

Diesrede

"Voertuig in beweging"

prof.dr.ir. H.B. Pacejka
(WbMt)

11 januari 1991



TRES Red. 1991

Diesrede

11 januari 1991

"Voertuig in beweging"

prof.dr.ir. H.B. Pacejka
(WbMt)



Pacejka_
red_
1991

Voertuig in beweging

H.B. Pacejka

Het voertuig zoals we dat in al z'n verschijningsvormen kennen, is een werktuig dat gedurende de afgelopen eeuw is ontwikkeld tot een betrouwbaar, veilig en comfortabel systeem dat op drastische wijze heeft ingegrepen in het maatschappelijk leven en in de vrije tijdsbesteding. Dat het vervoeren wel steeds beter maar niet op ideale wijze plaats vindt, vormt een voortdurende uitdaging voor de onderzoeker en de ontwerper.

Men zou het verplaatsen door middel van een voertuig vanuit een technisch oogpunt als niet ideaal kunnen omschrijven zolang er versnellingen optreden die voor de inzittende nog waarneembaar zijn. Ideaal lijkt dus te zijn: bewegen zonder dat je merkt dat je beweegt.

De mens als bestuurder van de auto zou daar anders over kunnen denken omdat een snelle terugkoppeling van de beweging in de vorm van voelbare dwarsversnellingen als gunstig wordt beoordeeld vooral als de beweging door plotseling optredende verstoringen moeilijk te controleren is.

Het goed en gemakkelijk bestuurbaar maken van een auto ook onder ongunstige omstandigheden is een onderwerp voor wetenschappelijk onderzoek dat een nieuwe dimensie heeft gekregen door het toepassen van de micro-electronica in de voertuigtechniek.

Storingen door bijvoorbeeld dwarswind of gladde plekken in een bocht of bij remmen zouden eigenlijk tijdig gedetecteerd moeten worden door sensoren en via electronica en actuators, die ingrijpen op de besturing, ongedaan gemaakt moeten worden. Zodra dat gerealiseerd kan worden lijken die voelbare dwarsversnellingen niet meer nodig te zijn voor het veilig besturen van een voertuig.

Naast de verwerkelijking van de technische doelstelling die leidt tot het steeds verder terugdringen van hinderlijke versnellingen, dient een optimale beheersing van de door de bestuurder gewenste veranderingen in de beweging van het voertuig nagestreefd te worden. Aanraking met soms plotseling opduikende obstakels kan vermeden worden door zelf voldoende grote horizontale versnellingen te genereren tenzij dit door het bereiken van fysische grenzen onmogelijk blijkt te zijn. Constructieve maatregelen moeten er daarna voor zorgen dat de vertraging waaraan de inzittenden bloot gesteld worden zo goed mogelijk in de beschikbare tijd gedoseerd wordt en dus zo laag mogelijk blijft.

Het in detail kunnen beheersen van de voertuigbeweging is een voorwaarde om het geschetste ideaal te benaderen. Dit betekent dat resulterende krachten en momenten die op het voertuig werken niet aan het toeval overgelaten worden maar zodanig gecontroleerd worden dat de gewenste bewegingsverandering en de daaruit resulterende beweging van de

voertuigcabine zo rustig mogelijk en op stabiele wijze verloopt.

Dat de beweging niet altijd stabiel hoeft te verlopen wordt in de praktijk ondervonden en heeft in de regel te maken met het mechanisme waarop krachten tussen wegdek en banden worden opgewekt.

Bekend is het ongecontroleerd van de weg raken van auto's waarvan de wielen door overmatige beremming blokkeren. Desastreus kunnen de gevolgen zijn bij met name zware vrachtautocombinaties als de achteras van het trekkende voertuig geblokkeerd raakt. Een heftige schaarbeweging is dan onvermijdelijk het gevolg. Opgemerkt dient te worden dat de geblokkeerde wielen weliswaar de instabiliteit veroorzaken maar dat de nog ruimschoots beschikbare dwars- of spoorkrachten van de rollende voorbanden verantwoordelijk zijn voor de ontwikkeling van deze omzwaaibeweging. Maar ook zonder blokkeren, zonder remmen, kan bij hoge rijsnelheden en in het bijzonder in scherpe bochten koersinstabiliteit optreden waarbij de uit zich zelf ontstane verdere instuurbeweging van de trekker kan resulteren in kantelen en omrollen van het gevaarte. Te vaak ziet men deze ongevallen gebeuren in bochten die volgen op uitritten van autosnelwegen.

Instabiliteiten kunnen ook gepaard gaan met gevaarlijke oscillaties. Bijvoorbeeld de zelfgeëxciteerde en zichzelf instandhoudende wielshimmybewegingen. Bestuurbare wielen van

vrachtauto's en motorfietsen maar ook kolossale hoofdlandingsgestellen van vliegtuigen lijden onder dit fenomeen waar het merkwaardige gedrag van de elastische luchtband mede debet aan is.

Deze vorm van instabiliteit wordt vaak versterkt door elastische vervormbaarheid van wielophangings- en besturingscomponenten en torsieslapheid van het hoofdframe van een motorfiets. Voertuigen kunnen ook als geheel instabiele oscillerende bewegingen uitvoeren zoals de gevaarlijke bij hogere snelheden optredende slingerbeweging van de motorfiets en van de autocaravan-combinatie. Al deze ongewenste voertuigeigenschappen kunnen door een goed ontwerp, juiste belading en handhaving van de goede staat voorkomen worden.

