

Verificatie-onderzoek simulatieresultaten RWS-barrier

Met behulp van de resultaten van eerder uitgevoerde proeven op ware schaal

R-96-6

Ing. W.H.M. van de Pol

Leidschendam, 1996

Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV

Documentbeschrijving

| | |
|---------------------|---|
| Rapportnummer: | R-96-6 |
| Titel: | Verificatie-onderzoek simulatieresultaten RWS-barrier |
| Ondertitel: | Met behulp van de resultaten van eerder uitgevoerde proeven op ware schaal |
| Auteur(s): | Ing. W.H.M. van de Pol |
| Onderzoeksmanager: | Ir. F.C.M. Wegman |
| Projectnummer SWOV: | 55.435 |
| Opdrachtgever: | De inhoud van dit rapport berust op gegevens verkregen in het kader van een project, dat is uitgevoerd in opdracht van de Bouwdienst Rijkswaterstaat |
| Trefwoorden: | Safety fence, steel, design (overall design), simulation, program (computer), safety, deformation, lorry, car, Netherlands. |
| Projectinhoud: | Dit rapport doet verslag van een verificatie-onderzoek dat tot doel heeft de vertaling van de RWS-barrier in een simulatiemodel te optimaliseren. Het verificatie-onderzoek wordt uitgevoerd aan de hand van twee proeven op ware schaal. |
| Aantal pagina's: | 26 pp. + 44 pp. |
| Prijs: | f 47,50 |
| Uitgave: | SWOV, Leidschendam, 1996 |

Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV



Stichting
Wetenschappelijk Onderzoek
Verkeersveiligheid
SWOV
Postbus 1090
2260 BB Leidschendam
Duindoorn 32
telefoon 070 3 209323
telefax 070-3201261

Samenvatting

In 1990 heeft de SWOV een aantal simulaties uitgevoerd van aanrijdingen met een personenauto en een vrachtauto tegen de stalen RWS-barrier (Van de Pol, 1990; 1991)

In 1993 zijn door de BAST twee proeven op ware schaal uitgevoerd tegen de stalen RWS-barrier, één met een personenauto en één met een vrachtauto (Ellmers & Schulte 1993a; 1993b).

De Bouwdienst van Rijkswaterstaat heeft de SWOV opdracht gegeven om aan de hand van de proeven op ware schaal de mathematische vertaling van de stalen RWS-barrier in het computerprogramma VEDYAC te verifiëren en eventueel verder te optimaliseren.

Beide rapporten over de proeven op ware schaal bevatten geen uitgebreide gegevens (getalwaarden) over de resultaten van de aanrijdingen. Vooral de gegevens over de gedragingen van de beide voertuigen zijn summier. Het gedrag van de voertuigen wordt alleen in algemene termen en niet in getalwaarden beschreven. De ijking van de dataset van de barrier is dan ook voor een groot deel gebaseerd op de werking van de RWS-barrier zelf.

De uitbuiging bij de personenauto in de computersimulatie is gelijk aan de uitbuiging bij de proef op ware schaal. De plaats waar deze maximale uitbuiging gemeten wordt, is in beide gevallen hetzelfde. De uiteinden van de barrier veranderen niet van plaats.

In de simulatie vertoont de personenauto bij het verlaten van de barrier een slipbeweging in de richting van de barrier. Bij de proef op ware schaal is deze beweging op de filmopnamen niet te zien. De ASI-waarde uit de computersimulatie is in de simulatie nagenoeg hetzelfde als bij de proef op ware schaal, namelijk 0,35 tegen 0,31.

De gesimuleerde uitbuiging bij de 10 tons vrachtauto is 2 cm kleiner dan de uitbuiging bij de proef op ware schaal, 124 cm tegen 126 cm.

De plaats waar deze maximale uitbuiging gemeten wordt, is voor beide aanrijdingen gelijk. Het eerste element van de barrier verandert circa 3 cm van plaats. Bij de proef op ware schaal wordt dezelfde verplaatsing gemeten.

Het gedrag van de 10 tons vrachtauto in de simulatie is vergelijkbaar met het gedrag van de vrachtauto bij de proef op ware schaal.

De conclusie is dan ook dat de nieuwe dataset van de stalen RWS-barrier, welke gebruikt is in de computersimulatie voor beide typen aanrijdingen, het mogelijk maakt de werkelijkheid goed te beschrijven en dat er derhalve geen verdere aanpassingen voor deze dataset nodig zijn.

Summary

Verification study of simulation results for the RWS barrier

In 1990, the SWOV performed a number of simulated collisions, using a passenger car and a lorry, versus the steel RWS barrier (Van de Pol, 1990; 1991)

In 1993, the BAST performed two trials versus the steel RWS barrier at actual scale, one using a passenger car and one using a lorry (Ellmers & Schulte 1993a; 1993b).

