

RIJSPOREN EN GOLVEN IN HET WEGDEK

Invloed van wegdekschade op de verkeersveiligheid bij natte wegdekken

R-87-25

J.P.M. Tromp

Leidschendam, 1987

Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV

SAMENVATTING

In dit rapport wordt de relatie tussen wegdekschade - het aanwezig zijn van rijsporen en golven - en de verkeersveiligheid op Rijkswegen beschreven. Uit een analyse van het probleem komt naar voren dat de kenmerken van een weg en van een wegdek geen onverwachte veranderingen mogen vertonen, wil het verkeersproces beheerst en veilig verlopen. Aanwezigheid van rijsporen in combinatie met waterlagen op het wegdek kan al snel tot aquaplaning leiden; het voertuiggedrag wordt dan onvoorspelbaar en er kunnen onveilige situaties ontstaan. Aanwezigheid van golven kan leiden tot een voor een bestuurder niet goed waarneembaar verlies aan contact tussen band en wegdek. Bij natte wegdekken zal deze situatie verder verslechteren. Andere vormen van wegdekschade worden op Rijkswegen niet relevant geacht. In een aansluitende literatuurstudie is onderzocht welke kennis aanwezig is over deze problematiek. Kennis over ongevallen waarbij rijsporen en golven een rol hebben gespeeld, blijkt in de geraadpleegde literatuur niet voorhanden te zijn. Ook kennis over het rijgedrag van automobilisten als gevolg van wegdekschade ontbreekt. Wel is het mogelijk gebleken een rekenmodel te ontwikkelen voor de bepaling van die waterlaagdikte, waarbij zo goed als geen aquaplaning op zal treden. Hieruit volgt dan een toelaatbare rijspoordiepte, die ver onder de huidige onderhoudsnorm ligt. De weinige aanwezige kennis over golven geeft geen afdoende antwoord om nu reeds zinnige aanbevelingen hierover te kunnen doen. Nader onderzoek is dan ook aanbevolen naar ongevallen en rijgedrag in deze samenhang, en naar het contact tussen band en wegdek bij aanwezigheid van golven bij nat wegdek.

INHOUD

Voorwoord

1. Inleiding
2. Probleemanalyse
 - 2.1. De weg
 - 2.2. Het voertuig
 - 2.3. Manoeuvres en rijgedrag
 - 2.4. Beschouwing over risico
3. Onderzoek naar effecten van wegdekkenmerken
4. Literatuurstudie naar de invloed van wegdekschade op de verkeers-
veiligheid bij natte wegdekken
 - 4.1. De krachten tussen band en wegdek
 - 4.2. De bepaling van de toelaatbare waterlaagdikte op de weg
 - 4.3. Regen en waterlaagopbouw
 - 4.4. De toelaatbare diepte van rijsporen
 - 4.5. De toelaatbare mate van golven
 - 4.6. De toelaatbare mate van gaten
5. Discussie
6. Aanbevelingen voor nader onderzoek

Geraadpleegde literatuur

Aanbevolen literatuur

Afbeeldingen 1 t/m 12

Tabellen 1 t/m 7

VOORWOORD

De Dienst Verkeerskunde van Rijkswaterstaat heeft de SWOV verzocht onderzoek te doen naar de relatie tussen wegdekkenmerken en de verkeersveiligheid. Al enige tijd is Rijkswaterstaat bezig een systeem voor rationeel wegbeheer in te voeren voor de intensief gebruikte snelwegen. Mede vanuit druk op de onderhoudsbudgetten is deze invoering versneld. Aan de SWOV is gevraagd op grond van verkeersveiligheidsaspecten overwegingen aan te dragen om onderhoudsrichtlijnen mede gestalte te geven.

In deze studie wordt nagegaan of het mogelijk is op basis van bestaande kennis richtlijnen te formuleren en, zo niet, suggesties te geven voor onderzoek. De problematiek van de wegdekkwaliteit is benaderd vanuit het verkeersproces - de samenhang tussen mens, voertuig en weg - en het ontstaan van kritische situaties. Hierbij is aquaplaning in samenhang met rijsporen en golven in het wegdek, als belangrijkste gevaar geïdentificeerd. Met gegevens uit de literatuur wordt een beschouwing opgezet over de toelaatbare waterlaagdikte op de weg en worden hieruit - voorzover mogelijk - eisen ontwikkeld voor rijsporen en golven. Een discussie over de resultaten en aanbevelingen voor nader onderzoek ronden het geheel af.

Dit rapport is opgesteld door J.P.M. Tromp van de Hoofdafdeling Strategisch Onderzoek.

1. INLEIDING

De verkeersafwikkeling is een gevolg van het door bestuurders vertoonde gedrag bij de mogelijkheden van de weg, andere weggebruikers en het eigen voertuig. Aan bestuurder, weg en voertuig zijn eisen te stellen om een veilige verkeersafwikkeling mogelijk te maken. Deze eisen kunnen al naar gelang de omstandigheden verschillen, zoals bij regen en duisternis. Er bestaat samenhang tussen kenmerken van wegen en voertuigen en de manoeuvres en het rijgedrag die met die voertuigen op die wegen worden uitgevoerd. De kenmerken van de weg zullen waarneembaar moeten zijn voor bestuurders, zodat zij kunnen bepalen welke manoeuvres nodig en mogelijk zijn en welk rijgedrag vertoond zal moeten worden. Onverwachte afwijkingen in deze wegkenmerken kunnen tot problemen leiden. Afhankelijk van het al-dan-niet routinematig kunnen reageren op een gebeurtenis kan op dat moment en voor die plaats onaangepast rijgedrag ontstaan. Niet alleen de kenmerken van het wegdek zullen een aan het verwachtingspatroon van de bestuurder aangepaste kwaliteit moeten bezitten: ook de overige wegeigenschappen zullen een aangepaste kwaliteit moeten bezitten en de aan de bestuurder verstrekte informatie zal goed waarneembaar en ondubbelzinnig moeten zijn. De eigenschappen van het wegdek zijn vooral van belang voor een voldoende contact tussen band en weg, zodat de noodzakelijke fysische voorwaarden voor het kunnen uitvoeren van manoeuvres aanwezig zijn. Overige fysische kenmerken van wegen, bijvoorbeeld belijning en zichtafstand, zijn vooral van belang voor het koershouden en het kunnen voorzien van de noodzaak manoeuvres uit te moeten voeren en het rijgedrag aan te passen. Verschillende voertuigen brengen verschillende soorten manoeuvres en rijgedrag met zich mee en kunnen telkens andere eisen aan de kwaliteit van de weg(dek)kenmerken stellen. Hierbij kunnen kritische situaties optreden. Er moet nu worden nagegaan welke invloed weg(dek)kenmerken uitoefenen op het ongevalrisico in kritische situaties. Ongevallengegevens kunnen hierbij wellicht belangrijke informatie bieden.

De probleemstelling wordt als volgt geformuleerd: Bij het rijden op een weg bestaan verwachtingen over de aan te treffen gebeurtenissen (in ruime zin: verkeer, weer, weg e.d.). Op deze gebeurtenissen wordt door ervaring en inzicht routinematig gereageerd, de bestuurder kan anticiperen en het verkeersproces verloopt beheerst. Bij onverwacht optredende gebeurtenissen ontstaat een probleemsituatie: als de bestuurder routinematig, op de juiste wijze en op tijd kan en zal reageren, zal er weinig aan de hand zijn. Als

echter de bestuurder niet routinematig reageert of kan reageren doordat omvang en aard van het probleem niet of niet tijdig onderkend worden, wordt de aandacht voor een gedeelte door de optredende gebeurtenis opgeëist. De ruimte om andere dingen waar te nemen is dan beperkt. Gesproken kan worden van een potentiële kritische situatie. Indien de tijd ontbreekt om te reageren of als niet op de juiste wijze gereageerd wordt, zal er regelrecht sprake kunnen zijn van een kritische situatie. Een dergelijke gebeurtenis kan optreden door onverwachte (veranderingen van) weg(dek)kenmerken en aanleiding kunnen geven tot het ontstaan van kritische situaties en zelfs van ongevallen.

De doelstelling van deze probleemanalyse is nu als volgt geformuleerd: Onderzoek welke weg(dek)kenmerken in welke mate leiden tot het ontstaan van kritische situaties (door hun aard of door hun mate van voorkomen) en geef de invloed weer op de verkeersveiligheid, zoals op het ontstaan van ongevallen.

De relatie tussen wegdekkenmerken en verkeersveiligheid is nogal complex. Voor de toegankelijkheid en hanteerbaarheid zullen zinnige vereenvoudigingen aangebracht moeten worden. De opdracht beperkt zich tot Rijkswegen met een geslotenverklaring - dus zonder langzaam verkeer. Dit zijn dus uitsluitend wegen buiten de bebouwde kom. De aandacht is primair gericht op de invloed van wegdekschade op de verkeersveiligheid. Hierbij zijn met name te lage stroefheid, rijsporen, golven en overige schade (bijvoorbeeld gaten en scheurvorming) genoemd. Deze wegdekschade vormt ook de grootste kostenpost bij wegonderhoud.

In Hoofdstuk 2 worden de voornaamste kenmerken besproken van wegdekken van Rijkswegen, van de voertuigen op die wegen en van de manoeuvres die zij daarop uitvoeren. Verder wordt ingegaan op het veronderstelde verkeersveiligheidsrisico die schade aan het wegdek zal opleveren. Het zal blijken dat bij een nat wegdek een verhoogd gevaar voor aquaplaning kan optreden, vooral bij aanwezigheid van rijsporen en - in mindere mate - golven.

In Hoofdstuk 3 wordt vervolgens uiteengezet op welke wijze onderzoek naar het verband tussen wegdekschade en verkeersveiligheid uitgevoerd zou moeten worden.

Daarna wordt in Hoofdstuk 4 de - weinige - beschikbare kennis uit de literatuur op een rijtje gezet.

In Hoofdstuk 5 wordt in de discussie op deze aanwezige kennis ingegaan en in Hoofdstuk 6 wordt aangegeven hoe deze kennis aangevuld zou moeten worden.

Een en ander leidt nog niet tot duidelijke en bruikbare conclusies om de onderhoudsrichtlijnen voor Rijkswegen mede gestalte te geven, anders dan de conclusie dat nog veel kennis ontbreekt.

2. PROBLEEMANALYSE

2.1. De weg

Het weglichaam wordt gekenmerkt door het lengteprofiel, het dwarsprofiel en door rechtstanden en bogen. Begrippen hierbij zijn langs- en dwarshelling, verkanting in bogen, en verkantingsovergangen tussen rechtstanden en bogen, en tussen bogen onderling. Kenmerkend voor het wegdek zijn de vormgeving, langs- en dwarsvlakheid, en de fysische gesteldheid, voornamelijk de stroefheid. Stroefheid, langs- en dwarsvlakheid en langs- en dwarshelling worden de belangrijkste wegdekkenmerken geacht.

A. De stroefheid

De stroefheid is een maat voor de wrijving tussen band en nat wegdek. Hoe groter de stroefheid, hoe groter de krachten die tussen band en wegdek overgebracht kunnen worden en hoe groter de marge tussen werkelijk optredende en maximaal mogelijke krachten. Deze marge kan bij geringe stroefheid en nat en vuil wegdek gemakkelijk verdwijnen. De werkelijk optredende wrijving tussen band en wegdek is, behalve van de stroefheid en andere eigenschappen van het wegdek, onder meer afhankelijk van de waterlaagdikte op de weg, de bandprofiel diepte, de bandrubbersamenstelling (verschil tussen vracht- en personenwagens) en de gereden snelheid. Bij droog (en schoon!) wegdek wordt de wrijving tussen band en wegdek voldoende geacht. Bij nat wegdek kan, vooral bij toenemende waterlaagdikte en snelheid, en afnemende bandprofiel diepte, de maximaal mogelijke wrijving laag of te laag worden. Dit zal kunnen leiden tot langere remwegen en zelfs tot blokkeren van wielen, zodat de dwarsstabiliteit verdwijnt. Ook kunnen bij het nemen van bochten onvoldoende dwarskrachten tot instabiliteit leiden.

Voor Rijkswegen wordt voor de stroefheid, zoals in Nederland gemeten, een richtlijn aangehouden die uit wetenschappelijk onderzoek is voortgevloeid (SWOV, 1973). In dit onderzoek is de grote invloed van de stroefheid op de ongevallenkans aangetoond. Deze richtstroefheid zal een voldoende wrijvingscoëfficiënt opleveren, mits de optredende waterlagen op het wegdek niet te dik worden en het wegdek schoon is. Anders is de stroefheid niet meer maatgevend voor de maximaal mogelijke wrijvingscoëfficiënten. De lagere wrijvingscoëfficiënt tussen band en wegdek bij nat wegdek mag algemeen bekend verondersteld worden. Niet iedereen realiseert zich echter dat het wegdek na regen nog enige tijd nat blijft en hoeveel langer de remweg op een nat wegdek is.

B. Langsvlakheid

De voornaamste verstoring van de langsvlakheid wordt gevormd door golven. Golven treden op als gevolg van stuik - samenpersing - van de verharding of, wat in Nederland veel meer voorkomt, als gevolg van ongelijkmatige zetting van de ondergrond. Stuik wordt beïnvloed door intensief vrachtverkeer, zetting niet. Golven komen vooral voor op de slappe gronden in het westen van het land. Bij bepaalde golflengten en amplituden kan resonantie van assen optreden met als gevolg grote wisselingen in de resulterende bandkrachten. In extreme gevallen kunnen de bandkrachten zelfs nul worden. Bij hoge snelheden en/of slechte schokdempers kan instabiliteit optreden. Lading kan los, beschadigd of verloren raken, terwijl onbeladen vrachtwagens hinder kunnen ondervinden door hun slechte demping. Het comfort tijdens het rijden zal bij de aanwezigheid golven nadelig worden beïnvloed. Golven zijn op vele wegen aan te treffen. Zij zijn vaak van verre te herkennen aan de kantstreep, die tijdens het koershouden in de gaten wordt gehouden. Overschrijding van comfortdrempels kan tot snelheidsaanpassing leiden.

C. Dwarsvlakheid

De voornaamste verstoring van de dwarsvlakheid wordt gevormd door rijsporen. Zij treden voornamelijk op als gevolg van belasting door intensief vrachtverkeer, vooral bij hoge temperaturen. Rijsporen komen voor in alle autosnelwegen (meestal alleen in de rechter rijstrook) en alle andere wegen met intensief vrachtverkeer. In bochten zijn de rijsporen meestal breder en minder diep door versporing (baanverbreding) van vrachtvoertuigen. Voertuigen kunnen gaan slingeren in de rijsporen. Bij aanhangers e.d. kan dit slingeren zich in ernstiger mate voordoen. Ook bij het wisselen van rijstrook kan hinder ondervonden worden: het voertuig zal moeite hebben om uit het spoor te komen en schiet vervolgens door. Bij regen blijft water in de sporen staan, waardoor de wrijvingscoëfficiënt tussen band en wegdek daalt. Ook kan aquaplaning optreden en extra zichthinder door spat- en sproeiwater van zware voertuigen. Het vermijden van het rijden in de gevormde sporen kan leiden tot het overschrijden van de rijstrookbreedte, waardoor hinder voor de andere rijstroken of voor tegemoetkomend verkeer kan ontstaan; en tot vlucht- strookrijden. Het kiezen van de linker rijstrook om sporen te vermijden kan leiden tot hogere snelheden. Rijsporen zijn in iedere hoofdweg te verwachten. Het is voor een bestuurder echter niet goed mogelijk om de diepte van de sporen te schatten. Routinematige reacties kunnen dan, vooral bij water in de sporen, tot onverwachte voertuigreacties leiden.

