

WIND EN WEGVERKEER

Bijdrage in: Ir. T. de Wit (ed). "Bijdragen Verkeerskundige Werkdagen 1983, Deel 3, Blok 7: Verkeerstechniek, Bijdrage 7.4., blz. 755 t/m 766. Koninklijk Instituut van Ingenieurs/Studiecentrum Verkeerstechniek, 's-Gravenhage/Driebergen-Rijsenburg, 1983

R-83-8

Drs. P.I.J. Wouters

Leidschendam, 1983

Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV

SAMENVATTING

Onderwerp van deze bijdrage vormt de hinder van wind, de gevolgen daarvan voor de veiligheid van het wegverkeer en de mogelijkheden voor oplossingen. In een probleemanalyse wordt ingegaan op de relatie tussen het optreden van sterke wind en het gebeuren van ongevallen. Enige voorlopige resultaten van een statistisch onderzoek dat thans wordt uitgevoerd, worden besproken. Tevens komen de eigenschappen van wind, c.q. luchtstromingen, en hun inwerking op bestuurder-voertuig-combinaties aan de orde.

Vervolgens worden de mogelijke oplossingen geïnterpreteerd, waaronder verkeersvoorzieningen ter signalering van het gevaar of ter detectie van koersafwijkingen, verkeersregulerende maatregelen ter beperking van de snelheid en verkeerstechnische maatregelen om de wind te breken of de windrichting te veranderen. De aandacht zal daarbij vooral uitgaan naar het windafhankelijke waarschuwingssysteem, waarmee aan weggebruikers op de Moerdijkbrug een snelheidsadvies wordt gegeven. Een evaluatieonderzoek naar de werking van het systeem is in uitvoering. Ook wordt het idee van "half-open" windschermen belicht. Met deze vorm van windbreking wordt een algehele verlaging van de windsterkte en een verandering van het windprofiel nagestreefd. Dit laatste is bijvoorbeeld van belang op plaatsen waar de wind zeer plaatselijk wordt afgeschermd door naast de weg gelegen bouwsels. Met een half-open windscherm is dan een geleidelijke overgang tussen de open en de afgeschermd situatie te creëren.

SUMMARY

Wind and road traffic

This article deals with the consequences of the hindrance of wind for road safety and with possible countermeasures.

An analysis of the relation between wind and accidents is presented. Preliminary results of a statistical research now being carried out, are discussed. Characteristics of wind and air flow and their influence on car-driver-combinations are treated.

Furthermore, an inventory of countermeasures is made for the categories: traffic provisions like those to signal the danger or to detect course-deviations; traffic regulations like those to restrict driving speed; and constructions to break the wind. Special attention is paid to the wind-dependent speed advice to drivers used on the Moerdijkbridge. Research to evaluate this windwarning system is being carried out. The idea of partly-permeable screens is worked out as well. In addition to breaking the wind these screens also alter the windprofile. The latter point is of importance in cases, where constructions near the road (e.g. buildings, columns and lockgates) cause a wind shelter. The partly-permeable screens are then able to create a transition between the open and sheltered situation.

INHOUD

1.	<u>Inleiding</u>	5
2.	<u>Probleemanalyse</u>	6
2.1.	Ongevallen als gevolg van wind	6
2.2.	Eigenschappen van wind en luchtstromingen	10
2.3.	Voertuig en bestuurder	11
3.	<u>Maatregelen en voorzieningen</u>	13
3.1.	Inventarisatie van oplossingen	13
3.2.	Een windafhankelijke adviessnelheid op de Moerdijkbrug	14
3.3.	"Half-open" windschermen	17
4.	<u>Slotopmerkingen</u>	19

Literatuur

21

Label

21

1. INLEIDING

Wind kan het besturen van voertuigen soms zo bemoeilijken, dat er gevaar voor de verkeersdeelnemers ontstaat. Grote windsterkten en vooral plotse-
linge veranderingen in windsterkte kunnen namelijk aanzienlijke koersaf-
wijkingen veroorzaken. Dit zal, met name onder omstandigheden als slecht
zicht, verminderde wegdekstroefheid enz., er gemakkelijk toe kunnen lei-
den dat een voertuig bijvoorbeeld buiten de rijstrook geraakt.

Op hooggelegen wegen bij open water - zoals op dammen, dijken en bruggen -
waait het doorgaans extra hard. Door afscherming van wind kunnen daarbij
verschillen in windsterkte ontstaan. Dit is bijvoorbeeld het geval wan-
neer bij zijwind vrachtwagens of bussen aan de lijzijde worden gepas-
seerd. Ook de vaak op of bij dammen e.d. aangebrachte constructies, zo-
als pijlers voor sluisdeuren, kunnen de wind afschermen. Uit een oog-
punt van verkeersveiligheid is voor dit soort situaties het treffen van
maatregelen te overwegen.

In deze bijdrage wordt eerst een analyse van het probleem van windhinder
gegeven. Vervolgens wordt een inventarisatie van oplossingen gegeven.

Twee van de daarin genoemde oplossingen - een windafhankelijk snelheids-
advies en "half-open" windschermen - worden ten slotte nader uitgewerkt.

2. PROBLEEMANALYSE

2.1. Ongevallen als gevolg van wind

Het bepalen van de omvang en de aard van het probleem van windhinder voor het wegverkeer in Nederland is het doel van een statistische analyse van ongevallen- en windgegevens, die thans bij de SWOV wordt uitgevoerd. Kennis over de omvang is van belang om de wenselijkheid van maatregelen te kunnen vaststellen. Kennis over de aard is o.a. van belang om te kunnen bepalen welke soort maatregelen nodig zijn.