Both reports concerning the trials at actual scale lack detailed data (numeric values) relating to the results of the collisions. In particular, the data concerning the behaviour of both vehicles are brief.

The behaviour of the vehicles is only described in general terms, and not in terms of numeric values, therefore the calibration of the data set of the barrier is largely based on the effect of the collision on the RWS barrier itself.

The distortion shown with the passenger car in the computer simulation is equivalent to the distortion measured with the trial at actual scale.

The location where this maximal distortion is measured is the same in both cases. The ends of the barrier do not change position.

In the computer simulation, the passenger car exhibits a skidding movement towards the barrier as it moves away from the barrier. With the trial at actual scale, this movement is not registered on film. The ASI value taken from the computer simulation is virtually the same in the simulation as with the trial at true scale, namely 0.35 versus 0.31.

The simulated distortion with the impact of the 10 ton lorry is 2 cm less than the distortion measured with the trial at actual scale, viz. 124 cm versus 126 cm.

The point at which this maximal distortion is measured is equivalent for both collisions. The first element of the barrier moves about 3 cm.

With the trial at actual scale, the same degree of displacement is measured.

The behaviour of the 10 ton lorry in the simulation is comparable to the behaviour of the lorry with the trial at actual scale.

The conclusion, therefore, is that the data set of the steel RWS barrier used in the computer simulation for both types of collision enables an accurate description of what actually occurred, so that no further adaptations to this data set are required.

The Construction Department of the Ministry of Public Works has asked the SWOV to verify and perhaps further optimise the mathematical translation of the steel RWS barrier in the computer programme VEDYAC, based on the tests conducted at actual scale.

Inhoud

| | | |
|--------|--|----|
| 1. | <i>Inleiding</i> | 6 |
| 2. | <i>Probleemstelling</i> | 7 |
| 3. | <i>Opzet en uitvoering van het onderzoek</i> | 8 |
| 4. | <i>De RWS-barrier</i> | 9 |
| 4.1. | Werking RWS-barrier | 10 |
| 4.2. | Modellering boutverbinding | 11 |
| 4.2.1. | Model-parameters | 11 |
| 4.2.2. | Lineaire componenten van de POINT-verbinding | 12 |
| 4.2.3. | Rotatie componenten van de POINT-verbinding | 13 |
| 4.2.4. | Momentsterkte Boutverbinding | 14 |
| 4.2.5. | Invloed speling en wrijving | 15 |
| 4.2.6. | Grootte wrijvingskracht | 16 |
| 4.2.7. | Grootte wrijvingsmoment | 16 |
| 4.3. | Testsimulaties | 17 |
| 5. | <i>Resultaten simulaties</i> | 19 |
| 5.1. | Simulatie met de zware personenauto | 19 |
| 5.2. | Simulatie met de 10 tons vrachtauto | 19 |
| 6. | <i>Resultaten proeven op ware schaal</i> | 21 |
| 7. | <i>Conclusies en aanbevelingen</i> | 23 |
| | <i>Literatuur</i> | 25 |
| | <i>Bijlage 1 t/m 3</i> | 27 |

1. Inleiding

In 1990 heeft de SWOV een aantal simulaties uitgevoerd van aanrijdingen met een personenauto en een vrachtauto tegen de RWS-barrier.

De opdracht werd verstrekt door de toenmalige Directie Bruggen van Rijkswaterstaat (RWS). De resultaten van deze simulaties zijn vastgelegd in een tweetal rapporten (Van de Pol, 1990; 1991).

In 1993 zijn twee proeven op ware schaal uitgevoerd van aanrijdingen tegen de RWS-barrier, één met een personenauto en één met een vrachtauto. De resultaten van deze twee proeven op ware schaal zijn vastgelegd in de rapporten BAST/93 7 S 002/ELL en BAST/93 7 S 003/ELL (Ellmers & Schulte 1993a; 1993b).

De Bouwdienst RWS te Apeldoorn heeft de SWOV opdracht gegeven om aan de hand van de resultaten van de proeven op ware schaal de vertaling van de RWS-barrier uit 1990 te verifiëren en eventueel verder te optimaliseren. Het betreft hier het simuleren van aanrijdingen tegen de RWS-barrier bij gelijke inrijcondities en voertuigen als bij de proeven op ware schaal.

