangeven. Hiervoor wordt niet gecorrigeerd om effecten van onervarenheid, enz., te verdisconteren. Als meetinstrumenten zijn cupmeter en windvaan, zoals voor meteorologische waarnemingen standaard toegepast, voor doeleinden als deze van ruim voldoende nauwkeurigheid. Voorgaande adviezen met betrekking tot de windmeting werden op 1 september 1978 gegeven (zie Bijlage 3).

In 1.2.1. is gewezen op aspecten van de zgn. vlagerigheid van natuurlijke wind en in 1.3. en 1.4. op het gegeven dat maar een bepaald deel van de in wind voorkomende frequenties relevant is voor de windhinderproblematiek. Het voorgaande heeft consequenties voor de verwerking van het gemeten windsignaal, maar ook voor het moment van inschakelen van het verdwijnbord en de duur van inschakelen. Dit laatste vormt overigens ook een deel van de eerder weergegeven vraagstelling. In de toelichting op de hierna te bespreken procedure

voor het instellen van de adviessnelheid komen deze onderwerpen aan de orde:

1. Het meetsignaal van de snelheid en de richting van de natuurlijke wind wordt gefilterd met behulp van een laagdoorlaatfilter met een kantelfrequentie van 1 Hz. De aldus verkregen signalen worden in de verdere procedure gehanteerd.

De bewerking van de ingangssignalen beoogt te voorkomen dat het waarschuwingssysteem reageert op de niet relevante fluctuaties in windsnelheid en -richting van boven de 1 Hz.

2. De geografische oriëntatie van de Moerdijkbrug in rekening brengende, wordt elke seconde voor de gemeten windrichting de waargenomen windsnelheid vergeleken met de voor die windhoek overeenkomende tabelwaarde van de windsnelheid die een 0,8 meter grote dwarsverplaatsing veroorzaakt. Indien nu geconstateerd wordt dat ofwel de meetwaarde in de afgelopen 32 seconden deze tabelwaarde tenminste 4 maal overschreden heeft, of dat de meetwaarde de tabelwaarde met een factor $1\frac{3}{8}$ of meer overschrijdt, wordt de adviessnelheid ingesteld.

Dit instelcriterium tracht rekening te houden met zowel een "normale" vlagerigheid van de heersende wind als met een plotse ling optreden van krachtige windstoten, waarmee bijvoorbeeld onweersbuien gepaard kunnen gaan. In de specifieke keuze van de hiervoor genoemde getalwaarden is enerzijds rekening gehouden met de mogelijkheden van de elektronische apparatuur voor de verwerking van het meetsignaal, zoals deze door DVK-RWS meegedeeld zijn. Anderzijds is op basis van door het KNMI verrichte windmetingen, zoals die bijvoorbeeld weergegeven in Afbeelding 9, een schatting gemaakt van het aantal piekwaarden, die de windsnelheid doorgaans per tijdeenheid vertoont. In Afbeelding 9 is tevens te zien dat wind bijvoorbeeld bij een onweersbui snel kan aanwakkeren. Teneinde onder dergelijke omstandigheden het snelheidsadvies zo spoedig mogelijk te geven, is gekozen voor een reageren van het waarschuwingssysteem op een enkele, maar dan forse overschrijding van de tabelwaarden door de meetwaarde. Bij het voorgaande is op te merken dat uit praktijkervaring de wenselijkheid tot bijstellen van dit instelcriterium kan blijken.

3. Indien nu, gegeven het instelcriterium, de adviessnelheid ingesteld wordt, is de duur van dit instellen $8\frac{1}{2}$ minuut. Als in de laatste 32 seconden van deze periode de gemeten windsnelheid de tabelwaarde minder dan tweemaal overschreden heeft, wordt het snelheidsadvies beëindigd en start de procedure vanaf punt 2. Zo niet dan wordt de duur van instellen telkens met 1 minuut verlengd.

In de keuze van dit uitschakelcriterium is getracht een als gevolg van fluctuaties in de windsnelheid en -richting al te snelle wisselingen in instellen en intrekken van het snelheidsadvies te voorkomen. Te snelle wisselingen zouden bij weggebruikers de geloofwaardigheid van het gegeven snelheidsadvies kunnen verminderen. Ook hier geldt dat praktijkervaring tot bijstellen van het instelcriterium kan leiden.

Voorgaande adviezen met betrekking tot de procedure werden op 22 september 1978 aangeboden (zie Bijlage 4).

5. DISCUSSIE

In deze discussie wordt eerst ingegaan op de maatregel van het geven van een snelheidsadvies, vervolgens op de geldigheid van uitspraken omtrent deze maatregel en tenslotte op mogelijkheden resultaten uit dit consult ook toe te passen op andere situaties dan die van de Moerdijkbrug.

In de vraagstelling ligt een keuze besloten voor een bepaalde oplossing voor het probleem van de windinwerking op het wegverkeer op de Moerdijkbrug. Er wordt nl. uitgegaan van een maatregel: het geven van een snelheidsadvies. In dit consult blijven daarom andere vormen van oplossingen buiten beschouwing. Mogelijke andere vormen zullen overigens wel aan de orde gesteld worden in het lopende SWOV-onderzoek "Windhinder van wegvoertuigen", waar het probleem windhinder, waarvoor dan oplossingen gezocht moeten worden, uitgangspunt vormt. Tevens bevat de vraagstelling impliciet de aanname dat de gekozen maatregel een positief effect heeft, dan wel dat een positief effect eventuele negatieve effecten overheerst. In dit consult wordt de maatregel zelf niet verder besproken, nu de vraag zich beperkt tot het bepalen van de omstandigheden waaronder de maatregel te treffen is. Toch lijkt het zinvol in deze discussie op het aspect van eventuele negatieve effecten van de maatregel kort in te gaan.

Met het inschakelen van het verdwijnbord krijgt de weggebruiker én een waarschuwing voor het gevaar van windstoringen én een advies omtrent de rijsnelheid. Een niet bedacht zijn op storingen veroorzaakt lagere rijprestaties van een bestuurder. Het waarschuwen kan daarom een gunstig effect hebben, dat overigens nog te versterken is door de weggebruiker meer informatie over de storing te geven, bijvoorbeeld door zgn. windzakken te plaatsen, waaruit de windrichting blijkt. De adviessnelheid hoeft - zijnde een advies - niet aangehouden te worden. Als verkeersdeelnemers deels wel en deels niet deze snelheid aanhouden, kan de homogeniteit van de verkeersstroom verminderen. Negatieve gevolgen kunnen hieruit voortkomen. Een evaluatie van het effect van het invoeren

van het snelheidsadvies is dan ook hierom al aan te bevelen. Uit een dergelijke evaluatie zou de wenselijkheid kunnen blijken voor het treffen van andersoortige maatregelen, bijvoorbeeld een tijdelijk, plaatsgebonden snelheidsverbod, dan wel van aanvullende maatregelen, bijvoorbeeld een inhaalverbod.

Wat de geldigheid betreft van uitspraken omtrent de maatregel het volgende.

In dit consult is er van uitgegaan dat de verkeersdeelnemers zich houden aan de voor hen geldende wettelijke maximum snelheden van 80 en 100 km/u. Welke snelheden er ter plekke van de Moerdijkbrug in werkelijkheid gereden worden was bij het opstellen van het consult niet bekend. In verloop van tijd kunnen er bovendien veranderingen optreden in de gebruikelijk aangehouden snelheden, bijvoorbeeld als gevolg van invloeden als energieschaarste, vervolgingsbeleid, enz. Ook zou de wetgeving op het punt van de maximum snelheid gewijzigd kunnen worden. De vraag rijst daarom wat de betekenis is van afwijken van dit uitgangspunt voor uitspraken in dit consult.

Toegelicht is dat zowel de rijsnelheid van de vrachtwagen en het lichtere, passerende voertuig, als hun verschilnelheid een rol spelen. De beschikbare kennis is niet toereikend om voor allerlei absolute en verschilnelheden de dwarsverplaatsingen van het lichtere voertuig te berekenen, die het gevolg zijn van de aerodynamische inwerkingen in de passeersituatie. Wel kan kwalitatief het volgende gezegd worden:

1. Toenemen van de rijsnelheid van het lichtere voertuig heeft tot gevolg dat de eenmaal door de storingen ontstane koersafwijkingen sneller leiden tot buiten de rijstrook geraken. Om dit te voorkomen moet de reactietijd van de bestuurder korter zijn, met andere woorden er worden hogere eisen aan zijn reactievermogen gesteld. Bovendien treedt er bij een hogere rijsnelheid een wijziging op in de schijnbare wind, hetgeen onder andere ongunstig uitwerkt op de waarden voor de dwarskracht en het giermoment op het voertuig.
2. De rijsnelheid van de vrachtwagen is van invloed op de grootte van de luchtverplaatsing. Deze wordt nl. bepaald door de zgn. effec-

tieve rijsnelheid, die de som is van de langscomponent van de windsnelheid en van de rijwind. Deze rijsnelheid is dus van invloed op een deel van de aerodynamische storing, die in zijn totaal behalve door een effect van de luchtverplaatsingen ook gevormd wordt door de grootte en richting van de natuurlijke wind en het door de vrachtwagen afschermen van die wind van aan zijn zijzijde passerende andere voertuigen.