Voldoende kennis van de van verscheidene omstandigheden afhangende wijze waarop de op het voertuig werkende krachten gegenereerd kunnen worden maar tegelijkertijd ook kennis en dus (eventueel indirect) meten van de krachten die ongewild vanuit de omgeving als storingen op het voertuig werken, is nodig om tot een succesvolle beheersing van de beweging van het op zich stabiele voertuig, ook onder kritieke omstandigheden, te kunnen komen.

Door gebruikmaking van modelmatige beschrijving van het voertuig en zijn componenten en van voldoende metingen aan het rijdende voertuig moet het mogelijk worden

om met behulp van moderne mechatronische middelen het voor ogen staande ideaal veel dichter te benaderen dan momenteel door passieve constructieve middelen mogelijk is.

Dit terrein van onderzoek staat sterk in de belangstelling bij de beoefenaren van de voertuigdynamica zowel bij wetenschappelijke instituten als bij de voertuigproducenten. Zaken die o.a. in dit verband in het Delftse onderzoek voorop staan zijn het theoretisch en experimenteel onderzoek naar het gedrag van de luchtband, het wiskundig modelleren van het voertuig als geheel en de toepassing van mechatronische principes om de voertuigeigenschappen te verbeteren.

De luchtband is een voertuigcomponent die van cruciale betekenis is i.v.m. veiligheid en comfort. Om het gedrag van de band ten behoeve van het onderzoek te kunnen beschrijven is het goed om in modellen te denken. Er zijn verschillende soorten modellen denkbaar die allemaal in wiskundige vorm zijn te brengen maar die sterk kunnen verschillen in complexiteit, in structuur en in gebruiksdoel.

Zo kennen we betrekkelijk eenvoudige modellen die in de eerste plaats bedoeld zijn om inzicht te verwerven in sommige aspecten van het bandgedrag en daarnaast modellen die we willen gebruiken om de band na te bootsen in complete dynamische voertuigmodellen. Voorts bestaan er vaak zeer ingewikkelde rekenmodellen die speciaal ontwikkeld zijn om

als hulpmiddel te dienen bij het ontwerpen van een nieuw type autoband.

Scherpe grenzen tussen deze categorieën zijn er niet. Ze lopen in elkaar over en beïnvloeden elkaars ontwikkeling. Zo ook de methoden van modelontwikkeling, gebaseerd op de theorie of op het experiment, die men vaak gemengd in de modelvorming aantreft.

Om een betere voorstelling te kunnen maken van de manier waarop de band zich schrap zet tegen bijvoorbeeld een gedwongen zijdelingse afwijking van de baan wordt wel het spaak- of roterend borstelmodel gebruikt. De elastisch vervormbare spaken maken contact met het wegdek over een bepaalde contactlengte. Als het wiel rolt dan bewegen de elementen zich van voor naar achter door de contactzone heen. Gaat de beweging van het wiel ten gevolge van remmen of door een opgelegde zijdelingse beweging van de wielas afwijken ten opzichte van de oorspronkelijke vrij rollende rechtuitgaande beweging, dan zullen de spaakelementen noodgedwongen in horizontale richting gaan vervormen. Beweegt de wielas naar links zoals in figuur 1, dan zal elk volgend element iets meer naar links in contact komen met de weg. Er ontstaat een drifthoek en een driehoekig naar achteren toenemend vervormingsbeeld. De ontstane spoorcracht F_y grijpt daardoor achter het contactcentrum aan hetgeen resulteert in een zogenaamd richtmoment M_z dat het wiel naar de nieuwe bewegingsrichting toe wil sturen.

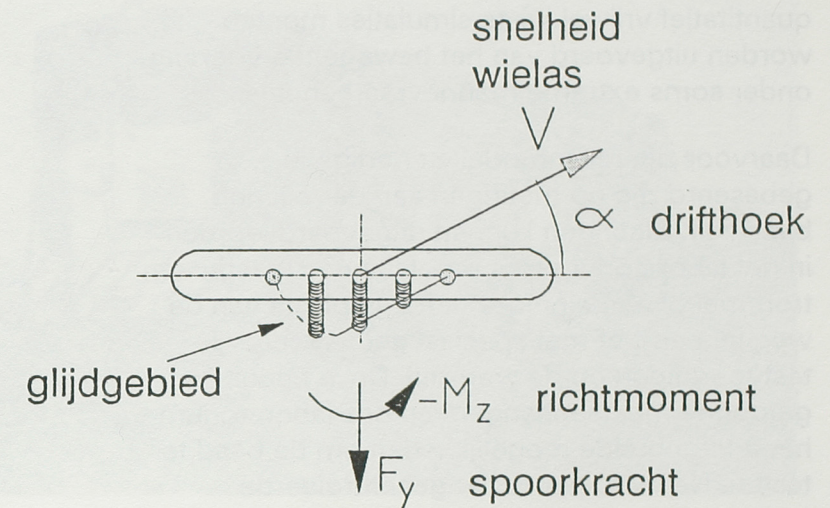


Fig. 1. Het eenvoudige bandmodel (bovenaanzicht) rollend onder een drifthoek α .

