

WIND - EEN GEVAAR OP DE WEG

Artikel Verkeerskunde 31 (1980) 3: 104 t/m 108

R-80-8

Drs. P.I.J. Wouters

Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV, Voorburg

Ir. G.L. Mooyman

Instituut voor Wegtransportmiddelen TNO, Delft

Voorburg, 1980

Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV

## SAMENVATTING

Op hooggelegen wegen in een vlakke omgeving - bijvoorbeeld op bruggen, dijken en dammen - waait het doorgaans extra hard. Het verkeer kan daarvan hinder ondervinden. Met name vrachtwagens en autobussen kunnen die hinder nog vergroten, doordat ze in passeersituaties zijwind afschermen en bovendien zelf luchtverplaatsingen veroorzaken. Windgevoelige andere weggebruikers kunnen door de combinatie van wind, afscherming en luchtverplaatsingen uit hun koers gebracht worden. Hoe groot de uitwijking bij diverse rij- en passeersnelheden kan zijn, wordt geschat voor wind van verschillende richting en sterkte. Daarnaast wordt ingegaan op de mogelijkheden om op gevaarlijke plaatsen de uitwijkingen bij krachtige wind binnen aanvaardbare grenzen te houden. Het tijdelijk tegengaan van passeren of verlagen van de rijsnelheid komen het meest in aanmerking. Op de Moerdijkbrug bijvoorbeeld, wordt bij gevaarlijke wind automatisch een snelheidsadvies aan de weggebruikers gegeven.

## SUMMARY

Wind blows generally stronger on high, exposed roads in flat surroundings such as on bridges, dykes and dams, and can therefore hinder traffic. The hindrance can be increased by lorries and buses because, while overtaking, they cut off crosswinds and produce their own air displacement. Other vehicles which are sensitive to wind can be brought off their course by the combination of wind, wind cut off, and air displacements. Estimations are made of the amount of sideways deviation for various driving and overtaking speeds. The possibilities of limiting the sideways deviation during strong winds to acceptable levels are discussed. The most obvious are temporary restrictions on overtaking and reduction of driving speeds. On the Moerdijk Bridge there is, for example, an automatic recommended speed indication during periods of dangerous wind.

## 1. INLEIDING

Wind kan gevaar opleveren voor weggebruikers. Zo kunnen door windstoten voertuigen buiten de rijstrook raken. Op wegen op dijken, dammen en bruggen, over open water, hoog boven dalen enz. waait het doorgaans extra hard. Uit een oogpunt van verkeersveiligheid valt dan ook te overwegen op die plaatsen maatregelen te treffen. Deze kunnen gericht zijn op de storing zelf, op de weg en de omgeving, op voertuigen en bestuurders. Het is hierbij van praktische betekenis te weten waar en wanneer er sprake is van verhoogde windinwerking en onder welke omstandigheden die gevaar voor het verkeer oplevert.

De Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV voert onderzoek uit naar de invloed van wind op de verkeersveiligheid. Dit onderzoek omvat een statistische analyse van gegevens over ongevallen en wind, onder meer om de omvang van het probleem vast te stellen. Tevens wordt in samenwerking met het Instituut voor Wegtransportmiddelen TNO de windinwerking op het bestuurder-voertuig-weg-systeem onderzocht, teneinde oplossingen voor de problematiek te ontwikkelen.

In dit artikel worden resultaten uit laatstgenoemde onderzoekingen gepresenteerd. Daarnaast wordt gebruik gemaakt van gegevens uit de literatuur. Eerst wordt besproken op welke plaatsen en onder welke omstandigheden voor het verkeer hinder van wind verwacht kan worden. Vervolgens wordt ingegaan op de dwarsverplaatsingen die bestuurde voertuigen ondergaan als gevolg van wind van verschillende sterkte en richting. Deze dwarsverplaatsingen worden geschat voor de omstandigheid, dat bij wind een vrachtwagen of bus gepasseerd wordt door voertuigen met ongunstige aerodynamische eigenschappen. Daarbij zijn verschillende rijksnelheden in beschouwing genomen. Ten slotte wordt ingegaan op mogelijkheden om bij wind plaatselijke maatregelen te treffen. In dit verband wordt als voorbeeld de situatie rond de Moerdijkbrug besproken (SWOV, 1979). Voor dit specifieke geval heeft Rijkswaterstaat inmiddels apparatuur ontwikkeld en op de brug geïnstalleerd. Bij wind van

bepaalde sterke en richting geeft die aan de weggebruikers een snelheidsadvies (Ravenschot e.a., 1979).

## 2. LUCHTSTROMINGEN

Twee typen luchtstromingen kunnen voor het verkeer een belangrijke aerodynamische storing opleveren, vooral in combinatie met elkaar: natuurlijke wind, al dan niet plaatselijk beïnvloed door discontinuïteiten in de omgeving van de weg en luchtstromingen rond rijdende voertuigen.

### 2.1. Wind

De wind waar het verkeer mee te maken heeft, wordt beïnvloed door (de structuur van) het aardoppervlak en vertoont de kenmerken van een zgn. grenslaagstroming. Dit houdt o.a. in dat de stroming turbulent is, met andere woorden dat de snelheid en richting van de wind op een bepaalde plaats veranderen in de tijd. Daarom zijn zowel de gemiddelde waarden van windsnelheid en -richting van belang, als de fluctuaties daarin.

De gemiddelde windsnelheid neemt toe met de hoogte. Bovendien is de gemiddelde windsnelheid hoger naarmate het aardoppervlak minder "ruw" is. Bij dit laatste valt op te merken dat voor die delen van het aardoppervlak die in landschappelijke zin als homogeen zijn te beschouwen, zogenaamde ruwheidsparameters bepaald zijn. Zulke delen worden aangeduid als "open zee", "zeer vlak, open land", "weiland, akkerbouw, heggen", "boomgroepen, verspreide bebouwing" enz. Bij een grotere ruwheid wordt enerzijds de wind sterker afgeremd als gevolg van meer wrijving, zodat de gemiddelde windsnelheid lager komt te liggen; anderzijds treedt een grotere "vlaggerigheid" (fluctuaties in de windsnelheid) op. De invloed van hoogte en oppervlakteruwheid op de gemiddelde windsnelheid leidt er toe, dat het op hoog gelegen wegen en op wegen in een vlakke omgeving extra hard waait. De toename is te schatten, o.a. met behulp van de formule van het logaritmisch windprofiel of met de machtwet (zie bijv. Rijkoort, 1968).

