

AFSCHERMINGSVOORZIENINGEN VOOR AUTOSNELWEGEN

Een overzicht en beoordeling van berm- en brugconstructies en obstakel-  
beveiligers

R-86-25

Leidschendam, 1986

Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV



## SAMENVATTING

Dit rapport geeft een overzicht van de verschillende typen afschermingsvoorzieningen voor bermen en kunstwerken (viaducten, bruggen en tunnels) langs en in autosnelwegen. Deze afschermingsvoorzieningen kunnen worden onderverdeeld in vervormbare (stalen) geleiderailconstructies en niet vervormbare (betonnen) geleideconstructies. Daarnaast worden obstakelbeveiligers behandeld, die kunnen worden toegepast voor de afscherming van solitaire obstakels.

In het rapport wordt een opsomming gegeven van praktische eigenschappen van de wel en niet vervormbare constructies. Per type wordt een beoordeling gegeven, die gebaseerd is op het functioneren bij een aanrijding. Hiertoe zijn functionele eisen geformuleerd waaraan een afschermingsvoorziening moet voldoen. De voornaamste beoordelingscriteria zijn dat het voertuig de constructie niet mag door- of overschrijden, dat het niet in de verkeersstroom mag worden teruggekaatst, dat het niet mag omrollen en dat de inzittenden geen ernstig letsel mogen oplopen. Voor obstakelbeveiligers gelden bij een zijdelingse aanrijding dezelfde criteria; bij een frontale aanrijding moeten ze het voertuig op een acceptabele wijze tot stilstand brengen voordat het het obstakel bereikt.

Op basis van deze functionele eisen zijn voor het goed functioneren van de geleideconstructies de volgende constructieve aspecten van belang. Voor de stalen constructies: de ligger moet stijf zijn, bij een aanrijding op voldoende hoogte blijven en de ondersteuningselementen (meestal palen) blijven afschermen; de ondersteuningselementen en/of afstandhouders moeten bij een aanrijding op progressieve wijze uitbuigen en/of vervormen, waarbij de botsingsenergie wordt geabsorbeerd (de opgenomen energie mag dus niet aan het voertuig worden teruggegeven). Een betonnen constructie moet voldoende sterk en voldoende hoog zijn; de constructie moet voorkomen dat de wielen van een voertuig te hoog tegen de constructie kunnen opklimmen; de geleiding moet primair plaatsvinden op basis van wielgeleiding, zodat wordt voorkomen dat de contactkrachten tussen carrosserie en constructie te hoog worden. De diverse typen obstakelbeveiligers zijn zo principieel verschillend van ontwerp, dat het opstellen van een samenhangende reeks constructieve eisen niet mogelijk is.

Rekening houdend met de nog ontoereikende veiligheidscriteria, zijn de belangrijkste conclusies die op grond van de testresultaten kunnen worden getrokken voor geleideconstructies:

- diverse typen vervormbare constructies (stalen geleiderails) voldoen goed bij aanrijdingen door personenauto's, ook onder zware inrijcondities (inrijsnelheden tot ca. 100 km/u, inrijhoeken tot ca. 20°);
- diverse typen vervormbare constructies voldoen ook bij aanrijdingen door zware voertuigen, mits de inrijcondities niet te zwaar zijn (inrijsnelheden tot ca. 80 km/u, inrijhoeken van maximaal 15°); bij zwaardere inrijcondities zal het voertuig vaak door de constructie heenbreken;
- niet vervormbare (betonnen) constructies beveiligen personenauto's alleen goed bij niet te zware inrijcondities (inrijsnelheden tot 80 km/u, inrijhoeken tot ca. 15°);
- stijve constructies werken beter bij aanrijdingen door zware voertuigen dan constructies die gemakkelijk vervormen, hoewel voor voertuigen met een hoog zwaartepunt kantelgevaar kan optreden;
- de werking van niet vervormbare constructies lijkt sterker afhankelijk te zijn van weersomstandigheden dan die van vervormbare constructies.

Ten aanzien van de obstakelbeveiligers kan worden geconcludeerd, dat voor de Europese autosnelwegen alleen die typen in aanmerking komen, die afgestemd zijn op het Europese voertuigpark.

Het verdient voor de stalen geleiderailconstructies aanbeveling nader onderzoek te doen naar de relatie tussen de grootte van de voertuigvertraging en de grootte van de dwarsverplaatsing van de ligger, in combinatie met onderzoek naar het effect van een progressieve werking van de constructie. Wat betreft de betonnen constructies zou onderzoek gedaan moeten worden naar een beter profiel, dat tot lagere voertuigvertragingen leidt en tevens het opklimmen van de wielen verhindert.

Tot slot benadrukt dit rapport de behoefte aan betere veiligheidscriteria; die zijn immers essentieel om de werking van de verschillende soorten afschermingsvoorzieningen te kunnen beoordelen.

## INHOUD

<u>Voorwoord</u>	8
1. <u>Inleiding</u>	9
2. <u>Korte theoretische beschouwing</u>	10
2.1. Verloop van de botsing	11
2.2. Werking van de verschillende constructietypen	11
2.2.1. Vervormbare constructies	12
2.2.2. Niet-vervormbare constructies	13
2.3. Belasting van de fundering	14
3. <u>Af te schermen locaties</u>	16
3.1. Bermen	16
3.2. Bruggen en viaducten	17
3.3. Specifieke locaties	17
3.3.1. Overgangen	17
3.3.2. Op- en afritten	18
3.3.3. Puntstukken	18
4. <u>Functionele eisen aan afschermingsvoorzieningen</u>	19
5. <u>Beschrijving van stalen geleiderailconstructies</u>	21
5.1. Enkele algemene kenmerken	21
5.2. Geleiderailconstructies voor bermen	22
5.2.1. Constructies met een enkelvoudige ligger	22
5.2.2. Constructies met een samengestelde ligger	23
5.2.3. Zelfherstellende constructies	25
5.3. Geleiderailconstructies voor bruggen, viaducten en tunnels	26
5.3.1. Constructies zonder energie-absorberende voorzieningen	27
5.3.2. Constructies met energie-absorberende voorzieningen	27
5.3.3. Zelfherstellende constructies	28
5.3.4. Speciale ondoordringbare constructie	29

6.	<u>Beschrijving van betonnen geleideconstructies</u>	30
6.1.	Enkele algemene kenmerken	30
6.2.	Beschrijving van de diverse profielen	31
7.	<u>Beschrijving van obstakelbeveiligers</u>	32
7.1.	Inschuifbare constructies met flankgeleiding	32
7.2.	Energie-absorberende tonnen	33
7.3.	Beiginstukken van beveiligingsconstructies	34
8.	<u>Testresultaten stalen geleiderailconstructies</u>	35
8.1.	Geleiderailconstructies voor berm	35
8.1.1.	Constructies met een enkelvoudige ligger	35
8.1.2.	Constructies met een samengestelde ligger	36
8.1.3.	Zelfherstellende constructies	39
8.2.	Geleiderailconstructies voor bruggen, viaducten en tunnels	39
8.2.1.	Constructies zonder energie-absorberende voorzieningen	39
8.2.2.	Constructies met energie-absorberende voorzieningen	40
8.2.3.	Zelfherstellende constructies	41
8.2.4.	Speciale ondoordringbare constructie	41
9.	<u>Testresultaten betonnen geleideconstructies</u>	43
9.1.	General Motors- en New Jersey-profiel	43
9.1.1.	Resultaten van ongevallenstudies	43
9.1.2.	Full-scale proeven	44
9.1.3.	Mathematische simulaties	48
9.2.	Configuration F- en Tric Bloc-profiel	50
10.	<u>Testresultaten obstakelbeveiligers</u>	51
10.1.	Inschuifbare constructie met flankgeleiding	51
10.2.	Energie-absorberende tonnen	53
11.	<u>Evaluatie testresultaten</u>	54
11.1.	Stalen geleiderailconstructies	54
11.1.1.	Constructieve aspecten	54
11.1.2.	Beoordeling van de diverse constructies	54

11.2.	Betonnen geleideconstructies	56
11.2.1.	Constructieve aspecten	56
11.2.2.	Beoordeling van de diverse constructies	57
11.3.	Obstakelbeveiligers	58
12.	<u>Conclusies</u>	59
13.	<u>Aanbevelingen voor onderzoek</u>	61
13.1.	Onderzoek naar letselcriteria	61
13.2.	Onderzoek naar constructieve aspecten	62
13.2.1.	Stalen geleiderailconstructies	62
13.2.2.	Betonnen geleideconstructies	63

Literatuur

Tabel en Afbeeldingen 1 t/m 21

Bijlagen 1 t/m 4

## VOORWOORD

Dit rapport geeft een overzicht en een beoordeling van de vele typen afschermingsvoorzieningen die de laatste jaren in diverse landen voor autosnelwegen zijn ontwikkeld. Daarbij wordt een onderscheid gemaakt in continue afschermingsvoorzieningen voor berm en bruggen (ook toepasbaar voor viaducten en tunnels), en afschermingsvoorzieningen voor geïsoleerde obstakels.

In het rapport wordt ervan uitgegaan dat afscherming van een gevarezone met een afschermingsvoorziening noodzakelijk is. Welke criteria hieraan ten grondslag liggen, zal slechts op summiere wijze uiteengezet worden. De diverse typen constructies zullen in hoofdzaak op hun functioneren bij een aanrijding worden beoordeeld. Enkele praktische algemene kenmerken zullen in het kort worden aangegeven.

Voor de gegevens over de diverse typen constructies is gebruik gemaakt van de literatuur. De beoordeling die de SWOV van deze typen geeft, is gebaseerd op een beschouwing van het fundamentele botsproces tussen voertuig en afschermingsvoorziening en op resultaten van proefnemingen (voor zover deze in voldoende mate hebben plaatsgevonden). Van enkele typen afschermingsvoorzieningen is de beoordeling mede gebaseerd op mathematische simulaties. Deze zijn uitgevoerd met het VEDYAC-voertuigmodel dat is ontwikkeld door het bureau Program Development & Technical Appliance Ltd (SPAT) te Milaan in opdracht van de SWOV.

Dit rapport is de Nederlandse versie van een rapport dat is opgesteld in opdracht van de Società Iniziative Nazionali Autostradali "SINA S.p.A." te Milaan en de aangesloten maatschappijen "Autostrada dei Fiori S.p.A."; "Autostrada Ligure-Toscana S.p.A."; Autostrade Valdostane S.p.A."; "Società Autostrada Torino-Milano S.p.A."; Società Autostrada Torino-Alessandria-Piacenza S.p.A."

De samenstellers van dit rapport zijn ing. C.C. Schoon, ir. T. Heijer, ing. W.H.M. van de Pol en D.J.R. Jordaan.



## 1. INLEIDING

In dit rapport worden de verschillende voorzieningen ter afscherming van gevarenczones langs de rijbanen van autosnelwegen behandeld. Zo'n gevarenczone kan zijn: de andere rijbaan met tegemoetkomend verkeer, een parallelweg of een fietspad; het binnendringen van zo'n gevarenczone gebeurt bij het doorschrijden van een midden- of tussenberm. Verder kunnen ook de zijbermen een gevarenczone vormen door de aanwezigheid van obstakels, steile taluds en dergelijke.

De volgende locaties komen voor afscherming in aanmerking: bermen, bruggen, viaducten en tunnels. Daarnaast komen specifieke locaties aan de orde zoals brugopritten, tunnelingangen en puntstukken.

Gevarenczones kunnen met behulp van daartoe ontwikkelde constructies worden afgeschermd. In dit rapport zullen die typen aan de orde komen waarvan is aangetoond of mag worden verwacht dat ze bij een aanrijding goed werken. Ook zullen constructies worden besproken die wel veel worden toegepast, maar die bij een aanrijding minder effectief werken.

Het doel van het onderzoek is in de eerste plaats een overzicht te geven van de stand van zaken betreffende stalen en betonnen afschermingsvoorzieningen langs autosnelwegen. Hierbij zullen de volgende zaken aan de orde komen:

- technische eisen te stellen aan afschermingsvoorzieningen;
- resultaten van full-scale proeven en mathematische simulaties.

In de tweede plaats zal een beoordeling worden gegeven van de effectieve werking van de diverse typen afschermingsvoorzieningen. In voorkomende gevallen zal worden aangegeven waar nog kennis ontbreekt en op welke wijze die kan worden aangevuld. Indien nader onderzoek vereist is, zullen hiervoor aanbevelingen worden gedaan.

Voorafgaand aan het overzicht zal een theoretische beschouwing van de principiële werking van de diverse typen afschermingsvoorzieningen worden gegeven. Centraal hierin staat het dynamische gedrag van een voertuig bij een aanrijding met een beveiligingsconstructie.

Voor een juiste beoordeling van de werking van de diverse afschermingsvoorzieningen is kennis nodig van de testcondities en de gehanteerde veiligheidscriteria. In de Bijlagen 1 en 2 wordt uitvoerig op deze onderwerpen ingegaan.

## 2. KORTE THEORETISCHE BESCHOUWING

De in dit rapport behandelde beveiligingsconstructies hebben alle ten doel te voorkomen dat motorvoertuigen de rijbaan geheel of gedeeltelijk verlaten. De constructies moeten daarom in staat zijn alle zijwaarts gerichte bewegingscomponenten van de voertuigen tijdens het contact tussen voertuig en constructie op een of andere wijze te niet te doen door het uitoefenen van contactkrachten.

Deze krachten moeten ervoor zorgen dat:

- het voertuig de weg niet verlaat (blokkeren);
  - de koers van het voertuig, als het na de botsing nog beweegt, zoveel mogelijk parallel aan de constructie blijft (geleiding) om te voorkomen dat het voertuig terugkaatst en met andere verkeersdeelnemers botst.
- Altijd geldt als eis dat de botsing tussen voertuig en constructie (zogenoemd vervangend ongeval) aanzienlijk minder gevaar voor inzittenden en voertuig oplevert dan het van de weg raken (bij aanwezigheid van een gevarezone).

De krachten die nodig zijn voor het blokkeren en geleiden komen voort uit vervorming van voertuig en constructie. De plaats en de grootte van de vervormingen hangen vooral af van ontwerpspecificaties van de constructie. Naarmate de vervorming geringer is, zal de voertuigvertraging toenemen.

We kunnen de constructies hierbij in twee hoofdgroepen indelen:

- a) constructies die zelf kunnen vervormen en daardoor goeddeels de grootte en richting van de contactkrachten bepalen;
- b) constructies die zelf niet vervormen, zodat de grootte van de krachten vooral wordt bepaald door vervorming van het voertuig, en de constructie vooral de richting en de aangrijpingspunten bepaalt.

In het algemeen geldt dat de constructies ervoor zorgen dat de energie van de zijwaartse bewegingscomponenten van het voertuig wordt omgezet in warmte door vervormings- en wrijvingsarbeid of in andere vormen van energie (rotaties). Daarna brengen remmen, banden, wielophanging (schokdempers) of carrosserie door wrijving of vervorming de uiteindelijke omzetting tot stand.

De zijwaartse beweging van het voertuig ten opzichte van de weg kan zowel door translatie (koersafwijking) als door rotatie (slippen, omrollen) ontstaan. In het algemeen zijn de bestaande constructies gericht op geleiding bij koersafwijkingen (translaties) die geen al te grote hoek (ca.  $30^{\circ}$ ) met de lengteas van de constructie maken, terwijl rotaties worden geblokkeerd.

### 2.1. Verloop van de botsing

Aan de botsing van een voertuig met een op geleiding gerichte constructie kunnen twee fasen worden onderscheiden:

a. Het primaire contact, waarbij doorgaans een deel van de voorzijde van het voertuig het eerst de constructie raakt; dit contact vindt meestal zover vóór het zwaartepunt van het voertuig plaats, dat niet alleen de zijwaartse translatie wordt tegengewerkt maar het voertuig ook tot rotatie van de constructie af wordt gedwongen.

Deze rotatie kan gedeeltelijk worden tegengewerkt door de momenten van wrijvingskrachten tussen voertuig en constructie alsmede voertuig en wegdek. De rotatie is voornamelijk "yawing" (rotatie om een verticale as).

b. Het secundaire contact (zogenaamd rear-end-effect) ontstaat als het in rotatie geraakte voertuig met de achterzijde de constructie raakt. Omdat het aangrijpingspunt dan achter het zwaartepunt van het voertuig ligt, wordt de oorspronkelijke rotatie geheel of gedeeltelijk teniet gedaan. Het rear-end-effect treedt niet altijd op, maar afhankelijk van het verloop van het primaire contact en de wrijvingsomstandigheden.

De zijwaartse translatie van het voertuig direct na de botsing hangt af van de mate van elasticiteit van primaire en secundaire botsing. De rotaties van het voertuig direct na de botsing worden gewoonlijk door wrijving op de weg en in de wielophanging teniet gedaan. Daardoor hangt de uiteindelijke koershoek van het voertuig niet alleen af van de elasticiteit van de botsing, maar ook van de wegdekcondities in de directe omgeving van de afschermingsconstructie.

### 2.2. Werking van de verschillende constructietypen

In principe kunnen twee constructietypen worden onderscheiden: vervormbare en niet-vervormbare constructies.

### 2.2.1. Vervormbare constructies

Deze constructies zijn ontworpen om energie op te nemen en bestaan in het algemeen uit drie hoofdelementen:

- een in de lengterichting doorlopende ligger;
- ondersteuningselementen die de ligger op een zekere hoogte boven de rijbaan houden;
- bevestigingselementen die ligger en ondersteuning met elkaar verbinden. Daarnaast zijn er vaak nog hulpelementen die de stabiliteit of stijfheid van de constructie verbeteren, zoals diagonalen in constructies met een rail aan beide zijden.

Alle hoofdelementen kunnen in principe deelnemen aan de vervorming; de mate waarin elk element deelneemt, is sterk afhankelijk van de ontwerp-eigenschappen. Soms ontbreekt ook een der elementen (bij bevestiging van de ligger direct op de paal, of bij bevestiging van de ligger aan een muur of rotswand).

De functie van de hoofdelementen tijdens een botsing kan als volgt worden beschreven.

De ligger zorgt voor het contact met het voertuig en buigt door de contactkrachten in horizontale richting uit. De ligger moet zo stijf zijn, dat de uitbuiging over voldoende grote lengte van de constructie plaatsvindt, waardoor meerdere ondersteunende en bevestigingselementen in de vervorming worden betrokken en de energie-opname wordt verdeeld. Hierdoor ontstaat bovendien een gunstige contour voor de geleiding van het voertuig. De ligger moet tevens in staat zijn de trekkrachten in de lengterichting op te nemen, die ontstaan door wrijving tussen voertuig en ligger en uitbuiging van de ligger; hierbij mag geen grote plastische vervorming of bezwijking optreden. De energie-opname van de ligger door buiging (plastische vervorming) kan niet groot zijn, omdat anders het gevaar van lokaal bezwijken (zakvorming, breuk) optreedt.

De verbindingselementen kunnen, afhankelijk van het ontwerp, een aantal verschillende taken, al dan niet tegelijkertijd, vervullen:

- bevestigen van de ligger aan de ondersteuning;
- handhaven van de afstand tussen ligger en ondersteuning om aanrijden van de ondersteuning te voorkomen, het weerstandsmoment tegen buiging van de ligger te vergroten of, samen met de ondersteuning, de hoogte van de ligger bij uitbuigen te handhaven;

- opnemen van de energie bij vervorming (buiging, indrukking, wrijving etc.).

De ondersteunende elementen hebben evenzo verschillende functies die al dan niet gecombineerd voorkomen:

- op hoogte houden van de ligger;
- opnemen van botsingsenergie door buiging, ploegen door de grond of breken van daarvoor speciaal aangebrachte constructiedelen;
- opnemen van de trekbelasting in de ligger (zonder grote verplaatsing).

De lengte en de diepte van de uitbuiging tijdens een botsing bepalen de hoek die de constructie met de lengte-as van de weg maakt, en daarmee de koers van het voertuig tijdens het contact met de constructie. De constructies zijn zo ontworpen dat de botsingen zo weinig mogelijk elastisch verlopen, waardoor terugkaatsen wordt voorkomen en het contact tussen voertuig en constructie zo lang mogelijk gehandhaaft blijft. Daardoor is de hoek van de uitbuiging, samen met de resulterende rotatie van het voertuig nadat het losgekomen is van de constructie, bepalend voor de uitrijcondities.

Stijve constructies, die weinig uitbuigen (kleine hoek) maar relatief grote dwarskrachten veroorzaken, zullen daarbij sterkere voertuigrotaties veroorzaken dan slappe constructies. De stijvere constructies zijn daarmee voor een goede werking sterker afhankelijk van de wrijvingscondities tussen voertuig en wegdek direct na de botsing dan de flexibeler constructies.

### 2.2.2. Niet-vervormbare constructies

Deze constructies bestaan uit prismavormige liggers met een speciale doorsnede die op dezelfde hoogte als de rijbaan zijn geplaatst. Ze zijn ontworpen om geen energie op te nemen en vaak in beton of dergelijk zwaar materiaal uitgevoerd. De werking is bij aanrijdingen onder kleine inrijhoeken gebaseerd op wielgeleiding, dat wil zeggen dat de vorm erop is gericht de dwarskrachten van primaire en secundaire botsing via de wielophanging te genereren en op het voertuig over te brengen. De dwarskrachten komen daarbij vooral tot stand door de wielen op een vlak met een zekere dwarshelling te laten rollen, en in veel mindere mate door botsing van delen van de carrosserie. Deze helling veroorzaakt bovendien verticale krachtcomponenten waardoor het voertuig behalve tot een beweging om

de hoogte-as ook tot rotaties om de lengte- en breedte-as wordt aangezet. Omdat de constructie zelf geen botsingsenergie opneemt en de wielophanging ook weinig energie ineens opneemt, zijn de botsingen sterk elastisch; vrijwel alle zijwaartse energie vlak voor de botsing die niet in rotatie-energie is omgezet, is direct na de botsing nog aanwezig. Daarmee wordt de energiedissipatie dus voornamelijk aan schokdempers, bandwrijving en eventuele plastische vervorming van de wielophanging overgelaten. Bij aanrijdingen onder grotere inrijhoeken vindt ook contact tussen carrosserie en constructie plaats. Naarmate hierbij meer carrosserievervorming optreedt, zal een groter deel van de zijwaartse energie worden geabsorbeerd.

In verband met de optredende voertuigrotatie zijn deze betonnen constructies voor het verkrijgen van goede geleidende eigenschappen nog sterker afhankelijk van de toestand van de weg en het voertuig dan de stijve geleiderailconstructies.

Omdat de energiedissipatie bij een onvervormbare constructie meestal veel kleiner is dan bij een vervormbare, is de kinetische energie van het botsende voertuig direct na de botsing naar verhouding (aanzienlijk) hoger.

### 2.3. Belasting van de fundering

De krachten in de constructie zullen bij beide typen geheel aan de fundering worden doorgegeven. Hoewel de dwarskrachten die het voertuig in rotatie brengen in beide gevallen ten minste dezelfde orde van grootte hebben, verschilt de verdeling van die dwarskrachten over diverse steunpunten: de zeer stijve wielgeleidingsconstructie zal de dwarskrachten beter verdelen dan de flexibele constructie, waardoor in de laatstgenoemde hogere puntbelastingen op de fundering of de ondersteunende elementen kunnen ontstaan.

Doordat ook de wrijvingskrachten in lengterichting tussen geleiderail en carrosserie groter zijn dan tussen geleidingsconstructie en wiel, zullen ook de langskrachten die op de fundering worden overdragen bij de vervormbare typen groter zijn. Ook de verticale krachtcomponenten verschillen bij beide typen: de ondersteuning van een uitbuigende geleiderail veroorzaakt omhooggerichte trekkrachten in de fundering (de grootte is sterk afhankelijk van de constructie), terwijl de niet-vervormbare constructie verticale drukkrachten oplevert.

Bij blokkeren zal de vervormbare constructie in het algemeen lagere lokale funderingskrachten opleveren dan de niet-vervormbare.

### 3. AF TE SCHERMEN LOCATIES

Door het plaatsen van een beveiligingsconstructie wordt een "vervangend" ongeval geïntroduceerd voor het ongeval dat plaats zou kunnen vinden als een voertuig de rijbaan verlaat. Het plaatsen van de constructie heeft ten doel een "voorspelbaar ongeval" te introduceren waarvan de gevolgen "bekend" zijn, in plaats van een ongeval waarvan de gevolgen naar verwachting ernstig zijn.

Botsingen met beveiligingsconstructies zijn echter ook niet zonder risico voor de voertuiginzittenden. Een beveiligingsconstructie dient dan ook pas na een goede afweging van de mogelijke risico's te worden geplaatst.

Het kwantificeren van de risicofactoren is moeilijk. Er zijn tot op heden geen criteria gevonden om de ernst van een botsing nauwkeurig te kunnen voorspellen. Toch zijn er wel wat gegevens beschikbaar uit empirisch onderzoek en ongevalgegevens. Zo is bijvoorbeeld bekend dat afronden, waterwegen en starre obstakels ernstig gevaar opleveren bij in- of aanrijden. De wegberm kan ook gevaarlijk zijn doordat grote oneffenheden of een te zachte bodem het voertuig erg moeilijk controleerbaar maken, waardoor het bijvoorbeeld kan omrollen of vrijwel onbestuurbaar terug op de rijbaan kan raken. Verder kan naast de berm ook een secundaire weg of fietspad liggen, waardoor doorschrijding van de berm botsingsgevaar met andere weggebruikers oplevert.

In de meeste gevallen is de berm, van welke aard dan ook, te smal voor gecontroleerde voertuigmanoeuvres; uit Amerikaans onderzoek kan worden afgeleid dat de benodigde breedte ca. 12 m bedraagt, met als noodzakelijke voorwaarde dat die ruimte vrij van obstakels is, en de bodem voldoende vlak en draagkrachtig (Huelke & Gikas, niet gepubliceerd). Voldoet de wegberm niet aan deze voorwaarden, dan komt hij voor afscherming in aanmerking.

#### 3.1. Bermen

Wanneer berm niet voldoende obstakelvrij zijn, kunnen ze dat soms alsnog worden door obstakels te verwijderen of te verplaatsen, of door de grond te egaliseren.

Obstakels als lichtmasten, verkeerstekens en bewijzeringsborden kunnen



echter niet buiten de zone van 12 m worden geplaatst. In dat geval is het soms mogelijk de obstakels zelf "botsvriendelijk" te maken door bijvoorbeeld breekconstructies toe te passen of obstakelbeveiligers te plaatsen. Het is dan niet nodig de gehele berm van een beveiligingsconstructie te voorzien.

Bij het nemen van een beslissing over het plaatsen van een geleiderailconstructie moet niet alleen worden gekeken naar het effect op de ernst van ongevallen, maar ook naar de invloed op het ontstaan van ongevallen en op de mogelijkheden tot hulpverlening. Zo kan de visuele geleiding door zo'n constructie wegbermongevallen helpen voorkomen; anderzijds kan de aanwezigheid van de constructie hulpverleners bij een ongeval ernstig hinderen.

### 3.2. Bruggen en viaducten

Bruggen en viaducten kunnen vrijwel nooit voldoen aan de eisen met betrekking tot een voldoende obstakelvrije zone en zullen daarom altijd van een beveiligingsconstructie moeten worden voorzien. Het risico bij het verlaten van de weg is bovendien zo groot, dat de beveiligingsconstructie absoluut niet door- of overschreden mag worden. Deze situatie levert in de praktijk grote ontwerpproblemen op, omdat enerzijds stijve of starre constructies nodig zijn die een grote bodembelasting veroorzaken, terwijl anderzijds de toelaatbare belasting beperkt wordt door de constructie van het brugdek.

Er is geen duidelijke standaardoplossing voor dit probleem en in de praktijk bestaat er dan ook een grote variëteit aan constructies, waarvan de effectiviteit overigens lang niet altijd duidelijk is. In verband met beperking van de belastingen wordt er, waar de ruimte dit toelaat, vaak wel naar "meertraps"-beveiliging gestreefd.

### 3.3. Specifieke locaties

#### 3.3.1. Overgangen

Waar een weg overgaat in een brug, viaduct of tunnel, moet de overgang op een goede wijze wordt afgeschermd. Zijn zowel het kunstwerk als de wegberm voorzien van een beveiligingsconstructie, dan dienen deze goed op

elkaar aan te sluiten. In de eerste plaats dient het verloop vloeiend te zijn. In de tweede plaats dient bij verschil in flexibiliteit tussen beide constructies de overgangsconstructie zodanig uitgevoerd te worden, dat het verschil in stijfheid geleidelijk wordt overbrugd.

Is de zijberm niet voorzien van een beveiligingsconstructie, dan moet eveneens een geleidelijk van stijfheid veranderende overgangsconstructie worden aangebracht tussen de berm en de constructie op het kunstwerk. Deze overgangsconstructie moet verhinderen dat een auto die van de weg afraakt, achter de constructie op het kunstwerk terecht kan komen.

### 3.3.2. Op- en afritten

In het algemeen zullen de bermen van op- en afritten in hun uitvoeringsvorm niet veel verschillen van de normale wegbermen. Een uitzondering vormen de boogstralen, die in op- en afritten meestal veel kleiner zijn dan in een normale weg. De beveiligingsconstructies in bermen van op- en afritten vragen dan ook speciale aandacht. De inrijhoeken kunnen namelijk veel groter zijn. Door de gebogen vorm van de constructie verloopt bij een aanrijding de opbouw van de krachten bovendien anders. Verder is bij kleine boogstralen de verkanting van het wegdek vrij groot. Hierbij is de stand van de constructie ten opzichte van het wegdek van belang.