Bij groter wordende drifthoek zal de spoorcracht minder dan proportioneel toenemen omdat dan ten gevolge van de beperkte wrijvingscoëfficiënt glijden zal gaan optreden dat begint aan de achterrand van het contactgebied waar de vervorming te groot zou zijn geworden. Na het bereiken van een bepaalde drifthoek zal de gehele band gaan glijden en zal de spoorcracht niet of nauwelijks verder toenemen.

Dit simpele fysische bandmodel is reeds in staat om karakteristieken te produceren die al veel lijken op gemeten verbanden. Het is echter onvoldoende nauwkeurig om te kunnen dienen in computermodellen van het voertuig waarmee

quantitatief vrijwel juiste simulaties moeten worden uitgevoerd van het bewegende voertuig onder soms extreme manoeuvreercondities.

Daarvoor zijn rekenmodellen nodig die gebaseerd zijn op metingen aan de rollende band zelf. Metingen kunnen uitgevoerd worden in het laboratorium met proefstanden waarin een trommel of een eindloze band de plaats van de weg inneemt of met speciaal geconstrueerde testvoertuigen op de weg zelf. De in figuur 2 getoonde meetaanhanger van ons laboratorium heeft uitgebreide mogelijkheden om de band te testen. Het wiel kan onder gecontroleerde verticale belasting gestuurd en geremd worden terwijl eventueel water voor de band gespreid wordt. Krachten en momenten die op het wiel werken worden met de speciale meetnaaf gemeten. De computer bestuurt het hele meetproces en verwerkt later de meetsignalen tot handzame grafieken en vervolgens tot formules die overeenkomen met het gewenste rekenmodel.

Eén van die modellen die onlangs ontwikkeld is en intussen alom bekend is geworden onder de naam "Magic Formula" heeft als basis de eenvoudige relatie

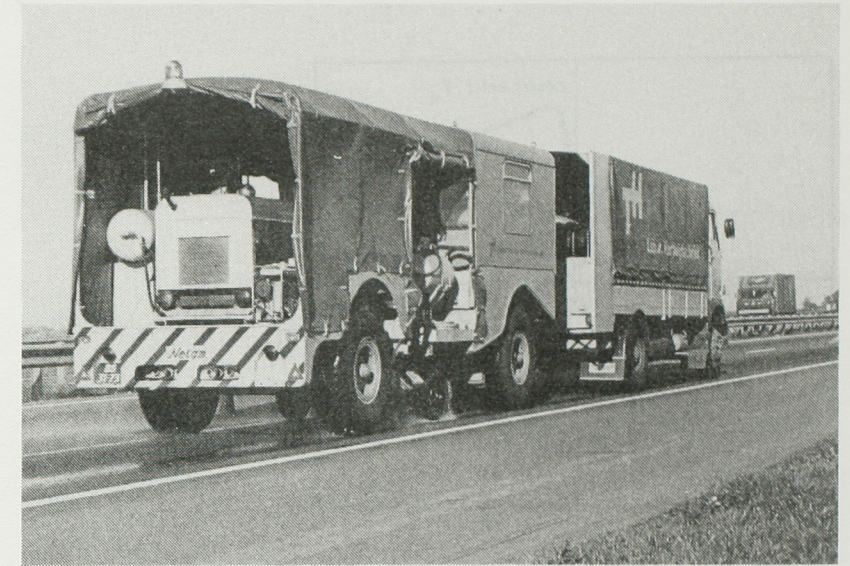


Fig. 2. De bandenmeetaanhanger van de TU-Delft.

$$Y = D \cdot \sin(C \cdot \arctan(B \cdot X))$$

met

D: maximum

C: vormfactor

B: stijfheidsfactor

De Y is de te berekenen grootte zoals de spoorkracht, het richtmoment of de remkracht terwijl X de ingangsvariabele is die de bewegingstoestand van het wiel beschrijft zoals de drifthoek en de rem- of aandrijfslip. In iets uitgebreidere vorm toont deze relatie een frappante overeenkomst met gemeten krommes (figuur 3).

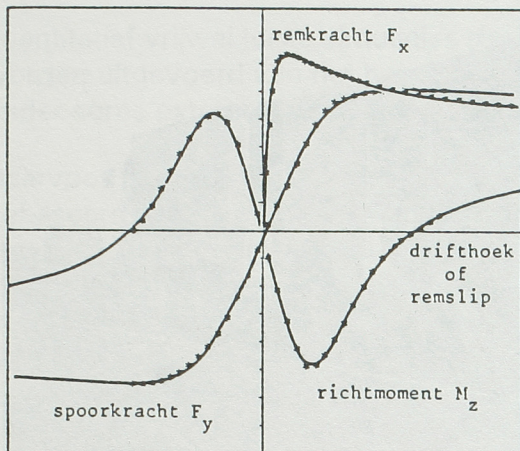


Fig. 3. Gemeten (*) en de volgens de "Magic Formula" gefitte karakteristieken.