Hierna zullen voorlopige resultaten van inmiddels uitgevoerde deelanalyses worden besproken. Daarbij zal blijken dat het bepalen van een verband tussen ongevallen en wind op vele moeilijkheden stuit.

In het onderzoek worden gegevens over een periode van vijf jaar (1971 t/m 1975) gebruikt uit de landelijke registratie van verkeersongevallen door het CBS. Aan ieder ongeval zijn van het KNMI afkomstige gegevens over de wind toegevoegd. Voor de deelanalyses zijn twee regio's gekozen uit de 15 waarin Nederland werd opgedeeld en die elk een centraal gelegen meteorologisch station hebben. Bij de keuze van regio's is rekening gehouden met: de algehele verdeling van de windsnelheid over Nederland, landschapkenmerken, bebouwing, verkeersintensiteit e.d. Via de gegevens over plaats en tijdstip van een ongeval is nu een koppeling met windgegevens aan te brengen. Bij ontbreken van expositiegegevens, bijvoorbeeld over de verdeling van de verkeersdeelname over het etmaal, zijn de ongevallen over drie groepen uren verdeeld: de nachtelijke uren met weinig verkeer (0-7, 20-24 uur), de tussenuren (7-8, 10-16 en 19-20 uur) en de spitsuren (8-10, 16-19 uur). Daarbij wordt verondersteld, dat binnen de uurgroepen de karakteristieken van samenstelling en intensiteit van het verkeer voor eenzelfde regio veel minder zullen variëren dan tussen de uurgroepen. Verder zijn de ongevallen ingedeeld naar klassen van windsnelheid: <3 , 3-6, 6-9 en ≥ 9 m/s. Proefanalyses van kruistabellen voor andere variabelen (vlagerigheid van de wind, plaats en bebouwing) wezen uit dat de variabele weer/wegdek van overwegend belang is. Deze variabele is opgesplitst in: droog wegdek, nat wegdek, regen.

De twee gekozen regio's zijn het oostelijke deel van Zuid-Holland (Rotterdam) en het oostelijke deel van Noord-Brabant (Eindhoven). Voor iedere cel van de opdeling naar uurgroep, windklasse en weer/wegdek, is

het aantal ongevallen (N) per regio bepaald. Tevens werd het aantal uren wind (T) per windklasse en uurgroep van de regio's bepaald. Het aantal uren wind per windklasse en uurgroep is niet voor weer/wegdek bekend. Uit een analyse van beperkte gegevens over wind en regen bleek, dat er grote verschillen optreden in de mate waarin wind en regen samengaan. Voor sommige perioden werd het ontbreken van een verband geconstateerd, voor andere bleek bijvoorbeeld bij wind ≥ 9 m/s 8 maal zo vaak regen voor te komen als bij wind < 3 m/s. Door deze uitkomsten was het niet mogelijk de duur van de wind betrouwbaar op te delen over droog wegdek, nat wegdek en regen. Hoewel het bestaan van een verband tussen wind en regen mogelijk lijkt, wordt er bij de berekeningen aan voorbijgegaan, omdat het in dit stadium van onderzoek niet voldoende te kwantificeren is. Bij de berekeningen is er vooralsnog van uitgegaan dat er gemiddeld 6,5% van de tijd sprake is van regen. Terwijl het niet meer regent, is het wegdek nog 6,5% van de tijd nat. Er is van uitgegaan, dat de tijd van regen en nat wegdek gelijk verdeeld is over de windsnelheidsklassen.

In de windsnelheidsklasse < 3 m/s kan wind geen invloed hebben op het ontstaan van ongevallen. Door de ratio van die klasse (N_0/T_0 ; d.i. het aantal ongevallen per uur bij geen wind) af te trekken van die van de andere klassen (N_i/T_i) vertegenwoordigen de verschillen een effect van wind. Vermenigvuldigen van het verschil met de windduur per klasse, $(N_i/T_i - N_0/T_0) \cdot T_i$, geeft dan een schatting van de ongevallen die geïnterpreteerd worden als ongevallen ten gevolge van wind (W-ong. in de tabellen). Deze interpretatie is alleen dan te rechtvaardigen als er geen verband bestaat tussen wind en regen. Op het eind van deze paragraaf wordt hierop teruggekomen. De beschreven werkwijze is overigens gevolgd, omdat effecten niet zonder meer uit totalen van ongevallen bepaald kunnen worden. De resultaten van de analyse zijn opgenomen in een zgn. basistabel achterin deze bijdrage. Van deze tabel worden hier een aantal doorsnijdingen besproken.

In totaal vonden er in de regio Rotterdam (R) 30.187 ongevallen plaats, waarvan er naar schatting 1975 ofwel 6,5% aan wind toe te schrijven zouden zijn. Voor de regio Eindhoven (E) zijn de cijfers resp. 33.130 en 2626 ofwel 7,9%. Een vergelijking in de basistabel tussen de gegevens voor R en E laat enerzijds zien dat het beeld voor de verschillende

variabelen consistent is, anderzijds dat de uitkomsten voor E over vrijwel de gehele linie hoger zijn dan die van R. Wanneer gekeken wordt naar de percentages aan wind te wijten ongevallen per windklasse, blijkt dat het aandeel van deze ongevallen toeneemt met de windsnelheid (tabel 1).

m/s		N-ong.	W.-ong.	
			abs.	%
<3	R	5.610	0	
	E	7.349	0	
3-6	R	12.136	843	6,9
	E	14.765	1.363	9,2
6-9	R	8.467	686	8,1
	E	8.895	950	10,7
≥9	R	3.974	447	11,2
	E	2.121	312	14,7

Tabel 1.