D. Dwarshelling

Wegen buiten de bebouwde kom worden in het algemeen onder een naar rechts gerichte dwarshelling van enkele procenten gelegd. Bij de overgang van rechte weggedeelten naar (linker) bochten zullen verkantingsovergangen optreden, waarbij in gedeeltes van de overgang een zeer geringe of zelfs geen dwarshelling voor kan komen. De dwarshelling is aangebracht om de waterafvoer naar de bermten te verzekeren. Als deze waterafvoer onvoldoende is, zullen waterlagen op het wegdek blijven staan en kunnen aquaplaningsverschijnselen optreden. Dit zal zich dan ook vooral voordoen bij verkantingsovergangen. Deze overgangen kunnen tevens problemen opleveren voor vrachtwagens als de verkantingswisselsnelheid te groot is.

E. Langshelling

Ongunstige combinaties van langs- en dwarshellingen kunnen bij natte wegdekken problemen geven door de soms lange afstrooimengte van het water, waardoor dikke waterlagen kunnen ontstaan. Dit kan onverwacht optreden en nogal eens op plaatsen waar het moeilijk tijdig waar te nemen is, zoals bijvoorbeeld na viaducten.

F. Overige factoren

Schade aan het wegdek kan optreden door ontwerpfouten, weersinvloeden, slijtage door het verkeer, oneigenlijk gebruik van wegen (overbelading) en door overschrijding van de levensduur van de wegconstructie. Te noemen zijn langs- en dwarsscheuren, craquelé-verschijnselen, gaten in het wegdek en bezwijken van naden. Schade kan vrij snel verergeren onder invloed van het verkeer. Dergelijke schade aan het wegdek is meestal slecht te onderkennen en treedt vaak onverwacht op. Schade zal het contact tussen band en wegdek kunnen verstoren. In gaten bijvoorbeeld blijft water staan, terwijl niet geschat kan worden hoe diep ze zijn. Dit zal nogal eens leiden tot ontwijkmanoeuvres. Verwacht kan worden dat op Rijkswegen alleen gaten problemen zullen geven en dat deze zich vooral na perioden met strenge vorst kunnen voordoen.

Behalve de boven genoemde kenmerken zijn de volgende aspecten van het wegdek ook van belang:

- Verhardingssoort: cementbeton, asfaltbeton, klinkers.
- Belijning en markering: door vooruitzien wordt de koers bepaald, door zijdelingse detectie worden koersafwijkingen gecorrigeerd. Belijning en markering delen de weg in; rijstrookbreedte en uitwijkruimte worden erdoor

bepaald en door geleiding is schatting van de snelheid mogelijk. Van belang bij toepassing zijn onder meer de zichtbaarheid bij regen en duisternis, de stroefheid van de belijning en markering en het optreden als barrière bij de waterafvoer.

- De manier waarop de weg overgaat in de berm: geleidelijk of ineens, zowel naar vorm als naar hardheid.
- Aanwezigheid van verontreinigingen zoals vuil, steenslag, rubber en glasresten.
- Overige oppervlakte-eigenschappen van het wegdek, waarbij bandgeluid en spiegelingen bij regen en zonlicht genoemd kunnen worden, en de kleur vanwege het waarnemen van belijning en markering.

Overige aspecten van de weg zijn:

- Wegcategorie, te onderscheiden in autosnelwegen, autowegen, overige wegen zonder gemengd verkeer en wegen met gemengd verkeer buiten de bebouwde kom; en wegen binnen de bebouwde kom.
- Bebakening en bebording, van belang voor detectie van onvoorziene wijzigingen in het wegverloop en voor het attenderen op situaties die extra aandacht van de bestuurder vragen.
- Bewegwijzering.
- Verlichting.
- Bermsituatie, onder meer aanwezigheid van beplantingen en verontreinigingen.
- Overzichtelijkheid van het wegverloop en zichtlengte.
- Verkeersintensiteit.

De meeste factoren worden van te voren bij het wegontwerp bepaald, doch kunnen in de loop der tijd aan verandering onderhevig zijn. Zo kunnen bijvoorbeeld de intensiteiten belangrijk gaan afwijken van de ontwerpintensiteiten, waardoor bijvoorbeeld overbelasting van een weg kan ontstaan; en zijn belijning, bebakening en bebording aan slijtage en vervuiling onderhevig. Het onderhoud van een weg is dan ook niet beperkt tot dat van het wegdek: de overige onderhoudsbehoevende kenmerken zullen op een evenredig niveau gehandhaafd moeten worden om een consistent aanbod naar het verwachtingspatroon van de bestuurder te kunnen verzekeren.

Drie wegcategorieën worden onderscheiden, in aansluiting op de RONA-indeling (RONA, 1980): autosnelwegen (RONA-A, I); autowegen (RONA-B, III) en wegen met een gesloten verklaring (RONA-C, V)

Autosnelwegen zijn uitgevoerd met gescheiden rijbanen en ongelijkvloerse aansluitingen, een gelijkmatig wegverloop met flauwe bochten, goede bermvoorzieningen (vluchtstroken, geleiderailconstructie) en goede informatievoorzieningen (bewegwijzering, praatpalen). De ontwerpsnelheid is 120 km per uur, terwijl alleen voertuigen zijn toegelaten die harder mogen en kunnen dan 70 km per uur.

Autowegen kunnen enkel- of dubbelbaans uitgevoerd zijn en zelden met ongelijkvloerse aansluitingen, het wegverloop is minder regelmatig en de bochten zijn minder flauw, er zijn minder bermvoorzieningen: zelden vluchtstroken; en de informatievoorzieningen zijn minder uitgebreid: niet altijd praatpalen. De ontwerpsnelheid is 100 km per uur, terwijl alleen voertuigen zijn toegelaten die harder kunnen en mogen dan 40 km per uur.

Wegen met een gesloten verklaring zijn enkelbaans, met gelijkvloerse kruispunten, een ongelijkmatig wegverloop met relatief scherpe bochten, weinig bermvoorzieningen: geen vluchtstroken, en weinig informatievoorzieningen. De ontwerpsnelheid is 80 km per uur.

2.2. Het voertuig

Op de onderscheiden wegtypen komen de volgende voertuigcategorieën voor:

- personenauto's en bestelwagens, met een maximale totale massa van 3500 kg, met of zonder aanhanger;
- vrachtwagens, trekker-opleggercombinaties en bussen, met een maximale totale massa van meer dan 3500 kg, met of zonder aanhanger.
- motorfietsen, met of zonder zijspan; motorfietsen met zijspan komen zo weinig voor dat zij buiten beschouwing gelaten zullen worden.

De hier genoemde voertuigcategorieën vertonen een aantal voor de categorie specifieke verkeersveiligheidskenmerken. Vrachtwagens en bussen vormen een voor andere verkeersdeelnemers "agressieve" categorie door massa, afmetingen en geometrie. Vrachtwagens en bussen zijn door de vervoersnoodzaak langer en meer op de weg, ook onder ongunstige omstandigheden, zoals 's nachts en bij slecht weer. Hun remvermogen is slechter dan dat van personenauto's (onder andere door de lagere wrijvingscoëfficiënt van natuurrubberen vrachtwagenbanden) en zij vertonen een sterk wisselend rij- en remgedrag door de grote verschillen tussen lege en beladen toestand. De manoeuvreerbaarheid is door afmetingen en motorvermogen gering. Als aanhangers of opleggers worden meegevoerd, kunnen deze gaan slingeren achter het trekkende voertuig; ook kan de combinatie tijdens het remmen instabiel worden, door-

dat één of meer assen blokkeren, met vaak scharen van de combinatie tot gevolg. Het zicht naar opzij en naar achteren is vaak beperkt. Vrachtwagens kunnen hinder opleveren voor het overige verkeer door afmetingen en eigenschappen: bijvoorbeeld windhinder voor inhalende voertuigen en hinder door spat- en sproeiwater bij natte wegdekken.

Motorfietsen hebben een relatief hoog risico, enerzijds omdat de berijder tamelijk onbeschermd is, anderzijds omdat enkelsporige voertuigen meer dan tweesporige gevoelig zijn voor oneffenheden in het wegdek en versturende invloeden, zoals wind.

Personenauto's en motorfietsen kunnen in relatie tot hun veiligheidseigenschappen - bijvoorbeeld remvermogen - zeer hoge snelheden bereiken. Aanhangers bij personenauto's kunnen problemen opleveren doordat bij (te) hoge snelheid instabiliteit van de combinatie optreedt.

2.3. Manoeuvres en rijgedrag

Op de onderscheiden wegtypen zijn de volgende soorten manoeuvres te onderscheiden:

- rijden inclusief inhalen, ingehaald worden
- remmen en optrekken
- begin inhalen (naar andere rijstrook)
- einde inhalen (terug naar oorspronkelijke rijstrook)
- invoegen - uitvoegen - weven - afslaan
- oprijden en oversteken van kruispunten

De laatste twee manoeuvres komen op autosnelwegen niet voor. Inhalen verschilt wezenlijk tussen enkel- en dubbelbaans wegen.

De genoemde manoeuvres zullen bij de diverse voertuigcategorieën telkens andere kenmerken vertonen. Van de drie onderscheiden voertuigcategorieën zullen motorfietsen bij het rijden het meest gevoelig zijn voor verstoringen en oneffenheden in de weg. Bij de twee andere categorieën kunnen problemen verwacht worden door slingeren bij aanhangers en opleggers. Bij waterlagen op de weg en plasvorming kunnen motorfietsen en personenauto's met toenemende snelheid hinder van aquaplaning ondervinden. Vrachtwagens en bussen hebben bijna geen last van aquaplaning door de hogere drukken tussen band en wegdek. Zoals reeds is aangegeven kunnen vrachtwagens en bussen minder goed remmen dan personenauto's en kunnen aanhangers en opleggers

tijdens het remmen stabiliteitsproblemen krijgen. Motorfietsen kunnen tamelijk snel problemen krijgen met de stabiliteit bij het remmen en dan uit de koers raken. In het algemeen zal bij natte wegdekken de remwerking minder zijn en worden eventuele problemen tijdens het remmen verscherpt. Zware voertuigen trekken veel trager op dan andere voertuigen.

Bij het inhalen op een tweestrooksweg met tegenliggers spelen afstand tot die tegenligger, lengte van het in te halen voertuig, overzichtelijkheid van de weg, acceleratievermogen van het inhalende voertuig en de snelheden van de betrokken voertuigen een rol. Inhalen zal veelal gepaard gaan met sterk verhoogde snelheden. Vrachtwagens met een gering acceleratievermogen en een grote lengte zullen zeer lang over het inhalen doen. Motorfietsen zijn gemakkelijk in staat om in te halen, onder andere vanwege het zeer grote acceleratievermogen. De kleine breedte - in geval van nood is er altijd nog wel een gaatje - zou een rol kunnen spelen bij de risico-acceptatie. Inhalen op tweestrookswegen zal reeds vrij spoedig een riskante gelegenheid zijn. Problemen bij inhalen op wegen met gescheiden rijbanen zijn: rijstrookwisselingen zonder acht te slaan op achteropkomend verkeer op de andere rijstrook, verkeerde snelheidsschattingen van het achteropkomend verkeer, te snel weer teruggaan (snijden) en te langzaam teruggaan (hinder).

Het invoegen kan problemen opleveren van dezelfde orde als bij beginnen in te halen op wegen met gescheiden rijbanen. Bij het uitvoegen kunnen problemen ontstaan als reeds voor de uitvoegstrook vertraagd wordt en door te laat uit te voegen. Bij weven zal een combinatie van in- en uitvoegproblemen kunnen optreden. Problemen bij het afslaan, en bij het oprijden en oversteken van kruispunten kunnen zijn het onjuist of niet aangeven van de wens af te slaan, verkeerde snelheidsschattingen van het naderend verkeer en de voorrangsproblematiek. Bij vrachtwagens kan wellicht de lengte een rol spelen.

2.4. Beschouwing over risico

De kwaliteit en de toestand van het wegdek zijn van zeer grote invloed op de kwaliteit van het contact tussen band en weg en daarmee op een essentiële voorwaarde voor een veilige verkeersafwikkeling. De kwaliteit van het wegdek is (onder andere!) af te meten aan de stroefheid, de vlakheid en de helling van het wegdek en het optreden van schade, voornamelijk gaten. Voor

stroefheid wordt voor Rijkswegen een op wetenschappelijk onderzoek gebaseerde richtlijn aangehouden, die zelden onderschreden wordt (zie SWOV, 1973 en SWOV, 1984). Dit aspect zal hierom alleen secundair beschouwd worden. De langs- en dwarshelling is een ontwerp- en uitvoeringsprobleem (zie hiervoor bijvoorbeeld Rohlfs, 1984, Rohlfs e.a., 1984 en Welleman, 1977). Dit aspect zal ook alleen secundair beschouwd worden. Langsvlakheid (golven), dwarsvlakheid (rijsporen) en overige schade (voornamelijk gaten) zijn dan de primaire aandachtsfactoren.

De toestand van het wegdek is te onderscheiden in droog, nat, glad en vuil wegdek. De volgende matrix geeft de relevantie van de wegdektoestand op de verkeersveiligheid weer:

Toestand	Tijdsduur	Relatief risico	Aantal wegdek- ongevallen
Droog	lang	klein	groot
Nat	middel	middel	middel
Glad	kort	groot	klein

(Van vervuiling is dit soort informatie niet bekend).

Droog wegdek is relevant door de grote aantallen ongevallen, natte wegdekken door de hoogte van het relatieve risico. Hoewel gladheid een zeer hoog risico met zich meebrengt, komt het weinig voor en zal - gezien de aparte problematiek - hier verder niet beschouwd worden. Het samengaan van kwaliteit en toestand van het wegdek bepaalt de mate van risico. Voor een afweging van deze mate van risico is onder andere van belang:

- welke verwachting bestuurders van voertuigen hebben van de kwaliteiten toestand van een wegdek;
- op welke wijze zij dit kunnen waarnemen;
- op welke wijze en in welke mate zij hiermee rekening houden en hierop reageren.

Rijsporen zullen bijna overal aangetroffen worden, golven vooral in het westen van het land en overige schade (voornamelijk gaten) slechts incidenteel, bijvoorbeeld na strenge vorstperioden. Rijsporen zullen op een droge weg alleen problemen opleveren indien zij excessief zijn, en wel voornamelijk voor motorrijders en personenauto's met aanhanger. Bij natte wegdekken

kunnen wel problemen ontstaan, omdat de waterlaagdikte in de sporen niet is waar te nemen en onverwacht groot kan zijn. Er bestaat dan een grote kans op aquaplaning: routinematige reacties, zoals remmen, kunnen dan onverwachte voertuigreacties opleveren. Rijsporen bij nat wegdek zijn dan ook in dit verband als een hoofdprobleem te beschouwen, met voornamelijk gevolgen voor personenauto's en motorfietsen.

Golven zullen te herkennen zijn aan de kantstrepen en aan overschrijding van comfortdrempels. De te verwachten routinematige reactie: snelheid verminderen, zal ook bij natte wegdekken de juiste zijn. Bij een nat wegdek zal het contact tussen band en weg eerder ontoereikend zijn. Alleen excessieve golven kunnen leiden tot een wegvallen van het contact tussen band en weg en tot problemen met lading. Aanwezigheid van golven wordt dan ook in dit verband aangemerkt als een minder groot probleem dan aanwezigheid van rijsporen. Gevolgen van golven treden op voor alle categorieën voertuigen, speciaal vrachtwagens. De combinatie van rijsporen en golven is weer als een hoofdprobleem te beschouwen, maar zal echter minder vaak voorkomen dan rijsporen alleen. Overige schade (gaten) zal naar verwachting incidenteel optreden en wordt als een minder belangrijk probleem - op Rijkswegen! - aangemerkt.

