

GELEIDERAILCONSTRUCTIES MET VERVORMBARE AFSTANDHOUDERS

Verslag van de literatuurstudie en de uitgevoerde simulaties

R-89-46

Ing. W.H.M. van de Pol

Leidschendam, 1989

Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV

INHOUD

Voorwoord

1. Inleiding

2. Criteria

3. Resultaten van de literatuurstudie

3.1. Beschrijving van de constructies

3.2. Specifieke problemen van de constructies

3.2. Testresultaten

3.4. Enige algemene opmerkingen

3.5. Discussie

3.6. Conclusies

4. Simulaties

4.1. Opzet en uitvoering van de simulaties

4.2. Resultaten van de simulaties

4.2.1. 2-golfrail, vervormingsafstand 29 cm

4.2.2. 2-golfrail, vervormingsafstand 40 cm

4.2.3. 3-golfrail, vervormingsafstand 40 cm

4.2.4. Vergelijking van de drie series simulaties

4.3. Discussie

5. Vergelijking van de plooibare-afstandhouderconstructie met geleiderail- en betonnen constructie

6. Conclusies

Literatuur

Afbeeldingen 1 t/m 7

Tabellen 1 t/m 12

Grafieken 1 t/m 4

Plots 1 t/m 8

Bijlagen 1 t/m 3

VOORWOORD

Dit rapport doet verslag van het onderzoek dat tot doel heeft te toetsen of een aanrijding tegen een geleiderailconstructie met vervormbare afstandhouders minder ernstig afloopt dan een aanrijding tegen een zogenaamde geleidebarrier. Het onderzoek, dat is uitgevoerd in opdracht van de Dienst Verkeerskunde van Rijkswaterstaat, bestaat uit een literatuurstudie en uit een serie simulaties. Het verslag is samengesteld door ing. W.H.M. van de Pol.

1. INLEIDING

In situaties waarin een beperkte hoeveelheid ruimte beschikbaar is, worden thans wel zogenaamde geleidebarriers toegepast, terwijl bij voldoende ruimte flexibele geleiderailconstructies worden geplaatst. Onder een geleidebarrier wordt in dit rapport verstaan een betonnen New Jersey Barrier. De geleiderailconstructie met vervormbare afstandhouders zou de ruimte tussen beide constructies kunnen opvullen. De geleidebarrier is star, de flexibele geleiderailconstructie kan gemakkelijk uitbuigen. Bij een normale geleiderailconstructie wordt de flexibiliteit bewerkstelligd door dat bij een aanrijding de palen door de grond kunnen "snijden". Bij de constructie met vervormbare afstandhouders wordt de flexibiliteit verkregen door het vervormen van de afstandhouders. Tijdens het vervormen van de afstandhouders wordt energie opgenomen.

In deze studie komen de volgende kwesties aan de orde:

1. Het nagaan of de veronderstelling juist is dat de ernst van een aanrijding tegen een geleiderailconstructie met vervormbare afstandhouders kleiner is dan tegen een geleidebarrier.
2. Het opstellen van functionele eisen voor de constructie met vervormbare afstandhouders.
3. Het aangeven van de noodzakelijke aanpassingen als de bestaande vervormbare afstandhouders niet aan de functionele eisen voldoen.
4. Het kwantificeren van de risico's die optreden bij aanrijding van de verschillende typen bermbeveiligingsvoorzieningen, te weten de flexibele geleiderailconstructie, de geleiderailconstructie met vervormbare afstandhouders en de geleidebarrier.

Met een literatuurstudie zal getracht worden een antwoord te geven op de eerste drie punten, eventueel nader toegesneden op de Nederlandse omstandigheden. Simulaties zullen een antwoord moeten geven op punt vier.

2. CRITERIA

De geleiderailconstructie met vervormbare afstandhouders is een (semi)-flexibele constructie. De eisen die aan de normale geleiderailconstructies worden gesteld gelden dus ook voor de constructie met vervormbare afstandhouders. Deze eisen zijn:

1. Het botsende voertuig mag niet door de constructie heen breken, er over heen rijden of kantelen, dan wel er onder door schieten.
2. Letsel van de inzittenden en schade aan de constructie en aan het voertuig moeten zo beperkt mogelijk blijven.
3. Het voertuig mag niet door de constructie in de eigen verkeersstroom worden teruggekaatst.
4. De constructie moet na een aanrijding zijn werking zo veel mogelijk blijven behouden.

Naast deze algemene eisen moet de constructie met vervormbare afstandhouders tevens voldoen aan een aantal speciale eisen:

- Tijdens de vervorming van de afstandhouder moet de vervormingskracht gelijk blijven, en mag in ieder geval niet beduidend afnemen.
- Tijdens de vervorming van de vervormbare afstandhouder moet de geleiderail op hoogte blijven.
- De vervormbare afstandhouder mag geen energie teruggeven.
- De vervormbare afstandhouder moet in samenwerking met de ligger een vloeiende uitbuiging geven.
- De vervormbare afstandhouder moet eenvoudig te fabriceren, te plaatsen en te herstellen zijn.
- Vervormbare afstandhouders, die niet zelf tijdens en na de botsing de rail op hoogte houden, hebben een geleidend element nodig.

Voor het simuleren van geleiderailconstructies met vervormbare afstandhouders worden dezelfde inrijcondities gehanteerd als bij de normale geleiderailconstructies, namelijk: rijsnelheid 100 km/uur en inrijhoek 20°.

3. RESULTATEN VAN DE LITERATUURSTUDIE

3.1. Beschrijving van de constructies

Bij de full-scale tests zijn drie soorten vervormbare afstandhouders gebruikt:

- rubber afstandhouders (zie Afbeelding 1)
- kruimelbeton- of -aluminium afstandhouders (zie Afbeelding 2, 3 en 4)
- afstandhouders met een plooibaar profiel (zie Afbeelding 5, 6 en 7)

Kruimelbeton is beton van een speciale samenstelling dat tijdens de botsing verkrumeld of verpulverd (drukbelasting) en daardoor energie opneemt. Aluminium afstandhouders werken op gelijke wijze. Tijdens de botsing wordt het aluminium over een speciaal gevormde schotel "gefragmenteerd".

3.2. Specifieke problemen van de constructies

Bij de eerste twee constructies moet de ligger bij een aanrijding op hoogte worden gehouden door een geleidend element; de vervormbare afstandhouder is vanwege de eigenschappen van het materiaal niet zelf in staat dit te doen. Tijdens en na de botsing steekt het geleidend element achter de constructie uit. Dat het geleidend element achter de constructie uitsteekt maakt dit principe ongeschikt om in tunnels toe te passen vanwege de daar zeer beperkte ruimte. De beschikbare uitbuigingsruimte (vervormingsafstand) kan bij rubber afstandhouders niet voor 100% gebruikt worden, omdat het vervormde rubber een restdikte heeft.

Bij de kruimelbeton en aluminium afstandhouders kan wel 100% uitbuigingsruimte gehaald worden. Na een aanrijding moeten wel alle in werking geweest zijnde afstandhouders worden vervangen. De constructie is anders nog maar in geringe mate werkzaam.

Bij de derde methode is de plooibare afstandhouder door zijn vorm en vervormingswijze wel in staat de ligger op hoogte te houden. Een geleidend element is dan niet nodig, waardoor dit principe uitermate geschikt is om in tunnels te worden toegepast. De beschikbare uitbuigingsruimte kan voor bijna 100% gebruikt worden: alleen twee à drie maal de materiaaldikte van de afstandhouder moet in mindering gebracht worden. Na een aanrijding moeten de vervormde afstandhouders vervangen worden; licht vervormde afstandhouders kunnen worden hersteld en de constructie blijft werkzaam.

3.3. Testresultaten

Tabel 1 geeft een overzicht van de uitgevoerde full-scale tests met personenauto's, Tabel 3 met bussen en Tabel 5 met trekkers met oplegger. De resultaten van de tests zijn samengevat in Tabel 2, 4 en 6.

In Grafiek 1 zijn de resultaten grafisch weergegeven. Tevens zijn in de grafiek de inrijcondities voor Nederland en Amerika aangegeven.

Uit Tabel 2, 4 en 6 blijkt weer eens dat elk onderzoek zijn "eigen" weergave van de resultaten heeft, die onderling niet altijd met elkaar te vergelijken zijn. Via beschrijving van de tests, foto's en/of grafieken is getracht de ontbrekende waarden alsnog te verzamelen. Deze waarden zijn met "ca" aangegeven.

Uit de resultaten blijkt dat binnen de (beperkte) beschikbare ruimte - tot ca. 45 cm - redelijke resultaten te bereiken zijn. De optredende vertragingen, snelheidsverschillen en ASI-waarden moeten als maximaal toelaatbaar worden beschouwd. Er is groot verschil in vertragingswaarden en/of uitbuiging. Beide worden veroorzaakt door de relatief hoge waarde van de vervormingskracht van de vervormbare afstandhouder en het grote verschil in gewicht en massastraagheid tussen de Amerikaanse en Europese personenauto's. De maximale botsenergie bij de Amerikaanse inrijcondities is ongeveer 2,3 maal zo groot als bij de Nederlandse inrijcondities. Uitgaande van de veronderstelling dat de uitbuiging evenredig is met de botsenergie (zie Bijlage 1), kan de sterkte van de vervormbare afstandhouder voor de Nederlandse omstandigheden met een factor twee worden verkleind. Hierbij moet rekening worden gehouden met de maximaal beschikbare uitbuigingsruimte. Is de beschikbare uitbuigingsruimte kleiner dan wordt de vervormbare afstandhouder navenant stijver.

Uit de proefresultaten blijkt dat een stijve ligger minder uitbuiging heeft. Door deze grotere buigstijfheid zijn meer afstandhouders in werking. Om een zelfde uitbuiging te bereiken moeten de vervormbare afstandhouders lichter zijn uitgevoerd. De vervormingsenergie wordt daardoor geringer, de lengte van de golf bij het begin van de botsing groter en de hoeksnelheid om de verticale as wat lager. Deze factoren hebben een gunstig effect op de optredende vertragingen en dus op de afloop van de botsing.

3.4. Enige algemene opmerkingen

De plooibare afstandhouder met het profiel van een ring (Afbeelding 6) met een wanddikte van 1,27 cm is ongeveer twee maal zo sterk als die met de ring met een wanddikte 0,95 cm. Vergelijkbare aanrijdingen met ongeveer dezelfde botsenergie verschillen in uitbuiging met een factor twee. In de literatuur wordt niet ingegaan op de mogelijke invloed van weersomstandigheden; hierbij wordt vooral gedacht aan invloed van vorst op de grootte van de vervormingskracht van het rubber of het kruimelbeton of -aluminium. Ook daarom lijkt de keuze van afstandhouders met een plooibaar (metalen) profiel beter.

3.5. Discussie

Gezien de proefresultaten genieten afstandhouders met een plooibaar profiel de voorkeur boven verkrumelende afstandhouders, omdat bij het plooibare profiel de verbinding tussen rail en constructie gehandhaafd blijft. De rail blijft hierdoor op hoogte, zodat geen geleidend element nodig is. Bij de verkrumelende afstandhouder is dit niet het geval. Bij rubber afstandhouders is eveneens een geleidend element nodig, zodat toepassing in tunnels niet mogelijk is.

Uit de full-scale tests blijkt dat voor de zware personenauto's (2000 kg en meer) vervormbare afstandhouders redelijke resultaten te bereiken zijn. Voor de Nederlandse omstandigheden, waarbij de voertuigen veel lichter zijn, moet het mogelijk zijn met zwakkere vervormbare afstandhouders gelijke resultaten te bereiken. Uit Grafiek 2 kan de (voorzichtige) conclusie worden getrokken dat de ASI-waarden van de vervormbare afstandhouder tussen die van de betonnen geleideconstructie en van de stijve geleide-railconstructie zullen liggen. Er moet wel rekening mee worden gehouden dat de ASI-waarden voor de personenauto's tot en met de middenklasse altijd boven de 1,6 zullen liggen. Door het uitvoeren van een aantal simulaties met voertuigen uit het Nederlandse wagenpark wordt veel meer inzicht verkregen in deze problematiek.

Uit de full-scale tests met de zware voertuigen (bussen en vrachtauto's) blijkt dat de (beveiligings)constructie een groot deel van de botsenergie moet kunnen opvangen. Onder deze (beveiligings)constructies worden ook

tunnelwanden, geluidwerende voorzieningen e.d. verstaan. Hierbij wordt dan tevens aan de voorwaarde voldaan dat, voor een goed functioneren van de vervormbare afstandhouder, de afstandhouder eerst zal moeten vervormen. Uit de testresultaten wordt niet duidelijk of een grotere vervormingsafstand betere resultaten geeft dan een kleinere afstand. De invloed van een goede verhouding tussen liggerstijfheid en vervormingskracht van de plooi-bare afstandhouder lijkt minstens zo groot te zijn.

Voorgesteld wordt om voor het simulatie-onderzoek een plooi-bare afstandhouder met een vervormingskracht van 1155 kgf te nemen. Voor nadere uitleg betreffende de grootte van de vervormingskracht wordt verwezen naar Bijlage 1.