		N-ong.	W-ong.	
			abs.	%
nacht	R	5.731	148	2,6
	E	8.886	225	2,5
tussen	R	13.304	968	7,3
	E	13.417	1.602	11,9
spits	R	11.152	858	7,7
	E	10.827	800	7,4

Tabel 2.

Wordt op een zelfde wijze gekeken naar de verdeling over de uurgroepen (zie tabel 2), dan valt vooral het lage percentage aan wind te wijten ongevallen op voor de nachtelijke uurgroep van lage verkeersintensiteit. Bij minder zicht zal het corrigeren van koersafwijkingen moeilijker zijn. Daar staat een geringere kans op conflicten met medeweggebruikers tegenover. Wellicht dat een analyse naar conflicttype een verhoging van het aantal enkelvoudige ongevallen te zien zal geven. Belangrijker lijkt echter een andere veronderstelling, die ook later nog aan de orde komt. In de nachtelijke uren komen de meeste niet-noodzakelijke verplaatsingen voor. Het is mogelijk dat die bij slecht weer eerder achterwege blijven of dat een andere wijze van vervoer wordt gekozen. Door het ontbreken van expositiegegevens kan deze veronderstelling niet onderzocht worden. Ook is niet onderzocht of er voor bepaalde uurgroepen een verband bestaat tussen het optreden van wind en regen.

In tabel 3 is de uitsplitsing naar droog wegdek, nat wegdek en regen weergegeven. Opmerkelijk is het geringe en soms zelfs negatieve percentage aan wind te wijten ongevallen op droog wegdek. Wellicht verandert bij wind de verkeersintensiteit of de vervoermiddelkeuze, wat zeker voor fietsers aan te nemen valt. Ook het juist bij de hoogste windklassen optreden van een negatief effect lijkt hierop te duiden. Als iets dergelijks plaats vindt, betekent het dat de uitkomsten voor nat wegdek en regen feitelijk hoger zullen liggen dan uit de analyse naar voren komt.

	m/s	Rotterdam			Eindhoven		
		N-ong.	W.-ong.		N-ong.	W-ong.	
			abs.	%		abs.	%
	<3	4.464	0		5.979	0	
droog	3-6	9.735	772		11.305	470	
wegdek	6-9	6.116	-56		6.110	-300	
	>9	2.185	-613		1.072	-389	
	∑	22.500	103	0,5	24.466	-219	-0,9
	<3	633	0		792	0	
nat	3-6	1.264	-38		1.795	306	
wegdek	6-9	1.059	154		1.215	321	
	>9	615	205		357	154	
	∑	3.571	321	9	4.159	781	18,8
	<3	513	0		578	0	
regen	3-6	1.137	109		1.665	588	
	6-9	1.292	587		1.570	929	
	>9	1.174	855		692	547	
	∑	4.116	1.551	37,7	4.505	2.064	45,8

Tabel 3.

Bij de bespreking van de analyseresultaten in deze paragraaf is er van uitgegaan, dat er geen verband bestaat tussen wind en regen. De tot nu toe verzamelde gegevens (over 8 maanden) in de regio Rotterdam wekken

echter de indruk dat er wel verband bestaat en dat het sterk genoeg is om de specifiek aan wind toegedichte effecten geheel te laten verdwijnen. Harde conclusies over de omvang en aard van de windhinderproblematiek zijn op dit moment dus niet te trekken.

2.2. Eigenschappen van wind en luchtstromingen

Natuurlijke wind vertoont de kenmerken van een grenslaagstroming. Dit houdt onder meer in dat de gemiddelde windsnelheid toeneemt met de hoogte boven het aardoppervlak. Bovendien wordt de snelheid hoger naarmate het oppervlak minder "ruw" is. Zo zal de gemiddelde windsnelheid op dammen en bruggen boven open water al snel twee maal zo hoog zijn als in laaggelegen akkerbouwgebieden. Een indruk van de toeneming is o.a. te verkrijgen uit de formule van het logaritmisch windprofiel (Rijkoord, 1968). Daarnaast kan de gemiddelde snelheid van wind toenemen als gevolg van opstuwning van lucht bij obstakels in een verder vlakke omgeving, zoals bij dammen en dijken.

De snelheid van natuurlijke wind verandert voortdurend en daarmee ook de kracht die wind op voertuigen uitoefent. Het fluctueren van de windsterkte is op te vatten als een som van periodieke veranderingen met verschillende frequenties. Daarbij geldt voor wind, dat laagfrequente veranderingen de grootste amplitudo hebben en daarmee de hoogste intensiteit (Hayashi & Furusho, 1966). Boven circa 1 Hz wordt de intensiteit te gering om nog voor het verkeer van belang te zijn.