3. ONDERZOEK NAAR EFFECTEN VAN WEGDEKKENMERKEN

De risicoverhoging die de primaire factoren - rijsporen, golven en gaten - met zich meebrengen, moet nu bepaald worden. Dit kan met behulp van onderzoek van ongevallengegevens, observatie van het rijgedrag, en onderzoek naar het voertuiggedrag, c.q. het contact tussen band en weg.

Onderzoek van ongevallengegevens is te onderscheiden naar de volgende onderwerpen:

- primaire factoren, deze gegevens zijn in de VOR-ongevallenbestanden niet als zodanig gecodeerd;
- algemene omstandigheden, bijvoorbeeld nat wegdek, wind, dag of nacht, manoeuvre-type e.d.; hiermee kan gepoogd worden de primaire factoren te benaderen door beschrijving van deelaspecten;
- specifiek onderzoek op vergelijkingsbasis, bijvoorbeeld voor- en nastudies en enkel- en multifactoronderzoek.

Door middel van gedragsobservatie kunnen gedragsafwijkingen ten gevolge van wegdekschade, zoals snelheidsaanpassing en ontwijken, bestudeerd worden.

Bij onderzoek naar het voertuiggedrag, of wel hoe de primaire factoren het contact tussen band en weg beïnvloeden, kan worden nagegaan welke manoeuvres op een weg uitgevoerd moeten worden en welke eisen dit stelt aan de wrijving tussen band en wegdek.

Alvorens tot onderzoek over te gaan is bekeken of er literatuur voorhanden is waarin gegevens en onderzoek voorkomen. De tot nu toe verzamelde literatuur leverde geen ongevallen- of rijgedragobservaties op onder de trefwoorden: spoorvorming, golfvorming en wegdekschade. De oogst is bescheiden: een klein aantal publikaties handelt over spoorvorming, een kleiner aantal over golfvorming, een enkele over gaten. Integrale studies over het probleem zijn niet gevonden. Te constateren valt dan ook dat er - behalve over stroefheid - grote kennislacunes zijn. In de literatuur zijn wel aanknopingspunten gevonden voor eisen aan de primaire factoren vanwege het contact tussen band en weg. Door Welleman (1977) is een aanzet gegeven tot richtlijnen voor rijspoordiepte bij nat wegdek, evenals - op eenvoudiger wijze - door Gabriel (1984). Fiala (1967) en Sinha (1973) handelen over golfvorming en het contact tussen band en wegdek. Wamboldt e.a. (1984) handelt over gaten in wegdekken. Het is dan ook mogelijk op basis van

bestaande kennis een aanzet te geven tot onderzoek naar het contact tussen band en weg. Dit contact is letterlijk de 'basis', rijgedrag geeft afwijkingen aan van ongestoord gedrag, ongevallen de resultaten van uit de hand gelopen verstoringen.

In de volgende hoofdstukken wordt op basis van de literatuur het contact tussen band en wegdek nader beschouwd.

4. LITERATUURSTUDIE NAAR DE INVLOED VAN WEGDEKSCHADE OP DE VERKEERSVEILIGHEID BIJ NAT WEGDEK

Het onderzoek is tot nu toe aan de volgende beperkingen onderhevig:

- er worden alleen Rijkswegen beschouwd, waarop uitsluitend personenauto's, vrachtwagens en motorfietsen voorkomen;
- alleen rijsporen, golfvorming en gaten worden beschouwd;
- glad wegdek wordt eveneens buiten beschouwing gelaten.

Hiervoor is uitgesproken dat vooral rijsporen bij nat wegdek een probleem zullen vormen en in mindere mate golfvorming door het mogelijke optreden van aquaplaning. Verwacht kan worden dat de eisen ten aanzien van wegdekschade bij nat wegdek stringenter zullen zijn dan die voor droog wegdek. Om deze reden zal deze literatuurstudie zich in eerste instantie concentreren op wegdekschade bij nat wegdek. De volgende lijn wordt gehanteerd: Eerst wordt een beschouwing gegeven van de krachten tussen band en wegdek, en van aquaplaning als ongewenste gebeurtenis. Hieruit volgen eisen aan een combinatie van waterlaagdikte op het wegdek, de bandprofiel diepte en de snelheid. Na keuze van maatgevende bandprofiel diepte en uitgangssnelheid, volgt de toelaatbare waterlaagdikte. Hieruit zal, afhankelijk van de weggeometrie, de toelaatbare diepte van rijsporen onder te definiëren omstandigheden volgen (bijvoorbeeld regenintensiteit); afhankelijk van dynamische eigenschappen van relevante voertuigen, de toelaatbare mate van golfvorming; en de toelaatbare overige schade (gaten).

4.1. De krachten tussen band en wegdek

Een wegdek zal zodanige oppervlakte-eigenschappen moeten bezitten dat onder de meeste omstandigheden een voldoende wrijving tussen band en wegdek mogelijk is. Deze wrijving moet het mogelijk maken met een voertuig te kunnen rijden en remmen, en manoeuvres uit te voeren. De weersomstandigheden, voornamelijk regen, en de gereden snelheid hebben een sterke invloed op deze wrijving. De werkelijke wrijving, resp. -krachten, zal groter moeten zijn dan de noodzakelijke wrijving, resp. krachten, om een veilig voertuiggedrag mogelijk te maken. Hierbij moet onderscheid gemaakt worden tussen bochten en rechte weggedeelten. Het berijden van bogen en het uitvoeren van zijdelingse bewegingen is alleen mogelijk als er tussen band en wegdek dwarskrachten overgedragen kunnen worden. De langskrachten voor aandrijven en remmen kunnen dan minder groot zijn: de resultante van langs- en dwars-

krachten, die ongeveer volgens een ellips samenhangen (Mitschke, 1972), moet voor een rollende band kleiner zijn dan de maximale wrijvingscoëfficiënt toelaat. Anders treedt glijden (blokkeren) op en is het voertuig niet meer beheersbaar. In bochten en bij zijdelingse bewegingen worden dus hogere eisen gesteld aan de wrijving omdat de noodzakelijke krachten tussen band en wegdek groter zullen zijn. Rechte weggedeelten liggen over het algemeen onder een dwarshelling (of verkanting) van 2 à 2,5%, zodat bij nat wegdek de waterafvoer gewaarborgd zal zijn. Bochten worden ook onder een zekere dwarshelling gelegd om de centrifugale krachten bij het doorlopen van een boog te compenseren. Bij rechter bochten geldt dat door de daar grotere dwarshelling het water beter wordt afgevoerd en er dus minder dikke waterlagen ontstaan. De maximale wrijvingscoëfficiënt bij water op de weg loopt dan minder sterk terug dan bij rechte weggedeelten. In de overgang tussen een recht weggedeelte (naar rechts afwaterend) en een linker bocht (naar links afwaterend) zal een verkantingsovergang voorkomen met een zeer geringe of zelfs geen dwarshelling. De waterafvoer zal hier op andere wijze gewaarborgd moeten worden, bijvoorbeeld door het wegdek onder een langshelling te leggen, anders kunnen de afstrooilenkten van het water erg groot worden. Hierdoor ontstaan aanzienlijke waterlaagdikten en daardoor een zeer lage wrijving. Overigens moet het mogelijk geacht worden verkantingsovergangen anders dan nu gebruikelijk vorm te geven: een wenteling per rijstrook bijvoorbeeld zal de afstrooilenkte al met de helft kunnen reduceren (zie verder Rohlfs, 1984; Rohlfs e.a., 1984).

Het zal niet eenvoudig zijn te bepalen welke krachten tussen band en wegdek nodig zijn. Uitgangspunten daarbij zijn de ontwerpsnelheid van een weg, de wettelijke remvertragingen en bovenal een zo goed mogelijk dynamisch voertuiggedrag, vooral bij remmen en ontwijken. De sterk wisselende omstandigheden maken het moeilijk een bepaald niveau te specificeren. Gemakkelijker zal het aangeven van onder- en bovengrenzen van de wrijving zijn. Tussen deze onder- en bovengrens zal een minimale wrijvingswaarde bepaald moeten worden, die nog als in praktische zin veilig is aan te merken. Laat ons hiervoor eens de bestuurder van een voertuig bezien. Een bestuurder heeft verwachtingen omtrent de beheersbaarheid van zijn voertuig, die onder meer gebaseerd zijn op waarneming van de toestand van het wegdek en op ervaring met de voertuigreacties bij die toestand. Of een bestuurder ook handelt naar datgene wat hij waarneemt, zal zijn eigen verantwoordelijkheid zijn; de wegbeheerder dient er zoveel mogelijk voor te zorgen dat hetgeen waargenomen wordt geen onverwachte aspecten bevat.

Bij droog en schoon wegdek zijn weinig problemen te verwachten: een droge wrijving maakt hoge langs- en dwarskrachten mogelijk en zelfs bij blokkerende wielen treedt door het in elkaar grijpen van bandrubber en wegdek een hoge overdracht van krachten op: dit is als een bovengrens van de wrijving te beschouwen (N.B. hierbij wordt rubber op de weg achtergelaten: een vervuiling die bij vochtig of nat wegdek de wrijving sterk kan doen dalen). Een nat wegdek en plassen - een gesloten waterfilm boven de textuurtoppen - zijn goed waar te nemen en de meeste bestuurders zullen uit ervaring of door voorlichting weten dat dan de wrijving lager is dan op droog wegdek. Wat zij echter niet kunnen waarnemen is de dikte van de waterlaag. Bij dunne waterlagen zal de wrijving nog grotendeels bepaald worden door de micro-ruwheid van het wegdek en de bandprofiel diepte. Bij dikke waterlagen echter kan aquaplaning optreden: de band en het wegdek zijn gescheiden door een waterfilm en de krachtoverdracht is minimaal. Dikke waterlagen, hoge snelheden en lage bandbelastingen hebben een versterkende invloed op dit verschijnsel. Aquaplaning is aan te merken als een onverwachte en dus ongewenste gebeurtenis. Routinematige reacties zoals remmen en ontwijken kunnen hierbij leiden tot onverwachte voertuigreacties: bij remmen zal gewichtsoverzetting naar de vooras plaatsvinden en wordt de achteras ontlast. De achterwielen zullen tijdens het remmen zelden in het spoor van de voorwielen lopen door ongelijke remwerking, dwarshelling van de weg en eventueel zijwind. Bij dikke waterlagen kunnen dan hier aquaplaningverschijnselen optreden, er kunnen geen dwarskrachten meer overgebracht worden en het voertuig breekt uit. Bij ontwijkpogingen en dikke waterlagen zullen de voorwielen door aquaplaning geen dwarskrachten meer over kunnen brengen en het voertuig rijdt onbestuurbaar rechttuit. Een zodanig lage wrijvingscoëfficiënt als bij aquaplaning optreedt, zal dan ook als een ondergrens aangemerkt kunnen worden. Een tussenwaarde wordt gevormd door de wrijving bij nat wegdek met net geen waterlaag. Een arbitraire keuze van een noodzakelijke minimum wrijving zou kunnen zijn: halverwege de wrijving bij aquaplaning en deze tussenwaarde. Een andere mogelijkheid zou kunnen zijn: het hanteren van de stroefheidsnorm van RWS (zie o.a. SWOV, 1973 en SWOV, 1984). Deze norm is echter moeilijk vertaalbaar naar wrijvingswaarden bij personenautobanden, onder andere doordat de meetband profielloos is, de waterlaagdikte gering (0,5 mm bij een textuurloos wegdek), de meetsnelheid laag en de meetband van natuurrubber.

4.2. De bepaling van de toelaatbare waterlaagdikte op de weg

In de vorige paragraaf is aquaplaning aangemerkt als ongewenste en meest relevante situatie. In het volgende wordt een overzicht gegeven van literatuur over aquaplaning en de factoren die hierbij een rol spelen. Daarna zullen van enige belangrijke factoren minimum waarden worden aangegeven, waarmee de maximaal toelaatbare waterlaagdikte kan worden bepaald. Hierbij wordt uitgegaan van de ontwerpsnelheden van de te beschouwen wegcategorieën: 120 km per uur voor autosnelwegen, 100 km per uur voor autowegen.

Agrawall & Henry (1973) hebben metingen verricht met een gladde testband op vier verschillende typen wegdek om na te gaan bij welke snelheden en waterlaagdikten de wrijving bij geblokkeerd wiel minimaal wordt. De bijpassende snelheid wordt de aquaplaningsnelheid genoemd. De vier gebruikte wegdekken zijn te onderscheiden in cement, split- en asfaltverhardingen. De textuurdiepte varieerde van 0,29 mm (cementbeton) tot 0,76 mm. Er is niet bekend hoe dit gemeten is, maar dit zal vermoedelijk met de 'sandpatch'-methode geschied zijn. De waterlaagdikte op het oppervlak (gemeten vanaf de toppen van de textuur) varieerde van 0 tot 1,27 mm en de snelheden van 80 tot ca. 120 km per uur, voor ons probleem zeer relevante bereiken. In Afbeelding 1 is te zien dat voor asfaltverhardingen, profielloze band en een snelheid van 100 km per uur de waterlaagdikte, waarbij aquaplaning optreedt, varieert van 0,7 mm (TD = 0,39 mm) tot 1,0 mm (TD = 0,76 mm) en bij 120 km per uur van 0,25 mm (TD = 0,29 mm) tot 0,6 mm (TD = 0,76). Dergelijke textuurdiepten komen ook voor op Nederlandse Rijkswegen (Tabel 1). Verdubbeling van de textuurdiepte vergroot de waterlaagdikte waarbij aquaplaning optreedt met iets minder dan de helft bij 100 km per uur en iets meer dan het dubbele bij 120 km per uur. De textuurdiepte heeft kennelijk een grote invloed die toeneemt bij hogere snelheid. De waterlaagdikten waarbij aquaplaning optreedt, zullen voor banden met profiel iets hoger liggen, omdat een deel van het water via de groeven afgevoerd wordt.

Bathelt (1973) concludeert aan de hand van analytische berekeningen en vergelijking met uit literatuur voorhanden gegevens dat voor het aquaplaninggedrag bij hoge snelheden vooral de textuurdiepte van belang is, naast waterlaagdikte, bandprofiel diepte en andere bandparameters. Hij stelt dat een tweemaal zo grote textuurdiepte een veel grotere invloed heeft op de kritische aquaplaningomstandigheden dan een verdubbeling van de minimum bandprofiel diepte van 1 naar 2 mm. Verder wordt gesteld dat bij het door

plassen rijden zelfs bij nieuwe banden aquaplaning niet te vermijden valt. Behalve dat de bandkrachten dan minimaal worden, treedt ook nog de (vaak eenzijdige) werking van de weerstand bij het rijden door de plas op. Essentieel is volgens hem dan ook dat maatregelen ter voorkoming van aquaplaning voornamelijk aan de weg genomen moeten worden: zowel een goede waterafvoer en het vermijden van het ontstaan van plassen is van belang, als een voldoende grote textuurdiepte. Hiermee is dus impliciet de verantwoordelijkheid van de wegbeheerder, c.q. overheid aangesproken.

