

BANDEN EN WEGDEKKEN

Experimenteel multifactoronderzoek naar de factoren die de rem- en spoorkrachten tussen autobanden en natte wegdekken beïnvloeden.

Samenvatting, Conclusies en Aanbevelingen van de research van Subcommissie I van de Werkgroep "Banden, Wegdekken en Slipongevallen".

R-76-34

Voorburg, 1976

Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV

INHOUD

Voorwoord

Samenvatting

1. Onderzoekcriteria

2. Invloedvariabelen

3. Kwalificatieonderzoek

4. Functionele eisen

5. Vrachtautobanden

6. Beschouwing van de resultaten

7. Conclusies en aanbevelingen

Literatuur

Bijlagen 1 t/m 10

VOORWOORD

Op verzoek van de Minister van Verkeer en Waterstaat in Nederland heeft de SWOV onderzoek uitgevoerd naar het verschijnsel slippen. Daartoe heeft het bestuur van de SWOV een Werkgroep "Banden, Wegdekken en Slipongevallen" ingesteld. In deze werkgroep zijn de overheid, de researchinstituten en de industrie vertegenwoordigd.

Subcommissie I van deze werkgroep kreeg onder meer tot taak de wegdek- en bandfactoren alsmede de overige factoren te bepalen, die van invloed zijn op de rem- en spoorkrachten tussen een autoband en een nat wegdek.

Het uitgangspunt van het onderzoek was dat slipongevallen ontstaan als gevolg van menselijk verkeersgedrag, waarbij onjuiste, te hoge, verwachtingen ten aanzien van de beschikbare rem- en spoorkrachten als oorzaak van het ontstaan van slipongevallen moet worden beschouwd. Belangrijk hierbij is de plaatselijke en/of tijdelijke daling van de rem- en spoorkrachten. De oorzaak van deze daling wordt vooral gevonden in de aanwezigheid van water op het wegdek. De studie houdt zich dan ook vooral bezig met omstandigheden waarbij het wegdek nat is.

In de bovenomschreven gedachtegang is het aantal slipongevallen te verminderen door de onjuiste verwachtingen van de weggebruiker te helpen voorkomen. Dit is te bereiken door de plaatselijke en/of tijdelijke daling van de rem- en spoorkrachten zo gering mogelijk te doen zijn. De weggebruiker moet onder alle omstandigheden kunnen beschikken over zo hoog mogelijke rem- en spoorkrachten.

Bij het maken van rem- en stuurmanoeuvres met auto's is onderscheid te maken tussen minimaal noodzakelijke rem- en spoorkrachten voor de bewegingen van het voertuig en de beschikbare krachten tussen band en wegdek. Om door maatregelen te bereiken dat de beschikbare krachten groter zijn dan de minimaal noodzakelijke is het nodig dat de grootte van die krachten bekend is.

Dit heeft de behoefte doen ontstaan onder zo realistisch mogelijke omstandigheden te onderzoeken welke factoren in feite van

invloed zijn op de grootte van de rem- en spoorkrachten. Uit de literatuur bleek dat veel van de tot dan toe uitgevoerde onderzoeken naar die factoren waren opgezet als enkelfactoronderzoek, d.w.z. dat de invloed van een enkele variabele op de grootte van de rem- en spoorkrachten is onderzocht. Voor een verantwoorde onderzoekopzet werd het ter aanvulling op de bestaande kennis noodzakelijk geacht een experimenteel multi-factoronderzoek uit te voeren. Het moest daarin mogelijk zijn de invloed van elke variabele zowel als de interactie te bepalen.

Het onderzoek is in drie fasen uitgevoerd. In de eerste fase zou moeten worden bepaald welke factoren en interacties van primair belang zijn voor de krachten in het contactvlak tussen personenauto, band en weg. In de tweede fase zou voor de primaire factoren de numerieke invloed op deze krachten te bepalen moeten zijn. In de derde fase zou hoofdzakelijk aandacht aan vrachtautobanden moeten worden besteed.

In Subcommissie I van de Werkgroep "Banden, Wegdekken en Slipongevallen" hebben zitting:

J.C.A. Carlquist, voorzitter (voordien M. Slop)
Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV,
Voorburg

J.C. de Bree
Rijkswegenbouwlaboratorium, Delft

P.M.W. Elsenaar
Rijkswegenbouwlaboratorium, Delft

F.X.M. Verhulst (voordien J. v.d. Burg)
Vredestein Enschede B.V.

A. Dijks (voordien H.B. Pacejka)
Laboratorium voor Voertuigtechniek van de Technische Hogeschool
Delft

J. de Bree (voordien J.T. Groennou)
Instituut voor Wiskunde, Informatieverwerking en Statistiek,
TNO, Den Haag

B.T. Han
Laboratorium voor Wegen en Spoorwegen van de Technische Hogeschool Delft

L.H.M. Schlösser, secretaris (voordien H.G. Paar en S.T.M.C. Janssen)
Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV,
Voorburg

Dit rapport is samengesteld door L.H.M. Schlösser.

Van het onderzoek is een film gemaakt door de Stichting Film en Wetenschap te Utrecht onder de titel "Banden en Wegdekken".

E. Asmussen
Directeur
Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV

SAMENVATTING

Het onderzoek naar het contact tussen band en wegdek is in drie fasen uitgevoerd. In elke fase is niet alleen getracht het effect van variabelen als wegdektype en snelheid op de slipweerstand vast te leggen maar ook interactie-effecten zoals profieldiepte-snelheid of bandtype - waterlaagdikte - profieldiepte.

In de eerste fase is een scheiding gemaakt tussen eerste- en tweede-orde factoren. De factoren wegdektype, bandtype, profieldiepte, waterlaagdikte, bandspanning en bandbelasting zijn in een experimenteel multifactoronderzoek betrokken. Elk van deze factoren bleek invloed te hebben op de rem- en spoorkrachten. Alleen de invloed van de bandspanning en de bandbelasting bleek of niet significant of zeer klein te zijn.

In de tweede fase is de numerieke invloed vastgelegd van de wegdekkenmerken en de snelheid op de grootte van de rem- en spoorkrachten. Het bleek mogelijk een mathematische relatie op te stellen waarin de bijdrage van de wegdekkenmerken macro- en microruwheid alsmede de snelheid aan de rem- en spoorkrachten is vastgelegd.

In de derde fase is eenzelfde mathematische relatie opgesteld waarbij ditmaal gebruik gemaakt is van vrachtautobanden.

Aan de hand van de resultaten is een vergelijking gemaakt tussen personenautobanden en vrachtautobanden. Hierbij valt vooral op dat de beschikbare remkrachten bij gebruik van vrachtautobanden tot circa een factor twee lagere waarden bereiken dan bij gebruik van personenautobanden.

Van de wegdekmerken heeft vooral de microruwheid overwegend een grote invloed op de slipweerstand. Dit geldt bij elk type band, bij elke snelheid en bij elk niveau van macroruwheid. De macroruwheid van het wegdek heeft vrijwel alleen een grote invloed bij hogere snelheden.

Tot slot worden er aanbevelingen gedaan voor het nemen van overheidsmaatregelen. Hierbij is vooral ingegaan op eisen aan de macro- en de microruwheid van wegdekken.

1. ONDERZOEKCRITERIA

Het onderzoek naar de beschikbare krachten die optreden tussen een band en een nat wegdek, tracht de invloed vast te leggen van verschillende variabelen op de grootte van de rem- en spoor-krachten. Ter onderlinge vergelijking worden dimensieloze rem- en spoorkrachtcoëfficiënten gebruikt die als volgt worden gedefinieerd [1]:

μ_{xm} : het quotiënt van de maximale waarde van de remkracht en de momentane verticale bandbelasting

μ_{xb} : het quotiënt van de remkracht en de momentane verticale bandbelasting indien het wiel geblokkeerd is

μ_y : het quotiënt van de maximale spoorkracht en de momentane verticale bandbelasting.

Door deze drie coëfficiënten is de slipweerstand gedefinieerd. Elk van deze drie coëfficiënten is onder bepaalde condities van belang. Een hoge μ_{xm} -waarde betekent dat hard remmen mogelijk is zonder dat de wielen van een voertuig gaan blokkeren. Hierdoor kan men een hoge vertraging bereiken met behoud van stabiliteit en bestuurbaarheid. In een noodsituatie zal de bestuurder meestal zo hard mogelijk remmen waardoor de wielen kunnen blokkeren. Voor een zo kort mogelijke remweg onder deze omstandigheden is een hoge μ_{xb} -waarde gunstig. Een hoge μ_y -waarde is wenselijk wanneer de bestuurder van koers wil veranderen, een bocht wil doorlopen of een uitwijkmanoeuvre tracht te maken.