De vervormingsafstand is ongeveer 29 cm, nl. 40 cm (uitbouw geleiderail-constructie) minus raildikte en restdikte van de afstandhouder. Als proefvoertuigen worden een lichte, een middelzware en een zware personenauto voorgesteld. De inrijcondities zijn: rijnsnelheid 100 km/uur en inrijhoek 20°.

Ter vergelijking worden met dezelfde inrijcondities en voertuigen simulaties uitgevoerd met een 2-golf rail en een 3-golf rail en een vervormingsafstand van 40 cm. Met deze serie simulaties kan worden nagegaan in hoeverre een grotere liggerstijfheid en het vergroten van de vervormingsafstand een gunstige invloed heeft op de afloop van een botsing.

3.6. Conclusies

- Het moet mogelijk zijn om voor de Nederlandse omstandigheden een constructie met vervormbare afstandhouders te ontwikkelen die aan de criteria voldoet.
- Gezien de beperkte beschikbare uitbuigruijnte zal een constructie met vervormbare afstandhouders altijd ASI-waarden veroorzaken die boven de 1,6 uitkomen.
- Plooi-bare afstandhouders verdienen de voorkeur boven de andere typen afstandhouders.
- De constructie waaraan/waartegen de plooi-bare afstandhouders zijn bevestigd, moet (veel) stijver zijn dan de plooi-bare afstandhouders zelf.

4. SIMULATIES

4.1. Opzet en uitvoering van de simulaties

Om de invloed van de voertuigmassa na te gaan is in elke gewichtsklasse een voertuig geselecteerd. In de middelzware klasse is een voertuigtype gekozen waarvan één model met een massa tegen de ondergrens en één met een massa tegen de bovengrens van deze klasse.

Geselecteerde voertuigen met de inrijconditie

Voertuig	Massa (kg)	Inrij- snelheid (km/uur)	Inrij- hoek (grd)	
VOLVO 244	1245	100	20	
VW Golf II	990	100	20	nieuw model
VW Golf I	750	100	20	oud model
FIAT 126	570	100	20	

De vervormingsafstand van de constructie met plooibare afstandhouder is gebaseerd op de uitbouw van een tweezijdig uitgebouwde flexibele geleide railconstructie. De uitbouw van deze constructie bedraagt 40 cm. De vervormingsafstand van de plooibare afstandhouder bedraagt dan 40 cm minus

Geselecteerde plooibare-afstandhouderconstructies

Railtype	Traagh. moment (cm ⁴)	Vervorm. afstand (cm)	Verv.h. afst.h. (kgf)	Gelijkm. belast. (kgf/m)
2-golfrail	102	29	1155	866
2-golfrail	102	40	1155	866
3-golfrail	153	40	1155	866

raildikte en restdikte van de geheel vervormde afstandhouder. De vervormingsafstand wordt dan 29 cm. De vervormingskracht van de plooibare afstandhouder is 1155 kgf.

Naast deze constructie zijn nog twee andere constructies met plooibare afstandhouders gesimuleerd; eenzelfde constructie met een vervormingsafstand van 40 cm en een constructie met een 3-golfrail en een vervormingsafstand van 40 cm.

De simulatieresultaten van deze drie constructies moeten antwoord geven op de volgende vragen:

- Hoe verhoudt de werking van de constructie met een plooibare afstandhouder zich tot de werking van normale geleiderailconstructies en de geleidebarrier?
- In hoeverre heeft het vergroten van de vervormingsafstand van de plooibare afstandhouder een gunstig effect op de afloop van een botsing?
- In hoeverre heeft het verstijven van de ligger een gunstig effect op de afloop van een botsing?

4.2. Resultaten van de simulaties

De uitgevoerde simulaties zijn in drie series verdeeld. Van elke simulatie uit de eerste serie zijn twee plots opgenomen: één plot die het verloop van de botsing weergeeft en één die het verloop van de ASI-waarde van het zwaartepunt van het voertuig, van de bestuurdersplaats en van de passagiersplaats links achter weergeeft. De resultaten van de simulaties zijn weergegeven in de Tabellen 7 t/m 12 en de Grafieken 3 en 4.

4.2.1. 2-golfrail, vervormingsafstand 29 cm

De resultaten van de uitgevoerde simulaties zijn weergegeven in Tabel 7 en 8. Uit de resultaten blijkt dat de twee zware personenauto's de tunnelwand raken (zie ook Plot 1 en 3). De ASI-waarden voor de vier voertuigen zijn altijd hoger dan 1,6 (zie Plots 2, 4, 6, 8). Vooral bij de botsing van de achterkant van het voertuig tegen de constructie, het "rear-end" effect, treden grote waarden van de ASI op. De optredende rolhoeken blijven klein, evenals de uitrijhoeken en het snelheidsverlies van de voertuigen als gevolg van de botsing. Het "rear-end" effect treedt bij alle voertuigen op.

4.2.2. 2-golfrail, vervormingsafstand 40 cm

De resultaten van de uitgevoerde simulaties zijn weergegeven in Tabel 9 en 10. Vergroting van de vervormingsafstand van 29 cm naar 40 cm heeft tot gevolg dat alleen nog het zwaarste voertuig (VOLVO 244) de tunnelwand raakt. Voor het overige zijn de resultaten gelijkwaardig aan de serie simulaties van par. 4.2.1.

4.2.3. 3-golfrail, vervormingsafstand 40 cm

De resultaten van de uitgevoerde simulaties zijn weergegeven in Tabel 11 en 12. Vergroting van de liggerstijfheid, van een 2-golfrail naar een 3-golfrail heeft tot gevolg dat geen van de voertuigen de tunnelwand raakt. Voor het overige zijn de resultaten gelijkwaardig aan de beide vorige series simulaties, met dien verstande dat het lichtste voertuig er beter van af komt. De ASI-waarden zijn bij het "rear-end" effect echter altijd groter dan 1,6.

4.2.4. Vergelijking van de drie series simulaties

Vergroting van de vervormingsafstand van 29 cm naar 40 cm heeft niet een duidelijk gunstig effect op de afloop van een botsing. Het vergroten van de liggerstijfheid heeft alleen voor het lichtste voertuig een gunstig effect. Voor de drie andere voertuigen zijn de resultaten gelijkwaardig (zie Grafiek 3).

Uit de Tabellen 7, 9 en 11 blijkt dat het "rear-end" effect grote invloed heeft op de grootte van de ASI-waarden. Het vergroten van de liggerstijfheid heeft een reducerend effect op de ASI-waarden.

4.3. Discussie

De uitgevoerde simulaties laten duidelijk zien dat de ernst van een aanrijding tegen een constructie met plooibare afstandhouders geringer is dan tegen een geleidebarrier. Een aanrijding tegen de verschillende typen normale geleiderailconstructies is daarentegen veiliger. In Grafiek 4 is dit weergegeven door de met x gemerkte simulatie-uitkomsten.

Uit de resultaten kan voorzichtig de conclusie worden getrokken dat het aanbeveling verdient om te kiezen voor een korte plooibare afstandhouder

in combinatie met een stijvere ligger. Ook constructief gezien verdient deze keuze de voorkeur, omdat dan de afstandhouder vormvast kan worden uitgevoerd. Bij een te grote vervormingsafstand is het mogelijk dat de plooibare afstandhouder in de beide andere richtingen dan de vervormingsrichting te slap wordt. Nader onderzoek zal moeten uitwijzen of dit inderdaad het geval is. Tevens moet dan worden nagegaan op welke manier een afstandhouder geconstrueerd moet worden die tijdens het vervormen een progressieve vervormingskracht heeft (gunstig voor de lichte personenauto).

In par. 3.1 is onderscheid gemaakt naar constructies voor gebruik in tunnels en voor gebruik op palen (bijvoorbeeld bij geluidwerende voorzieningen). Gezien de resultaten van de simulaties wordt aangenomen dat het toepassen van plooibare afstandhouders bij constructies op palen gelijkwaardige resultaten zullen opleveren. Als voorwaarde geldt dat de paalweerstand (veel) groter moet zijn dan de vervormingskracht van de plooibare afstandhouder.

Uit de plots van de ASI-waarden blijkt dat deze ter plaatse van de zwaartepunten van de voertuigen bij de primaire botsing altijd boven de 1,6 uitkomen, en op de plaats van de bestuurder en/of de achterpassagier er onder. De verschillen worden veroorzaakt door de optredende hoeksnelheid en de afstand tot het zwaartepunt van het voertuig. De ASI-waarden, veroorzaakt door de secundaire botsing, zijn altijd hoger dan 1,6. De invloed van het "rear-end" effect op de achterpassagier is altijd groter dan op de bestuurder, vanwege de grotere afstand van de plaats van de achterpassagier tot het zwaartepunt van het voertuig. De grootte van de ASI-waarde wordt mede bepaald door de grootte van de vervormingskracht bij het begin van de botsing. Hoe lager deze kracht is, hoe lager de ASI-waarde zal zijn. Dit is vooral gunstig voor de lichtere voertuigen. Om binnen redelijke vervormingsafstanden te blijven zou een afstandhouder waarbij de vervormingskracht progressief toeneemt een oplossing kunnen zijn. Een tweede oplossing zou, al dan niet in samenhang hiermee, het vergroten van de liggerstijfheid kunnen zijn.

5. VERGELIJKING VAN DE PLOOIBARE-AFSTANDHOUDERCONSTRUCTIE MET GELEIDERAIL-
EN BETONNEN CONSTRUCTIE

In Grafiek 2 zijn de resultaten weergegeven van simulaties met de betonnen New Jersey Barrier en een stijve geleiderailconstructie, alsmede de proefresultaten uit deze literatuurstudie. Twee van de proeven (gemarkt met *) zijn uitgevoerd met vergelijkbare ook in de simulaties gebruikte middenklasse personenauto's. Uit de grafiek blijkt dat een geleiderailconstructie met plooibare afstandhouder beter functioneert dan de betonnen constructie, maar minder goed dan een stijve geleiderailconstructie. Dat de constructie met plooibare afstandhouders minder goed reageert dan een stijve geleiderailconstructie ligt aan het feit dat de plooibare afstandhouder een (veel) grotere beginweerstand heeft voordat die gaat vervormen. In het begin reageert de constructie min of meer als een starre constructie. Ook hier geldt dat zwaardere voertuigen (Amerikaanse personenauto's) er beter van afkomen dan lichtere voertuigen (Europese personenauto's).

6. CONCLUSIES

- De ernst van een aanrijding tegen een geleiderailconstructie met plooi-bare afstandhouders is kleiner dan de ernst van een aanrijding tegen een geleidebarrier.
- De ernst van een aanrijding tegen een geleiderailconstructie met plooi-bare afstandhouders is groter dan de ernst van een aanrijding tegen een stijve geleiderailconstructie.
- Een plooi-bare afstandhouder met een oplopende vervormingskracht zal een gunstig effect hebben op de werking van de constructie.
- Een grotere liggerstijfheid (3-golfraail) heeft een gunstig effect op de werking van de constructie.
- Een aanrijding met een lichte personenauto tegen een geleiderailconstructie met plooi-bare afstandhouders zal altijd (te) hoge ASI-waarden opleveren.
- Uit de simulaties blijkt dat de plooi-bare afstandhouder in samenwerking met de ligger een vloeiende uitbuiging geeft en dat de energie-teruggave gering is.
- De plooi-bare afstandhouder moet in verticale richting voldoende stijfheid hebben om de ligger op hoogte te houden. Een kleine vervormingsafstand verdient daarom de voorkeur.

LITERATUUR

Beason, W.L. et al. (1986). A low-maintenance, energy-absorbing bridge rail. In: TRR 1065.

Giavotto, V. et al. (1967). Highway safety barriers; Theory and applications. SINA Report nr 1.

Kasinskas, M.M. & Dougan, C.E. (1976). Construction of frangible-tube, energy-absorbing bridge barrier system. In: TRR 566.

Kimball, C.E. et al. (1976a). Development of a new collapsing-ring bridge rail system. In: TRR 566.

Kimball, C.E. et al. (1976b). Full-scale tests of a modified collapsing-ring bridge rail system. In: TRR 594.

Mcdonald, M.M. (1989). Three car impact tests on the combined open box beam safety fence and timber noise barrier. TRRL RR 119.

Michie, J.D. (1981). Recommended procedures for the safety performance evaluation of highway appurtenances. NCHRP Report 230.

Schoon, C.C. (1975). Aanrijdingen met in stijfheid verschillende typen geleiderailconstructies. SWOV R-85-63.

Schoon, C.C. et al. (1985). Aanrijdingen met de betonnen geleide-constructietypen General Motors en New Jersey. SWOV R-85-64.

Stocker, A.J. et al. (1970). Full-scale tests of the fragmenting-tube-type energy-absorbing bridge rail. In: HRR 302.

Walker, G.W. & Warner, C.Y. (1972). Crash test evaluation of strong-post, energy-absorbing guardrail using a lapped W-beam for transitions and median barriers. In: HRR 386.