De snelheid van wind verandert tevens, en dan veelal in meer abrupte zin, door afscherming. Voor het verkeer is vooral de afscherming door vrachtwagens en bussen en door constructies in de onmiddellijke nabijheid van wegen van belang. Vrachtwagens en bussen schermen wind die van opzij komt af. Hierdoor ontstaan er aan de lijzijde van het voertuig aan voor- en achterkant verschillen in windsnelheid. Ook veroorzaakt het rijdende voertuig zelf luchtverplaatsingen, gekenmerkt door een "boeggolf" aan de voorkant van het voertuig en een "kielzog" aan de achterkant (Wouters & Mooyman, 1980). Constructies langs wegen - gebouwen, pijlers voor sluisdeuren enz. - veroorzaken eveneens luwte. Een enkel object leidt dan doorgaans tot een eenmalige stootvormige verstoring; op regelmatige afstand van elkaar geplaatste objecten veroorzaken een periodieke verstoring. Bij beide vormen van afscherming heeft de

rijsnelheid een belangrijke invloed op de frequenties waarmee de luchtstroming op een voertuig inwerkt.

2.3. Voertuig en bestuurder

Luchtstromingen beïnvloeden de bewegingen van voertuigen. De bestuurder dient de ontstane afwijkingen in deze bewegingen te ondervangen. De automobilist heeft daarbij in hoofdzaak te maken met afwijkingen in de positie en koers, de tweewielerberijder tevens met de zogenaamde rolbeweging: een beweging rond de lengteas van het voertuig (Godthelp & Wouters, 1980).

De luchtstromingen oefenen op een voertuig niet alleen krachten maar ook momenten uit, doordat het aangrijpingspunt van de krachten doorgaans niet samenvalt met het zwaartepunt van het voertuig. Deze krachten en momenten zijn onder meer evenredig met het kwadraat van de luchtsnelheid ten opzichte van het voertuig en hangen verder af van de afmetingen en de vorm van het voertuig. De gevoeligheid van een voertuig voor hun invloed wordt bepaald door een aantal andere voertuigkarakteristieken zoals de massaverdeling en de driftstijfheid van de banden (Mitschke, 1972). Ook hangt de invloed van krachten en momenten samen met de duur, c.q. de frequentie van hun inwerking. Bepaalde typen voertuigen zoals sommige bestelbusjes en tweewielers zijn als gevolg van hun karakteristieken extra gevoelig voor wind. In het algemeen worden personenauto's beïnvloed door windstoringen met frequenties tussen de 0 en 2 Hz. Positie- en koersafwijkingen maken stuurcorrecties nodig; rolbewegingen noodzaken tot stuurcorrecties en tot het uitoefenen van momenten op het zadel. Het vermogen van een bestuurder daartoe is echter begrensd. Behalve de benodigde reactietijd, spelen grenzen aan de snelheid en kracht waarmee een bestuurder kan reageren, een rol. Adequate stuurcorrecties mogen daarom slechts verwacht worden op voertuigbewegingen met frequenties tussen 0 en 0,5 Hz. Afhankelijk van o.a. ervaring, zicht 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 (McRuer & Weir, 1969). De bestuurder-voertuig-combinatie zal dus vooral hinder ondervinden van storingen die bij frequenties tussen 0,5 en 2 Hz een grote amplitudo hebben, en van situaties en omstandigheden die de reacties van voertuig en bestuurder nadelig beïnvloeden.

Ten slotte nog twee opmerkingen. In verband met de samenhang tussen krachten en momenten enerzijds en de luchtsnelheid ten opzichte van het voertuig anderzijds, neemt de grootte van de storing toe met de rijsnelheid. Bij een hogere rijsnelheid en een gelijkblijvende reactietijd leiden koersverschillen bovendien tot een grotere uitwijking. De tweede opmerking betreft periodieke storingen met frequenties tussen 0,5 en 2 Hz. Dergelijke storingen kunnen aanleiding geven tot "opslingeren". Ziet de bestuurder namelijk geen kans om de koersafwijking tussen twee opeenvolgende storingen te corrigeren, dan wordt het effect van de nieuwe storing opgeteld bij het restant van de vorige, als beide storingen van gelijke fase zijn.

3. MAATREGELEN EN VOORZIENINGEN

3.1. Inventarisatie van oplossingen

De volgende maatregelen en voorzieningen dienen zich in principe aan om het probleem van windhinder op te lossen:

- Voorzieningen in verband met signalering en lokalisering van wind(stoten).

Te denken valt aan het gevarenteken "zij- en rukwinden", windzakken e.d. Waarschuwen voor en informeren over de aard en eigenschappen van de storing kan een gunstig effect hebben op de rijprestaties.

- Voorzieningen in verband met de detectie van koersafwijkingen.

Te denken valt aan extra markeringen van de rijstrookbegrenzing, openbare verlichting e.d. Snelle detectie van koersafwijkingen, ook bij slecht zicht, is van belang bij het koers houden.

- Vergroting van de beschikbare, c.q. verkleining van de benodigde ruimte.

Te denken valt aan rijstrookverbreding, het creëren van ruimtelijke marges (verharde kantstroken, dubbele belijning tussen rijstroken enz.) en een ook bij neerslag optimale wegdekstroefheid (bijv. door verbeterde hemelwateropslag en -afvoer). Door de eerstgenoemde maatregelen ontstaat meer gelegenheid tot het uitvoeren van koerscorrecties. Op een stroef wegdek kunnen stuurcorrecties effectiever en met minder kans op slippen worden uitgevoerd.

- Snelheidsbeperkingen voor het verkeer.

Te denken valt aan snelheidslimieten en adviessnelheden, al dan niet windafhankelijk. Bij lagere rijssnelheden neemt de gevoeligheid van voertuigen voor windinwerking af en zijn voertuigbewegingen gemakkelijker te corrigeren.

- Andere beperkingen voor het verkeer of de verkeersstroom.