Dijks (1973) heeft de invloed van de profieldiepte van banden op de slipweerstand bij nat wegdek onderzocht. Gemeten werd op twee verhardingen: asfaltbeton met een textuurdiepte van slechts 0,2 mm en cementbeton met een textuurdiepte van 0,8 mm. Diverse typen banden zijn onderzocht met van nieuw naar bijna glad afnemende profieldiepte. De waterlaagdikte was constant: 0,6 mm, maar niet erg duidelijk gedefinieerd. De waterlaagdikte boven de textuurtoppen moet bij het asfaltbeton ca. 0,4 mm bedragen hebben, bij het cementbeton is het niet duidelijk of er sprake is geweest van een gesloten waterfilm boven de textuurtoppen. Dijks definieert een verlieskental, dat uitdrukking geeft aan het verlies aan absolute wrijving en de afnamesnelheid ervan per mm profielverlies (Afbeelding 2). Te zien is dat dit kental beneden de 2 mm profieldiepte sterk oploopt, vooral voor de wrijvingscoëfficiënt in langsrichting. De snelheidsinvloed (toename kental) en de textuurdiepte (afname kental) zijn duidelijk aanwezig. Dijks trekt de volgende conclusies: Bij hoge snelheden (80 à 100 km per uur) vormt de profieldiepte een essentiële factor in het contact tussen band en wegdek. Dit geldt vooral voor de asfaltverharding met een geringe textuurdiepte, waar bij een profieldiepte van minder dan 2 mm de wrijvingscoëfficiënt sterk afneemt. Van grote invloed is ook de gereden snelheid en de textuurdiepte.

In Dijks (1974) wordt een multifactoronderzoek beschreven naar de invloed van diverse weg-, band en andere factoren op de slipweerstand. Een deel van dit verhaal bestaat uit de metingen die de basis vormen van hetgeen hiervoor is besproken (Dijks, 1973). Van invloed op deze slipweerstand - de wrijving in langs- en dwarsrichting - zijn, in volgorde van belangrijkheid: wegdekeigenschappen, gereden snelheid, profieldiepte en bandeigenschappen. De SRT-waarde - een maat voor de microruwheid van het wegdek - is de belangrijkste parameter bij lage snelheden; bij hoge snelheden is vooral de textuurdiepte van belang. Bij natte wegdekken zal een grote textuurdiepte bijdragen tot een snelle afvoer van water uit het contactvlak tussen band

en wegdek doordat een soort kanalenstelsel aanwezig is. De overige relevante conclusies zijn reeds eerder vermeld door Dijks (1973).

Martinez e.a. (1972) onderzochten het verminderen van de wielrotatie als voorbode voor het optreden van aquaplaning. De onderzochte waterlaagdikten waren echter zo groot - het minimum bedroeg 3 mm - dat de resultaten nauwelijks toepasbaar zijn voor ons probleem (waarbij als relevante waterlaagdikten 0 - 2 mm wordt beschouwd). Martinez e.a. stellen dat 80 km per uur uit aquaplaningoverwegingen een aanvaardbare snelheid is bij waterlaagdikten van ca. 2,5 mm. Dit is wel erg hoog. In het onderzoek zijn overigens bias-belted banden beschouwd - een kruising tussen diagonaal en radiaal - die in Europa nauwelijks bekend zijn, onder voor Europese verhoudingen grote bandbelastingen en bandspanningen.

Sakai e.a. (1978) hebben proeven genomen met verscheidene personenauto-, lichte en zware vrachtwagenbanden om het effect van aquaplaning op rem- en dwarskrachten te bestuderen. De proeven werden in het laboratorium op een trommel uitgevoerd die bekleed was met twee verschillende soorten materialen: het ene een soort schuurpapier en het andere verchroomd wafelbord. De textuurdiepte is niet opgegeven. Alleen de resultaten met schuurpapier zullen hier relevant zijn. Afbeelding 3 beschrijft het verband tussen de wrijvingscoëfficiënt bij geblokkeerd wiel (locked braking force coefficient LBC) en de omwentelingssnelheid voor waterlagen (vermoedelijk boven de textuurtoppen gemeten) van 0 tot 10 mm. De maximum snelheid is 100 km per uur. De meetbanden waren van het radiale (personenauto)type met voor ons probleem relevante parameters. In Afbeelding 4 is de invloed van de waterlaagdikte op de wrijvingscoëfficiënt in dwarsrichting (cornering force coefficient CFC) getoond. In beide gevallen dalen de coëfficiënten met toenemende snelheid en met toenemende waterlaagdikte. Zo is bijvoorbeeld de LBC (Afbeelding 3) bij waterlaagdikte 1 mm de helft van die bij waterlaagdikte 0 mm (bij 100 km per uur). De CFC is bij toenemende waterlaagdikte kleiner. De testbanden hadden een maximale profieldiepte. Het effect van de waterlaagdikte zal bij afnemende profieldiepte sterker zijn. Omdat de textuurdiepte niet is opgegeven en omdat de laboratoriumproeven niet zijn vergeleken met praktijkproeven, geeft Sakai alleen kwalitatieve invloeden weer. Ten aanzien van lichte truckbanden wordt geconcludeerd dat er geen aquaplaningproblemen zullen optreden als er voldoende groeven in de band voorhanden zijn. Geheel afgesleten banden kunnen wel problemen opleveren.

Door Staughton (1970) zijn proeven beschreven met diagonaalbanden. De invloed van de profieldiepte op de slipweerstand is nagegaan. Eén van de conclusies is dat profieldiepte niet kan compenseren voor gebrek aan textuurdiepte. Gezien echter de verschillen tussen diagonaal- en radiaalbanden (zie o.a. Dijks, 1973) en het feit dat tegenwoordig uitsluitend radiaalbanden worden toegepast is dit onderzoek van ondergeschikt belang.

Schilling (1977) onderzocht het aquaplaninggedrag van winter(radiaal)banden bij waterlaagdikten van 10 tot 25 mm. Dergelijke waterlaagdikten zijn echter uitermate extreem en dit onderzoek wordt verder buiten beschouwing gelaten.

Hoewel zijdelings van belang, wordt toch het SWOV-rapport over bandprofiel-diepten (SWOV, 1979) vermeld. Hierin wordt gesteld dat wanneer alle personenwagens voorzien zouden zijn van banden met een profieldiepte van 1,6 mm of meer, naar schatting 1% van de ongevallen met letsel of doden niet gebeurd zou zijn.

In Welleman (1977) zijn metingen beschreven om de invloed te bepalen van voertuigsnelheid, waterlaagdikte en ruwheid van de verharding op de langskrachtcoëfficiënt. De waterlaagdikte - gemeten vanaf de textuurtoppen - varieerde van 0 tot 20 mm; de textuurdiepte van 0 tot 4,3 mm en de snelheid van 50 tot 120 km per uur. De metingen zijn verricht met de standaardmeetband van RWL (Rijkswegenbouwlaboratorium) van Rijkswaterstaat (nu Dienst Weg- en Waterbouw DWW). Om een vergelijking te treffen met personenautobanden moeten de gemeten langskrachtcoëfficiënten gecorrigeerd worden voor wielslip (van 86% naar 100%) en voor bandrubbersamenstelling (van natuur-rubber naar SBR - styreen butadiëen rubber). De diagonale meetband is geprofileerd. De metingen geven het volgende beeld te zien (Afbeelding 5): Bij de voor ons probleem relevante snelheden van 100, resp. 120 km per uur en voor open asfaltbeton ($TD = 0,7 - 0,9$) bereikt de langskrachtcoëfficiënt een minimum waarde bij een waterlaagdikte van ca. 2,5, resp. 3 mm. Deze minimum waarde is te interpreteren als het optreden van aquaplaning. Een textuurdiepte van 0,7 mm komt veelvuldig voor (Tabel 1). Voor de andere wegdekken (epoxybitumen met $TD = 0$ buiten beschouwing gelaten) liggen de minimum waarden telkens hoger en worden deze weer bij 2 à 3 mm waterlaagdikte bereikt. Hieruit is de conclusie te trekken dat deze waterlaagdikte van 2 à 3 mm minimale langskrachtcoëfficiënten oplevert en daarmee in feite onveilige situaties. Hierbij zij bovendien opgemerkt dat de meetband gepro-

fileerd was. Voor banden met weinig of geen profiel zal deze kritische waterlaagdikte lager uitvallen. Welleman stelt dat maatregelen ter voorkoming van lage langskrachtcoëfficiënten pas effect sorteren als de waterlaagdikten tot beneden de 2 à 3 mm gereduceerd worden.

Aquaplaning is een ongewenste gebeurtenis. Grote invloed op het optreden ervan hebben de waterlaagdikte en de gereden snelheid. Textuurdiepte, en in mindere mate bandprofiel diepte, zorgen voor een afvoer van water uit de contactzone tussen band en wegdek en reduceren daarmee het effect van waterlaagdikte. Als uitgangssnelheden zijn hier de ontwerpsnelheden van de beschouwde wegcategorieën gekozen (100 en 120 km per uur), zodat de toelaatbare waterlaagdikte op de weg bepaald wordt door de textuurdiepte en de wettelijk voorgeschreven minimum profiel diepte. De textuurdiepte is een door de wegbeheerder bewaakte kwaliteit van het wegdek. Aangezien de invloed ervan op ons probleem domineert en de wegbeheerder beter in staat geacht moet worden om deze kwaliteit op een bepaald niveau te handhaven, is het logisch minimum eisen voor de textuurdiepte te stellen. Dit zal dan in samenhang met de toelaatbare rijspoordiepte moeten gebeuren (zie onder par. 4.4). Aan de andere kant zou het beslist geen kwaad kunnen om de wettelijke minimum profiel diepte (nu 1 mm) te verhogen tot 2 mm (zie Dijks, 1973). De geringe extra kosten die dit voor de voertuigbezitter met zich meebrengt, zal opwegen tegen de extra veiligheid die verschaft wordt. Handhaving van deze profiel diepte kan een probleem zijn, constatering minder: tegenwoordig zijn bijna alle banden voorzien van een slijtage-indicator bij 1,6 mm (tread wear indicator, TWI). Profiel diepte kan echter slechts zeer ten dele compenseren voor te weinig textuurdiepte.

De gegevens uit de voornaamste, relevante literatuur: Uit Agrawall & Henry (1977) volgt dat bij remmen met een profielloze band reeds aquaplaning optreedt bij 0,6 tot 1,0 mm waterlaagdikte. Bij Sakai e.a. (1978) is bij remmen sprake van een reductie in langskrachtcoëfficiënt met de helft bij toename van de waterlaagdikte van 0 naar 1 mm en met nog eens een kwart van 1 naar 2 mm (Afbeelding 3). Uit Welleman (1977) volgt dat bij een waterlaagdikte van 2 mm of meer reeds aquaplaning zal optreden bij een band met profiel (Afbeelding 5). Deze gegevens wijzen alle ongeveer in dezelfde richting: Bij ca. 2 mm en (ontwerp)snelheden van 100 à 120 km per uur zal aquaplaning op kunnen treden. Bij 0 mm treedt het zeker niet op. Een aanvaardbare waterlaagdikte zal dan tussen de 0 en 2 mm moeten liggen en liefst dicht bij 0 dan bij 2. Een logische en gemakkelijke waarde voor de waterlaagdikte zal dan 1 mm zijn.

In hetgeen volgt wordt bekeken hoe vaak en hoeveel het regent, welke waterlaagdikten daarbij ontstaan en welke invloed de textuurdiepte daarbij heeft.

4.3. Regen en waterlaagopbouw

Welleman (1977) geeft een overzicht van een aantal in de literatuur voorkomende berekeningswijzen van waterlaagdikten op wegdekken. Na vergelijking spreekt hij een voorkeur uit voor de formule van Gallaway, onder andere omdat hiermee de praktijksituatie het dichtst benaderd wordt en de hierin gebruikte textuurdiepte ook in Nederland gehanteerd wordt. In deze formule (zie ook Gallaway e.a., 1972) is de waterlaagdikte - gemeten vanaf de toppen van de textuur van het verhardingsoppervlak - een functie van de textuurdiepte, de regenintensiteit, de afstrooimengte van het water en de helling van het verhardingsoppervlak (resultante van langs- en dwarsstelling). In formule:

$$d = 1,487 \times 10^{-2} \times TD^{0,11} \times L^{0,43} \times I^{0,59} \times S^{-0,42} - TD$$

waarbij

d = waterlaagdikte (mm), TD = gemiddelde textuurdiepte (mm), L = afstrooimengte (m), I = regenintensiteit (mm/uur), S = helling van het verhardingsoppervlak (%)

De formule is in het laboratorium beproefd tot een afstrooimengte van 9 m. De formule geldt niet voor zeer kleine hellingen en met opstuwing door wind is geen rekening gehouden. Een aantal door Welleman uitgevoerde praktijkmetingen gaven een redelijk goede overeenstemming tussen theorie en praktijk. In de volgende beschouwing zal deze formule van Gallaway gebruikt worden. De relevante grootheden worden hieronder besproken en vervolgens worden enige rekenexercities gepleegd.

In Afbeelding 6 (uit Welleman, 1977) is weergegeven hoe vaak een regenbui met een bepaalde intensiteit en tijdsduur voorkomt. Buien van minder dan vijf minuten zijn volgens Welleman niet relevant, omdat deze periode te kort is voor een volledige opbouw van de waterlaag. Indien wel relevant voor de waterlaagdikte, zijn zij zo hevig dat de weggebruiker zijn snelheid aanpast. De kans op voorkomen van een vijf-minuten bui met intensiteiten

van 0,2, 0,4 en 0,6 mm/minuut is respectievelijk eenmaal per week (kleine bui), eenmaal per maand (grote bui) en eenmaal per drie maanden (hevige regen). De bui eenmaal per drie maanden, met een intensiteit van 0,6 mm/minuut = 3 mm per vijf minuten, zal zodanig zijn dat de ruitewissers in de hoogste stand het water nauwelijks meer kunnen verwerken en er een snelheidsaanpassing op zal treden. Zij komt bovendien relatief zelden voor. Hierbij wordt dan ook aangenomen dat een regenbui met een intensiteit van 0,4 mm/minuut gedurende vijf minuten als maatgevend kan worden beschouwd. Als maatgevende textuurdiepte wordt 0,5 mm relevant geacht. Uit Welleman blijkt dat dit een reële ondergrens is voor in Nederland toegepaste verhardingen (Tabel 1). Hoewel deze gegevens uit 1971 stammen, bestaat de indruk dat zij nu niet wezenlijk anders zijn (Mededeling Weg- en Waterbouwkundige Dienst van Rijkswaterstaat). Als aanstroo lengte is gekozen voor de afstand tussen de 'top' van de verharding - de middenbermkant of bij 4-strookswegen de linker kantstreep - tot ongeveer de plaats waar een rechter rijspoor op kan treden. Dit leidt tot de waarde 3; 7,5; 11 en 15 m voor respectievelijk een tweestrooksweg (dakkantprofiel), en een twee-, drie- en vierstrooksrijbaan. Voor S zijn verscheidene waarden gekozen tussen 1 en 4%.

In Tabel 2 en 3 zijn de waterlaagdikteberekeningen weergegeven voor diverse variaties der parameters.