Warner, C.Y. & Walker, G.W. (1971). Crash test performance of a prototype lightweight concrete energy-absorbing guardrail system. In: HRR 343.

Woolam, W.E. & Garza, L.R. (1970). Design, fabrication, and installation of a fragmenting-tube-type energy absorber in conjunction with a bridge rail. In: HRR 302.

AFBEELDINGEN 1 T/M 7

Afbeelding 1. Constructie met rubber afstandhouder

Afbeelding 2. Constructie met kruimelbeton afstandhouder 1

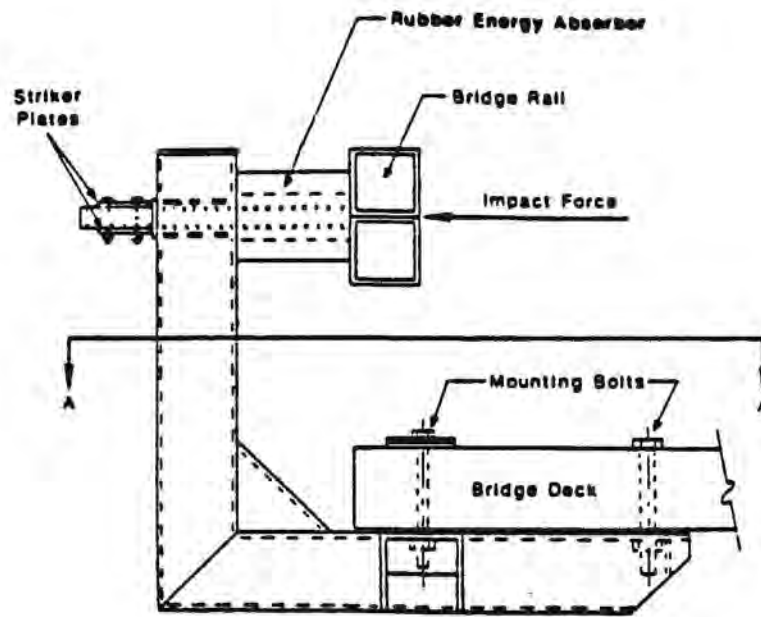
Afbeelding 3. Constructie met kruimelbeton afstandhouder 2

Afbeelding 4. Constructie met kruimelaluminium afstandhouder

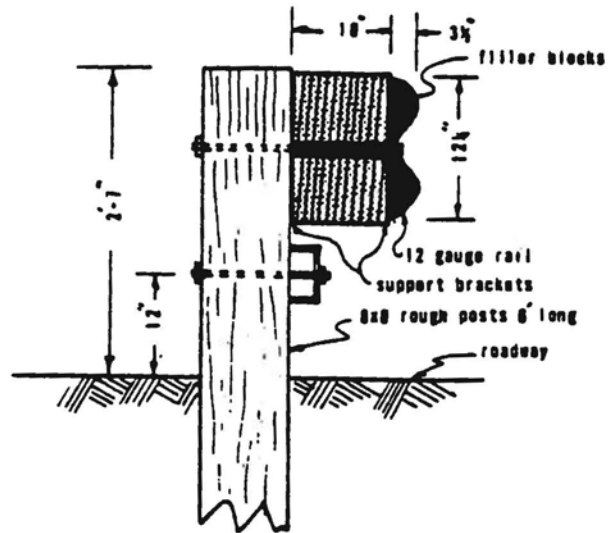
Afbeelding 5. Constructie met stalen afstandhouder SINA

Afbeelding 6. Constructie met stalen ring afstandhouder

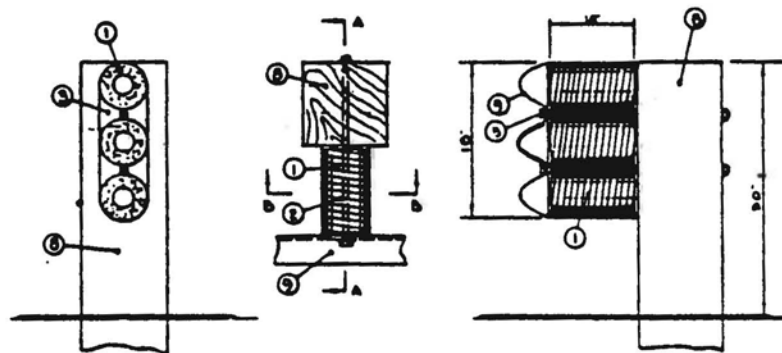
Afbeelding 7. Constructie met stalen hexagonale afstandhouder



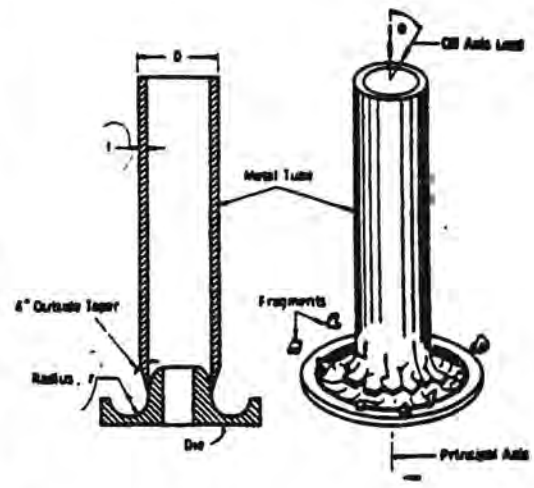
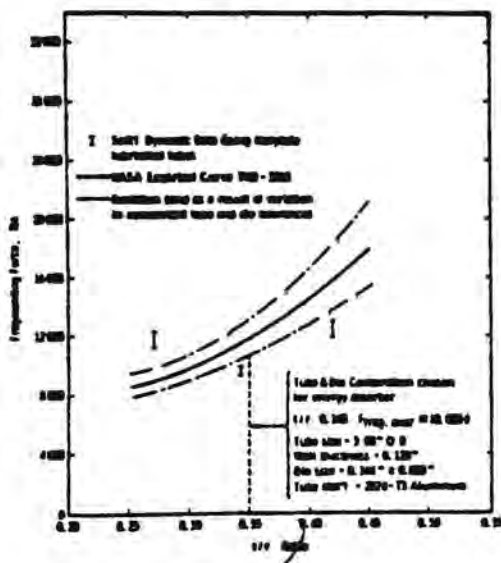
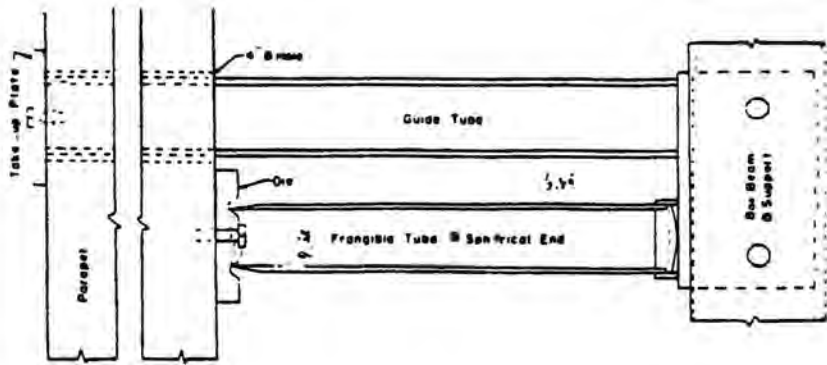
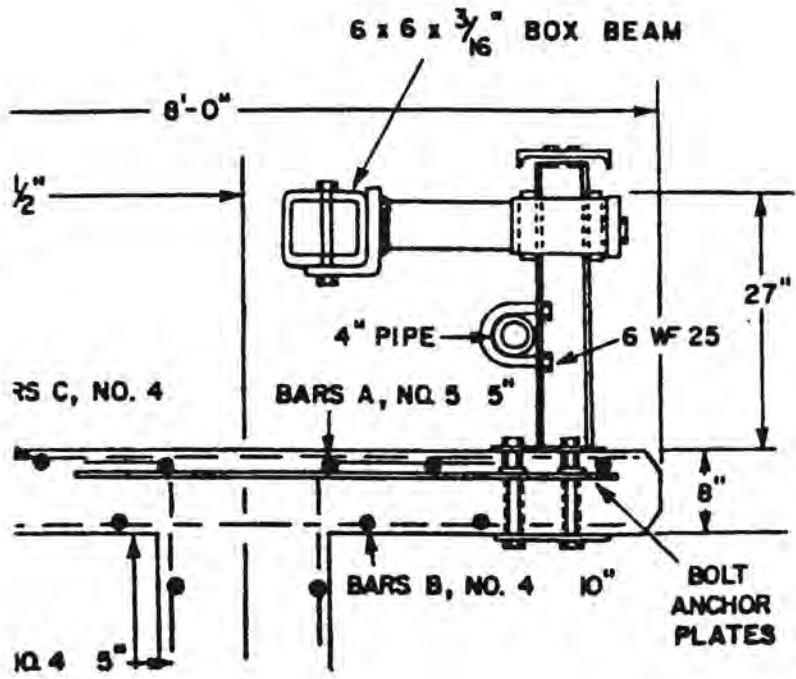
Afbeelding 1. Constructie met rubber afstandhouder



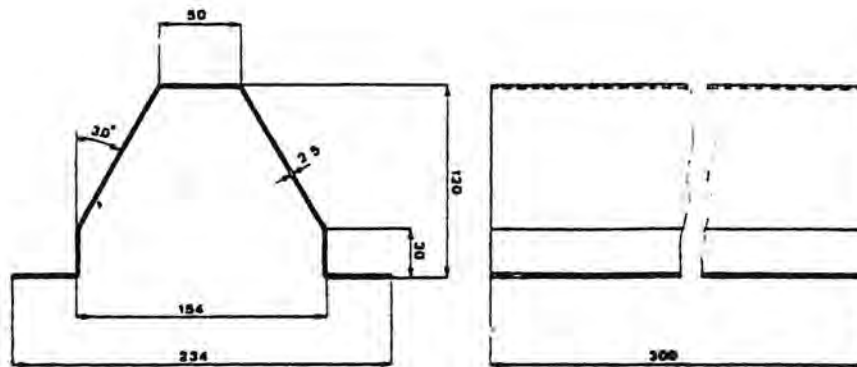
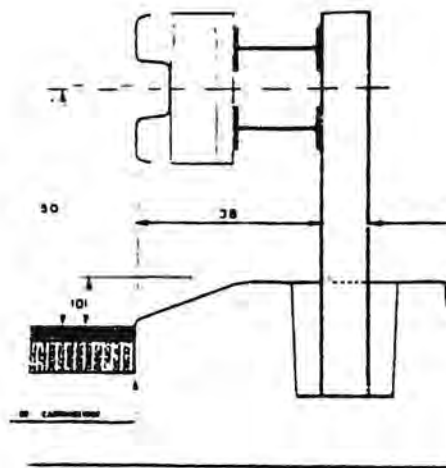
Afbeelding 2. Constructie met kruimelbeton afstandhouder 1



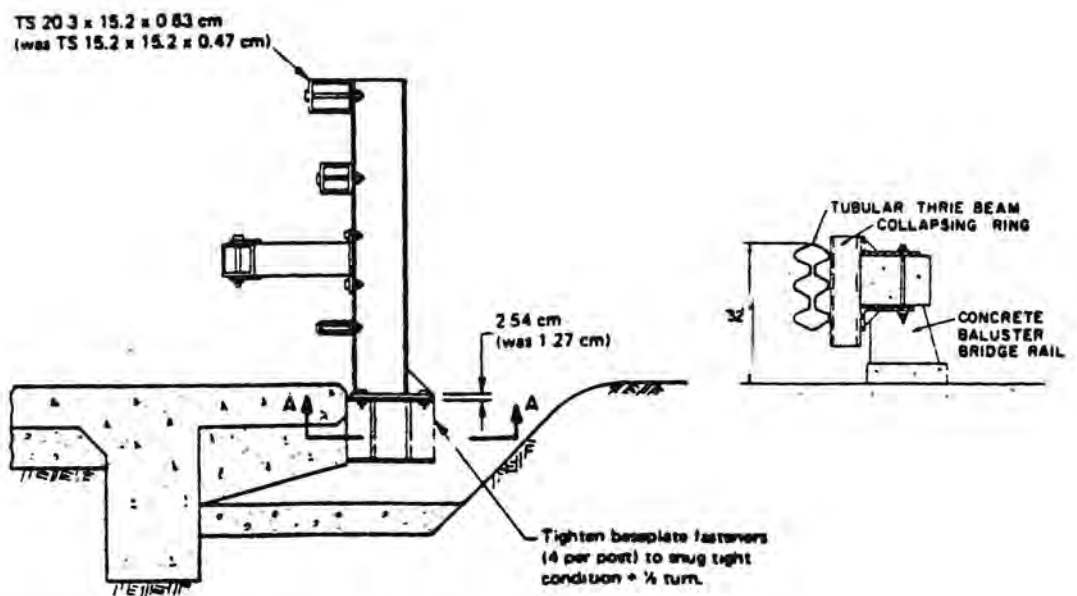
Afbeelding 3. Constructie met kruimelbeton afstandhouder 2