Meetmethode

De metingen aan personenautobanden zijn uitgevoerd met de bandenmeetwagen van het Laboratorium voor Voertuigtechniek van de Technische Hogeschool Delft. In een speciale meettoeren worden de verticale bandbelasting en de rem- en spoorkrachten met behulp van een meetnaaf gemeten. De verkregen rem- en spoorkrachtcoëfficiënten zijn steeds het gemiddelde van vier waarnemingen. De bandenmeetwagen is uitvoerig beschreven door A. Dijks [2].

Bij de metingen aan vrachtautobanden is gebruik gemaakt van de eenwielige meetaanhanger voor truckbanden van het Laboratorium voor Voertuigtechniek van de Technische Hogeschool Delft. Hiermee kunnen alleen remkrachtcoëfficiënten worden bepaald. De meetcriteria bij de truckbanden waren dan ook de maximale remkrachtcoëfficiënt μ_{xm} en de blokkeerwaarde μ_{xb} .

2. INVLOEDSVARIABELEN

Bij de aanvang van het onderzoek is aan de hand van de literatuur een inventarisatie gemaakt van de invloedsfactoren van belang voor het contact tussen band en wegdek. Daar deze factoren bekend mogen worden verondersteld zal hier met een korte beschrijving worden volstaan.

1. Wegdekfactoren

De aard en samenstelling van het wegoppervlak, met name de wegdektextuur, heeft een zeer belangrijke invloed op de rem- en spoorkrachtcoëfficiënten [3, 4, 5]. De belangrijkste kenmerken van belang voor de slipweerstand zijn de macro- en de microruwheid. De macroruwheid (oneffenheden van 10^{-3} tot 10^{-2} m) dient voor het snel afvoeren van water uit de contactzone tussen band en wegdek. De microruwheid (10^{-4} tot $5 \cdot 10^{-4}$ m) dient om de resterende waterfilm te doorbreken om adhesie tussen bandrubber en wegdek mogelijk te maken.

In het onderhavige onderzoek is de macroruwheid gemeten door het bepalen van de gemiddelde textuurdiepte \overline{TD} volgens de sand-patch methode [6]. Een standaardvolume zeer fijn zand wordt op het te meten wegdek cirkelvormig verspreid. De diameter van de zandvlek is een maat voor de gemiddelde textuurdiepte \overline{TD} . De microruwheid is bepaald met het SRT-toestel (British Portable Skid Resistance Tester), een door het Engelse Road Research Laboratory ontwikkeld instrument [7]. Een slinger, met aan het uiteinde een blokje rubber glijdt over een tevoren nat gemaakt oppervlak. De opslingerhoogte uitgedrukt in een getal van 0 tot 100, is een maat voor de microruwheid.

De vlakheid (10^{-2} tot 1 m) is van belang voor de slipweerstand in verband met plassen op het wegdek en het optreden van dynamische veranderingen in de wielbelasting. De vlakheid wordt gemeten met de schokmeter.

Andere wegkenmerken zoals lengteprofiel en dwarsprofiel beïnvloeden de afvoer van het water naar de zijkanten van de weg

(statische drainage) en kunnen daarom van belang zijn voor de optredende rem- en spoorkrachten. Hierop wordt hier niet verder ingegaan.

2. Bandfactoren

Bij banden zijn kenmerken te onderscheiden die samenhangen met de constructie, met de profilering en met de rubbersamenstelling.

Onder het kenmerk bandconstructie wordt meestal de opbouw van het karkas verstaan. Van de typen radiaal, diagonaal en biasbelded komt het laatste in Europa vrijwel niet voor. Radiaalbanden geven door de aanwezigheid van de stijve gordel meer vrijheid in de vormgeving van het profiel. Door de stijve gordel worden de groeven in het contactvlak nauwelijks dichtgedrukt [8]. Dwarsgroeven geven met radiaalbanden minder problemen dan met diagonaalbanden en in het profiel van radiaalbanden zijn dan ook vrijwel steeds dwarsgroeven aanwezig. Deze dwarsgroeven verlagen plaatselijk de hydrodynamische druk en zijn daarom gunstig voor de remkrachten.

Van alle karkaskenmerken is waarschijnlijk alleen de driftstijfheid van belang voor de dwarskrachtcoëfficiënt. De driftstijfheid is de dwarskracht per graad sliphoeck in het gebied tussen +1 en -1 graad sliphoeck. In dit gebied kan de dwarskracht lineair worden verondersteld.

De profilering van een band dient voor het verdringen, c.q. opnemen van het water uit het contactvlak tussen band en wegdek. Het water zal voor een deel in een kanaal of slot (kleine insnijding) kunnen worden opgenomen. De opnamecapaciteit kan worden gerelateerd aan het luchtgetal. Het luchtgetal is het quotiënt van het gezamenlijke oppervlak van de kanalen en slots en het totale contactoppervlak. Het water dat niet kan worden opgenomen zal uit het contactvlak moeten worden afgevoerd. Daar het berekenen van de afvoercapaciteit vooralsnog geen resultaat opleverde is de afvoercapaciteit langs experimentele weg bepaald. Via een spleet wordt water door het profiel van de band

geperst. Met behulp van karakteristieke waarden kunnen profi-
leringen met elkaar vergeleken worden [9].

De rubbersamenstelling van het loopvlak van personenautobanden
bestaat uit een mengsel van synthetische rubber, roet, olie en
andere toevoegingen. Bij vrachtautobanden komt nog veel natuur-
rubber voor. Het is moeilijk langs chemische weg de rubbersa-
menstelling vast te stellen. Voor de rubbersamenstelling zijn
daarom een aantal afgeleide kenmerken bepaald. De hardheid
wordt gemeten met een skore-hardheidsmeter; de resilience met
de gemodificeerde Lübke-meter. Tenslotte is de glastemperatuur
bepaald. De temperatuur waarbij een verandering in de soorte-
lijke warmte van het rubber optreedt, wordt de glastemperatuur
genoemd [10].

De invloed van bandbelasting, bandspanning en bandenmaat op de
slijpweerstand is in het praktijkgebied voor personenautoban-
den waarschijnlijk klein. Bij grotere waterlaagdikten speelt de
bandspanning waarschijnlijk nog wel een rol bij het optreden
van aquaplanen.

3. Profiel diepte

De invloed van het expliciet gemaakte bandkenmerk profiel diep-
te is in enkelfactoronderzoek vrij uitvoerig onderzocht [11].
In het algemeen zal de remkrachtcoëfficiënt aanvankelijk vrij
geleidelijk dalen bij afnemende profiel diepte. Bij een profiel-
diepte die minder wordt dan 2 à 3 mm zal de remkrachtcoëffi-
ciënt sterk progressief lager worden. Bij hogere snelheden en
gladde wegen is dit effect het grootst. De invloed van de pro-
fiel diepte blijkt op de dwarskrachtcoëfficiënt minder te zijn
dan op de remkrachtcoëfficiënt.

4. Snelheid

De invloed van de snelheid op de slijpweerstand is sterk afhan-
kelijk van de eigenschappen van band en wegdek. Dat betekent
dat onderzoekresultaten uit enkelfactoronderzoek met voorzich-

tigheid moeten worden bekeken. In het algemeen zal de slipweerstand bij toenemende snelheid afnemen.

5. Waterlaagdikte

Door wegebouwkundige maatregelen zoals verkanting, vlakheid en overgang naar de berm alsmede goed onderhoud, kunnen grotere waterlaagdikten op de wegen grotendeels worden voorkomen. Op een vlakke, normaal verkante weg tijdens een zware regenbui is een waarde van 1 mm al extreem [5, 12]. Bij waterlaagdikten van enkele millimeters en meer ontstaat gevaar voor aquaplaning.

3. KWALIFICATIEONDERZOEK

Opzet

Het eerste doel van het onderzoek was om te bepalen welke factoren en welke interacties van primair belang zijn voor de slipweerstand. Hiertoe is een experimenteel multifactoronderzoek opgezet [13, 14]. Het aantal te verrichten metingen wordt mede bepaald door het aantal niveaus van de factoren. Naarmate met het aantal te verrichten metingen de omvang van het experiment toeneemt, kan er onbedoelde heterogeniteit in de waarnemingsresultaten ontstaan. In de hoop deze heterogeniteit te elimineren kan een indeling van de te verrichten metingen worden gemaakt in zogeheten blokken. Bij dit kwalificatieonderzoek is de eenheid dag als blok gekozen. Aangezien het onuitvoerbaar was binnen één blok, dus op één dag, bij alle combinaties van de factoren een meting te verrichten, is besloten tot strengeling van sommige factoren met blokken. Strengeling van een factor met blokken heeft tot gevolg, dat het effect van die factor niet kan worden onderscheiden van het blokeffect.