Een voorbeeld: Uit Tabel 2 blijkt dat bij een vijf-minuten-bui een keer per maand ($I = 0,4$ mm/min) op een tweestrooksrijbaan onder een dwarshelling van 2,5% ter plaatse van de rechterkant van de rechterrijstrook ($L = 7,5$ m) bij een textuurdiepte van 0,5 mm een waterlaagdikte van 0,51 mm zal ontstaan. Uit Tabel 3 blijkt dan verder dat onder dezelfde omstandigheden bij een textuurdiepte van 1,0 mm een waterlaag van 0,09 mm zal ontstaan. In een rechterbocht met een verkanting van 4 % zal onder dezelfde omstandigheden een waterlaagdikte ontstaan van 0,33 mm, resp. een waterlaagdikte van minder dan nul (geen gesloten waterfilm). Als de dwarshelling daalt tot 1 %, bijvoorbeeld in een linker bocht, zal de waterlaagdikte onder dezelfde omstandigheden 0,98 mm, resp. 0,60 mm bedragen. Hieruit blijkt eens te meer de grote invloed van de textuurdiepte op de waterlaagdikte.

4.4. De toelaatbare diepte van rijsporen

Met behulp van de formule van Gallaway (uit par. 4.3.) is Afbeelding 7 (uit Welleman, 1977) berekend. Hieruit kan de toelaatbare rijspoordiepte worden

afgelezen, afhankelijk van dwarshelling en waterlaagdikte. Voor het voorbeeld uit par. 4.3. geldt dat bij een toelaatbare waterlaagdikte van 1 mm de rijspoordiepte maximaal ca. 9, resp. 10 mm mag bedragen voor het rechte weggedeelte, ca. 15, resp. 16 mm voor de rechter bocht en ca. 3,5, resp. 4 mm voor de linker bocht. Bij een toelaatbare waterlaagdikte van 2 mm, waarbij dus al aquaplaning kan optreden, kan worden afgelezen dat de rijspoordiepte in het rechte weggedeelte ca. 12, resp. 13 mm mag bedragen, in de rechter bocht ca. 17, resp. 17 mm en in de linker bocht 5,5, resp. 6,5 mm. Bij verkantingsovergangen (hier geldt de formule van Gallaway niet, omdat de helling nul is) kunnen al zonder rijsporen te dikke waterlagen optreden (meer dan 2 mm; zie ook Rohlf's, 1984). Hier mogen dan eigenlijk ook geen rijsporen toegelaten worden. Deze berekeningen en Afbeelding 7 tonen aan dat de toelaatbare rijspoordiepte weinig gevoelig is voor veranderingen in textuurdiepte, enigszins gevoelig voor de zonder rijsporen al aanwezige waterlagen op het wegdek en zeer gevoelig voor de dwarshelling. De geometrie en de plaats van het rijspoor in de rijstrook zullen ook van belang zijn. Gabriel (1984) vermeldt dat voor het dwarsprofiel van rijsporen in Oostenrijk een parabool kan aangenomen worden. Breedte en diepte van het rijspoor hangen met elkaar samen, afhankelijk van de breedte van de rijbaan (zie verder Gabriel, 1984). In Nederland is hierover bijna niets bekend; incidenteel komt een rijspoordwarsprofiel voor met opgestulpte zijranden. Een overzicht van de in Nederland voorkomende rijspoordiepten is gegeven in Afbeelding 8. Er zijn veel plaatsen waar de rijspoordiepte de berekende waarden overschrijdt; de huidige norm ligt op 20 mm met een actiegrens van 18 mm.

4.5. De toelaatbare mate van golven

Het langsprofiel van de weg wordt gekenmerkt door golflengte en amplitude. Bij bepaalde golflengten en amplituden treedt resonantie op van het voertuig of delen ervan. Indien resonantie van assen optreedt, zal dit resulteren in grote wisselingen in de verticale bandkracht. De horizontale bandkracht is afhankelijk van de wrijving, die weer beïnvloed wordt door wegeigenschappen (voornamelijk de microruwheid) en de toestand van het wegdek (voornamelijk water op de weg, zie par 4.2.). De verticale bandkracht bestaat uit een statisch deel: de bandkracht bij stilstaand voertuig, en een dynamisch deel: de bandkrachtvariëaties tijdens het rijden. De dynamische bandkracht is afhankelijk van de amplitude van het wegdek, de gereden snelheid en de eigenschappen van het massa-veersysteem "voertuig". Onder

ongunstige omstandigheden kunnen de bandkrachtvariaties zo groot worden dat de resulterende verticale bandkrachten gedurende enige tijd zeer klein of zelfs nul worden. Daarbij kan het vóórkomen dat de rollende wrijving overgaat in glijdende wrijving (bijvoorbeeld bij natte wegdekken) en dat het na passeren van het minimum aan bandkracht, enige tijd duurt voordat weer de toestand van (grotere) rollende wrijving optreedt. Gevolg is een verlies aan effectieve wrijving en daarmee een daling van de kwaliteit van het contact tussen band en wegdek.

Over de toestand van het wegdek is hierboven reeds het nodige gezegd. Bij golvend en nat wegdek zal de wrijving snel dalen tot onder een aanvaardbaar niveau. De waterlaagdikte zal ook hier tot 1 mm beperkt dienen te blijven. Langsprofiel en voertuig vertonen interactie. Deze interactie heeft zowel betrekking op de veiligheid - het band/weg-contact - als het comfort. Comfortbedreiging zou ertoe kunnen leiden dat resonantie van de voertuigcarrosserie tot snelheidsaanpassing voert. Als problematisch daarentegen zijn de resonanties van assen te beschouwen. Vooral de combinatie van een relatief licht voertuig met een relatief zware as (zoals een starre as met differentieel, met hoge onafgeveerde massa, grote wegdekamplituden en hoge snelheden) zal tot problemen kunnen leiden, vooral als ook nog de schokdempers in slechte staat verkeren. Ook vrachtwagens kunnen hinder ondervinden waarbij de lading schade kan oplopen.

Door Cooper e.a. (1978) is de relatie tussen wegdekoneffenheid en comfort, wegbelasting en voertuiggedrag, resp. bestuurbaarheid beschreven. Subjectieve waarderingen en objectieve metingen zijn gedaan, de laatste als RMS- (root mean square)waarde van de verticale versnelling van de zitting. Gebleken is dat onregelmatigheden tot 30 m lengte toe het voertuiggedrag nog kunnen beïnvloeden. De comfortwaarneming ligt in een gebied van 0 tot 20 Hz. De conclusies zijn dat de RMS-waarde van de verticale versnelling op hoofdwegen varieert tussen 0,01 en 0,25 g. Deze versnelling neemt lineair toe met de voertuigsnelheid. Zowel het absolute niveau van de versnelling als de toename ervan bij snelheidsverhoging neemt af bij toenemende voertuigmassa.

Cooper & Young (1978) behandelen het comfort in personenwagens, Cooper & Young (1980) comfort bij vrachtwagens. De maximale gemeten versnellingen bij vrachtwagens zijn bijna tweemaal zo hoog als in personenauto's.

Helms (1982) beschrijft een model om voertuigtrillingen, veroorzaakt door ongelijkmatig wegdek, te kunnen berekenen. Verbeteringen aan het voertuig worden besproken. Dit onderzoek valt echter buiten het kader van dit rapport.

Fiala (1967) stelt dat de eenvoudigste beschrijving van de golfvorm de effectieve of RMS-waarde is. Deze effectieve waarde is niet genoeg: het wegoppervlak kan lange of korte golven vertonen. Met behulp van de vermogensdichtheid wordt een relatie tot stand gebracht tussen de effectieve waarde en de golflengte. Wegen vertonen bij benadering een Gausse verdeling van de amplituden: de dichtheid is dan voldoende voor een beschrijving van de golfvorming. Kleine amplituden komen veel vaker voor dan grote: 1/3de deel der amplituden is absoluut groter dan de RMS-waarde en ca. 5% is meer dan 2 maal zo groot. Enige berekeningen zijn uitgevoerd met een eenvoudig model, bestaande uit een massa-veersysteem met slechts een wiel. De golflengten, waarbij invloed op de bandkrachtvariatie optreedt, liggen van 0,3 tot 20 m, voor comfort tussen 0,7 en 40 m (Tabel 4 en 5). Opgemerkt wordt dat de (toen) bestaande meetmethoden weinig geschikt waren om golfvorming op te sporen.

Sinha (1973) beschreef mathematische modellen om de wegligging van een voertuig op een oneffen weg te bepalen. Kenmerkend voor het contact tussen band en weg zijn amplitude en golflengte (frequentie) van het wegdek, en bij het voertuig de veer- en dempingseigenschappen van band en ophanging, en de geometrie van de wielophanging. Uit studie van literatuur blijkt dat overwegend RMS-waarden en vermogensdichtheid als criteria worden gebruikt (o.m. in Fiala, 1967, zie hierboven). Uit een geciteerd werk blijkt dat de wegligging het meeste wordt aangetast bij frequenties van 0,7 tot 1,2 Hz als gevolg van de afgeveerde massa - de carrosserie - en van 7 tot 25 Hz als gevolg van de onafgeveerde massa - de assen. Uit een aantal andere studies worden aanbevelingen gehaald voor afstemming van schokdempers en ophangingsparameters. De resonantiefrequentie van de carrosserie blijkt 0,5 tot 2 Hz te bedragen, voor assen van 8 tot 12 Hz. De mathematische modellen zijn ontwikkeld voor simulatie met behulp van een analoge computer. Het eenvoudige model bestaat uit een as en een wiel, het uitgebreide uit twee assen, twee wielen en een bestuurder. De weg wordt sinusvormig opgevat, met wisselende amplitude en golflengte. Als voertuig is een Amerikaanse stationcar met bouwjaar 1963 gekozen, met een massa van maar liefst 1900 kg, bijna twee maal zo veel als de gemiddelde Europese auto. Vermoedelijk is

dit voertuig zeer week geveerd en gedempt. De invloed van wegoneffenheden op de dynamische bandkrachtvariatie wordt getoond in Afbeelding 9. Hierin worden de frequentieresponsiecurven weergegeven van voor- en achteras voor vier verschillende wegamplituden. In elke curve zijn twee pieken waarneembaar, een carrosserieresonantie bij ca. 1,5 Hz en een asresonantie bij ca. 12 Hz voor en 10 Hz achter. Deze piekwaarden nemen lineair toe met de weg-amplitude. Sinha formuleert een Road Holding Index $R(i)$: de verhouding tussen de gemiddelde waarde van de effectieve bandkracht en de statische bandkracht. Deze index geeft aan welk deel van de statische bandkracht gebruikt kan worden bij het remmen op een gegeven weg. In Afbeelding 10 is weergegeven bij welke golflengten, amplituden en snelheden $R(i)$ een bepaalde waarde onderschreden wordt (gearceerd gedeelte). Dit is dan aan te merken als een ongunstige situatie. Te zien is dat de keuze van de waarde van $R(i)$ een grote invloed heeft. De door Sinha voor de wegligging relevant geachte golflengtebereiken worden getoond in Tabel 6 en voor comfort in Tabel 7. De voor de wegligging belangrijke golflengten liggen tussen 0,5 en 20 m. Amplituden van 0,02 m en hoger verslechteren de wegligging aanzienlijk doordat resonantie van assen optreedt. In Nederland wordt de langsvlaktheid gemeten met een Frans apparaat, de APL (zie verder Geerts, 1983). Uit deze metingen wordt een langsvlakheidsindex (LEI) berekend. De actiegrens voor wegonderhoud ligt bij een LEI van 2,5. Een indruk van deze LEI-waarden voor Rijkswegen geeft Afbeelding 11.

Deze LEI-waarden zijn uitsluitend gebaseerd op comfortoverwegingen en geven geen goede indicatie voor het contact tussen band en wegdek en dus de verkeersveiligheid. Er is geen onderzoek bekend naar de invloed van golven op het contact tussen band en wegdek bij natte wegdekken.

4.6. De toelaatbare mate van schade

In Wambold e.a. (1984) wordt een onderzoek beschreven naar de invloed van gaten in het wegdek op de bestuurbaarheid van voertuigen. Gaten tot 0,9 m lang en 0,175 m diep (!) hadden geen invloed op de stabiliteit, d.w.z. het voertuig week bij doorrijden niet van zijn baan af. Wel was de mogelijkheid van velgbeschadigingen en klapbanden aanwezig. Bij veldexperimenten en computersimulaties zijn de veiligheidsmarges bepaald door het inveren van diverse asophangingssystemen bij het rijden door gaten te combineren met bandvervormingseffecten. Het resultaat is weergegeven in Afbeelding 12. De langsdoorsnede van de gaten is rechthoekig aangenomen. Dit komt weliswaar zelden voor, maar zal de meest kritische situatie opleveren. Te zien is de

lengte en diepte van een dergelijk gat, waarbij nog met een bepaalde snelheid doorheen gereden kan worden. (Mini compact = kleine Europese wagen, zoals de Japanse Honda Civic bijvoorbeeld). De toelaatbare diepte van het gat zal sterk samenhangen met de bandafmetingen (diameter) en de voertuiggrootte. Gesteld kan worden dat gaten dieper dan ca. 3,2 inch = ca. 80 mm niet meer veilig zijn en dieper dan 5,3 inch = ca. 130 mm beslist onveilig zijn. De "veiligheids"lengte hangt samen met de gereden snelheid. Omdat waar hard gereden kan worden, ook langzaam gereden kan worden, zal een gat niet langer mogen zijn dan ca. 30 inch = 0,75 m. Overigens zullen gaten eerder een gevaar vormen doordat bestuurders uitwijkpogingen ondernemen of proberen te remmen. Op Rijkswegen komen gaten zelden voor: zij worden zo snel mogelijk gerepareerd.

5. DISCUSSIE

De toelaatbare diepte van rijsporen - waarbij geen aquaplaning zal optreden - is behandeld aan de hand van een rekenmodel. Belangrijk hierbij is de keuze van een maatgevende regenintensiteit. Deze heeft namelijk een aanzienlijke invloed op de berekende waterlaagdikten (zie Tabel 2 en 3). Een tweede factor is de gebruikte formule van Gallaway. Deze is in het laboratorium beproefd tot afstrooilenngtes van 9 meter, zodat toepassing van deze formule op drie- en vierstrooks rijbanen niet-getoetste resultaten oplevert. Daarnaast houdt deze formule geen rekening met opstuwng door wind. Onder ongunstige omstandigheden kan dit een fikse toename van de waterlaagdikte teweeg brengen. Verder houdt de formule geen rekening met drainerende oppervlaktematerialen, zoals zeer open asfaltbeton. Het gebruik van een andere of gecorrigeerde formule zal echter geen gevolg hebben voor de logische gang binnen het rekenmodel. Met dit rekenmodel is het mogelijk, eventueel na bijstelling en andere keuzen voor de randvoorwaarden, voor iedere situatie apart te bepalen welke rijspoordiepte uit veiligheidsoverwegingen toelaatbaar kan worden geacht. Veel meer voor de hand liggend is het ontwikkelen van een algemene richtlijn voor de rijspoordiepte aan de hand van de meest relevante manoeuvres (remmen en ontwijken) en wegsituaties en uiteraard aan de hand van meer overwegingen dan veiligheid alleen. De huidige norm ligt op 20 mm, Welleman (1977) adviseerde 13 mm. De in par. 4.4. gepleegde exercitie toont aan dat 20 mm teveel zal zijn. Afhankelijk van de situatie (rechter bocht, recht weggedeelte, linker bocht) zullen lagere tot zeer veel lagere waarden gehanteerd moeten worden. Geometrie en plaats van het rijspoor in de weg zullen ook van belang zijn. Met name bij uit het spoor komen zal ook de dwarshelling van het rijspoor een rol kunnen spelen. Zonder nader onderzoek is het niet mogelijk een goed gefundeerde uitspraak te doen over toelaatbare rijspoordiepte, temeer daar bijstelling der norm grote implicaties heeft voor het wegonderhoud.