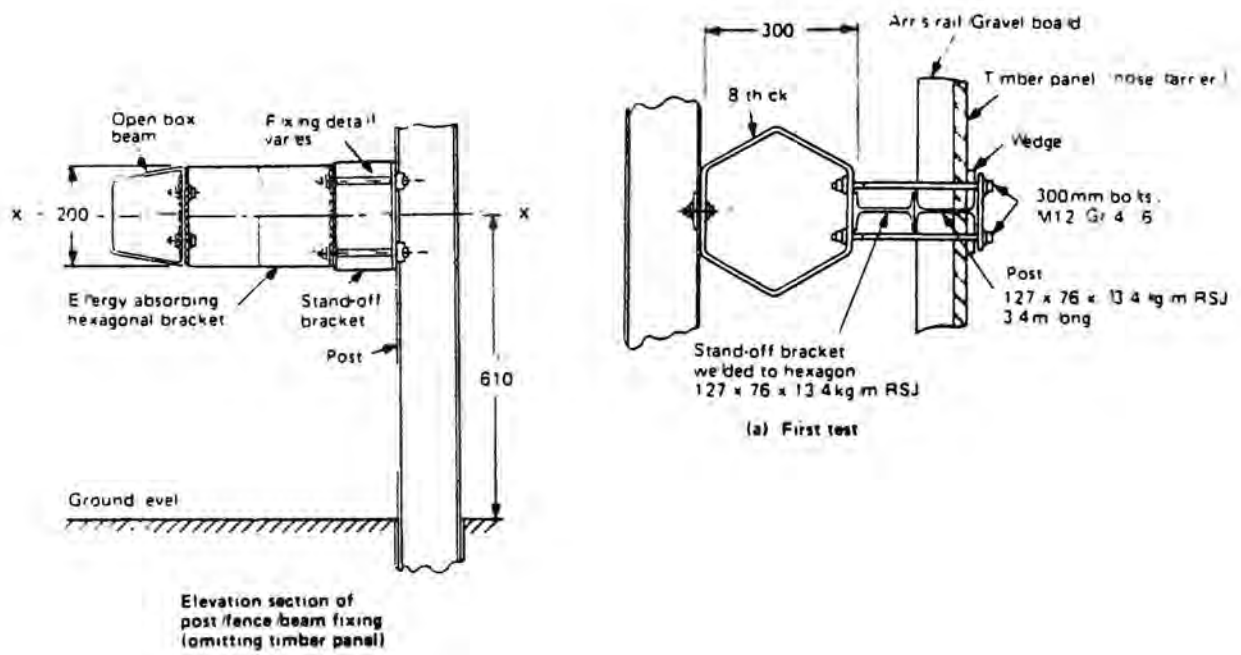
Afbeelding 4. Constructie met kruimelaluminium afstandhouder



Afbeelding 5. Constructie met stalen afstandhouder SINA



Afbeelding 6. Constructie met stalen ring afstandhouder



Afbeelding 7. Constructie met stalen hexagonale afstandhouder

TABELLEN 1 T/M 12

Tabel 1. Overzicht proeven met personenauto's

Tabel 2. Proefresultaten met personenauto's

Tabel 3. Overzicht proeven met bussen

Tabel 4. Proefresultaten met bussen

Tabel 5. Overzicht proeven met trekkers met oplegger

Tabel 6. Proefresultaten van trekkers met oplegger

Tabel 7. Resultaten simulaties plooibare afstandhouder, max. 29 cm vervorming en 2-golf rail

Tabel 8. Resultaten simulaties plooibare afstandhouder, max. 29 cm vervorming en 2-golf rail

Tabel 9. Resultaten simulaties plooibare afstandhouder, max. 40 cm vervorming en 2-golf rail

Tabel 10. Resultaten simulaties plooibare afstandhouder, max. 40 cm vervorming en 2-golf rail

Tabel 11. Resultaten simulaties plooibare afstandhouder, max. 40 cm vervorming en 3-golf rail

Tabel 12. Resultaten simulaties plooibare afstandhouder, max. 40 cm vervorming en 3-golf rail

Constr.	Massa (kg)	Inrij snelh (km/u)	Inrij hoek (grd)	Energie dwars (kgfm)	Verv K afst h (kgf)	Gelijkm belast . (kgf/m)	
Afb. 1	818	101	16	2493	-	-	
	2043	98	25.5	14409	-	-	
Afb. 2	2085	64	28	7456	-	-	
	1587	88	28	10834	-	-	
Afb. 3	2131	76	30	12102	-	-	
	1723	79	25	7553	-	-	
	1949	92	24	10733	-	-	
	1893	80	21	6119	-	-	
	1451	97	21	6895	-	-	
Afb. 4	1451	94	25	9019	4530	1785	
	2140	88	25	11754	4530	1785	
	707	74	25	2750	4530	1785	
Afb. 5	810	80	19	2161	3100	2065	
Afb. 6a	1795	97	24.7	11557	2360	967	*
	1857	97	25.9	13065	1320	540	
	1772	90	23.9	9378	1320	540	
	947	90	23.5	4787	1320	540	
	1998	100	22.7	11694	1320	540	
Afb. 6b	1020	93	17.1	2943	1790	666	#
	2041	97	25	13233	1790	666	#
Afb. 7	1461	118	20	9150	2600	1080	
	1418	118	21	9717	2600	1080	
	1011	115	20	6034	2600	1080	

* ring 1,27 cm dik i.p.v. 0,95 cm

ring 0,3175 cm dik, diameter 15,24 cm. 3-golf rail (2x)

Afb. 1. Constructie met rubber afstandhouder

Afb. 2. Constructie met kruimelbeton afstandhouder 1

Afb. 3. Constructie met kruimelbeton afstandhouder 2

Afb. 4. Constructie met kruimelaluminium afstandhouder

Afb. 5. Constructie met stalen afstandhouder SINA

Afb. 6. Constructie met stalen ring afstandhouder

Afb. 7. Constructie met stalen hexagonale afstandhouder

Tabel 1. Overzicht proeven met personenauto's

Constr.	Uitrij hoek (grd)	dV (km/u)	Vertraging		Uitbuiging			ASI	
			lon (m/sec ²)	lat	max	stat	dyn (cm)		
Afb. 1	0.5	12.5	-	-	<25	1.5	11.7	-	
	2.0	23.1	-	-		2.4	18.3	-	
Afb. 2	12	18.5	1.7	2.4	25	30.9	37.6	1	&
	7	52	3.7	2.3		45.7	55.6	1.6	&
Afb. 3	10	19	2.7	3.0	25	-	20.3	1.	ca
	10	16	2.5	2.6		-	15.2	0.8	
	10	24	4.0	4.5		-	20.3	1.5	
	8	15	-	-		-	12	-	
	12	8	2.5	6.0		-	12.7	1.8	
Afb. 4	-	-	-	4.5	45	8	14	-	
	30	-	-	3.7		20	37.5	-	
	-	-	-	3.7		0	0	-	
Afb. 5	15	-	-	7.8	12	1.1	2.2	-	
Afb. 6a	12	27.4	6.1	8.5	45	17.9	22	1.9	*
	5.6	38.6	6.8	6.6		-	-	1.6	
	12	22.7	5.6	6.6		34.9	43	1.5	&
	13	23.7	6.5	12.2		10.2	12.5	2.6	
	7.1	17.4	5.3	7.7	45@	48.3	53.3	1.7	&
Afb. 6b	6.8	-	4.1	8.4	15	-	1.5	1.8	#
	6	-	5.9	11.7		-	12.8	2.5	&#
Afb. 7	1	32	2.9	3.8	30	27	49	-	&
	0	28	2.9	5.5		27	41	-	&
	1	19	3.8	5.0		21	30	-	&

* ring 1,27 cm dik i.p.v. 0,95 cm

waar geen ASI waarden worden gegeven, zijn het gemiddelde vertragingen maar niet over 50 ms.

& paalverplaatsing/vervorming

@ paal/brug verbinding zwakker

ring 0,3175 cm dik, diameter 15,24 cm, 3-golf rail (2x)

Tabel 2. Proefresultaten met personenauto's

Constr.	Massa (kg)	Inrij snelh (km/u)	Inrij hoek (grd)	Energie dwars (kgfm)	Verv.K. afst.h. (kgf)	Gelijkm belast. (kgf/m)	
Afb. 5	12674	75	10	8294	3100	2065	&
					ca	ca	
Afb. 6	8618	55	7.5	1765	2360	967	*
	8618	90	7.3	4442	2360	967	*
	8618	98	13.9	18785	1320	540	&
	18160	87	15.1	36432	1320	540	&
	18160	87	19.1	58413	1320	540	&

* ring 1,27 cm dik i.p.v 0,95 cm.

& paalverplaatsing/vervorming

Tabel 3. Overzicht proeven met bussen

Constr.	Uitrij hoek (grd)	dV (km/u)	Vertraging		Uitbuiging			ASI	
			lon	lat	max	stat	dyn		
	(m/sec ²)	(m)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)		
Afb. 5	ca 9	-	-	1.7	12	13.5	18.0	-	&
Afb. 6a	0.6	11.9	0.9	0.4	-	1.6	0.2	*	
	2		1.3	2.7	45	-	10.6	0.6	*
	2	11.1	2.1	3.9		-	51.3	0.8	&
	7.9	6.7	1.2	2.2		88.9	121.9	0.5	&
	13.2	18.5	1.4	2.6		137.2	153.4	0.6	&

* ring 1,27 cm dik i.p.v. 0,95 cm

& paalverplaatsing/vervorming

Tabel 4. Proefresultaten met bussen

Constr.	Massa (kg)	Inrij snelh (km/u)	Inrij hoek (grd)	Energie dwars (kgfm)	Verv.K. afst.h. (kgf)	Gelijkm belast. (kgf/m)	
					ca	ca	
Afb. 6a	31780	71	10	19213	1300	545	&
	18160	92	15.6	43431	1300	545	&
	18160	89	19	59558	1300	545	&

& paalverplaatsing/vervorming

Tabel 5. Overzicht proeven van trekkers met oplegger

Constr.	Uitrij hoek (grd)	dV (km/u)	Vertraging		Uitbuiging		ASI		
			lon (m/sec2)	lat	max	stat dyn			
Afb. 6a	3	2.2	3.0	5.0	24.9	30.0	1.1	&	
	3	8.5	1.1	7.8	45	135.61	45.8	1.6	&
	11	14	3.6	8.9	58.91	21.9	1.4	&	

& paalverplaatsing/vervorming

Tabel 6. Proefresultaten van trekkers met oplegger

Voertuig	Dyn uitb. (cm)	ASI			Amax lat (m/s ²)	Vrtg raakt muur	Ener gie dwars (kgfm)
		zwpt 1 botsing/rear	best 2	pass 3 -end			
VOLVO 244 1245 kg	25	1.7 2.0	1.7 2.3	1.0 3.5	15	ja	5728
VW golf 990 kg	21	2.0 1.9	1.3 3.3	0.9 5.1	22	ja	4554
VW golf 750 kg	15	2.1 2.4	1.4 4.1	1.0 6.6	45	neen	3450
FIAT 126 570 kg	10	2.1 3.1	2.5 2.7	1.2 5.3	50	neen	2622

N.B. De lengte van de uitbuiging bedraagt altijd 1200 cm. Er vindt altijd een tweede botsing plaats.

Tabel 7. Resultaten simulaties plooibare afstandhouder, max 29 cm vervorming en 2-golf rail

Voertuig	Rolhoek con weg (grd)		Uitrij hoek (grd)	Uitrij snelheid (km/u)	Snelheid verschil (km/u)
VOLVO 244 1245 kg	-1	-6	2	87	13
VW golf 990 kg	-2	-2	4	88	12
VW golf 750 kg	-2	-3	5	88	12
FIAT 126 570 kg	-6	-6	4	89	11

Tabel 8. Resultaten simulaties plooibare afstandhouder, max 29 cm vervorming en 2-golf rail

Voertuig	Dyn uitb. (cm)	ASI			Amax lat m/s ²	Vrtg raakt muur	Ener gie dwars (kgfm)
		zwpt 1 botsing/rear-end	best 2	pass 3			
VOLVO 244 1245 kg	28	1.9 2.3	1.7 2.7	1.1 4.4	42	ja	5728
VW golf 990 kg	23	2.0 1.8	1.3 3.0	0.9 4.8	17	neen	4554
VW golf 750 kg	15	2.2 2.0	1.5 3.4	1.1 5.4	22	neen	3450
FIAT 126 570 kg	10	2.2 3.4	2.7 3.0	2.3 5.3	50	neen	2622

N.B. De lengte van de uitbuiging bedraagt altijd 1200 cm. Er vindt altijd een tweede botsing plaats.