### 3.3.3. Puntstukken

Puntstukken komen langs autosnelwegen voor aan het begin van een afrit. In tweeërlei opzicht kan in een dergelijk puntstuk een gevaarlijke situatie ontstaan. Ten eerste als daar een star obstakel staat opgesteld, bijvoorbeeld een kolom van een bewegwijzeringsbord. Ten tweede als twee geleiderailconstructies, noodzakelijk ter afscherming van gevarenczones, daar samenkomen. Zijn de eindpunten van de rail ter hoogte van het begin van de afrit ingegraven, dan kan een van de rijbaan afgeraakte auto op de geleiderailconstructie terechtkomen of tussen de rails doorschieten en in de zone erachter belanden. Zijn de twee einden van de geleiderailconstructie door een omgebogen rail met elkaar verbonden, dan is de geleiderailconstructie zelf min of meer een star obstakel geworden. In beide gevallen kan een obstakelbeveiliger voor een doeltreffende afscherming zorgen.

#### 4. FUNCTIONELE EISEN AAN AFSCHERMINGSVOORZIENINGEN

De verschillende typen afschermingsvoorzieningen zijn globaal te onderscheiden in continu verlopende constructies voor de afscherming van gevarenczones die zich over een grote lengte uitstrekken, en in korte constructies (de zogenaamde obstakelbeveiligers) ter afscherming van solitaire gevarenpunten.

Voor de afscherming van uitgestrekte gevarenczones zijn twee typen effectief gebleken: stalen en betonnen geleideconstructies. Voor de afscherming van gevarenpunten zijn constructies (zogenaamde obstakelbeveiligers) ontwikkeld die bij een flankaanrijding het voertuig geleiden en bij een frontale aanrijding het voertuig op een acceptabele wijze tot stilstand brengen.

Geleideconstructies van staal en beton moeten bij een aanrijding aan de volgende eisen voldoen:

- het voertuig mag niet door de constructie heenbreken, er overheen rijden/kantelen of er onderdoor schieten;
- het voertuig mag tijdens en na de botsing niet omrollen en ook niet in de eigen verkeersstroom worden teruggekaatst;
- inzittenden mogen geen ernstig letsel oplopen;
- na een botsing moet de constructie werkzaam blijven;
- de constructie moet snel te repareren zijn.

Afhankelijk van de situatie (bijvoorbeeld op bruggen) kan de eis van ondoordringbaarheid van het allergrootste belang worden geacht. De andere eisen krijgen dan een meer secundair karakter.

Een obstakelbeveiligers die wordt aangereden, dient aan 'de volgende functionele eisen te voldoen:

- bij een aanrijding op de neus dient de obstakelbeveiligers zodanig te functioneren dat het voertuig binnen de lengte van de obstakelbeveiligers tot stilstand gebracht wordt; dit moet ook het geval zijn als de aanrijding schuin of excentrisch op de neus plaatsvindt;
- bij een aanrijding in de flank van een obstakelbeveiligers dient de obstakelbeveiligers op dezelfde wijze te werken als een geleiderailconstructie: de richting van het voertuig moet veranderd worden, zodat het langs de obstakelbeveiligers en het obstakel wordt geleid;

- het tot stilstand brengen of geleiden mag geen ernstig letsel voor de inzittenden van het voertuig tot gevolg hebben;
- bij een frontale aanrijding mag het voertuig niet op de rijbaan tot stilstand komen; dit houdt in dat het voertuig tijdens een aanrijding niet te veel mag roteren en terugkaatsen;
- bij een aanrijding in de flank van de constructie dient de uitrijhoek gering te zijn;
- een aangereden constructie mag niet op de rijbaan terechtkomen en er mogen geen onderdelen losraken.

## 5. BESCHRIJVING VAN STALEN GELEIDERRAILCONSTRUCTIES

In de loop der jaren zijn talrijke typen stalen geleiderailconstructies ontwikkeld en beproefd. In dit hoofdstuk zullen we ons beperken tot de hoofdtypen en enkele belangrijke subtypen. Bij de bespreking ervan zullen we het accent leggen op de werkingsprincipes. We zullen daarbij een onderscheid maken naar constructies voor wegbermen en constructies voor bruggen, viaducten en tunnels.

### 5.1. Enkele algemene kenmerken

Voorafgaand aan de beschrijving van de diverse hoofd- en subtypen willen we nog enkele algemene kenmerken van stalen geleiderailconstructies bespreken.

Om te beginnen kan worden opgemerkt dat stalen geleiderailconstructies een open profiel hebben. Voor berijders van tweewielers levert zo'n open constructie bij een aanrijding meer gevaar op dan een gesloten constructie, bijvoorbeeld een betonnen geleideconstructie. Een voordeel van een stalen ten opzichte van een betonnen constructie is echter dat er speciale voorzieningen in aangebracht kunnen worden om in noodgevallen via de middenberm de andere rijbaan te kunnen bereiken (Jordaan & Van de Pol, 1977). Dit kan voor de hulpverlening na een ongeval van groot belang zijn, met name wanneer de afstanden tussen op- en afritten groot zijn. Bij de plaatsing van een stalen geleiderailconstructie moeten de begin- en eindpunten goed in de grond worden verankerd, vanwege de grote langskrachten die bij een aanrijding kunnen optreden. Bij plaatsing van de constructie in een zachte bodem, moet men er rekening mee houden dat de grondweerstand in laterale en verticale richting onvoldoende kan zijn, zodat bredere profielen moeten worden gebruikt. Bij een harde bodem kunnen zich ingravingsproblemen voordoen, terwijl op kunstwerken verankeringsplaten nodig zijn. Op kunstwerken kunnen ten gevolge van het verschil in uitzettingscoëfficiënt tussen staal en beton bovendien expansieproblemen optreden. Er moeten dan expansievoegen worden aangebracht. Een nadeel van deze voegen is dat ze de constructie verzwakken, waardoor bij een aanrijding een grotere uitbuiging kan optreden (Van de Pol, 1975; SWOV, 1975).

Stalen geleiderailconstructies vergen meer onderhoud dan betonnen en

moeten regelmatig worden geïnspecteerd op schade door aanrijdingen (ook lichte). Daarnaast dient op gezette tijden te worden gecontroleerd of de geleiderails door verzakking van de constructie of door ophoging van het wegdek (nieuwe deklagen) niet te dicht bij het wegdek zijn gekomen. Alvorens over te gaan tot de bespreking van de specifieke typen willen we ten slotte nog vermelden dat op een geleiderailconstructie gemakkelijk anti-verblindingschermen kunnen worden aangebracht.

## 5.2. Geleiderailconstructies voor bermen

De diverse typen geleiderailconstructies voor bermen kunnen in drie hoofdtypen en een aantal subtypen worden ingedeeld:

### 1. Constructies met een enkelvoudige ligger:

- ligger direct aan het ondersteuningselement (paal) bevestigd;
- ligger met een bevestigingselement (afstandhouder) aan de paal bevestigd.

### 2. Constructies met een samengestelde ligger:

- ligger direct aan de paal bevestigd;
- ligger met een afstandhouder aan de paal bevestigd.

### 3. Constructies die na een aanrijding zelfherstellend zijn:

- enkelvoudige ligger scharnierend bevestigd aan een afstandhouder;
- samengestelde ligger steunend op speciaal gevormde palen.

We zullen nu per constructietype de specifieke werking bespreken.

#### 5.2.1. Constructies met een enkelvoudige ligger (afbeelding 1)

De werking van een constructie met een enkelvoudige ligger die direct aan de paal is bevestigd (afbeelding 1a), berust voor het overgrote deel op de energieopname door de paalverplaatsing door de grond. Deze hangt van twee factoren af: de paalvorm en de grondstructuur.

Een brede paal geeft een grote grondweerstand, die zo groot kan zijn dat de paal zich bij een aanrijding niet kan verplaatsen. De kans is dan groot dat de buigstijfheid van de enkele rail niet voldoende is om een dergelijke belasting te doorstaan, waardoor plastische vervorming (zakvorming) onvermijdelijk is. Een zwakke paal zal in een dergelijke situatie op maaiveldhoogte verbuigen of breken. De buigstijfheid van de enkele rail is dan wel groot genoeg om de energie-opname over meerdere buigende

of brekende palen te verdelen. Het voertuig komt dan echter in aanraking met de verbogen palen (AASHTO, 1977; Bronstad et al., 1985; Bryden & Phillips, 1985; Gösswein, 1977; Michie & Bronstad, 1971; Troutbeck, 1975).

Als de ligger met een afstandhouder aan de paal bevestigd is (afbeelding 1b), zorgt de afstandhouder ervoor dat het aanrijden van de palen in een veel later stadium kan plaatsvinden. Bovendien blijft het aanrakingsvlak van de rail met het voertuig dan langer op de goede hoogte, zelfs wanneer de paal op maaiveldhoogte zou gaan buigen. Het is ook mogelijk enigszins vervormbare afstandhouders toe te passen.

Tijdens een aanrijding worden er zowel langs- als dwarskrachten op de constructie uitgeoefend. De langskrachten in de ligger veroorzaken via de afstandhouders een torsiemoment op de palen. Als de palen onder invloed van dit moment bezwijken of in de grond draaien, wordt de afstand tussen ligger en paal kleiner en gedraagt de constructie zich steeds meer als een constructie zonder afstandhouders (AASHTO, 1977; Bronstad et al., 1985; Innenministerium Baden-Württemberg, 1969; Ivey et al., 1982; Michie & Bronstad, 1971; Troutbeck, 1975).

#### 5.2.2. Constructies met een samengestelde ligger (afbeelding 2)

Door toepassing van een tweede rail wordt de buigstijfheid van een ligger die direct aan de paal bevestigd is (afbeelding 2a), vergroot. Belangrijk is dat beide rails in voldoende mate met elkaar worden verbonden. De grotere buigstijfheid van de ligger zorgt voor een betere verdeling van de krachten over de palen. De constructie is beter in staat een aanrijding te verwerken, zij het dat in een wat later stadium alle beschreven effecten van de enkelvoudige ligger zonder afstandhouder zullen optreden (AASHTO, 1977; Bronstad et al., 1985; Bryden & Phillips, 1985; Gösswein, 1977; Michie & Bronstad, 1971; Troutbeck, 1975).

Bij een samengestelde ligger die met een afstandhouder aan de paal bevestigd is (afbeelding 2b), wordt de buigstijfheid van de ligger vergroot door de twee rails op enige afstand van elkaar te bevestigen. Het is belangrijk de rails op regelmatige afstanden met elkaar te verbinden. Behalve door de onderlinge afstand van de rails kan de buigstijfheid van de ligger (sterk) worden vergroot door toepassing van bijvoorbeeld diagona-

len of een vakwerk. Bovendien vermindert deze bouwwijze het torsiemoment in de palen ten gevolge van de langskrachten.

Door de uitbouw symmetrisch te maken is de constructie geschikt om van beide zijden te worden aangereden (middenbermbeveiliging). Bij een flexibele constructie, waarbij de palen relatief gemakkelijk door de grond kunnen snijden, wordt na een zware aanrijding de achterste rail tegen de grond gedrukt. Hierdoor ontstaat een extra weerstand tegen verder uitbuigen. De voorste rail blijft tevens beter op hoogte en de palen blijven min of meer afgeschermd. Na de aanrijding blijft de geleiderailconstructie nog een zekere werking behouden (AASHTO, 1977; Bronstad et al., 1985; Gösswein, 1977; Innenministerium Baden-Württemberg, 1969; Michie & Bronstad, 1971; Troutbeck, 1975).

Wanneer de palen in voldoende mate door de grond kunnen snijden, ligt het draaipunt van de bewegende paal op een zekere diepte onder maaiveld. Door de uitbouw van de voorste rail blijft deze vóór het punt waar de paal uit de grond komt. Aanrijden van de palen zal dan nauwelijks optreden. Wanneer de grondweerstand zo groot is dat de paal gaat buigen, gebeurt dit op maaiveldhoogte. De voorste rail schermt de palen dan niet meer voldoende af. In dat geval kunnen de palen wel aangereden worden. De ernst van zo'n aanrijding (schade voorwielophanging) kan worden gereduceerd door de palen laten te bezwijken door toepassing van een breekconstructie. De werking na een aanrijding neemt hierdoor evenwel af.

Het op hoogte blijven van de voorste rail wordt mede bepaald door de stijfheid van de verbinding tussen paal en afstandhouder. Door de rail zodanig schuin aan de afstandhouder te verbinden dat het contact tussen voertuig en rail eerst tegen het bovenste deel van de rail plaatsvindt, ontstaat een omhoog gericht moment op deze verbinding. Na enige uitbuiing van de paal komt ook het onderste deel van de rail in aanraking met het voertuig. Door de omhoog gerichte beweging van de voorste rail blijft het contactvlak tussen voertuig en constructie op voldoende hoogte en is de kans klein dat de voorste rail door de botsing naar beneden wordt gedrukt. Door de afstandhouder aan de onderkant vervormbaar te maken kan de onderste golf van de rail onder invloed van de belasting enigszins meegeven waardoor het contactvlak voldoende groot blijft en ernstige beschadigingen (van voertuig of rail) worden voorkomen. De kans dat de rail bezwijkt, wordt hierdoor kleiner.



De laatste tijd wordt geëxperimenteerd met een rail die uit drie golven bestaat. Deze drie-golfrail heeft een groter traagheidsmoment dan de twee-golfrail en is hoger. De hoogte van de constructie kan daardoor worden vergroot, zodat vrachtwagens e.d. beter op zwaartepuntshoogte worden tegengehouden en kleine voertuigen toch niet onder de constructie kunnen raken.

### 5.2.3. Zelfherstellende constructies (afbeelding 3)

Het principe van de zelfherstellende constructie is dat bij een aanrijding alleen de ligger wordt verplaatst; de paal mag in principe niet vervormen of door de grond snijden. Bij een aanrijding wordt de ligger in een schuin opwaartse richting gedwongen. Door de grote buigstijfheid van de ligger vindt dit over een grote lengte plaats.

De botsingsenergie wordt voor een groot deel door de massatraagheidskrachten opgevangen. Na enige tijd zal de ligger, afhankelijk van eventuele plastische vervorming, weer in zijn oorspronkelijke stand terugkeren. Een gevolg hiervan is dat een gedeelte van de energie weer wordt teruggegeven aan het voertuig. Dit kan nadelig zijn voor het verdere verloop van de botsing.

Twee constructietypen zullen we nog wat uitgebreider bespreken. Ze kunnen zowel in bermen worden toegepast als op bruggen, viaducten en in tunnels.

Het eerste type is dat met een enkelvoudige ligger, scharnierend bevestigd aan een afstandhouder (afbeelding 3a). De ligger is opgebouwd uit twee tegen elkaar geplaatste drie-golfrails. Hij is met een bevestigings-element scharnierend aan een paal bevestigd. Tussen ligger en paal is nog een afstandhouder bevestigd. In principe kan deze afstandhouder zodanig worden gedimensioneerd dat hij bij een aanrijding kan deformereren doordat de ligger er tegenaan wordt gedrukt (Bronstad et al., 1983; Bronstad & McDevitt, 1984).

Het tweede type is dat met een samengestelde ligger, steunend op speciaal gevormde palen (afbeelding 3b). De ligger bestaat uit twee rails die door een afstandhouder met elkaar zijn verbonden. De afstandhouder steunt op de bovenkant van de paal, die is voorzien van een concaaf verlopend profiel. Bij een aanrijding worden de rails met afstandhouders gedwongen

dit profiel te volgen. Door zijn symmetrische vorm kan dit type beveiligingsconstructie in de middenberm worden geplaatst (Bronstad & McDevitt, 1984).

### 5.3. Geleiderailconstructies voor bruggen, viaducten en tunnels

Geleiderailconstructies op bruggen, op viaducten en in tunnels onderscheiden zich kenmerkend ten opzichte van de constructies in bermen door het ontbreken van de mogelijkheid van gronddoorsnijding. Het ondersteuningslichaam van de constructie moet daarom aan een fundering bevestigd worden. Wat dit betreft zijn de situaties op bruggen, viaducten en in tunnels onderling vergelijkbaar. De op deze situatie afgestemde constructies zullen hierna als brugconstructies worden aangeduid.

Met betrekking tot het doorschrijdingsgevaar is nog wel een onderscheid aan te brengen tussen bruggen en viaducten enerzijds en tunnels anderzijds. Bij de te bespreken constructietypen zal hierop nader worden ingegaan.

De in de loop der jaren ontwikkelde brugconstructies zijn in vier hoofdtypen en een aantal subtypen in te delen:

1. Brugconstructies zonder energie-absorberende voorzieningen:

- montage op de brug;
- montage tegen de brug;
- montage op een verhoging.

2. Brugconstructies met energie-absorberende voorzieningen

- energie-absorberende palen;
- energie-absorberende afstandhouders.

3. Brugconstructies die na een aanrijding zelfherstellend zijn. In principe zijn dit dezelfde constructies als in bermen worden toegepast.

Alleen de wijze van montage aan de ondergrond is anders. Aangezien de werking reeds is beschreven (par. 5.2 e.v.), wordt er hier niet nader op ingegaan.

4. Specifieke brugconstructies ter voorkoming van doorschrijding.

In de volgende paragrafen wordt per constructietype nader op de specifieke werking ingegaan.

### 5.3.1. Constructies zonder energie-absorberende voorzieningen (afb. 4)

De constructies zonder energie-absorberende voorzieningen bestaan uit liggers met enkele of dubbele rail, die rechtstreeks of met korte afstandhouders aan de palen zijn bevestigd. Het werkingsprincipe van dit type berust voornamelijk op blokkeren, hoewel bij zware aanrijdingen ook enige energie-opname door buigen, breken of scheuren van de palen mogelijk is.

Als de ligger voldoende buigstijf is, zal de belasting door meerdere palen worden opgenomen en het voertuig ook worden geleid. Alleen bij het bezwijken van de palen zal gevaar voor het aanrijden van de palen ontstaan.

Is de ligger niet stijf genoeg, dan kan er zakvorming (grote plastische vervorming) in de ligger plaatsvinden. Hierdoor kan het voertuig de eerst volgende paal "frontaal" aanrijden, waarbij de kans groot is dat voertuig en constructie zwaar worden beschadigd en het voertuig door de constructie heenbreekt.

Aangezien bij deze constructies grote krachten op de palen worden uitgeoefend, dient de paalvoet voldoende verankerd te worden. De paal kan op het brugdek (afbeelding 4a) of er tegenaan (afbeelding 4b) worden gemonteerd; vaak wordt de paal op een verhoging geplaatst (afbeelding 4c). Dit laatste geeft ongunstige bij-effecten. Het botsende voertuig komt namelijk eerst met zijn wielen in aanraking met de hoge betonnen rand. Hierdoor kan een kantelmoment ontstaan. Afhankelijk van de hoogte van de rand, de grootte van de wielen, de snelheid en inrijhoek van het voertuig en de afstand van de voorkant van de betonnen rand tot de geleiderailconstructie, kan het voertuig daarnaast een zodanige opwaartse beweging krijgen dat het voertuiggedrag onvoorspelbaar wordt. De mate van geleiding van het voertuig door de geleiderailconstructie wordt dan eveneens onvoorspelbaar (AASHTO, 1977; Bronstad & Michie, 1981; Bronstad et al., 1983; Michie & Bronstad, 1971).

### 5.3.2. Constructies met energie-absorberende voorzieningen (afb. 5 + 6)

De energie-absorptie bij energie-absorberende brugconstructies wordt voornamelijk bereikt door het aanbrengen van verzwakkingen in de verbindende elementen of in de ondersteuning.

Bij constructies met energie-absorberende palen (afbeelding 5) is een verzwakking aangebracht bij de bevestiging van de paal aan de fundering.

Deze verzwakking kan een op proeven gebaseerde gedimensioneerde las of profielvorm zijn. Bij lichte aanrijdingen is alleen sprake van energie-absorptie door buiging. Is de aanrijding zwaarder, dan zal er breuk optreden. Naarmate de ligger stijver is uitgevoerd, zullen er meer palen aan de energie-absorptie bijdragen.

Bij zware aanrijdingen is er een extra weerstand nodig: het tweetraps-effect. Dit kan worden gerealiseerd door de achterrail bij een aanrijding op het wegdek te laten steunen (toepassing voor tussenbermen; afbeelding 5a), tegen een op de rand van de brug geplaatste handleuning (afbeelding 5b) of tegen een (betonnen) ophoging (afbeelding 5c).

Verzwakking van de paal kan ook worden bereikt door een speciale profielvorm van de paal (afbeelding 5d) of door de paal om een draaipunt aan de basis te laten roteren, waarbij de kinetische energie voor het grootste gedeelte wordt geabsorbeerd door een hydraulische demper (afbeelding 5e) (AASHTO, 1977; Innenministerium Baden-Württemberg, 1969; Michie & Bronstad, 1971; Ross & Nixon, 1976; SWOV, 1975)

Bij constructies met energie-absorberende afstandhouders (afbeelding 6) is de verzwakking doelbewust aangebracht in de afstandhouder. Deze kan in principe uit allerlei vervormbare profielen bestaan. Het meest toegepast is het buisprofiel: als grote ring met geringe hoogte (afbeelding 6a) en als kleine ring met grote hoogte (afbeelding 6b).

Wil men bij een aanrijding de schade beperkt houden tot de afstandhouder, dan dient de paal voldoende zwaar uitgevoerd te worden. In principe is het ook mogelijk de ligger direct met energie-absorberende afstandhouders aan een betonnen wand (bijvoorbeeld in tunnels) te bevestigen (AASHTO, 1977; Kimball et al., 1976; Michie & Bronstad, 1971; Wiles et al., 1977).

### 5.3.3. Zelfherstellende constructies (afbeelding 7)

Evenals de zelfherstellende constructie voor bermen zijn die voor bruggen te onderscheiden in (Bronstad & McDevitt, 1984; Bronstad et al., 1977):

- constructies met een enkelvoudige ligger, scharnierend bevestigd aan een afstandhouder (afbeelding 7a);
- constructies met een samengestelde ligger, steunend op speciaal gevormde palen (afbeelding 7b).

Voor de werkingsprincipes wordt verwezen naar paragraaf 5.2.3. Met betrekking tot afbeelding 7a kan worden opgemerkt dat de betonnen rand die

ten gevolge van een aanrijding buiten de constructie komt te liggen, bepaalde invloeden op de wielen van het voertuig en daarmee op het voertuiggedrag kan uitoefenen.

#### 5.3.4. Speciale ondoordringbare constructie (afbeelding 8)

Deze constructie is ontworpen om (theoretisch) aan de eis van ondoordringbaarheid te voldoen. Hierbij is uitgegaan van zeer zware inrijcondities: een voertuigmassa tot 50 ton, inrijshnelheden tot 80 km/u en inrijhoeken tot 25-30°.

Deze constructie onderscheidt zich van de vorige door de zware uitvoering, de in de richting van de rijbaan omgebogen vorm van de palen en de hooggeplaatste geleiderail (1,80 m). Hierdoor wordt het kantelen van voertuigen met een erg hoog zwaartepunt voorkomen. Aangezien deze constructie niet geschikt is voor de geleiding van personenauto's, wordt er een "normale" geleiderailconstructie vóór geplaatst (Van de Pol & Edelman, 1977).

## 6. BESCHRIJVING VAN BETONNEN GELEIDECONSTRUCTIES

Betonnen geleideconstructies kunnen zowel in bermen als op bruggen, op viaducten en in tunnels worden toegepast. De diverse typen worden gekarakteriseerd door hun profiel. Dubbelzijdige profielen worden in tussenbermen toegepast, enkelzijdige in zijbermen. De hoogte bedraagt ongeveer 80 cm.

De constructies kunnen in bermen als losse geprefabriceerde elementen worden geplaatst of met behulp van een glijbekisting ter plaatse worden gestort.

### 6.1. Enkele algemene kenmerken

Betonnen geleideconstructies hebben een gesloten profiel, waardoor ze voor tweewielers bij een aanrijding minder gevaar opleveren dan de open stalen constructies.

Bij plaatsing in bermen dient de nodige aandacht aan de fundering besteed te worden. Bij plaatsing op kunstwerken moet rekening worden gehouden met het gewicht van de betonnen constructies. Bij plaatsing in tunnels kan het profiel in de tunnelwand worden geïntegreerd. De constructies moeten op hetzelfde niveau als het wegdek worden aangebracht. In verband met waterafvoer dienen in voorkomende gevallen afwateringsopeningen aangebracht te worden. De verankering van de begin- en eindpunten vraagt minder aandacht dan bij stalen constructies, omdat de langskrachten die bij een aanrijding optreden, gering zijn.

Ten gevolge van temperatuurwisselingen treedt uitzetting en inkrimping van het materiaal op. Daarom kan het nodig zijn krimpvoegen in de constructie aan te brengen.

Betonnen constructies vergen in het algemeen weinig onderhoud. Alleen na zware aanrijdingen kunnen reparaties nodig zijn.

Op de betonnen constructies kunnen anti-verblindingschermen en geluidschermen worden gemonteerd. In sommige landen wordt ook ander wegmeubilair op de constructies geplaatst, bijvoorbeeld lichtmasten. Indien het om starre, niet bezwijkbare palen gaat, dient dit echter te worden afgeraden, omdat het bij aanrijdingen nog al eens voorkomt dat een voertuig dermate hoog tegen een constructie oprijdt, dat het op de constructie terecht komt.

In de constructie kunnen uitsparingen voor de doorvoer van kabels worden aangebracht. Eventueel kunnen de constructies hiervoor in langsrichting worden gedeeld.

Verplaatsbare units kunnen worden toegepast voor de afscherming van tijdelijke gevarenczones, bijvoorbeeld bij werk in uitvoering.

## 6.2. Beschrijving van de diverse profielen

In de Verenigde Staten zijn diverse typen profielen ontwikkeld, waarvan de belangrijkste zijn: General Motors, New Jersey en Configuration F. Daarnaast is in Zweden een type ontwikkeld, genaamd Tric Bloc. De profielen zijn afgebeeld op afbeelding 9.

De Amerikaanse profielen zijn 81 cm hoog. Ze hebben vanaf de basis gezien een recht opstaand randje, vervolgens een afgeschuind vlak onder een hoek van  $55^{\circ}$  dat overgaat in een nagenoeg verticaal staand vlak (hoek met de basis van  $80-84^{\circ}$ ). Het eerste verschil tussen de profielen is het opstaande randje (de voetheogte). Dit is bij het General Motors-profiel ca. 5 cm en bij de beide andere profielen ca. 7,5 cm. Het tweede verschil betreft de hoogte van de kniklijn tussen het schuine en nagenoeg verticaal verlopende vlak. Bij het General Motors-profiel ligt deze kniklijn het hoogst, namelijk op 38 cm; bij het New Jersey- en Configuration F-profiel ligt deze op een hoogte van resp. 33 en 25 cm (AASHTO, 1977; ACPA, 1977; Michie & Bronstad, 1971).

Naast het New Jersey-profiel wordt in de Verenigde Staten ook het New Jersey Modified-profiel toegepast. Bij de beschrijving van ongevallenstudies wordt dit profiel aangehaald. Het enige verschil met het gewone New Jersey-profiel is dat voetheogte 2,5-5 cm groter is. Voor zover bekend zijn er geen full-scale proeven met dit profieltype uitgevoerd.

Het Zweedse profiel wijkt in een aantal opzichten af van de Amerikaanse profielen. Het profiel verloopt volgens een boogstraal. De constructiehoogte bedraagt 97 cm; de voetheogte is 20 cm. Indien de ondersteuning van de constructie niet op wegdekhoogte wordt geplaatst maar ingebed, bedraagt de voetheogte 13 cm (Lidström & Turbell, 1978; Schoon, 1979; Turbell, 1981).

## 7. BESCHRIJVING VAN OBSTAKELBEVEILIGERS

Obstakelbeveiligers zijn afschermingseenheden die kunnen worden gebruikt voor gevarenczones waar continue afschermingsvoorzieningen niet kunnen worden toegepast. De volgende gevarenczones komen in aanmerking:

- obstakels en gevarenczones achter puntstukken;
- alleenstaande obstakels in bermten waar geen geleiderailconstructies kunnen worden toegepast of het toepassen ervan geen optimale oplossing is;
- alleenstaande tijdelijke obstakels, bijvoorbeeld bij werk in uitvoering.

In de loop der jaren zijn met name in de Verenigde Staten veel verschillende typen obstakelbeveiligers ontworpen, met als doel het afremmen en of geleiden van het voertuig. Veel van deze typen zijn echter weinig toegepast vanwege hun minder goede werking, dan wel de gecompliceerde bouw. Ze zullen hier dan ook niet worden behandeld. De typen die in de Verenigde Staten veel worden toegepast zullen wel worden besproken, evenals een in Nederland ontwikkeld type.

De typen zijn te splitsen in drie hoofdgroepen: inschuifbare constructies met flankgeleiding, energie-absorberende tonnen en beveiligde beginstukken van geleiderails.

### 7.1. Inschuifbare constructies met flankgeleiding

Een inschuifbare constructie met flankgeleiding bestaat uit een U- of V-vormige constructie van in elkaar te schuiven flankdelen (panelen of geleiderail), met daartussen dwarssteunen op wieltjes of glijplaten.

Tussen de dwarssteunen zit energie-absorberend materiaal.

Meestal is er een neussegment dat eveneens (in geringe mate) energie kan absorberen. De constructie wordt aan de achterzijde bevestigd aan een funderingssteun. De constructies heeft voorzieningen die de bewegingsvrijheid in dwarsrichting beperken.

Bij een aanrijding op de neus van de constructie schuiven de flankdelen successievelijk langs elkaar. Hierbij wordt de kinetische energie van het botsende voertuig voornamelijk geabsorbeerd door het energie-absorberend materiaal. Bij een aanrijding in de flank van de constructie wordt het



voertuig door de flankdelen geleid. Door de stijfheid van de constructie in dwarsrichting is de verplaatsing hierbij gering.