De toelaatbare mate van golven - ook bij nat wegdek - is nog onvoldoende onderzocht. Maatgevend zal òf een lichte Europese personenauto moeten zijn, omdat deze het meeste last zullen hebben van golven door de geringe eigen demping door geringe massa, en een zeer veel voorkomend voertuig is, òf een bijna lege vrachtwagen. Een slecht comfort zal slechts gedeeltelijk waarschuwen voor excessieve golven. De maatgevende golflengten hiervoor liggen een bereik verder (0,7 - 40 m) dan de voor wegligging maatgevende golflengten (0,3 - 20m). Een indicatie voor maximale amplitude, 0,02 m, is gegeven

voor zware voertuigen (1900 kg) met waarschijnlijk weke vering en biedt weinig inzicht in de toelaatbare maximale amplitude voor kleine voertuigen. Bovendien zal dit samenhangen met de golflengte.

De toelaatbare mate van gaten vormt op Rijkswegen een zeer ondergeschikt probleem.

Combinatie van rijsporen en golven levert verdergaande problemen op: De gezamenlijke invloed zal het contact tussen band en wegdek verder verslechteren. Te verwachten is dat door golven plasvorming in de rijsporen optreedt. Voertuigen kunnen daarbij mogelijk een éézijdige krachting bij rijden door de plas ondervinden waardoor de stabiliteit ongunstig wordt beïnvloed. Richtlijnen voor rijsporen en voor golfvorming kunnen dan ook niet los van elkaar worden gezien: zij zullen minder speelruimte toelaten dan aparte richtlijnen alleen.

Min of meer als nevenprodukt kan een advies over bandprofiel diepte gegeven worden: het verdient aanbeveling de wettelijke minimum profiel diepte te verhogen van 1 naar minimaal 1,6 mm en liefst naar 2 mm.

Uit een onderzoek van Cooper e.a. (1980) blijkt dat het plegen van onderhoud aan een weg - vlakmaken door herprofilieren - een verwaarloosbare verhoging van de gemiddelde snelheid met zich meebrengt.

Een kanttekening: Wegen met gemengd verkeer en wegen binnen de bebouwde kom zullen in dit project voorlopig niet aan de orde worden gesteld. Aanbevelingen uit dit project zullen misschien ook gebruikt kunnen worden voor sommige wegen van lagere orde. Er zijn nu bijna geen onderbouwde richtlijnen voor deze wegen voorhanden. Juist op wegen met gemengd verkeer gebeuren veel ongevallen. Een deel hiervan zou mede te wijten kunnen zijn aan slechte wegdekken, die naar verwachting juist op deze wegen veel voor zullen komen. Het gedrag van langzaam verkeer en langsrijdend snelverkeer op smalle wegen met slecht wegdek is een speciale verkeersveiligheidsproblematiek. Aanbevelingen, gedaan voor wegen zonder gemengd verkeer, zouden mogelijk op wegen met gemengd verkeer averechts kunnen werken.

6. AANBEVELINGEN VOOR NADER ONDERZOEK

De geraadpleegde literatuur biedt te weinig materiaal om een voldoende inzicht te bieden in de relatie tussen wegdekschade en verkeersveiligheid. Ten eerste is onderzoek nodig naar het verband tussen rijsporen, golven en ongevallen, vooral bij nat wegdek. Ten tweede naar het rijgedrag van automobilisten bij rijsporen en golven. En ten derde is aanvulling gewenst van de kennis over het contact tussen band en wegdek bij rijsporen en golven.

Over het contact tussen band en wegdek bij rijsporen en water op de weg is in het voorgaande al een en ander beschreven. Het gepresenteerde rekenmodel zou op een aantal punten nog verfijnd kunnen worden, onder andere ten aanzien van het gebruik van zeer open asfalt beton.

Veel belangrijker is het echter de aandacht te richten op golven, omdat hier zeer weinig over bekend is. Onderzoek zal gedaan moeten worden naar de relatie tussen voertuiggedrag en golven voor maatgevende typen voertuigen (bijvoorbeeld lichte personenauto's; vrachtwagens) bij nat wegdek. De daarbij optredende bandkrachtvariaties kunnen vergeleken worden met de bovengenoemde noodzakelijke wrijvingscoëfficiënten als referentie.

Naar gaten lijkt geen nader onderzoek gewenst: snelle reparatie is de meest effectieve methode.

Tenslotte is uitbreiding van het onderzoek gewenst naar andere dan Rijkswegen.

GERAADPLEEGDE LITERATUUR

Agrawall, S.K.; Henry, J.J. (1977) Technique for evaluating hydroplaning potential of pavements. Transportation Research Record 633, 1977.

Bathelt, H (1973) Die Berechnung des Aquaplaning-Verhaltens von glatten und profilierten Reifen. Automobil Technische Zeitschrift 75 (1973) 10: 368-374.

Cooper, D.R.C.; Jordan, P.G.; Young, J.C. (1978) Road surface irregularity and vehicle ride, Part 1. TRRL Supplementary Report 341. Transport and Road Research Laboratory, 1978.

Cooper, D.R.C.; Young, J.C. (1978) Road surface irregularity and vehicle ride, Part 2. TRRL Supplementary Report 400. Transport and Road Research Laboratory, 1978.

Cooper, D.R.C.; Young, J.C. (1980) Road surface irregularity and vehicle ride, Part 3. TRRL Supplementary Report 560. Transport and Road Research Laboratory, 1980.

Cooper, D.R.C.; Jordan, P.G.; Young, J.C. (1980) The effect on traffic speed of re-surfacing a road. TRRL Supplementary Report 571. Transport and Road Research Laboratory, 1980.

Dijks, A. (1973) Versuche über die Kleinstzulässige Profiltiefe von Personenwagenreifen. Automobil Technische Zeitschrift 75 (1973) 1: 1-6.

Dijks, A. (1974) A multifactor examination of wet skid resistance of car tires. SAE-paper 741106. Society of Automotive Engineers, 1974.

Fiala, F. (1967) Strassenwelligkeit, Fahrkomfort und Radlastschwankungen. Strasse und Autobahn 18 (1967) 2: 37-45.

Gallaway, B.M. e.a. (1972) The relative effects of several factors affecting rainwater depths on pavements surfaces. Highway Research Record 396, 1972.

Gabriel, B. (1984) Die Ausbildung von Spurrinnen als Parameter zur Beurteilung des Fahrbahnzustandes. Die Asphaltstrasse (1984) 1: 46-49.

- Geerts, J.H. (1983) Het meten en waarden van het wegprofiel in rijrichting. *Wegen* 57 (1983) 3: 80-87.
- Helms, H. (1982) Vibrations of four-wheel motor vehicles due to uneven road surface. In: *The Dynamics of Vehicles. Proceedings 7th IAVSD-Symposium*, Cambridge, 1981. Swets & Zeitlinger, 1982.
- Martinez, J.E. e.a. (1972) A study of variables associated with wheel spin down and hydroplaning. *Highway Research Record* 396, 1972.
- Mitschke, M. (1972) *Dynamik der Kraftfahrzeuge*. Springer Verlag, 1972.
- Rohlfs, R. (1984) Ontstaan van afwateringsproblemen. *PT/Civiele Techniek* 39 (1984) 6: 29-32.
- Rohlfs, R; Gerardu, J.J.A.; Van Zwieten, J. (1984) Voorkomen en oplossen van afwateringsproblemen. *PT/Civiele Techniek* 39 (1984) 7/8 : 32-36.
- RONA (1980) *Categorie-indeling voor wegen buiten de bebouwde kom. Voorlopige richtlijnen*. Commissie RONA, 1980.
- Sakai, H. e.a. (1978) The effect of hydroplaning on the dynamic characteristics of car, truck and bus tires. SAE-paper 780195. Society of Automotive Engineers, 1978.
- Schilling, H. (1977) Das Aquaplaning-Verhalten von Winterreifen verschiedener Profiltiefe. *Automobil Technische Zeitschrift* 79 (1977) 10: 431-435.
- Sinha, B.P. (1973) Influence of road unevenness on road holding and ride comfort. Rapport 28. Statens Väg- och Trafikinstitut, Stockholm, 1973.
- Staughton, G.C. (1970) The effect of tread pattern depth on skidding resistance. RRL Laboratory Report 323. Road Research Laboratory, 1970.
- SWOV (1973) *Verkeersongevallen en wegdekstroefheden: een onderzoek naar de statistische relatie tussen de stroefheid van het wegdek en de relatieve onveiligheid*. Researchrapport van de Subcommissie V van de Werkgroep banden, wegdekken en slipongevallen. R-73-5 A + B. Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV, 1973.

SWOV (1979) Profieldiepte van personenautobanden. Publikatie 1979-1N.
Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV, 1979.

SWOV (1984) (Tromp, J.P.M.) Wegdekstroefheid en verkeersongevallen. Rapport
R-84-19. Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV,
1984.

TRB (1984) The influence of roadway surface discontinuities on safety.
Transportation Research Board, National Research Council, 1984.

Wambold, J.C. e.a. (1984) Rougness, holes and bumps. In: TRB (1984).

Welleman, A.G. (1977) Water op de Weg. SCW-publikatie L. Stichting Studie
Centrum Wegenbouw, 1977.

AANBEVOLEN LITERATUUR

- Blaauw, G.J.; Godthelp, J. (1977). De invloed van het type wegdek op het rijgedrag van motorrijders. Rapport IZF-TNO 1977-C9. Instituut voor Zintuigfysiologie-TNO, Soesterberg 1977.
- Brevoord, G.A. (1984). Werken op autosnelwegen. In: Wegencongres 1984 'Beheer en onderhoud van wegen en straten' Vereniging "Het Nederlandse Wegencongres", Den Haag, 1984.
- Brouwers, J.A.C.Th. (1983). De weg. In: Wegencongres 1983 "Wegen, verkeer en zwa(arde)re voertuigen". Vereniging "Het Nederlandse Wegencongres", Den Haag, 1983.
- Geerts, J.H.; Tolman, T.R.G.; Van Wieringen, J.B.M. (1984). Beslismodel voor verhardingsonderhoud. *Wegen* 58 (1984) 9: 282-289.
- Hoitink, G.J.H.; Molenaar, A.A.A. (1984). Systemen voor wegbeheer. In: Wegencongres 1984 "Beheer en onderhoud van wegen en straten". Vereniging "Het Nederlandse Wegencongres", Den Haag, 1984.
- Houweninge, G. van (1984). Beheer en onderhoud van wegen bij de Rijksoverheid. In: Wegencongres 1984 "Beheer en onderhoud van wegen en straten". Vereniging "Het Nederlandse Wegencongres", Den Haag, 1984.
- Ivey, D.L.; Mounce, J.M. (1984). Water accumulations. In: TRB (1984).
- Martinez, J.E. (1977). Effects of Pavement Grooving on Friction, Braking and Vehicle Control. *Transportation Research Record* 633, 1977.
- Post, T.M.; Bernard, J.E. (1976). Response of Vehicles to Pavement Undulations. Highway Safety Research Institute, Michigan, 1976.
- Ryba, D. (1984). Vibration Isolation, Analysis and Experiments. In: Delft Progress Report 7 (1982) 3/4: 241-260.
- Rijkswaterstaat (1977). De rijspoormeter RWL-Wegwijzer 1-1977.
- Rijkswaterstaat (1982a). De stroefheidsmeter. WBD-Wegwijzer 6-1982.

Rijkswaterstaat (1982b). Perspectief voor wegonderhoud. Eindrapportage Projectgroep Rationeel Wegonderhoud. Maart 1982.

Rijkswaterstaat (1983). Perspectief voor wegonderhoud. Interimrapportage Project Rationeel Wegonderhoud. November 1983.

SCW (1977). Wegwijs in wegbeheer. SCW-publicatie K. Stichting Studie Centrum Wegenbouw, 1977.

SCW (1980). Spoor- en ribbelforming. SCW-mededeling 48. Stichting Studie Centrum Wegenbouw, 1980.

Stoughton, R.L. e.a. (1979). Effects of Longitudinal Edge of Paved Surface Dropp-offs on Vehicle Stability. Transportation Research Record 703, 1979.

Wildervanck, C. (1982). Met de motor overweg. Verslag Verkeerstechnische Leergangen ANWB 1982.

Zipkes, E (1983). Über das Leistungsvermögen einer Strassenoberfläche und ihres Angebotes im Adhäsionsbereich. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik (1982) 2: 45-53.

Zwaan, J.A. e.a. (1976). Beweging van motorrijwielen verstoord door weg-regularmatigheden. LVT-rapport 104. Laboratorium voor Voertuigtechniek, Technische Hogeschool Delft, 1976.

AFBEELDINGEN 1 T/M 12

Afbeelding 1. Relatie tussen aquaplaningsnelheid en waterlaagdikte (boven textuurtoppen) (Bron: Agrawall & Henry, 1977).

Afbeelding 2. Verlieskental van radiaalbanden (Bron: Dijks, 1973).

Afbeelding 3. Relatie tussen rijsnelheid, waterlaagdikte (boven textuurtoppen) en "locked braking force" coëfficiënt (Bron: Sakai et al., 1978).

Afbeelding 4. Relatie tussen rijsnelheid, waterlaagdikte (boven textuurtoppen) en "cornering force"-coëfficiënt (Bron: Sakai et al., 1978).

Afbeelding 5. Langskrachtcoëfficiënt μ_x als functie van waterlaagdikte bij verschillende rijsnelheden (Bron: Welleman, 1977).

Afbeelding 6. Kans op voorkomen van een regenintensiteit I gedurende een aaneengesloten periode t^* (Bron: Welleman, 1977, naar gegevens KNMI).

Afbeelding 7. Extra waterlaagdikte d_R als functie van de dwarshelling S_d (Bron: Welleman, 1977).

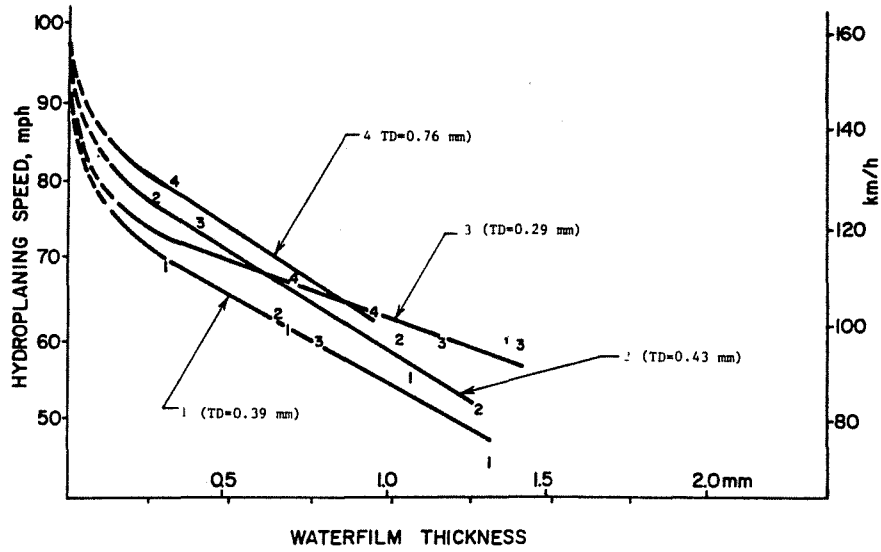
Afbeelding 8. Rijspoordiepten in Nederland (meting Wegbouwkundige Dienst WBD/RWS, 1983/1984).