In dit experiment zijn de factor wegdektype en de factor exemplaren van één bandtype gestrengeld met blokken om eventuele verschillen die er binnen het type tussen de verschillende banden bestaan, te laten samenvallen met de verschillen tussen dagen. Teneinde doeltreffend te kunnen strengelen was het wenselijk om een groot aantal factoren op eenzelfde aantal niveaus te kiezen. Besloten werd de factoren snelheid, waterlaagdikte, bandbelasting en profieldiepte op twee niveaus in te stellen. Voor elk der beide andere factoren, wegdektype en bandtype, werden vier niveaus in de proef opgenomen. De niveaus van de factoren is weergegeven in Bijlage 1.

Naast deze variabelen zijn er een aantal omstandigheden die tijdens de metingen noodgedwongen hebben gevarieerd. Dit zijn onder meer de temperatuur van de buitenlucht, het wegdek en het sproeiwater; weersomstandigheden zoals vochtigheidsgraad van de lucht, windsnelheid, bewolking etc. Al deze variabelen zijn tijdens de metingen zo consequent mogelijk genoteerd.

Resultaten van het kwalificatieonderzoek

De resultaten van de hoofdeffecten en interacties zijn weergegeven in Bijlage 2. Aan de hand van 32 herhalingsmetingen kan worden geconcludeerd dat er zeer reproduceerbaar gemeten is waardoor ook kleine verschillen in rem- en spoorkrachtcoëfficiënten significant kunnen zijn. Tevens is de conclusie gerechtvaardigd dat er geen andere dan hier opgenomen belangrijke invloedsgrootheden zijn geweest die in het onderzoek hebben gevarieerd.

De conclusies uit het kwalificatieonderzoek kunnen slechts betrekking hebben op het gebied waarbinnen het niveau van de factoren gekozen zijn. De keuze is zodanig geweest dat hierbij het gehele voor de praktijk van belang zijnde gebied is betrokken. Voor het contact tussen band en wegdek zijn als eerste-orde factoren van belang: het wegdektype, het bandtype, de snelheid, de profieldiepte en de waterlaagdikte. Bandbelasting en bandspanning blijken van zeer kleine invloed te zijn. De invloed van de waterlaagdikte is erg klein doch wel significant binnen de gekozen niveaus.

4. FUNCTIONELE EISEN

Opzet

Na het kwalificatieonderzoek werd de behoefte gevoeld nader onderzoek te doen omdat voor beleidsbeslissingen in principe alleen kwantitatieve uitspraken van betekenis zijn. De nadruk in deze fase lag op de wegkenmerken. De overheid kan als wegbeheerder direct invloed uitoefenen op de wegkenmerken. Bovendien was uit de eerste fase gebleken dat de wegkenmerken de grootste invloed uitoefenen op de slipweerstand.

Bij de opzet van de tweede fase is ervan uitgegaan, dat alle hoofdeffecten, twee- en driefactorinteracties bepaald moesten kunnen worden. Dit had tot gevolg, dat bij elke mogelijke instelling van de factoren moest worden gemeten. Wederom is er een indeling gemaakt in blokken met de eenheid dag als blok. Per dag werden 12 metingen verricht. Aangezien ook nu niet alle metingen binnen een blok konden worden verricht, is wederom besloten tot strengeling en uitvoeren van de proef in twee meetseries.

In de eerste meetserie zijn de factoren wegdektype en profieldiepte gestrengeld met de blokken. In de tweede serie de factoren bandtype en snelheid. Vanwege de nadruk op de wegkenmerken is in deze fase gewerkt met zes niveaus van wegdektypen. Verder werd de factor bandtype gevarieerd op vier niveaus, de snelheid op drie niveaus en de profieldiepte op twee. Alle overige variabelen werden op een constant niveau gehouden, ook de waterlaagdikte. Eensdeels omdat de waterlaagdikte voor beleidsmaatregelen moeilijk grijpbaar omdat de hoeveelheid neerslag per tijdseenheid een gegeven is. Anderdeels omdat de invloed van de waterlaagdikte, hoewel significant, toch vrij gering was. De keuze van de variabelen is weergegeven in Bijlage 3. Aangezien wegdekken met de vereiste kenmerken in de praktijk niet aanwezig waren of geschikt voor het doen van metingen is overgegaan tot de aanleg van een aantal proefvakken op een proefbaan.

Korte beschrijving van de resultaten (zie Bijlage 4)

Zoals verwacht kon worden zijn op de wegdekken met zeer grote macrotextuur (B en C) bijzonder hoge waarden gemeten, die zelfs ver boven de waarde 1 voor de maximale remkrachtcoëfficiënt uit kunnen gaan. De hoge waarden op vak C (macro groot - micro klein) kunnen worden toegeschreven aan de toch nog in vrij grote mate aanwezige microruwheid. Vak F (geen macro, geen micro) geeft onder alle omstandigheden zeer lage waarden te zien.

De verschillen tussen de banden onderling zijn slechts zeer gering in vergelijking met de andere hoofdeffecten. Er is een duidelijk verschil tussen nieuwe en afgesleten banden. De snelheidsinvloed is bij nieuwe banden minder dan bij afgesleten banden. De toenemende snelheid nemen de coëfficiënten vrijwel lineair af op alle wegdekken. Naarmate de macrotextuur toeneemt wordt de snelheidsinvloed kleiner. Op zeer macroruwe wegdekken is er vrijwel geen invloed van de snelheid meer. Op het wegdek met uitsluitend microtextuur wordt een zeer grote interactie met de snelheid gevonden.

Mathematische relatie

De keuze van de variabelen en hun niveaus is zodanig geweest dat het mogelijk moest zijn een kwantitatieve relatie te verkrijgen tussen de rem- en spoorkrachtcoëfficiënten enerzijds en de wegkenmerken, bandkenmerken, de snelheid en de profieldiepte anderzijds. Daarvoor is getracht in formulevorm een model op te stellen dat deze relatie weergeeft.

De volgende overwegingen lagen aan dit model ten grondslag:

- Het in het model opnemen van bandkenmerken bleek op moeilijkheden te stuiten. De verschillen tussen de bandtypen als hoofdeffect zijn slechts gering. Voor een goed onderscheid tussen de bijdrage van elk bandkenmerk zou een groter aantal banden ter beschikking moeten staan. Dit onderzoek is uitgevoerd door het Laboratorium voor Voertuigtechniek van de Technische Hogeschool Delft. Het onderzoek en de resultaten zijn beschreven door

A. Dijks [15]. Globaal zijn de kenmerken glastemperatuur en luchtgetal van belang voor μ_{xm} , de kenmerken luchtgetal en resiliënce voor μ_{xb} en de kenmerken glastemperatuur en driftstijfheid voor μ_y .

Voor het hier beschreven onderzoek is een gemiddelde van vier banden genomen.

- Het opnemen van de profieldiepte in het model is eveneens op moeilijkheden gestuit. Voor een goed inzicht zou de profiel-diepte op meer dan de hier gekozen twee niveaus moeten worden gevarieerd. Dit onderzoek is eveneens uitgevoerd door het Laboratorium voor Voertuigtechniek van de Technische Hogeschool Delft en is beschreven door A. Dijks [15].

- De \overline{TD} - en SRT-waarden zijn een redelijke indicatie voor de macro- en microruwheid van het wegdek. Deze waarden kunnen dan ook redelijkerwijze dienen om de wegkenmerken in het model te vertegenwoordigen.

- De formules zijn eigenlijk alleen geldig binnen het gebied dat door de variabelen wordt bestreken. Voor de wegdekken werd als bezwaar gezien dat geen normaal in de praktijk gebruikte wegdekken vertegenwoordigd waren. Om dit bezwaar ten dele op te heffen zijn een serie extra metingen verricht op door normaal verkeer bereden wegvakken. Dit vond plaats op een serie proefvakken van Rijkswaterstaat op Rijksweg 12. Deze proefvakken vertonen enige diversiteit en de eigenschappen waren gedurende een reeks van jaren bekend. De wegkenmerken en de meetresultaten staan vermeld in Bijlage 5 en 6.

Bij het model is ervan uitgegaan dat de rem- en spoorkrachtcoëfficiënten kunnen worden verklaard uit een adhesieterm en een hydrodynamische term. De adhesieterm is gerelateerd aan de SRT-waarde. De hydrodynamische term aan snelheid en textuur-diepte. De relatie zal derhalve de volgende vorm vertonen:

$$\mu = \left[1 - f \left(\frac{v}{\overline{TD}}, v \right) \right] \left[f (SRT) \right].$$

Deze vorm leverde de beste resultaten op uit een aantal alternatieve benaderingswijzen. Als er lineaire verbanden worden verondersteld dan ontstaat de volgende formule:

$$\mu = a_1 + a_2 \frac{v}{TD} + a_3 v + a_4 \text{SRT} + a_5 v \times \text{SRT} + a_6 \frac{v}{TD} \times \text{SRT}.$$

De coëfficiënten a_1 , a_2 etc. dienen te worden bepaald uit de meetresultaten. Termen met twee of meer variabelen vertonen interactie-effecten.