Om het geval van gecombineerde slip te kunnen beschrijven dat optreedt als de auto zich al remmend in een bocht beweegt, wordt de formule beduidend ingewikkelder. Met behulp van geavanceerde regressietechnieken zijn we in staat om de gemeten relaties te "fitten". Figuur 4 toont de variatie van spoorkracht en remkracht bij een vast ingestelde stuur- of drifthoek terwijl de remdruk geleidelijk wordt verhoogd waardoor de remslip stijgt totdat het wiel tot blokkeren wordt gebracht. We constateren dat de spoorkracht eerst wat groter wordt om daarna te dalen en als de remkracht z'n maximum heeft bereikt scherp af te nemen tot een gering niveau als het wiel geblokkeerd is. Het voertuig is dan onbestuurbaar geworden en kan gemakkelijk uit z'n baan raken, zoals we eerder gezien hebben.

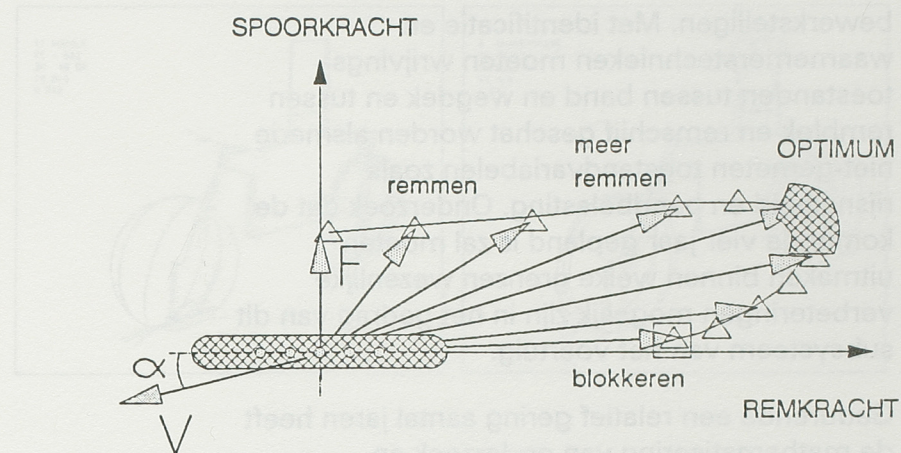


Fig. 4. De band bij driften en remmen. Het door een anti-blokkeersysteem na te streven optimum.

Een belangrijke opgave is nu een zodanige regeling van het remkoppel te ontwerpen dat een optimum remslip wordt gehandhaafd waardoor de remkracht in de buurt van z'n maximum blijft en er nog voldoende spoorvermogen van de band overblijft. De heden ten dage commercieel verkrijgbare anti-blokkeersystemen zijn in staat om het optimale gedrag te benaderen. Maar er is nog een lange, moeilijke weg te gaan om een echt continu geregeld optimaal werkend remsysteem te ontwikkelen dat ook goed functioneert als het wiel over oneffen, slipperige en bochtige wegen beweegt.

Gedetailleerde dynamische modelvorming van het bandgedrag is nodig en de mechatronica zal ons de mogelijkheden moeten bieden om de gewenste beheersing van de wielbeweging te

bewerkstelligen. Met identificatie en waarnemerstechnieken moeten wrijvings-toestanden tussen band en wegdek en tussen remblok en remschijf geschat worden alsmede niet-gemeten toestandvariabelen zoals rijnsnelheid en bandbelasting. Onderzoek dat de komende vier jaar gepland is zal moeten uitmaken binnen welke grenzen wezenlijke verbeteringen mogelijk zijn in het gedrag van dit subsysteem van het voertuig.

Gedurende een relatief gering aantal jaren heeft de mathematisering van onderzoek en ontwikkeling ook van het voertuig als geheel een grote vlucht genomen. Men spreekt van wiskundige prototypen waarmee met behulp van de computer de eerste gesimuleerde rijtesten kunnen worden uitgevoerd.

Aan deze theoretische modellen en de ontwikkelde computerprogrammatuur worden hoge eisen gesteld voor wat betreft bereikte nauwkeurigheid en benodigde rekentijd. Ook de vereiste inspanning om een model op te stellen en de door het programmapakket geboden faciliteiten om de resultaten te evalueren en te analyseren zijn factoren die de ontwerper van deze tegenwoordig vaak semi-automatische, modellerings- en simulatie-algorithmen als even belangrijke doelstellingen voor ogen moet houden.

De animatie is daarbij een onmisbaar presentatiemiddel geworden (zie figuur 5 voor een impressie van een eenvoudige animatie).

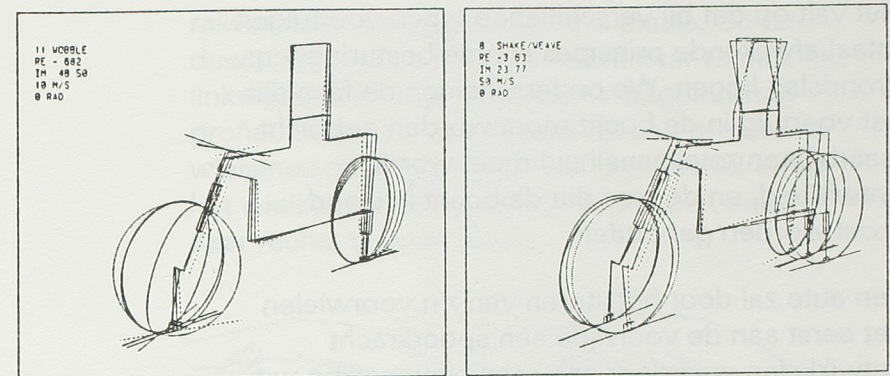


Fig. 5. Berekende trillingsvormen van de motorfiets (beelden uit een animatie).