3. De verschilsnelheid is een van de belangrijkste factoren die de frequentie en amplitudo bepalen van de bewegingen van het lichtere voertuig, voorzover deze bewegingen het gevolg zijn van de inwerking door luchtverplaatsingen en het afschermingseffect. Geringe verschilsnelheden veroorzaken grotere amplitudo's, met andere woorden een grotere afwijking in positie en/of koers van het lichtere voertuig. Gezien de lagere frequentie onder die omstandigheid zijn deze afwijkingen relatief gemakkelijk door een bestuurder te corrigeren. Grote verschilsnelheden veroorzaken kleinere afwijkingen, maar van een hogere, door de bestuurder moeilijker te corrigeren, frequentie.

Consequenties van het voorgaande zijn:

- a. voor hogere absolute snelheden van zowel de vrachtwagen als het lichtere voertuig maar met eenzelfde verschilsnelheid als in die van het uitgangspunt, zullen de werkelijke uitwijkingen van het lichtere voertuig wat groter worden dan de berekende;
- b. voor én hogere absolute snelheden van beide voertuigen én grotere verschilsnelheden is te verwachten dat de berekende en werkelijke uitwijkingen duidelijk zullen gaan uiteenlopen.

Een ander uitgangspunt is dat de invloed van de landhoofden op de luchtstroming gering zal zijn. Tevens zij er hier op gewezen dat niet gecorrigeerd is voor het verschil in de windsnelheid ter hoogte van het aerodynamische drukpunt van voertuigen en de op 12 m hoogte boven het brugdek gemeten windsnelheid. Hieraan was de schatting gekoppeld dat dit verschil 5 à 10% zal bedragen, afhankelijk van de windrichting. Het lijkt nuttig dit uitgangspunt en deze schatting in enkele praktijkmetingen te toetsen. Dit zou kunnen door met het voor o.a. windmetingen ingerichte zgn. geïstrumenteerde voer-

tuig van IW-TNO het traject af te leggen. De aldus verkregen meetwaarden van windsnelheid en -richting voor verschillende plekken op de brug kunnen, door ze te vergelijken met de meetwaarden van de vaste windmeter op het midden van de brug, een eventuele invloed van de landhoofden aantonen. Uit een dergelijke vergelijking van meetwaarden is tevens de juistheid van de schatting te verifiëren.

Als laatste onderwerp in deze bespreking van de geldigheid van uitspraken omtrent de maatregel wordt ingegaan op de procedure voor het instellen van de adviessnelheid. In Hoofdstuk 4 is vermeld vanuit welke overwegingen de specifieke waarden van het instel- en uitschakelcriterium gekozen zijn. Er werd daarbij al opgemerkt dat uit praktijkervaring de wenselijkheid tot bijstellen van deze waarden kan blijken. Hierop aansluitend wordt aanbevolen gedurende een bepaald tijdvak, bijvoorbeeld in een herfst- en winterperiode, de metingen van de windmeters en de verwerking van die metingen door de aan de windmeters gekoppelde elektronische apparatuur te doen registreren. Hierdoor komt vast te staan wat, gegeven de windomstandigheden, de reden tot inschakelen en de reden van ingeschakeld blijven van het verdwijnbord geweest is. Dit maakt een beoordeling van het directe functioneren van de apparatuur mogelijk. Daarnaast is uit zo'n registratie inzicht te verkrijgen in de windomstandigheden op de brug. Dit ook in relatie tot de omstandigheden boven land, door middel van een vergelijking met windmetingen van meteorologische stations. Tevens wordt de duur van ingeschakeld zijn van het verdwijnbord bekend, hetgeen o.a. te relateren is aan de duur van periodes met veel wind. Dit maakt een beoordeling van het totale functioneren van het waarschuwingssysteem voor windhinder mogelijk.

Wat de mogelijkheden betreft resultaten uit dit consult op ruimere schaal toe te passen het volgende.

Eerder in deze discussie is gewezen op de beperking in de vraagstelling, waardoor andere vormen van oplossingen buiten beschouwing bleven. Bij een eventueel treffen van maatregelen tegen windhinder op andere locaties is het wenselijk de voor- en nadelen af te wegen

van de verschillende mogelijke oplossingen, die gericht kunnen zijn op de storing zelf, op de weg en de omgeving van de weg en op voertuigen en bestuurders. Gaat daarbij de voorkeur uit naar de in dit consult verder uitgewerkte maatregel, dan is ook om die reden uitvoering geven aan de in deze discussie aanbevolen vervolgonderzoeken gewenst.

Tenslotte wordt hier nog met nadruk erop gewezen dat resultaten uit dit consult niet zonder meer toegepast kunnen worden op situaties, waar de windstoring duidelijk deterministische componenten bevat.

AFBEELDINGEN 1 T/M 9

Afbeelding 1. Het vermogensspectrum van de windsnelheid, bepaald ter hoogte van het aerodynamische drukpunt van voertuigen en op verschillende plaatsen van een (in een homogene omgeving gelegen) autosnelweg. (Bron: Hayashi & Furusho, 1966).

Afbeelding 2. Voorbeelden van het patroon van luchtdrukverschillen rond twee verschillende typen vrachtwagens. De pieken aan de linkerzijde vormen de zgn. boeggolven. (Bron: HTS, Voertuigtechniek).

Afbeelding 3. Vectoriële samenstelling van de ware wind - de schijnbare wind - en de zijwindsnelheid voor de situaties van resp. kopwind en staartwind.

Afbeelding 4. C_{IJ} - en C_N -waarden als functie van de sliphoek β . (Bron: IW-TNO).

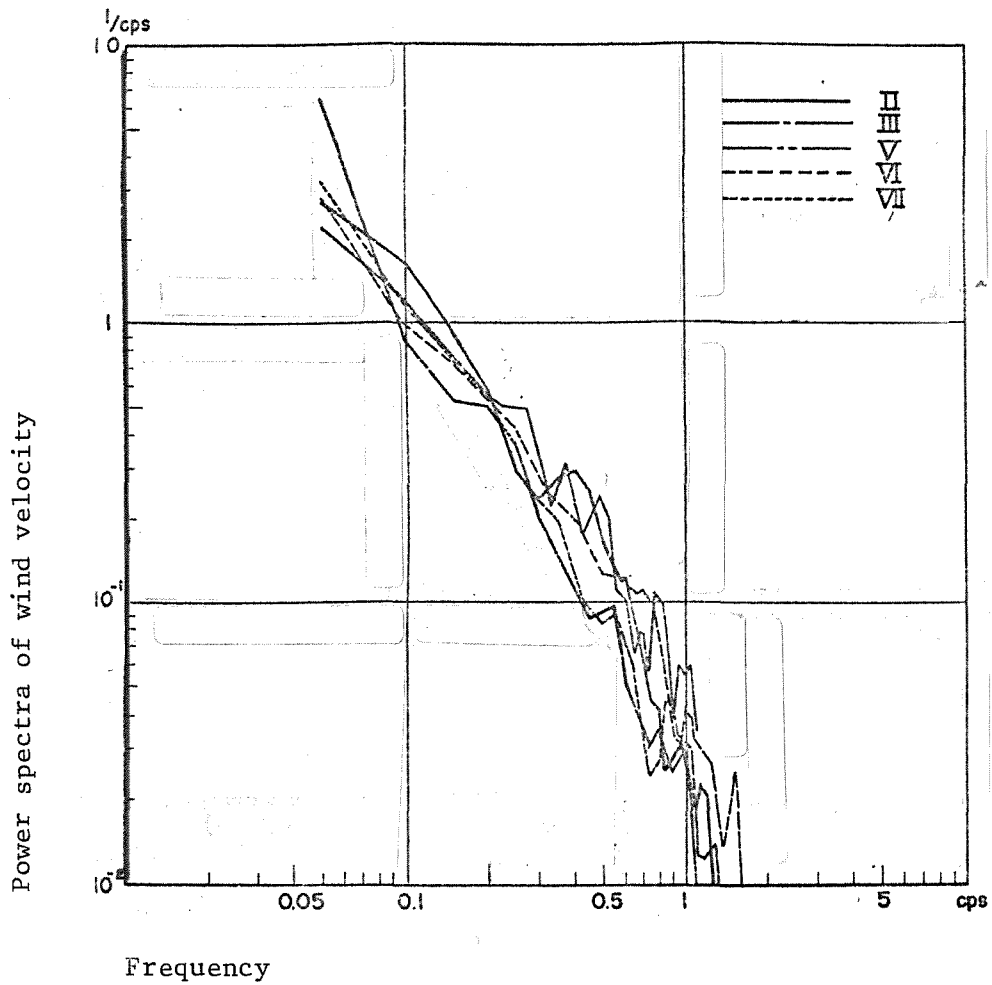
Afbeelding 5. Dwarsverplaatsingen van een voertuig bij het inhalen van een bus als functie van de hoek van de ware wind. (Bron: Weir e.a., 1972).