De diverse typen onderscheiden zich het meest kenmerkend van elkaar door het soort energie-absorberend materiaal dat wordt toegepast. De belangrijkste typen zijn:

- GREAT (Guardrail Energy Absorbing Terminal); USA; materiaal: verkrui-  
melbaar licht beton (zie afbeelding 10; EAS, 1975);
- Hi-Dro Cell Sandwich; USA; materiaal: kunststof cylinders gevuld met  
water (zie afbeelding 11; AASHTO, 1977);
- Hi-Dri Cell Sandwich; USA; materiaal: verkrui-  
melbaar licht beton (zie  
afbeelding 12; AASHTO, 1977);
- Steel drums; USA; materiaal: metalen vaten (zie afbeelding 13; AASHTO,  
1977; Sicking et al., 1982);
- RIMOB; Nederland; materiaal: aluminium rimpelbuizen (zie afbeelding  
14; Quack & Schoon, 1982; Schoon, 1982).

## 7.2. Energie-absorberende tonnen

Het kenmerkende verschil tussen obstakelbeveiligers bestaande uit ener-  
gie-absorberende tonnen en de hiervoor besproken constructies is dat de  
flankdelen ontbreken. Het type dat de laatste jaren het meest wordt toe-  
gepast is de Energite (Energite Module Inertial Barrier; zie afbeelding  
15).

De werking is als volgt (SWOV, 1980; Troutbeck, 1976): Bij een aanrijding  
springen de tonnen successievelijk stuk, waardoor er steeds een massa  
"zwevend" zand voor de opname van energie zorgdraagt. De eerste tonnen  
van de obstakelbeveiligers, die met de hoogste snelheid getroffen worden,  
bevatten de minste hoeveelheid zand; de daarop volgende steeds meer. De  
laatste tonnen, die uiteindelijk het voertuig tot stilstand moeten bren-  
gen, bevatten de grootste hoeveelheid zand. Met een dergelijke opstelling  
wordt een zekere gelijkmatigheid in de optredende vertragingen bereikt.  
Het zand is zodanig in en over de tonnen verdeeld dat het zwaartepunt van  
de zandmassa in de beveiligers op de gemiddelde hoogte van het zwaartepunt  
van personenauto's ligt.

De tonnen staan los van elkaar en kunnen in elke willekeurige opstelling  
geplaatst worden; hiervoor is geen fundering noodzakelijk.

### 7.3. Beginstukken van beveiligingsconstructies

Beginpunten van beveiligingsconstructies zijn voor van de rijbaan afge-  
raakte voertuigen erg gevaarlijk. In bijzondere gevallen (bijvoorbeeld  
puntstukken) kunnen ze met een obstakelbeveiliger worden afgeschermd.  
Deze wordt dan op de beginpunten van bijvoorbeeld geleiderailconstructies  
aangesloten.

In Nederland worden beginpunten van geleiderailconstructies ingegraven  
waarbij een hellingshoek van 1:25 wordt aangehouden (zie afbeelding 16;  
Slop, 1970).

In de Verenigde Staten is voor beginpunten van geleiderailconstructies  
een speciale voorziening ontworpen (zie afbeelding 17; Troutbeck, 1976).  
Deze constructie bestaat uit een in een 6-vorm omgebogen rail; de voorste  
palen kunnen gemakkelijk bezwijken doordat ze van hout zijn of doordat ze  
met een speciale voorziening aan de fundering zijn bevestigd (bijvoor-  
beeld met een schuifconstructie of gemakkelijk breekbare lassen).

Op basis van full-scale proeven kan worden gesteld dat deze typen beveiligingsconstructies onder bepaalde inrijcondities niet effectief werken. Op basis van ongevallenonderzoek is geconstateerd dat in veel gevallen (ernstig) letsel ontstaat bij een aanrijding.

Op grond hiervan zal in dit rapport niet verder op deze constructies worden ingegaan.

Onlangs is in de Verenigde Staten een nieuw type beginpuntconstructie ontwikkeld. Dit type bestaat uit elkaar overlappende rails, die bij een aanrijding in elkaar schuiven. Hoewel bij de auteurs van dit rapport geen resultaten van full-scale proeven bekend zijn, verwachten zij dat dit type constructie bij een aanrijding effectiever werkt dan het andere in de Verenigde Staten ontworpen type.

## 8. TESTRESULTATEN STALEN GELEIDERRAILCONSTRUCTIES

Van de beveiligingsconstructies die zijn beschreven in de Hoofdstukken 5 t/m 7, worden in dit hoofdstuk de resultaten van full-scale proeven en, voor zover aanwezig, van mathematische simulaties gepresenteerd. Er is gebruik gemaakt van testresultaten uit de volgende landen: Verenigde Staten, Bondsrepubliek Duitsland, Groot-Brittannië en Nederland. In Bijlage 1 zijn de condities beschreven waaronder de proeven in de Verenigde Staten en Nederland hebben plaatsgevonden.

Hoewel de resultaten niet in alle gevallen goed gedocumenteerd zijn en de wijze van registreren nogal uiteen loopt, is getracht een zo goed mogelijke interpretatie van de testresultaten te geven. In Bijlage 2 wordt een overzicht gegeven van de criteria die worden gehanteerd om de ernst van een botsing te bepalen. Het meest gebruikte criterium is de Acceleration Severity Index (ASI). Een maximale ASI-waarde van 1 wordt als acceptabel beschouwd voor voertuiginzittenden zonder gordel; voor gordel dragers wordt meestal een maximale waarde van 1,6 gehanteerd. Bijlage 3 gaat in op de wijze waarop bij full-scale proeven metingen zijn uitgevoerd.

### 8.1. Geleiderailconstructies voor berm

#### 8.1.1. Constructies met een enkelvoudige ligger (afbeelding 1)

Bij het beproeven van constructies met een enkelvoudige, direct aan de paal bevestigde ligger (afbeelding 1a) zijn voornamelijk de zware typen personenauto's gebruikt met een massa tot ca. 2200 kg; er is ook een enkele lichte personenauto getest.

De constructie werkte goed bij niet te grote inrijhoeken en inrijsnelheden tot ca. 100 km/u. Tot ca. 15° was de schade gering, zowel voor de constructie als voor het voertuig. De uitrijhoeken bereikten waarden tot 20°.

Werden de inrijhoeken vergroot (inrijsnelheid tot ca. 110 km/u), dan nam de schade aan de voertuigen toe. Ook rolden er dan enkele voertuigen om. De grootte van de uitrijhoeken varieerde van 20 tot 35°. Ook de schade aan de constructie varieerde erg: van weinig schade tot zakvorming of breuk van de ligger. Meestal werden de palen aangereden. Verder is bij enkele proeven geconstateerd dat het voertuig loskwam van de grond.

Er is één proef met een vrachtauto uitgevoerd; de inrijhoek was  $15^{\circ}$ , de inrijnsnelheid bedroeg 70 km/u. Het resultaat was slecht: de constructie werd totaal vernield (AASHTO, 1977; Bronstad et al., 1985; Bryden & Phillips, 1985; Gösswein, 1977; Michie & Bronstad, 1971; Troutbeck, 1975).

Bij het beproeven van constructies met een enkelvoudige, met een afstandhouder aan de paal bevestigde ligger (afbeelding 1b) zijn voornamelijk personenauto's gebruikt in de klasse van 1800-2200 kg en enkele lichtere personenauto's in de klasse van 1000-1400 kg.

De constructie werkte goed bij niet te grote inrijhoeken (tot  $15^{\circ}$  à  $20^{\circ}$ ) en inrijnsnelheden tot ca. 110 km/u. De uitrijhoeken bereikten waarden tot  $10^{\circ}$ . Werden de inrijhoeken vergroot, dan nam de schade aan voertuig en constructie toe. Vanaf  $25^{\circ}$  rolden voertuigen om en werden de constructies overreden. Ook de uitrijhoeken werden groter en bereikten waarden tot  $25^{\circ}$ . Omrollen van het voertuig en doorbreken van de ligger vond alleen plaats bij constructies die lager waren dan 76 cm. Zakvorming in de ligger trad op bij grote afstanden tussen de palen (3,8 m). In het algemeen boog de ligger over een relatief geringe lengte ver naar opzij uit.

Bij inrijhoeken tot  $20^{\circ}$  kwam de ASI-waarde niet veel boven de 1 uit. Bij inrijhoeken boven de  $20^{\circ}$  kon de ASI-waarde boven de 2 uitkomen (AASHTO, 1977; Bronstad et al., 1985; Innenministerium Baden-Württemberg, 1969; Ivey et al., 1982; Michie & Bronstad, 1971; Troutbeck, 1975).

Proeven met vrachtauto's en bussen van resp. 15.000 en 10.000 kg verliepen redelijk bij een inrijhoek van  $15^{\circ}$  en een inrijnsnelheid van 60 km/u. Werd de snelheid vergroot tot ca. 95 km/u, dan kantelde het voertuig zelfs nog bij een constructiehoogte van 84 cm. Bij een hoogte van 90 cm is het kantelverschijnsel niet waargenomen (Innenministerium Baden-Württemberg, 1969; Ivey et al., 1982; Troutbeck, 1975).

Door de afstandhouder werden de palen alleen bij zwaardere aanrijdingen nog geraakt. Hierbij trad grote voertuigschade op.

#### 8.1.2. Constructies met een samengestelde ligger (afbeelding 2)

Bij het beproeven van constructies met een samengestelde, direct aan de paal bevestigde ligger (afbeelding 2a) zijn personenauto's gebruikt met een massa van 1000-1800 kg. De inrijhoeken bedroegen  $20^{\circ}$  en  $25^{\circ}$  en de inrijnsnelheden ca. 60 tot 110 km/u.

De constructies werden beschadigd, maar de geleiding was goed. De schade aan de voertuigen was groot. De uitrijhoeken varieerden van  $5^{\circ}$  tot  $13^{\circ}$ . De ASI-waarden waren groter dan 1,6 (AASHTO, 1977; Bronstad et al., 1985; Bryden & Phillips, 1985; Gösswein, 1977; Michie & Bronstad, 1971; Troutbeck, 1975).

Er zijn twee proeven met een vrachtauto (massa 10.000 kg) uitgevoerd bij een inrijhoek van  $15^{\circ}$  en een inrijsnelheid van 70 km/u. Bij één proef is de vrachtauto gekanteld; bij de andere was de uitrijhoek  $7^{\circ}$ . Bij beide proeven was de schade groot, zowel aan de constructie als aan het voertuig (Gösswein, 1977).

Bij het beproeven van constructies met een samengestelde, met een afstandhouder aan de paal bevestigde ligger (afbeelding 2b) zijn personenauto's, vrachtauto's en bussen gebruikt. De hier beschreven proeven hebben betrekking op het constructietype 2b-3.

De constructie werkte voor personenauto's goed bij niet te grote inrijhoeken ( $15$  à  $20^{\circ}$ ) en bij snelheden tot ca. 110 km/u. Als grootste waarde voor de uitrijhoek is  $9^{\circ}$  gemeten; de optredende rolhoeken zijn klein gebleven. Werden de inrijhoeken groter, dan werden de uitrijhoeken in het algemeen ook groter (waarden tot  $60^{\circ}$ ), en nam de schade aan voertuig en constructie toe. De structuur van de constructies bleef evenwel intact. Omrollen van het voertuig is niet geconstateerd. Gebleken is dat het aanbrenge van een breekconstructie tussen paal en afstandhouder alleen voordelen heeft bij zware aanrijdingen en in de gevallen dat het voertuig in de constructie zou vastlopen. De gevonden ASI-waarden varieerden van 1 tot 2 (AASHTO, 1977; Bronstad et al., 1985; Gösswein, 1977; Innenministerium Baden-Württemberg, 1969; Michie & Bronstad, 1971; Troutbeck, 1975).

Voor vrachtauto's en bussen voldeed de constructie redelijk goed wanneer de inrijcondities niet te zwaar waren (inrijhoeken tot  $20^{\circ}$  en inrijsnelheden tot 80 km/u). Daarboven nam de uitbuiging van de constructie dermate toe ( $> 1,80$  m), dat de palen werden aangerezen. De uitrijhoeken varieerden van ruim 10 tot  $45^{\circ}$ . Andere proeven met vrachtauto's (massa 10.000 kg) verliepen minder gunstig. De voornaamste reden hiervan was dat de voorste rail tijdens het uitbuigen niet omhoog kwam, omdat de bewegingsvrijheid van de rail door de bumper of de cabine werd beperkt. De voorste rail werd hierdoor zo zwaar belast dat in een aantal gevallen

breuk optrad met als gevolg doorschrijding van de constructie. De inrijhoek bedroeg bij deze proeven  $20^{\circ}$  en de snelheden varieerden van 65 tot 76 km/u (Gösswein, 1977; Innenministerium Baden-Württemberg, 1969).

Met dit constructietype zijn niet alleen full-scale proeven, maar ook mathematische simulaties uitgevoerd. De SWOV heeft zo onderzocht welke verschillen er zijn tussen aanrijdingen tegen een relatief stijve en tegen een relatief flexibele constructie. Veelal wordt bij plaatsing de voorkeur gegeven aan de flexibele constructie. Als daarvoor de nodige plaatsingsruimte ontbreekt, wordt de stijve geleiderailconstructie toegepast. Vergroting van de stijfheid kan worden gerealiseerd door:

- plaatsing van meer palen;
- vergroting van de weerstand die de paal in de grond ondervindt;
- verstijving van de ligger.

Voor de stijve geleiderailconstructie is als uitgangspunt gehanteerd dat bij een "normaanrijding" de uitbuiging 0,50 m bedraagt; voor de flexibele constructies bedraagt deze 1,50 m. Als "normaanrijding" is gekozen voor een aanrijding tegen de geleiderailconstructie met een middenklasse personenauto (massa ca. 850 kg), bij een snelheid van 100 km/u en een inrijhoek van  $20^{\circ}$  (Schoon, 1985).

De simulaties hebben de volgende resultaten opgeleverd. De ernst van een aanrijding tegen een stijve constructie is groter dan die van een aanrijding tegen een flexibele constructie. In termen van de waarde van de samengestelde vertragingen (ASI) is het verschil gemiddeld ca. 35%.

De mate van terugkaatsing kan worden aangegeven in termen van de grootte van de uitrijhoek en de gierhoek. Naarmate de constructie flexibeler is, is de uitrijhoek kleiner. Onder de diverse inrijcondities geeft een stijve constructie uitrijhoeken die gemiddeld ca.  $5^{\circ}$  groter zijn dan de uitrijhoeken bij een flexibele constructie. De combinatie van grote inrijhoek en lage snelheid (die op enkelbaanswegen vaker zal voorkomen dan op dubbelbaanswegen) geeft grotere uitrijhoeken dan de combinatie van kleine inrijhoek en hoge snelheid. Voor de stijve constructie geldt dit in sterkere mate dan voor de flexibele constructie. Een vergroting van de inrijhoek met ca.  $5^{\circ}$  geeft in het algemeen een vergroting van de uitrijhoek met ca.  $2^{\circ}$ . De grootte van de gierhoek is nauwelijks afhankelijk van het constructietype, maar vooral van het massatraagheidsmoment van het voertuig om de hoogte-as en van de stroefheid van het wegdek.

### 8.1.3. Zelfherstellende constructies (afbeelding 3)

Er is één proef uitgevoerd met de constructie waarbij een enkelvoudige ligger scharnierend aan een afstandhouder bevestigd is (afbeelding 3a). Daarbij is een personenauto (massa 2018 kg) gebruikt; de inrijhoek was  $25^{\circ}$ , de inrijsnelheid 96 km/u.

De aanrijding was zo zwaar dat enkele palen door de grond sneden en ca. 20 cm verplaatst werden. De afstandhouder voorkwam dat de paal werd aangereken. De schade aan de constructie was gering, het voertuig daarentegen was zwaar beschadigd (Bronstad et al., 1983; Bronstad & McDevitt, 1984).

De constructie met een samengestelde ligger, steunend op speciaal gevormde palen (afbeelding 3b) is beproefd met twee personenauto's (massa 2062 en 907 kg) en een bus (massa 18.000 kg).

De constructie voldeed goed voor de personenauto's (inrijsnelheid ca. 95 km/u, inrijhoeken  $26^{\circ}$  en  $17^{\circ}$ ). Bij de aanrijding met de zware personenauto werden de palen iets verplaatst. De schade aan de constructie was nihil. Bij de aanrijding met de bus (inrijsnelheid 91 km/u, inrijhoek  $14^{\circ}$ ) ontstond enige schade aan de ligger; enkele rails en het geleidingsmechanisme werden verbogen. De rolhoek bereikte een waarde van  $17^{\circ}$ . De bus had alleen plaatschade (Bronstad & McDevitt, 1984).

## 8.2. Geleiderailconstructies voor bruggen, viaducten en tunnels

### 8.2.1. Constructies zonder energie-absorberende voorzieningen (afb. 4)

Bij deze constructies was de ligger direct aan de paal bevestigd. De palen waren op of tegen een gesimuleerd brugdek gemonteerd.

Er zijn proeven uitgevoerd met diverse personenauto's (massa 1020-2040 kg). Bij de proeven met hoge inrijsnelheid en grote inrijhoek (100 km/u,  $20^{\circ}$ ) is een grote dynamische uitbuiging van meer dan 1 m opgetreden.

Hierbij is in de praktijk de kans groot dat een voertuig van de brug zal afrijden. De schade aan voertuigen en constructies was groot.

Er is één proef gedaan met een bus (massa 9070 kg). De inrijhoek was gering ( $7,5^{\circ}$ ); de inrijsnelheid bedroeg 77 km/u. De maximale rolhoek van het voertuig bedroeg  $15^{\circ}$ . De bus bleek na de botsing nog te kunnen rijden. De schade aan de constructie was matig.

Ook zijn constructies beproefd die waren gemonteerd op een betonnen rand

met een hoogte van 25 cm. De proeven zijn uitgevoerd met personenauto's met een massa van ca. 1575 kg. De inrijhoeken varieerden van 7 tot 35<sup>o</sup> en de inrijsnelheden van 64 tot 98 km/u. De 25 cm betonnen verhoging veroorzaakte aanzienlijke schade aan de voorwielophanging. "Springen" van de voertuigen werd evenwel niet geconstateerd.

Proeven uitgevoerd met een lagere betonnen rand van 15 cm leverden minder schade aan de voorwielophanging op (AASHTO, 1977; Bronstad et al., 1983; Bronstad & Michie, 1981; Bronstad et al., 1985; Graham et al., 1967; Michie & Bronstad, 1971).

#### 8.2.2. Constructies met energie-absorberende voorzieningen (afb. 5 + 6)

De constructie met energie-absorberende palen (afbeelding 5) is getest met personenauto's, bussen en vrachtwagens met een massa van resp. ca. 1000 kg, ca. 10.000 kg en ca. 3500-10.000 kg.

Behalve bij de proeven met de zwaarste vrachtauto voldeed de constructie goed. De uitrijhoeken lagen tussen de 4 en 12<sup>o</sup>. De schade aan voertuigen en constructie was matig. Bij de proeven met een achter de geleiderail-constructie geplaatste leuning werd duidelijk dat de leuning een belangrijk aandeel in de goede afloop van de botsing heeft vanwege het tweetrapseffect. Bij de proef met de vrachtwagen van 10.000 kg bleek de leuning niet sterk genoeg (Innenministerium Baden-Württemberg, 1969; Michie & Bronstad, 1971; Ross & Nixon, 1976; SWOV, 1975).

Er zijn ook proeven uitgevoerd met een constructie met energie-absorberende afstandhouders (afbeelding 6) met een lengte van ca. 60 cm; de hoogte van de constructie was ca. 1,50 m.

De proeven met personenauto's gaven een goed verloop te zien. De grote uitrijhoeken (ca. 12<sup>o</sup>) zullen zijn veroorzaakt door de geringe stijfheid van de ligger. De schade aan constructies en voertuigen was klein. De ASI-waarden waren voor alle proeven groter dan 1.

Bij de proef met een lichte bus (8600 kg) ontstond matige schade aan de constructie; bij die met een zware bus (18.000 kg) werd de constructie zwaar beschadigd (paal/brugverbinding). De maximale rolhoek bedroeg 20<sup>o</sup>. Bij de proef met een lichte trekker met oplegger (18.000 kg) ontstond dezelfde schade aan de constructie als bij de busproeven.

Door de verbinding tussen paal en brug te verzwakken en de ligger een grotere buigstijfheid te geven trad bij de aanrijdingen met de zwaardere



voertuigen minder structurele schade op. Bij de proeven met deze zwaardere voertuigen werd het nut van een hoge constructie (ca. 1,50 m) duidelijk: geen van de voertuigen kantelde (Kimball et al., 1976).

Tenslotte zijn er zes proeven uitgevoerd met constructies van een geringere hoogte (70-80 cm) en met een kortere energie-absorberende afstandhouder (15 cm). Er is alleen getest met personenauto's (massa variërend van 966 kg tot 2040 kg).

Het proefverloop was goed: lichte schade aan constructies en voertuigen. Na de aanrijdingen konden de voertuigen nog rijden (AASHTO, 1977; Wiles et al., 1977).

### 8.2.3. Zelfherstellende constructies (afbeelding 7)

Bij het testen van de constructie met een enkelvoudige ligger, scharnierend bevestigd aan een afstandhouder (afbeelding 7a) was de constructie op een betonnen rand gemonteerd. Als de ligger wordt weggedrukt, komt de betonnen rand buiten het werkingsgebied van de ligger te liggen.

De rail werkte zoals was bedoeld: tijdens aanrijdingen met lichtere personenauto's (ca. 1000 kg) bewoog de rail in een schuin opwaartse richting. Er is geen schade aan de constructie geconstateerd. Het voertuig kwam wel in aanraking met de betonnen rand, maar bleek daarna nog te kunnen rijden.

Bij aanrijdingen met zwaardere personenauto's (massa ca. 2000 kg) trad er een soortgelijk proefverloop op, maar was de voertuigschade groter: de wielophanging raakte ontzet, waarschijnlijk door het aanrijden van de betonnen rand.

Ook proeven met bussen (massa 9000-18.000 kg) verliepen goed. De grootste gemeten rolhoek bedroeg  $15^{\circ}$ . De schade aan constructies en bussen was klein (Bronstad et al., 1983; Bronstad & McDevitt, 1983).

De constructie met een samengestelde ligger, steunend op speciaal gevormde palen (afbeelding 7b) is niet getest, maar het valt te verwachten dat de werking overeen zal komen met die van de soortgelijke bermconstructie (zie paragraaf 8.1.3.).

### 8.2.4. Speciale ondoordringbare constructie (afbeelding 8)

Met dit type brugconstructie zijn geen full-scale proeven uitgevoerd, wel diverse mathematische simulaties met zware typen voertuigen (massa 30.000-40.000 kg).

Bij de simulaties is een maximale uitbuiging van de constructie van ca. 1,20 m opgetreden. Deze uitbuiging was zodanig dat de wielen van het voertuig nog op het wegdek bleven. Uit de grootte van de rolhoeken bleek dat de liggerhoogte van de constructie goed in overeenstemming was met de gekozen zwaartepunthoogten van de voertuigen.

Vanwege de zware uitvoering van de constructie traden bij aanrijdingen met lichtere vrachtauto's en bussen hoge voertuigvertragingen op (Van de Pol & Edelman, 1977).

## 9. TESTRESULTATEN BETONNEN GELEIDECONSTRUCTIES

Het General Motors- en het New Jersey-profiel worden het meest toegepast. Bij de bespreking van deze typen profielen kunnen we niet alleen gebruik maken van de resultaten van full-scale proeven en mathematische simulaties, maar ook van de resultaten van ongevallenstudies. Het in de Verenigde Staten ontwikkelde Configuration F-profiel en het in Zweden ontwikkelde Tric Bloc-profiel zullen worden besproken aan de hand van resultaten van full-scale proeven. Deze profielen zijn weergegeven in afbeelding 9.

### 9.1. General Motors- en New Jersey-profiel

#### 9.1.1. Resultaten van ongevallenstudies

In het begin van de jaren zeventig is in de Verenigde Staten een ongevalenstudie verricht naar aanrijdingen met drie typen betonnen geleideconstructies: General Motors, New Jersey en New Jersey Modified (Bronstad et al., 1977). In totaal zijn 540 ongevallen verzameld, die verdeeld zijn naar ernst van de afloop (zie tabel 1); daarbij is ook nagegaan of het voertuig omgerold is of op de betonnen geleideconstructie is geklommen. Met de General Motors-constructie hebben naar verhouding meer letselongevallen met een ernstige afloop plaatsgevonden dan met de beide andere constructies. Het enige gerapporteerde ongeval met dodelijk afloop heeft plaatsgevonden met een gemodificeerde New Jersey-constructie.

Bij de gewone New Jersey-constructie kwam het geringste aantal roll-over ongevallen voor: 4% van het totale aantal ongevallen met dit profieltype. Bij het General Motors- en het New Jersey Modified-profiel was dit respectievelijk 6% en 12%.

In slechts enkele gevallen is gerapporteerd dat het voertuig op de constructie is geklommen. Bij het General Motors-profiel was dit vier keer het geval en bij het New Jersey-profiel één keer. Deze ongevallen kunnen ernstig letsel opleveren als op de constructie palen (bijvoorbeeld lichtmasten) zijn gemonteerd.

Een andere studie betreft alleen ongevallen met het General Motor-profiel. In één jaar zijn 170 ongevallen gerapporteerd en vervolgens geanalyseerd (Schlosser, 1973). Het verloop van deze ongevallen was als volgt:

- 67% van de voertuigen kwam in de omgeving van de constructie tot stilstand;
- 18% van de voertuigen kaatste terug op de rijbaan; in een kwart van de gevallen resulteerde dit in een secundaire aanrijding;
- 7% van de voertuigen krom op de constructie;
- 8% van de voertuigen ging over de kop (in totaal 13 ongevallen); vijf van deze voertuigen belandden op de andere rijbaan.

Men dient zich te realiseren dat bij deze ongevallenstudies alleen de geregistreeerde ongevallen zijn onderzocht. Dit zijn in het algemeen ongevallen met een tamelijk ernstige afloop. Om er een idee van te krijgen hoe deze ongevallen zich verhouden tot het totale aantal aanrijdingen met een betonnen geleideconstructie, is het volgende onderzoek illustratief. Op twee locaties is gedurende een bepaalde periode onderzocht hoeveel contacten met de constructies plaatsvonden (op basis van sporen), en hoeveel ongevallen werden geregistreerd. In totaal zijn 100 contacten waargenomen, waarvan er 32 als ongeval zijn geregistreerd (Bronstad et al., 1977).

#### 9.1.2. Full-scale proeven

##### Personenauto's

Bij Amerikaanse proeven (AASHTO, 1977; Bronstad et al., 1977) met personenauto's met een massa van ca. 2000 kg en bij botssnelheden van ca. 100 km/u gaf het General Motors-profiel bij kleine inrijhoeken (ca.  $7^{\circ}$ ) een wat grotere rolhoek (voertuigrotatie om de lengte-as) te zien dan het New Jersey-profiel. De uitrijhoeken kwamen niet boven de  $7^{\circ}$  uit.

Bij een inrijhoek van ca.  $15^{\circ}$  was er weinig verschil tussen beide profielen. De uitrijhoek was bij het New Jersey-profiel groter dan bij het General Motors-profiel (respectievelijk  $12^{\circ}$  en  $5^{\circ}$ ).

Bij een inrijhoek van  $25^{\circ}$  is alleen het New Jersey-profiel beproefd: de voertuigvertraging, uitgedrukt in de ASI-waarde, liep hierbij zeer hoog op; in 2 van de 12 gevallen is het voertuig omgerold. De uitrijhoeken bleven beperkt tot  $8^{\circ}$ .

Bij deze proeven met zware personenauto's bleken onder vergelijkbare inrijcondities de ASI-waarden erg veel te verschillen (factor 2 à 3).

In de Verenigde Staten zijn ook proeven uitgevoerd met personenauto's met een massa van ca. 1000 kg; de botssnelheid bedroeg bij de diverse inrijhoeken ca. 90 km/u.

Bij een inrijhoek van ca.  $7^{\circ}$  werd weinig verschil in rolhoek tussen het General Motors- en New Jersey-profiel geconstateerd. De ASI-waarden lagen bij het General Motors-profiel hoger dan bij het New Jersey-profiel. De uitrijhoeken zijn niet boven de  $4^{\circ}$  uitgekomen.

Bij een inrijhoek van  $15^{\circ}$  is het General Motors-profiel beproefd met één voertuig, dat omrolde. Bij het New Jersey-profiel bleven de rolhoeken van de twee beproefde voertuigen klein, evenals de uitrijhoeken.

Bij een inrijhoek van  $20^{\circ}$  is alleen het New Jersey-profiel beproefd. De rolhoek was klein; de ASI-waarde daarentegen was ongeveer het dubbele van die bij de inrijhoek van  $15^{\circ}$ .

In Groot-Brittannië zijn diverse proeven met vijf verschillende uitvoeringsvormen van de General Motors- en New Jersey-profielen uitgevoerd (Jehu & Pearson, 1977). De verschillen hadden in hoofdzaak betrekking op de hoogte van de verticale voet. Daarnaast is nog een constructie beproefd met een horizontaal lopend vlak halverwege de constructie. Twee proeven zijn uitgevoerd met een middenklasse personenauto met een massa van ca. 1500 kg, en elf met kleine personenauto's met een massa van 760 kg (inclusief ballast). Alle proeven zijn gedaan met een inrijhoek van  $20^{\circ}$ , waarbij de snelheid varieerde van 85 tot 116 km/u.