2. Probleemstelling

Het CEN (Comité Européen de Normalisation) stelt voor Europa normen op waaraan afschermvoorzieningen moeten voldoen; ook wordt bepaald onder welke inrijcondities de proeven op deze afschermvoorzieningen moeten worden uitgevoerd. In 1990 waren de voorlopige CEN-voorschriften echter nog niet bekend. De gebruikte voertuigen en vooral de inrijcondities in het simulatieonderzoek komen dan ook niet overeen met de voertuigen en inrijcondities vermeld in deze voorschriften. De proeven op ware schaal zijn wel uitgevoerd conform de voorlopige CEN-voorschriften, te weten TB 21 en TB 41. Onderstaande tabel geeft een overzicht van de aanzienlijke verschillen van de inrijcondities tussen de uitgevoerde simulaties en de gehouden proeven op ware schaal.

| voertuig | inrij snelheid [km/uur] | inrijhoek [grd] | massa [kg] | botsenergie [Knm] |
|------------------------------------|----------------------------|--------------------|---------------|----------------------|
| SWOV-simulaties (1990) | | | | |
| | 100 | 20 | 990 | 45 |
| | 80 | 15 | 10000 | 165 |
| BASt-proeven op ware schaal (1993) | | | | |
| Gewenste aanrijding | | | | |
| TB 21 | 80 | 8 | 1300 | 6 |
| TB 41 | 70 | 8 | 10000 | 37 |
| Uitgevoerde aanrijding | | | | |
| TB 21 | 82,9 | 7,1 | 1286 | 5 |
| TB 41 | 72,9 | 8 | 9951 | 40 |

In 1990 waren nog geen resultaten bekend van de proeven op ware schaal met een stalen New Jersey-barrier (NJB). De stalen RWS-barrier heeft namelijk het New Jersey profiel. De vertaling van de RWS-barrier in een dataset ten behoeve van de simulaties moest derhalve plaatsvinden zonder dat het mogelijk was de dataset te verifiëren met behulp van gegevens uit proeven op ware schaal.

Het doel van dit onderzoek is om aan de hand van de proeven op ware schaal resultaten te verifiëren of de vertaling van de RWS-barrier reëel is geweest, dan wel dat enige aanpassingen in de dataset van de barrier gewenst is.

N.B.

De simulaties met de personenauto in het jaar 1990 komen redelijk overeen (massa 990 kg in plaats van 900 kg) met de TB 11 test van de voorlopige CEN-voorschriften.

De simulaties met de vrachtauto in het jaar 1990 komt het dichtst (inrij snelheid 80 km/uur in plaats van 70 km/uur) in de buurt van test TB 42 van de voorlopige CEN-voorschriften.

3. Opzet en uitvoering van het onderzoek

Gegeven de doelstelling van het onderzoek, verificatie en optimalisatie van het in 1990 ontwikkelde simulatiemodel van de RWS-barrier, zijn de oude datasets uit 1990 teruggezet, gecontroleerd en aangepast aan de nieuwe uitvoering van het computerprogramma VEDYAC2. Tevens is nagegaan of de ervaringen en inzichten, die in de laatste vijf jaar zijn opgedaan, aanpassing van de dataset nodig maakten.

Voorts is onderzocht in hoeverre het 1990-ontwerp van de RWS-barrier afwijkt van het 1993-ontwerp van de geteste RWS-barrier. Zowel de ervaringen en inzichten als het verschil in ontwerp van de RWS-barrier hebben aanleiding gegeven om enkele aanpassingen door te voeren.

Hierna zijn korte simulaties uitgevoerd om na te gaan of de nieuwe dataset geen invoerfouten bevatte/voldeed. Gekeken is of de elementen stilstonden (niet bewogen als ze werden neergezet) en of de verbindingen tussen de elementen goed waren, bijvoorbeeld geen voorspanning vertoonden.

Vervolgens zijn de TB 21 en de TB 41 gesimuleerd en de resultaten van deze simulaties vergeleken met de resultaten van de proeven op ware schaal. Aan de hand van deze vergelijking is bepaald of de dataset moest worden aangepast en zijn de simulaties herhaald. Dit proces is herhaald totdat de resultaten van de simulaties en de proeven op ware schaal met elkaar in overeenstemming waren. De overeenstemming is vastgesteld door vergelijking van onder andere:

- de werking van de barrier; dynamische en statische uitbuiging, lengte van de uitbuiging,
- het gedrag van het voertuig; dump-, rol- en gierhoeken (pitch, roll en yaw), snelheidsverlies, uitrijhoek en contactlengte met de barrier.

4. De RWS-barrier

De RWS-barrier die in 1990 is gesimuleerd, wijkt enigszins af van de RWS-barrier die bij de proeven op ware schaal is gebruikt. De koppeling tussen de elementen onderling bij de simulaties wijkt af, is zwakker en slapper, van de koppeling bij de proeven op ware schaal (zie *Afbeelding 1* en *2*).