Te denken valt hierbij vooral aan het instellen van een inhaalverbod. Onder extreme omstandigheden kan het afsluiten van een weg of van rijstroken, of het instellen van alternerend éénrichtingsverkeer worden overwogen.

- Voorzieningen voor het breken van de wind en het wijzigen van het windprofiel.

Te denken valt aan windschermen en windgeleidingsconstructies. De eerdergenoemde maatregelen waren gericht op het vermijden of ontcrachten van nadelige gevolgen van windinwerking op het verkeer, maar lieten een groot

deel van de verantwoordelijkheid bij de weggebruiker. De constructies als hier bedoeld richten zich op de oorzaak van de hinder en stellen verder geen speciale eisen aan de verkeersdeelnemer.

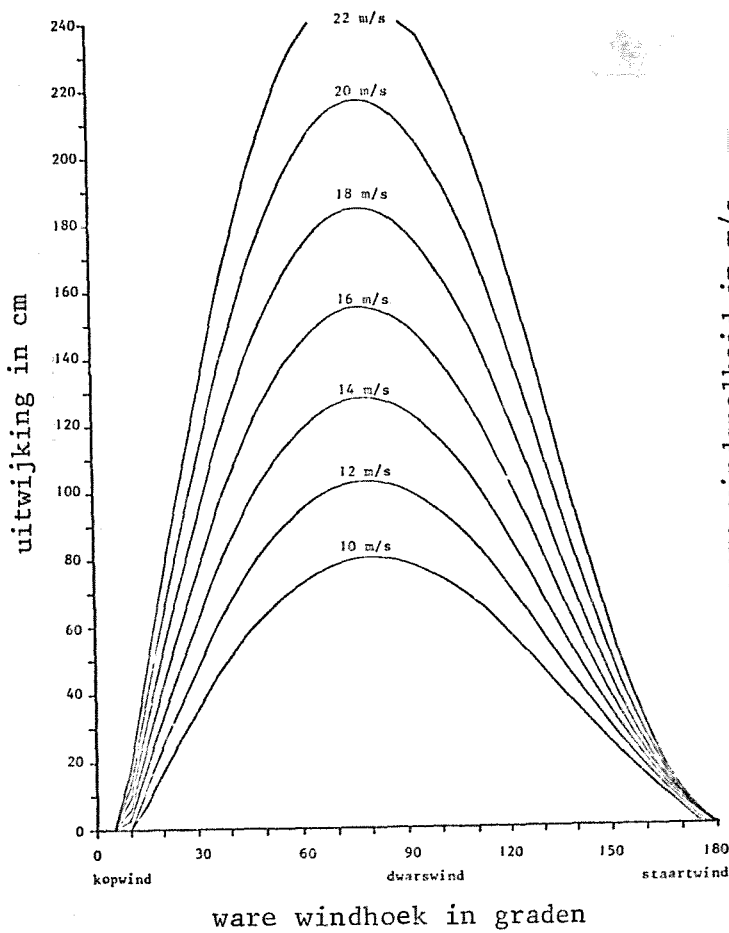
3.2. Een windafhankelijke adviessnelheid op de Moerdijkbrug

Het verkeer over de circa 1 km lange Moerdijkbrug rijdt ongeveer 15 m boven het wateroppervlak. De weg over de brug is onderdeel van een autosnelweg, zodat er de wettelijke maximumsnelheden van 100 en 80 km/u gelden. Hij bestaat uit twee maal drie rijstroken, elk 3,60 m breed. De vormgeving van de brug en de toeleidende wegen komt zo overeen, dat weggebruikers zich nauwelijks zullen realiseren dat zij op een brug hoog boven water rijden. Naar aanleiding van ongevallen bij wind besloot Rijkswaterstaat het verkeer een snelheidsadvies van 70 km/u te geven bij gevaarlijke windomstandigheden. De SWOV werd gevraagd die omstandigheden te bepalen. Mede gezien mogelijkheden voor ruimere toepassing, zal dit voorbeeld van een windafhankelijke snelheidsbeperking hier worden toegelicht.