Tabel 9. Resultaten simulaties plooibare afstandhouder, max 40 cm vervorming en 2-golf rail

Voertuig	Rolhoek con weg (grd)		Uitrij hoek (grd)	Uitrij snelheid (km/u)	Snelheid verschil (km/u)
	-	+			
VOLVO 244 1245 kg	-2	2	3	87	13
VW golf 990 kg	-2	-3	6	88	12
VW golf 750 kg	-2	-2	7	87	13
FIAT 126 570 kg	-2	-6	6	90	10

Tabel 10. Resultaten simulaties plooibare afstandhouder, max 40 cm vervorming en 2-golf rail

Voertuig	Dyn uitb. (cm)	ASI			Amax lat m/s ²	Vrtg raakt muur	Ener gie dwars (kgfm)
		zwpt 1 botsing/rear-end	best 2	pass 3			
VOLVO 244 1245 kg	25	2.0 2.0	1.9 2.3	2.1 3.7	17	neen	5728
VW golf 990 kg	16	2.3 2.2	1.4 3.6	1.1 5.5	45	neen	4554
VW golf 750 kg	10	2.5 2.4	1.5 3.9	1.3 6.1	34	neen	3450
FIAT 126 570 kg	5	2.5 2.3	3.0 1.9	1.4 3.6	40	neen	2622

N.B. De lengte van de uitbuiging bedraagt altijd 1200 cm. Er vindt altijd een tweede botsing plaats.

Tabel 11. Resultaten simulaties plooibare afstandhouder, max 40 cm vervorming en 3-golf rail

Voertuig	Rolhoek con (grd)	weg	Uitrij hoek (grd)	Uitrij snelheid (km/u)	Snelheid verschil (km/u)
VOLVO 244 1245 kg	-2	-6	5	88	12
VW golf 990 kg	-8	-5	5	86	14
VW golf 750 kg	-4	-3	5	87	13
FIAT 126 570 kg	-1	-4	6	85	15

Tabel 12. Resultaten simulaties plooibare afstandhouder, max 40 cm vervorming en 3-golf rail

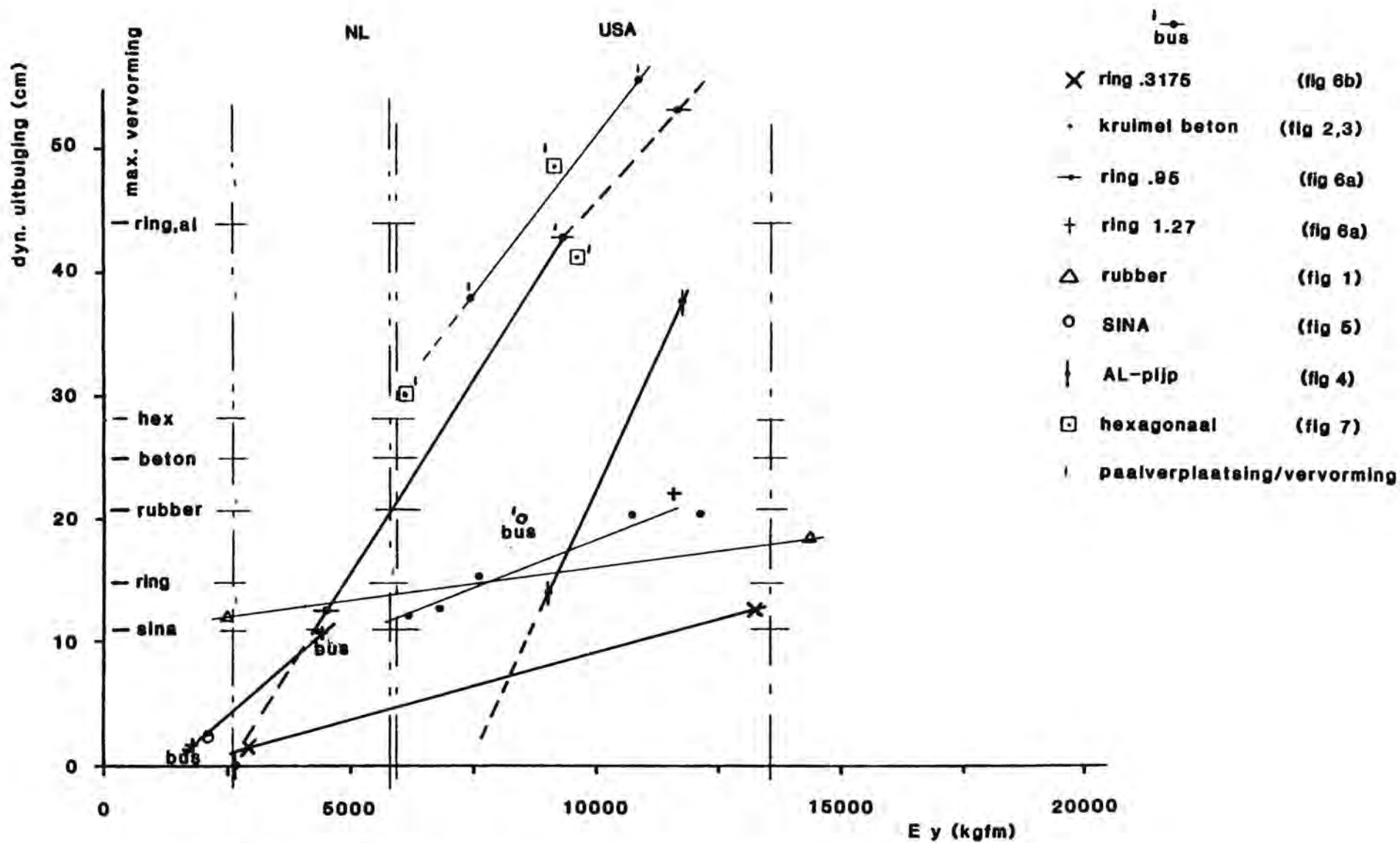
GRAFIEKEN 1 T/M 4

Grafiek 1. Dynamische vervormingsafstand van verschillende vervormbare afstandhouders tegen botsenergie in dwarsrichting

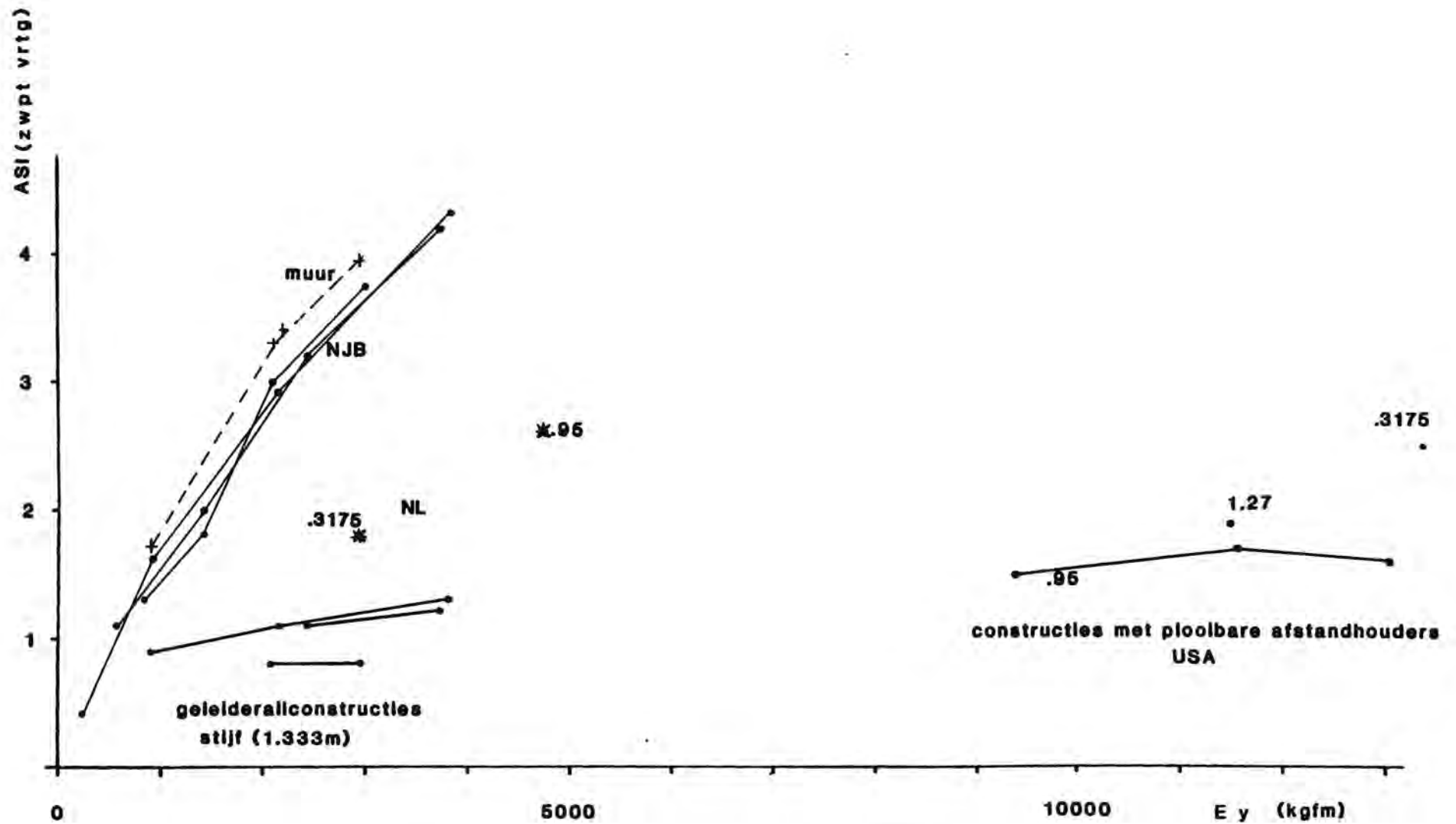
Grafiek 2. Vergelijking ASI-waarden van de plooibare afstandhouder met de NJB- en de stijve geleiderailconstructie

Grafiek 3. Dynamische vervormingsafstand van verschillende vervormbare afstandhouders tegen botsenergie in dwarsrichting

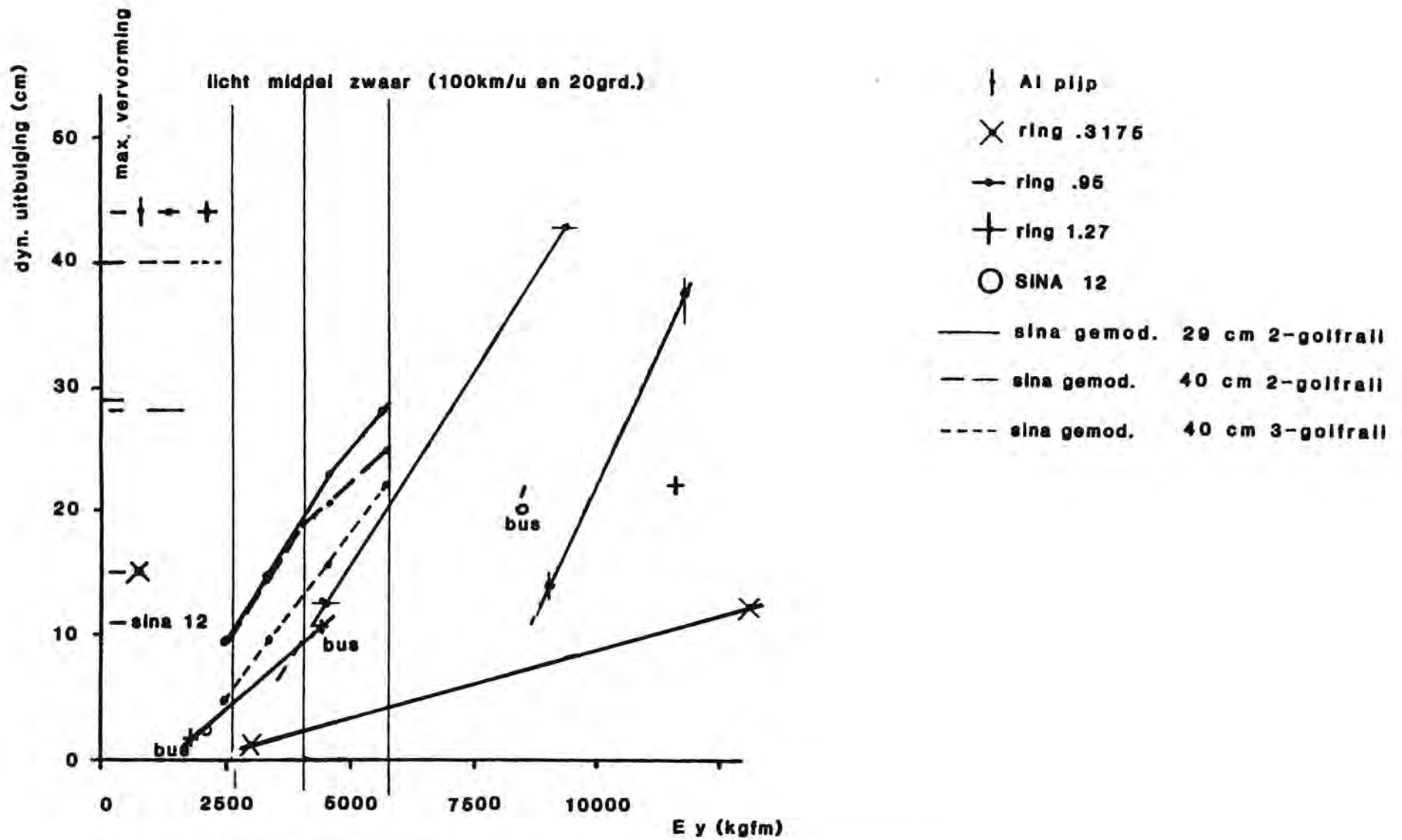
Grafiek 4. Vergelijkbare ASI-waarden van de plooibare afstandhouder met de NJB- en de stijve geleiderailconstructie