Afbeelding 9. Relatie tussen amplitude, frequentie en de dynamische bandkracht voor voor- en achterassen (Bron: Sinha, 1973).

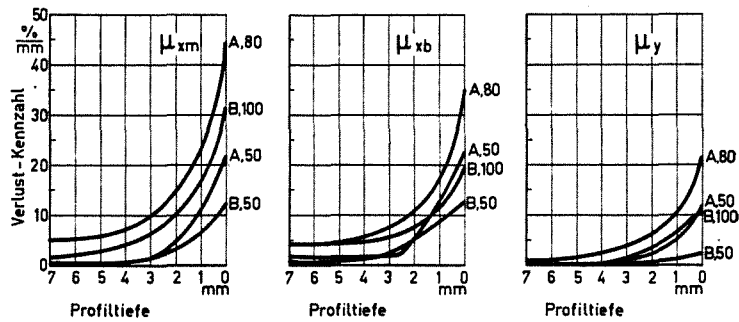
Afbeelding 10. Relatie tussen verschillende Road Holding Index R_i met amplitude, frequentie en rijsnelheid (Bron: Sinha, 1973).

Afbeelding 11. Langsvlakheidsindex LEI op Rijkswegen (meting Wegbouwkundige Dienst WBD/RWS, 1983/1984).

Afbeelding 12. Relatie tussen gat lengte en -diepte en rijsnelheden met verschillende voertuigcategorieën (Bron: Wambold et al., 1984).



Afbeelding 1. Relatie tussen aquaplaningsnelheid en waterlaagdikte (boven textuurtoppen) (Bron: Agrawal & Henry, 1977).



μ_{xm} = maximale wrijvingscoëfficiënt in langsrichting

μ_{xb} = wrijvingscoëfficiënt in langsrichting bij geblokkeerd wiel

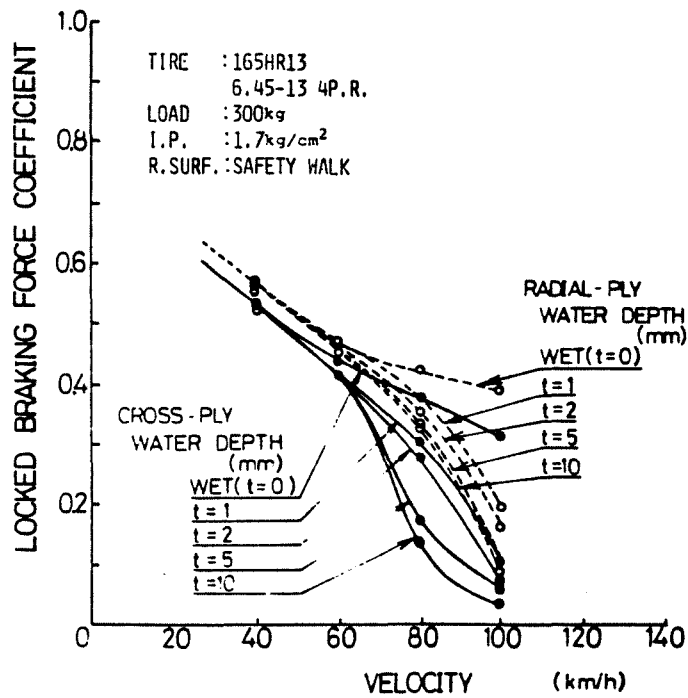
μ_y = wrijvingscoëfficiënt in dwarsrichting

A = asfaltbeton

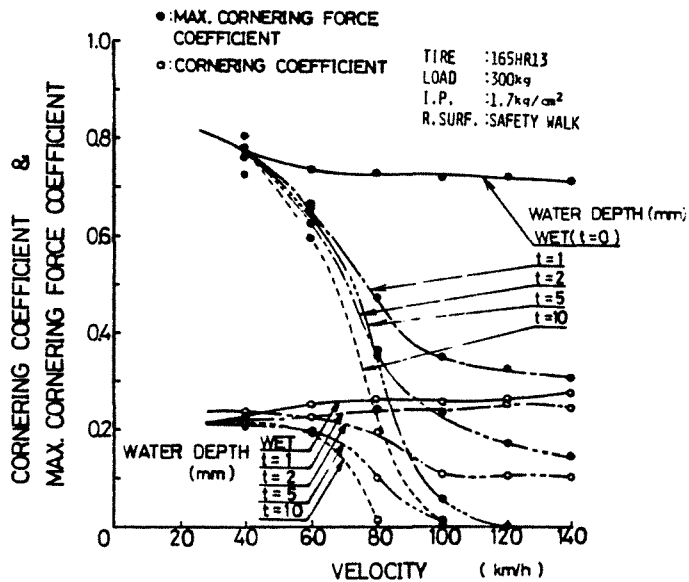
B = cementbeton

50, 80, 100 = snelheid in km

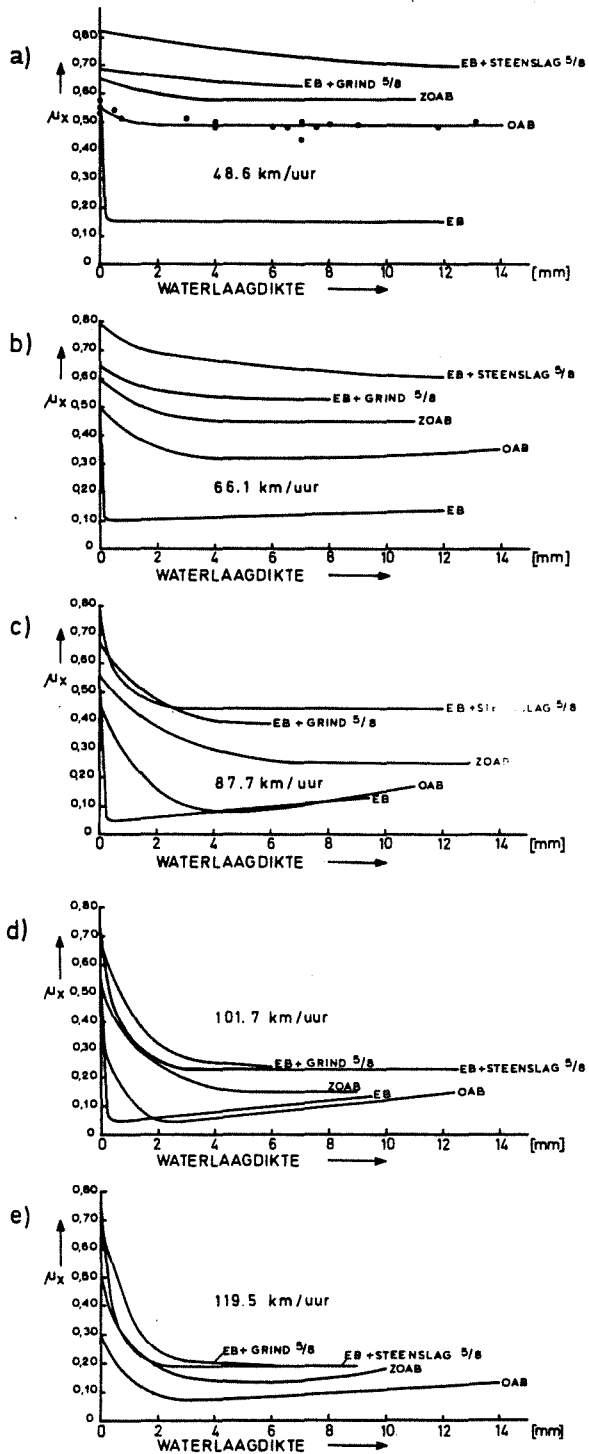
Afbeelding 2. Verlieskental van radiaalbanden (Bron: Dijks, 1973).



Afbeelding 3. Relatie tussen rijsnelheid, waterlaagdikte (boven textuurtoppen) en "locked braking force" coëfficiënt (Bron: Sakai et al., 1978).

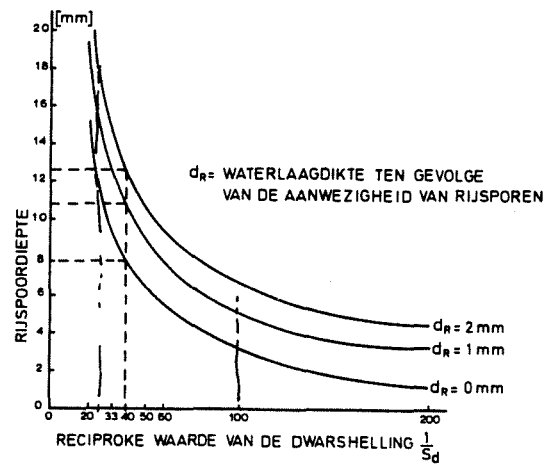
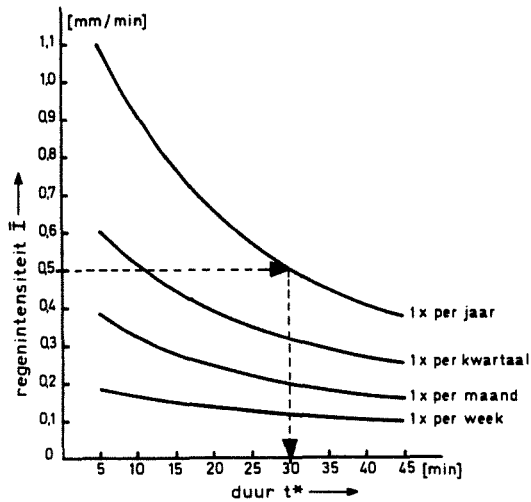


Afbeelding 4. Relatie tussen rijsnelheid, waterlaagdikte (boven textuurtoppen) en "cornering force"-coëfficiënt (Bron: Sakai et al., 1978).



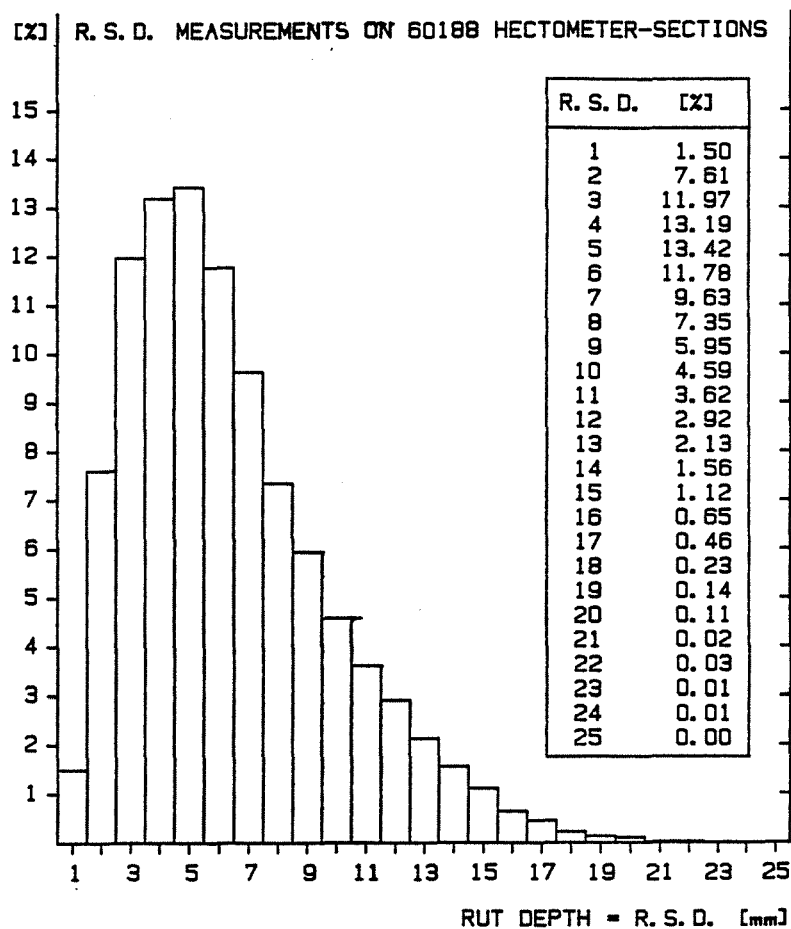
EB = epoxybitumen
 ZOAB = zeer open asfaltbeton
 OAB = open asfaltbeton

Afbeelding 5. Langskrachtcoëfficiënt μ_x als functie van waterlaagdikte bij verschillende rij snelheden (Bron: Welleman, 1977).

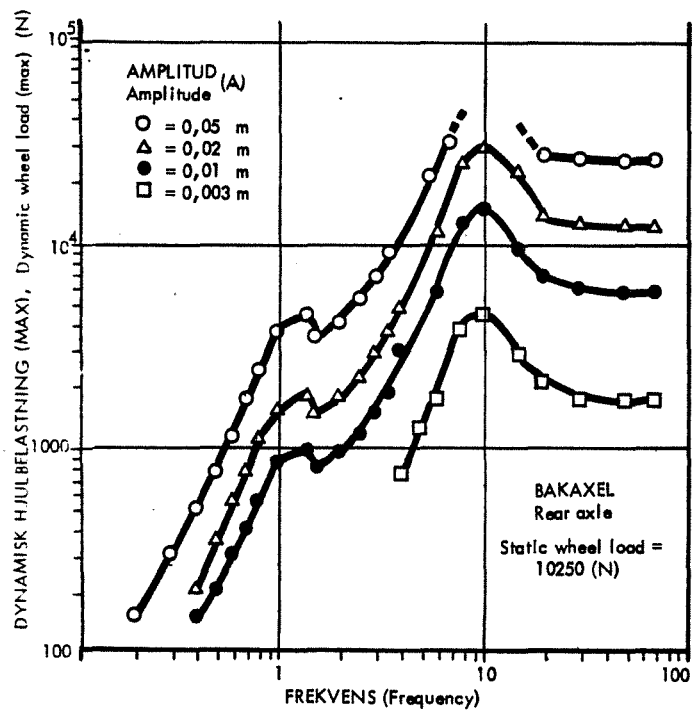
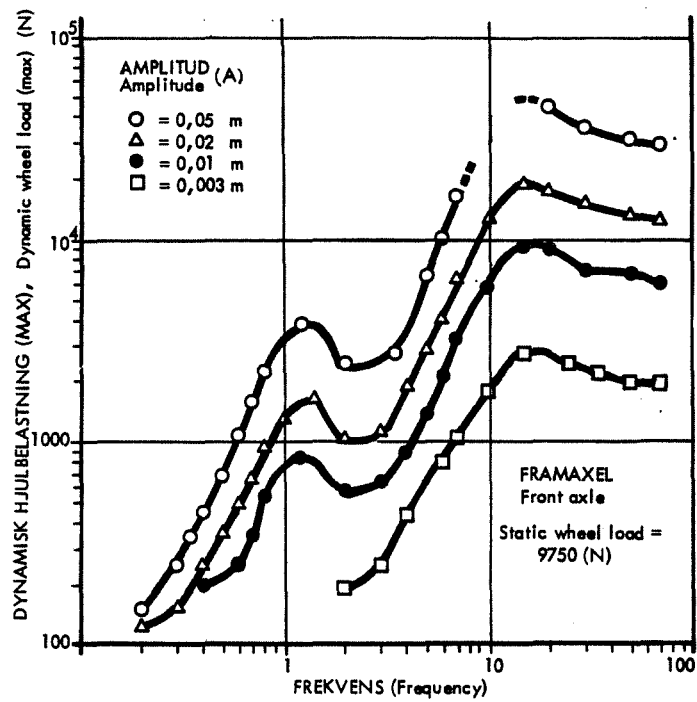


Afbeelding 6. Kans op voorkomen van een regenintensiteit I gedurende een aaneengesloten periode t^* (Bron: Weleman, 1977, naar gegevens KNMI).