De koppeling van de gesimuleerde RWS-barrier bestaat uit twee koppelplaten van 6 mm dikte met aan één zijde, in lengterichting van het element, slobgaten van 18x23 mm. De speling tussen de elementen bedraagt 8 mm. De koppeling van de proeven op ware schaal bestaat uit vier koppelplaten van 10 mm dikte met gaten van 22 mm rond. De speling tussen de elementen bedraagt 8 mm.

Na het uitvoeren van de simulaties in 1990 (van de Pol, 1990) is het VEDYAC computerprogramma geoptimaliseerd. Eén van de doorgevoerde verbeteringen is het zelfstandig kunnen invoeren van de speling en de daarbij behorende krachten en momenten. In het oude programma werd de speling verkregen door optellen en aftrekken van krachten en momenten en de daarbij behorende vervormingen.

In onderstaande tabel zijn de parameters van de POINT-verbinding tussen de elementen, die de invloed van de speling en de wrijving weergeven, opgenomen.

| kracht component | fa+ [N] | p [m] | fa- [N] | p [m] |
|------------------|----------|---------|----------|---------|
| in x-as | 7,6E4 | 0,005 | -7,6E4 | 0,005 |
| moment component | fa+ [Nm] | p [rad] | fa- [Nm] | p [rad] |
| om z-as | - | - | - | - |

In onderstaande tabel zijn de parameters van de POINT-verbinding tussen de elementen opgenomen.

| kracht component | k [N/m] | d [Ns/m] | e + [N] | b+ [m] | e - [N] | b- [m] |
|------------------|------------|-------------|----------|----------|----------|----------|
| in x-as | 3,2E6 | 1,0E2 | 2,9E6 | 0,10 | -2,9E6 | -0,10 |
| in y-as | 3,2E6 | 1,0E2 | 2,9E6 | 0,10 | -2,9E6 | -0,10 |
| in z-as | 3,2E6 | 1,0E2 | 2,9E6 | 0,10 | -2,9E6 | -0,10 |
| moment component | k [Nm/rad] | d [Nms/rad] | e + [Nm] | b+ [rad] | e - [Nm] | b- [rad] |
| om x-as | 2,0E6 | 0,6E2 | 8,9E5 | 1,0 | -8,9E5 | -1,0 |
| om y-as | 2,1E7 | 3,4E2 | 3,1E5 | 1,0 | -3,1E5 | -1,0 |
| om z-as | 4,6E7 | 3,4E2 | 3,1E5 | 1,0 | -3,1E5 | -1,0 |

Zie voor de verklaring van de gebruikte parameteraanduidingen *Bijlage 3*.

In de oude simulaties is er van uitgegaan, dat de koppelingen van de stalen RWS-barrier niet zouden breken. Deze aanname is gebaseerd op de gesimuleerde situatie; namelijk een RWS op het wegdek staande barrier zonder verankeringen, een flexibele opstelling.

4.1. Werking RWS-barrier

De wijze waarop de barrier zich tijdens een aanrijding gedraagt, bepaalt voor een deel de keuze waarop de koppeling tussen twee elementen in het model tot stand wordt gebracht.

Een goed werkende koppeling bepaalt de kwaliteit van de barrier. Bij de RWS-barrier wordt de koppeling tot stand gebracht door vier koppelplaten, twee in het stijle bovengedeelte en twee in het bredere ondergedeelte. De gaten in deze koppelplaten zijn in verticale richting als slopogaten uitgevoerd. Dit om oneffenheden in het wegdek te kunnen volgen. In langsrichting gezien is de speling 4 mm. De speling maakt het mogelijk bogen in de weg te kunnen volgen.

Tijdens de aanrijding zijn drie belastingen in de koppeling belangrijk: de trek/druk in langsrichting, het torsiemoment om de as in langsrichting en het buigmoment om de verticale as. De speling in de boutgaten heeft invloed op de trek/druk-belasting en op het buigmoment.

Tijdens de aanrijding buigt de barrier naar achteren uit. De koppeling wordt daardoor op trek en buiging belast. De buiging vindt plaats om de verticale as en in wat mindere mate om de langsas. De grootte van de belastingen wordt door de wrijvingskrachten bepaald. Wanneer de wrijvingskrachten worden overschreden, wordt de speling uit de koppeling getrokken. Tot het moment dat de speling uit de koppeling getrokken is, buigt de barrier relatief makkelijk uit. Na het bereiken van dit moment loopt de spanning in de koppelingen verder op en buigt de barrier over een steeds groter wordende lengte uit.