Afbeelding 6. Passeersituaties bij diverse windrichtingen.

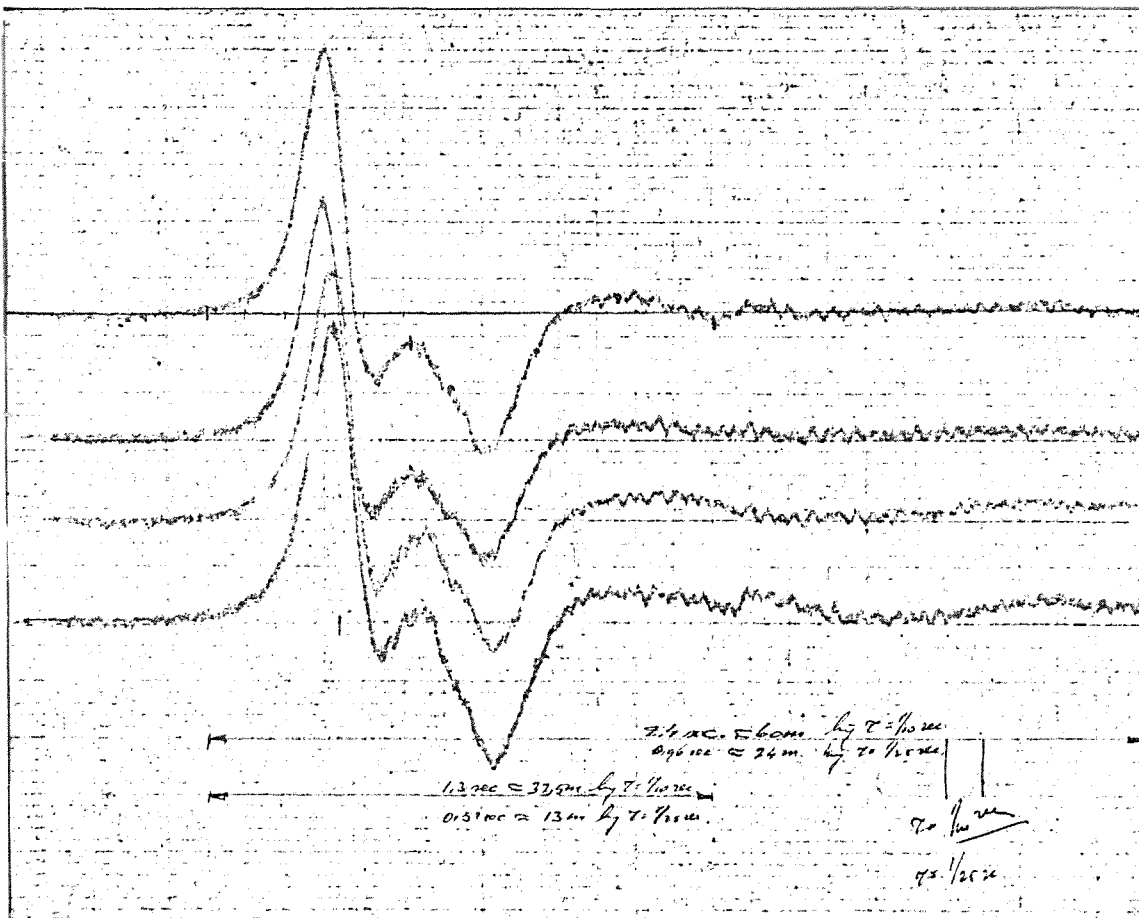
Afbeelding 7. Berekende voertuigdwarsverplaatsingen als functie van de hoek van de ware wind.

Afbeelding 8. Ware windsnelheid als functie van de hoek van de ware wind, waarbij een voertuigdwarsverplaatsing van 0,8 m optreedt, met bijbehorende tabel.

Afbeelding 9. Meetsignaal van windmetingen, verricht op 10 en 200 m hoogte. (Bron: KNMI).

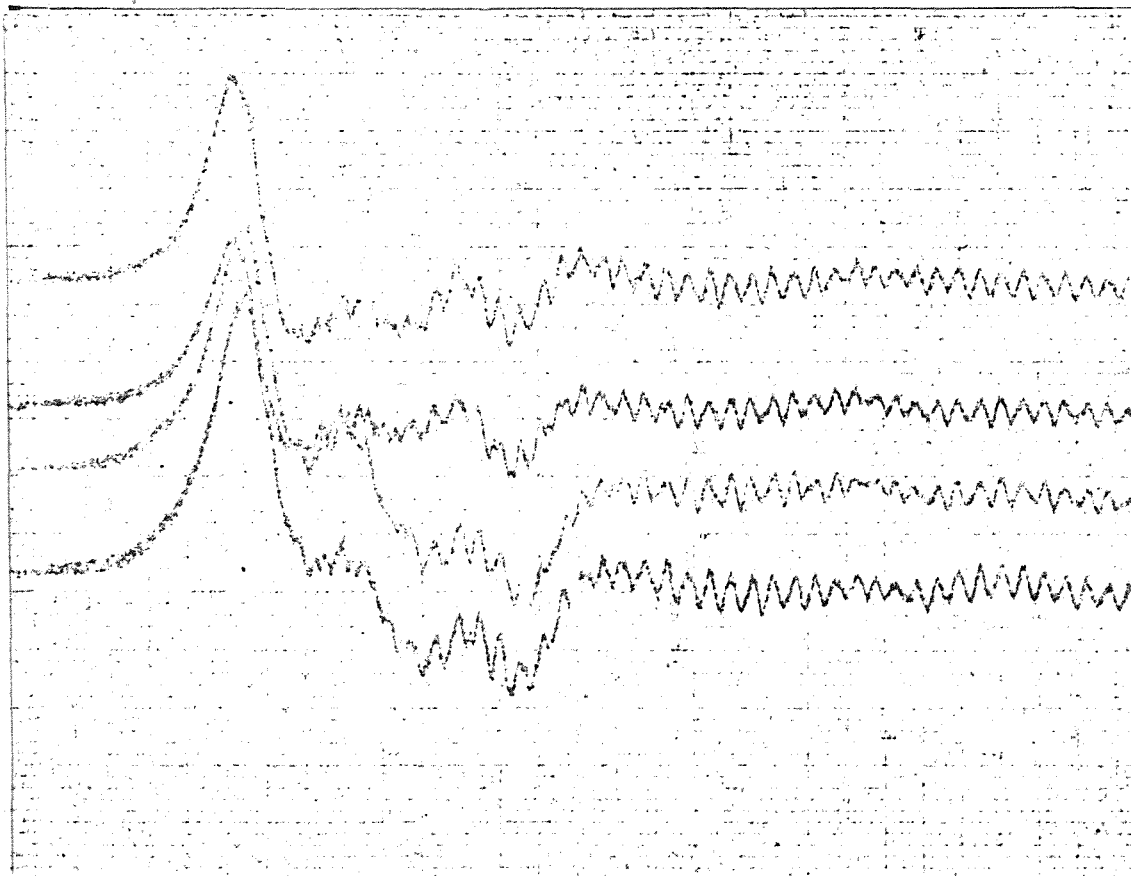


Afbeelding 1. Het vermogenspectrum van de windsnelheid, bepaald ter hoogte van het aerodynamische drukpunt van voertuigen en op verschillende plaatsen van een (in een homogene omgeving gelegen) autosnelweg. (Bron: Hayashi & Furusho, 1966).