Vaak om gecompliceerde berekende bewegingsvormen in beeld te brengen en een eerste visuele indruk te krijgen van de correctheid van de modelberekening om vervolgens een analyse te maken van de beweging op een manier die ook aantrekkelijk is voor de oppervlakkige beschouwer en, uiterst belangrijk, voor de eventuele opdrachtgever.

Simpele modellen hebben echter nog lang niet afgedaan. Met succes worden ze gebruikt in het onderwijs, bij het uitdenken van nieuwe concepten, maar ook als intern model in een regelaar. Bij de volgende beschouwingen over de besturing van een voertuig blijken zulke eenvoudige modellen van groot nut te zijn.

Het valt op dat bij verschillende typen voertuigen totaal afwijkende principes aan de besturing ten grondslag liggen. We onderscheiden de fase dat het voertuig in de bocht moet worden gebracht, waarbij een rotatiesnelheid moet worden ontwikkeld, en de fase dat de bocht in stand moet worden gehouden.

Een auto zal door het sturen van z'n voorwielen het eerst aan de voorzijde een spoorkracht ontwikkelen waardoor een rotatieversnelling van de auto om z'n verticale as ontstaat. Als ook de achterwielen bestuurbaar zijn (Fig. 6), dan zijn er verschillende strategieën mogelijk. De verhouding tussen stuurhoeken voor en achter kan men afhankelijk maken van de rijnsnelheid en van de grootte van de stuurwielverdraaiing en -verdraaiingssnelheid maar ook van andere toestandvariabelen. Electronische regeling opent de mogelijkheid om een zo prettig en zo veilig mogelijk sturende auto te maken. Deze interessante ontwikkeling kan echter niet plaats vinden zonder de wetenschappelijke bijdrage van deskundigen op het gebied van de relatie tussen mens en machine waarvan de vandaag in ons midden verkerende professor Sheridan de hooggeschatte promotor is.

Bij vier-wielbesturing kan de rotatie ingezet worden door dwarskrachten werkend op de voor- en achteras. Een rotatie kan echter ook geïnitieerd worden door links en rechts tegengesteld gerichte langskrachten. Dat gebeurt bij een tank die voorzien is van individueel aangedreven rupsbanden. Ook bij een

railvoertuig vindt iets dergelijks plaats. De rail duwt, bijvoorbeeld bij een bocht naar rechts, het linkerwiel omhoog vanwege z'n kegelvormig profiel. Daardoor zal dat wiel op een grotere wielstraal gaan lopen dan het rechterwiel en zal het wielstel gedwongen worden in een boog naar rechts te gaan rollen.

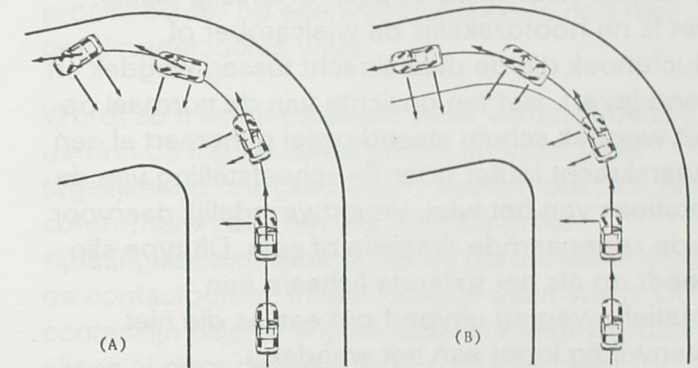


Fig. 6. De bocht insturen met een conventioneel bestuurde auto (links) en met een volgens een bepaald algoritme actief (vier-wiel) gestuurde auto (rechts).

Bij een fiets of motorfiets gaat het weer anders. Om het evenwicht te bewaren moet het voertuig eerst in een wat gekantelde stand worden gebracht. Willen we een bocht naar rechts gaan maken dan moeten we, overigens zonder dat we het merken, eerst even naar links sturen om de fiets in een schuine stand te brengen die dadelijk nodig is om in de bocht niet om te vallen.

Eenmaal in de bocht zullen bij elk type voertuig evenwichtig verdeelde dwarskrachten van de weg op het voertuig werken om de vereiste centripetale kracht te leveren. Dit zal in het algemeen met enige dwarslip gepaard gaan behalve bij motorfietsen en fietsen.

In tegenstelling tot de andere typen voertuigen vindt hier nauwelijks of geen dwarslip plaats. Het is nu hoofdzakelijk de wielcamber of vluchthoek die de dwarskracht tussen wegdek en band levert. Het ten opzichte van de normaal op het wegdek schuin staande wiel genereert al een dwarskracht louter door de scheefstelling van de rotatieas van het wiel. Verantwoordelijk daarvoor is de zogenaamde draaislip of spin. Dit type slip treedt op als het rollende lichaam een rotatiebeweging uitvoert om een as die niet evenwijdig loopt aan het wegdek.