Het fluctuerende windsnelheidsverloop is op te vatten als een som van periodieke veranderingen met verschillende frequenties. Daarbij geldt dat de laag frequente veranderingen de grootste amplitudo

en daarmee de hoogste intensiteit hebben. Met het toenemen van de frequentie nemen amplitudo en intensiteit sterk af. Boven de ca. 1 Hz wordt de intensiteit zo gering, dat deze voor het verkeer nog nauwelijks van belang is (Hayashi & Furusho, 1966). Het fluctueren van de windsnelheid en -richting heeft tot gevolg dat de kracht die wind op voertuigen uitoefent, ook veranderlijk is. Op de betekenis hiervan wordt in hoofdstuk 3 nader ingegaan.

De luchtstroming kan plaatselijk beïnvloed worden door afzonderlijke obstakels. Voor het verkeer is dit vooral van belang wanneer zulke obstakels in de onmiddellijke nabijheid van een weg staan. Uit onderzoek naar flatgebouwen, dijkmagazijnen, windschermen op bruggen enz. valt namelijk te concluderen dat de invloed op de luchtstroming aanzienlijk is (zie bijv. Bazlen, 1963; Plate, 1966; Jurksch, 1973; Smith, 1973; Feis, 1976).

Een enkel obstakel in de nabijheid van een weg kan een doorgaans eenmalige, stootvormige windbelasting voor het verkeer veroorzaken. Op regelmatige afstand van elkaar geplaatste obstakels, bijvoorbeeld brugpijlers, kunnen periodieke windbelastingen veroorzaken.

## 2.2. De luchtstroming rond rijdende voertuigen

Voertuigen schermen wind die van opzij komt, af. Hierdoor ontstaan er aan de lijzijde van het voertuig, ter plekke van de voor- en achterkant, plotselinge verschillen in windsnelheid. Het verschil is groter naarmate het harder waait en de wind meer dwars op de rijrichting staat. De mate van afscherming wordt vooral bepaald door de afmetingen van het voertuig. Grote voertuigen als vrachtwagens en autobussen veroorzaken daardoor bij harde zijwind aanzienlijke storingen voor andere voertuigen, wanneer die aan hun lijzijde passeren of gepasseerd worden.

Daarnaast veroorzaakt een rijdend voertuig zelf luchtverplaatsingen. De luchtstromingen die daarvan het gevolg zijn worden gekenmerkt door een "boeggolf" aan de voorkant van het voertuig en een "kielzog" aan de achterkant. Vorm en sterkte van boeggolf en kielzog worden in hoofdzaak bepaald door de afmetingen van het voertuig en

door de snelheid van de rijwind. De snelheid van de rijwind is gelijk aan de rijsnelheid, maar tegengesteld van richting. Met name snelrijdende vrachtwagens en autobussen kunnen zo storingen veroorzaken voor andere voertuigen die passeren of gepasseerd worden. Door de boeggolf worden zij namelijk weggedrukt van de vrachtwagen of bus en door het kielzog er naartoe getrokken. Heeft de vrachtwagen of bus wind recht of schuin tegen, dan neemt de snelheid van de luchtstroming ten opzichte van het voertuig toe. Bij wind mee of schuin van achteren neemt die snelheid af. Daardoor ontstaat er een "effectieve" rijwind die groter, respectievelijk kleiner is dan de rijwind. Door die "effectieve" rijwind wordt het boeggolf- en kielzogeffect versterkt, respectievelijk verzwakt. Afbeelding 1 illustreert hoe de snelheid van de "effectieve" rijwind tot stand komt.

Vaak zullen de effecten van afscherming en luchtverplaatsing gelijktijdig optreden. Wanneer in dat geval een vrachtauto of autobus aan de lijzijde gepasseerd wordt door een ander voertuig, zal dit voertuig ter hoogte van de achterkant van de vrachtwagen of bus te maken krijgen met het wegvallen van de wind. Het voertuig zal daardoor uitwijken in de richting van de vrachtwagen of bus, welke beweging nog wordt versterkt door het kielzog. Het gecombineerd optreden van afscherming en luchtverplaatsing kan de storing dus vergroten (Brown, 1973; Friesz e.a., 1973; Friesz & Trentacoste, 1973; Johnson e.a., 1973; Weir e.a., 1973).

In passeersituaties is het verschil in rijsnelheid tussen het verstorende en het verstoorde voertuig bepalend voor de tijd waarin het verstoorde voertuig het patroon van de luchtstromingen rond de vrachtwagen of autobus doorloopt en derhalve voor de frequenties waarmee de luchtstromingen op het verstoorde voertuig inwerken. Dit is een belangrijk aspect waarop later nader wordt ingegaan.

### 3. VOERTUIG EN BESTUURDER

De eigenschappen van luchtstromingen zijn van belang in relatie tot die van voertuig en bestuurder.

Luchtstromingen oefenen krachten uit op een voertuig. Als het aangrijpingspunt van deze krachten niet samenvalt met het zwaartepunt, ondervindt het voertuig ook momenten. Vooral de zijdelingse componenten van deze krachten en momenten (dwarskracht en giermoment) beïnvloeden respectievelijk de oorspronkelijke positie op de weg en de koers van het voertuig.

Dwarskracht en giermoment zijn evenredig met het kwadraat van de luchtsnelheid ten opzichte van het voertuig. Ze hangen, evenals de ligging van het aangrijpingspunt, af van de afmetingen van het voertuig. Ook de vorm van het voertuig is belangrijk. Deze wordt verdisconteerd in twee coëfficiënten, die bij benadering evenredig zijn met de invalshoek van de luchtstroming ten opzichte van het voertuig: de dwarskrachtcoëfficiënt en de giermomentcoëfficiënt. De gevoeligheid van het voertuig voor de inwerking van deze krachten en momenten wordt o.a. bepaald door de massaverdeling van het voertuig, de driftstijfheid van banden en de geometrie en elastische eigenschappen van wielophanging en stuurinrichting (zie bijvoorbeeld Mitschke, 1972). Bepaalde combinaties van deze eigenschappen kunnen resulteren in hoge zijwindgevoeligheid. Dit is met name het geval voor sommige typen bestelbusjes.

Behalve door voornoemde oorzaken worden positie- en koersafwijkingen bepaald door de tijd waarbinnen de verstorende krachten en momenten op het voertuig inwerken. De afwijkingen worden namelijk kleiner naarmate die tijd afneemt, als gevolg van invloeden van massa-tragheiden e.d. Zo zijn personenauto's hoofdzakelijk gevoelig voor de langzaam fluctuerende verstoringen in het laagfrequentie gebied tussen 0 en 2 Hz.