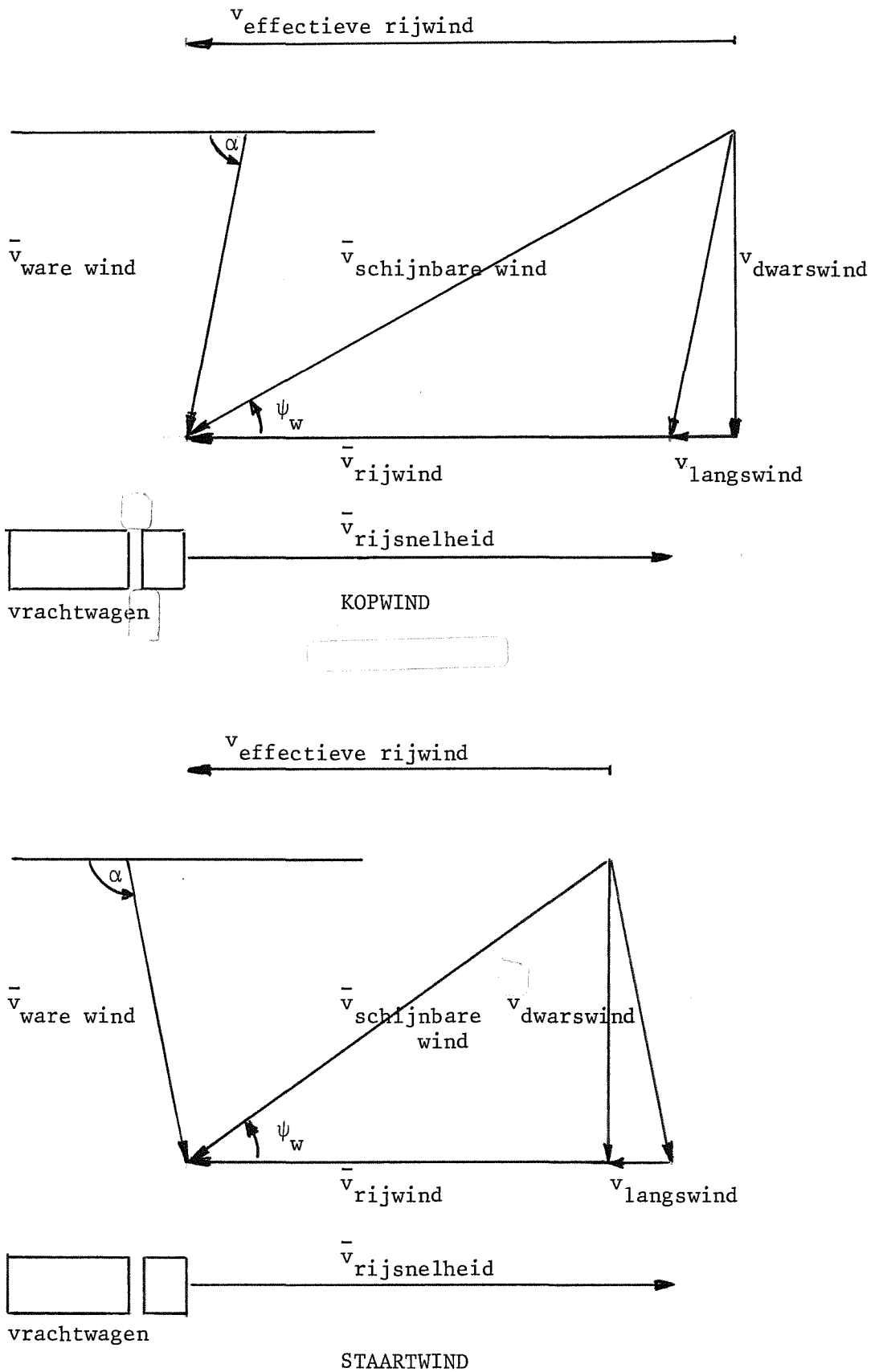


▲ Mercedes Benz vrachtauto

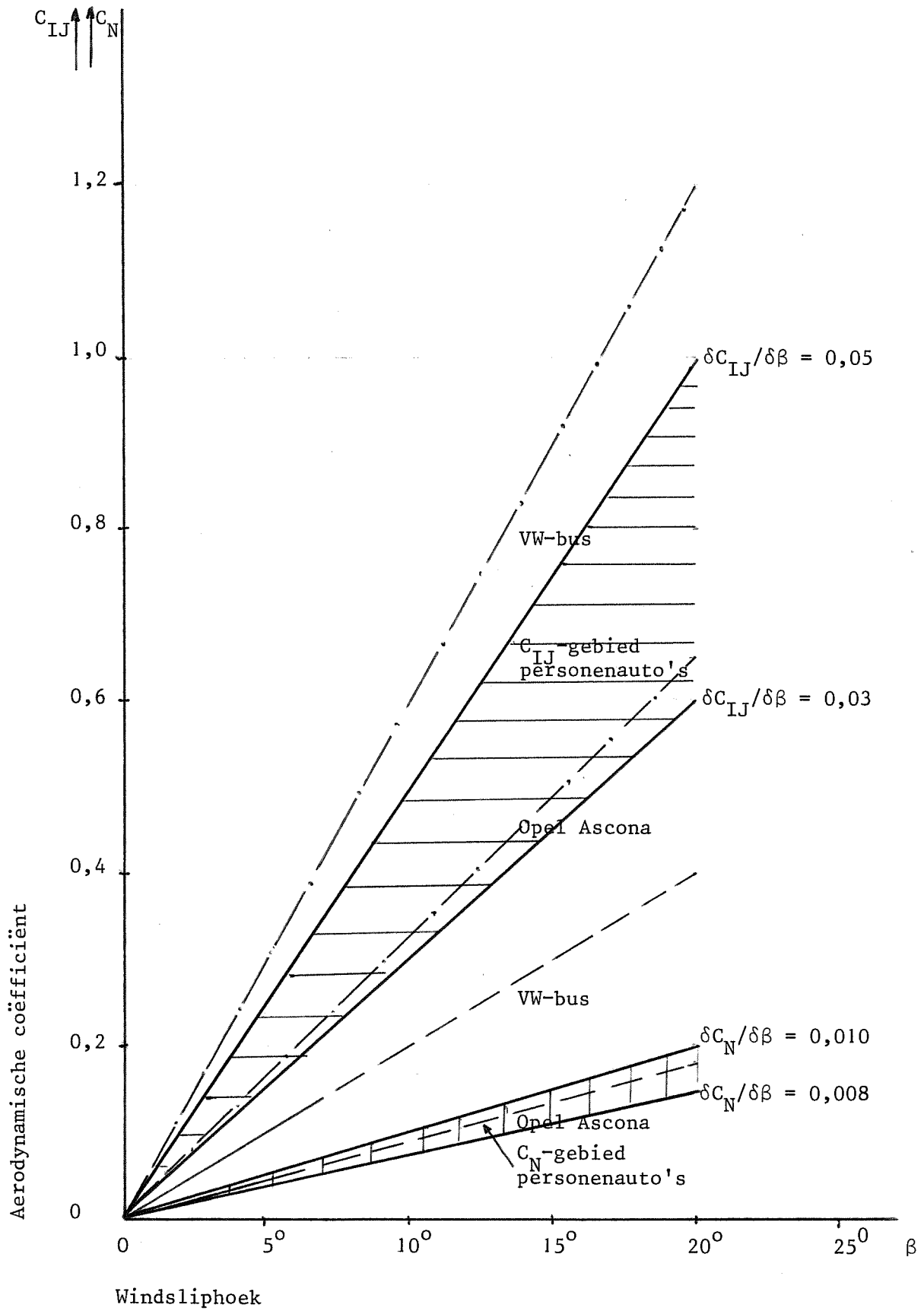
DAF combinatie ▼



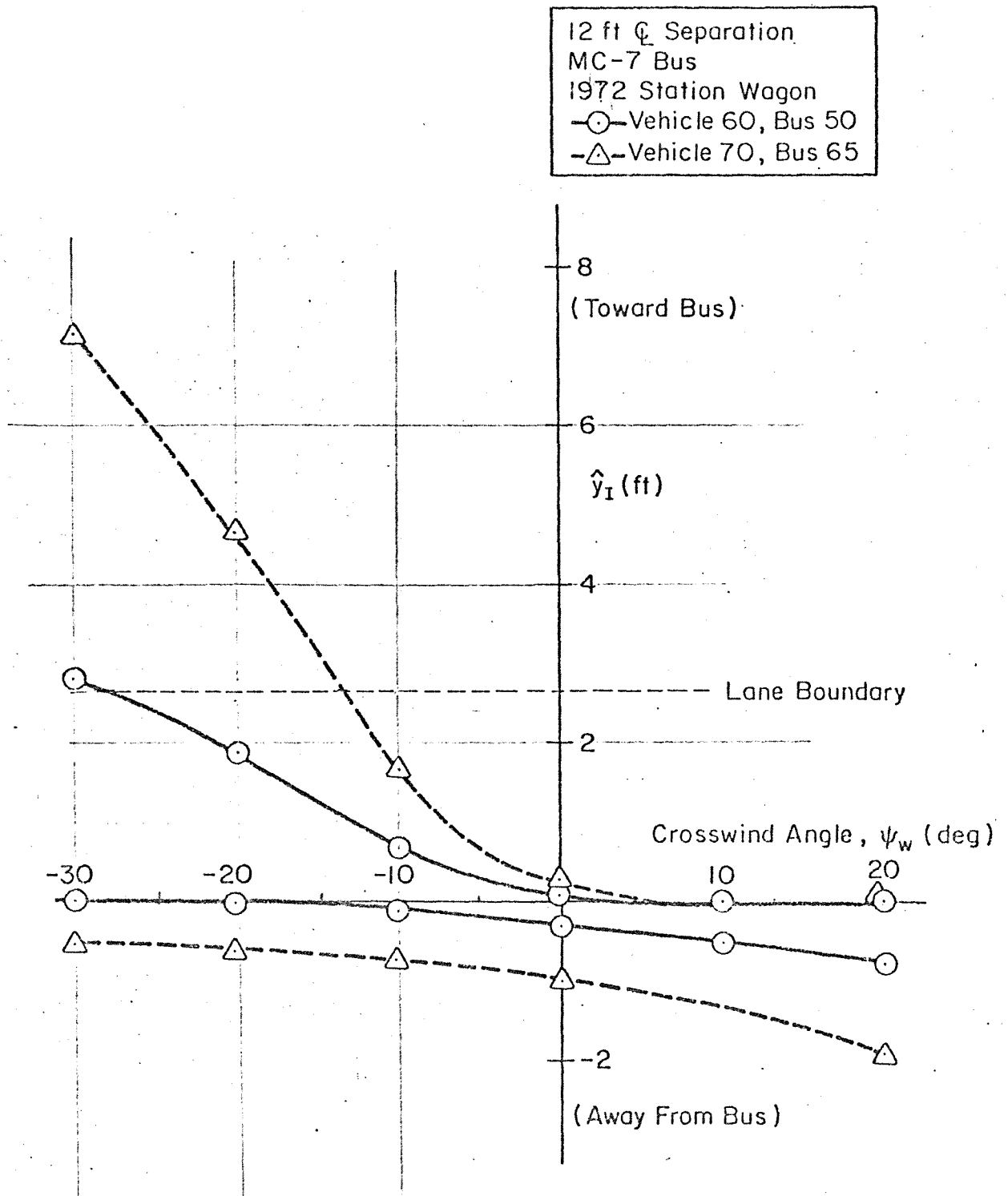
Afbeelding 2. Voorbeelden van het patroon van luchtdrukverschillen rond twee verschillende typen vrachtwagens. De pieken aan de linkerzijde vormen de zgn. boeggolven. (Bron: HTS, Voertuigtechniek).