Met behulp van een voorwaartse stapsgewijze multipele regressie-analyse zijn de coëfficiënten berekend. Dit gaf de volgende formules:

$$\mu_{xm} = 0,397 + 0,94 \frac{\text{SRT}}{100} - \frac{v}{100} \left(0,0017 \frac{\text{SRT}}{\text{TD}} - \frac{0,028}{\text{TD}} \right)$$

$$R = 0,990 \quad s = 0,038$$

$$\mu_{xb} = 0,133 + 0,95 \frac{\text{SRT}}{100} - \frac{v}{100} \left(0,0017 \frac{\text{SRT}}{\text{TD}} - \frac{0,035}{\text{TD}} + 0,0010 \times \text{SRT} \right)$$

$$R = 0,985 \quad s = 0,038$$

$$\mu_y = 0,520 + 0,58 \frac{\text{SRT}}{100} - \frac{v}{100} \left(0,0010 \frac{\text{SRT}}{\text{TD}} \right)$$

$$R = 0,985 \quad s = 0,034$$

v in km/h

SRT dimensieloos

TD in mm

R is de multipele correlatiecoëfficiënt en s de standaarddeviatie.

De multipele correlatiecoëfficiënt is erg hoog. Dit betekent dat de opbouw van de μ -waarden is ca. 0,04, een waarde die in de orde van grootte ligt van de spreiding van de metingen.

5. VRACHTAUTOBANDEN

Alvorens tot een evaluatie van de resultaten over te gaan werd de behoefte gevoeld ook voor vrachtautobanden metingen te verrichten. Dit om te voorkomen dat aanbevelingen voor personenautobanden niet van toepassing zouden zijn wanneer vrachtautobanden worden gebruikt.

Bij de produktie van vrachtautobanden wordt in hoge mate gebruik gemaakt van natuurrubber. Hierdoor worden veel lagere rem- en spoorkrachtcoëfficiënten gehaald dan met personenautobanden. De bandbelasting is in de regel veel hoger en ook de bandspanning. Belangrijk voor het contact tussen band en wegdek is de hoge vlaktedruk in het contactvlak.

Het is zeer wel aan te nemen dat vanwege de specifieke bedrijfsomstandigheden van vrachtautobanden andere eisen aan het wegdek gesteld zouden moeten worden dan wanneer personenautobanden gebruikt worden. De doelstelling van de derde fase was dan ook om te zien of conclusies uit het onderzoek van personenautobanden ook geldig zijn wanneer vrachtautobanden worden gebruikt. Daarom kon met een beperkte opzet worden volstaan.

Opzet

Voor het opstellen van eenzelfde mathematische relatie als bij de personenautobanden is een aantal waarnemingen van tenminste twintig nodig. Dit is bereikt door buiten de proefstroken ook op normale wegen te meten. Op de proefstroken zijn de metingen wederom tweemaal uitgevoerd. Hierbij is weer een indeling in blokken gemaakt met de eenheid dag als blok. Het bleek bezwaarlijk om tijdens de metingen een wiel te verwisselen. Er is dan ook steeds met slechts één band per dag gemeten. Dat betekent een strengeling van banden met dagen. De gekozen wegvakken en de niveaus van de overige factoren is weer gegeven in Bijlage 7.

Resultaten

De meetresultaten zijn weergegeven in Bijlage 8. De vier banden vertonen onderling geen grote verschillen. De diagonaalband bereikt overal iets lagere waarden dan de radiaalbanden. Opvallend is dat de niveaus van de rem- en spoorkrachtcoëfficiënten tot ca. een factor 2 lager zijn dan die van personenautobanden. Ook bij truckbanden is de snelheidsinvloed vrijwel afwezig.

Op dezelfde wijze als bij de personenautobanden is ook bij de vrachtautobanden een formule opgesteld. Hierbij is hetzelfde model gebruikt. Gezien de beperkte opzet van de proeven kunnen de formules slechts in grote trekken indicatief zijn voor de grootte en de volgorde waarin de factoren en de interacties de remkrachtcoëfficiënten verklaren. De formules zijn:

$$\mu_{xm} = 34,8230 - 0,0666 \frac{v}{TD} + 0,4384 \text{ SRT}$$

$$R = 92,2$$

$$\mu_{xb} = 46,2222 - 0,0417 \frac{v}{TD} - 0,4559 v + 0,0048 v \times \text{SRT}$$

$$R = 90,1$$

6. BESCHOUWING VAN DE RESULTATEN

Bandtype

Omdat de verschillende banden onderling slechts enige geringe verschillen vertonen is voor een verdere beschouwing ter vereenvoudiging gewerkt met gemiddelde waarden voor personenauto- en vrachtautobanden. De metingen met verschillende banden worden dan beschouwd te zijn verricht met dezelfde band met meerdere waarnemingen.

Vergelijken we de personenauto- en truckbanden met elkaar (Bijlage 9) dan blijkt er steeds een groot verschil te bestaan tussen beide soorten banden. Op de openbare wegen (inhaalstroken van rijkswegen) bedraagt de verhouding truckbanden/personenautobanden 71% voor μ_{xm} en 58% voor μ_{xb} . Dit berekend gemiddeld over alle snelheden. Op de teststroken treedt globaal hetzelfde beeld op: 57% voor μ_{xm} en 49% voor μ_{xb} .

Bij de definitie van de meetcriteria (Hoofdstuk 1) is reeds op het belang van elk der drie coëfficiënten μ_{xm} , μ_{xb} en μ_y ingegaan. Voor normaal remmen is een hoge μ_{xm} gunstig, voor een noodstop is echter juist μ_{xb} van belang. Voor truckbanden zijn niet alleen de absolute waarden van μ lager, maar ook is de verhouding μ_{xb}/μ_{xm} ongunstiger dan voor personenautobanden. Dit betekent dat vrachtauto's niet alleen bij een reeds relatief geringe vertraging blokkerende wielen krijgen, maar dat de beschikbare remkracht dan ook nog progressief afneemt vergeleken met personenauto's.

Profiel diepte

Daar de profiel diepte als aparte factor elders al uitvoerig is beschreven [11] wordt ook hier een vereenvoudiging toegepast. Bij rechtstreekse vergelijking tussen personenauto- en truckbanden is steeds een vol profiel genomen voor beide bandtypen. Bij de bespreking van wegdekkenmerken en snelheid is

voor de personenautobanden een gemiddelde waarde bepaald uit de meetwaarden van een nieuwe en een tot 1 mm afgesleten band. Voor de truckbanden is wederom gewerkt met het volle profiel.

Wegdektype en snelheid

Aan de hand van de ontwikkelde formules (Hoofdstuk 4 en 5) kan voor de praktijksituatie berekend worden welke variabelen het meeste effect hebben. Hierbij worden beschouwd de wegdekkenmerken microruwheid met als criterium de SRT-waarden, de macroruwheid met als criterium de gemiddelde textuurdiepte \overline{TD} en de snelheid v .

De SRT-waarden variëren op de huidige rijkswegen tussen 50 en 80, de \overline{TD} varieert in een gebied van 0,4 tot 1,0. Voor de grenzen van de snelheid kunnen de waarden 50 en 100 km/h redelijkerwijze dienen als afperking van het snelheidsinterval voor de praktijksituatie.

De numerieke invloeden van de variabelen binnen het praktijkgebied zijn weergegeven in Bijlage 10.

Invloed \overline{TD}

Uit de tabellen blijkt dat de invloed van \overline{TD} vrij belangrijk kan zijn. De invloed van \overline{TD} is het grootst voor μ_{xm} , dan voor μ_{xb} en daarna voor μ_y . De invloed van \overline{TD} is in absolute zin groter voor personenautobanden dan voor vrachtautobanden. Zoals te verwachten was is de invloed van \overline{TD} bij hogere snelheden groter dan bij lagere snelheid.

Invloed SRT

De SRT heeft overwegend een grote invloed. De invloed is het grootst voor μ_{xm} , dan voor μ_{xb} en dan voor μ_y . De SRT heeft voor personenautobanden een grotere invloed dan voor vrachtautobanden. Bij personenautobanden is een hoge SRT-waarde in

combinatie met een hoge \overline{TD} -waarde extra gunstig (interactie). Bij vrachtautobanden is de invloed van SRT vrijwel onafhankelijk van \overline{TD} .