Positie- en koersafwijkingen maken stuurcorrecties nodig. Het vermogen van een bestuurder daartoe is echter begrensd. Om te beginnen heeft elke bestuurder een bepaalde reactietijd nodig; daarnaast zijn er grenzen aan de snelheid en kracht waarmee hij kan



reageren. Ook de response van het voertuig op stuurcorrecties kent dergelijke beperkingen. Adequate stuurcorrecties mogen daarom slechts verwacht worden op voertuigbewegingen met frequenties tussen 0 en 0,5 Hz. Afhankelijk van o.a. ervaring en oplettendheid en ten koste van toenemende inspanning, worden hogere frequenties steeds minder goed ondervangen. Rond de 1 Hz is de grens van het vermogen van een bestuurder tot stuurcorrecties bereikt (zie bijvoorbeeld McRuer & Weir, 1969; Mitschke & Niemann, 1972; Mitschke, 1974; Weir e.a., 1972). De bestuurder-voertuig-combinatie zal dus vooral hinder ondervinden van storingen met frequenties tussen 0,5 en 2 Hz. Daarnaast is de voertuigsnelheid van belang. Bij hogere rijsnelheden neemt de grootte van de storing namelijk toe. Bovendien worden dan, bij een zelfde reactietijd van de bestuurder, de koersverschillen groter.

Behalve dat luchtstromingen positie- en koersafwijkingen veroorzaken, kunnen ze ook leiden tot bewegingen van een voertuig rond zijn lengte-as. Deze zogenaamde rolbewegingen kunnen op hun beurt weer de positie- en koersafwijkingen beïnvloeden. Dit is vooral van betekenis voor tweewielers (Sharp, 1971; Eaton, 1973; Godthelp & Wouters, 1978) en voor lichte gelede voertuigen zoals een personenauto met caravan (Wojcik & Mellinger, 1971; Collins & Wong, 1974; Lister, 1978).

#### 4. TOELAATBARE VOERTUIGUITWIJKINGEN

Door Weir e.a. (1971 en 1972) werden de zijdelingse uitwijkingen van bestuurder-voertuig-combinaties onderzocht, zoals die optreden bij wind van verschillende sterkte, uit een richting dwars op de weg. Daarbij werd er van uitgegaan dat de bestuurder-voertuig-combinaties een vrachtwagen of autobus inhaalden. Zij bepaalden o.a. de maximale zijdelingse uitwijkingen bij het inhalen van een autobus (Weir, e.a., 1972: p. 24). Het inhalende voertuig had eigenschappen, vergelijkbaar met die van windgevoelige typen bestelbusjes. Het werd bestuurd door "modale" bestuurders. De snelheidsverschillen tussen het verstorende en het verstoorde voertuig bedroegen circa 8 en 17 km/u. Gezien de duur van de luchtinwerking, zijn bij dergelijke snelheidsverschillen de grootste uitwijkingen van het lichtere voertuig te verwachten. In de betreffende onderzoeksresultaten van Weir e.a. zijn realistische praktijksituaties verdisconteerd. Ze kunnen voor een ruimere toepassing geschikt worden gemaakt door ze voor willekeurige windsnelheden en -richtingen uit te werken. Tevens moet dan o.a. het effect van kop- en staartwind in rekening gebracht worden. Zoals meer uitvoerig beschreven is door de SWOV (1979), is dit mogelijk door uit te gaan van de bij benadering geldende evenredigheid tussen de grootte van de krachten en momenten op het lichtere voertuig en het produkt van de effectieve rijwindsnelheden van dit voertuig en de autobus. Aangenomen dat de voertuiguitwijkingen evenredig zijn met op het voertuig uitgeoefende krachten en momenten, kunnen deze uitwijkingen geschat worden. In afbeelding 2 wordt zo'n schatting gegeven voor het geval van een autobus die circa 80 km/u rijdt en ingehaald wordt door een bestelbusje dat ca. 97 km/u rijdt. De verschillende invloed van kop- en staartwind blijkt daar overigens uit de asymmetrie van de curves rond een lijn door de ware windhoek van  $90^{\circ}$  (waarbij derhalve de wind dwars op de weg gericht is). Naast de hiervoor genoemde bewerkingen is door extrapolatie nog een beeld te geven van dergelijke uitwijkingen voor andere rijwindsnelheden, maar bij een gelijkblijvend snelheidsverschil. Op resultaten hiervan wordt nog teruggekomen.

Nu de maximale voertuiguitwijkingen bij benadering bekend zijn, rijst de vraag wanneer deze uitwijkingen een kritieke waarde bereiken. Gesteld kan worden dat voertuigen de rijstrookbegrenzing niet ongewild mogen overschrijden. Is de rijstrook bijvoorbeeld (zoals gebruikelijk) 3,60 m breed, dan betekent dit dat bestelbusjes hooguit 0,80 m en de meeste personenauto's niet veel meer dan 1,00 m van hun baan mogen afwijken. Hierbij is aangenomen, dat ze aanvankelijk in het midden van de rijstrook reden. Dit is aanneemelijk, omdat vrijwel iedere bestuurder bij het passeren van een vrachtwagen of bus een zo ruim mogelijke zijdelingse afstand aanhoudt.

De kritieke waarde wordt ook nog door andere factoren bepaald. Grote uitwijkingen naar de vrachtwagen of bus toe kunnen bijvoorbeeld schrikreacties veroorzaken. Sterke stuurcorrecties bij glad wegdek verhogen het gevaar voor slippen. Het waarnemen van koerswijzigingen kan bemoeilijkt worden door zichtbelemmeringen, bijvoorbeeld van opspattend water rond een vrachtwagen of bus. Dergelijke factoren zullen vooral voor onervaren bestuurders van belang zijn. De uit rijstrook- en voertuigbreedte afgeleide kritieke waarde moet daarom beschouwd worden als een hypothetische bovengrens. De grenswaarde van nog toelaatbare uitwijkingen zal wat lager liggen. Hoeveel lager, zal uiteindelijk de wegbeheerder moeten beslissen op basis van een enigszins subjectieve schatting van het belang van deze factoren voor de plaatselijke omstandigheden.

Bij welke windsnelheid en -richting de eenmaal vastgestelde grenswaarde wordt bereikt, volgt rechtstreeks uit de berekeningen van maximaal optredende uitwijkingen, zoals die bijvoorbeeld in afbeelding 2 zijn weergegeven. Voor een toelaatbare grenswaarde van 0,80 m worden de bijbehorende berekende waarden voor windsnelheid en windrichting gegeven in de afbeeldingen 3, 4 en 5. Bij de afbeeldingen valt op te merken dat een punt (gevormd door de waarden van de ware windsnelheid en -richting) boven de U-vormige krommen aangeeft dat grotere uitwijkingen dan 0,80 m verwacht kunnen worden. De berekeningen zijn overigens bij windsnelheden

boven de 22 m/s afgebroken, omdat bij dergelijke snelheden de wind alleen al problemen voor het verkeer zal opleveren.

Uit afbeelding 3 blijkt dat, bij eenzelfde rijsnelheid van de gepasseerde autobus (nl. 80 km/u), een snelheidsverschil van 10 km/u grotere voertuiguitwijkingen veroorzaakt dan een snelheidsverschil van 20 km/u. Die grotere uitwijkingen komen dus tot stand ondanks dat het lichtere, passerende voertuig langzamer rijdt.