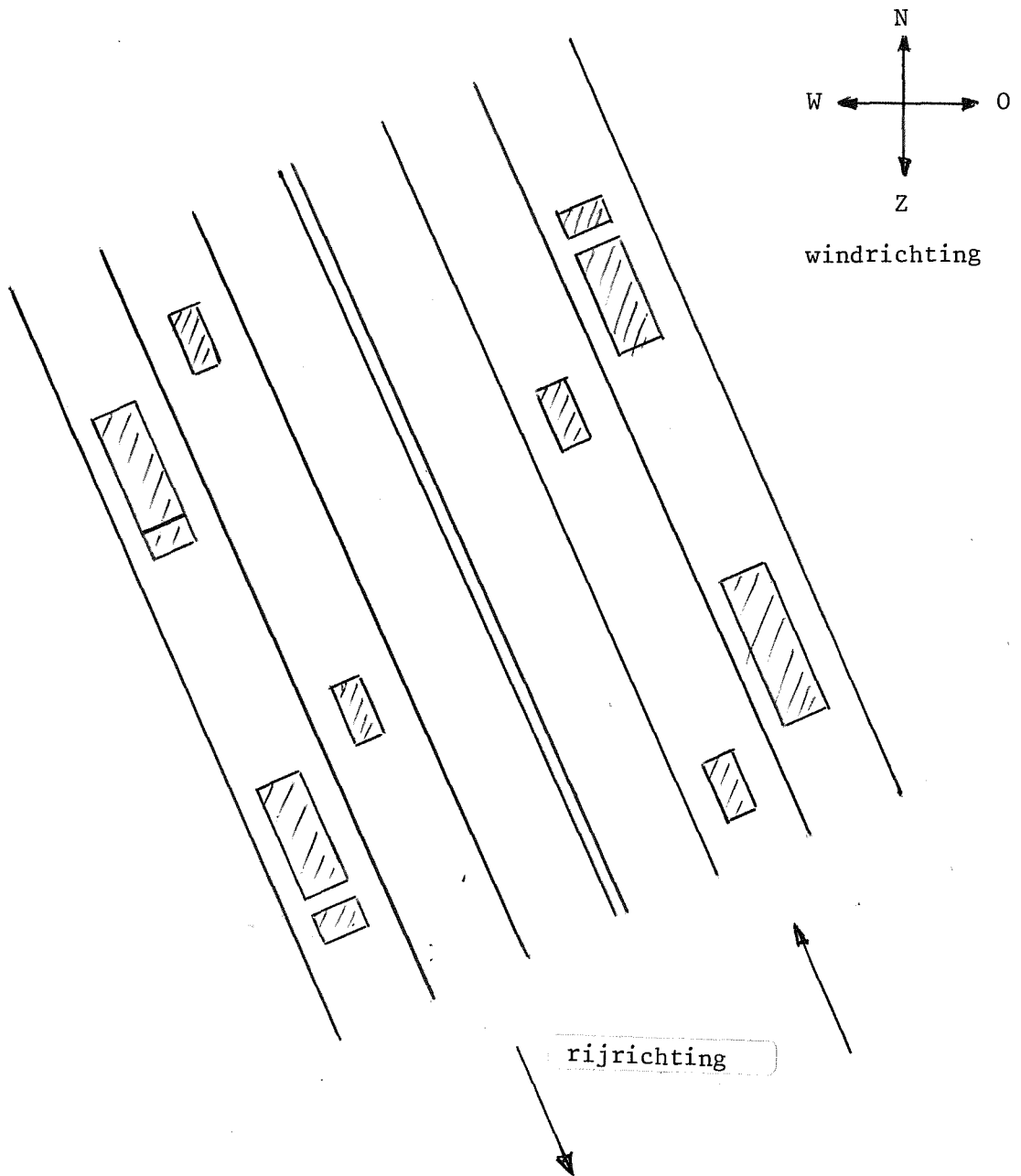
Afbeelding 3. Vectoriële samenstelling van de ware wind-, de schijnbare wind- en de zijwindsnelheid voor de situaties van resp. kopwind en staartwind.



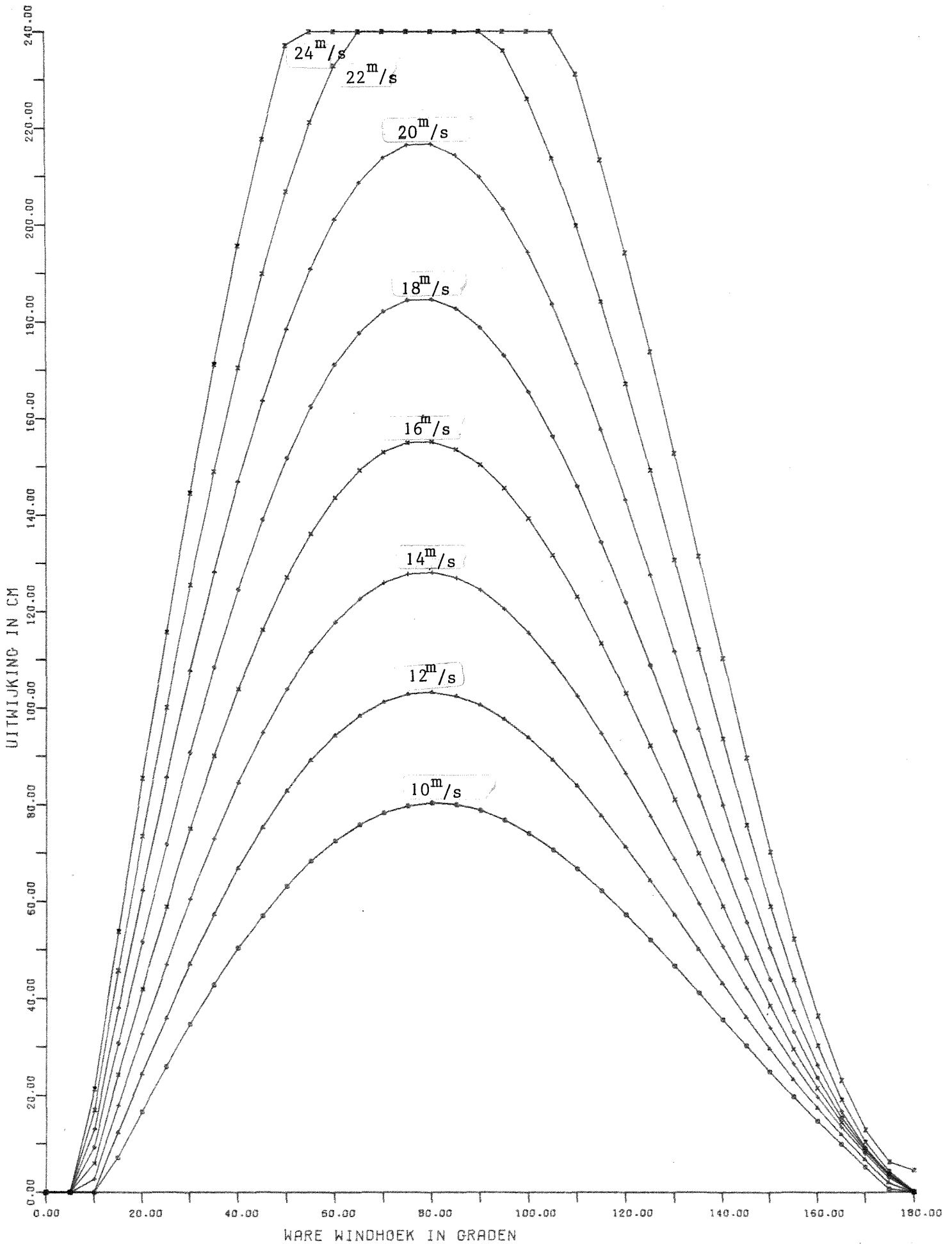
Afbeelding 4. C_{IJ} - en C_N -waarden als functie van de sliphoek β .
(Bron: IW-TNO).