De proeven met de elf kleine personenauto's hadden in het algemeen een slechte afloop. Het voorwiel krom in de meeste gevallen tot een hoogte van meer dan 75 cm. In zeven gevallen rolde het voertuig om. In een aantal gevallen was dit het gevolg van voertuigrotatie op de rijbaan, waarbij het voertuig in het niet-verharde gedeelte van de proefbaan terecht kwam. De uitrijhoek is niet boven de  $10^{\circ}$  uitgekomen. De langsvertraging varieerde van 1 tot 9 g. In het algemeen was er niet veel verschil tussen de diverse beproefde profielen. De drie proeven met een New Jersey-profiel zonder voet gaven relatief de gunstigste afloop te zien. Bij de proeven kwam het voorwiel niet boven de 70 cm uit en in één geval rolde de auto om.

Bij de twee proeven met personenauto's uit de middenklasse is er weinig verschil geconstateerd tussen het General Motors- en het New Jersey-profiel (beide met een hogere voet dan normaal). Het voorwiel krom tot

een hoogte van ca. 80 cm, de uitrijhoek bedroeg niet meer dan  $8^{\circ}$  en de voertuigen rolden niet om.

In Frankrijk is het New Jersey-profiel beproefd met een middenklasse personenauto; de inrijsnelheid was 84 km/u, de inrijhoek  $30^{\circ}$ . De auto rolde niet om en de uitrijhoek was klein (Guimarho, 1978).

Wat de schade aan de personenauto's betreft, kan in het algemeen worden opgemerkt dat bij aanrijdingen met kleine inrijhoeken geringe schade aan het plaatwerk is ontstaan; de voertuigen waren na afloop nog bestuurbaar. Bij aanrijdingen met grote inrijhoeken kon daarentegen zware schade aan het chassis optreden. De voertuigen waren dan meestal niet meer bestuurbaar. Er is weinig verschil tussen het schadepatroon van de auto's die het General Motors-profiel aanreden en dat van de auto's die het New Jersey-profiel aanreden.

#### Vrachtauto's en bussen

In de Verenigde Staten zijn full-scale proeven met zware voertuigen uitgevoerd met als voornaamste doel de sterkte van de betonnen geleideconstructies te testen.

De proeven zijn uitgevoerd met trekkers met oplegger, intercity bussen en schoolbussen. De massa van de voertuigen varieerde van 9000 tot 23000 kg. De zwaartepunthoogte van de voertuigen varieerde van 77 tot 160 cm; die van de opleggers was ca. 180 cm. Bij de meeste voertuigen lag het zwaartepunt daarmee boven de hoogte van de betonnen geleideconstructies, die namelijk 81 cm bedraagt. De betonnen geleideconstructies zijn beproefd bij inrijsnelheden van ca. 55-100 km/u; waarbij de inrijhoeken varieerden van  $6^{\circ}$  tot  $20^{\circ}$  (AASHTO, 1977; Davis et al., 1981; Wiles et al., 1977). Bij de proeven viel op dat de zware voertuigen bij de aanrijding een rotatie ondergingen in de richting van de geleideconstructie; bij personenauto's is de rotatierichting tegengesteld. Dit komt door het hogere zwaartepunt van de zware voertuigen.

De rolhoek werd groter naarmate de voertuigsnelheid opliep. Bij een snelheid van 100 km/u had het voertuig de neiging te kantelen (rolhoek  $45^{\circ}$ ). In twee gevallen is het voorwiel aan de zijde van de aanrijding meer dan 50 cm opgeklommen.

De uitrijhoeken waren  $10^{\circ}$  of minder, behalve bij de schoolbussen, die

beproefd zijn met de hoogste snelheid van bijna 100 km/u; hier was de uitrijhoek ca. 15°.

De voertuigvertragingen waren bij de intercity bussen beduidend lager dan bij de vrachtauto's en schoolbussen. Het lijkt aannemelijk dat dit te maken heeft met het verschil in carrosseriebouw. Bij de intercity bussen zijn de voorwielen namelijk afgeschermd door een laag doorlopende carrosserie; daarnaast staan de voorwielen verder naar achteren. Bij een aanrijding van een intercity bus met een betonnen geleideconstructie wordt de grootste kracht op de vervormbare carrosserie uitgeoefend. Bij de schoolbussen en vrachtauto's grijpt de grootste dwarskracht min of meer direct op de stijve wielophanging aan, hetgeen veel grotere vertragingen veroorzaakt.

De intercity bussen waren na de aanrijdingen in de meeste gevallen nog bestuurbaar. Bij de schoolbussen werden bij beide aanrijdingen de voorwielen onder het voertuig weggeslagen. Dit resulteerde vervolgens in kantelen van de bus. Hierbij dient aangetekend te worden dat de botssnelheden bij de schoolbussen ruim 10 km/u hoger lagen dan bij de intercity bussen.

De trekkers van de vrachtauto's met torpedo-besturing waren na de aanrijding ook nog bestuurbaar, maar de botssnelheden waren dan ook niet bijzonder hoog (54-72 km/u). De ene proef met een trekker met frontbesturing (botssnelheid 85 km/u) liep slecht af vanwege het loslaten van de kantelcabine.

Bij de eerste proeven met vrachtauto's en bussen werden de geleideconstructies zwaar beschadigd. Bij de volgende proeven zijn de constructies in de meeste gevallen versterkt met stalen liggers en zandzakken achter de constructie.

In Groot-Brittannië is een botsproef met een bus uitgevoerd op een New Jersey-profiel met een hoogte van 150 cm in plaats van de gebruikelijke 81 cm. De inrijnsnelheid bedroeg 72 km/u en de inrijhoek was 20°. De rolhoek bedroeg 13° naar de zijde van de constructie toe. Deze rotatie van de bus werd begrensd door het contact van de verhoogde bovenkant van de constructie met de zijkant van de bus; hierbij braken de ruiten aan die zijde, alsook de voor- en achterraut. De bus vervolgde zijn weg evenwijdig aan de constructie. De betonnen constructie werd niet structureel beschadigd (Jehu & Pearson, 1977).

In Frankrijk is een New Jersey-profiel beproefd met een vrachtauto met een massa van 10000 kg (inrijsnelheid 72 km/u, inrijhoek  $20^{\circ}$ ) en met een bus (inrijsnelheid 70 km/u, inrijhoek  $20^{\circ}$ ). Bij geen van beide proeven ging het voertuig over de kop; de uitrijhoeken waren gering. De betonnen constructies hebben geen beschadiging opgelopen (Guimarho, 1978).

### 9.1.3. Mathematische simulaties

Voor de General Motors- en New Jersey-profielen is de SWOV (Schoon et al., 1985) op mathematische wijze nagegaan welke invloed veranderingen van snelheid, inrijhoek en voertuigmassa hebben op de grootte van de voertuigvertraging (uitgedrukt in de ASI) en op het klimmen van het voorwiel aan de aanrijdingszijde. Het klimmen van het voorwiel geeft een beter beeld van de verticale positie van het voertuig ten opzichte van de constructie dan de rolhoek. Indien beide voorwielen (of zelfs het gehele voertuig) in dezelfde mate omhoog komen, blijft de waarde van de rolhoek namelijk laag.

De uitkomsten van de mathematische simulaties zijn in eerste instantie geverifieerd aan de hand van de resultaten van full-scale proeven. Hieruit bleek dat de resultaten van aanrijdingen onder kleine inrijhoeken vrij betrouwbaar zijn. Onder grotere inrijhoeken moeten ze als indicatief worden beschouwd.

Met het middelzware personenauto's (massa ca. 850 kg) zijn meer simulaties onder diverse inrijcondities uitgevoerd dan met lichte en zware typen, zodat hiervoor wat meer algemene tendenzen zijn aan te geven. De gekozen snelheden varieerden van 60-100 km/u en de inrijhoeken van  $5-30^{\circ}$ . Uit afbeelding 18 blijkt dat voor zowel het General Motors- als het New Jersey-profiel de waarde voor de voertuigvertraging groter wordt bij een toenemende inrijhoek en -snelheid. Wat dit betreft is er niet veel verschil tussen beide typen constructies.

Op afbeelding 19 is het klimeffect van het voorwiel aangegeven. Hieruit blijkt dat bij het New Jersey-profiel het klimmen van het voorwiel toeneemt bij een toename van inrijhoek en -snelheid. Bij een snelheid van 100 km/u is het klimmen al bij een inrijhoek van  $10^{\circ}$  onacceptabel. Bij het General Motors-profiel is het klimmen minder voorspelbaar. Bij lagere snelheden en kleinere inrijhoeken kunnen al onacceptabele klimhoogten optreden.



De simulaties met lichte en zware personenauto's (massa resp. 600 en 1250 kg) zijn onder vier inrijcondities uitgevoerd: 100 km/u -  $10^{\circ}$ , 100 km/u -  $15^{\circ}$ , 80 km/u -  $20^{\circ}$  en 60 km/u -  $30^{\circ}$ . De ASI-waarden en het klimmen van het voorwiel zijn in de afbeeldingen 20 en 21 uitgezet tegen een combinatie van de inrijsnelheid en inrijhoek. Hiertoe is de component van de inrijsnelheid gehanteerd die loodrecht op de constructie staat. Deze wordt uitgedrukt in de waarde  $v \cdot \sin \alpha$  ( $v$  = snelheid en  $\alpha$  = de inrijhoek). Deze component is medebepalend voor de grootte van de kinetische energie van het voertuig.

In afbeelding 20 zijn de ASI-waarden van simulaties met het New Jersey-profiel voor de drie typen voertuigen (licht, middelzwaar en zwaar) uitgezet. Met uitzondering van de inrijconditie 60 km/u -  $30^{\circ}$  met het middelzware voertuigtype hebben de curves een gelijkmatig verloop: het lichte voertuig geeft de hoogste ASI-waarden te zien, het zware voertuigtype de laagste en het middelzware voertuigtype waarden hier tussenin.

Het New Jersey-profiel geeft wat het klimmen van het voorwiel betreft ook voor de lichte en zware personenauto's een redelijk gelijkmatig patroon te zien: bij het toenemen van de waarde van  $v \cdot \sin \alpha$  neemt ook de klimhoogte toe (afbeelding 21). Bij het General Motors-profiel is er een meer dalende tendens. Als alleen de inrijcondities bij een snelheid van 80 en 100 km/u worden beschouwd (inrijhoeken  $10^{\circ}$ ,  $15^{\circ}$  en  $20^{\circ}$ ), klimt de lichte personenauto het minst op het New Jersey-profiel, terwijl de zware personenauto juist het minst klimt op het General Motors-profiel (klimhoogte in beide gevallen maximaal 45 cm). De lichte personenauto klimt zeer hoog op het General Motors-profiel, de zware personenauto juist op het New Jersey-profiel (klimhoogte ca. 100 cm).

De SWOV heeft ook nog een kleine serie mathematische simulaties uitgevoerd met een personenauto (massa 850 kg) en het New Jersey profiel. Daaruit komt naar voren dat de auto aanzienlijk minder hoog klimt als de wrijvingscoëfficiënt van het materiaal waaruit de constructie is gemaakt, kleiner wordt. Omslaan van het voertuig zou dan voorkomen kunnen worden, ook onder botscondities die normaal tot een ernstige afloop zouden leiden. Dit houdt enerzijds in dat de werking van deze constructie afhankelijk is van weersomstandigheden die de wrijvingscoëfficiënt van beton beïnvloeden (regen, hagel, sneeuw), maar biedt anderzijds ook een aanknopingspunt om de werking te verbeteren.

Ook de wrijvingscoëfficiënt van de verharding in de onmiddellijke nabijheid van de constructie lijkt effect te hebben op de werking ervan. Hier leidt het verlagen van de wrijving echter tot een slechtere werking van de constructie.

## 9.2. Configuration F- en Tric Bloc-profiel

Het verschil tussen het Configuration F-profiel en het New Jersey-profiel betreft alleen de hoogte van de kniklijn tussen beide oplopende vlakken: bij het Configuration F-profiel ligt de kniklijn lager (zie afbeelding 9). Full-scale proeven met betrekkelijk kleine inrijhoeken (7 en 15°) tonen aan dat een lagere kniklijn gunstiger is voor het klimeffect van het voorwiel. Dit geldt voor zowel de voertuigklasse van 1000 kg als die van 2000 kg. Bij een inrijhoek van 25° is er weinig verschil met het New Jersey-profiel. De grootte van de voertuigvertragingen en de uitrijhoeken liggen bij het Configuration F-profiel in dezelfde orde van grootte als bij de beide andere Amerikaanse profielen (Lidström & Turbell, 1978).

Het Tric Bloc-profiel wordt gekarakteriseerd door een profiel volgens een bepaalde kromtestraal. Dit profiel is een aantal keren gemodificeerd. Van het laatste ontwerp zijn drie gedocumenteerde proeven bekend. In alle drie de gevallen (inrijhoeken 15° en 25°) zijn de voertuigen bijzonder hoog tegen de constructie opgeklommen (meer dan 80 cm). De voertuigvertragingen zijn niet geregistreerd (Lidström & Turbell, 1978; Turbell, 1981).

## 10. TESTRESULTATEN OBSTAKELBEVEILIGERS

De in Hoofdstuk 7 beschreven typen obstakelbeveiligers zijn beproefd met frontale en zijdelingse aanrijdingen. Bij de frontale aanrijdingen dient het grootste deel van de kinetische energie ( $= \frac{1}{2} mv^2$ ) van het botsende voertuig door de constructie geabsorbeerd te worden. Naarmate massa en snelheid van het voertuig groter zijn, dienen zwaardere eisen aan de obstakelbeveiligers te worden gesteld.

De in de Verenigde Staten ontwikkelde obstakelbeveiligers zijn afgestemd op de zware (Amerikaanse) voertuigen. Voor deze typen voertuigen wordt bij een aanrijding de grootte van de vertraging zo gelijkmatig mogelijk over de tijdsduur van de botsing verdeeld. Indien nu een aanrijding met een lichter (Europees of Japans) voertuig tegen zo'n constructie plaats vindt, valt de voeruijgvertraging aanzienlijk hoger uit.

De laatste jaren is het aandeel van lichtere personenauto's in de Verenigde Staten aanzienlijk toegenomen. Bij de gehanteerde testcondities wordt daar nu ook rekening mee gehouden. De in dit rapport beschreven Amerikaanse obstakelbeveiligers zijn (voor zover bekend) alle nog geconstrueerd voor de zwaardere typen personenauto's met een massa van ca. 2000 kg.

De in Nederland ontwikkelde RIMOB is afgestemd op het Nederlandse (Europese) wagenpark. De constructie is dan ook lichter uitgevoerd dan de Amerikaanse typen. Het bij proeven met de RIMOB gebruikte voertuig had een massa van 850 kg (inclusief dummy en instrumentarium).

In dit hoofdstuk zullen de resultaten van proefnemingen met de inschuifbare constructies met flankgeleiding en met de energie-absorberende tonnen summier worden weergegeven. Verder zullen nog resultaten van ongevallenonderzoek worden gegeven.

### 10.1. Inschuifbare constructie met flankgeleiding

Op grond van in de Verenigde Staten uitgevoerde full-scale proeven kan worden gesteld dat de daar ontwikkelde obstakelbeveiligers in het algemeen goed functioneren. Bij frontale proeven werden de personenauto's binnen de lengte van de obstakelbeveiliger tot stilstand gebracht; bij flankproeven werd de auto goed door de constructie geleid. Indien fron-

tale proeven off-set werden uitgevoerd - dat wil zeggen dat de assen van voertuig en obstakelbeveiliger ten opzichte van elkaar zijn verschoven (40 à 50 cm) -, vond voertuigrotatie plaats. Die kan ertoe leiden dat het voertuig op de rijbaan tot stilstand komt.

Bij de proeven met zware (Amerikaanse) auto's lag de voertuigvertraging (uitgedrukt in de ASI) op een niveau dat niet acceptabel is indien de inzittenden geen autogordel omhebben maar wel als zij de autogordel gebruiken. Lichtere (Europese) auto's gaven vertragingniveaus te zien die ook voor inzittenden met autogordel onacceptabel zijn (AASHTO, 1977; Segal, 1976; SWOV, 1980; Troutbeck, 1976).

De in Nederland ontwikkelde RIMOB werkte bij frontale en zijdelingse botsingsproeven zoals hierboven voor de Amerikaanse constructies is aangegeven. Bij de off-set proeven trad eveneens voertuigrotatie op.

De gemeten voertuigvertragingen (uitgedrukt in de ASI) lagen voor de auto's met een massa van ca. 850 kg op een niveau dat niet acceptabel is voor inzittenden zonder gordel maar wel acceptabel voor inzittenden met autogordel (Quack & Schoon, 1982; Schoon, 1982).

In de periode 1980 t/m 1982 is in de Amerikaanse staat Kentucky een studie verricht naar ongevallen met obstakelbeveiligers. De volgende typen waren hierbij betrokken: Hi-Dro Cell, GREAT, stalen vaten en met zand gevulde tonnen. In totaal zijn 116 ongevallen geanalyseerd. Uit het onderzoek bleek dat in 85% van de gevallen de obstakelbeveiliger naar behoren had gefunctioneerd. In de resterende gevallen functioneerden de constructies niet goed, onder meer vanwege omrollen van het voertuig en te grote terugkaatsing. Het percentage ongevallen met gewonden was vrij hoog (38%); het aandeel ongevallen met doden en/of zwaar gewonden bedroeg 16%. In negen gevallen was er een lichtere categorie personenauto bij betrokken; het aandeel ongevallen met letsel was hierbij 67%, beduidend hoger dan bij de totale groep. Uit het onderzoek kunnen geen grote onderlinge verschillen tussen de diverse typen obstakelbeveiligers worden opgemaakt (Pigman et al., 1984).

In Nederland zijn vanaf 1983 ca. 50 RIMOB-obstakelbeveiligers geplaatst. Tot dusver hebben er zeven ongevallen met dit type obstakelbeveiliger plaats gevonden. In geen van de gevallen is letsel geconstateerd.

## 10.2. Energie-absorberende tonnen

De in Hoofdstuk 7 beschreven Energite-obstakelbeveiliger is op diverse wijzen beproefd met Amerikaanse en Europese (Japanse) personenauto's. Bij een aantal frontale proeven met een Amerikaans proefvoertuig is de auto door de gehele constructie heen geschoten. Bij lichtere typen personenauto's gebeurde dit niet. Bij frontale proeven onder een hoek roteerde het voertuig sterk. Bij de frontale proeven lag de voertuigvertraging voor inzittenden met een autogordel op een acceptabel niveau. Proeven met flankbotsingen gaven slechte resultaten te zien: óf het voertuig roteerde sterk, óf het schoot door een aantal tonnen heen, waarna het af te schermen obstakel werd geraakt (AASHTO, 1977; SWOV, 1980; Troutbeck, 1976; Young, 1975).

## 11. EVALUATIE TESTRESULTATEN

In dit hoofdstuk zullen we op basis van de testresultaten een oordeel geven over de werking van stalen geleiderailconstructies, betonnen geleideconstructies en obstakelbeveiligers. De beoordeling van de stalen en betonnen geleideconstructies zal geschieden aan de hand van een lijst van constructieve aspecten, die voortvloeien uit de in Hoofdstuk 4 geformuleerde functionele eisen.

### 11.1. Stalen geleiderailconstructies

#### 11.1.1. Constructieve aspecten

De functionele eisen aan afschermingsvoorzieningen kunnen voor stalen geleiderailconstructies worden vertaald in de volgende constructieve aspecten:

- de ligger moet stijf zijn;
- de ligger moet voldoende sterk zijn om doorbreken te voorkomen;
- de ligger moet op en over voldoende hoogte functioneren, ook bij een volledige uitbuiging;
- de ligger dient de ondersteuningselementen op voldoende wijze af te schermen, ook bij een volledige uitbuiging;
- de ondersteuningselementen en/of afstandhouders moeten bij een aanrijding op progressieve wijze uitbuigen en/of vervormen, waarbij de botsingsenergie wordt geabsorbeerd;
- energie die wordt geabsorbeerd mag niet aan het voertuig worden teruggegeven; energie kan worden opgenomen door plastische vervorming en wrijving; opgenomen elastische of potentiële energie mag pas vrijkomen nadat het voertuig de constructie heeft verlaten.

#### 11.1.2. Beoordeling van de diverse constructies

De constructies worden beoordeeld in dezelfde volgorde als waarin ze in Hoofdstuk 5 zijn beschreven.

##### Bermconstructies met een enkelvoudige ligger (afbeelding 1)

De constructies waarbij de ligger direct aan de paal is bevestigd (afbeelding 1a) zijn niet geschikt, omdat:

- de palen bij een aanrijding worden aangereden;

- de ligger bij uitbuiging niet op hoogte blijft;
- de ligger niet eenvoudig te verstijven is.

De constructies met afstandhouder (afbeelding 1b) zijn ook niet geschikt. De constructie die is weergegeven in afbeelding 1b-1 is ongeschikt omdat het contactvlak tussen voertuig en ligger lager komt te liggen naarmate de ligger verder uitbuigt (kantelgevaar). De constructies die zijn weergegeven in de afbeeldingen 1b-2 en 1b-3 zijn ongeschikt omdat de stijfheid van de ligger niet eenvoudig kan worden vergroot en omdat geen progressieve uitbuiging kan worden geprogrammeerd.

#### Bermconstructies met een samengestelde ligger (afbeelding 2)

De constructies waarbij de ligger direct aan de paal is bevestigd (afbeelding 2a) zijn niet geschikt omdat de ligger bij het uitbuigen niet op hoogte blijft en de palen worden aangereden.

De constructie met afstandhouder die is weergegeven in afbeelding 2b-1 is ook niet geschikt, omdat het contactvlak tussen voertuig en ligger lager komt te liggen naarmate de ligger verder uitbuigt (kantelgevaar).

De constructies met afstandhouder die zijn weergegeven in de afbeeldingen 2b-2 en 2b-3 zijn wel geschikt; de laatste verdient daarbij de voorkeur, omdat:

- de constructie tijdens een aanrijding beter op hoogte blijft;
- de palen minder gauw worden aangereden;
- er een tweetrapseffect aanwezig is voor aanrijdingen met zware voertuigen.

#### Zelfherstellende bermconstructies (afbeelding 3)

Beide typen zelfherstellende constructies zijn geschikt. De dwarsuitbuiging is geringer dan bij de constructie op afbeelding 2b-3. Het is niet bekend welke invloed dit heeft op de kans op letsel voor de inzittenden. Met de constructie van afbeelding 3a kan op eenvoudiger wijze een progressieve werking worden verkregen dan met die van afbeelding 3b.

#### Brugconstructies zonder energie-absorberende voorzieningen (afbeelding 4)

Deze constructie is niet geschikt: heeft ze stijve, moeilijk vervormbare palen, dan worden de voertuigvertragingen te hoog; heeft zij zwakke palen, dan gelden dezelfde bezwaren als bij de soortgelijke bermconstructies.

### Brugconstructies met energie-absorberende voorzieningen (afb. 5 + 6)

De constructies met energie-absorberende palen die zijn weergegeven in de afbeeldingen 5a, 5b en 5c zijn geschikt. Wel moet worden opgemerkt dat de verbinding tussen paal en fundering bestaat uit een "geprogrammeerde" lasverbinding. Als de las geheel breekt, kan de ligger te ver uitbuigen en roteren. De constructies van de afbeeldingen 5d en 5e zijn in principe eveneens geschikt, maar er is nog weinig ervaring mee opgedaan.

De constructies met energie-absorberende afstandhouders (afbeelding 6) zijn beide geschikt, waarbij moet worden aangetekend, dat de mate van dwarsverplaatsing per constructie verschilt; welke invloed dit heeft op de grootte van de voertuigvertraging - en daarmee de kans op letsel - is niet duidelijk.

### Zelfherstellende brugconstructies (afbeelding 7)

Beide typen zelfherstellende constructies zijn geschikt; zie ook de opmerkingen bij de zelfherstellende bermconstructies.

### Speciale ondoordringbare brugconstructie (afbeelding 8)

Deze constructie is wel geschikt, maar kan alleen worden geplaatst in combinatie met een ervoor geplaatste beveiligingsconstructie.

## 11.2. Betonnen geleideconstructies

### 11.2.1. Constructieve aspecten

De belangrijkste constructieve aspecten aan betonnen geleideconstructies zijn:

- de constructie moet voldoende sterk zijn;
- de constructie moet voldoende hoog zijn;
- de constructie moet voorkomen dat wielen te hoog tegen de constructie opklimmen;
- de geleiding moet primair plaatsvinden op basis van wielgeleiding; hiermee wordt voorkomen dat de contactkrachten tussen carrosserie en constructie te hoog worden.

### 11.2.2. Beoordeling van de diverse constructies

Voorafgaand aan de beoordeling van de verschillende constructies dienen nog enkele algemene opmerkingen te worden gemaakt.



Vanwege het lage contactvlak bij een aanrijding ontstaat bij zwaardere voertuigen met een hoog zwaartepunt de neiging te gaan kantelen. Bij de normale constructies met een hoogte van ca. 80 cm kan dit ertoe leiden dat deze voertuigen omrollen. Dit probleem doet zich niet voor in tunnels, als het profiel in de tunnelwand is geïntegreerd.

Bij aanrijdingen met personenauto's doet zich het verschijnsel voor dat de wielen aan de aanrijdingszijde tegen de constructie opklimmen. Dit is niet toelaatbaar vanwege de kans op omrollen. Ook hier geldt dat omrollen zich minder gauw voordoet bij integratie van het profiel in tunnelwanden. Bij aanrijdingen die plaats vinden onder kleine inrijhoeken, werken de betonnen geleideconstructies in principe goed als sprake is van wielgeleiding. Zijn de inrijhoeken groter dan vindt in eerste instantie meestal geen wielgeleiding meer plaats, maar is er direct contact tussen carrosserie en constructie. Dit leidt tot hoge voertuigvertragingen die de kans op ernstig letsel doen toenemen.

#### General Motors- en New Jersey-profiel (afbeelding 9)

Bij het New Jersey-profiel klimt het voorwiel hoger op naarmate de inrijhoek groter is; bij het General Motors-profiel is het klimmen van het voorwiel onvoorspelbaar.

Inrijnelheden boven de 80 km/u en inrijhoeken van meer dan ca. 25° geven bij beide profieltypen onacceptabele klimhoogten (met kans op omrollen).

#### Configuration F-profiel (afbeelding 9)

Aanrijdingen met het Configuration F-profiel leveren iets hogere voertuigvertragingen op dan aanrijdingen met het General Motors- en New Jersey-profiel. Wat de klimhoogte van het voorwiel bij het Configuration F-profiel betreft, kan worden opgemerkt dat deze bij kleinere inrijhoeken (5-15°) beduidend geringer is dan bij de beide andere profielen. Bij grotere inrijhoeken (20-30°) is de klimhoogte even onacceptabel als bij de beide andere profielen.

#### Tric Bloc-profiel (afbeelding 9)

Vanwege het ontbreken van metingen valt over de grootte van de voertuigvertraging niets te zeggen. De klimhoogte van het voorwiel is bij het Tric Bloc-profiel onacceptabel.

### 11.3. Obstakelbeveiligers

Voor de beoordeling van de obstakelbeveiligers moet worden volstaan met de volgende algemene opmerkingen.

Als goede constructies kunnen die typen worden aangemerkt, die bij frontale aanrijdingen inschuifbaar zijn en die voorzien zijn van een flankgeleiding. De constructies moeten een progressieve werking hebben die is afgestemd op het voertuigpark.

Voor toepassing in een land met voornamelijk lichtere personenauto's komt de RIMOB-obstakelbeveiliger in aanmerking, alsmede de Amerikaanse typen obstakelbeveiligers die zijn afgestemd op de Europese en Japanse typen personenauto's. De obstakelbeveiliger met energie-absorberende tonnen komt niet in aanmerking vanwege het ontbreken van flankgeleiding.

## 12. CONCLUSIES

Rekening houdend met de betrekkelijk slechte kwaliteit van de veiligheidscriteria, kunnen uit onderzoek de volgende conclusies worden getrokken over beveiligingsconstructies voor autosnelwegen.

Goede stalen geleiderailconstructies kenmerken zich door een stijve ligger die in principe niet plastisch vervormt, en door ondersteunings- en bevestigingselementen die voor de absorptie van de botsingsenergie zorgdragen. Belangrijk is dat bij een aanrijding het contactvlak tussen voertuig en constructie hoog ligt en ook bij uitbuiging van de ligger hoog blijft. Constructies die na een aanrijding zelfherstellend zijn, zijn in principe ook goed, mits de door de constructie opgenomen botsingsenergie niet aan het voertuig wordt teruggegeven.

Diverse typen stalen geleiderails voldoen goed bij aanrijdingen door personenauto's, ook onder zware inrijcondities (inrijsnelheden tot 100 km/u, inrijhoeken tot ca. 20°). Ze voldoen eveneens bij aanrijdingen door zware voertuigen, mits de inrijcondities niet te zwaar zijn (snelheden tot 80 km/u, hoeken tot 15°).

Om een keus te kunnen maken uit de vele constructies, is nader onderzoek noodzakelijk, onder meer naar de relatie tussen de grootte van de voertuigvertraging en de grootte van de dwarsverplaatsing van de ligger, in combinatie met onderzoek naar het effect van een progressieve werking van de constructie.