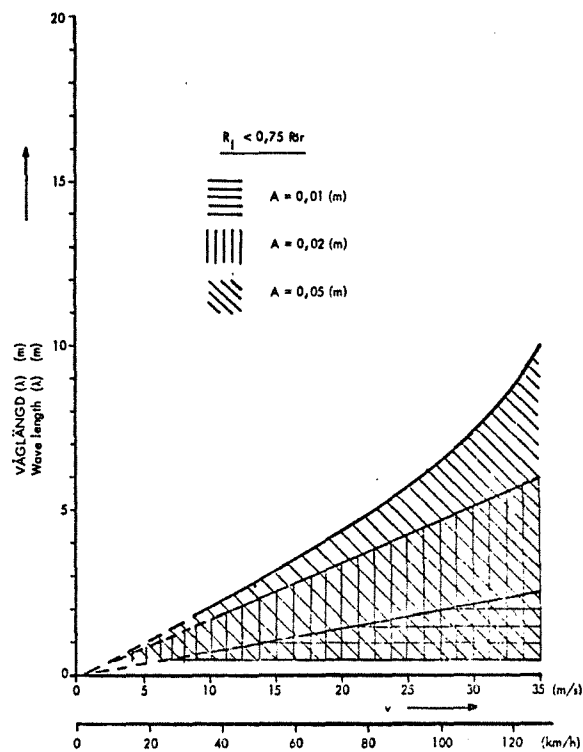
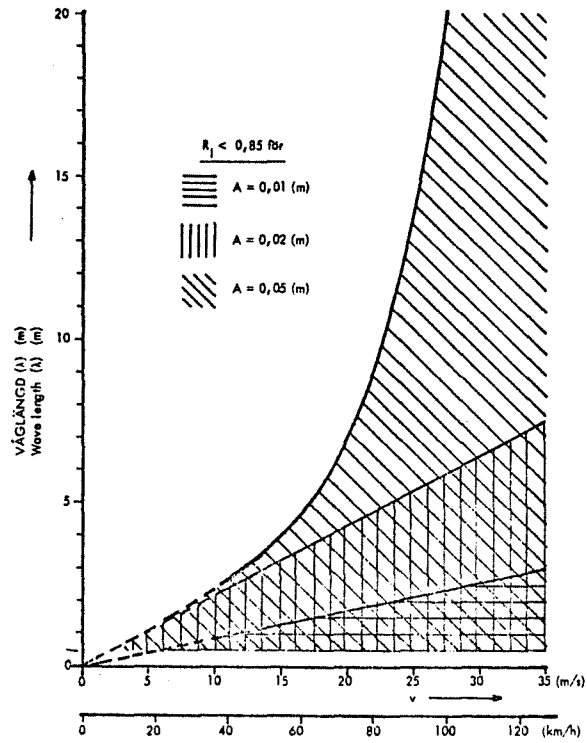
Afbeelding 7. Extra waterlaagdikte d_R als functie van de dwarselling S_d (Bron: Welleman, 1977).



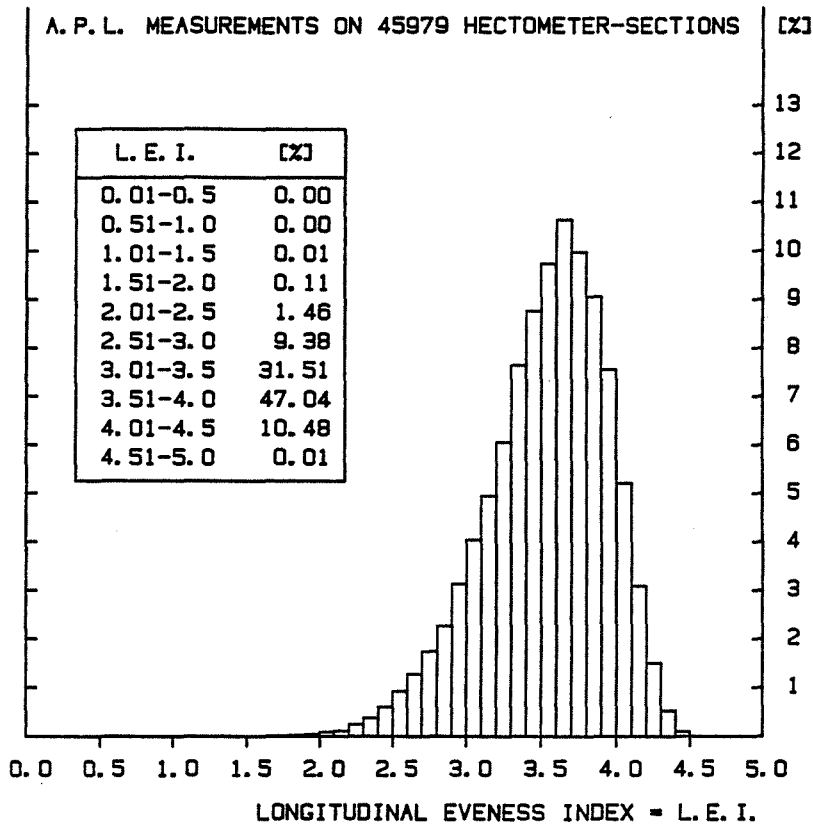
Afbeelding 8. Rijspoordiepten in Nederland (meting Wegbouwkundige Dienst WBD/RWS, 1983/1984).



Afbeelding 9. Relatie tussen amplitude, frequentie en de dynamische bandkracht voor voor- en achterassen (Bron: Sinha, 1973).

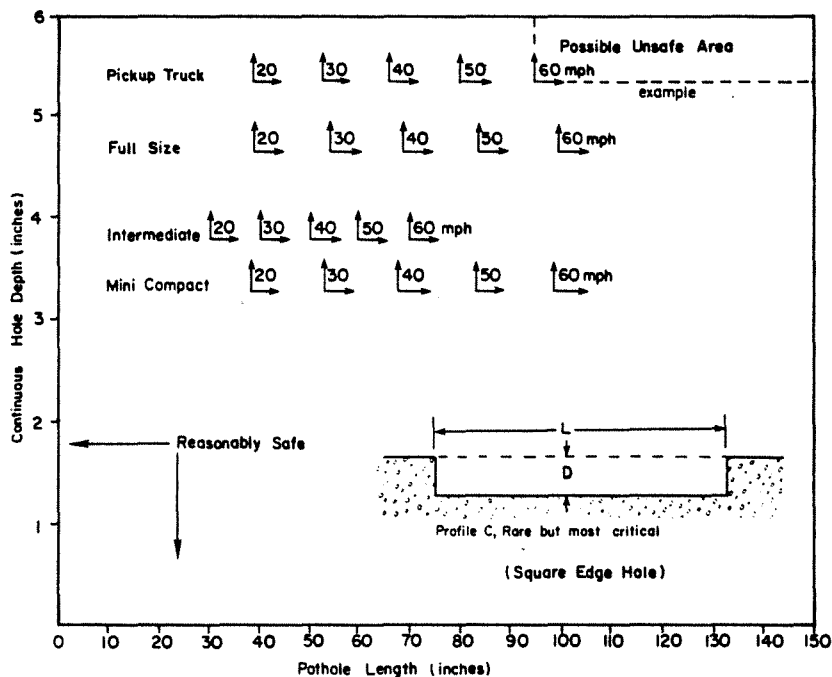


Afbeelding 10. Relatie tussen verschillende Road Holding Index R_1 met amplitude, frequentie en rijsnelheid (Bron: Sinha, 1973).



LEI = 0 : zeer slecht; 2,5 = actiegrens; 5 = zeer goed

Afbeelding 11. Langsvlakheidsindex LEI op Rijkswegen (meting Wegbouwkundige Dienst WBD/RWS, 1983/1984).



Afbeelding 12. Relatie tussen gatlengthe en -diepte en rijksnelheden met verschillende voertuigcategorieën (Bron: Wambold et al., 1984).

TABELLEN 1 T/M 7

Tabel 1. Overzicht van de textuurdiepte van een aantal verhardingsoppervlakken (Bron: Welleman, 1977).

Tabel 2. Berekende waterlaagdikten op wegen met een textuurdiepte van 0,5 mm bij buien van resp. 0,2, 0,4 en 0,6 mm/ minuut.

Tabel 3. Berekende waterlaagdikten op wegen met een textuurdiepte van 1,0 mm bij buien van resp. 0,2, 0,4 en 0,6 mm/ minuut.

Tabel 4. Effect van golflengte λ op bandkrachtvariaties voor verscheidene rij snelheden (Bron: Fiala, 1967).

Tabel 5. Effect van golflengte λ op rijcomfort voor verscheidene snelheden (Bron: Fiala, 1967).

Tabel 6. Golflengten λ bij amplituden A van belang voor wegligging R_I (Bron: Sinha, 1973).

Tabel 7. Golflengten λ bij amplituden A van belang voor rijcomfort K (Bron: Sinha, 1973).

Toplaag van de verharding	Textuurdiepte in mm
Slembehandeling	0,2
Grof dicht asfaltbeton	0,3 - 0,7
Open asfaltbeton	0,6 - 1,3
Oppervlaktebehandeling op teer- of bitumenbasis:2/5	0,5 - 1,1
:5/8	0,6 - 2,3
Oppervlaktebehandeling op kunstharsbasis:3/5	1,7 - 2,8
:5/8	3,3 - 4,2

Tabel 1. Overzicht van de textuurdiepte van een aantal verhardingsoppervlakken (Bron: Welleman, 1977).

$I = 0,2 \times 60 = 12$		$TD = 0,5$			
L =	3 m	7,5 m	11 m	15 m	
S = 0,01	- 0,40	0,48	0,66	0,82	
S = 0,02	- 0,005	0,23	0,37	0,49	
S = 0,025		0,17	0,29	0,40	
S = 0,03		0,12	0,23	0,33	
S = 0,04		0,05	0,15	0,24	
S = 0,05		0	0,09	0,17	

$I = 0,4 \times 60 = 24$		$TD = 0,5$			
L =	3 m	7,5 m	11 m	15 m	
S = 0,01	0,50	0,98	1,24	1,49	
S = 0,02	0,25	0,61	0,80	0,99	
S = 0,025	0,18	0,51	0,69	0,86	
S = 0,03	0,13	0,43	0,60	0,76	
S = 0,04	0,06	0,33	0,47	0,61	

$I = 0,6 \times 60 = 36$		$TD = 0,5$			
L =	3 m	7,5 m	11 m	15 m	
S = 0,01	0,7	1,38	1,71	2,03	
S = 0,02	0,45	0,90	1,15	1,39	
S = 0,025	0,36	0,78	1,01	1,22	
S = 0,03	0,30	0,68	0,90	1,09	
S = 0,04	0,21	0,55	0,74	0,91	

Tabel 2. Berekende waterlaagdikten op wegen met een textuurdiepte van 0,5 mm bij buien van resp. 0,2, 0,4 en 0,6 mm/ minuut

I = 0,2 x 60 = 12		TD = 1,0		
L =	3	7,5	11	15
S = 0,01	-0,29	0,06	0,25	0,43
S = 0,02	-0,47	-0,21	-0,07	0,07
S = 0,025	-0,03			
I = 0,4 x 60 = 24		TD = 1,0		
L =	3	7,5	11	15
S = 0,01	0,08	0,60	0,88	1,15
S = 0,02	-0,20	0,19	0,41	0,61
S = 0,025		0,09	0,28	0,46
S = 0,03		0,01	0,19	0,36
S = 0,04			0,05	0,20
I = 0,6 x 60 = 36		TD = 1,0		
L =	3	7,5	11	15
S = 0,01	0,37	1,03	1,39	1,73
S = 0,02	0,02	0,51	0,79	1,04
S = 0,025		0,38	0,63	0,86
S = 0,03		0,28	0,51	0,72
S = 0,04		0,13	0,33	0,53

Tabel 3. Berekende waterlaagdikten op wegen met een textuurdiepte van 1,0 mm bij buien van resp. 0,2, 0,4 en 0,6 mm/ minuut.

Frequentie (Hz)	∞ -50	50-20	20-5	5-2	2-0
Rijsnelheid (km/uur)(m)		λ (m)	λ (m)	λ (m)	λ (m)
v = 50	0-0,28	0,28-0,7	0,7-2,8	2,8-7,0	7,0- ∞
v = 100	0-0,56	0,56-1,4	1,4-5,6	5,6-14,0	14,0- ∞
v = 150	0-0,84	0,84-2,1	2,1-8,4	8,4-21,0	21,0- ∞
Effect op bandkrachtvariatië	verwaarloosbaar	gemiddeld	groot	gemiddeld	verwaarloosbaar

Tabel 4. Effect van golflengte λ op bandkrachtvariatië voor verscheidene rijsnelheden (Bron: Fiala,

Frequentie (Hz)	∞ -20	20-10	10-2	2-1	1-0
Rijsnelheid (km/uur)	λ (m)	λ (m)	λ (m)	λ (m)	λ (m)
v = 50	0-0,7	0,7-1,4	1,4-7,0	7-14	14- ∞
v = 100	0-1,4	1,4-2,8	2,8-14,0	14-28	28- ∞
v = 150	0-2,1	2,1-4,2	4,2-21,0	21-42	42- ∞
Effect op rijcomfort	verwaarloosbaar	middel sterk	sterk	middel sterk	verwaarloosbaar

Tabel 5. Effect van golflengte λ op rijcomfort voor verscheidene snelheden (Bron: Fiala, 1967).

Rijsnel- heid (km/uur)	Road holding index $R_I = 0,75$			Road holding index $R_I = 0,85$		
	$A = \pm 0,01$ λ (m)	$A = \pm 0,02$ λ (m)	$A = \pm 0,05$ λ (m)	$A = \pm 0,01$ λ (m)	$A = \pm 0,02$ λ (m)	$A = \pm 0,05$ λ (m)
v = 50	0,5-1,0	0,5-2,5	0,5-3,0	0,5-1,25	0,5-3,0	0,5-3,5
v = 70	0,5-1,5	0,5-3,5	0,5-4,25	0,5-1,75	0,5-4,25	0,5-6,5
v = 90	0,5-1,75	0,5-4,0	0,5-5,5	0,5-2,25	0,5-5,5	0,5-13,5
v = 110	0,5-2,25	0,5-5,25	0,5-7,5	0,5-2,75	0,5-6,5	0,5-20,0

Tabel 6. Golflengten λ bij amplituden A van belang voor wegligging R_I
(Bron: Sinha, 1973).

Rijsnel- heid (km/uur)	Acceptabele comfort index K = 3		Acceptabele comfort index K = 10	
	$A = \pm 0,003$ λ (m)	$A = \pm 0,05$ λ (m)	$A = \pm 0,003$ λ (m)	$A = \pm 0,05$ λ (m)
v = 50	1,5 - 12,5	0,75 - 40	All investigated wave lengths ranging in between 0,5 and 100 (m) have been found to be comfortable	0,75 - 24
v = 70	2,0 - 17,5	1,0 - 56		1 - 34
v = 90	2,75 - 22,5	1,25 - 72		1,25 - 44
v = 110	3,25 - 27,5	1,5 - 89		1,5 - 54

Tabel 7. Golflengten λ bij amplituden A van belang voor rijcomfort K
(Bron: Sinha, 1973).