Zoals in paragraaf 2 en 3 reeds globaal besproken is, ondervindt het lichtere voertuig bij geen of zeer geringe snelheidsverschillen de grootste luchtinwerking. De lagere frequenties waarbij dit gebeurt, zijn echter door de bestuurder relatief gemakkelijk te ondervangen. Bij wat grotere verschillen, bijvoorbeeld 10 km/u, neemt de frequentie toe, terwijl bovendien bij dat snelheidsverschil de inwerking van de luchtstroming nog groot is. Daardoor wordt corrigeren moeilijker. Voor nog grotere verschillen, bijvoorbeeld 20 km/u, nemen de voertuigafwijkingen verder af als gevolg van invloeden van massatraagheid e.d. Bij zeer grote verschillen, zoals het geval is bij tegemoetkomend verkeer, is de uitwijking gering. Er is dan slechts een trillen of schokken van het voertuig merkbaar.

Uit de afbeeldingen 4 en 5 blijkt dat, bij gelijke snelheidsverschillen, de bestuurder-voertuigcombinaties bij hogere rijsnelheden meer hinder van de luchtstromingen ondervinden. De toelaatbare waarde wordt namelijk overschreden, zowel bij lagere windsnelheden als bij windrichtingen die minder dwars op de rijrichting staan.

## 5. PLAATSELIJKE MAATREGELEN BIJ WIND

Vooral in een vlakke omgeving staan hooggelegen wegen doorgaans aan extra hevige wind bloot. Op vrijwel alle wegen komt vrachtverkeer voor en rijden bussen. Tot de maatregelen die op zulke plaatsen tegen de windhinder te treffen zijn, behoort het tijdelijk bij wind tegengaan van inhalen van en door vrachtwagens en autobussen. De invloed van luchtverplaatsingen en afscherming wordt dan vermeden en de hinder blijft beperkt tot die van wind alleen. Deze hinder is aanzienlijk geringer. Ook kan gedacht worden aan het tijdelijk bij wind fors verlagen van de rijsnelheid van het verkeer. Bij lagere rijsnelheden neemt immers de gevoeligheid van voertuigen voor windinwerking af en zijn voertuigbewegingen gemakkelijker te corrigeren.

In aanvulling op dergelijke maatregelen is het wenselijk weggebruikers te waarschuwen voor windhinder en hen over de situatie ter plekke informatie te geven. Dit kan bijvoorbeeld door zogenaamde windzakken te plaatsen. Hiervan gaat niet alleen een waarschuwing uit, maar er wordt informatie over de windrichting mee gegeven. Wanneer een weggebruiker bedacht is op storingen en hij de eigenschappen ervan kent, zal dit zijn rijprestaties bij het koers houden ten goede komen.

De snelheid en de richting van de wind zijn op plaatsen waar van verhoogde windinwerking sprake is, continu te meten, bijvoorbeeld met een vast opgestelde anemometer en windvaan. Bij deze meetwaarden horen dan de voorspelde voertuiguitwijkingen, waarin invloeden van het passeren van vrachtwagens enz. in rekening gebracht zijn. De voorspelde uitwijkingen zijn te vergelijken met de toelaatbare (bijv. door gebruik te maken van de berekende waarden in de afbeeldingen 4 en 5). Hiermee is bekend wanneer het treffen van maatregelen gewenst is.

Wat betreft een verlaging van de rijsnelheid kan nog worden opgemerkt dat een tijdelijk ingestelde maximumsnelheid wellicht de voorkeur verdient boven een tijdelijk snelheidsadvies. Een snelheidsadvies maakt minder kans opgevolgd te worden. Als verkeersdeelnemers deels wel en deels niet hun rijsnelheid verlagen, zal

de homogeniteit van de verkeersstroom afnemen. Dit kan nadelige gevolgen hebben voor de verkeersveiligheid.

## 6. EEN WINDAFHANKELIJK SNELHEIDSADVIES OP DE MOERDIJKBRUG

De Moerdijkbrug ligt over het daar circa 1 km brede Hollandsch Diep. Het verkeer rijdt er ongeveer 15 m boven het wateroppervlak. Met behulp van het zogenaamde logaritmisch windprofiel is te schatten dat, bij wind uit richtingen dwars op de rijweg, de gemiddelde windsnelheid op de brug tot 2,5 maal zo hoog kan zijn als op de naar de brug leidende wegen. De weg op de brug vormt een onderdeel van een autosnelweg, waarvoor de wettelijke maximumsnelheden gelden van 80 km/u voor vrachtwagens en 100 km/u voor personenauto's. Hij bestaat uit tweemaal drie rijstroken van elk 3,60 m breed. De vormgeving van de brug en de toeleidende wegen komt zo overeen, dat weggebruikers zich nauwelijks zullen realiseren dat ze op een brug hoog boven water rijden.

Naar aanleiding van ongevallen bij wind, o.a. tijdens de voorlopige openstelling van de vernieuwde Moerdijkbrug, besloot Rijkswaterstaat vanaf het officieel openstellen van de brug het verkeer een snelheidsadvies van 70 km/u te geven bij gevaarlijke windomstandigheden. De SWOV werd gevraagd, die omstandigheden te bepalen.

In een daarover uitgebracht consult (SWOV, 1979) is uitgegaan van de hinder van wind in passeersituaties, waarbij de vrachtwagen of bus 80 km/u rijdt en het lichtere voertuig 100 km/u. Als maximaal toelaatbare uitwijking voor het door de luchtstromingen beïnvloede voertuig is 0,80 m genomen. Deze uitgangspunten leidden ertoe dat gebruik werd gemaakt van de schattingen uit afbeelding 2. De daaruit afgeleide U-vormige kromme voor de maximaal toelaatbare voertuiguitwijkingen werd in tabelwaarden omgezet. Continu ter plaatse verrichte metingen van de snelheid en richting van de wind worden in een microprocessor vergeleken met de tabelwaarden die in zijn geheugen zijn opgeslagen. In principe krijgen de weggebruikers via oplichtende verkeersborden (zogenaamde verdwijnborden) op de oprit-ten van de brug het snelheidsadvies, wanneer de meetwaarden tabelwaarden overschrijden.

De SWOV heeft geadviseerd de windmetingen midden op de brug te verrichten. Daar is de wind het sterkst, niet alleen omdat het de hoogst gelegen plaats is, maar ook omdat de wind er voor richtingen

dwars op de weg het minst afgeremd wordt. Om te voorkomen dat voorbijrijdend verkeer de metingen beïnvloedt, zouden de meters op zo'n 12 m (namelijk enkele malen de hoogte van een vrachtwagen) boven het wegdek aangebracht kunnen worden. Door het hoogteverschil tussen meetpunt en aangrijpingspunt van de wind op een voertuig zal de gemeten windsnelheid te hoog zijn. Uiteraard is hiervoor een correctie nodig en mogelijk.