De niet-vervormbare betonnen geleideconstructies (inrijsnelheid >80 km/u; inrijhoek >15°) kunnen in hun huidige vorm bij zware inrijcondities als onveilig worden beschouwd vanwege het klimeffect en de mogelijk te grote voertuigvertraging voor personenauto's. Bij aanrijdingen door vrachtauto's voldoen de betonnen constructies redelijk, maar als het voertuig een hoog zwaartepunt heeft, bestaat er kantelgevaar. Dit laatste is niet het geval als het profiel van de geleideconstructie is geïntegreerd in een tunnelwand. Onderzoek is noodzakelijk om aan te kunnen geven in hoeverre het profiel te optimaliseren is, met name ten aanzien van de wrijvingscoëfficiënt. Ook de wrijving van het wegdek in de buurt van de geleideconstructie dient in een dergelijk onderzoek betrokken te worden.

Een goede obstakelbeveiliger wordt gekenmerkt door het feit dat hij bij een frontale aanrijding het voertuig op acceptabele wijze tot stilstand brengt en bij een flankaanrijdingen het voertuig geleidt. Voor de Europese situatie zijn alleen die typen acceptabel, die zijn afgestemd op het Europese voertuigpark.

### 13. AANBEVELINGEN VOOR ONDERZOEK

In Hoofdstuk 11 is bij alle typen afschermingsvoorzieningen aangegeven of ze al dan niet voor plaatsing geschikt zijn. Bij een aantal van de geschikte typen zijn tevens restricties aangegeven. Deze restricties waren noodzakelijk, omdat er vaak onvoldoende kennis is om tot een goed onderbouwde uitspraak te kunnen komen.

In dit hoofdstuk zal worden aangegeven welk onderzoek noodzakelijk is voor het bepalen van de relaties tussen het botsproces (in het bijzonder de inrijcondities en afloop van het ongeval) en de constructieve elementen van diverse beschouwde constructies. Kennis van deze relaties is noodzakelijk voor:

- de keuze van een optimaal functionerende afschermingsvoorziening;
- het aanpassen van bestaande constructies;
- de keuze van de basiselementen voor een nieuw ontwerp afschermingsvoorziening.

#### 13.1. Onderzoek naar letselcriteria

De meest gehanteerde indicator voor de ernst van een aanrijding met een afschermingsvoorziening is de grootte van de voertuigvertraging. Met zeer globale criteria kan een schatting van de kans op (ernstig) letsel worden gemaakt. Het is beter gebruik te maken van indicatoren die direct een indruk geven van de geweldsinwerking op de inzittenden. Voor een goede schatting van de kans op letsel is echter nog veel onderzoek noodzakelijk. Voor toepassing van huidige of eventuele toekomstige criteria is in ieder geval een goede kennis van het totale versnellingsveld in het botsende voertuig nodig; in Bijlage 4 wordt uiteengezet hoe de versnellingen in elk gewenst punt in een voertuig kunnen worden berekend.

Nu lijkt dit niet direct een onderwerp van onderzoek dat past in het kader van onderzoek naar afschermingsvoorzieningen. Toch zal in een meer toegepaste vorm bepaald moeten worden welke invloed het grote verschil in voertuigvertragingsswaarden tussen de niet en wel vervormbare geleideconstructies heeft op de kans op ernstig letsel. Het verschil bedraagt namelijk ongeveer een factor 3 (uitgedrukt in ASI-waarden) in het nadeel van de niet-vervormbare betonnen constructies.

## 13.2. Onderzoek naar constructieve aspecten

Diverse constructieve aspecten vragen nog om nader onderzoek. Ze zullen per hoofdgroep worden aangegeven.

### 13.2.1. Stalen geleiderailconstructies

A. De relatie tussen de mate van uitbuiging in dwarsrichting en de kans op letsel.

Toelichting. Bij diverse typen bermconstructies wordt bij een aanrijding met een personenauto een uitbuiging van 1 tot 1,5 m bereikt. Bij brugconstructies bedraagt deze veelal slechts 20-30 cm.

B. De relatie tussen een progressieve opbouw van krachten bij uitbuiging van de ligger en de kans op letsel.

Toelichting. Het is wellicht gewenst bij de aanvang van de botsing een "zachte" aanrijding te hebben (een relatief gemakkelijke uitbuiging), om daarna de reactiekrachten te laten toenemen naarmate de constructie meer uitbuigt. Een dergelijke progressieve opbouw is ook van nut voor het grote verschil in massa van de diverse betrokken voertuigen.

C. De relatie tussen de stijfheid (uitbuiging) van de constructie en de grootte van de uitrijhoek en voertuigrotatie. De wrijvingsweerstand tussen voertuig en wegdek (bermoppervlak) zal hierbij waarschijnlijk van grote invloed zijn.

Toelichting. Mogelijk is bij stijve constructies de terugkaatsing groter dan bij flexibeler constructies. Verwacht wordt dat de uitrijcondities gunstiger zijn naarmate de wrijvingscoëfficiënt tussen het voertuig en de ondergrond groter is. De verschillen in wrijvingscoëfficiënt tussen een asfaltlaag en een zand- of grasberm zijn groot.

D. De relatie tussen de hoogte van een geleiderailconstructie (in combinatie met de mate van dwarsuitbuiging) en het kantelen van voertuigen met een hoog zwaartepunt.

Toelichting. De hoogte van de huidige constructies lijkt toereikend voor de meeste typen voertuigen. In sommige gevallen kan het gewenst zijn het kantelgevaar voor hogere typen voertuigen zoveel mogelijk uit te sluiten.

### 13.2.2. Betonnen geleideconstructies

A. De relatie tussen profiel en/of wrijvingscoëfficiënt en de mate waarin de wielen aan de aanrijdingszijde klimmen.

Toelichting. De klimhoogte van het voorwiel van een personenauto is bij de huidige constructies ontoelaatbaar. In hoeverre optimalisatie te realiseren is, dient onderzocht te worden.

B. De relatie tussen de hoogte van de constructie en het kantelgevaar voor vrachtauto's.

Toelichting. In tegenstelling tot personenauto's hebben vrachtauto's bij een aanrijding kantelneigingen naar de constructie toe.

C. De relatie tussen het botsingverloop en de wrijving tussen voertuig en wegdek.

Toelichting. De indruk bestaat dat het botsingverloop gunstiger is naarmate de genoemde wrijving groter is. Als dit het geval is, dient hiermee rekening gehouden te worden, onder meer bij het plaatsen van betonnen geleideconstructies in berm.

LITERATUUR

- AASHTO (1977). Guide for selecting, locating and designing traffic barriers. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 1977.
- ACPA (1979). Concrete safety and curb manual. American Concrete Pavement Association, Arlington Heights, Illinois, 1979.
- Bronstad, M.E.; Calcote, L.R. & Kimball, Jr., C.E. (1977). Concrete median barrier research. Final Report Vol. 1 and 2. Report FHWA-RD-77-3. Federal Highway Administration, Washington, D.C., 1977.
- Bronstad, M.E.; Calcote, L.R.; Kimball, C.E. Jr., & McDevitt, C.F. (1983). Development of retrofit railings for through truss bridges. Transportation Research Record 942 (1983).
- Bronstad, M.E. & McDevitt, C.F. (1984). Design and development of self-restoring traffic barriers. Transportation Research Record 970 (1984).
- Bronstad, M.E.; Kimball, Jr., C.E. & McDevitt, C.F. (1981). Bridge rail retrofit for curved structures. Report FHWA/RD-81/-. Federal Highway Administration, Washington, D.C., 1981.
- Bronstad, M.E.; Kimball, Jr., C.E. & McDevitt, C.F. (1982). Crash test and evaluation of barriers installed on a curved off ramp. Transportation Research Record 868 (1982).
- Bronstad, M.E. & Michie, J.D. (1981). Multiple-service level highway bridge railing selection procedures. NCHRP Report No. 239. Transportation Research Board, Washington, D.C., 1981.
- Bronstad, M.E.; Michie, J.D. & Mayer, Jr., J.B. (1985). Performance of longitudinal traffic barriers. Phase I. Interim report draft on Project SwRi 06-7684. Southwest Research Institute, San Antonio, Texas, 1985.
- Bryden, J.E. & Phillips, R.G. (1985). Performance of a thrie-beam steel-post bridge-rail system. Paper presented for the 64th Annual Meeting of the Transportation Research Board, 1985.
- Davis, S.; Baczynski, R. & Garn, R. (1981). Test and evaluation of concrete median barriers with light and heavy vehicles. Vol. 1 and 2. Reports FHWA/RD-81/134 and 81/135. Prepared for the Federal Highway Administration. Dynamic Science Inc., 1981.
- EAS (1975). The GREAT system: Design manual; Guard Rail Energy Absorbing Terminal; A proven-effective crash cushion for narrow-site hazards. Energy Absorption Systems, Inc., 1975.



- EAS (1975). Crash test evaluation of the Guard Rail Energy Absorbing Terminal. Energy Absorption Systems, Inc., 1975.
- Gösswein, K. (1977). Anfahrversuche an Schutzleitplanken mit Sigma-Pfosten. Forschungsauftrag Studiengesellschaft für Stahlleitplanken e.V., Siegen, 1977.
- Graham, M.D.; Burnett, W.C.; Gibson, J.L. & Freer, R.H. (1967). New highway barriers: the practical application of theoretical design. Highway Research Record 174 (1967).
- Guimarho, C. (1978). Les glissières de sécurité en béton. Le Moniteur, 27 février 1978.
- Hahn, K.C. & Bryden, J.E. (1980) Crash tests of construction-zone traffic barriers. Report FHWA/NY/RR-80/82. New York State Department of Transportation, Engineering Research and Development Bureau, 1980.
- Huelke, D.F. & Gikas, P.W. Nonintersectional automobile fatalities; A problem in roadway design. University of Michigan, Medical School (niet gepubliceerd).
- Innenministerium Baden-Württemberg (1969). Ahnfahrversuche an Leitplanken (Anschlussauftrag). Stuttgart, 1969.
- Ivey, D.L.; McDevitt, C.F.; Robertson, R.; Buth, C.E. & Stocker, A.J. (1982). Thrie-beam guardrails for school and intercity buses. Transportation Research Record 868 (1982).
- Jehu, V.J. & Pearson, L.C. (1977). Impacts of European cars and a passenger coach against shaped concrete barriers. TRRL Laboratory Report 801. Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, 1977.
- Jordaan, D.J.R. & Van de Pol, W.H.M. (1977). Slagboomconstructies bij beveiligingsconstructies in bermen ten behoeve van doorgangen; een beschrijving van een aantal botsproeven in opdracht van de Rijkswaterstaatswerkgroep "Bermbeveiligingen", gehouden in 1970-1972 op "De Vlasakkers" te Amersfoort. R-77-48. SWOV, 1977.
- Kimball, C.E.; Bronstad, M.E.; Michie, J.D.; Wentworth, J.A. & Viner, J.G. (1976). Full-scale tests of a modified collapsing-ring bridge rail system. Transportation Research Record 594 (1976).
- Lidström, M. & Turbell, Th. (1978). Vägräcken; Litteraturstudie rörande betongräcken och praktiska prov med betongräcket Tric-Bloc. VTI Rapport 158. Statens Väg- och Trafikinstitut, Linköping, 1978.

- Lisle, F.N. & Hargroves, B.T. (1980). Evaluation of the performance of portable precast concrete traffic barriers. Transportation Research Record 769 (1980).
- Michie, J.D. & Bronstad, M.E. (1971). Location, selection and maintenance of highway traffic barriers. HHCPR Report 118. Highway Research Board, Washington, D.C., 1971.
- Pigman, J.G.; Agent, K.R. & Creasy, T. (1984). Analyses of accidents involving crash cushions. Kentucky Transportation Research Program. University of Kentucky, 1984.
- Pigman, J.G.; Agent, K.R. & Creasy, T. (1984). Analyses of accidents involving breakaway-cable-terminal end treatments. Kentucky Transportation Research Program. University of Kentucky, 1984.
- Pol, W.H.M. van de (1985). Hydraulische schokdempers; Expansiemogelijkheden in beveiligingsconstructies op kunstwerken. R-75-9. SWOV, 1975.
- Pol, W.H.M. van de & Edelman, A. (1977). Viaductbeveiligingsconstructies voor vrachtauto's. R-77-36. SWOV, 1977.
- Quack, R.F.B. & Schoon, C.C. (1982). The RIMOB; A Dutch impact attenuator with crumpling tubes. A report of the development research: inventarisatie van het probleem, functionele eisen, ontwikkeling van ontwerp en het testen. R-82-31, SWOV, 1982.
- Ross, H.E. & Nixon, J.F. (1979). Impact performance and an evaluation criterion for median barriers. Transportation Research Record 586 (1976).
- Schlosser, P. (1973). Report on accident experience - concrete median barrier. Federal Highway Administration, Wisconsin Division, 1973.
- Schoon, C.C. (1979). Oriënterend verslag over het Tric-Bloc systeem. SWOV (niet gepubliceerd).
- Schoon, C.C. (1982). RIMOB-obstakelbeveiliging met rimpelbuizen. R-82-38 SWOV, 1982.
- Schoon, C.C. (1985). Aanrijdingen met in stijfheid verschillende typen geleiderailconstructies. SWOV, 1985.
- Schoon, C.C.; Van de Pol, W.H.M. & Jordaan, D.J.R. (1985). Aanrijdingen met de betonnen geleideconstructietypen General Motors en New Jersey. SWOV, 1985.
- Segal, D.J. (1976). Highway Vehicle Object Simulation Model (HVOSM). Volume 1. Users manual. Report nr. FHWA-RD-76-162.  
Volume 2. Programmers manual. Report nr. FHWA-RD-76-163.

Volume 3. Engineering manual-analysis. Report nr. FHWA-RD-76-164.

Prepared for the Federal Highway Administration. Calspan Corporation, 1976.

- Sicking, D.L.; Ross, H.E. & Benson, F.C. (1982). A crash cushion for narrow objects. Texas Transportation Institute, 1982.
- Slop, M. (1970). Roadside safety structures; A description of the crash barriers developed in The Netherlands. Report 1970-6. SWOV, 1970.
- SWOV (1975). Beveiligingsconstructies op kunstwerken. R-75-8 I-IV. SWOV, 1975.
- SWOV (1980). Beoordeling van twee nieuwe obstakelbeveiligers: de Energite en GREAT obstakelbeveiligers. R-80-52. SWOV, 1980.
- Troutbeck, R.J. (1975). A review of the literature of full-scale tests on safety barriers and kerbs. Report No. 45. Australian Road Research Board, Vermont-South, Victoria, 1975.
- Troutbeck, R.J. (1976). A review of the literature of full-scale tests on safety barriers and energy attenuators. Australian Road Research (1976) 1.
- Turbell, Th. (1981). Crash tests of the Tric-Bloc precast concrete median barrier. Rapport 252. Statens Väg- och Trafikinstitut, Linköping, 1981.
- Wiles, E.O.; Bronstad, M.E. & Kimball Jr., C.E. (1977). Heavy vehicle crash test evaluation of concrete safety shape. Southwest Research Institute, San Antonio, Texas, 1977.
- Young, B.O. (1975). Evaluation of 1400 lbs Energite and 2100 lbs Fibco inertial barrier models. Energy Absorption Systems, Inc., 1975.
- Young, B.O. (1975). Preliminary report of crash test at angle impacts on sand inertial barrier systems. Energy Absorption Systems, Inc., 1975.



TABEL EN AFBEELDINGEN 1 T/M 21

Tabel 1. In de Verenigde Staten geregistreerde ongevallen met drie typen betonnen geleideconstructies: General Motors, New Jersey en New Jersey Modified (Bron: Bronstad et al., 1976).

Afbeelding 1. Zijbermconstructies met een enkelvoudige ligger.

Afbeelding 2. (Midden)bermconstructies met een samengestelde ligger.

Afbeelding 3. Bermconstructies die na een aanrijding zelf-herstellend zijn.

Afbeelding 4. Brugconstructies zonder energie-absorberende voorzieningen.

Afbeelding 5. Brugconstructies met energie-absorberende palen.

Afbeelding 6. Brugconstructies met energie-absorberende afstandhouders.

Afbeelding 7. Brugconstructies die na een aanrijding zelf-herstellend zijn.

Afbeelding 8. Een specifieke brugconstructie ter voorkoming van doorschrijding.

Afbeelding 9. Diverse profielen van betonnen geleideconstructies.

Afbeelding 10. "GREAT" obstakelbeveiliger met zeshoekige kunststofschuim patronen.

Afbeelding 11. "Hi-Dro" obstakelbeveiliger met PVC-cellen gevuld met water.

Afbeelding 12. "Hi-Dri" obstakelbeveiliger met vermiculite patronen.

Afbeelding 13. Obstakelbeveiliger samengesteld uit stalen vaten.

Afbeelding 14. De RIMOB-obstakelbeveiliger met aluminium rimpelbuizen.

Afbeelding 15. Obstakelbeveiliger samengesteld uit met zand gevulde energie-absorberende tonnen.

Afbeelding 16. Ingegraven en verankerde begin- en eindpunt van een samengestelde ligger (Nederland).

Afbeelding 17. Beginpunt railbeveiliging (VS).

Afbeelding 18. Relatie tussen de inrijhoek en de voertuigvertragingen (uitgedrukt in de ASI) van een middelzware personenauto met als parameter de voertuigsnelheid bij gesimuleerde aanrijdingen tegen de General Motors en de New Jersey betonnen geleideconstructies.

Afbeelding 19. Relatie tussen de inrijhoek en de klimhoogte van het voorwiel van een middelzware personenauto met als parameter de voertuigsnelheid bij gesimuleerde aanrijdingen tegen de General Motors en de New Jersey betonnen geleideconstructies.

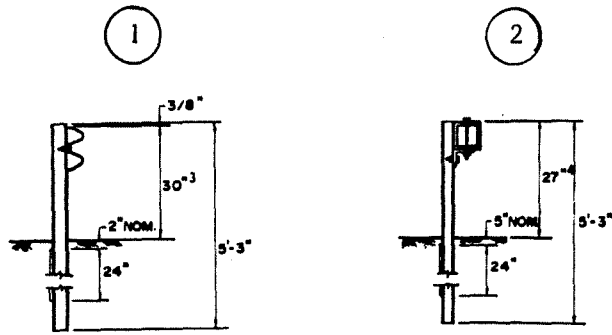
Afbeelding 20. Relatie tussen  $v \cdot \sin \alpha$  (snelheid maal sinus inrijhoek) en de voertuigvertragingen (uitgedrukt in de ASI) van resp. een lichte, middelzware en zware personenauto bij gesimuleerde aanrijdingen tegen de New Jersey betonnen geleideconstructie.

Afbeelding 21. Relatie tussen  $v \cdot \sin \alpha$  (snelheid maal sinus inrijhoek) en de klimhoogte van het voorwiel van een lichte en een zware personenauto bij gesimuleerde aanrijdingen tegen de General Motors en de New Jersey betonnen geleideconstructies.

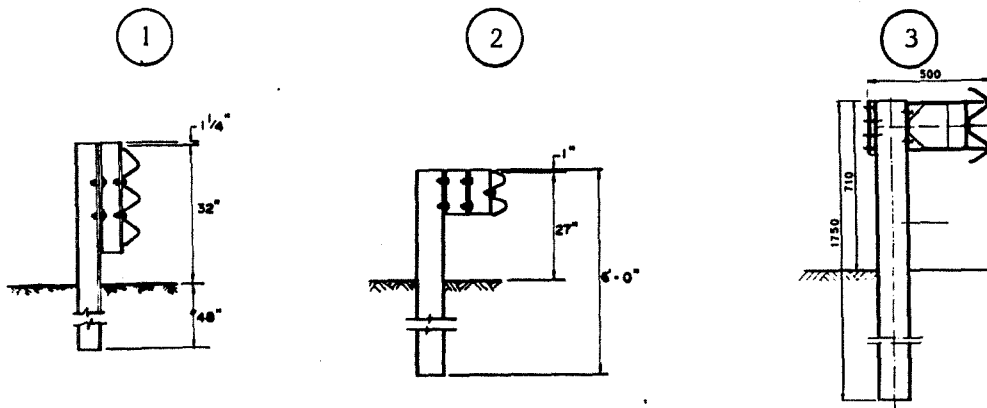
Type constructie	Aantal ongevallen				Bijzonderheden voertuig	
	UMS	Ernstig letsel	Dodelijke afloop	Totaal	Gekanteld	Op de constructie geklimmen
General Motors	225 (75%)	74 (25%)		299 (100%)	19 (6,4%)	4 (1,3%)
New Jersey	133 (79%)	35 (21%)		168 (100%)	6 (3,6%)	1 (0,6%)
New Jersey Modified*	58 (79%)	15 (20%)	1 (1%)	73 (100%)	9 (12,3%)	
Totaal	416 (77%)	124 (23%)	1 (0,2%)	540 (100%)	34 (6,3%)	5 (0,9%)

\* De voethoogte is bij dit type 2,5-5 cm hoger dan bij het gewone New Jersey-profiel.

Tabel 1. In de Verenigde Staten geregistreerde ongevallen met drie typen betonnen geleideconstructies: General Motors, New Jersey en New Jersey Modified (Bron: Bronstad et al., 1976).



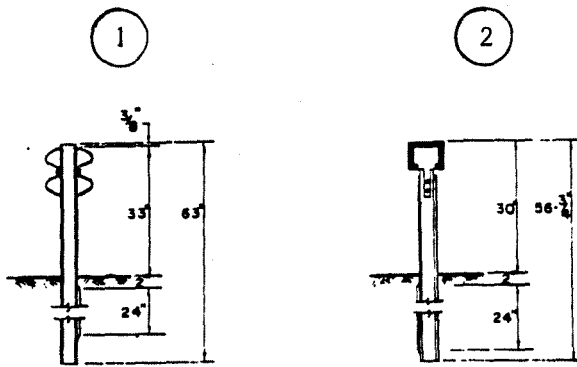
a. Ligger direct aan de paal bevestigd.



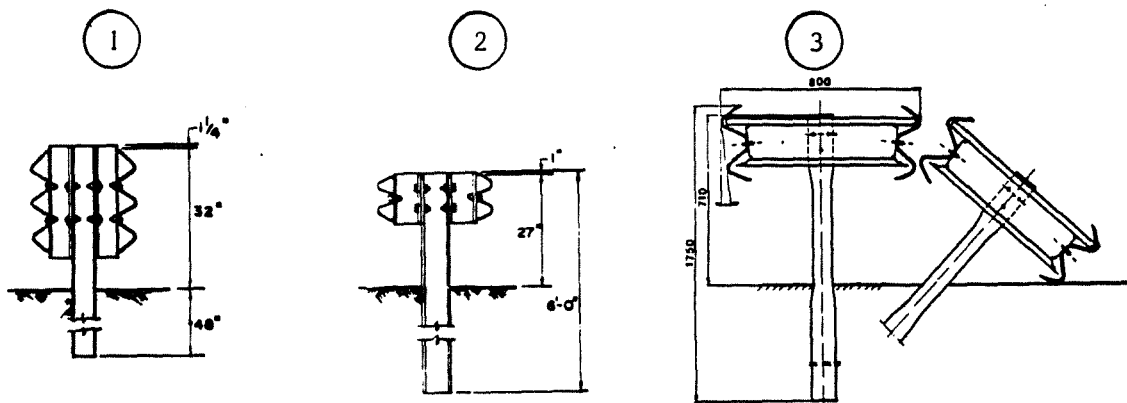
b. Ligger met een afstandhouder aan de paal bevestigd.

Afbeelding 1. Zijbermconstructies met een enkelvoudige ligger.



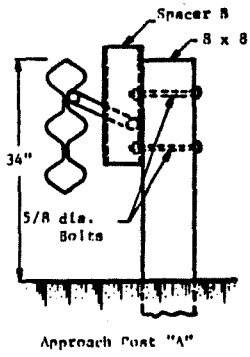


a. Ligger direct aan de paal bevestigd.

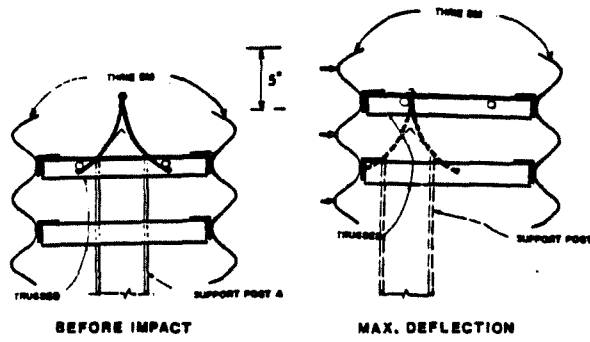


b. Ligger met afstandhouders aan de paal bevestigd.

Afbeelding 2. (Midden)bermconstructies met een samengestelde ligger.

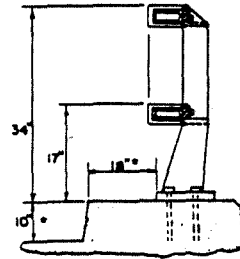
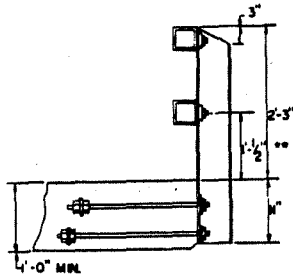
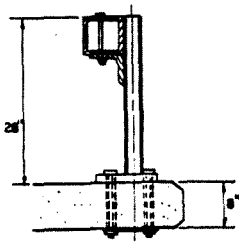


a. Zijberm



b. Middenberm

Afbeelding 3. Bermconstructies die na een aanrijding zelf-herstellend zijn.

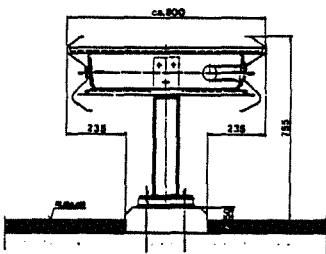


Montage: a. op brug

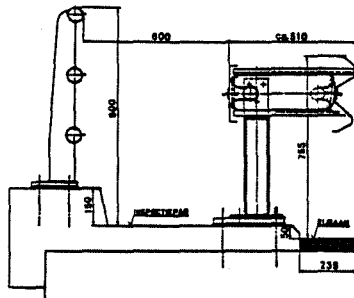
b. tegen brug

c. op verhoging

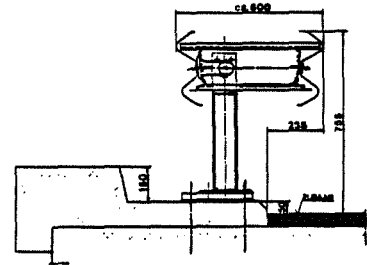
Afbeelding 4. Brugconstructies zonder energie-absorberende voorzieningen.



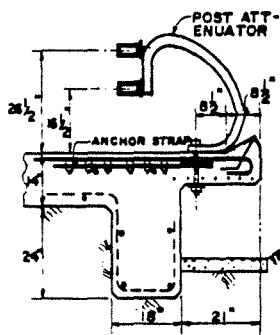
a. middenberm



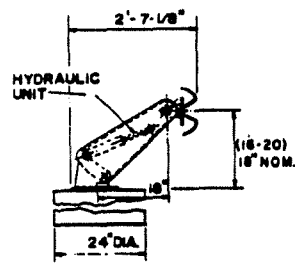
b. met handleuning



c. met verhoogde rand

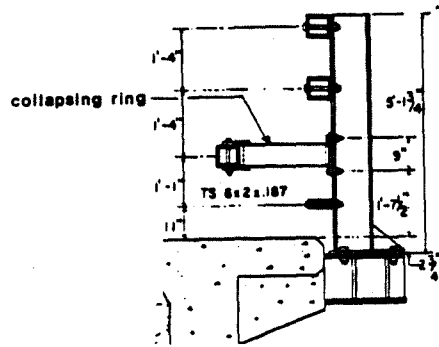


d. gebogen paal

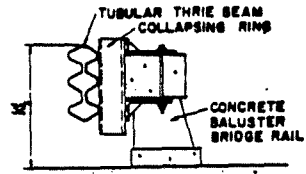


e. hydraulische demper

Afbeelding 5. Brugconstructies met energie-absorberende palen.

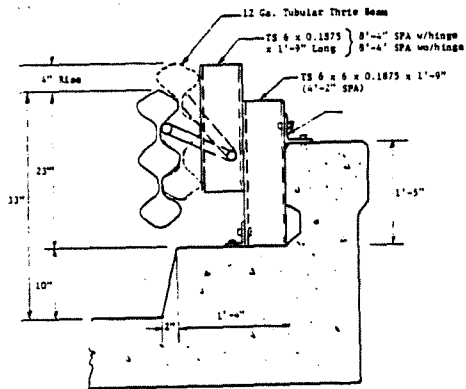


a. platte ring

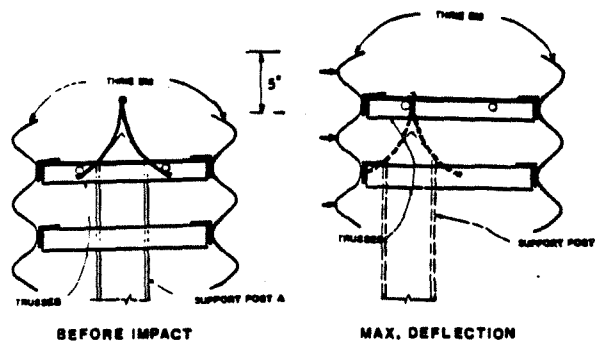


b. hoge ring (buis)

Afbeelding 6. Brugconstructies met energie-absorberende afstandhouders.