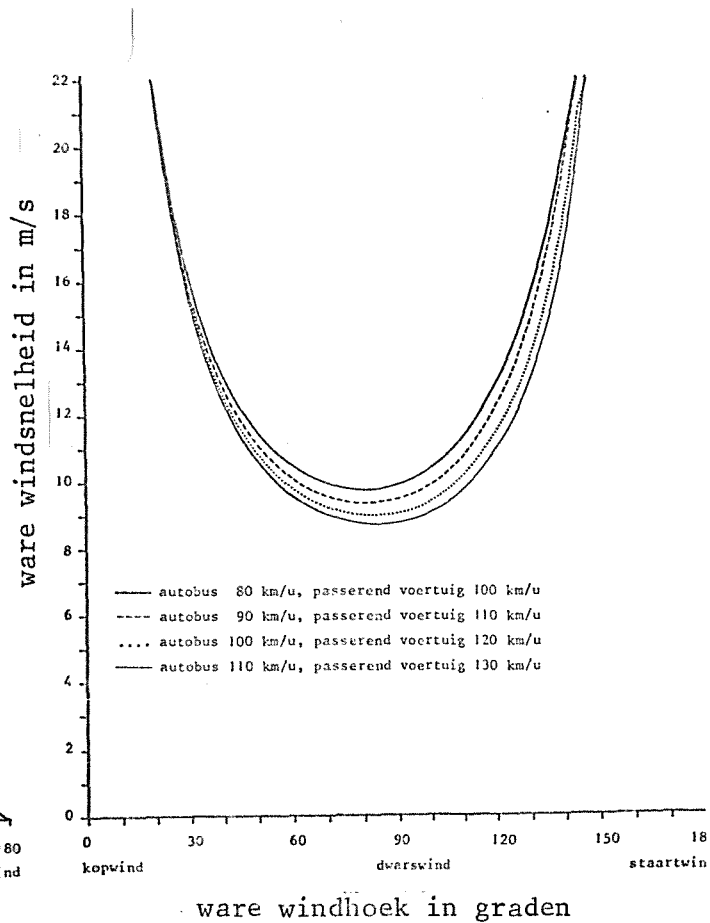
Uitgangspunt bij de ontwikkeling van deze verkeersvoorziening (SWOV, 1979) was, dat voertuigen door windinwerking niet buiten de rijstrook mogen raken. Dit uitgangspunt is "vertaald" in een zijdelingse voertuiguitwijking van maximaal 80 cm. De meest ernstige vorm van windhinder op de brug ontstaat bij het passeren van een vrachtwagen of bus, hetgeen op de Moerdijkbrug betrekkelijk vaak voorkomt. Daarom is ook van dit gegeven uitgegaan. Verder is uitgegaan van windgevoelige voertuigtypen (vrij veel voorkomende typen bestelbusjes) en van "modale" bestuurders. Uit veldexperimenten (Weir e.a., 1971 en 1972) waren maximale zijdelingse uitwijkingen bekend van bestuurder-voertuig-combinaties bij het inhalen van o.a. vrachtwagens. De uitwijkingen waren vastgesteld voor twee passeersnelheden, bij wind van verschillende sterkte uit een richting dwars op de weg. Deze gegevens zijn uitgewerkt voor willekeurige windsnelheden en -richtingen. Daarbij is o.a. gebruik gemaakt van een bij benadering geldende evenredigheid tussen de grootte van de krachten en momenten op het lichte voertuig en het produkt van de effectieve rijwindsnelheden van dit voertuig en de vrachtwagen.

Figuur 1 geeft een voorbeeld van zo verkregen schattingen voor de uitwijkingen van een windgevoelig voertuig dat met een snelheid van 97

km/u een vrachtauto inhaalt die 80 km/u rijdt. In opdracht van de RWS wordt thans door de SWOV een onderzoek uitgevoerd, dat onder meer ten doel heeft deze schattingen in de werkelijkheid te verifiëren. Het Instituut voor Wegtransportmiddelen-TNO verricht hiertoe metingen. Uit figuur 1 volgt, voor welke windsnelheden en -richtingen uitwijkingen van 80 cm te verwachten zijn. Er ontstaan dan U-vormige krommen als die van figuur 2, waarbij een punt (gevormd door de waarden van ware windsnelheid en -richting) boven zo'n kromme aangeeft dat uitwijkingen van meer dan 80 cm te verwachten zijn. Uit extrapolaties verkregen resultaten voor verschillende rij- en passeersnelheden (= snelheidsverschillen) tonen aan dat de grootste uitwijkingen optreden bij passeersnelheden van circa 10 km/u en dat de uitwijkingen toenemen met de rijnsnelheid.



figuur 1

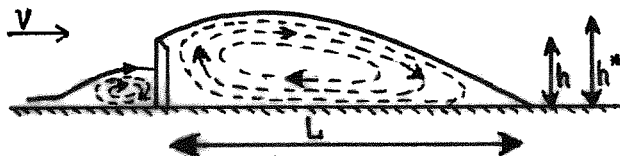


figuur 2

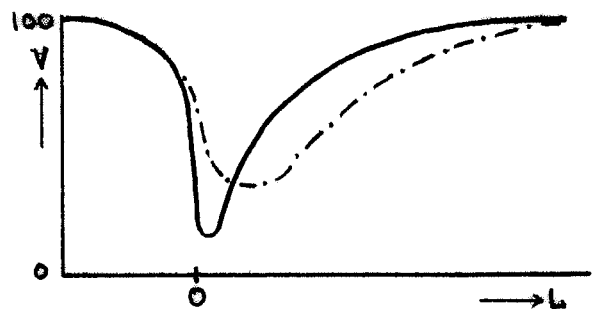
De U-vormige kromme voor de passeersituatie van 80-100 km/u is omgezet in tabelwaarden en deze vormen de basis van het windwaarschuwingssysteem op de Moerdijkbrug. Ter plaatse worden de snelheid en de richting van de wind continu gemeten; de resultaten worden in een microprocessor vergeleken met de tabelwaarden die in zijn geheugen zijn opgeslagen. In principe krijgen weggebruikers via oplichtende verkeersborden (zogenoemde verdwijnborden) op de opritten van de brug het snelheidsadvies van 70 km/u, wanneer de meetwaarden tabelwaarden overschrijden. Eigenlijk moet steeds de sterkste wind op de brug worden gemeten. Daarom heeft de SWOV geadviseerd de windmeters op het hoogste punt van de brug te situeren. Thans zijn zij om praktische redenen op het zuidelijke landhoofd geplaatst. In het evaluatieonderzoek zal het windprofiel over de brug worden onderzocht. Tevens wordt nagegaan, of en hoe met de metingen op het landhoofd de sterkste wind op de brug vast te stellen is. In feite wordt het snelheidsadvies pas gegeven, wanneer de meetwaarden vier maal in een halve minuut de tabelwaarden hebben overschreden. 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 advies kunnen verminderen, worden hiermee vermeden. Indien in de laatste halve minuut van deze periode de tabelwaarden tenminste twee maal overschreden zijn, wordt de duur van het advies met (telkens) één minuut verlengd. Deze inschakelcriteria worden thans eveneens geëvalueerd. Voor nadere bijzonderheden over de uitvoering van de microprocessor en de daarin geprogrammeerde controle- en beslissingsfuncties, wordt korthedshalve verwezen naar een publikatie van de ontwerpers (Ravenschot e.a., 1979). Afsluitend nog de volgende opmerking. Wellicht verdient een tijdelijke snelheidslimiet de voorkeur boven een tijdelijk snelheidsadvies. Een snelheidsadvies maakt minder kans opgevolgd te worden. Als sommige verkeersdeelnemers hun snelheid verlagen maar andere niet, neemt de homogeniteit van de verkeersstroom af. Dit kan nadelige gevolgen hebben voor de verkeersveiligheid. In ieder geval lijkt het zinvol op de Moerdijkbrug na te gaan, hoe weggebruikers reageren op het snelheidsadvies.