In feite wordt het snelheidsadvies pas gegeven wanneer de meetwaarden de tabelwaarden vier maal in een halve minuut overschreden hebben. Ook wanneer de meetwaarden éénmaal groter zijn dan  $1 \frac{3}{8}$  maal de tabelwaarden, wordt het snelheidsadvies gegeven. Dit laatste inschakelcriterium is gekozen om rekening te kunnen houden met een plotseling aanwakkeren van de wind, bijvoorbeeld bij onweersbuien. Het snelheidsadvies wordt vervolgens gedurende  $8 \frac{1}{2}$  minuut gehandhaafd. Snelle wisselingen in uit- en inschakelen, die de geloofwaardigheid van het opgegeven advies bij weggebruikers zouden kunnen verminderen, worden hiermee vermeden. Indien in de laatste halve minuut van deze periode de tabelwaarden tenminste tweemaal overschreden zijn, wordt de duur van het advies met (telkens) één minuut verlengd. Uit de praktijkervaring zou overigens kunnen blijken dat deze inschakelcriteria bijgesteld moeten worden.

Voor nadere bijzonderheden over de uitvoering van de microprocessor en de daarin geprogrammeerde controle- en beslissingsfuncties ten aanzien van het al of niet activeren van het verdwijnbord, wordt korthedshalve verwezen naar een publikatie daarover van de ontwerpers (Ravenschot e.a., 1979). In die publikatie worden ook uitvoeringsaspecten beschreven, die hier niet aan de orde komen.



## 7. SLOTOPMERKINGEN

Bij het beschouwen van windhinder voor het verkeer is uitgegaan van realistische omstandigheden, in het bijzonder van situaties waarin vrachtwagens of autobussen passeren of gepasseerd worden. Dat betekent niet dat met alle kritische omstandigheden is rekening gehouden. Bij de huidige stand van onderzoek is dit nog niet mogelijk. Een nadere evaluatie van de gepresenteerde bevindingen is daarom nodig, evenals verder onderzoek. Wat dit laatste betreft zou met name de invloed van verschillen in passeersnelheid nader bestudeerd moeten worden.

Behalve in passeersituaties, kan de hinder van wind ook verergeren door de invloeden van vaste obstakels in de omgeving van de weg. Ook hier is nader onderzoek gewenst. De effecten van afmetingen en vorm van obstakels, hun ligging ten opzichte van de weg en de reacties van bestuurders op hun vaak specifieke storingen, belemmeren thans een algemene behandeling. Er bestaat overigens wel voldoende aanleiding om aan te bevelen obstakels niet in de onmiddellijke omgeving van de weg te plaatsen. Speciale aandacht vragen op regelmatige afstand van elkaar aangebrachte obstakels, ook al is de invloed van elk afzonderlijk obstakel gering. De periodieke storingen die ze veroorzaken, kunnen namelijk tot opslingeren van de voertuigbewegingen leiden.

In dit artikel is bij het schatten van de zijdelingse uitwijkingen uitgegaan van voertuigeigenschappen zoals die voorkomen bij bepaalde windgevoelige typen bestelbusjes. Over andere windgevoelige voertuigcategorieën is nog het volgende op te merken. Met het relatief smalle motorrijwiel kan veelal een vrij grote zijdelingse afstand tot de vrachtwagen of bus worden aangehouden. Daardoor is er meer ruimte om voertuiguitwijkingen op te vangen. Fietsers en bromfietsers die op korte afstand worden gepasseerd door een vrachtwagen of autobus, hebben niet alleen te maken met de luchtstoringen, maar kunnen ook een schrikreactie krijgen. Bovendien wordt hun gezichtsveld gedeeltelijk afgeschermd, waardoor ze moeilijker hun evenwicht kunnen bewaren. Deze problemen zijn het beste te ondervangen door de aanleg van vrijliggende fietspaden

(Godthelp & Wouters, 1978). Voor personenauto's met caravan geldt in de meeste Europese landen een wettelijke maximumsnelheid van 80 km/u. Zeker bij wind is het in hun belang deze snelheid niet te overschrijden. Wanneer zij echter, ook bij die snelheid, gepasseerd worden door vrachtwagens e.d. kunnen er bij wind problemen optreden. Controle op de naleving van de maximumsnelheid van vrachtwagens, bussen en personenauto's met caravan zal wellicht de verkeersveiligheid verhogen. Hetzelfde kan worden gezegd van voorlichting aan de bestuurders over de gevaren die te hard rijden met zich mee kan brengen, en van passeerverboden voor de genoemde voertuigen.

LITERATUUR

Bazlen, K.A. (1963). Windschermen op de Afsluitdijk. Wegen 37 (1963) 2 (febr.): 32-37.

Brown, G.J. (1973). Aerodynamic disturbances encountered in highway passing situations. Paper 730234. Society of Automotive Engineers, Inc., New York, 1973.

Collins, R.D. & Wong, J.P. (1974). Stability of car trailer systems with special regard to trailer design. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, juni 1974.

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

Feis, N. (1976). Hoogbouw-windproblemen?! Polytechnisch Tijdschrift, bouwkunde, wegen- en waterbouw 31 (1976) 5 (mei): 282-287.

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

Friesz, T.L. & Trentacoste, N.P. (1973). Large vehicle-induced aerodynamic disturbances. Report PB-222 894. Federal Highway Administration, Washington, 1973.

Godthelp, J. & Wouters, P.I.J. (1978). Koers houden door fietsers en bromfietsers. Verkeerskunde 29 (1978) 11 (nov.): 537-543.

Hayashi, M. & Furusho, H. (1966). The response of automobile against a gust. In: Proc. 11. Internationaler automobiltechnischer Kongress. Vortrag B7. FISITA, München, 1966.

Johnson, W.S.; Speckhart, F.H.; Bridwell, R.E. (1973). Aerodynamic effects of passing vehicles. Paper 730687. Society of Automotive Engineers, Inc., Chicago, 1973.

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

Lister, T.A. (1978). Caravan and trailer stability. Paper presented at the New Zealand Institution of Engineers Annual Conference, Wellington, 1978.

McRuer, D.T. & Weir, D.H. (1969). Theory of manual vehicular control. Ergonomics 12 (1969) 4 (juli): 559-633.

Mitschke, M. (1972). Dynamik der Kraftfahrzeuge. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 1972.

Mitschke, M. & Niemann, K. (1972). Die Regeltätigkeit des Autofahrers bei Kursabweichungen. Heft 221. Verlag des Vereins Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 1972.