Invloed snelheid

De snelheid kan een vrij behoorlijke invloed hebben. De snelheidsinvloed is het grootst voor μ_{xb} , dan voor μ_{xm} en daarna voor μ_y . De invloed van de snelheid is voor personenauto's groter dan voor vrachtautobanden bij een hoge SRT-waarde, doch juist andersom bij een lage SRT-waarde.

Samenvattend kan nu bij de gekozen randvoorwaarden gezegd worden dat de microruwheid van het wegdek een zeer grote invloed heeft op de slipweerstand. Dit geldt bij elk type band, bij elke snelheid en bij elk niveau van macroruwheid. De macroruwheid van het wegdek heeft vrijwel alleen een grote invloed bij hogere snelheden. Omgekeerd is de snelheidsinvloed alleen groot op wegen met een geringe textuurdiepte.

7. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

Conclusie ten aanzien van de gevolgde methodiek

Uit het onderzoek is veel kennisvermeerdering opgedaan voor wat betreft de factoren die van invloed zijn op de rem- en spoorkrachten die werken in het contactvlak tussen band en wegdek. De opzet als multi-factoronderzoek heeft ertoe bijgedragen dat niet alleen de factoren afzonderlijk maar ook in hun onderlinge samenhang op hun invloed op de slipweerstand konden worden bestudeerd.

Hiertoe moesten veel metingen worden verricht. Volgens het tevoren gemaakte meetschema moest dikwijls een bepaald aantal metingen binnen een dag worden uitgevoerd. Aangezien dit op de openbare wegen dikwijls moeilijk uitvoerbaar is, dient een proefbaan ter beschikking te staan. Hierbij kan als nadeel gelden dat daar geen wegen ter beschikking staan die door normaal verkeer worden bereden.

Eerste-orde-factoren van belang voor de slipweerstand

Voor de grootte van de rem- en spoorkrachten tussen personenautobanden en een nat wegdek zijn de volgende factoren van belang: het wegdektype, het bandtype, de voertuigsnelheid, de profieldiepte van de band en de waterlaagdikte op de weg. Het wegdektype en de snelheid hebben een grote invloed, de profieldiepte en de waterlaagdikte (extremen als gevolg van rijgoten e.d. daargelaten) hebben een matige invloed en het bandtype heeft een geringe invloed. De factoren bandbelasting en bandspanning kunnen worden beschouwd als tweede-orde-factoren voor de slipweerstand. Hun invloed is zo gering dat deze voor een verdere beschouwing verwaarloosd kan worden. Andere dan de genoemde factoren hadden geen aantoonbare invloed op de slipweerstand. Met name is er geen verband gevonden tussen temperatuur en slipweerstand.

Kenmerken van belang voor het verkrijgen van zo groot mogelijke rem- en spoorkrachten

Om zo groot mogelijke rem- en spoorkrachten te verkrijgen luidt de conclusie voor de onderzochte kenmerken als volgt: Voor alle wegen is een grote SRT-waarde gunstig. Op wegen waar met hoge snelheden (100 km/h en meer) wordt gereden, levert een vergroting van de gemiddelde textuurdiepte een hogere slipweerstand op, speciaal met personenautobanden. Matiging van de snelheid levert steeds een verhoging van de slipweerstand op, het minst op wegen met grote micro- en macroruwheid, het meest op wegen zonder micro- en macroruwheid. Een grote profieldiepte is gunstig, ook bij matige snelheid en op ruwe wegen. Normale handelsbanden leveren onderling slechts weinig verschillen op, zowel bij personenauto's als bij vrachtauto's.

Aanbevelingen voor overheidsmaatregelen

Ten behoeve van een zo groot **mogelijke** slipweerstand, te verkrijgen door het nemen van overheidsmaatregelen, volgen uit de conclusies de volgende aanbevelingen:

Voor wegdekken kan een zo hoog mogelijke minimumeis worden aanbevolen voor de microruwheid uitgedrukt in een SRT-waarde. Afhankelijk van het type weg kan in verband met voorkomende rijsnelheden deze eis nog worden aangevuld met een minimumeis voor de gemiddelde textuurdiepte \overline{TD} , dus speciaal op autowegen. Aangaande de hoogte van de minima kan mede worden geoordeeld aan de hand van sociaal-economische motieven (geldmiddelen) en uit milieutechnisch oogpunt (geluidhinder), het onderzoek voert niet anders dan tot de aanbeveling van zo hoog mogelijke minima.

Indien een tijdelijke en/of **plaatselijke** daling van de beschikbare rem- en spoorkrachten optreedt, kunnen snelheidslimieten overwogen worden. Daar het niet realistisch is algemene snelheidslimieten in te voeren op grond van de stroefheid van het wegdek

alleen, dienen deze limieten beperkt te blijven tot de situatie waarbij het wegdek nat is. Daartoe is dan een koppeling met vochtigheidsindicatoren wenselijk.

Hoewel een waarde niet rechtstreeks uit dit onderzoek kan worden afgeleid, verdient het aanbeveling te komen tot het voorschrijven van een minimum profieldiepte.

De kennis op het gebied van bandkenmerken van belang voor de slipweerstand is nog niet zodanig dat concrete beleidsmaatregelen kunnen worden aanbevolen. Dit geldt zowel voor personenautobanden als voor truckbanden. Er bestaat in absolute zin een groot verschil tussen truckbanden en personenautobanden. Bij truckbanden bestaat er bovendien een relatief groot verschil tussen de maximale remkrachtcoëfficiënt en de blokkeerwaarde (verhouding μ_{xm} / μ_{xb}). Er dient dan ook bevorderd te worden dat optimaal van de beschikbare remkrachten gebruik wordt gemaakt. Deze maatregelen liggen op het gebied van de remkrachtverdeling met ter aanvulling een anti-blokkeerinrichting.

LITERATUUR

1. (SWOV). Skidding accidents; First interim report of the SWOV Working Group on Tyres, Road Surfaces and Skidding Accidents. Report 1970-4. Institute for Road Safety Research SWOV, 1970.
2. A. Dijks. Wet skid resistance of car and truck tires. Tire Science and Technology, TSTCA, Vol 2, No 2, May 1974.
3. B.J. Albert & J.C. Walker (Dunlop). Tyre to wet road friction. First Paper: Tyre to wet road friction at high speeds. Proc. Instr. Mech. Engrs. 1965 - 66 Vol 180 Pt 2A No 4.
4. G. Maycock (TRRL). Tyre to wet road friction. Second Paper: Studies on the skidding resistance of passenger-car tyres on wet surfaces.
5. B.E. Sabey; T. Williams & G.N. Lupton (TRRL). Factors affecting the friction of tires on wet roads.
6. The measurement of texture depth by the sand path method. Road Note No 27. Road Research Laboratory, 1969.
7. Instructions for using portable skid - resistance tester. Road Note 27. Road Research Laboratory, 1969.
8. H.C.A. van Eldik Thieme & A. Dijks. Het gedrag van banden op natte wegdekken. De Ingenieur 24, 25 (1971).
9. G.K. Groels. Metingen met het groefdoorstromingsapparaat. Report No P 136. Vehicle Research Laboratory of the Delft University of Technology, 1970.
10. R.F. Peterson et al. Tread compound effects in tire fraction. Presented at General Motors Research Symposium: The Physics of Tire Fraction, Warren, October 1973.
11. A. Dijks. Influence of tread depth of car tyres on skidding resistance. Report WTHD 39. Vehicle Research Laboratory of the Delft University of Technology, 1972.
12. H.J. Höcker. Nasse Fahrbahnoberflächen; Definition und Einflussfaktoren. Strasse und Autobahn 10/1971 p. 452.
13. Cochran, W.G. & Cox, G.N. Experimental designs. John Wiley and Sons, Inc., 1957.
14. Kempthorne, O. The design and analysis of experiments. John Wiley and Sons, Inc. 1952.
15. A. Dijks. A multifactor examination of wet skid resistance of car tyres. SAE-paper 741106.