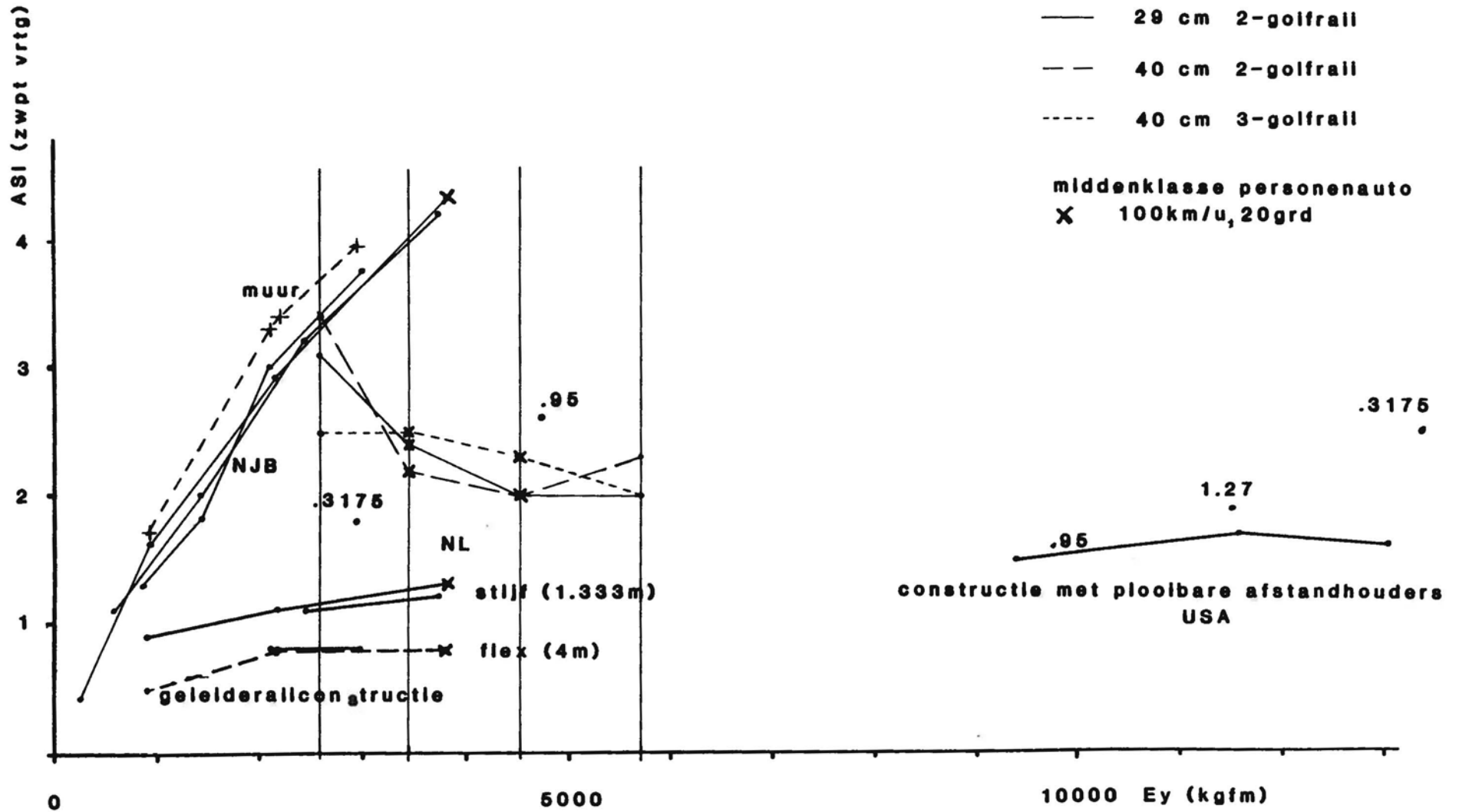
Grafiek 1. Dynamische vervormingsafstand van verschillende vervormbare afstandhouders tegen botsenergie in dwarsrichting



Grafiek 2. Vergelijking ASI-waarden van de plooibare afstandhouder met de NJB- en de stijve geleiderailconstructie



Grafiek 3. Dynamische vervormingsafstand van verschillende vervormbare afstandhouders tegen botsenergie in dwarsrichting



Grafiek 4. Vergelijkbare ASI-waarden van de plooibare afstandhouder met de NJB- en de stijve geleiderailconstructie

PLOTS 1 T/M 8

2-golfraail; vervormingsafstand 29 cm

Plot 1. Verloop botsing Volvo 244

Plot 2. Verloop ASI-waarden Volvo 244

Plot 3. Verloop botsing VW Golf (zwaar)

Plot 4. Verloop ASI-waarden VW Golf (zwaar)

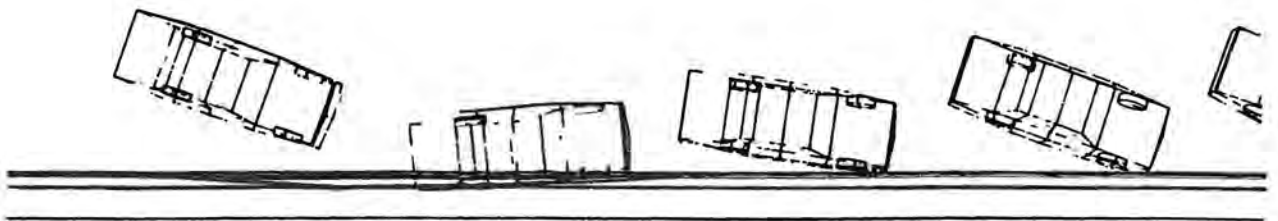
Plot 5. Verloop botsing VW Golf (licht)

Plot 6. Verloop ASI-waarden VW Golf (licht)

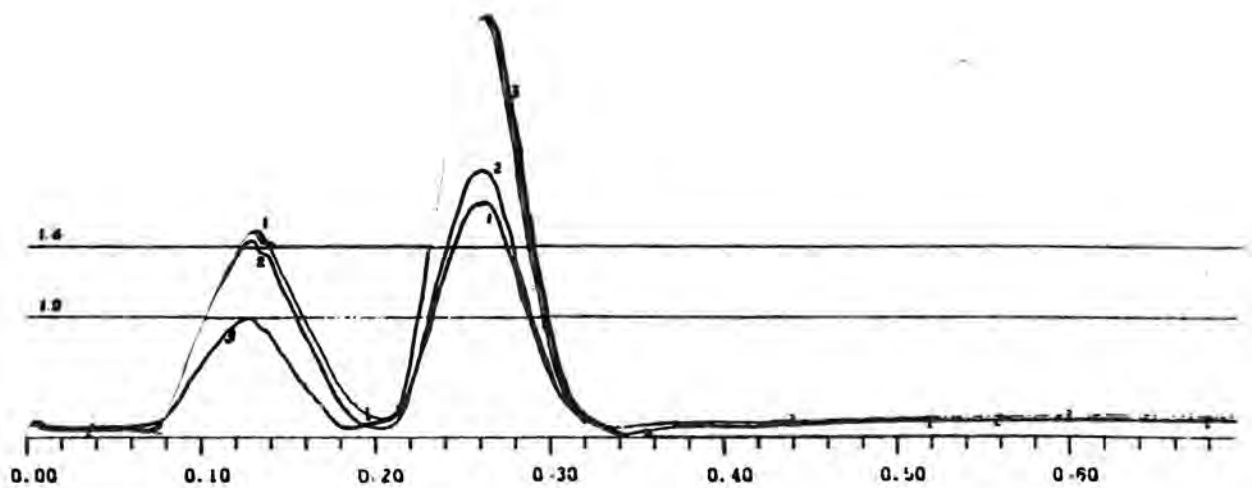
Plot 7. Verloop botsing Fiat 126

Plot 8. Verloop ASI-waarden Fiat 126

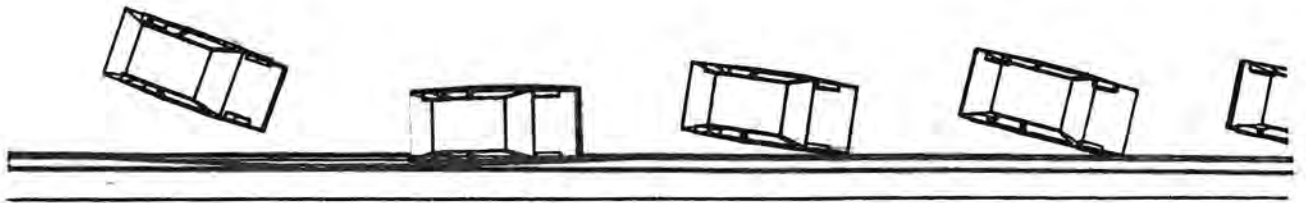
N.B. In de plots met de ASI-waarden geeft lijn 1 de ASI-waarde van het zwaartepunt van het voertuig weer, lijn 2 de ASI-waarde van de bestuurdersplaats en lijn 3 de ASI-waarde van de passagiersplaats links achter.