De speling van 4 mm in de koppeling heeft in de drie as-richtingen de volgende invloed. Voor de krachten geldt alleen in x-richting, dat de speling van 4 mm invloed heeft. In de y- en z-richting heeft de speling, door de vormgeving van de barrier, geen invloed. Voor de momenten geldt, dat de 4 mm speling om de y- en z-as invloed heeft. Om de x-as heeft de speling, door de vormgeving van de barrier, geen invloed. De mogelijke 'vrije' hoekverdraaiing om de y-as bedraagt ($\arctg 4/762,5$) 0,3 graden. De mogelijke 'vrije' hoekverdraaiing om de z-as bedraagt ($\arctg 4/600$) 0,38 graden. Om de x-as kan gezien de vormgeving van de barrier geen 'vrije' hoekverdraaiing plaatsvinden.

Bij de verdere 'vertaling' van de barrier worden de volgende aannamen gedaan:

- gezien de vormgeving/werking van de barrier treedt geen breuk op door krachten in y- en z-richting;
- gezien de vormgeving/werking van de barrier treedt geen breuk op door moment om de y-as;
- gezien de vormgeving en de lage torsiestijfheid van de barrier om de x-as treedt geen breuk op om de x-as;
- breuk van de barrier om de z-as treedt op het moment dat de bovenste bouten in de boutverbinding zijn afgeschoven;
- wanneer de speling bij hoekverdraaiing om de z-as uit de onderste boutgaten is getrokken, komen ook de barrierplaten tegen elkaar.

Er ontstaat stuik tussen de onderste opstaande randen (zie *Afbeelding 3*, het gemarkeerde gedeelte) van 7,5 cm. Dit punt gaat bij verdere hoekverdraaiing min of meer als draaipunt optreden.

4.2. Modelering boutverbinding

De boutverbinding tussen de elementen kan op een aantal manieren worden gesimuleerd; de krachten en momenten worden namelijk in één punt (zwaartepuntshoogte) geconcentreerd, dan wel in het hart van de vier koppelplaten (vier punten), dan wel door een combinatie van de eerste twee manieren. De punten worden in het verslag verder als POINT (zie *Bijlage 1*) aangeduid.

Na het uitvoeren van enige testsimulaties is voor de één POINT-koppeling gekozen. Als voornaamste reden voor deze keuze geldt, dat de één POINT-koppeling de onderlinge afstemming van de invloed van de speling/wrijvingskrachten in de boutverbinding en de invloed van de krachten en momenten in de verbinding nadat de speling uit de verbinding is getrokken, beter te regelen valt.

De elementen worden dus door één POINT-koppeling aan elkaar verbonden. In deze POINTS worden de krachten en momenten opgenomen.

4.2.1. Model-parameters

Bij de berekeningen zijn de volgende waarden gebruikt:

| | | | | |
|-------------------------|---------------|------------------------|---------|-------------------|
| Element | | | | |
| oppervlak | A | $1,1193 \cdot 10^{-2}$ | m^2 | |
| traagheidsmoment | I_x | $1,3435 \cdot 10^{-7}$ | m^4 | |
| traagheidsmoment | I_y | $6,7909 \cdot 10^{-4}$ | m^4 | |
| traagheidsmoment | I_z | $3,0757 \cdot 10^{-4}$ | m^4 | |
| materiaal eigenschappen | | | | |
| treksterkte | σ_t | $400 \cdot 10^6$ | N/m^2 | |
| stuiksterkte | σ_{st} | $400 \cdot 10^6$ | N/m^2 | |
| afschuifsterkte | τ | $240 \cdot 10^6$ | N/m^2 | (0,6 treksterkte) |
| vloeisterkte | σ_{vl} | $240 \cdot 10^6$ | N/m^2 | |
| elasticiteitsmodulus | E | $210 \cdot 10^9$ | N/m^2 | |
| glijdingsmodulus | G | $81 \cdot 10^9$ | N/m^2 | |
| Bout M16 (4.6) | | | | |
| oppervlak | A_s | $1,57 \cdot 10^{-4}$ | m^2 | |
| materiaal eigenschappen | | | | |
| treksterkte | σ_t | $400 \cdot 10^6$ | N/m^2 | |
| stuiksterkte | σ_{st} | $400 \cdot 10^6$ | N/m^2 | |
| afschuifsterkte | τ | $240 \cdot 10^6$ | N/m^2 | (0,6 treksterkte) |
| vloeisterkte | σ_{vl} | $240 \cdot 10^6$ | N/m^2 | |

De parameters in de POINT-verbinding zijn als volgt berekend (zie § 4.2.2 hieronder).