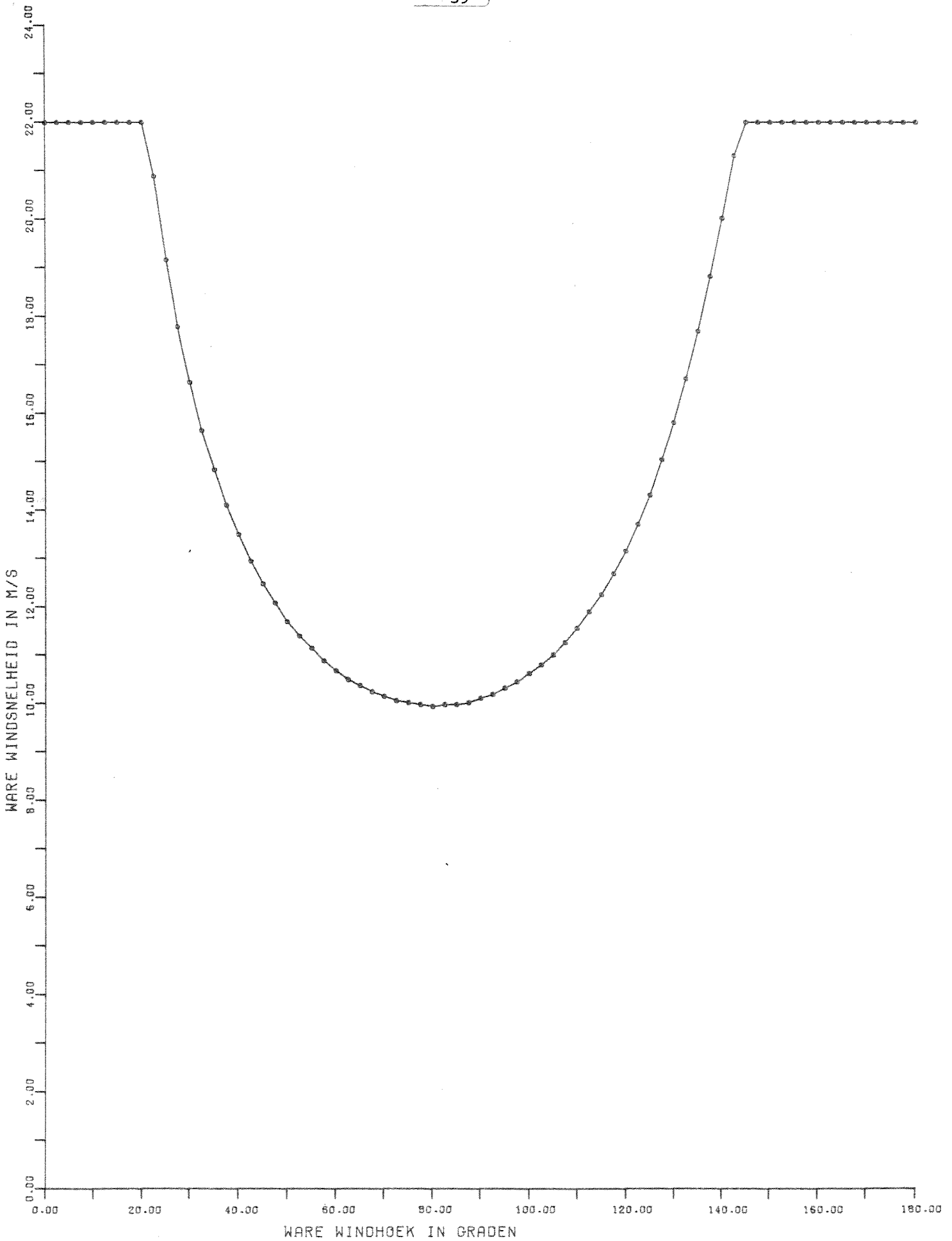
Afbeelding 5. Dwarsverplaatsingen van een voertuig bij het inhalen van een bus als functie van de hoek van de ware wind. (Bron: Weir e.a., 1972).



Afbeelding 6. Passeersituaties bij diverse windrichtingen.



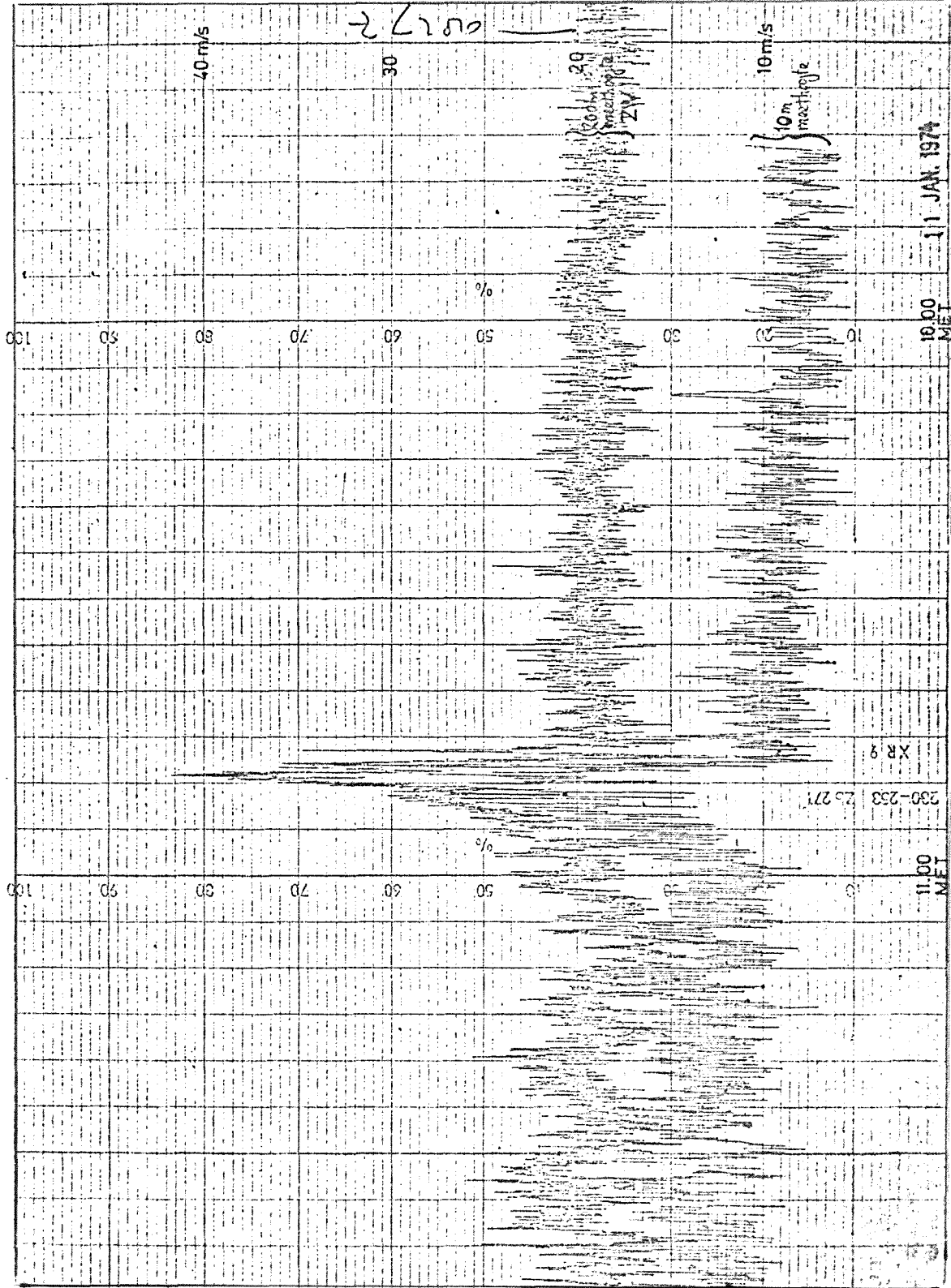
Afbeelding 7. Berekende voertuigdwarsverplaatsingen als functie van de hoek van de ware wind voor verschillende ware windsnelheden.