LIJST VAN BIJLAGEN

1. Overzicht van de variabelen in fase 1 (personenautobanden)
- 2.1. Meetresultaten hoofdeffecten in fase 1
- 2.2. Significante interacties in fase 1
3. Overzicht van de variabelen in fase 2 (personenautobanden)
- 4.1. Meetresultaten μ_{xm} in fase 2
- 4.2. Meetresultaten μ_{xb} in fase 2
- 4.3. Meetresultaten μ_y in fase 2
5. Overzicht van de variabelen voor de extra metingen in fase 2
6. Meetresultaten van de extra metingen in fase 2
7. Overzicht van de variabelen in fase 3 (vrachtautobanden)
- 8.1. Meetresultaten $\mu_{xm} * 100$ in fase 3
- 8.2. Meetresultaten $\mu_{xb} * 100$ in fase 3
- 9.1. Vergelijking personenauto- en vrachtautobanden op speciaal geconstrueerde wegdekken
- 9.2. Vergelijking personenauto- en vrachtautobanden op normale snelwegen
- 10.1. Berekening van de numerieke invloed van SRT en \overline{TD}
- 10.2. Berekening van de numerieke invloed op μ , aan de hand van de formules
- 10.3. Berekening van de gepercenteerde invloed op μ , aan de hand van de formules

BIJLAGE 1. Overzicht van de variabelen in fase 1 (personenautobanden)

1. Type of road surface

Normal highways

	Testsite Kesteren	Testsite Leiden	Testsite Raamsdonkveer	Testsite Gorinchem
Macro texture TD	0.3	0.6	0.8	0.7
Micro texture SRT	69	74	77	79

2. Type of tyre

	Uniroyal Rallye 180		Michelin 2 x		Vredestein Sprint		Goodyear 9800	
Tread depth	7 mm	2 mm	7 mm	2 mm	7 mm	2 mm	7 mm	2 mm
Type	Radial steel belted		Radial steel belted		Radial textile belted		Radial textile belted	
Cornering stiffness kg/deg	76		80		65		63	
Air ratio %	29.7	26.3	23.4	16.2	30.6	28.4	30.6	27.6
Resilience rebound %	36	36	39	38	42	42	31	33
Hardness Skore A	59		62		59		64	

3. Speed: 50 and 100 km/h

4. Water depth: 0.3 and 0.6 mm

5. Tread depth: new tyre 7 à 8 mm; worn tyre: 2 mm

6. Tyre load: 250 and 400 kg

7. Tyre pressure: 1.4 and 2.0 kg/cm²

BIJLAGE 2.1. Meetresultaten hoofdeffecten in fase 1

Type of road surface

KES = Testsite Kesteren

LEI = Testsite Leiden

RAA = Testsite Raamsdonkveer

GOR = Testsite Gorinchem

Type of tyre

UNI = Uniroyal Rallye 180

MIC = Michelin z X

VRE = Vredestein Sprint

G00 = Goodyear G 800

Main effects

Table 1. Type of road surface

Average μ_{xm} 84,3				Average μ_{xb} 50,6				Average μ_y 78,7			
KES	LEI	RAA	GOR	KES	LEI	RAA	GOR	KES	LEI	RAA	GOR
-13,9	+0,3	+4,5	+9,1	-6,0	+0,2	+0,4	+5,4	-9,7	+1,8	+1,0	+6,9

Table 2. Type of tyre

μ_{xm}				μ_{xb}				μ_y			
UNI	MIC	VRE	G00	UNI	MIC	VRE	G00	UNI	MIC	VRE	G00
-2,3	-1,9	+1,5	+2,7	-2,0	-2,5	-0,3	+0,3	+2,1	0,3	-0,9	-1,5

Table 3. Other factors

				μ_{xm}		μ_{xb}		μ_y	
Speed	km/h	50	100	+6,3	-6,3	+9,6	-9,6	+4,2	-4,2
Tread depth	mm	2	7	-2,8	+2,8	-3,6	+3,6	+1,0	-1,0
Water depth	mm	0,3	0,6	+1,7	-1,7	+0,5	-0,5	+0,5	-0,5
Tyre load	kg	250	400			+0,7	-0,7	+1,2	-1,2
Tyre pressure	kg/cm ²	1,4	2,0			+0,5	-0,5		

BIJLAGE 2.2. Significante interacties in fase 1.

Twee-factor-interacties

De significante interacties zijn in volgorde van grootte:

- μ_{xm} :
1. wegdektype - bandtype
 2. bandtype - profieldiepte
 3. snelheid - profieldiepte
 4. wegdektype - profieldiepte
 5. wegdektype - snelheid
 6. snelheid - bandtype
 7. profieldiepte - waterlaagdikte

- μ_{xb} :
1. bandtype - profieldiepte
 2. wegdektype - bandtype
 3. snelheid - profieldiepte
 4. wegdektype - snelheid
 5. wegdektype - bandtype
 6. wegdektype - bandtype
 7. profieldiepte - bandspanning

- μ_y :
1. wegdektype - bandtype
 2. wegdektype - profieldiepte
 3. bandtype - profieldiepte
 4. wegdektype - snelheid
 5. snelheid - bandtype
 6. wegdektype - bandbelasting
 7. bandtype - bandbelasting
 8. profieldiepte - bandbelasting
 9. snelheid - waterlaagdikte

Drie-factor-interacties

- μ_y :
1. wegdektype - snelheid - profieldiepte
 2. bandtype - snelheid - profieldiepte
 3. bandtype - profieldiepte - bandbelasting

BIJLAGE 3. Overzicht van de variabelen in fase 2 (personenautobanden)

1. Type of road surface

Specially constructed road surfaces

	A	B	C	D	E	F
\overline{TD}	1.2	3.2	3.6	2.0	0.5	0.1
SRT	82	92	72	68	92	34

2. Type of tyre

	Pirelli Cinturato CN53	Michelin X as	Vredestein Sprint	Uniroyal Rallye 180
Tread depth	1 mm new	1 mm new	1 mm new	1 mm new
Type	Radial textile belted	Radial steel belted	Radial textile belted	Radial steel belted
Glass transition temperature °K	199	215	227	223
Hardness Skore A	72 71	65 62	63 63	62 60
Cornering kg/deg stiffness	61 57.5	72.5 71.5	62 57.5	73 70.5
Air ratio %	17 30	101 31	25 31	21 30
Resilience rebound %	37 34	36 35	42 41	36 35

3. Speed: 50, 75 and 100 km/h

4. Tread depth: new 7 à 8 mm; worn: 1 mm

5. Water depth: 0,6 mm

6. Tyre pressure: 1,8 ato

7. Tyre load: 330 kg

Road surface	A			B			C			D			E			F		
	50	75	100	50	75	100	50	75	100	50	75	100	50	75	100	50	75	100
Speed	112	110	109	121	127	127	102	104	108	105	107	106	115	113	108	59	40	57
km/h	115	116	106	133	127	120	98	101	101	101	98	100	116	110	108	53	48	38
Vredesstein	115	116	104	110	113	122	91	95	90	101	106	101	101	70	48	38	33	16
	116	99	97	120	125	115	88	91	91	99	89	86	97	51	38	58	35	19
Uniroyal	129	122	109	130	128	131	98	101	103	113	111	106	107	108	98	65	36	29
	117	111	109	128	137	128	101	111	109	105	113	105	110	106	98	56	49	42
1 mm	127	115	103	123	111	114	106	92	101	114	112	105	82	51	41	41	26	14
	128	102	95	134	123	124	93	104	92	103	106	86	79	48	35	41	24	15
new	113	112	109	109	125	124	91	101	98	104	104	101	105	104	104	50	48	43
	112	110	98	120	124	120	103	102	101	101	97	94	108	106	99	69	55	47
1 mm	105	107	99	102	112	119	78	92	88	98	94	92	111	98	65	35	29	30
	122	107	102	116	121	121	90	88	88	91	94	92	122	102	78	57	30	22
new	118	111	114	124	126	116	97	102	98	100	109	104	106	102	101	46	57	34
	113	108	103	123	125	122	99	99	101	103	106	96	108	100	94	59	50	46
1 mm	132	99	107	114	107	115	89	97	91	99	103	95	80	50	35	47	23	17
	118	107	95	119	123	119	88	87	85	98	89	79	79	57	33	59	38	24

BIJLAGE 4.1. Meetresultaten M_{xm} in fase 2.