Mitschke, M. (1974). Experimentelle Untersuchungen und Rechnungen zum Verhalten von Fahrern in Kraftfahrzeugen bei Seitenwind. Bericht Nr. 388. Institut für Fahrzeugtechnik, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, 1974.

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

Ravenschot, W.H.; Versluis, A.; Van der Voort, R.C. (1979). Windwaarschuwingssysteem bij de Moerdijkbrug. Verkeerskunde 30 (1979) 2 (febr.): 68-70.

Rijkoort, P.J. (1968). The increase of mean wind speed with height in the surface friction layer. Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, Mededelingen en Verhandelingen No. 91. Staatsdrukkerij, 's-Gravenhage, 1968.

Smith, N.P. (1973). Wind gusts measured on high-speed roads. In: Proc. Instn. Mech. Engrs., Automobile Division Third Paper, Vol. 187 30/73, p. 354-360.

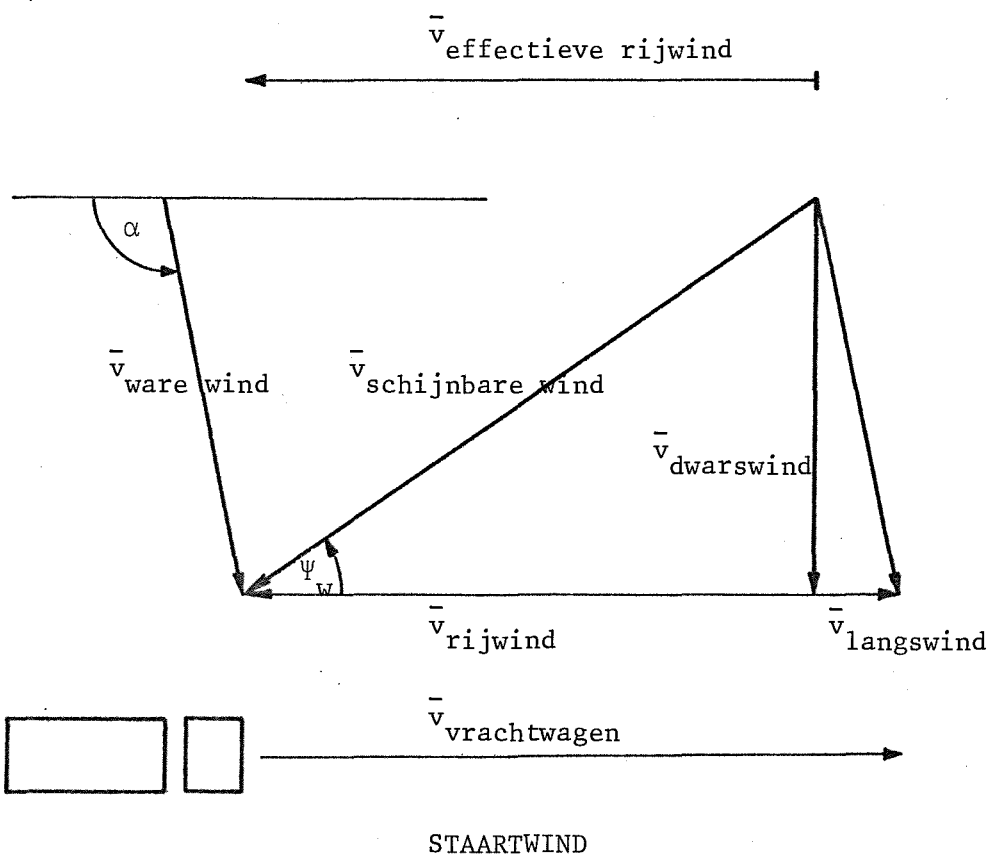
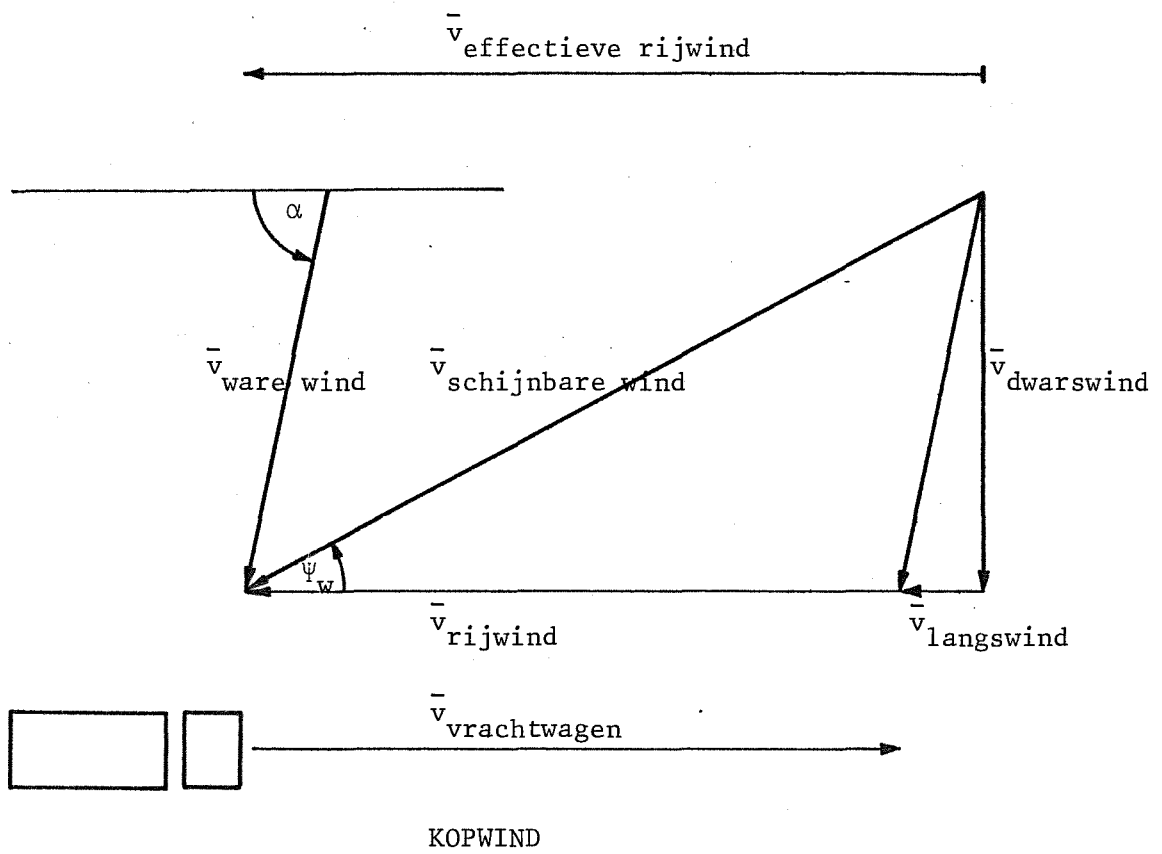
SWOV (1979). Een windafhankelijke adviessnelheid voor het wegverkeer op de Moerdijkbrug. Rapport R-79-20. Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV, Voorburg, 1979.