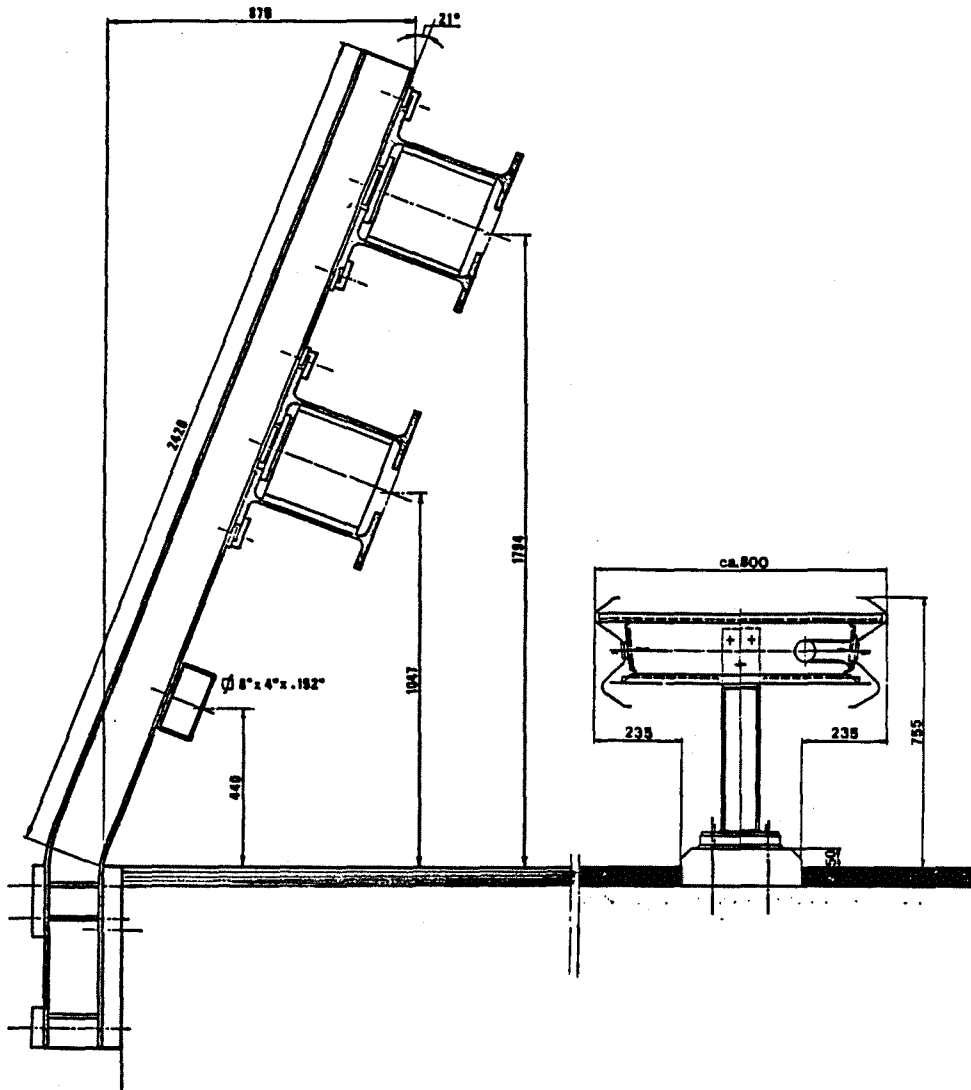


a. zijberm

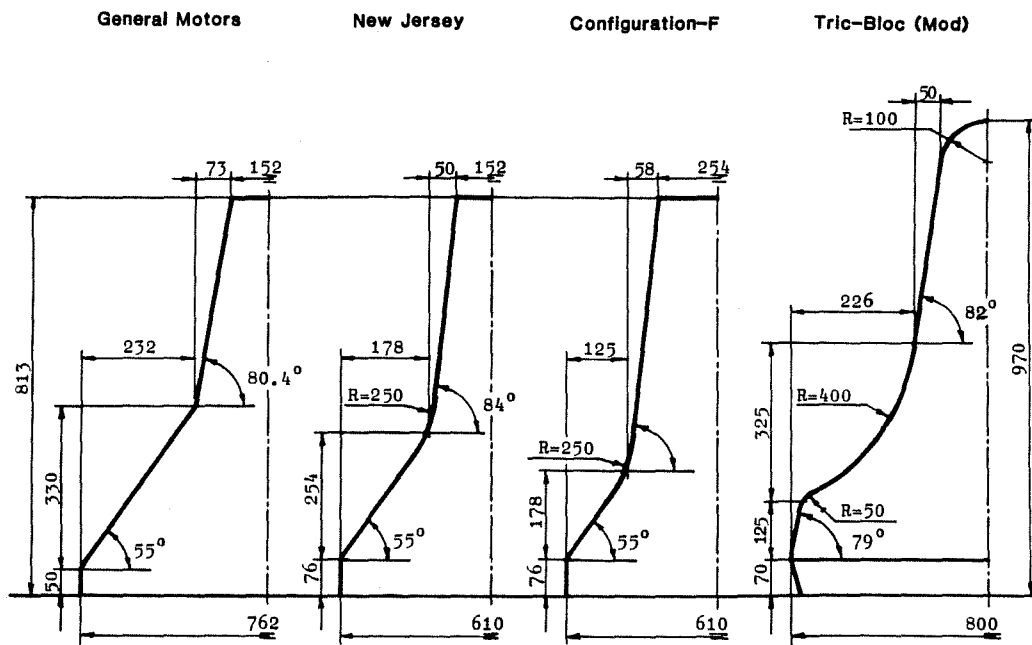


b. tussenberm

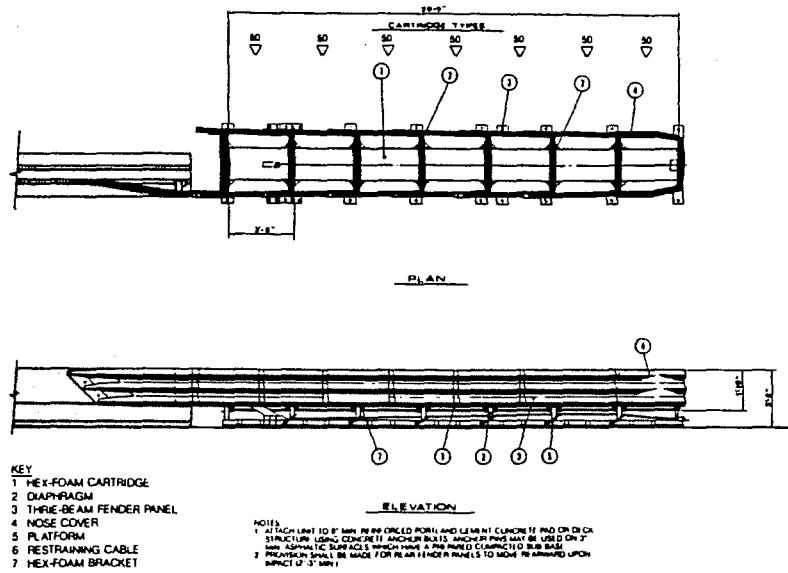
Afbeelding 7. Brugconstructies die na een aanrijding zelf-herstellend zijn.



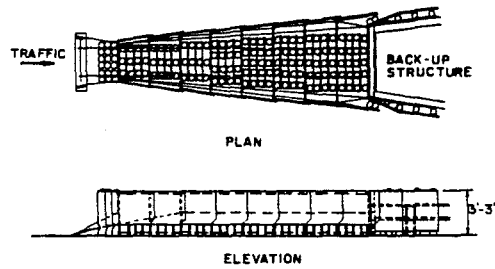
Afbeelding 8. Een specifieke brugconstructie ter voorkoming van doorschrijding.



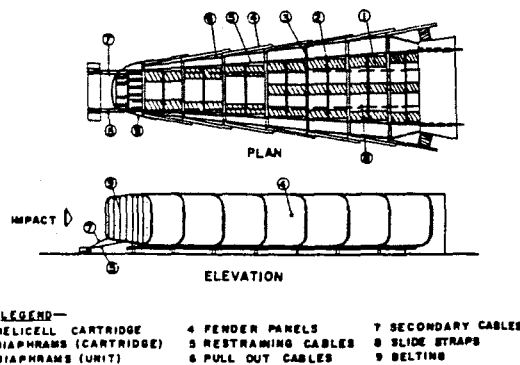
Afbeelding 9. Diverse profielen van betonnen geleideconstructies.



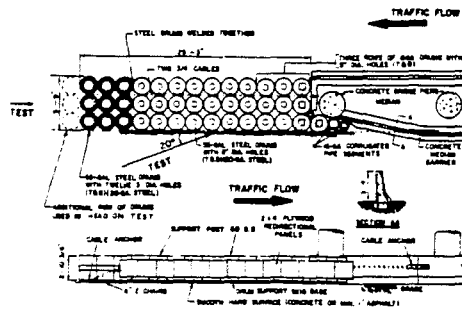
Afbeelding 10. "GREAT" obstakelbeveiliger met zeshoekige kunststofschuimpatronen.



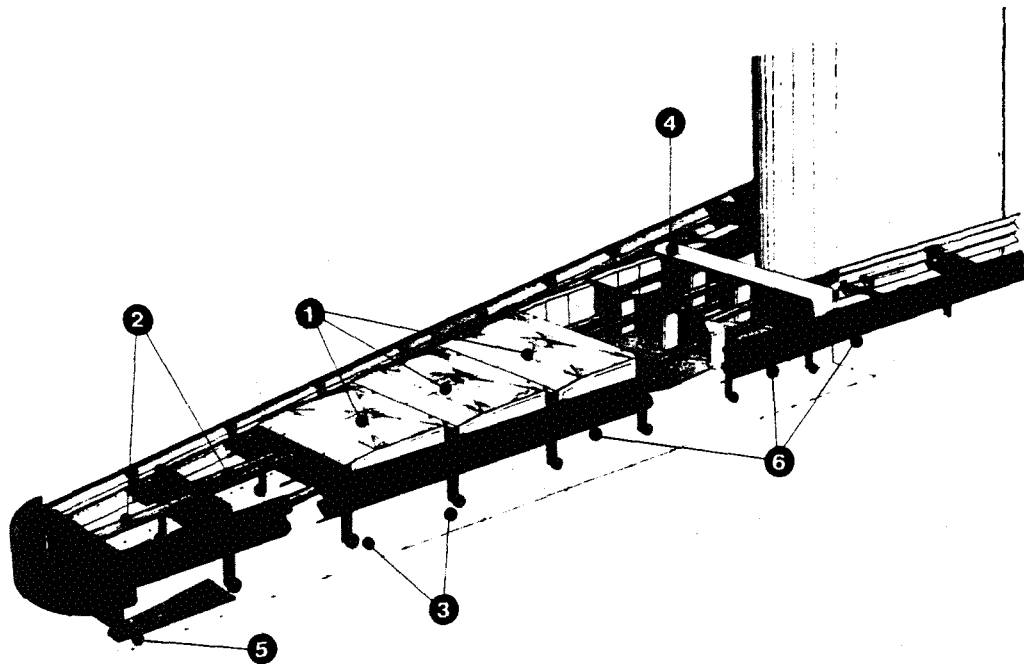
Afbeelding 11. "Hi-Dro" obstakelbeveiliger met PVC-cellen gevuld met water.



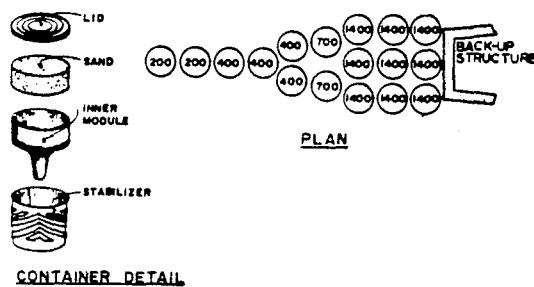
Afbeelding 12. "Hi-Dri" obstakelbeveiliger met vermiculite patronen.



Afbeelding 13. Obstaclebeveiliging samengesteld uit stalen vaten.

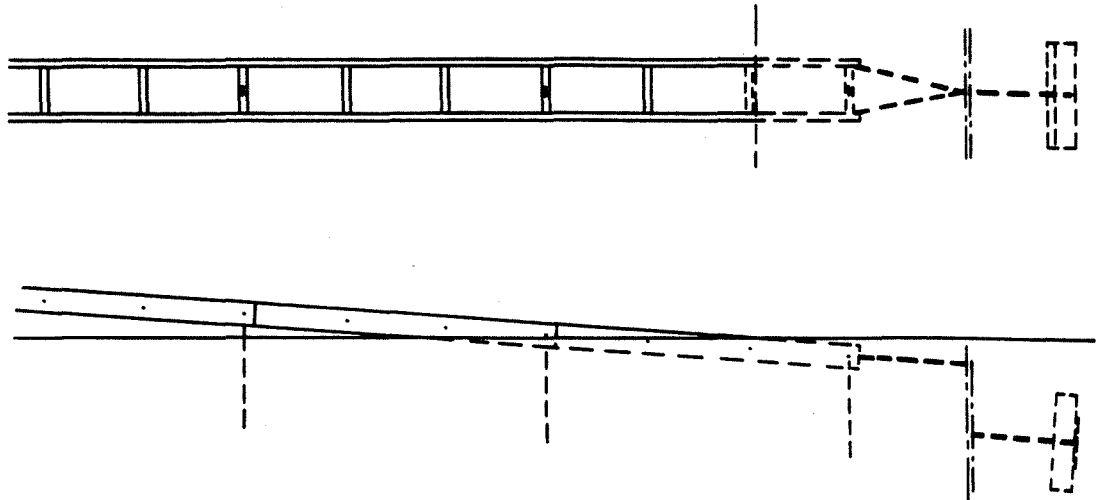


Afbeelding 14. De RIMOB-obstaclebeveiliging met aluminium rimpelbuizen.

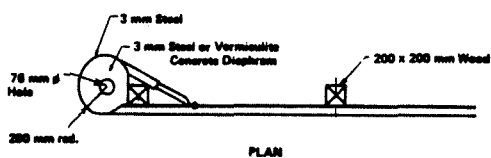


Afbeelding 15. Obstaclebeveiliging samengesteld uit met zand gevulde energie-absorberende tonnen.

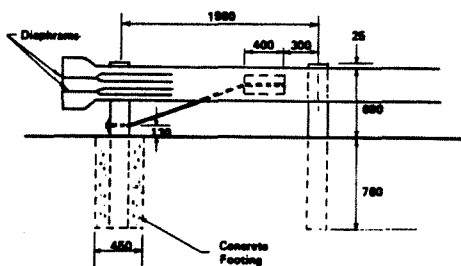




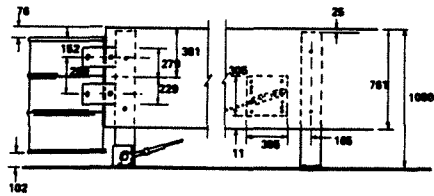
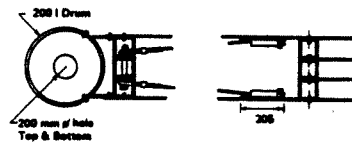
Afbeelding 16. Ingegraven en verankerde begin- en eindpunt van een samengestelde ligger (Nederland).



PLAN

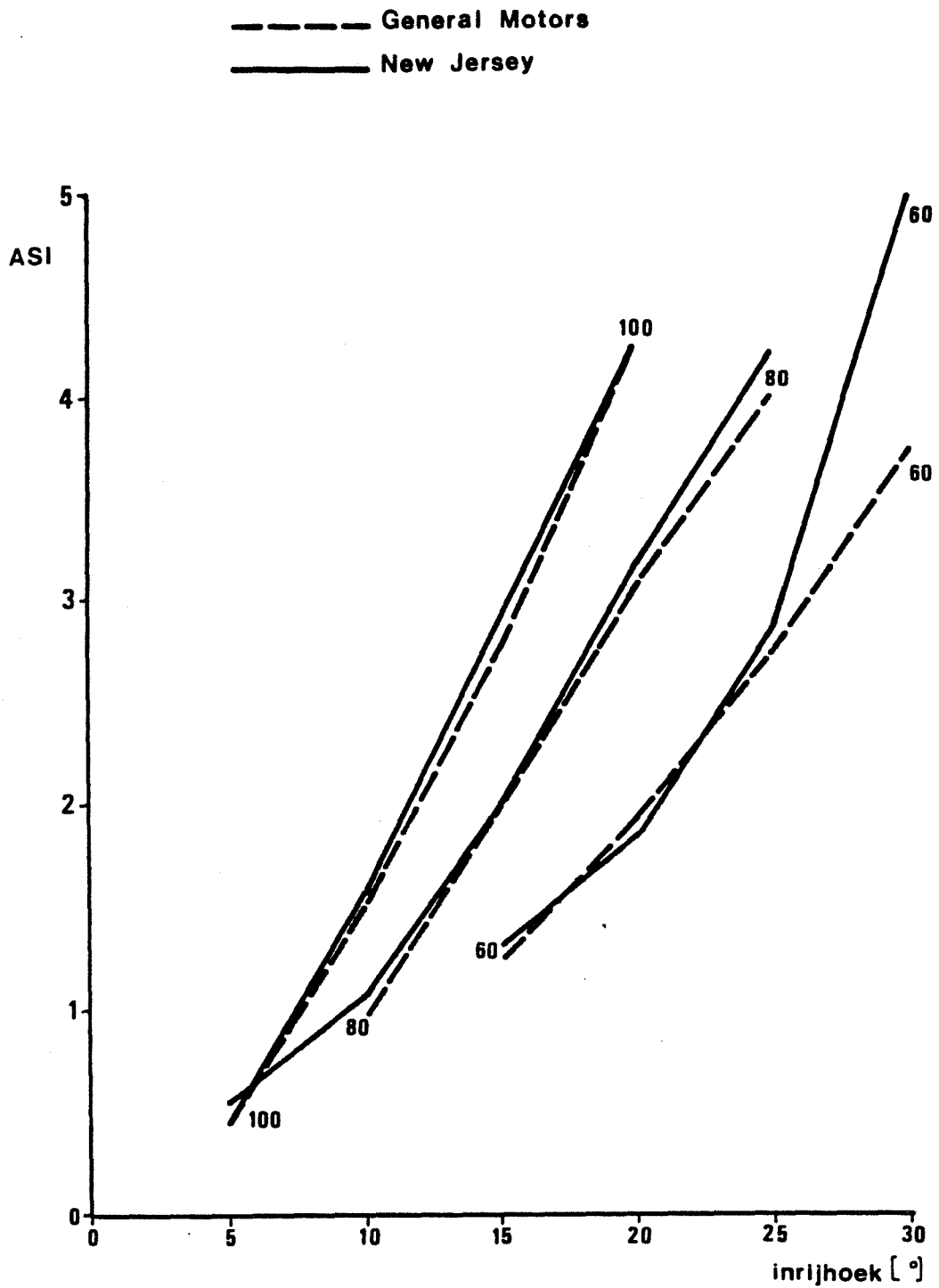


a. zijberm



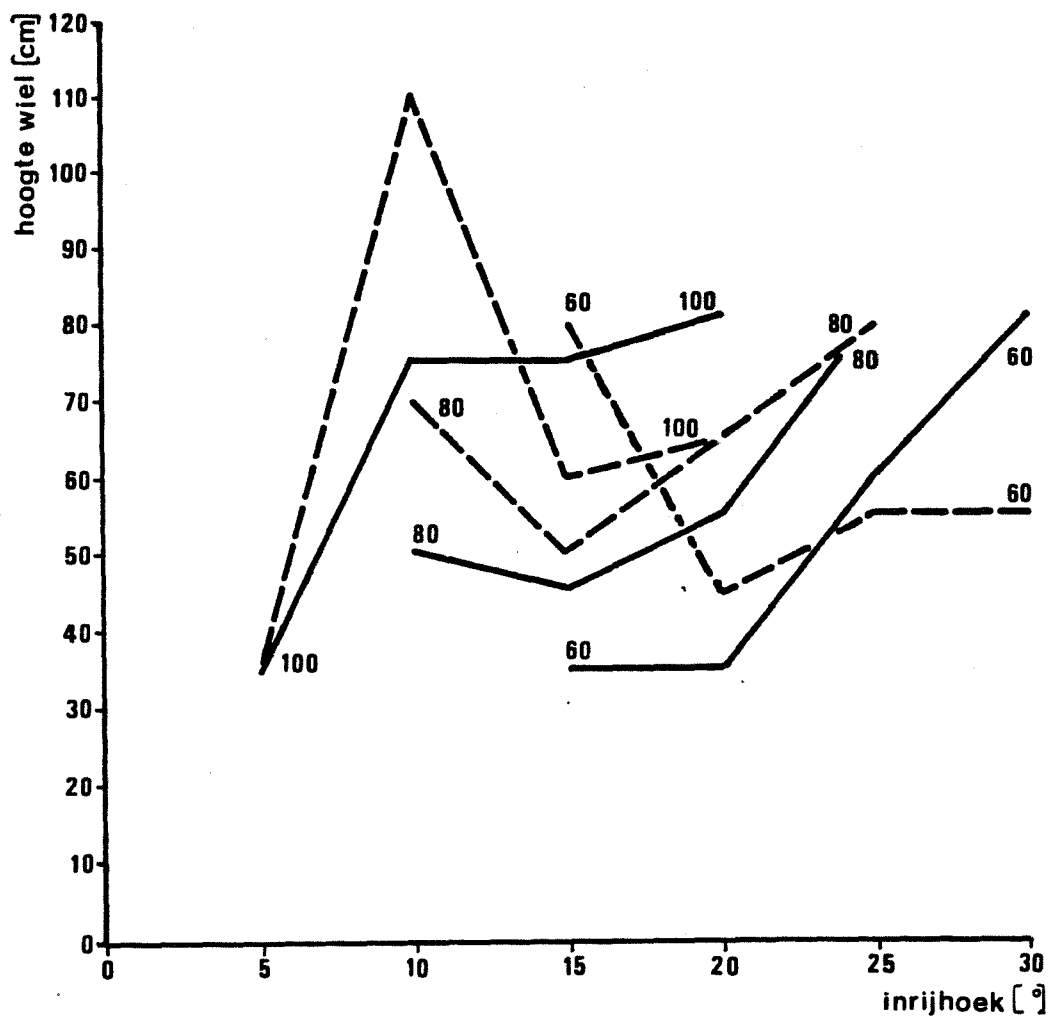
b. middenberm

Afbeelding 17. Beginpunt railbeveiliging (V.S.).



Afbeelding 18. Relatie tussen de inrijhoek en de voertuigvertragingen (uitgedrukt in de ASI) van een middelzware personenauto met als parameter de voertuigsnelheid bij gesimuleerde aanrijdingen tegen de General Motors en de New Jersey betonnen geleideconstructies.

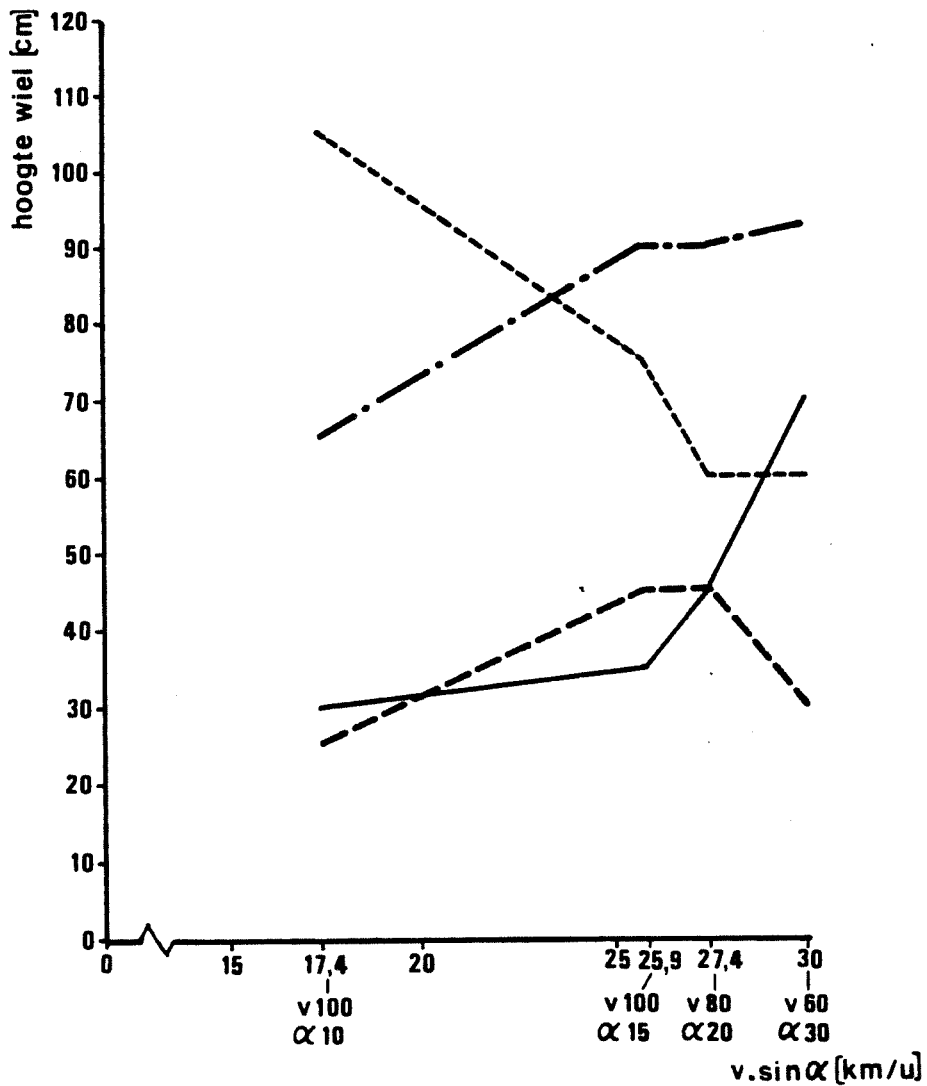
----- General Motors  
 ————— New Jersey



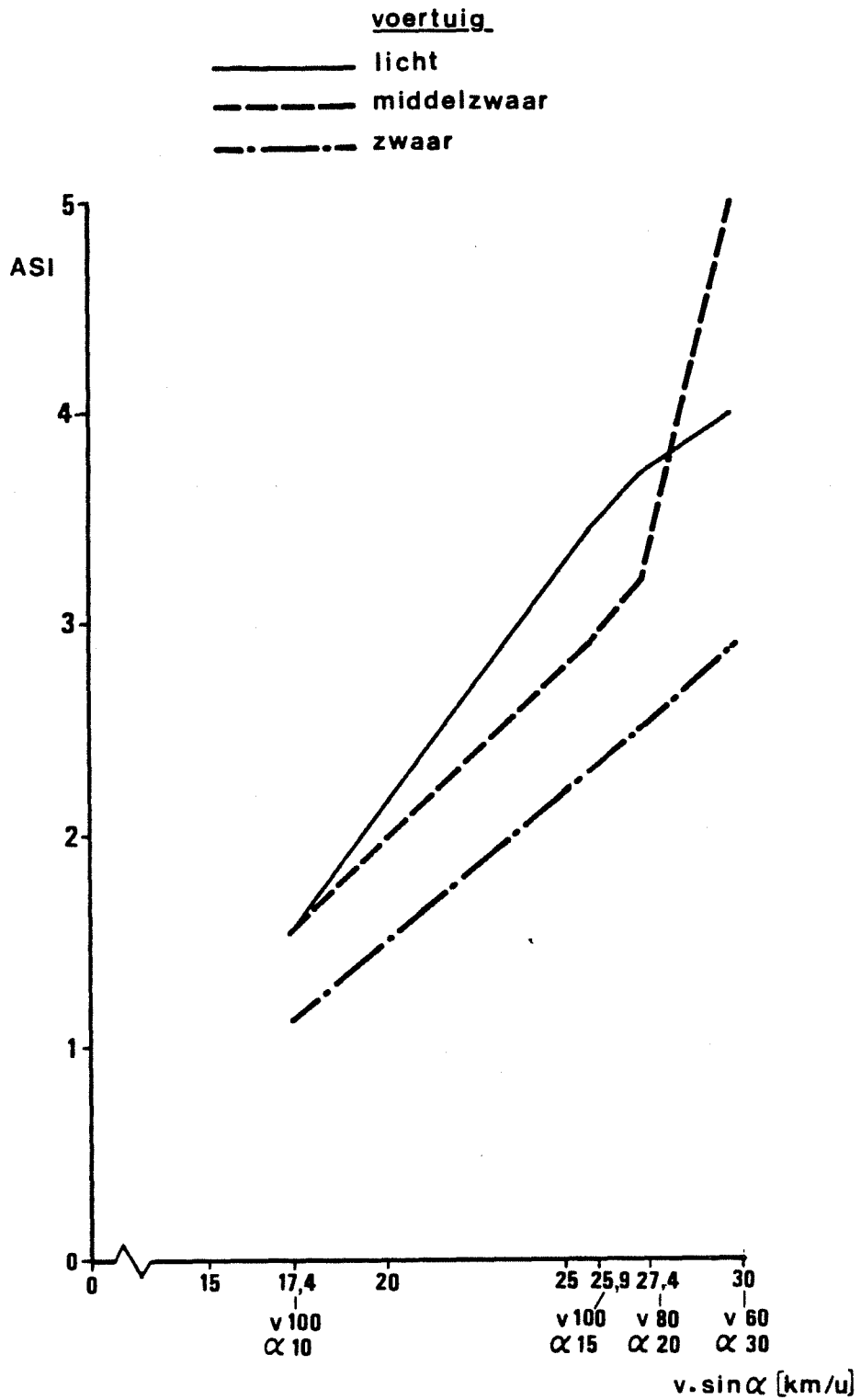
Afbeelding 19. Relatie tussen de inrijhoek en de klimhoogte van het voorwiel van een middelzware personenauto met als parameter de voertuigsnellheid bij gesimuleerde aanrijdingen tegen de General Motors en de New Jersey betonnen geleideconstructies.

vrtg . constructie

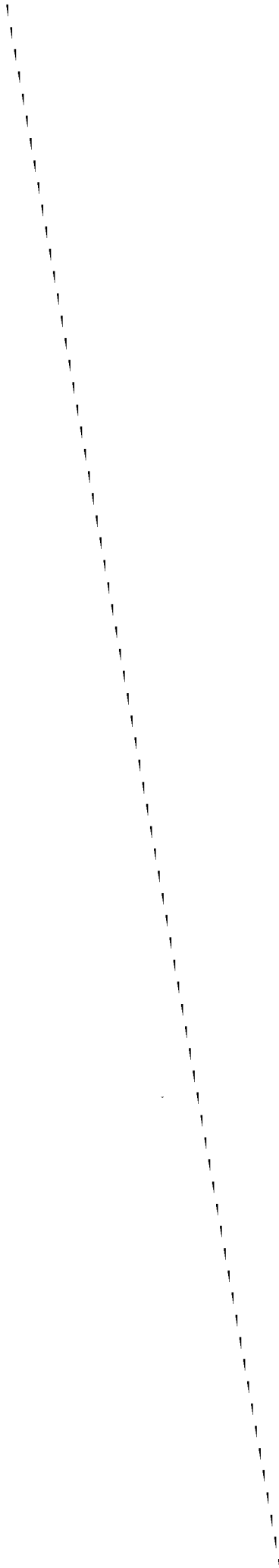
- licht . New Jersey
- - - licht . General Motors
- . - . zwaar . New Jersey
- - - zwaar . General Motors



Afbeelding 20. Relatie tussen  $v \cdot \sin \alpha$  (snelheid maal sinus inrijhoek) en de voertuigvertragingen (uitgedrukt in de ASI) van resp. een lichte, middelzware en zware personenauto bij gesimuleerde aanrijdingen tegen de New Jersey betonnen geleideconstructie.