Road surface	A			B			C			D			E			F			
	50	75	100	50	75	100	50	75	100	50	75	100	50	75	100	50	75	100	
Speed	50	75	100	50	75	100	50	75	100	50	75	100	50	75	100	50	75	100	
km/h																			
Vredestein	new	84	76	71	99	102	95	79	76	81	78	71	70	93	84	73	30	22	25
	1 mm	79	72	69	95	92	92	75	75	72	68	65	59	92	80	77	31	25	18
Uniroyal	new	76	66	58	91	89	87	66	65	63	69	61	57	60	45	34	23	16	10
	1 mm	66	60	50	90	84	72	61	60	56	64	51	46	75	38	26	25	19	10
Pirelli	new	82	80	66	92	95	88	79	79	82	72	74	69	78	79	67	39	17	13
	1 mm	79	71	65	92	89	84	78	77	74	70	67	61	80	79	64	34	28	22
Michelin	new	71	68	51	89	92	87	68	70	66	66	66	58	47	35	24	21	22	9
	1 mm	71	57	48	92	83	75	63	63	59	62	50	44	55	34	24	20	14	8
Pirelli	new	85	80	71	91	98	93	80	79	79	83	73	71	92	82	70	24	21	17
	1 mm	81	78	66	94	90	88	80	77	75	74	68	65	91	82	72	34	30	21
Michelin	new	71	69	60	88	89	87	68	68	64	75	65	56	79	62	34	21	12	12
	1 mm	82	65	60	89	85	75	62	59	59	66	62	55	87	69	49	26	16	11
Pirelli	new	76	74	70	103	90	95	82	78	73	71	71	67	75	73	62	30	28	15
	1 mm	65	66	66	91	80	77	75	74	73	66	64	60	71	66	55	36	30	20
Michelin	new	72	59	59	95	88	78	69	66	65	74	63	57	56	35	24	26	13	10
	1 mm	75	61	52	88	83	74	60	57	58	61	54	45	60	36	20	30	22	14

Road surface	A			B			C			D			E			F		
	50	75	100	50	75	100	50	75	100	50	75	100	50	75	100	50	75	100
Speed	92	93	92	100	102	100	89	86	90	91	87	87	88	86	84	51	40	41
Vredestein	95	90	85	111	96	94	91	89	89	88	86	89	89	84	87	51	49	40
1 mm	76	97	96	101	94	100	83	83	81	88	88	90	101	96	52	35	34	8
	106	104	101	105	107	109	80	79	82	88	85	87	107	85	53	47	30	13
new	109	99	95	108	102	106	94	90	94	98	94	92	93	93	84	68	32	25
1 mm	103	99	101	114	112	111	96	96	93	93	95	90	92	104	85	59	54	43
	122	111	101	112	103	106	90	83	87	97	97	89	112	99	52	38	17	8
1 mm	119	118	104	115	106	113	84	85	85	95	94	87	131	104	60	46	22	10
new	99	98	74	99	102	97	86	88	81	91	92	87	100	96	73	43	49	37
1 mm	102	94	94	109	107	106	88	89	89	91	87	86	101	97	95	61	55	47
	99	97	92	96	99	98	80	81	76	87	87	85	105	101	69	23	27	19
1 mm	107	103	94	107	110	108	79	81	78	85	82	82	111	101	80	37	33	14
new	100	98	91	105	105	102	91	89	84	94	92	85	95	93	83	39	54	27
1 mm	96	92	95	112	109	107	90	88	89	87	87	86	92	89	82	57	49	37
	116	103	93	100	96	93	85	83	77	89	90	83	107	93	38	47	25	10
1 mm	112	103	99	106	107	105	78	72	79	84	84	84	120	87	41	54	37	17

BIJLAGE 4.3. Meetresultaten μ_y in fase 2.

BIJLAGE 5. Overzicht van de variabelen voor de extra metingen in fase 2

1. Type of road

Normal highways

	Test site 1		Test site 4		Test site 7		Test site 9	
	Traffic lane	Passing lane	Traffic lane	Passing lane	Traffic lane	Passing lane	Traffic lane	Passing lane
SRT	70	70	66	71	71	73	69	70
$\overline{\text{TD}}$	1.3	1.0	0.5	0.6	1.5	1.4	0.5	0.7

2. Type of tyre: Vredestein Sprint

3. Speed: 50 and 100 km/h

4. Water depth: 0.6 mm

5. Tyre pressure: 1.8 ato

6. Tyre load: 33 kg

7. Tread depth: new

BIJLAGE 6. Meetresultaten van de extra metingen in fase 2.

Testsite	Speed km/h	Traffic lane			Passing lane		
		μ_{xm}	μ_{xb}	μ_y	μ_{xm}	μ_{xb}	μ_y
1	50	.93	.58	.71	1.01	.63	.74
1	100	.90	.57	.69	.92	.49	.73
4	50	1.00	.60	.67	1.08	.66	.71
4	100	.84	.44	.64	.94	.49	.71
7	50	.96	.63	.75	.98	.67	.77
7	100	.88	.49	.69	.93	.52	.74
9	50	.96	.67	.68	1.03	.64	.72
9	100	.91	.50	.65	.95	.53	.71

BIJLAGE 7. Overzicht van de variabelen in fase 3 (vrachtautobanden)

1. Type of road

	Specially constructed road surfaces					Normal highways				
	A	B	D	E	F	Go	Ze	Wo	Br	Wi
SRT	74	87	67	89	84	70	70	67	68	77
\overline{TD}	1.2	3.0	1.8	0.4	<0.1	0.7	1.1	0.8	0.8	0.6

<u>2. Type of tyre</u>	Pirelli Cinturato SN 55	radial
	Michelin D 20 X	radial
	UBO WPX	cover tyre on
		Carcass Michelin D 20 X
	Vredestein Special	diagonal

3. Speed: 50, 75 en 100 km/h

4. Tyre load: 2500 kg

5. Tyre pressure: 6,25 bar

6. Tread depth: new

7. Water depth: 1 mm at 100 km/h 2 mm at 50 km/h

BIJLAGE 8.1. Meetresultaten $\mu_{xm} \approx 100$ in fase 3

$\mu_{xm} \approx 100$		Specially constructed road surfaces					Normal highways				
		A	C	D	E	F	Wi	Ze	Wo	Br	Go
100 km/h	Mich	63 66	61 58	61 55	57 58	13 19	58	56	48	59	55
	Pire	70 75	63 60	66 60	57 60	11 15	63	61	57	61	
	UB0	68 63	61 59	58 58	59 52	21 15	55	53	53	54	54
	Vred	54 63	54 57	59 60	50 48	6 11	58	55	55	47	48
75 km/h	Mich	67 64	60 58	58 54	60 62	20 20	62	62	53	62	62
	Pire	70 71	62 62	61 64	76 68	21 19	67	70	66	66	65
	UB0	66 69	59 62	61 65	60 56	21 19	61	60	56	60	60
	Vred	70 70	56 59	58 63	52 58	16 15	64	63	54	64	58
50 km/h	Mich	72 69	58 56	63 62	70 71	28 25	66	69	57	63	65
	Pire	71 71	68 60	64 66	75 71	20 22	68	69	63	65	70
	UB0	68 70	61 57	64 61	67 66	24 27	61	62	58	60	61
	Vred	67 68	56 57	58 62	72 69	17 19	68	67	59	62	65

BIJLAGE 8.2. Meetresultaten $\mu_{xb} \approx 100$ in fase 3

$\mu_{xb} \approx 100$		Specially constructed road surfaces					Normal highways				
		A	C	D	E	F	Wi	Ze	Wo	Br	Go
100 km/h	Mich	32	39	31	31	9	32	29	22	29	26
		32	34	28	30	8					
	Pire	34	40	33	26	7	28	27	19	25	22
		34	36	31	24	7					
UBO	34	41	33	36	9	31	29	23	28	27	
	36	40	33	30	7						
Vred	31	36	29	21	4	27	28	19	24	20	
	32	37	29	26	7						
75 km/h	Mich	39	36	32	38	10	36	36	27	36	34
		36	37	32	38	8					
	Pire	39	39	33	39	10	35	35	25	35	30
		39	37	33	35	8					
UBO	39	40	34	39	13	38	38	29	37	34	
	42	38	36	37	9						
Vred	39	35	33	28	6	37	35	25	35	31	
	39	39	33	32	9						
50 km/h	Mich	42	37	36	45	15	43	43	36	39	39
		44	37	37	46	13					
	Pire	48	44	42	46	13	42	41	33	38	38
		41	38	36	43	12					
UBO	45	38	39	44	13	44	41	36	40	40	
	41	37	36	45	11						
Vred	43	34	37	42	10	44	43	32	38	41	
	43	39	37	41	11						

	Speed km/h	Car tyres specially constructed road surfaces						Truck tyres						Truck tyres Car tyres					
		A	C	D	E	F	A	C	D	E	F	A	C	D	E	F			
μ_{xm} ($\neq 100$)	100	108	101	104	100	38	66	60	60	56	14	61	59	58	56	37			
	75	114	103	109	107	45	69	60	61	62	19	61	58	56	58	42			
	50	119	100	108	111	56	70	59	63	71	23	59	59	58	64	41			
μ_{xb} ($\neq 100$)	100	68	76	67	66	15	33	38	31	28	8	49	50	46	42	53			
	75	75	77	71	77	21	39	38	33	36	9	52	49	46	47	43			
	50	81	79	75	84	30	44	38	38	45	13	54	48	51	54	43			
$\frac{\mu_{xb}}{\mu_{xm}}$	100	63	75	64	66	39	50	63	52	50	57	63	63	50	57				
	75	66	75	65	72	47	57	63	54	58	47	63	63	58	47				
	50	68	79	69	76	54	63	64	60	63	57	64	64	63	57				