4.2.2. Lineaire componenten van de POINT-verbinding

De point-verbinding neemt krachten op in x-, y- en z-richting. Alleen in x-richting is speling aanwezig. In de koppeling zitten 24 M16 4.6 bouten. Voor het uitrekenen van de benodigde verbingsparameters is eerst nagegaan, wat de zwakste schakel in de verbinding is.

$$\text{afschuiven bouten} \quad F_{br} = A_s \tau n$$

Uit de formule volgt, met $A_s = 1,57 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$, $\tau = 240 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$ en $n = 24$ bouten,

$$F_{br} \text{ is } 904320 \text{ N.}$$

$$\text{stuik bouten} \quad F_{st} = A \sigma_{st} n$$

Uit de formule volgt, met $A = 9,6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$, $\sigma_{st} = 400 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$ en $n = 24$ bouten,

$$F_{st} \text{ is } 921600 \text{ N.}$$

De stuikbelasting op de dwarsdoorsnede van de barrier wordt berekend met de formule:

$$F_{stb} = A \sigma_{st}$$

Uit de formule volgt, met $A = 1,1193 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$ (oppervlak dwars doorsnede van de barrier en $\sigma_{st} = 400 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$,

$$F_{stb} \text{ is } 4477200 \text{ N.}$$

Uit berekeningen blijkt, dat in x-richting het afschuiven van de bouten in trekrichting de zwakste schakel is en niet de stuikbelasting op de bouten, 904320 N tegen 921600 N. In y-, en z-richting is de verbinding veel sterker dan in de x-richting. In de simulatie wordt er van uitgegaan, dat de boutverbinding in deze richtingen dan ook niet breekt. In beide richtingen is een waarde genomen, die driemaal de waarden heeft in x-richting. In drukrichting is de stuikbelasting, op de bouten en barrier doorsnede samen, maatgevend. De maximale stuikbelasting bedraagt 5398800 N.

De *plasticiteitsgrens* (el+ en el-) in x-richting voor trek is de kleinste waarde aangehouden van de berekende waarden, dus $9,0 \cdot 10^5 \text{ N}$. Voor druk licht deze waarde veel hoger, te weten $5,4 \cdot 10^6 \text{ N}$. In y- en z-richting is de waarde $2,7 \cdot 10^6 \text{ N}$ aangehouden.

De *stijfheidscoëfficiënten* (k) worden bepaald uit de plasticiteitsgrens en de mogelijke elastische vervorming in de boutverbinding. De grootte van deze vervorming wordt op 10 mm aangenomen. De *stijfheidscoëfficiënten* worden berekend met behulp van de formule:

$$k_{k(x,y,z)} = F_{pl(x,y,z)} / f_F$$

Uit de formule volgt dat, met $F_{plx} = 9,0E5 \text{ N}$, $F_{pl(y,z)} = 2,7E6 \text{ N}$ en $f_F = 0,01 \text{ m}$,

k_{kx} is 9,0E7 N/m. en

$k_{k(y,z)}$ is 2,7E8 N/m.

De *dempingscoëfficiënten* (d) zijn berekend met behulp van de formule:

$$d_{kr} = 2 \sqrt{m \cdot n \cdot k_{k(x,y,z)}}.$$

Uit de formule volgt dat, met $m = 630$ kg (massa element), $n = 2$ (aantal verbindingen per element), $k_{kx} = 9,0E7$ N/m en $k_{k(y,z)} = 2,7E8$ N/m,

$d_{kr(x)}$ is 6,7E5 Ns/m

$d_{kr(y,z)}$ is 1,2E6 Ns/m

Ten behoeve van numerieke stabiliteit in de simulatie is het gebruikelijk om voor de demping ééntiende van de kritische demping te nemen ($d_{kr}/10$). Deze waarde wordt over de twee koppelingen per element verdeeld. Voor de demping in de berekening in x-richting $d = 6,7E5 / 20 = 3,4E4$ Ns/m. en in y- en z-richting $d = 1,2E6 / 20 = 5,8E4$ Ns/m.

De *breekverplaatsingen* ($b+$ en $b-$) in de y- en z-richting zijn groot genomen, omdat er van wordt uitgegaan dat er geen breuk in die richtingen zullen optreden; $b+$ en $b-$ zijn 0,2 meter. In x-richting is de *breekverplaatsing* ($b+$ en $b-$) op 0,025 meter berekend (alle bouten zijn afgeschoven plus enige vervorming). In deze breekverplaatsing is tevens de aanwezige speling tussen de bout en boutgat opgenomen. Deze bout/gat-speling bedraagt 0,004 meter.

4.2.3. Rotatie componenten van de POINT-verbinding

Het bezwijken van de barrier om de z-as kan twee oorzaken hebben:

- De barrier-dwarsdoorsnede is te zwak; I_z is te klein voor het optredende moment.
- De boutverbinding kan het optredende moment niet aan; de bouten schuiven af.

Momentsterkte dwarsdoorsnede.