Afbeelding 8. Ware windsnelheid als functie van de hoek van de ware wind, waarbij een voertuigdwarsverplaatsing van 0,8 m optreedt, met bijbehorende tabel.

WINDHOEK	WINDSNELHEID		
0.0	22.0	100.0	10.6
2.5	22.0	102.5	10.8
5.0	22.0	105.0	11.0
7.5	22.0	107.5	11.3
10.0	22.0	110.0	11.6
12.5	22.0	112.5	11.9
15.0	22.0	115.0	12.2
17.5	22.0	117.5	12.7
20.0	22.0	120.0	13.1
22.5	20.9	122.5	13.7
25.0	19.2	125.0	14.3
27.5	17.8	127.5	15.0
30.0	16.6	130.0	15.8
32.5	15.6	132.5	16.7
35.0	14.8	135.0	17.7
37.5	14.1	137.5	18.8
40.0	13.5	140.0	20.0
42.5	12.9	142.5	21.3
45.0	12.5	145.0	22.8
47.5	12.1	147.5	22.0
50.0	11.7	150.0	22.0
52.5	11.4	152.5	22.0
55.0	11.1	155.0	22.0
57.5	10.9	157.5	22.0
60.0	10.7	160.0	22.0
62.5	10.5	162.5	22.0
65.0	10.4	165.0	22.0
67.5	10.2	167.5	22.0
70.0	10.1	170.0	22.0
72.5	10.1	172.5	22.0
75.0	10.0	175.0	22.0
77.5	10.0	177.5	22.0
80.0	9.9	180.0	22.0
82.5	10.0		
85.0	10.0		
87.5	10.0		
90.0	10.1		
92.5	10.2		
95.0	10.3		
97.5	10.4		

Tabel bij Afbeelding 8



Afbeelding 9. Meetsignaal van windmetingen, verricht op 10 en 200 m hoogte. (Bron: KNMI).

LITERATUUR

Brown, G.J. (1973). "Aerodynamic disturbances encountered in highway passing situations". SAE Paper 730234, 1973.

Davenport, A.G. (1965). "The relationship of windstructure to wind-loading". In: National Physical Laboratory Symposium: Windeffects on Buildings and Structures, p. 54-102. HMSO, London, 1965.

Eaton, D.J. (1973). "Man-machine dynamics in the stabilization of single-track vehicles". Dissertation. University of Michigan, Highway Safety Research Institute, Ann Arbor, 1973.

Feis, J. (1976). "Hoogbouw - windproblemen?!" Polytechnisch Tijdschrift Pt-631 (1976) nr. 5.

Friesz, T.L., Pilkington, G.B., Daniels, F.J., Morrison, D.W., Kakeley, E. & Mela, D.F. (1973). "Summary of staff and contract research on safety of wide buses". Report PB-221 160. Federal Highway Adm. and National Highway Traffic Safety Adm., 1973.

Friesz, T.L. & Trentacoste, N.P. (1973). "Large vehicle-induced aerodynamic disturbances, Critique of past studies and recommendations for further research". Report PB-222 894. JRB Associates, Inc., Arlington, Virginia, 1973.

Godthelp, J. & Wouters, P.I.J. "Koers houden door fietsers en bromfietsers". R-78-16. SWOV, Voorburg, 1978. 39 blz. Ook in: Verkeerskunde 29 (1978) 11: 537 t/m 543.

Hayashi, M. & Furusho, H. (1966). "The response of automobile against a gust". In: Proc. 11. Internationaler automobiltechnischer Kongress FISITA, Juni 1966, München.

Johnson, W.S., Speckhart, F.H. & Bridwell, R.E. "Aerodynamic effects of passing vehicles". SAE Paper 730687, 1973.

Jurksch, G. (1973). Windschutzuntersuchungen an exponierten Strassenbrücken". PROMET 4-1973. Deutsche Wetterdienst, 1973.

McRuer, D.T. & Weir, D.H. (1969). "Theory of manual vehicular control", Ergonomics 12 (1969) 4.

Mitschke, M. (1972). "Dynamik der Kraftfahrzeuge". Springer-Verlag, 1972.

Mitschke, M. (1974). "Experimentelle Untersuchungen und Rechnungen zum Verhalten von Fahrern in Kraftfahrzeugen bei Seitenwind". Bericht No. 88. Techn. Universität Braunschweig, Institut für Fahrzeugtechnik, 1974.

Mitschke, M. & Nieman, K. (1972). "Die Regeltätigkeit des Autofahrers bei Kursabweichungen", Deutsche Kraftfahrforschung und Strassenverkehrstechnik, Heft 221, 1972.

Plate, E.J. (1966). Ein Beitrag zur Bestimmung der Windgeschwindigkeitsverteilung in der durch eine Wand gestörten bodennahen Luftschicht". Dissertatie. TH Stuttgart, 1966.

Plate, E. (1971). "Aerodynamic characteristics of atmospheric boundary layers". USAEC Division of technical information extension, Oak Ridge, 1971.

Rijkoort, P.J. (1970). "Wind - een meteorologische grootheid". De Ingenieur Bouw- en Waterkunde 82 (1970) 31.

Sharp, R.W. (1971). "The stability and control of motorcycles". J. Mech. Engng. Sci. 13 (1971) 24.

Smith, N.P. (1973). "Wind gusts measured on high-speed roads". Proc. Instn Mech Engrs Vol. 187 30/73, pp. 354-360.

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.

Weir, D.H., Hoh, R.H. & Teper, G.L. (1973). "Driver/vehicle control and performance in the presence of aerodynamic disturbances from large commercial vehicles". Systems Technology Inc., Hawthorne, Calif., 1973.

Werkgroep Windenergie TH Eindhoven (1974). "Windenergie". R 2005, Dictaatnr. 3.323. TH Eindhoven, Afd. Natuurkunde, Vakgroep Transportfysica, 1974.

Wojcik, C.K. & Mellinger, R.L. "Pilot-study of housetrailer and truck camper safety". Final Report, phase 2. UCLA-ENG-7208. Institute of Transportation and Traffic Engineering, Los Angeles, Calif., 1971.

BIJLAGEN 1 T/M 4

hoofddirectie van de waterstaat

• Aan
~~de~~ heer Directeur van de Stichting
Wetenschappelijk Onderzoek
Verkeersveiligheid SWOV,
Postbus 71,
2270 AB VOORBURG

uw kenmerk:

's-gravenhage, 25 juli 1978

uw brief van:

ons kenmerk: WVI 46828

onderwerp:

verzonden: 26 JULI 1978

Windbelasting op rijdende
voertuigen.

bijlagen:

Met verwijzing naar het telefonisch gesprek dat op 21 juli j.l. met de heer Wouters werd gevoerd, verzoek ik u om een consult inzake de vraag bij welke windsnelheid, onder welke windhoek en gedurende welke tijd een nader te bepalen adviessnelheid in een automatisch werkend verdwijnbord zou kunnen worden getoond, teneinde ongevallen t.g.v. het uit de koers raken (buiten de rijstrook geraken) van motorvoertuigen bij harde windstoten op de Moerdijkbrug te voorkomen. In verband met de wenselijkheid het automatisch werkende verdwijnbord voor de opening van de Moerdijkbrug met 2 x 3 rijstroken op 11 oktober a.s. te plaatsen, verzoek ik u mij de gevraagde criteria op basis van de huidige kennis terzake, voor 4 september a.s. mede te delen. Voor nadere bijzonderheden t.a.v. het automatische verdwijnbord kunt u contact opnemen met ir.J.J.Klijnhout van de Dienst Verkeerskunde.

DE DIRECTEUR-GENERAAL VAN DE RIJKSWATERSTAAT,
l.D.-G.



Hoofddirectie van de Rijkswaterstaat
Afdeling Veiligheid Wegen
Koningskade 4
's-Gravenhage
t.a.v. De Hoogedelgestrenge Heer
R.T. Overakker

WVI 46828

JC/TK/68702

Windbelasting op rijdende voertuigen
Moerdijkbrug, SWOV nr. 178.098

Voorburg, 28 september 1978.