Weir, D.H.; Ringland, R.F.; Heffley, R.K.; Ashkenas, I.L. (1971). An experimental and analytical investigation of the effect of truck-induced aerodynamic disturbances on passenger car control and performance. Report No. STI 1001-1. Systems Technology, Inc., Hawthorne, 1971.

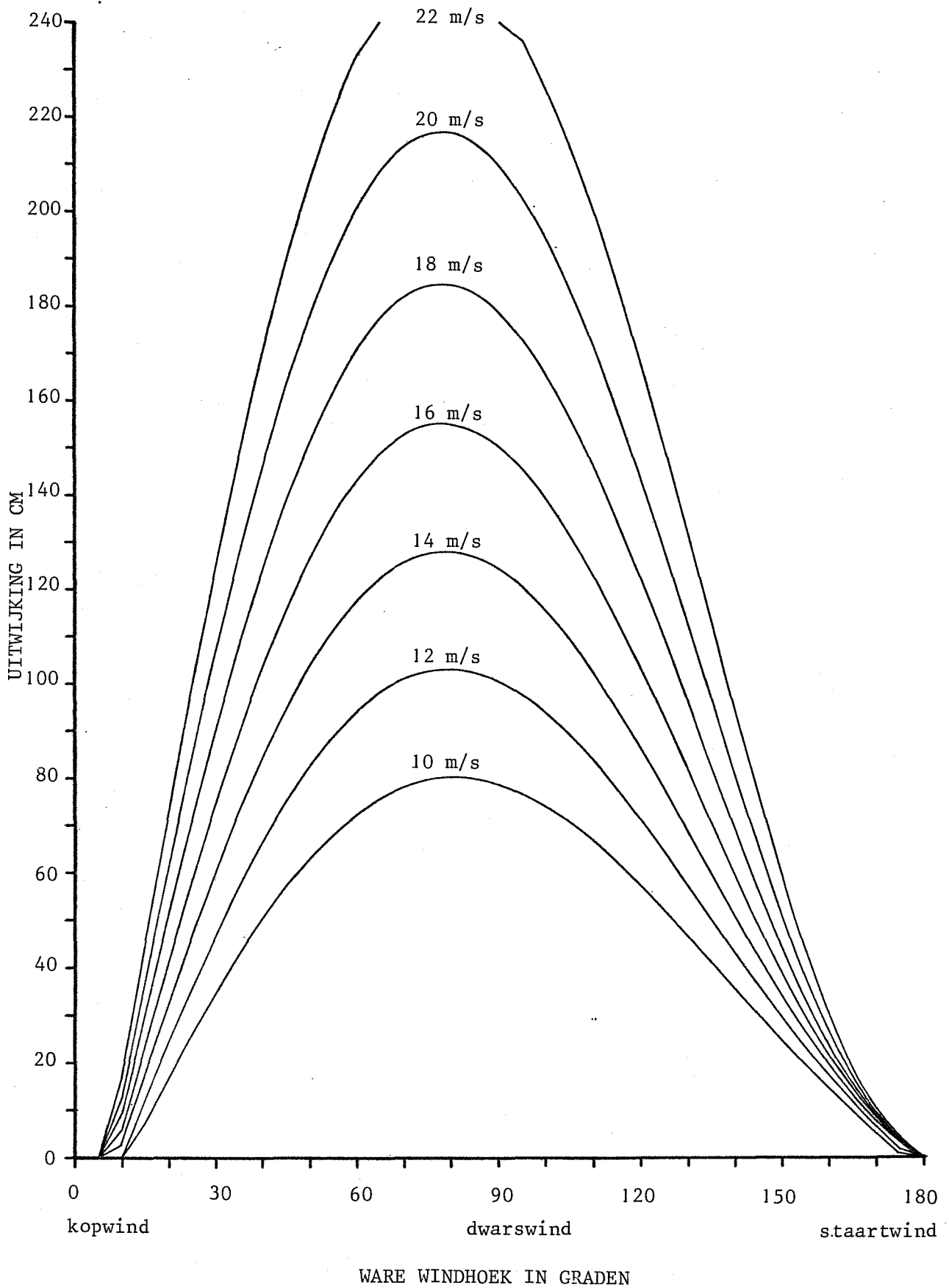
Weir, D.H.; Hoh, R.H.; Heffley, R.K.; Teper, G.L. (1972). An experimental and analytical investigation of the effect of bus-induced aerodynamic disturbances on adjacent vehicle control and performance. Report No. STI TR-1016-1. Systems Technology, Inc., Hawthorne, 1972.

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, 1973.