Dat gebeurt bijvoorbeeld bij een rollende kegel. Van nature zal de kegel in een bocht gaan rollen. Dwingen we de kegel echter rechtuit te bewegen dan gaat de kegel in het contactgebied o.a. in zijdelingse richting vervormen. Er ontstaat een dwarskracht die de camber- of spinkracht genoemd wordt. Als de wrijvingscoëfficiënt nul zou zijn dan ontstaat er natuurlijk geen dwarskracht en ook geen dwarsvervormingen. De contactpunten van de rollende band zullen nu niet meer volgens een rechte lijn van voren naar achteren door het contactgebied heen bewegen maar volgens een boog. Dat is het gedeelte van de ellips die je ziet als de schuine op de kegel getekende cirkel loodrecht op het wegdek

geprojecteerd zou worden. Op een stroef wegdek wordt deze boog dus teruggedrukt tot de vereiste rechte contactlijn ontstaat.

Zowel bij een schuin staand wiel met luchtband als bij een spoorwiel met kegelvormig loopvlak vindt in wezen het zelfde verschijnsel plaats. Bij een moderne autoband verloopt het proces echter op een wat complexere nog niet goed onderzochte wijze.

Wordt zo'n schuin staande band verticaal belast, dan zal de ingebouwde gordel afgeplat maar tegelijkertijd ook getordeerd worden om zich te conformeren aan het wegdek. De grote zijdelingse buigstijfheid van de gordel verhindert de contactpunten in een boog te gaan staan. De contactlijn blijkt al vrijwel recht te zijn geworden alleen al door de werking van de verticale bandindrukking. Er is dan nog maar betrekkelijk weinig dwarsvervorming van het loopvlakrubber nodig om precies rechtuit te gaan rijden.

Bij een motorfietsband is geen gordel ingebouwd of zo die er wel is dan heeft die een gekromde doorsnede waardoor wel een afplatting maar vrijwel geen tordering van de gordel plaatsvindt. Het gevolg is dat een autoband slechts een kleine camberstijfheid vertoont en een motorfietsband een grote.

Net als bij het ontstaan van spoorkrachten tengevolge van het optreden van een drifthoek zal ook bij een camberhoek de kracht die ingeleid wordt in het loopvlak, doorgegeven moeten worden aan de wielvelg. Dit gaat gepaard met

grote zijdelingse vervormingen van het karkas van de band. Er is enige tijd of beter gezegd enige afgelegde afstand nodig om deze dwarsvervorming op te bouwen. Een differentiaalvergelijking zal de ontwikkeling van deze vervorming en van de kracht gaan beschrijven.

Bij dwarsslip, dus bij een drifthoek, is dit reeds uitvoerig onderzocht maar bij camber nog niet. Dat zal het onderwerp worden van een binnenkort aan te vangen promotiewerk. We hopen daarna in staat te zijn het bandgedrag bij wisselende camberhoeken maar ook bij sterke variaties in plaatselijke dwarshellingen van het wegdek op een geschikte manier in een theoretisch model te kunnen vangen.

De auto met z'n twee sporen zal niet zo gauw omvallen en hoeft niet, zoals bij motorfietsen, eerst in de bocht gelegd te worden. Het is zelfs zo dat als de auto een bocht beschrijft, de carrosserie een rolhoek naar buiten vertoont, die vooral bij slapgeveerde auto's onacceptabel groot kan worden. Naast het bewegingscomfort wordt ook het stuurgedrag nadelig beïnvloed door deze rolbewegingen van de carrosserie.

De rolbeweging zou men eigenlijk volledig willen onderdrukken zonder uiteraard het verticale trillingscomfort te verslechteren. Op volledig passieve wijze, dus met veren en stangen, is hier geen doorbraak meer te verwachten. Ook hier kan de mechatronica een nieuwe weg wijzen. De opgave is dan door middel van actuatoren in de

wielophangingsconstructie een op de carrosserie werkend tegenkoppel te genereren dat er voor zorgt dat de auto vlak de bocht door gaat. Eventueel kan men ook aan overcompensatie denken waardoor de wagen naar binnen overhelt en de inzittenden nog minder van de dwarsversnelling zullen merken.

Er zijn meerdere regelalgorithmen denkbaar die geïmplementeerd in de meerrijdende computer voor de aansturing van de actuatoren zorg dragen. Directe terugkoppeling van de door sensoren gemeten rolhoek veroorzaakt een rolverstijving van de wielophanging waardoor wegdekoneffenheden sterker voelbaar worden. Beter lijkt het de gemeten dwarsversnelling te gebruiken om het anti-rolkoppel te berekenen. Helaas is dit signaal sterk vervuild door ruis. Filtering zou uitkomst kunnen bieden zij het dat daardoor het systeem te traag wordt en snelle slalomtrajecten niet meer kan volgen. Een verbetering wordt gevonden door niet de gemeten dwarsversnelling te gebruiken maar de door berekening geschatte waarde daarvan (Fig. 7). De computer berekent de dwarsversnelling door simulatie met een betrekkelijk eenvoudig voertuigmodel. De gemeten rijsnelheid wordt als parameter gebruikt en de stuurwiel-verdraaiing als ingangssignaal. Afwijkingen tussen geschatte en gemeten dwarsversnelling worden teruggekoppeld om onnauwkeurigheden van het interne model te compenseren. De ontwikkeling van de realisatie van deze nieuwe technische oplossing is in volle gang ook voor wat betreft het mechanische deel.