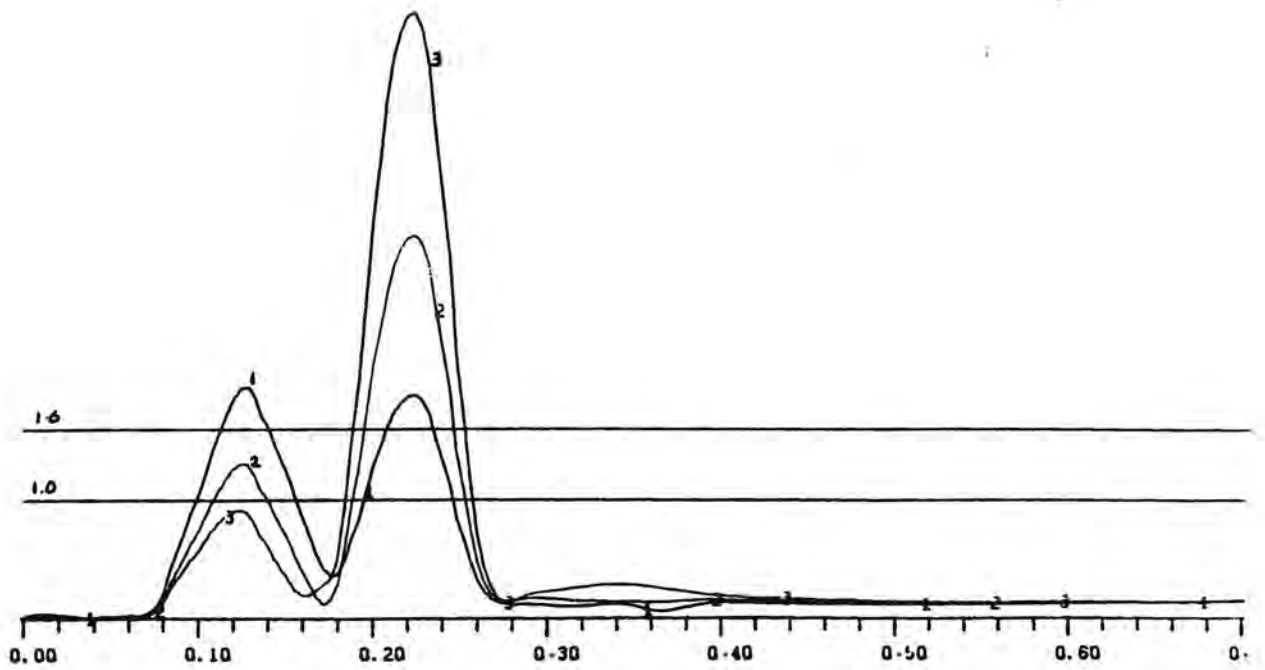
Plot 1. Verloop botsing Volvo 244



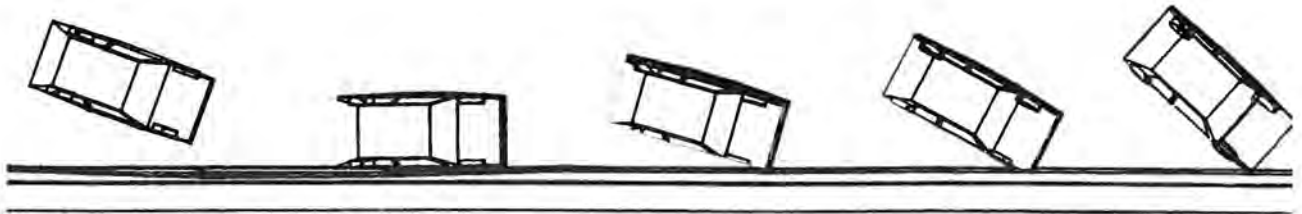
Plot 2. Verloop ASI-waarden Volvo 244



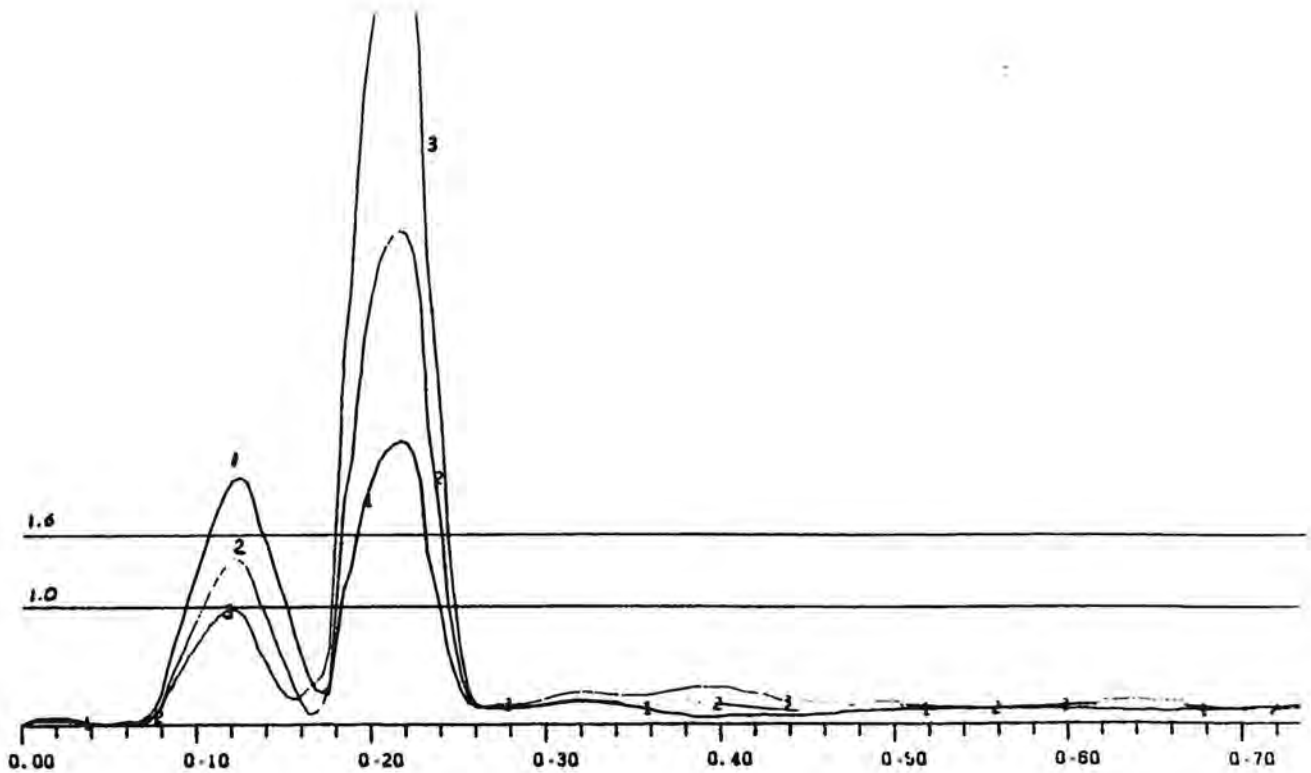
Plot 3. Verloop botsing VW Golf (zwaar)



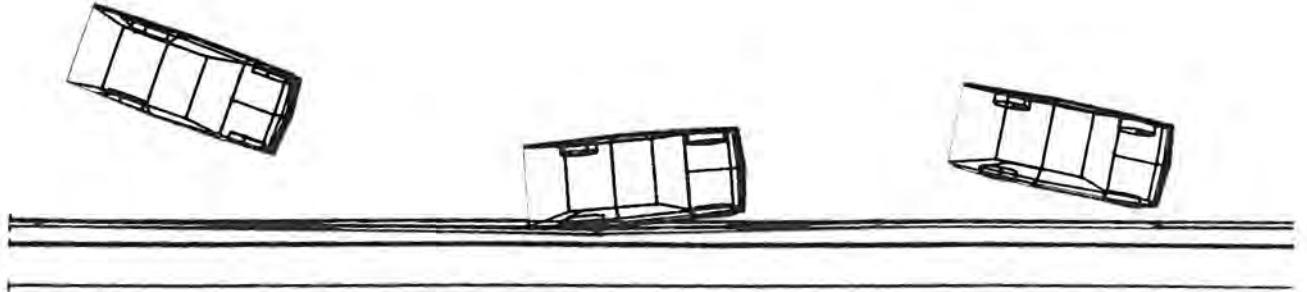
Plot 4. Verloop ASI-waarden VW Golf (zwaar)



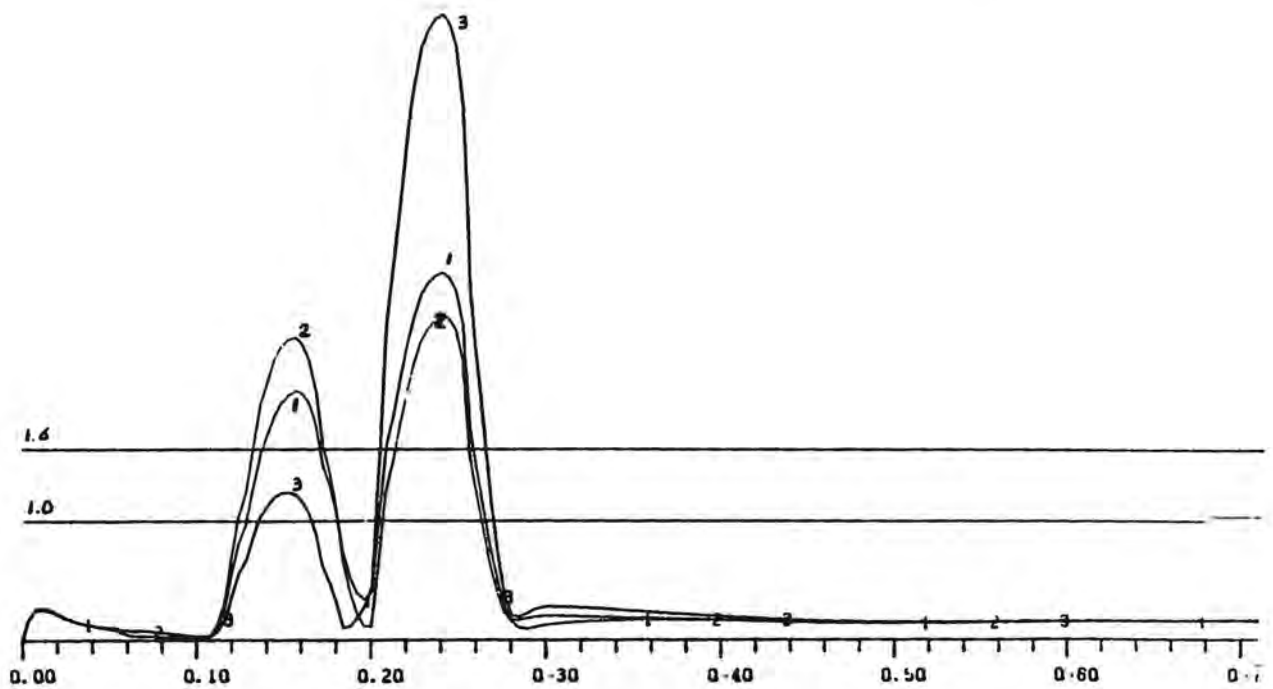
Plot 5. Verloop botsing VW Golf (licht)



Plot 6. Verloop ASI-waarden VW Golf (licht)



Plot 7: Verloop botsing Fiat 126



Plot 8: Verloop ASI-waarden Fiat 126

BIJLAGEN 1 T/M 3

Bijlage 1. Berekening vervormingskracht plooibare afstandhouder

Bijlage 2. Berekening minimale botscondities

Bijlage 3. Vervorming bij plooibare afstandhouders (Beschreven door Giavotto et al. (1967) en Kimball et al. (1976a en 1976b))

BIJLAGE 1.

BEREKENING VERVORMINGSKRACHT PLOOIBARE AFSTANDHOUDER

Tabel A geeft een overzicht van de proefvoertuigen, de inrijcondities en de sterkte van de plooibare afstandhouder. In Tabel B zijn de testresultaten verzameld die geschikt zijn voor de bepaling van de vervormingskracht die in de simulaties gebruikt zal worden. Grafiek 1 geeft een grafische weergave van deze resultaten.

De verbindingslijnen veronderstellen een rechtlijnig verband tussen toename in energie en toename in uitbuiging. Deze veronderstelling is gebaseerd op een constante vervormingskracht van de vervormbare afstandhouder. Tevens mag het verschil in inrijhoek niet te groot zijn en er mag geen paalvervorming of -verplaatsing zijn opgetreden.

Als voorbeeld worden de proefresultaten van de constructie met de kruimelaluminium afstandhouders (Afbeelding 4) gebruikt. De proef met het lichtste voertuig heeft geen uitbuiging. De aanvangsvervormingsenergie van de constructie is dus groter dan de botsenergie van het voertuig van deze proef, meer dan 2750 kgfm. Uit de gegevens van de andere twee proeven is deze energie te berekenen. Het verschil in botsenergie gedeeld door het verschil in uitbuiging geeft de benodigde energie voor 1 cm uitbuiging. Vermenigvuldigd met de uitbuiging geeft dit de benodigde energie voor die uitbuiging. Het verschil van de botsenergie en de uitbuigenergie is de aanvangsvervormingsenergie.

$$\text{Vervormingsenergie voor 1 cm} \quad \frac{11754 - 9019}{37.5 - 14} = 116 \text{ kgfm}$$

$$\text{Voor 14 cm} \quad 14 \times 116 = 1629 \text{ kgfm}$$

$$\text{Aanvangsvervormingsenergie} \quad 9019 - 1629 = 7390 \text{ kgfm}$$

Deze waarde moet overeenstemmen met punt 1 in Grafiek 1 van deze bijlage.

Voor de andere drie voorbeelden is op gelijke wijze de aanvangsvervormingsenergie te berekenen.

TABEL A. OVERZICHT PROEVEN MET PERSONENAUTO'S

Constr.	Massa (kg)	Inrij snelh (km/u)	Inrij hoek (grd)	Energie dwars (kgfm)	Verv.K. afst.h. (kgf)	Gelijkm belast. (kgf/m)	
Afb. 6a	1772 947	90 90	23.9 23.5	9378 4787	660 660	270 270	
Afb. 6b	1020 2041	93 97	17.1 25	2943 13233	900 900	335 335	# #
Afb. 4	1451 2140 707	94 88 74	25 25 25	9019 11754 2750	4530 4530 4530	1785 1785 1785	
Afb. 5	810	80	19	2161	3100	2065	