Afbeelding 21. Relatie tussen  $v \cdot \sin \alpha$  (snelheid maal sinus inrijshoek) en de klimhoogte van het voorwiel van een lichte en een zware personenauto bij gesimuleerde aanrijdingen tegen de General Motors en de New Jersey betonnen geleideconstructies.



BIJLAGEN 1 T/M 4

Bijlage 1: Testcondities

Bijlage 2: Indicatoren en criteria

Bijlage 3: Metingen bij full-scale proeven

Bijlage 4: Een methode om in elk gewenst punt van een voertuig versnelingen te berekenen.





BIJLAGE 1: TESTCONDITIES

## 1. INLEIDING

De testcondities zijn te onderscheiden in de gebruikte proefvoertuigen en de gekozen inrijcondities (inrijsnelheid en inrijhoek).

In deze bijlage zullen alleen de testcondities in de Verenigde Staten en Nederland aan de orde worden gesteld, aangezien in beide landen tot dusver op meer uitgebreide en systematische wijze full-scale proeven en mathematische simulaties zijn uitgevoerd dan in andere landen.

## 2. VOERTUIGTYPEN

### 2.1. Verenigde Staten

Bij de in de Verenigde Staten uit te voeren proeven worden volgens een aanbevolen procedure voor het testen van wegmeubilair de volgende voertuigtypen aanbevolen (Michie, 1981). De voertuigmassa (inclusief dummies en belasting) is tussen haakjes aangegeven.

#### Personenauto:

- mini compact sedan ( 885  $\pm$  22,5 kg)
- sub-compact sedan ( 1.135  $\pm$  45 kg)
- grote sedan ( 2.045  $\pm$  135 kg)

#### Bus:

- "utility"-bus ( 9.100  $\pm$  225 kg)
- kleine Intercity bus (14.500  $\pm$  340 kg)
- grote Intercity bus (18.200  $\pm$  455 kg)

#### Trekker met oplegger:

- voor vrachtvervoer (36.000  $\pm$  1000 kg)
- tankwagen (36.000  $\pm$  1000 kg)

De keuzen van de hierboven genoemde voertuigtypen worden door Mitchie niet gemotiveerd.

## 2.2. Nederland

### 2.2.1. In Nederland gekozen voertuigtypen

#### Personenauto:

- licht (ca. 600 kg); type: Fiat 126
- middelzwaar (ca. 850 kg); type: Opel Kadett B
- zwaar (ca. 1.250 kg); type: Volvo 244

De aangegeven massa is exclusief dummies en lading.

#### Bus:

touring car (ca. 16.000 kg); type: DAF MB200

De opgegeven massa heeft betrekking op het maximum toelaatbaar gewicht (GVW:Gross Vehicle Weight). Tot dusver zijn met dit type bus nog geen mathematische simulaties verricht.

#### Vrachtauto:

gesloten model (ca. 16.500 kg); type: DAF FA2105

De aangegeven massa heeft ook hier betrekking op het maximum toelaatbaar gewicht.

### 2.2.2. Motivering van de in Nederland gekozen voertuigtypen

#### Personenauto's

Voor de uitvoering van de mathematische simulaties zijn tot dusver modulen van drie typen personenauto's gebruikt: Fiat 126, Opel Kadett B en Volvo 244. De keuze van deze voertuigtypen is gebaseerd op de massa en twee andere kenmerken waarvan wordt verondersteld dat ze van invloed zijn op de voertuigstabiliteit, te weten de wielbasis en de spoorbreedte. De voertuigen zijn geselecteerd op grond van de cumulatieve verdeling van deze kenmerken over alle personenauto's naar verkoopcijfers in Nederland (CBS, 1973-75; CBS, 1976-78; Boesmans, 1976).

Op grond van de cumulatieve verdelingen kan de Opel Kadett B worden beschouwd als een representant van de middengroep en de Fiat 126 en de Volvo 244 als representanten van resp. de onder- en bovengroep.

### Bussen

Uit cijfers over het Nederlandse autobuspark (1970 t/m 1975) kan worden opgemaakt dat de klasse van 16.000 tot 16.500 kg zeer sterk is vertegenwoordigd (aandeel 44%). Overige klassen zijn slechts voor ten hoogste 20% vertegenwoordigd. Binnen de klasse van 16.000-16.500 kg zijn in de Nederlandse situatie de DAF MB200 en Mercedes O 303 de meest voorkomende bus-typen (Boesmans, 1976).

### Vrachtauto

Voor de keuze van het vrachtautomodel is gebruik gemaakt van CBS-marktcijfers aangaande de typen vrachtauto's van de jaren 1967 t/m 1978 (CBS, 1973-75; CBS, 1976-78). Daaruit blijkt dat van alle geregistreerde vrachtauto's 77% een gesloten laadruimte heeft. Voor de keuze van de massa van de te simuleren vrachtauto zijn dezelfde bronnen gehanteerd. Van de hieruit geselecteerde gegevens is een verdeling naar massaklasse gemaakt. De jaren 1967 t/m 1978 zijn gesplitst in drie perioden van 4 jaren, waarmee een trend in de verschuiving van het aandeel van de diverse klassen zichtbaar werd. In de laatste periode bleek het aantal voertuigen in de klassen van 16 tot 18 ton en van 20 tot 24 ton het sterkst toegenomen te zijn, voornamelijk ten koste van de lichtere klassen. Aangezien de klasse van 16 tot 18 ton met 27% het sterkst was vertegenwoordigd, is deze gekozen. Binnen deze klasse is gekozen voor een gesloten vrachtauto met een maximaal toelaatbare massa van 16,5 ton.

### 3. INRIJCONDITIES

De inrijcondities snelheid en hoek kunnen op verschillende uitgangspunten worden gebaseerd: ongevallensituaties, fysisch haalbare condities (onder meer afhankelijk van gereden snelheid en wegbreedte) en een combinatie van beide. In alle gevallen is er een duidelijke koppeling tussen inrij-snelheid en inrijhoek.

Voor de Verenigde Staten staan de condities vermeld in het reeds aangehaalde rapport van Michie (1981). Een motivering wordt hierin niet gegeven. In Nederland is de keus gebaseerd op ongevallenstudies die in de Verenigde Staten zijn uitgevoerd. Om te kunnen nagaan in welke relatie de in beide landen gehanteerde inrijcondities staan tot de fysisch haalbare condities, zullen deze eerst worden aangeven.

Op fysische gronden kan een voertuig op een rijbaan een bepaalde boog met een minimum kromtestraal beschrijven. De grootte van de straal is afhankelijk van de voertuigsnelheid en de wrijving tussen de banden en het wegdek. Bij deze minimumstraal zit het voertuig op het grensgebied van slippen en/of rollen (afhankelijk van de grootte van de wrijvingcoëfficiënt). Op basis van deze boogstraal kan de grootte van de inrijhoek worden berekend. De inrijhoek wordt groter naarmate de afstand van de oorspronkelijke positie van het voertuig tot de afschermingsvoorziening groter wordt. Deze afstand is afhankelijk van het aantal rijstroken, de positie van het voertuig op één van de rijstroken, de aanwezigheid van een vluchtstrook en de breedte van de berm tussen vluchtstrook en afschermingsvoorziening.

Op afbeelding A is de relatie tussen de voertuigsnelheid en de fysisch haalbare inrijhoek voor twee wrijvingscoëfficiënten grafisch weergegeven (AGV, 1983):

-  $\mu = 0,4$  (nat wegdek)

-  $\mu = 1,0$  (zeer stroef wegdek)

In de grafiek is de gezochte relatie voor 2 en 3 rijstroken met elk een breedte van 3,5 m aangegeven. De breedte van de vluchtstrook en de berm is op resp. 3 en 0,50 m gesteld.

Uit de grafiek blijkt het volgende verband tussen snelheid en fysisch haalbare inrijhoek; hierbij wordt een minimale en maximale waarde voor de inrijhoek gegeven, gekoppeld aan de conditie van het wegdek (nat en zeer stroef):

- 2 rijstroken, snelheid 100 km/u, inrijhoek ca. 15-25°

- 3 rijstroken, snelheid 100 km/u, inrijhoek ca. 20-30°

Voor andere snelheden zijn op dezelfde wijze corresponderende inrijhoeken te bepalen.

### 3.1. Verenigde Staten

Voor personenauto's worden in de Verenigde Staten bij full-scale proeven de volgende inrijcondities aanbevolen (Michie, 1981):

100 km/u - 25° (continue geleideconstructies)

100 km/u - 15° (continue geleideconstructies)

100 km/u - 20° (obstakelbeveiligers)

100 km/u - 0° (obstakelbeveiligers)

Voor proeven met betonnen constructies is daarnaast de volgende inrijconditie frequent toegepast (niet aanbevolen door Michie):

100 km/u - 7°.

De Amerikaanse condities bevinden zich op de grens van de fysisch haalbare uitrijhoek voor twee rijstroken. Voor drie rijstroken (bovengrens 30°) wordt het maximum niet bereikt.

Voor vrachtauto's en bussen worden door Michie de volgende inrijcondities aanbevolen:

100 km/u - 15°

80 km/u - 15°

70 km/u - 7°

### 3.2. Nederland

#### 3.2.1. In Nederland toegepaste inrijcondities

Voor personenauto's worden in Nederland de volgende inrijcondities gehanteerd:

100 km/u - 15°

80 km/u - 20°

60 km/u - 30°

Met betrekking tot de fysisch haalbare condities liggen deze waarden op de curve: "natte weg met twee rijstroken". Dit is de curve die de lichtste inrijcondities geeft.

#### 3.2.2. Motivering van de in Nederland toegepaste inrijcondities

In Nederland heeft de SWOV zich voor de keuze van inrijcondities gericht op in de Verenigde Staten uitgevoerde ongevallenstudies. Deze hebben geen betrekking op aanrijdingen met afschermingsvoorzieningen, maar op van de rijbaan afgeraakte voertuigen.

#### Inrijhoek

De relatie tussen de inrijhoek en het percentage personenauto's dat een gegeven inrijhoek heeft overschreden, zoals weergegeven in afbeelding B, is herleid uit een aantal onderzoeken (Balz, 1964; Bitzl, z.j.; Deleys & McHenry, 1967; Dunlap & Grote, 1972; Garrett & Tharp, 1969; Hutchinson, 1962; Ross & Nixon, 1976). De auteurs zijn naast de curves vermeld. Om

geen rekening met uitschieters te hoeven houden, is een waarde van de inrijhoek bepaald die in 85% van de gevallen dat een voertuig van de rijbaan afraakt, niet wordt overschreden.

Om deze waarde met behulp van de uit de literatuur gevonden curves te kunnen vaststellen, is als volgt te werk gegaan. De buitenste van de afgebeelde curves zijn als begrenzingen gezien van de "bandbreedte" die de relatie tussen de inrijhoek en het percentage voertuigen aangeeft. Bij het (arbitrair) vastgestelde percentage van 15% is ongeveer in het midden van de "bandbreedte" een inrijhoek vastgesteld. Hieruit volgt een inrijhoek van  $25^{\circ}$ .

Dit houdt in dat op grond van bovengenoemde gegevens verwacht mag worden dat bij ongevallen niet meer dan ongeveer 15% van de voertuigen de rijbaan verlaat met een grotere inrijhoek dan  $25^{\circ}$ .

### Inrijsnelheid

In het algemeen is het moeilijk betrouwbare gegevens te verkrijgen over de snelheid waarmee voertuigen de rijbaan verlaten. Betere gegevens dan die in afbeelding C zijn, voor zover bekend, niet beschikbaar. Voorshands zullen deze dan ook gebruikt moeten worden.

In afbeelding C zijn inrijsnelheden uitgezet tegen het percentage voertuigen dat een bepaalde inrijsnelheid heeft overschreden (Balz, 1964; Deleys & McHenry, 1967; Garrett & Tharp, 1969). Op analoge wijze als bij de inrijhoek kan ook hier met behulp van de "bandbreedte" de relatie tussen inrijsnelheid en het percentage betrokken voertuigen worden vastgesteld.

Als ook hier de 15%-waarde wordt gehanteerd, blijkt de maximum inrijsnelheid op ca. 100 km/u uit te komen.

### Verband tussen inrijsnelheid en inrijhoek

Uit de literatuur blijkt een samenhang tussen inrijsnelheden en inrijhoeken (Balz, 1964; Deleys & McHenry, 1967; Garrett & Tharp, 1969; Olson et al., 1970). In afbeelding D is deze samenhang grafisch weergegeven. Over de betrouwbaarheid van de gegevens kan hetzelfde worden gezegd als eerder met betrekking tot "inrijsnelheid" is opgemerkt.

Uit afbeelding D kan in het algemeen worden geconcludeerd dat naarmate de inrijsnelheid hoger is, de hoek van inrijden geringer is. Ook hier kan weer een "bandbreedte" en een "middellijn" binnen deze bandbreedte bepaald worden. Deze 50%- en 85%-lijnen zijn in de afbeelding opgenomen.

Uitgaande van deze 85%-lijn volgt een relatie tussen inrijsnelheid en inrijhoek: 100 km/u en  $10^{\circ}$ ; 80 km/u en  $15^{\circ}$  en 60 km/u en  $25^{\circ}$ .

Op basis van een door de SWOV uitgevoerde vergelijking van ongevallenonderzoek en resultaten van full-scale proeven is geconcludeerd dat de hierboven aangegeven inrijhoeken waarschijnlijk te klein zijn. Een vergroting van de inrijhoeken met  $5^{\circ}$  lijkt niet onrealistisch. Bij een recente SWOV-studie zijn daarom de volgende inrijcondities gehanteerd:

100 km/u -  $15^{\circ}$   
80 km/u -  $20^{\circ}$   
60 km/u -  $30^{\circ}$ .

#### LITERATUUR

- AGV (1983). Literatuurstudie baanbeschrijving voertuigen. Deel 1: hoofdrapport. Report 1-101/230. Adviesgroep voor Verkeer en Vervoer, Utrecht, 1983.
- Balz, R.T. (1964). Erfahrungen mit Metall-Leitplanken. Strasse und Verkehr 10 (1964).
- Bitzl, F. (z.j.). Auftreffwinkel und Auftreffgeschwindigkeiten bei Unfällen mit Leitplanken. ISETH, Zürich.
- Boesmans, B. (1976). Ontwerpvoertuigen deel I, II en III. Report 714005. Instituut voor Wegtransportmiddelen TNO, Delft, 1976.
- CBS (1973-75). Statistiek van het autopark. Staatsuitgeverij, 's-Gravenhage.
- CBS (1976-78). Statistiek van de motorvoertuigen. Staatsuitgeverij, 's-Gravenhage.
- Deleys, N.J. & McHenry, P.R. (1967) Highway guardrails; A review of current practice. NCHRP Report No. 36. Transportation Research Board, Washington, D.C., 1967.
- Dunlap, D.F. & Grote, P. (1972). Median dike impact evaluation: sensitivity analysis. Highway Research Record 386 (1972).
- Garrett, J.W. & Tharp, K.J. (1969). Development of improved methods for reduction of traffic accidents. NCHRP Report No. 79. Transportation Research Board, Washington, D.C., 1969.
- Hutchinson, J.W. (1962). The significance and nature of vehicle encroachment on medians of divided highways. Highway Engineering Series No. 8. University of Illinois, Urbana, 1962.



- Michie, J.D. (1981). Recommended procedures for the safety performance evaluation of highway appurtenances. NCHRP Report No. 230. Southwest Research Institute, San Antonio, Texas, 1981.
- Olson, R.M.; Post, E.R. & McFarland, W.F. (1970). Tentative service requirements for bridge rail systems. NCHRP Report No. 86. Transportation Research Board, Washington, D.C., 1970.
- Ross, H.E. & Nixon, J.F. (1976). Impact performance and an evaluation criterion for median barriers. Transportation Record 586 (1976).

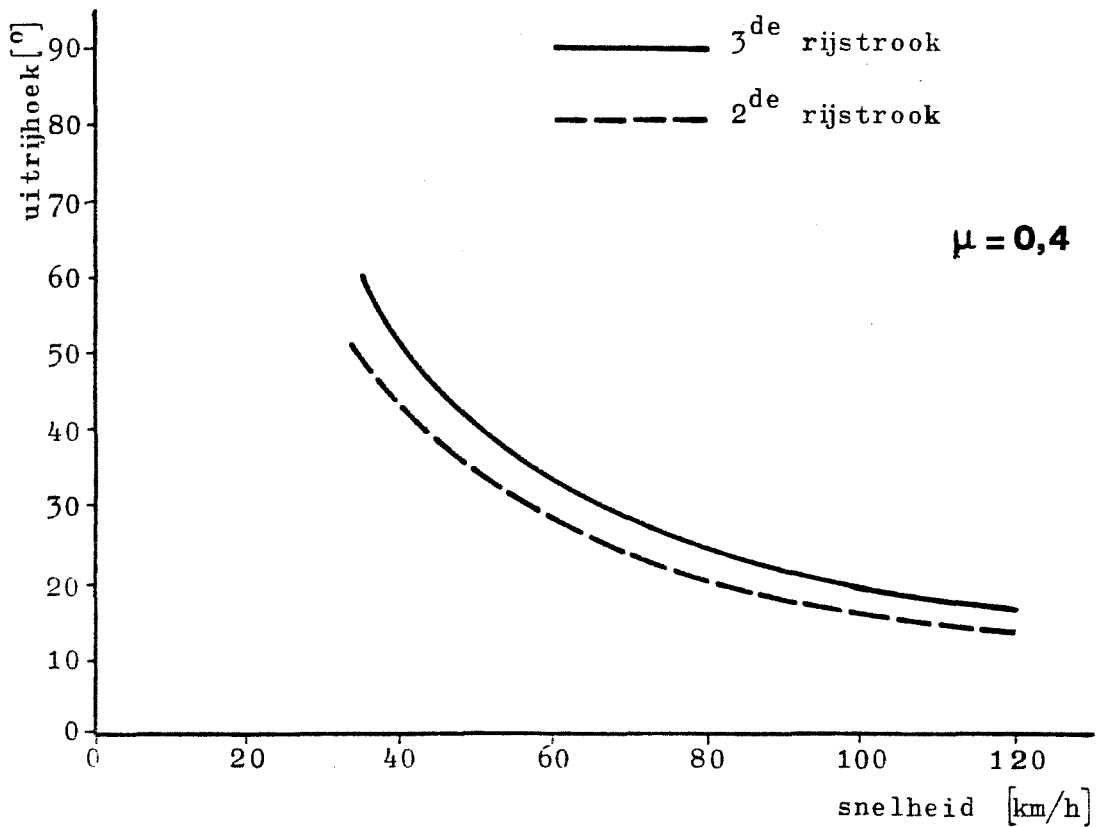
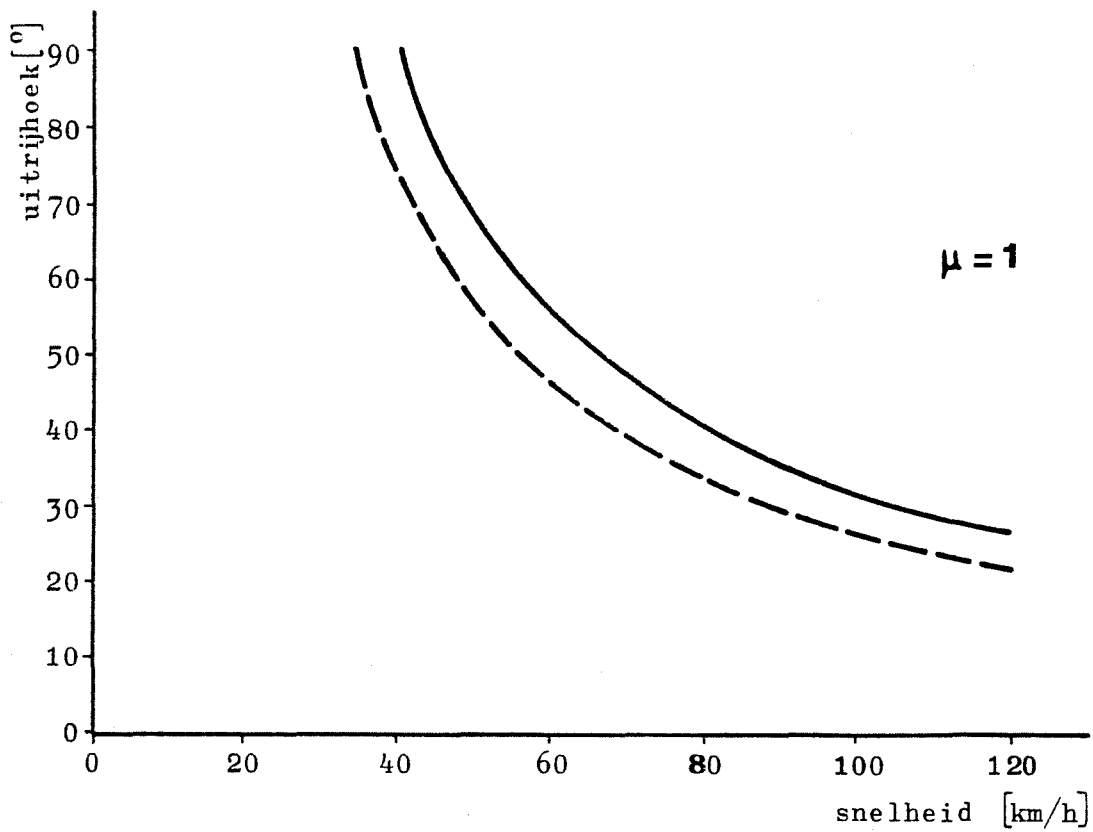
AFBEELDING A T/M D

Afbeelding A. Relatie tussen de voertuigsnelheid en de fysisch haalbare inrijhoek voor twee wrijvingscoëfficiënten.

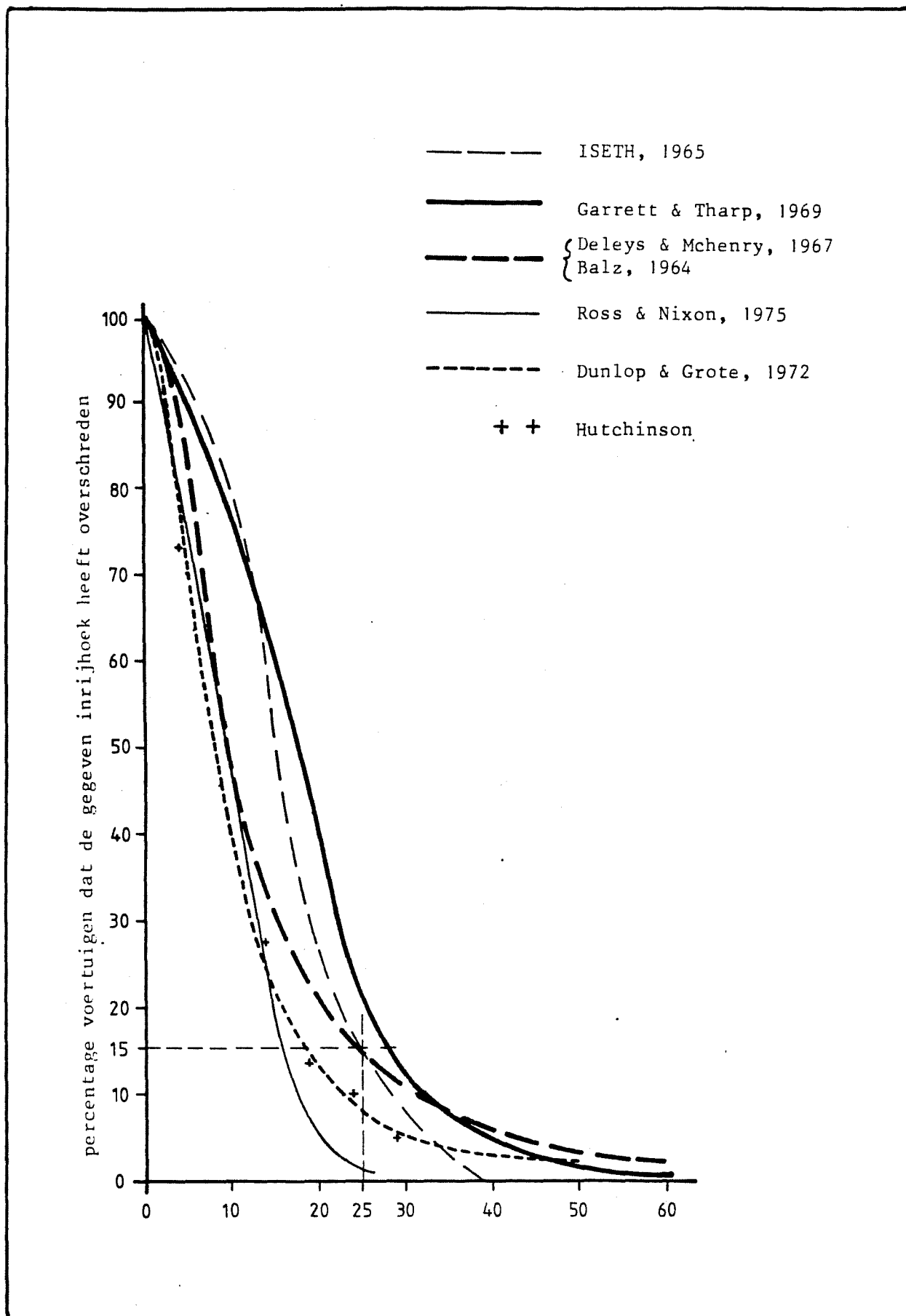
Afbeelding B. Relatie tussen inrijhoek en het percentage voertuigen dat de gegeven inrijhoek heeft overschreden, gebaseerd op de aangegeven buitenlandse literatuur.

Afbeelding C. Relatie tussen inrijsnelheid en het percentage voertuigen dat de gegeven inrijsnelheid heeft overschreden, gebaseerd op de aangegeven buitenlandse literatuur.

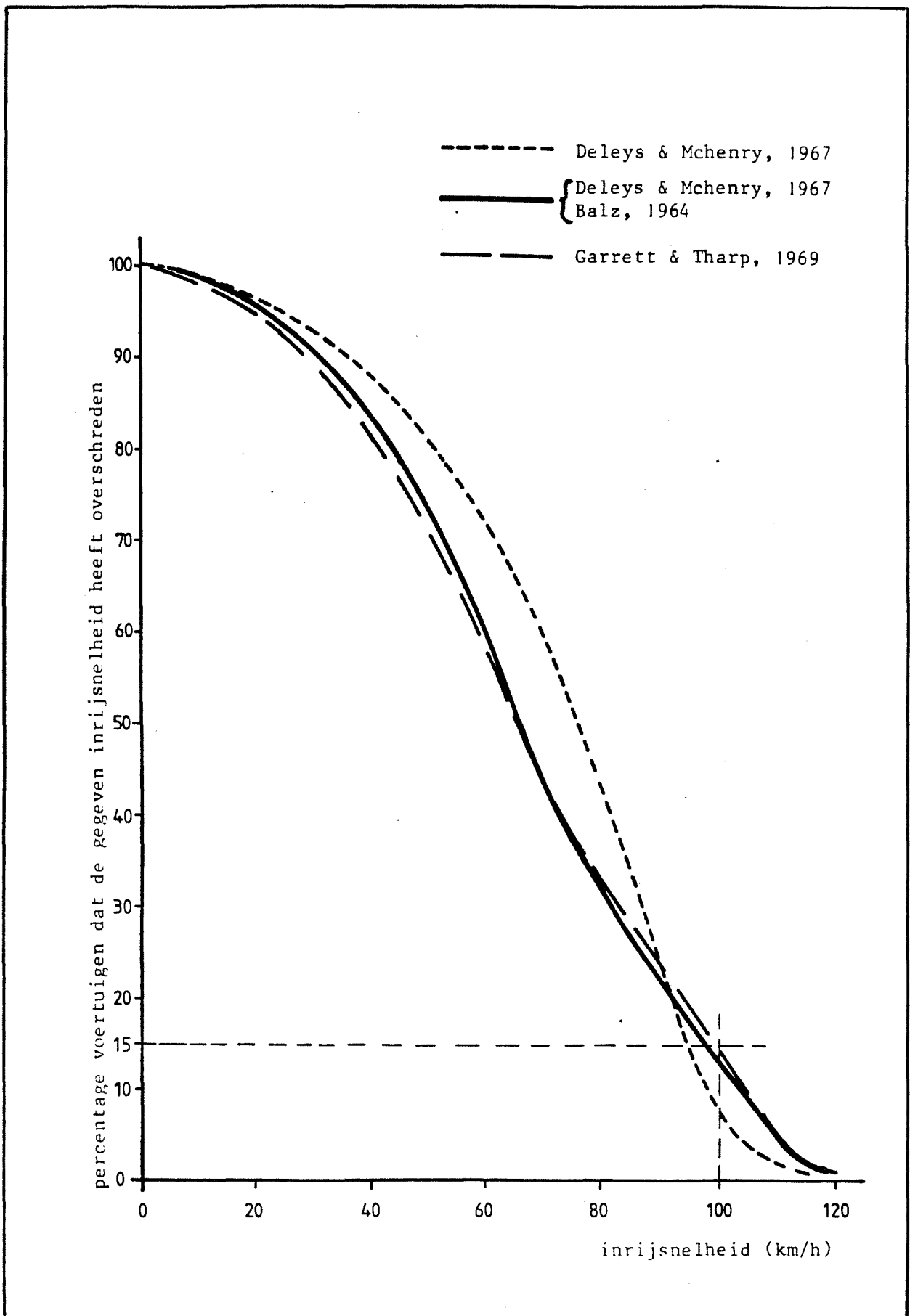
Afbeelding D. Relatie tussen de inrijsnelheid en de inrijhoek, gebaseerd op de aangegeven buitenlandse literatuur.