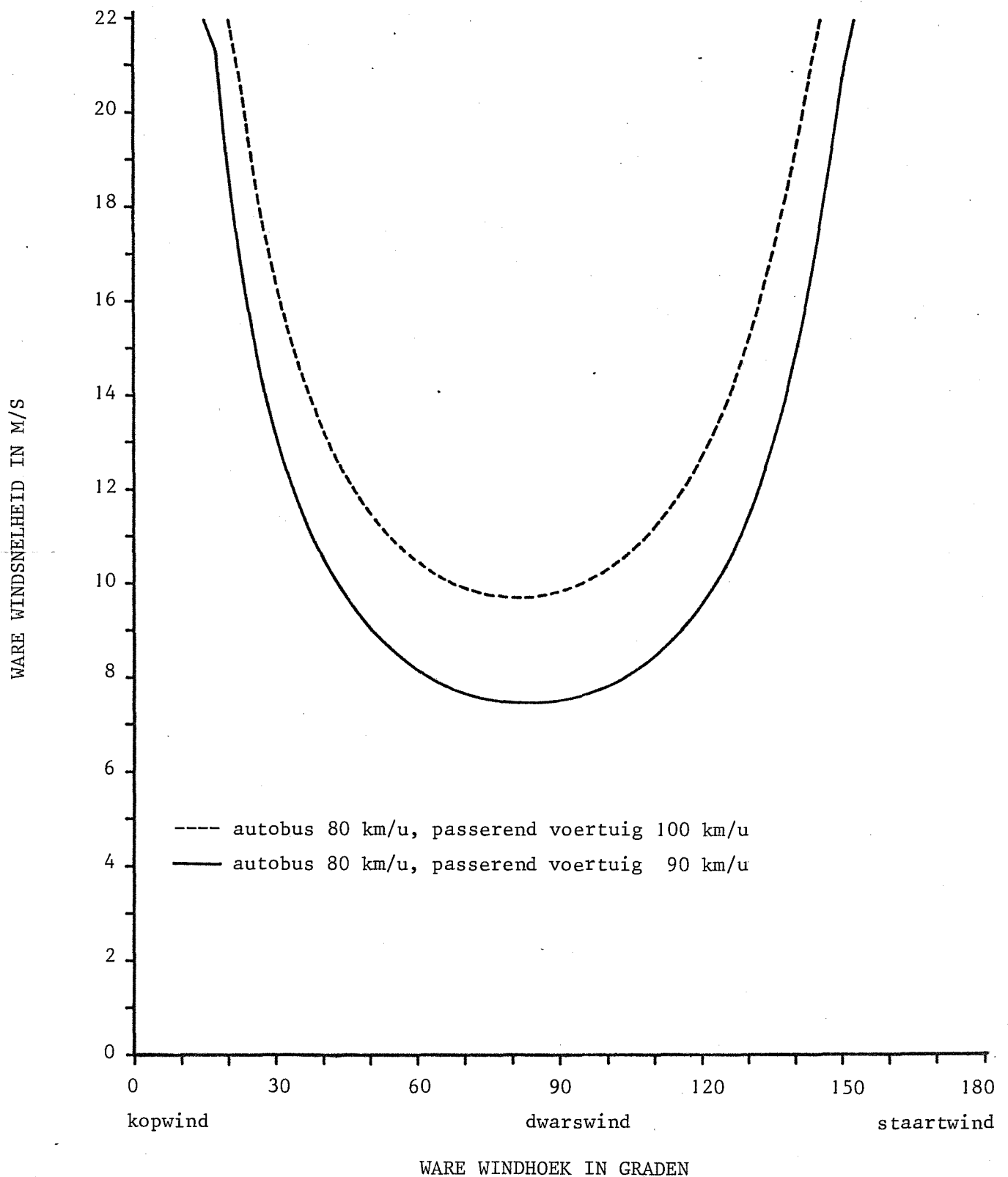
Wojcik, C.K. & Mellinger, R.L. (1971). Pilot study of housetrailer and truck camper safety, Phase 2. Final report. UCLA School of Engineering, Institute of Transportation and Traffic Engineering, Los Angeles, 1971.



Afbeelding 1. Vectoriële samenstelling van de effectieve rijwind, schijnbare en ware wind bij kopwind, resp. staartwind



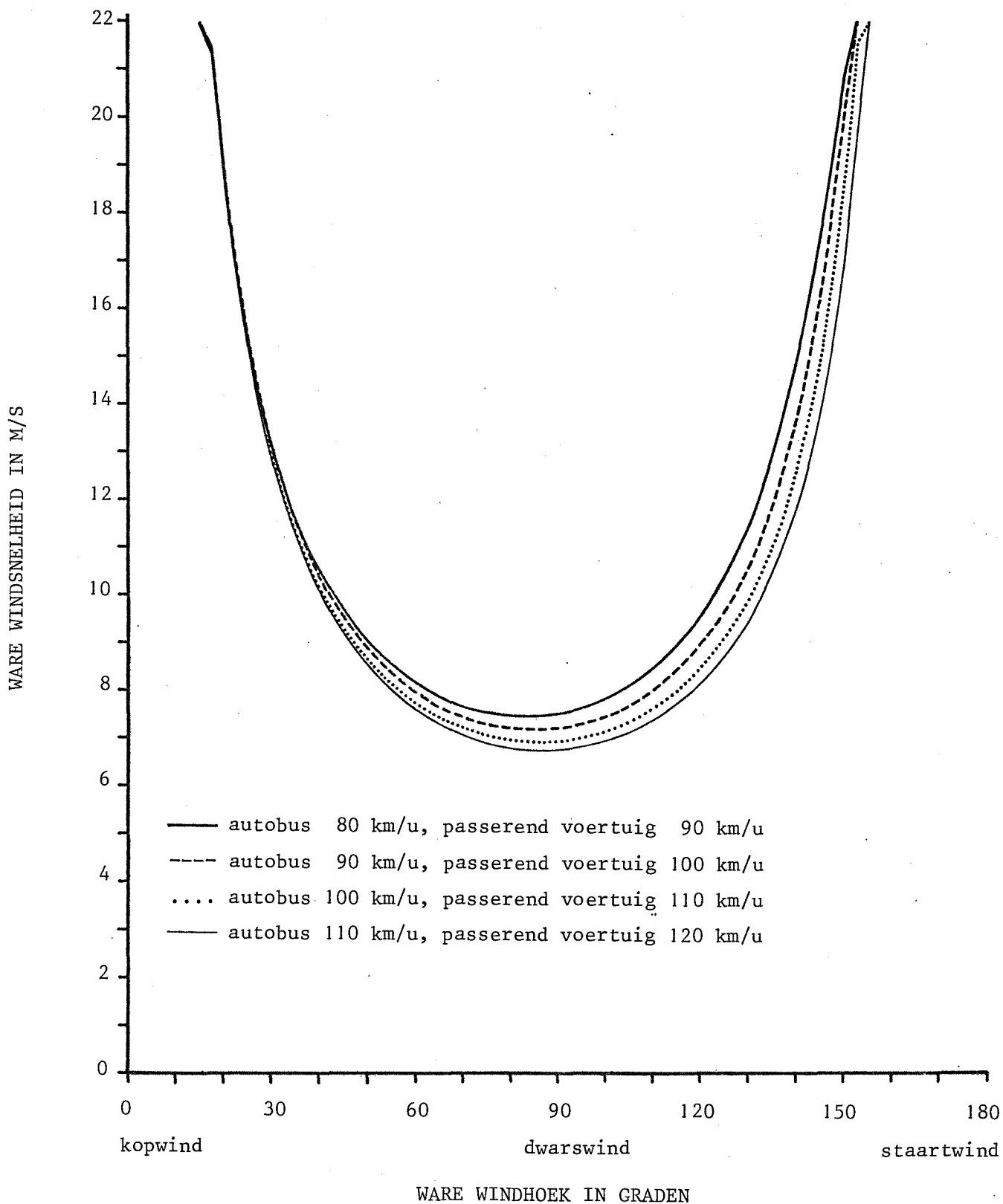
Afbeelding 2. Berekende maximale uitwijkingen van voertuigen die een autobus passeren, afhankelijk van windrichting en windsnelheid. Het passerende voertuig rijdt 97 km/u, de autobus 80 km/u



Afbeelding 3. Windsnelheden en -richtingen waarbij het passerende voertuig een maximale uitwijking van 0,80 m bereikt, voor verschillen in rijsnelheid van 10 en 20 km/u







Afbeelding 5. Windsnelheden en -richtingen waarbij het passerende voertuig een maximale uitwijking van 0,80 m bereikt, voor verschillende rijssnelheden maar een gelijkblijvend snelheidsverschil van 10 km/u