BIJLAGE 9.1. Vergelijking personenauto-vrachtautobanden op speciaal geconstrueerde wegvakken

BIJLAGE 9.2. Vergelijking personenauto-vrachtautobanden op normale snelwegen

		Truck tyre 25000 N; 6.25 bar		Car tyre 3300 N; 1.8 bar		
Road surface	Speed km/h	μ_{xm}	μ_{xb}	μ_{xm}	μ_{xb}	μ_y
Go	50	65	40	81	60	73
	75	61	32	84	56	72
	100	54	24	85	48	70
Ze	50	67	42	86	62	82
	75	64	36	82	53	75
	100	56	28	81	49	75
Wo	50	59	34	71	52	68
	75	57	27	67	44	65
	100	53	21	70	39	61
Br	50	63	39	79	57	67
	75	63	36	81	52	68
	100	55	27	78	47	67
Wi	50	66	43	83	62	76
	75	64	37	81	58	74
	100	59	30	83	50	72
Average	50	60	37	80	59	73
	75	58	32	79	53	71
	100	53	27	79	47	69
Truck/Car		72%	60%			
μ_{xb}/μ_{xm}		56%		67%		

BIJLAGE 10.1. Berekening van de numerieke invloed van SRT en \overline{TD}

Car tyre					
V (km/h)		50		100	
\overline{TD} (mm)		0,4	1,0	0,4	1,0
SRT	50	79,6	83,9	72,5	81,0
	80	101,4	109,5	87,9	104,1

Truck tyre						
		50		100		
		0,4	1,0	0,4	1,0	
		48,6	53,7	40,3	50,3	μ_{xm}
		61,8	66,9	53,5	63,5	(± 100)

SRT	50	52,1	55,8	43,3	50,8
	80	72,7	80,3	56,1	71,2

		29,8	32,9	13,3	19,8	μ_{xb}
		37,0	40,1	27,9	34,2	(± 100)

SRT	50	74,8	78,5	68,5	76,0
	80	88,4	94,4	78,4	90,4

-						μ_y
						(± 100)

Effect TD	Car tyres		Truck tyres	
	μ_{xm}	μ_{xb}	μ_y	μ_{xb}
$\mu_{TD=1} - \mu_{TD=0,4}$	at 50 km/h { SRT = 50			
	4,3	3,7	3,7	3,1
	at 100 km/h { SRT = 80			
	8,1	7,6	6,0	3,1
$\mu_{TD=1} - \mu_{TD=0,4}$	at 50 km/h { SRT = 50			
	8,5	7,5	7,5	6,5
	at 100 km/h { SRT = 80			
	16,2	15,1	12,0	6,3
$\mu_{TD=1} - \mu_{TD=0,4}$	av. at 50 km/h			
	6,2	5,6	4,8	3,1
	av. at 100 km/h			
	12,4	11,3	9,8	6,4
$\mu_{TD=1} - \mu_{TD=0,4}$	av. at SRT = 50			
	6,4	5,6	5,6	4,8
	av. at SRT = 80			
	12,2	11,3	9,0	4,7
$\mu_{TD=1} - \mu_{TD=0,4}$	total average			
	9,3	8,5	7,3	4,8
Effect SRT	at 50 km/h { TD = 0,4			
	21,8	20,6	13,6	7,2
	at 100 km/h { TD = 1			
	25,6	24,5	15,9	7,2
$\mu_{SRT=80} - \mu_{SRT=50}$	at 50 km/h { TD = 0,4			
	15,4	12,8	9,9	14,6
	at 100 km/h { TD = 1			
	23,1	20,4	14,4	14,4
$\mu_{SRT=80} - \mu_{SRT=50}$	av. at 50 km/h			
	23,7	22,6	14,8	7,2
	av. at 100 km/h			
	19,2	16,6	12,2	14,5
$\mu_{SRT=80} - \mu_{SRT=50}$	av. at TD = 0,4			
	18,6	16,7	11,8	10,9
	av. at TD = 1			
	24,4	22,4	15,2	10,8
$\mu_{SRT=80} - \mu_{SRT=50}$	total average			
	21,5	19,6	13,4	10,8

BIJLAGE 10.2. Berekening van de numerieke invloed op μ , aan de hand van de formules

Effect speed	Car tyres		Truck tyres	
	μ_{xm}	μ_{xb}	μ_y	μ_{xb}
$\mu_{50 \text{ km}} - \mu_{100 \text{ km}}$ $\left\{ \begin{array}{l} \overline{TD} = 0,4 \\ \overline{TD} = 1 \end{array} \right\}$ $\left\{ \begin{array}{l} \text{SRT} = 50 \\ \text{SRT} = 80 \end{array} \right\}$	7,1	8,8	6,3	8,3
	13,5	16,6	10,0	8,3
	2,9	5,0	2,5	3,4
	5,4	9,1	4,0	3,4
$\mu_{50 \text{ km}} - \mu_{100 \text{ km}}$ $\left\{ \begin{array}{l} \text{av. } \overline{TD} = 0,4 \\ \text{av. } \overline{TD} = 1 \end{array} \right\}$ $\left\{ \begin{array}{l} \text{av. SRT} = 50 \\ \text{av. SRT} = 80 \end{array} \right\}$	10,3	12,7	8,2	8,3
	4,2	7,0	3,2	3,4
	5,0	6,9	4,4	5,8
	9,4	12,8	7,0	5,8
$\mu_{50 \text{ km}} - \mu_{100 \text{ km}}$ total average	7,2	9,9	5,7	5,8
				11,2

BIJLAGE 10.2. (vervolg) Berekening van de numerieke invloed op M , aan de hand van de formules

Effect TD	Car tyres		Truck tyres	
	μ_{xm}	μ_{xb}	μ_y	μ_{xb}
$\mu_{\overline{TD}=1} - \mu_{\overline{TD}=0,4}$	at 50 km/h	SRT = 50	4,7	9,4
	at 100 km/h	SRT = 80	6,4	7,5
	av. at 50 km/h	SRT = 50	9,9	32,8
	av. at 100 km/h	SRT = 80	13,3	18,4
$\mu_{\overline{TD}=1} - \mu_{\overline{TD}=0,4}$	av. at 50 km/h		5,6	8,5
	av. at 100 km/h		11,8	23,7
	av. at SRT = 50		7,3	18,2
	av. at SRT = 80		9,7	12,7
$\mu_{\overline{TD}=1} - \mu_{\overline{TD}=0,4}$	total average		8,6	15,1
<u>Effect SRT</u>	at 50 km/h	$\overline{TD} = 0,4$	15,4	19,5
	at 100 km/h	$\overline{TD} = 1$	16,9	18,0
	av. at 50 km/h	$\overline{TD} = 0,4$	12,6	52,4
	av. at 100 km/h	$\overline{TD} = 1$	15,9	42,1
$\mu_{SRT=80} - \mu_{SRT=50}$	av. at 50 km/h		16,2	18,7
	av. at 100 km/h		14,5	46,6
	av. at $\overline{TD} = 0,4$		14,2	33,6
	av. at $\overline{TD} = 1$		16,4	29,1
$\mu_{SRT=80} - \mu_{SRT=50}$	total average		15,3	31,0

BIJLAGE 10.3. Berekening van de gepercenteerde invloed op μ , aan de hand van formules

Effect speed	Car tyres	Truck tyres				
		μ_{xm}	μ_{yb}			
$\mu_{50 \text{ km}} - \mu_{100 \text{ km}}$	$\overline{TD} = 0,4$	8,9	16,9	8,4	17,1	55,4
	$\left. \begin{matrix} \text{SRT} = 50 \\ \text{SRT} = 80 \end{matrix} \right\}$	13,3	22,9	11,3	13,4	24,6
	$\overline{TD} = 1$	3,5	9,0	3,2	6,3	39,8
	$\left. \begin{matrix} \text{SRT} = 50 \\ \text{SRT} = 80 \end{matrix} \right\}$	4,9	11,2	4,2	5,1	14,7
$\mu_{50 \text{ km}} - \mu_{100 \text{ km}}$	av. at $\overline{TD} = 0,4$	11,4	20,4	10,0	15,0	38,4
	av. at $\overline{TD} = 1$	4,3	10,3	3,7	5,6	23,3
	av. at SRT = 50	6,1	12,8	5,7	11,3	47,3
	av. at SRT = 80	8,9	16,7	7,7	9,0	19,5
$\mu_{50 \text{ km}} - \mu_{100 \text{ km}}$	total average	7,7	15,2	6,8	10,0	32,1

BIJLAGE 10.3. (vervolg) Berekening van de gepercenteerde invloed op μ , aan de hand van de formules