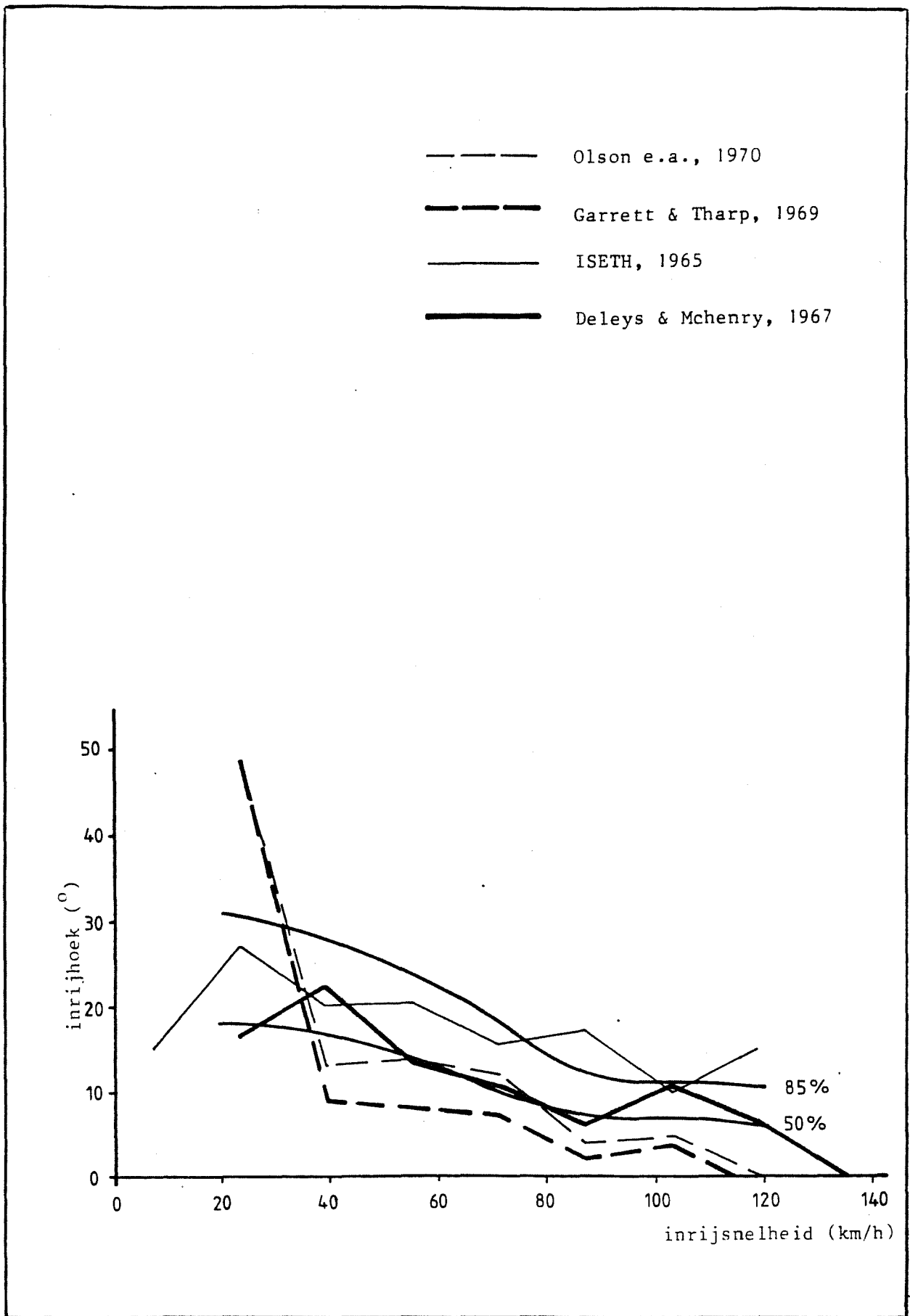
Afbeelding A. Relatie tussen de voertuigsnelheid en de fysisch haalbare inrijhoek voor twee wrijvingscoëfficiënten.



**Afbeelding B.** Relatie tussen inrijhoek en het percentage voertuigen dat de gegeven inrijhoek heeft overschreden, gebaseerd op de aangegeven buitenlandse literatuur.



Afbeelding C. Relatie tussen inrijnsnelheid en het percentage voertuigen dat de gegeven inrijnsnelheid heeft overschreden, gebaseerd op de aangegeven buitenlandse literatuur.



Afbeelding D. Relatie tussen de inrijsnelheid en de inrijhoek, gebaseerd op de aangegeven buitenlandse literatuur.

BIJLAGE 2: INDICATOREN EN CRITERIA

## 1. INLEIDING

De veiligheid van voertuiginzittenden tijdens een botsing wordt bepaald door de ernst van de letsels die zij kunnen oplopen. Die letsels zijn het gevolg van een aantal factoren:

- contactkrachten tussen lichaamsdelen en omgeving;
- versnellingen en daarmee samenhangende traagheidskrachten en -momenten;
- individuele letselgevoeligheid.

De eerste twee factoren hangen op een ingewikkelde manier samen met versnellingen van het voertuig, vervormingseigenschappen van het in- en exterieur van het voertuig, en van het gebruik van beveiligingsmiddelen (gordels, airbags etc). De derde factor wordt bepaald door grotendeels onbekende individuele kenmerken, waarvan overigens wel aannemelijk is dat ze een relatief grote spreiding vertonen.

Uit deze beschouwing wordt duidelijk dat het moeilijk is een goede indruk van de "veiligheid" van een botsing te verkrijgen door alleen de kinematica van het botsende voertuig te beschouwen. Toch zijn die kinematische gegevens vaak als enige goed meetbaar bij de uitvoering van full-scale tests.

Om daarbij een zo goed mogelijke indruk van de veiligheid te verkrijgen zijn een aantal empirische criteria ontwikkeld op basis van de lineaire versnellingen en snelheden op plaatsen in het botsende voertuig: de Acceleration Severity Index (ASI) en de in Amerikaanse barrierproeven gebruikte Occupant Impact Velocity (OIV) en Occupant Ridedown Accelerations (ORA).

Daarnaast zijn criteria ontwikkeld die zijn gebaseerd op directe geweldsinwerking op de mens (letselcriteria).

## 2. CRITERIA OP BASIS VAN VOERTUIGGEGEVENS

### 2.1. ASI-criterium

In principe kan het ASI-criterium in elk punt in het versnellingsveld worden berekend; indien de hoekversnellingen klein zijn, kan worden volstaan met de criteriumwaarde voor het zwaartepunt. Zijn de hoekversnellingen aanzienlijk, dan moet de criteriumwaarde afzonderlijk worden berekend voor elke passagiersplaats (AASHTO, 1977). Het criterium weegt



de versnellingen in drie hoofdrichtingen en middelt de absolute waarde van die gewogen versnellingen over een voortschrijdend tijdsinterval van 50 ms. De hoogste waarde van het criterium over het gehele tijdsinterval van de meting geldt dan als maatgevend voor de veiligheid.

Meestal wordt de criteriumwaarde 1 gebruikt als grens voor de veiligheid van inzittenden zonder gordel, en een waarde van 1,6 voor gordel dragers. De algemene formulering van het criterium luidt:

$$ASI = \sqrt{\left(\frac{g_{long}}{g_{long_a}}\right)^2 + \left(\frac{g_{lat}}{g_{lat_a}}\right)^2 + \left(\frac{g_{vert}}{g_{vert_a}}\right)^2}$$

long	=	longitudinaal
lat	=	lateraal
vert	=	verticaal
index a	=	acceptabel

### 2.2. Het OIV-criterium

Het OIV-criterium is gebaseerd op proeven waarin dummy-hoofden met een zekere aanvangssnelheid tegen voorruit zijn gebotst (Michie, 1981). Op basis van het toegepaste Head Injury Criterion (HIC; zie 3: Letselcriteria) werd vastgesteld dat, indien de aanvangssnelheid zekere waarden niet overschrijdt, de HIC-waarden onder de gewenste grenswaarde van 1000 bleven. Het OIV-criterium wordt als volgt berekend: op passagiersplaatsen in het voertuig worden, door integratie, uit het versnellingsverloop in het zwaartepunt van het botsende voertuig de snelheidscomponenten in langs- en dwarsrichting berekend.

Deze snelheden worden gerelateerd aan maximum waarden van 12 m/s in langsrichting en 9 m/s in dwarsrichting. Daarbij wordt aangegeven dat dit absolute maximum waarden zijn, en dat elke haalbare lagere grenswaarde kan worden gehanteerd. Afhankelijk van het type beveiligingsconstructie worden in de literatuur gevonden veiligheidsfactoren op de maximumwaarden toegepast van 1,33 tot 2,67.

### 2.3. Het ORA-criterium

Bij het ORA-criterium worden componenten van de voertuigversnelling van het zwaartepunt in langs- en dwarsrichting gemiddeld over een voortschrijdend tijdsinterval van 10 m/s. De maximale waarden van deze gemiddelden worden, net als bij het OIV-criterium, vergeleken met de absolute maximum waarden van 20 g in beide richtingen; ook hierbij kunnen weer

veiligheidsfactoren worden toegepast. De literatuur vermeldt bijvoorbeeld een factor van 1,33 (Michie, 1981).

### 3. LETSELCRITERIA

De criteria op basis van voertuiggegevens zijn slechts een oppervlakkige maat, omdat ze geen rekening houden met alle contactkrachten tussen mens en voertuig; hiermee wordt een belangrijke bron van letsels buiten beschouwing gelaten. Bovendien geldt voor zowel het OIV- als het ORA-criterium dat de voertuigrotaties en hoekversnellingen klein moeten zijn, omdat de criteria gebaseerd zijn op meting van uitsluitend lineaire versnellingen in het zwaartepunt van het voertuig. Die eis is lang niet altijd realiseerbaar, waardoor deze criteria minder bruikbaar worden.

Men kan een betere indruk van de ernst van een botsing krijgen door de inzet van fysieke of mathematische mensmodellen. In het eerste geval heeft men de botsende voertuigen bij full-scale tests voorzien van proefpoppen waaraan op een aantal vitale plaatsen (zoals hoofd, thorax en bekken) contactkrachten en versnellingen worden gemeten. In het tweede geval wordt de botsing van het voertuig met inzittende(n) geheel of gedeeltelijk op een computer nagebootst, waarbij dergelijke gegevens ook en meer in detail, verkregen worden. Het mathematische model kan daarbij de gehele botsing van voertuig en mens simuleren, maar het kan ook "gevoed" worden met de in de proeven gemeten voertuigbewegingen. Beide methoden leveren een beter inzicht in botsingsernst dan voertuiggebonden criteria maar zijn door het ontbreken van goede letselcriteria nog steeds beperkt.

Het enige bestaande letselcriterium is het Head Injury Criterion (HIC) dat in de praktijk slecht blijkt te voldoen. Dit criterium wordt berekend op basis van gemiddelde lineaire versnellingen in het zwaartepunt van het hoofd:

$$HIC = \left( \frac{\int_{t_1}^{t_2} (a_r dt)}{t_2 - t_1} \right)^{2,5} (t_2 - t_1)$$

$a_r$  = resulterende versnelling

$t_1, t_2$  = in de tijd opeenvolgende

minima in de versnellingscurve

Zolang er nog geen internationaal aanvaarde letselcriteria zijn, worden de volgende empirische waarden gebruikt:

- max. HIC-waarde van 1000 of resulterende versnelling van het zwaartepunt van het hoofd: max. 80 g;
- resulterende versnelling in de thorax: max. 60 g;
- maximale kracht op de femora: 10.000 N;
- maximaal zijdelings snelheidsverschil bij botsing: 9,1 m/s.

Verder kunnen nog worden gebruikt:

- maximale kracht in schoudergordel: 8000 N;
- maximale relatieve indrukking van de thorax (frontaal): 40%.

Het is niet bekend of er een ondubbelzinnige samenhang gevonden kan worden tussen de hier gegeven letselcriteria en de criteria gebaseerd op voertuiggegevens.

Wel is duidelijk dat de kosten van proefpoppen hoog zijn, waardoor wettelijke simulatie als een belangrijk hulpmiddel moet worden beschouwd. Hiermee kunnen de empirische criteria worden aangevuld.

#### LITERATUUR

- AASHTO (1977). Guide for selecting, locating and designing traffic barriers. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 1977.
- NHTSA (1969). Occupant crash protection head injury criterion. Docket No. 69-7. Notice 17. National Highway Traffic Safety Administration, 1967.
- Michie, J.D. (1981). Recommended procedures for the safety performance evaluation of highway appurtenances. NCHRP Report No. 230. Southwest Research Institute, San Antonio, Texas, 1981.



BIJLAGE 3: METINGEN BIJ FULL-SCALE PROEVEN

## 1. INLEIDING

In het algemeen moeten de metingen voldoende gegevens opleveren om achteraf te kunnen vaststellen:

- welke beschadigingen het voertuig heeft opgelopen;
- of de koers van het voertuig goed werd gecorrigeerd;
- of de veiligheid van inzittenden aan beschikbare criteria heeft voldaan.

Meestal wordt in de praktijk een combinatie van optische en elektro-mechanische meetinstrumenten gebruikt, waarbij de optische vooral dienen om de baan van het proefvoertuig vast te leggen, snelheden te meten en eventuele beschadigingen aan voertuig en constructie te beoordelen. De elektro-mechanische metingen zijn vooral versnellingsmetingen, waarmee ook een indruk van de veiligheid kan worden verkregen.

Ook worden optische hulpmiddelen als high-speed films gebruikt om voertuigversnellingen vast te stellen of worden versnellingsmetingen geïntegreerd om een koersverloop te reconstrueren; in beide gevallen moet er met relatief grote onnauwkeurigheden rekening worden gehouden.

## 2. WIJZE VAN METEN BIJ UITGEVOERDE FULL-SCALE TESTS

Bij veel Amerikaanse proeven zijn zowel optische metingen verricht als versnellingsmetingen. De optische metingen bestaan vooral uit high-speed films, de versnellingsmetingen beperken zich vaak tot twee-assige metingen in het zwaartepunt van het voertuig (lengte- en dwarsrichting van het voertuig).

De goede werking van de constructie wordt beoordeeld aan de hand van het koersverloop, de mate van voertuigrotatie en veiligheidscriteria voor inzittenden.

Gegevens over de absolute of relatieve nauwkeurigheid van de gebruikte meetinstrumenten zijn bijvoorbeeld te vinden in FMVSS-voorschriften, die bij Amerikaanse proefnemingen worden toegepast.

Zoals ook is opgemerkt in Bijlage 2: Indicatoren en criteria, kunnen hoekversnellingen van het voertuig aanzienlijke invloed hebben op de lokale waarden van veiligheidscriteria. Aangezien zowel bij vervormbare als onvervormbare constructies sterke voertuigrotaties kunnen optreden is enige voorzichtigheid geboden bij het gebruik van criteria die uitsluitend gebaseerd zijn op zwaartepuntsversnellingen.

Ook bij het gebruik van die criteria als relatieve vergelijkingswaarden voor de beoordeling van verschillende constructies dient dan aan de voorwaarde te worden voldaan dat de hoekversnellingen absoluut gering zijn, of dat bij alle proeven een vergelijkbaar hoog niveau is opgetreden.

### 3. GEWENSTE REGISTRATIE

Als we het gehele versnellingsveld in het botsende voertuig wél goed willen reconstrueren, omdat dit nodig is voor ASI-berekeningen of voor mathematische simulaties, blijkt er een aanzienlijk ingewikkelder configuratie van meetopnemers nodig te zijn dan in de meeste Amerikaanse proeven is toegepast.

In Bijlage 4 wordt aangetoond dat er in dit geval vier tri-axiale versnellingsopnemers noodzakelijk zijn, die onder de volgende randvoorwaarden in het voertuig moeten zijn aangebracht:

- de oriëntatie van alle meetopnemers moet gelijk zijn (de assen van de opnemers gelijk gericht);
- er mogen geen drie opnemers op een lijn liggen;
- de vier opnemers mogen niet in een vlak liggen.

Verder zijn er een aantal praktische voorwaarden die op de meetnauwkeurigheid betrekking hebben:

- de plaats van de opnemers moet, in relatie tot hun onderlinge afstand, voldoende nauwkeurig bekend zijn;
- de verankering aan het voertuig moet voldoende stijf zijn om trillingen buiten het meetgebied te houden;
- de absolute fout van de gebruikte opnemers moet klein zijn in het meetgebied (0 - ca. 25 g); een kleine relatieve fout bij een zeer groot meetbereik levert toch een grote fout in het beschouwde meetgebied op!

Ten aanzien van de specificaties van meet- en registratie-instrumenten geldt nog het volgende: de voertuigbewegingen die van belang zijn spelen zich af in een frequentiegebied van 0 tot ca. 12 Hz; bij analoge registratie van opnemerssignalen dient de filterfrequentie van de voorfiltering, in verband met fasefouten veel hoger dan 12 Hz te worden ingesteld, bij voorkeur >100 Hz.

Omdat de geregistreerde meetwaarden uiteindelijk door een computer moeten worden verwerkt, is het noodzakelijk de analoge gegevens te "samplen" met

een samplefrequentie van tenminste 25 Hz, maar liefst aanzienlijk hoger, bijvoorbeeld 500 Hz. De uiteindelijke uitfiltering van het meest interessante gebied kan dan, zonder nauwkeurighedsverlies, verder op de computer geschieden.

Het is ook mogelijk zonder tussenkomst van analoge registratie direct een sampling van de meetwaarden vast te leggen; deze methode is waarschijnlijk goedkoper en zeker sneller. Bovendien kunnen digitale registraties verliesvrij worden gekopieerd.



BIJLAGE 4: EEN METHODE OM IN ELK GEWENST PUNT VAN EEN VOERTUIG  
VERSHELLINGEN TE BEREKENEN

## 1. INLEIDING

Bij botsproeven met auto's worden via telemetrie vele signalen uit de auto vastgelegd om geanalyseerd te worden. Hier gaat het om de signalen van versnellingsopnemers, die op geschikte punten aan de carrosserie zijn bevestigd. Uit deze signalen moet de momentane versnelling van ieder gewenst punt in de auto worden berekend. Het daarvoor gebruikte algoritme zal hier worden beschreven.

## 2. DEFINITIE VAN HET PROBLEEM

Het fysische probleem betreft een driedimensionaal star lichaam (een auto) dat een willekeurig versnelde of vertraagde, al dan niet draaiende beweging kan uitvoeren. Aan het lichaam is een orthogonaal coördinatensysteem  $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$  verbonden gedacht, dat rechtsdraaiend is ( $\bar{x} \wedge \bar{y} = \bar{z}$  etc.) en waarvan de oorsprong ligt in het zwaartepunt van het starre lichaam. De momentane versnellingstoestand van zo'n star lichaam kan beschreven worden door de volgende drie vectoren:

1.  $\bar{u}$ , de versnellingsvector van het zwaartepunt
  2.  $\bar{\phi}$ , de hoekversnellingsvector om een as door het zwaartepunt
  3.  $\bar{\omega}$ , de hoeksnelheidsvector om een as door het zwaartepunt,
- waarin bijvoorbeeld  $\bar{u}$  aanduidt een vector  $\bar{u} = (u_x, u_y, u_z)$ .

De bijdrage van  $\bar{\omega}$  is de middelpuntzoekende versnelling ten gevolge van de momentane draaiing om de as  $\bar{\omega}$ . We brengen in herinnering dat deze bijdrage onafhankelijk is van het teken van de draaiing: links- of rechtsomdraaien geeft dezelfde middelpuntzoekende versnelling.

## 3. ANALYSE VAN HET PROBLEEM

Een bepaald punt van de auto, beschreven in het coördinatensysteem  $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ , geven we aan door  $\bar{r} = (x, y, z)$ . De versnellingen ter plaatse van het punt en uitgedrukt in ditzelfde coördinatensysteem, geven we aan door  $\bar{a}(\bar{r})$ . Uitgedrukt in  $\bar{u}$ ,  $\bar{\phi}$  en  $\bar{\omega}$  wordt dit:

$$\bar{a}(\bar{r}) = \bar{u} + \bar{\phi} \wedge \bar{r} + \bar{\omega} \wedge (\bar{\omega} \wedge \bar{r}) \text{ ----- (1)}$$

waarin  $\wedge$  het uitwendig vectorprodukt is.

Het is zinvol deze uitdrukking die lineair is in  $\bar{r}$ , anders te schrijven, gebruik makend van tensornotatie:

$$\bar{a}(\bar{r}) = \bar{u} + \bar{\phi} \wedge \bar{r} + \bar{\omega}(\bar{\omega} \cdot \bar{r}) - \omega^2 \bar{r} \text{ ----- (2)}$$

$$\bar{a}(\bar{r}) = \bar{u} + \bar{r} \cdot \bar{\xi} \cdot \bar{\phi} + \bar{r} \cdot \bar{\omega} \bar{\omega} - \omega^2 \bar{r} \text{ ----- (3)}$$

waarin  $\bar{\xi}$  de volledig antisymmetrische 3x3x3 tensor is met

$\xi_{ijk} = 0$  als twee of drie indexen gelijk zijn

$\xi_{ijk} = 1$  als i,j,k een even permutatie is van x,y,z

$\xi_{ijk} = -1$  als i,j,k een oneven permutatie is van x,y,z

en waarin  $\bar{\omega} \bar{\omega}$  de symmetrische tensor is met als componenten  $(\bar{\omega} \bar{\omega})_{ij} = \omega_i \cdot \omega_j$  en de punt . het inwendig vectorprodukt.

$$\text{Als we definiëren } \bar{\bar{A}} = \bar{\bar{\xi}} \cdot \bar{\phi} + \bar{\omega} \bar{\omega} - \omega^2 \bar{\bar{I}} \text{ ----- (4)}$$

waarin  $\bar{\bar{I}}$  de eenheidstensor  $\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$  is, dan kunnen we (3) herschrijven in:

$$\bar{a}(\bar{r}) = \bar{u} + \bar{r} \cdot \bar{\bar{A}} \text{ ----- (5)}$$

$\bar{\bar{A}}$  ziet er uitgeschreven in componenten als volgt uit:

$$\bar{\bar{A}} = \begin{pmatrix} -\omega_y^2 - \omega_z^2, & -\phi_z + \omega_x \omega_y, & \phi_y + \omega_x \omega_z \\ \phi_z + \omega_x \omega_y, & -\omega_z^2 - \omega_x^2, & -\phi_x + \omega_y \omega_z \\ -\phi_y + \omega_x \omega_z, & \phi_x + \omega_y \omega_z, & -\omega_x^2 - \omega_y^2 \end{pmatrix} \text{ ----- (6)}$$

Het is belangrijk dat de relatie tussen  $\bar{a}(\bar{r})$  en  $\bar{r}$ , uitgedrukt door (1) of (5), (niet-homogeen) lineair is. We moeten nu  $\bar{u}$  en  $\bar{\bar{A}}$  zien af te leiden uit de versnellingsopnemers.

$\bar{u}$  en  $\bar{\bar{A}}$  vormen 3+3x3 = 12 onbekenden, zodat vier versnellingsopnemers met ieder drie signalen voor de (x,y,z) componenten voldoende zijn.

We zullen de plaatsen van de vier versnellingsopnemers aangeven door  $\bar{r}_0, \bar{r}_1, \bar{r}_2$  en  $\bar{r}_3$  en de bijbehorende versnellingssignalen met  $\bar{a}(\bar{r}_0), \bar{a}(\bar{r}_1)$  enz.

Uitgangspunt voor de berekening is (5) met daarin ingevuld  $\bar{r}_0$  t/m  $\bar{r}_3$ , een lineair stelsel van 12 vergelijkingen in 12 onbekenden. Dit stelsel gaan we als volgt oplossen.

We definiëren de verschilvectoren  $\bar{K}_i$ :

$$\bar{K}_i \equiv \bar{r}_i - \bar{r}_0 \quad (i = 1,2,3) \text{ ----- (7)}$$

en de verschilversnellingen  $\bar{a}_i$ :

$$\bar{a}_i \equiv \bar{a}(\bar{r}_i) - \bar{a}(\bar{r}_0) \quad (i = 1,2,3) \text{ ----- (8)}$$

We kunnen nu (5) herschrijven met behulp van (7) en (8):

$$\bar{a}_i = \bar{K}_i \cdot \bar{A} \quad (i = 1, 2, 3) \quad \text{-----} \quad (9)$$

Het is handig (9) in matrixnotatie over te zetten:

$$\bar{a} = \bar{K} \cdot \bar{A} \quad \text{-----} \quad (10)$$

$$\text{waarin } \bar{a} = (\bar{a}_1, \bar{a}_2, \bar{a}_3) = \begin{bmatrix} a_{1x}, a_{2x}, a_{3x} \\ a_{1y}, a_{2y}, a_{3y} \\ a_{1z}, a_{2z}, a_{3z} \end{bmatrix} \quad \text{-----} \quad (11)$$

$$\text{en } \bar{K} = (\bar{K}_1, \bar{K}_2, \bar{K}_3) \quad \text{-----} \quad (12)$$

We berekenen de inverse van  $\bar{K}$ :

$$\bar{K}^{-1} = \begin{bmatrix} \bar{K}_1^{-1} \\ \bar{K}_2^{-1} \\ \bar{K}_3^{-1} \end{bmatrix} \quad \text{-----} \quad (13)$$

$$\text{met } \bar{K}_1^{-1} = \frac{\bar{K}_2 \wedge \bar{K}_3}{\bar{K}_1 \cdot (\bar{K}_2 \wedge \bar{K}_3)} \quad \text{-----} \quad (14)$$

$\bar{K}_2^{-1}$  en  $\bar{K}_3^{-1}$  kunnen op dezelfde manier worden afgeleid door cyclische rotatie van indexen.

Deze inversie kan alleen maar als  $\det(\bar{K}) = \bar{K}_1 \cdot (\bar{K}_2 \wedge \bar{K}_3) \neq 0$

wat inhoudt dat  $\bar{K}_1$ ,  $\bar{K}_2$  en  $\bar{K}_3$  niet in één vlak liggen, wat weer inhoudt dat de punten  $\bar{r}_0$  t/m  $\bar{r}_3$  niet in één vlak mogen liggen.

$$\text{Als we nu in (10) links en rechts met } \bar{K}^{-1} \text{ vermenigvuldigen, krijgen we } \bar{A}: \quad \bar{K}^{-1} \cdot \bar{a} = \bar{A} \quad \text{-----} \quad (15)$$

Met behulp van (11) en (13) en met toepassing van dezelfde regels als voor het verkrijgen van de tensor  $(\omega\omega)$  uit de vector  $\omega$ , kunnen we (15) ook anders schrijven:

$$\bar{A} = (\bar{K}_1^{-1} a_1) + (\bar{K}_2^{-1} a_2) + (\bar{K}_3^{-1} a_3) \text{ met } (\bar{K}_1^{-1} a_1)_{ij} = K_{1i}^{-1} a_{1j} \quad \text{-----} \quad (16)$$

Nu we  $\bar{A}$  hebben berekend, is  $\bar{u}$  eenvoudig te vinden uit (5) als we bedenken dat  $\bar{u} = \bar{a}(\bar{0})$  omdat het zwaartepunt de oorsprong van het coördinaten-systeem is:

$$\bar{u} = \bar{a}(\bar{r}) - \bar{r} \cdot \bar{A} \quad \text{-----} \quad (17)$$

waarin voor  $\bar{r}$  een van de vectoren  $\bar{r}_i$  ( $i = 0, 1, 2, 3$ ) gekozen moet worden.

Nu  $\bar{u}$  en  $\bar{A}$  bekend zijn, kan met behulp van (5) de versnelling in ieder gewenst punt  $\bar{r}$  worden berekend.

Uit  $\bar{A}$  kunnen op eenvoudige wijze de vectoren  $\phi$  en  $\omega$  worden berekend;  $\phi$  uit het antisymmetrische deel van  $\bar{A}$  en  $\omega$  uit het symmetrische deel.