De *plasticiteitsgrens* ($el+$ en $el-$) wordt berekend met behulp van de formule:

$$M_{pl(x,y,z)} = \sigma_{vl} I_{x,y,z} / e$$

Uit de formule volgt dat, met $\sigma_{vl} = 240 \cdot 10^6 \cdot 1,3$ N/m², $I_x = 1,3435 \cdot 10^7$ m⁴, $I_y = 6,7909 \cdot 10^4$ m⁴, $I_z = 3,0757 \cdot 10^4$ m⁴, $e_x = 0,53$ m, $e_y = 0,30$ m, $e_z = 0,438$ m,

M_{plx} is 79 Nm.

M_{ply} is 7,1 10^5 Nm.

M_{plz} is 2,2 10^5 Nm.

N.B. De vloeigrens wordt met 30% verhoogd om versteviging tijdens het vloeien te simuleren.

De *rotatiestijfheidscoëfficiënt* (k) wordt bepaald uit de plastisiteitsgrens en de mogelijke elastische hoekverdraaiing Φ om de x-as is 1 rad, om de y-as 0,033 rad en om de z-as 0,033 rad. De *stijfheidscoëfficiënten* worden berekend met behulp van de formule:

$$k_{m(x,y,z)} = M_{pl} / \Phi_{M(x,y,z)}$$

Uit de formule volgt dat, met $M_{plx} = 79 \text{ Nm}$, $M_{ply} = 7,1 \cdot 10^5 \text{ Nm}$, $M_{plz} = 2,2 \cdot 10^5 \text{ Nm}$, $\Phi_{Mx} = 1,0 \text{ rad}$, $\Phi_{My} = 0,033 \text{ rad}$ en $\Phi_{Mz} = 0,033 \text{ rad}$.

$$k_{mx} \text{ is } 1,6 \cdot 10^4 \text{ Nm/rad.}$$

$$k_{my} \text{ is } 2,1 \cdot 10^7 \text{ Nm/rad.}$$

$$k_{mz} \text{ is } 6,6 \cdot 10^6 \text{ Nm/rad.}$$

De *dempingscoëfficiënten* (d) zijn berekend met behulp van de formule:

$$d_{kr} = 2 \sqrt{m \cdot n \cdot k_{m(x,y,z)}}$$

Uit de formule volgt dat, met $m = 630 \text{ kg}$ (massa element), $n = 2$ (aantal verbindingen per element), k_{mx} is $1,6 \cdot 10^4 \text{ Nm/rad}$, k_{my} is $2,1 \cdot 10^7 \text{ Nm/rad}$ en k_{mz} is $6,6 \cdot 10^6 \text{ Nm/rad}$.

$$d_{krx} \text{ is } 8980 \text{ Nms/rad.}$$

$$d_{kry} \text{ is } 3,2 \cdot 10^5 \text{ Nms/rad.}$$

$$d_{krz} \text{ is } 1,8 \cdot 10^5 \text{ Nms/rad.}$$

Ten behoeve van numerieke stabiliteit in de simulatie is het gebruikelijk om voor de demping ééntiende van de kritische demping te nemen ($d_{kr}/10$). Deze waarde wordt over de twee koppelingen per element verdeeld. Voor de demping in de berekening; $d_x = 8980 / 20 = 4,49 \cdot 10^2 \text{ Nms/rad}$, $d_y = 3,2 \cdot 10^5 / 20 = 1,6 \cdot 10^4 \text{ Nms/rad}$ en $d_z = 1,8 \cdot 10^5 / 20 = 9,0 \cdot 10^3 \text{ Nms/rad}$.

De *breekverplaatsingen* ($b+$ en $b-$) om de x- en y-as zijn groot genomen, omdat er van wordt uitgegaan, dat er geen breuk om de x-as (erg torsieslap) zal optreden; $b+$ en $b-$ zijn 1,0 radiaal en om de y-as zal optreden; $b+$ en $b-$ zijn 0,1 radiaal. Om de z-as is de *breekverplaatsing* $b+$ en $b-$ op 0,3 radiaal (alle bouten aan één zijde zijn afgeschoven) berekend.

In deze breekverplaatsing is tevens de mogelijke hoekverdraaiing door de aanwezige speling opgenomen. Deze hoekverdraaiing bedraagt 0,002 radiaal.