3.3. "Half-open" windschermen

Er is al opgemerkt, dat windschermen gericht zijn op de oorzaak van windhinder en daardoor geen speciale eisen stellen aan de weggebruiker. Zeker op locaties waar veelvuldig ernstige windhinder optreedt, kan het aanbrengen van zo'n permanente voorziening de voorkeur verdienen. Het dichte windscherm heeft nadelen, die met een half-open uitvoering te vermijden zijn. Bovendien biedt deze laatste uitvoeringsvorm de mogelijkheid het windprofiel te beïnvloeden. Hierover gaat het volgende. Inzicht in de veranderingen die een windscherm in de stroming van de lucht veroorzaakt, is o.a. te verkrijgen uit metingen aan schaalmodellen in een windtunnel. Zo'n onderzoek (Plate, 1966) aan een zgn. vlakke plaat op een plat grondvlak laat zien, dat achter de plaat een zone ontstaat waar stationaire wervels voorkomen; zie figuur 3. Voor deze uiteraard geïdealiseerde nabootsing van de werking van een dicht windscherm werd een relatie vastgesteld tussen de hoogte (h) van de plaat en de totale lengte (L) waarover de zone zich uitstrekt: $L = 12.h$.



figuur 3



figuur 4

Tevens bleek de maximale hoogte (h^*) van de zone gelijk te zijn aan circa 1,65 maal de plaathoogte: $h^* = 1,65.h$. De luchtsnelheid binnen de zone varieert met de afstand tot de plaat. Vlak achter de plaat treedt de minimale waarde op. De waarde neemt eerst over een relatief kleine afstand snel toe en loopt dan meer geleidelijk op tot de waarde van de luchtsnelheid vóór de plaat. Figuur 4 brengt dit schematisch in beeld. Met een dicht windscherm is derhalve een verlaging van de windsnelheid te bereiken, maar de windsnelheid varieert dan over de breedte van een erachter gelegen weg. Zo zou bijvoorbeeld een verkeersdeelnemer op een enkelbaans autoweg geconfronteerd kunnen worden met de

situatie dat op de ene rijstrook de windsnelheid gemiddeld gereduceerd is tot 70% van de oorspronkelijke waarde en op de andere tot 40%. Daarnaast is te verwachten dat bouwsels die vóór het scherm staan een duidelijk merkbare invloed blijven houden op de luchtstroming achter het scherm.

Een half-open windscherm, bijvoorbeeld uitgevoerd als een rij staande lamellen, laat een deel van de aanstromende lucht door. De rest wordt, net als bij een dicht scherm, eroverheen geleid en veroorzaakt de besproken zone van stationaire luchtwervels. De interactie tussen de doorgelaten lucht en de wervels leidt tot een aanmerkelijke verlaging van de windsterkte, die zich veel gelijkmatiger over een groter gebied uitstrekt (zie ook Plate, 1971).

Behalve vanwege het tegengaan van al te grote verschillen in windsterkte over de breedte van de weg, zijn half-open schermen ook om een andere reden interessant. Door de doorlaatbaarheid over de lengte te variëren is het namelijk mogelijk het luchtstromingsprofiel achter het scherm te beïnvloeden. Als er bijvoorbeeld in de nabijheid van de weg op regelmatige afstand van elkaar gebouwen e.d. staan, kan zo'n variatie het pulsvormige karakter van de storing afvlakken en daarmee een periodiciteitseffect ontkrachten. Bij een scherm van lamellen kan de doorlaatbaarheid worden gevariëerd door de openingen tussen de lamellen of de breedte van de lamellen te variëren. Het bepalen van de variatie in doorlaatbaarheid zal op basis van onderzoek moeten gebeuren. Een mogelijke opzet voor zo'n onderzoek, waarbij resultaten van windtunnelmetingen en simulaties van mens-machine-systemen met elkaar in verband worden gebracht, is inmiddels gemaakt (SWOV, 1982).

4. SLOTOPMERKINGEN

In de onderzoeksperiode waaide het in de regio Rotterdam gedurende 11,3% van de tijd harder dan 9 m/s en in de regio Eindhoven 5,4% van de tijd. Windhinder zal bij zo'n sterke wind vooral op bepaalde locaties of onder bepaalde omstandigheden optreden en daardoor wellicht "gevoelsmatig" onderschat worden. Het samengaan van wind met regen of nat wegdek zal extra gevaarlijk zijn. Een verband tussen ongevallen en wind is nog niet aangetoond, maar op theoretische gronden wel aannemelijk.