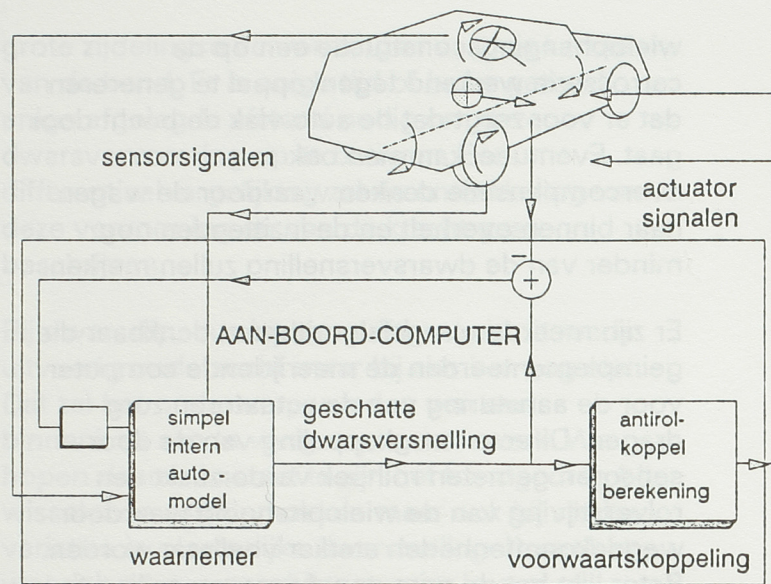


Fig. 7. Mechatronica-schema voor een systeem dat het "rollen" van de autocarosserie in de bocht tegengaat.

Reeds onderzochte en beproefde methoden om een anti-rolkoppel te genereren maken gebruik van het principe van het verspannen van veren zoals gasveren en rolstabilisatoren. Dit verspannen kost echter meer energie dan ons lief is. In principe hoeft het vlak houden van de carrosserie geen arbeid te kosten omdat er geen standverandering optreedt. Er wordt momenteel door studenten aan slimme constructies gewerkt om dit principe in de realisatie door te voeren.

Onderzoek aan de toepassing van de regeltechniek in wielophangingsconstructies is wereldwijd vooral geconcentreerd op de verbetering van de verticale trillingsisolatie. Hydraulische actuatoren nemen hierbij de plaats in van de veer- en schokbreker. Er zijn dan minstens twee zaken die nagestreefd moeten worden. Ten eerste het verbeteren van het trillingscomfort en ten tweede het handhaven van voldoende wegcontact om veilig stuurgedrag te kunnen waarborgen.

We zouden ons voor kunnen stellen dat de actuatoren zodanig worden aangestuurd dat de wielen netjes over de weghobbels worden heengetild. Op die manier zal in ieder geval de bandindrukking ongeveer constant gehouden kunnen worden. Maar ook de carrosserie zal aanzienlijk minder op en neer bewegen als de aanstootfrequentie maar niet te hoog wordt. Bij hogere frequenties zullen de versnellingskrachten, die de actuator moet leveren om de wielas- massa de wegoneffenheden te laten volgen, groter worden en dus als reactie merkbaar worden in de cabine. In het algemeen blijkt een compromis tussen comfort en wegligging noodzakelijk te zijn. Figuur 8 toont frequentie-responsie-karakteristieken van de bakversnelling en van de verticale bandkracht op wegdek-oneffenheden. Adaptief regelen is in dit geval de meest belovende optie waarbij weegfactoren worden afgestemd op het soort, meer of minder oneffen, wegdek en op de gemakkelijk te onderkennen noodzaak of door

sturen of remmen horizontale bandkrachten gegenereerd moeten worden.

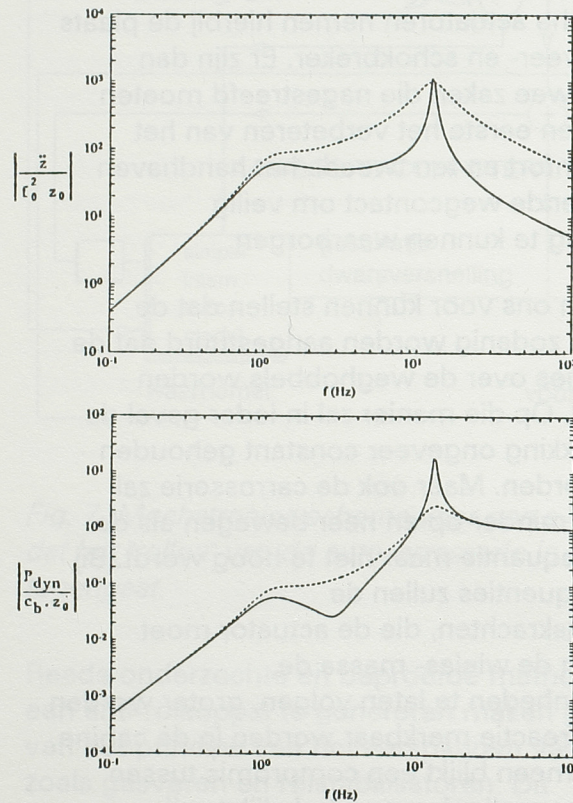


Fig. 8. Amplitude-responsiefuncties voor de verticale versnelling van de wagenbak (z) en voor de dynamische bandlastvariatie (P_{dyn}) op wegdekoneffenheden (z_0) bij een conventioneel passief systeem (.....) en een actief geveerd systeem (—).