In uw brief van 25 juli 1978, kenmerk WVI 46828, verzoekt u om een consult inzake een windafhankelijke adviessnelheid op de Moerdijkbrug. Dit, op basis van huidige kennis en mede te delen vóór 4 september jl..

Aan het verzoek hebben wij gaarne gehoor gegeven. Voor het uitbrengen van het consult zijn en worden thans werkzaamheden verricht. In ons nog lopende onderzoek "Windhinder voor Wegvoertuigen", dat ondermeer op soortgelijke problematiek gericht is als waarin sprake is in dit consult, werken wij samen met het Instituut voor Wegtransportmiddelen TNO. Zowel de SWOV als IW-TNO beschikken over kennis inzake deze materie. Het werd daarom door de SWOV nodig geacht IW-TNO bij het uitbrengen van het consult in te schakelen. Dit is in het telefoongesprek tussen de heer Overakker en Ir. P.I.J. Wouters vermeld. De hieruit voortvloeiende door ons te betalen externe kosten bedragen naar schatting f 10.000,-- incl. BTW. Deze kosten zijn niet in ons Werkschema 1978 voorzien. Wij vertrouwen erop dat deze voor het consult gemaakte externe kosten door de RWS vergoed zullen worden; de interne kosten van de SWOV (manuren) zullen volgens een voorlopige algemene afspraak uit onze basissubsidie worden betaald. Uw bericht hierover zien wij gaarne op korte termijn tegemoet. Zonder uw tegenbericht kunt u omstreeks eind november op basis van nacalculatie onze rekening tegemoet zien.

Inmiddels, d.d. 1 september jl., is aan Ir. J.J. Klijnhout van de Dienst Verkeerskunde mondelinge dusdanige informatie verschaft, dat door hem met het ontwikkelen van de electronica gestart kan worden. Tevens werd advies gegeven over de plaats van opstelling van een cupmeter en windvaan.

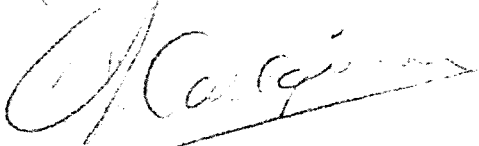
Op 22 september hebben wij advies uitgebracht over de zogenaamde instelwaarden, zodat bij het openstellen van de brug een windafhankelijke adviessnelheid in werking kan zijn.

De schriftelijke rapportage van een en ander zal spoedig volgen.

- 2 -

Het advies is gebaseerd op beschikbare literatuur en bevat daardoor een aantal veronderstellingen, o.a. aangaande de situatie ter plaatse. Het lijkt ons nuttig deze veronderstellingen middels enkele praktijkmetingen te toetsen (windmetingen en afleggen van het traject met een geïnstrumenteerd voertuig). Indien u hiervoor belangstelling hebt en middelen ter beschikking wilt stellen kunnen wij aan de schriftelijke rapportage een plan dienaangaande en een kostenraming toevoegen (naar ruwe schatting zullen de kosten \pm f 20.000,-- bedragen, in 1979 te besteden).

Hoogachtend,
Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV.



J.C.A. Carlquist,
Research-coördinator.

Project Moerdijkbruggen 1975, verkeersvoorzieningen in verband met windoverlast

Bespreking d.d. 1 september 1978.

Aanwezig: de heren J.J. Klijnhout,
C.H. van der Rassel en
W. Ravenschat RWS Dienst Verkeerskunde
Wouters S.W.O.V.
Mooyman IBBC - TNO
J.P. Veldhoven en
J.S. Leendertz RWS Directie Bruggen

1. De heer Veldhoven overhandigt aan D.V.K. tek.no B 34875 in 2-voud, hierop staat aangegeven waar de betonpoeren worden gestort t.b.v. de borden met snelheidsbeperkingen. De poeren zullen 15 september gereed zijn.
2. Opstelling ten behoeve van windsnelheidsmeting.
De opstelling zal zoveel mogelijk een goede meting moeten kunnen realiseren. De heer Wouters merkt op dat behalve dat de wind overlast veroorzaakt voor vrachtauto's, laatstgenoemden op hun beurt samen met de wind gevaarlijke situaties kunnen veroorzaken voor personenauto's. De meting zal daarom zoveel mogelijk in een ongestoorde luchtstroom moeten plaatsvinden. Het effect van de vrachtauto's zal dan door middel van een berekening door de S.W.O.V. en het IBBC-TNO er aan gekoppeld worden.

Voor de plaats van de opstelling, die globaal gezien bestaat uit een elektronische windmeter (fabr. Thier bestelnr. 9.5000.00) en een ondersteuningsconstructie, bijv. een mast, komen twee plaatsen in aanmerking. a. op het zuidelijke landhoofd of
b. op de brug.

a. Op het landhoofd, aan de westzijde.

De windmeter bevindt zich op een mast van $\pm 4,5$ meter boven de weg, dat wil zeggen ongeveer 14,500 meter + NAP. Deze hoogte komt overeen met het midden van de brug.

Deze plaats heeft het nadeel dat de luchtstroom sterk beïnvloed wordt door de oppervlakteruwheid van het land.

Bij westelijke en noordelijke wind zal er door omrekening nog een redelijk resultaat worden verkregen. Bij zuid-westelijke tot zuidenwind is dit echter nagenoeg onmogelijk.

Het voordeel is dat de uitvoering snel kan plaatsvinden, zodat het geheel in oktober in bedrijf is.

b. Op de brug

De voorkeur gaat dan uit naar een opstelling op een van de bruggen bij het midden van de rivier, vanwege de ongestoorde luchtstroom. Er zijn dan twee mogelijkheden, aan de westzijde of midden op de brug.

De westzijde heeft het nadeel dat er aan de brug een speciale voorziening gemaakt zal moeten worden om een mastje te bevestigen. Verder is de luchtstroom hier nogal verstrooid doordat de wind juist op deze plaats een obstakel ontmoet, de zijkant van de brug. Een andere oplossing wordt verkregen door de windmeter op een lichtmast in de as van de brug te plaatsen.

De top van de mast bevindt zich dan 13,5 meter boven de brug op ongeveer 28,0 meter + NAP. De kabel via welke de gegevens worden getransporteerd, moet langs de buitenzijde van de lichtmast naar beneden gevoerd worden om beïnvloeding door de luchtstroom te vermijden.

Het nadeel van deze oplossing is, dat de realisering enige tijd zal vergen.

3. Keuze van de oplossing

Vooralsnog gaat de voorkeur uit naar de plaatsing op een lichtmast. Directie Bruggen zal hiervoor een voorstel ontwerpen.

Dit moet op 15 november gereed zijn.

In verband met de korte tijdsduur tot de opening van de brug wordt besloten om eerst een tijdelijke opstelling op het zuidelijke landhoofd te maken, 25 meter vanaf de kop van het landhoofd.

J.S. Leendertz.

Voorburg, 4 september 1978.

Afschrift aan: D.V.K. 3 x
S.W.O.V. 2 x (1x IBBC-TNO)
Dir. Br. 4 x

Bespreking t.b.v. de instelcriteria voor het inkomen van de advies-
snelheidsborden op Moerdijkbrug.

22-9-'78.

Aanwezig: HH. Wouters (S.W.O.V.).
Schoorman (I.W.-T.N.O.).
Versluis (D.V.K.-E.S.).
Kappert (D.V.K.-E.S.).
Ravenschot (D.V.K.-E.S.).

Aan de hieronderstaande eisen zal het systeem moeten voldoen;

- 1^e De windhoek en de windsnelheid moeten beide door een laagdoor-
laatfilter met een kantelfrequentie van 1 Hz gevoerd worden.
- 2^e Iedere seconde moet er beslist worden of de adviessnelheids-
borden in moeten komen of niet.
- 3^e De inslagcriteria zijn door de S.W.O.V. geleverd via een tabel
met grafiek.
- 4^e Hierbij moet het criterium in de afgelopen 32 seconde 4 x over-
schreden zijn of als het $1\frac{3}{8}$ criterium wordt bereikt dan komt
het systeem onmiddellijk in.
- 5^e De minimale „in“ tijd van het systeem is $8\frac{1}{2}$ minuut.
- 6^e Het uitschakelcriterium is dat bij minder dan 2 inslagcriteria
in de afgelopen 32 seconde het systeem teruggezet wordt.(=blank-
stand).
- 7^e Moet het systeem inblijven, dan is de minimale verlengtijd
1 minuut.
- 8^e Tevens zal op de interface kaart zichtbaar worden gemaakt of er
een criterium is overschreden.

Ravenschot D.V.K. - E.S. 25-9-'78.