Op landelijk niveau kunnen de nadelige gevolgen van wind vooral worden bestreden met maatregelen die gericht zijn op een optimale wegdekstroefheid en goed zicht voor de weggebruikers. Op locaties waar de wind extra op het verkeer inwerkt, vormen windafhankelijke snelheidsbeperkingen en half-open windschermen de belangrijkste oplossingen.

B A S I S - T A B E L R E G I O - W E E R W E G D E K - U U R G R O E P - W I N D S N E L H E I D 1 9 7 1 - 1 9 7 5

ROTTERDAM						EINDHOVEN				
W U S	N-ONG	T-UREN	N/T	N/T*	W-ONG	N-ONG	T-UREN	N/T	N/T*	W-ONG
1 1 1	1507	5856	0.2573	1.0000	0	2714	6542	0.4149	1.0000	0
1 1 2	1588	6844	0.2320	0.9016	-173	2839	7488	0.3791	0.9138	-268
1 1 3	580	3296	0.1759	0.6837	-268	682	2819	0.2419	0.5832	-487
1 1 4	183	1476	0.1240	0.4817	-197	91	553	0.1645	0.3964	-139
1 2 1	1560	2020	0.7722	1.0000	0	1660	2171	0.7647	1.0000	0
1 2 2	4246	4919	0.8632	1.1178	447	4611	5422	0.8504	1.1121	465
1 2 3	3122	3893	0.8019	1.0384	116	3234	4032	0.8020	1.0487	150
1 2 4	1214	1876	0.6472	0.8381	-234	640	1021	0.6266	0.8194	-141
1 3 1	1397	1372	1.0182	1.0000	0	1605	1629	0.9855	1.0000	0
1 3 2	3901	3343	1.1671	1.1462	498	3855	3635	1.0606	1.0762	273
1 3 3	2414	2276	1.0607	1.0417	97	2194	2188	1.0027	1.0175	38
1 3 4	788	953	0.8272	0.8124	-182	341	457	0.7466	0.7576	-109
2 1 1	189	438	0.4320	1.0000	0	310	489	0.6343	1.0000	0
2 1 2	328	511	0.6414	1.4849	107	604	559	1.0796	1.7021	249
2 1 3	229	246	0.9298	2.1524	123	308	211	1.4625	2.3057	174
2 1 4	126	110	1.1423	2.6443	78	60	41	1.4514	2.2882	34
2 2 1	231	151	1.5305	1.0000	0	219	162	1.3504	1.0000	0
2 2 2	487	368	1.3251	0.8658	-75	625	405	1.5429	1.1426	78
2 2 3	462	291	1.5883	1.0378	17	539	301	1.7891	1.3249	132
2 2 4	288	140	2.0551	1.3428	74	179	76	2.3457	1.7371	76
2 3 1	213	103	2.0780	1.0000	0	263	122	2.1614	1.0000	0
2 3 2	449	250	1.7979	0.8652	-70	566	272	2.0842	0.9643	-21
2 3 3	368	170	2.1642	1.0415	15	368	163	2.2511	1.0415	15
2 3 4	201	71	2.8240	1.3591	53	118	34	3.4579	1.5998	44
3 1 1	175	438	0.4000	1.0000	0	232	489	0.4747	1.0000	0
3 1 2	297	511	0.5613	1.4032	82	512	559	0.9152	1.9279	246
3 1 3	297	246	1.2059	3.0149	198	398	211	1.8898	3.9812	298
3 1 4	242	110	2.1939	5.4850	198	136	41	3.2898	6.9303	116
3 2 1	170	151	1.1264	1.0000	0	149	162	0.9188	1.0000	0
3 2 2	457	368	1.2435	1.1040	43	594	405	1.4684	1.5960	222
3 2 3	541	291	1.8599	1.6513	213	660	301	2.1907	2.3844	383
3 2 4	526	140	3.7534	3.3324	368	307	76	4.0231	4.3788	237
3 3 1	168	103	1.6389	1.0000	0	197	122	1.6190	1.0000	0
3 3 2	393	250	1.5737	0.9602	-16	559	272	2.0584	1.2714	119
3 3 3	454	170	2.6700	1.6291	175	512	163	3.1320	1.9345	247
3 3 4	406	71	5.7043	3.4804	289	249	34	7.2967	4.5069	194

zgn. basistabel

LITERATUUR

Godthelp, J. & P.I.J. Wouters (1980). Course holding by cyclists and moped riders. Applied Ergonomics 11 (1980) 4: 227-235.

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

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

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

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

Plate, E.J. (1971). Aerodynamic characteristics of atmospheric boundary layers. U.S. Atomic Energy Commission, Argonne National Laboratory, Karlsruhe University, Argonne/Karlsruhe, 1971.

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

SWOV (1979). Een windafhankelijke adviessnelheid voor het wegverkeer op de Moerdijkbrug. Rapport R-7920. Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV, Voorburg, 1979.

SWOV (1982). Windhinder voor het wegverkeer. Rapport R-82-24. Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV, Leidschendam, 1982.

Weir, D.H.; Ringland, R.F.; Heffley, R.K. & I.L. Ashkenas (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.

21-347

Weir, D.H.; Hoh, R.H.; Heffley, R.K. & G.L. Teper (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.

Wouters, P.I.J. & G.L. Mooyman (1980). Wind - een gevaar op de weg. Verkeerskunde 31 (1980) 3: 104-108.