Veel regeltechnische, dynamische en constructieve aspecten zoals semi-actieve weinig energie vragende alternatieven, coördinatie tussen de vier wielophangingen, uitnutten van het trillingsabsorberend vermogen van derde massa's zoals het motorblok en (nog verder wegliggend) de optimale samenwerking tussen de regelingen van de drie orthogonale bewegingen: sturen, remmen en vering zijn onderwerpen voor toekomstig onderzoek.

Dat automatische regeling met succes stabiliserend op de beweging van voertuigen kan werken is bekend door de toepassing in moderne jachtvliegtuigen. Een andere spectaculaire toepassing is gevonden in de zelfstabilisatie van een onbemande motorfiets, speciaal ontwikkeld om het uitgebreide mathematische model van de motorfiets te kunnen valideren (Fig. 9). Een electromotor levert een koppel werkend op het stuur. Dit koppel ontstaat door terugkoppeling van stuursnelheid, rolhoek en rolhoeksnelheid.

Radiografisch worden stuursignalen gegeven zoals ontkoppelen, schakelen, gasgeven, remmen en de met de bocht overeenkomende rolhoek. Het is opvallend te kunnen constateren dat deze "rider robot" er eveneens voor zorgt dat het stuur eerst even naar links wordt verdraaid om vervolgens een rechterbocht in te kunnen gaan.

Dit omvangrijke en multi-disciplinaire onderzoek kan niet meer als groep alleen worden uitgevoerd. Voortschrijdende wetenschap en

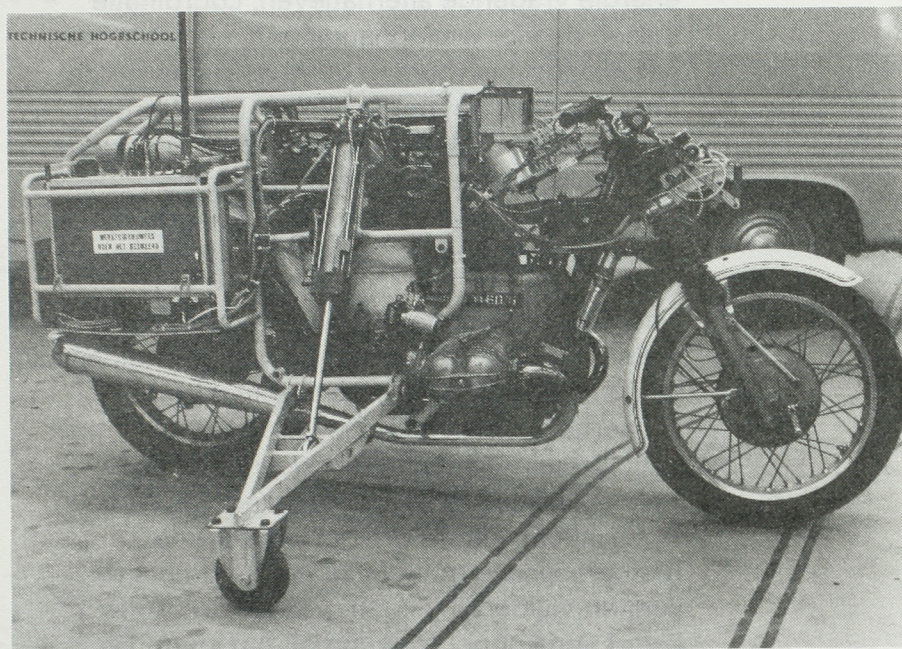


Fig. 9. De zelfstabiliserende met de "rider-robot" uitgeruste (onbemande) motorfiets.

techniek vereisen samenwerking met anderen. Met enthousiasme is samenwerking met onze regeltechnische groep tot stand gebracht om het boeiende terrein van de mechatronica tot verdere ontwikkeling te brengen maar ook om het, maar dan in nog breder verband, uit te dragen in het onderwijs zoals in de speciale afstudeervariant "Mechatronica" en een mogelijk op te zetten tweede-fase opleiding.

Voor de continuering van het uitvoeren van grote projecten samen met het bedrijfsleven waar wij ten gevolge van de hard aangekomen bezuinigingen te klein voor zijn geworden is een veelbelovende samenwerkingsvorm met het Instituut voor Wegtransportmiddelen TNO in wording.

Wij denken en vertrouwen dat deze samenwerkingsverbanden ons in staat zullen stellen om ook in de toekomst het vakgebied der voertuigdynamica samen met studenten en promovendi op voldoende hoog en breed wetenschappelijk niveau te kunnen blijven beoefenen.