* ring 1,27 cm dik i.p.v. 0,95 cm

ring 0,3175 cm dik, diameter 15,24 cm, 3-golf rail

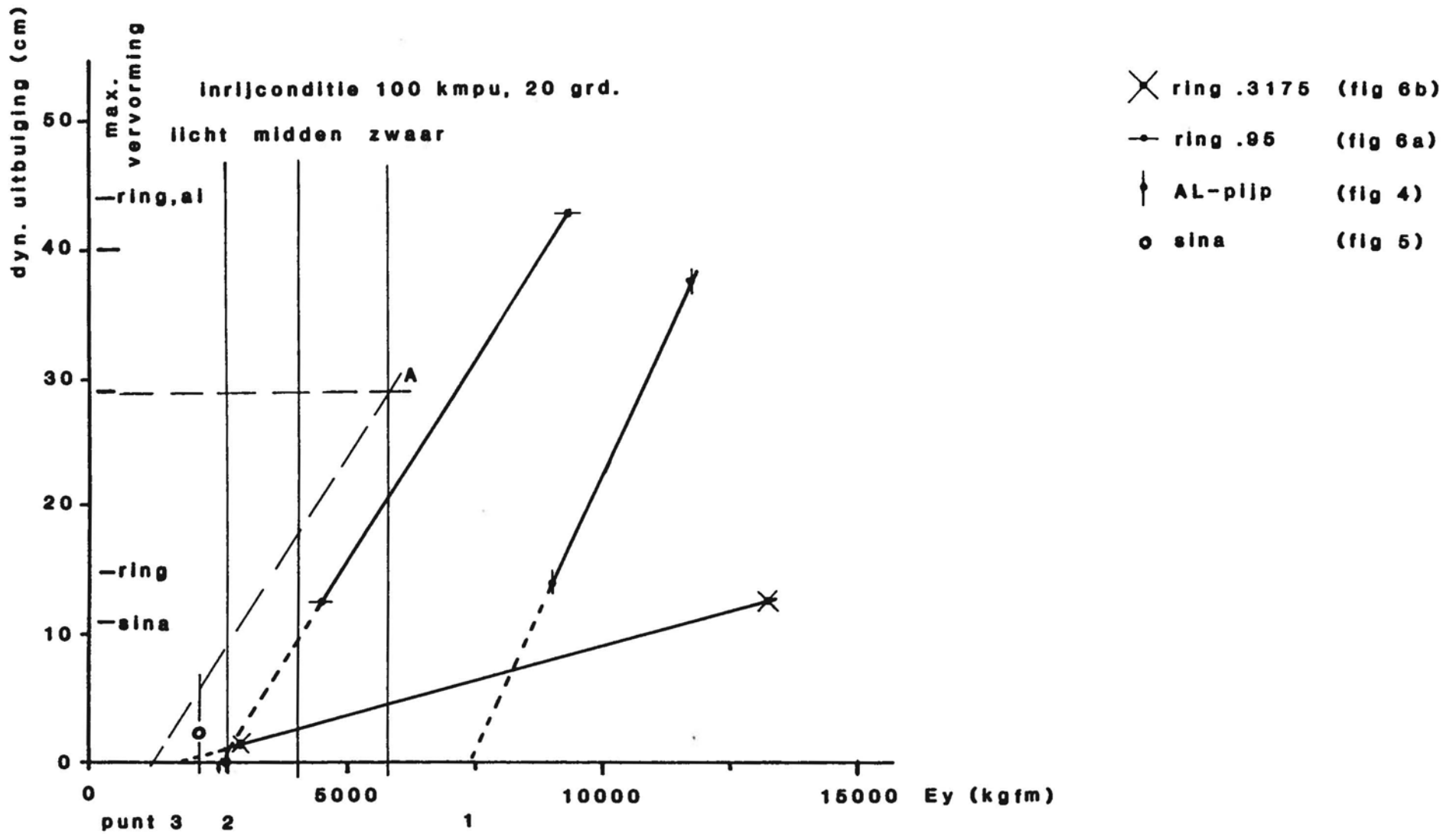
TABEL B. PROEFRESULTATEN MET PERSONENAUTO'S

Constr.	Uitr hoek (grd)	dV (km/u)	Vertraging lon lat (m/sec2)		Uitbuiging max stat dyn (cm)			ASI	
Afb. 6a	12 13	22.7 23.7	5.6 6.5	6.6 12.2	45 45	34.9 10.2	43. 12.5	1.5 2.6	&
Afb. 6b	6.8 6	- -	4.1 5.9	8.4 11.7	15 15	- -	1.5 12.8	1.8 2.5	# &#
Afb. 4	- 30 -	- - -	- - -	4.5 3.7 3.7	45 45 45	8 20 0	14 37.5 0	- - -	
Afb. 5	15	-	-	7.8	12	1.1	2.2	-	

* ring 1,27 cm dik i.p.v. 0,95 cm

ring 0,3175 cm dik, diameter 15,24 cm, 3-golf rail

& paalverplaatsing/vervorming



Grafiek: 1 Dynamische vervormingsafstand van verschillende plooibare afstandhouders tegen botsenergie in dwarsrichting.

Voor punt 2 : 2905 kgfm, komt overeen met 151 kgfm per cm.

3 : 1577 kgfm, komt overeen met 911 kgfm per cm.

Voor het vaststellen van de vervormingskracht van de nieuwe plooibare afstandhouder wordt van het bovenstaande gebruik gemaakt. De metalen plooibare afstandhouder "SINA", in combinatie met een geleiderailligger voldoet aan de voorwaarde dat de constructie vervormt bij een aanrijding met de lichte personenauto. De bovengrens wordt gevormd door het snijpunt A (inrijconditie: zware personenauto met maximale uitbuiging). Wordt een gelijkwaardige energievernietiging per cm uitbuiging gekozen als van de naast liggende constructie (ring 0,95 cm) dan kan door punt A een evenwijdige lijn worden getrokken. Ten opzichte van de plooibare afstandhouder "SINA" is de uitbuiging ongeveer twee maal zo groot. Met inachtnaam van het verschil in afstand van de afstandhouders komt dit overeen met een vervormingskracht van ongeveer 1155 kgf voor de nieuwe afstandhouder.

BIJLAGE 2.

BEREKENING MINIMALE BOTSCONDITIONES

Op gelijke wijze als is weergegeven in Bijlage 1 kan voor de drie gesimuleerde constructies de aanvangsvervormingsenergie worden berekend. Het verschil in botsenergie gedeeld door het verschil in uitbuiging geeft de benodigde vervormingsenergie voor 1 cm uitbuiging. Vermenigvuldigd met de uitbuiging geeft de benodigde energie voor die uitbuiging. Het verschil van de botsenergie en de uitbuigenergie is de aanvangsvervormingsenergie.

Constructie 1 : 1160 kgfm (2-golfrail, vervormingsafstand 29 cm).

Constructie 2 : 1160 kgfm (2-golfrail, vervormingsafstand 40 cm).

Constructie 3 : 1716 kgfm (3-golfrail, vervormingsafstand 40 cm).

Met behulp van deze energie kunnen de minimale botscondities worden berekend waaronder de afstandhouders gaan vervormen.

Voor constructie 1 en 2 is dit:

Fiat 126 $V = 67 \text{ km/u}$ bij 20 grd.

Volvo 244 $V = 45 \text{ km/u}$ bij 20 grd.

Voor constructie 3 is dit:

Fiat 126 $V = 81 \text{ km/u}$ bij 20 grd.

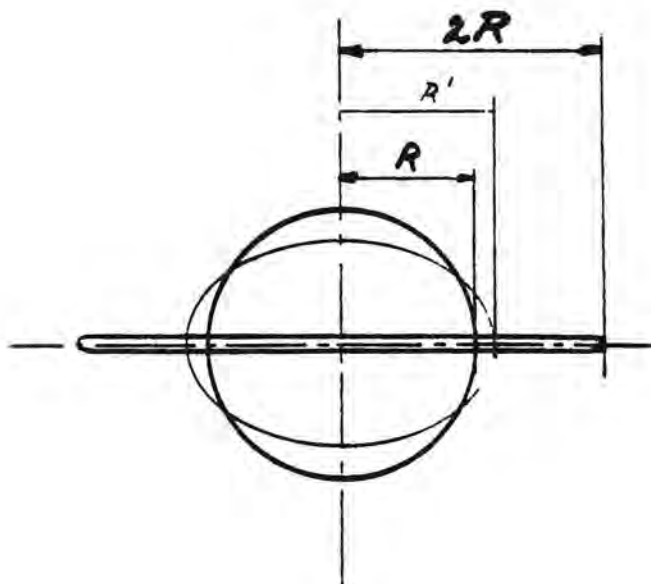
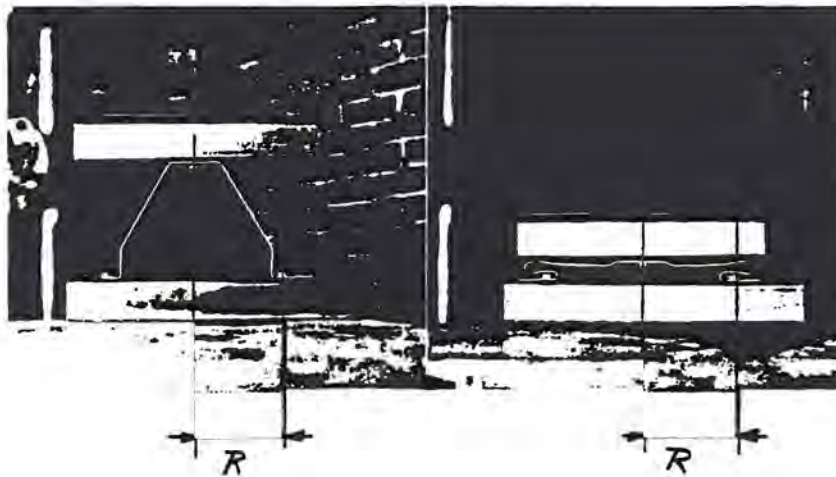
Volvo 244 $V = 55 \text{ km/u}$ bij 20 grd.

BIJLAGE 3.

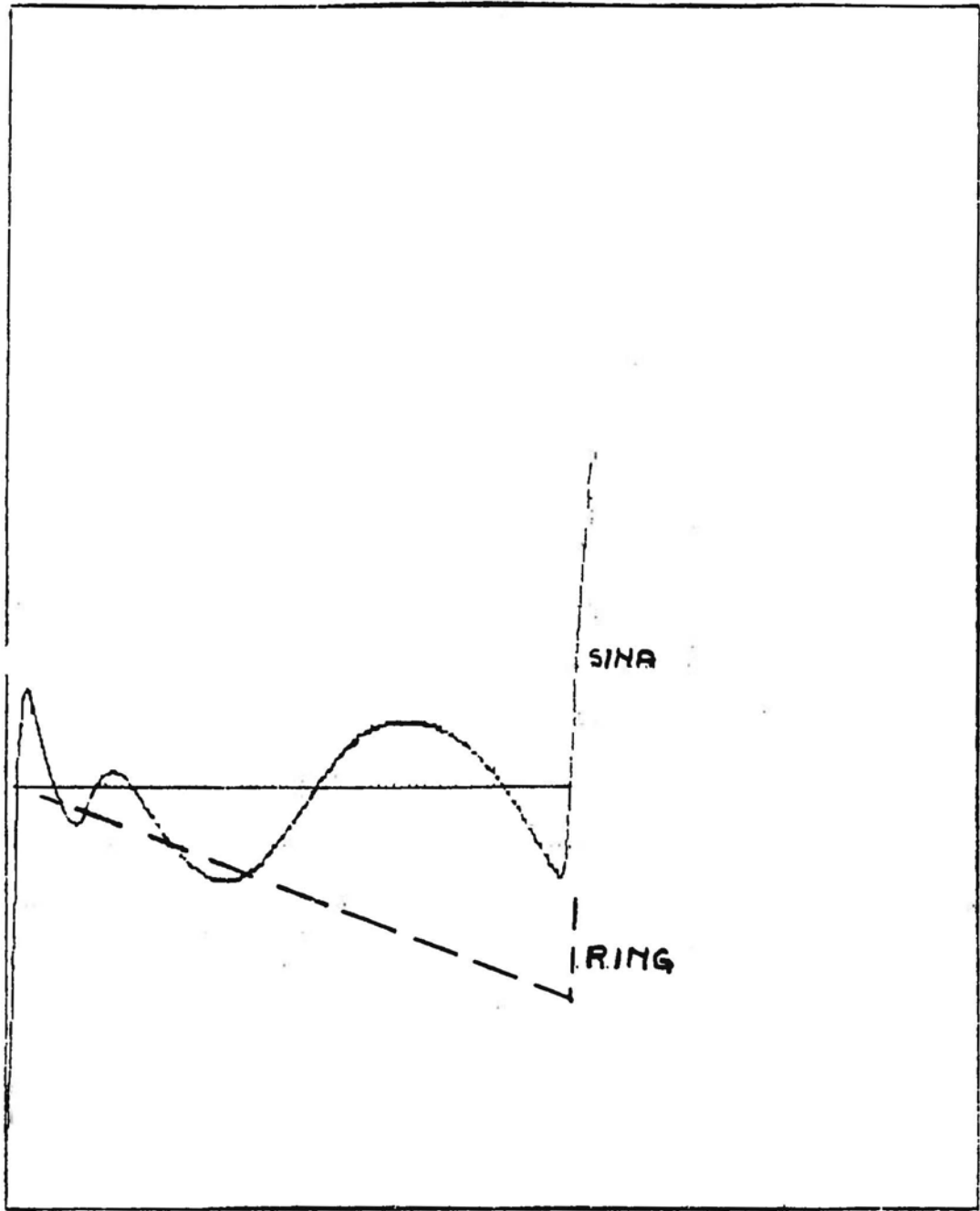
VERVORMING BIJ PLOOIBARE AFSTANDHOUDERS (Beschreven door Giavotto et al. (1967) en Kimball et al. (1976a en 1976b))

In deze Bijlage zijn twee voorbeelden opgenomen van vervormen van de afstandhouders.

De "hoed" afstandhouder van Giavotto et al. is zodanig ontworpen dat de vervormingskracht redelijk constant blijft (zie Grafiek). De momentarm R blijft constant. Dit in tegenstelling tot de "ring" afstandhouder van Kimball et al. Bij deze afstandhouder wordt tijdens de vervorming de momentarm R steeds groter. De vervormingskracht neemt af (zie Grafiek).



[kN]
95
90
85
80
75
70
65
60
55
50
45
40
35
30
25
20
15
10
5.0



20 40 60 80 100 120 140 160 180 [mm]