4.2.4. Momentsterkte Boutverbinding

In *Afbeelding 3* is weergegeven, bij welke hoekverdraaiing de speling is verbruikt. Tevens is weergegeven, bij welke hoekverdraaiing de bouten zijn afgeschoven. Uit de grafiek blijkt, dat de boutspeling bij G nog niet is verbruikt, op het moment dat de bouten bij A en B reeds zijn afgeschoven. De opbouw van het moment om de z-as heeft dus een niet lineair verloop. Het maximaal op te brengen moment door de bouten

ontstaat voordat de bouten bij A afschuiven. Deze waarde bedraagt ongeveer 2,6E5 Nm. De hoekverdraaiing bedraagt circa 0,03 rad. De bijbehorende *rotatiestijfheidscoëfficiënt* bedraagt $2,6E5/0,03 = 8,7E6$ Nm/rad. Na het afschuiven van de bouten bij A blijft het moment ongeveer deze waarde tot het moment dat de bouten bij B afschuiven. Hierna neemt het op te brengen moment door de bouten snel af tot praktisch nul. De hoekverdraaiing bedraagt dan ongeveer 0,223 rad (*Afbeelding 4*).

In § 4.1 is aangegeven dat de verbinding als gebroken wordt beschouwd wanneer de bouten bij F zijn afgeschoven.

4.2.5. Invloed speling en wrijving

Het vaststellen van deze krachten en momenten, die nodig zijn om de speling uit de koppelingen te halen, is een moeilijke zaak. De grootte van deze krachten en momenten worden onder andere beïnvloed door:

- het feit dat de moeren met de 'hand' worden aangedraaid;
- de kwaliteit van de plaatoppervlakken en de daarbij behorende wrijvingscoëfficiënten ($\mu=?$);
- de grootte van aandrukvlakken/speling in de boutverbinding.

Bij het vaststellen van de krachten en momenten zijn de volgende twee werkwijzen gevolgd.

Voordat de speling uit de boutverbinding wordt getrokken, moet eerst de wrijving tussen koppelplaten en barrierplaat worden overwonnen. Deze wrijvingskracht (F_{wr}) wordt berekend met behulp van de formules:

$$F_{norm} = 0,8 \sigma_{vl} A_s \text{ en}$$

$$F_{wr} = F_{norm} \mu$$

Uit de formules volgt dat, met $\sigma_{vl} = 240 \cdot 10^6 \text{N/m}^2$, $A_s = 1,57 \cdot 10^{-4} \text{m}^2$, en $\mu = 0,3$ (wrijvingscoëfficiënt tussen plaatmateriaal),

$$F_{wr} = 9043 \text{ N per bout}$$

In de boutverbinding zijn 24 bouten aangebracht, zodat de totale wrijvingskracht F_{wrtot} uitkomt op 217032 N.

De formules gelden voor voorspanbouten en niet voor kwaliteit 4 6 bouten. Om enig inzicht in de grote van F_{wrtot} te krijgen zijn deze formules toch gebruikt. Door toepassing van een reductiefactor wordt getracht rekening te houden met het kwaliteitsverschil tussen een verbinding uitgevoerd met voorspanbouten en een verbinding onder normale omstandigheden met 'normale' bouten. De reductiefactor is op 0,3 aangenomen. F_{wrtot} wordt dan $217032 \times 0,3 = 65110 \text{ N}$.

Behalve van deze theoretische benadering is ook gebruik gemaakt van gegevens uit een proef op ware schaal. De proefopstelling bestaat uit een aan een zijde ingeklemde RWS-barrier van vier elementen lang. Aan het vrije uiteinde wordt getrokken. De optredende trekkracht wordt met behulp van een trekmeter geregistreerd. In *Afbeelding 5* wordt de optredende trekkracht tegen de verplaatsing van het vrije uiteinde gegeven. Uit de grafiek kan worden afgeleid, dat de curve begint, nadat de speling er reeds is uitgetrokken.

Afbeelding 6 geeft een overzicht van de proefopstelling. Het moment, dat op doorsnede A wordt uitgeoefend, is gelijk aan de trekkracht maal de afstand. Uitgaande van de laagste genoteerde trekkracht in de grafiek, wordt het moment in doorsnede A $2500 \times 18 = 45000$ Nm. Het optredende moment om de speling uit de boutverbinding te halen, moet hieronder liggen.

De grootte van de trekkracht, tijdens het er uittrekken van de speling, was aan grote schommelingen onderhevig. Stel trekkracht gemiddeld 800 N, dan wordt het moment $800 \times 18 = 14400$ Nm. De voet van de RWS-barrier is 0,60 meter breed. De kracht in de voet van de barrier is dan $14400 / 0.6 = 24000$ N. Gezien de vorm van de dwarsdoorsnede van de barrier zal de momentarm in deze doorsnede niet 0,60 meter zijn maar kleiner, en daardoor de kracht groter.

4.2.6. Grootte wrijvingskracht

De grootte van de wrijvingskracht is in eerste instantie geraamd op de waarde, die aan de hand van de proef is vastgesteld, zijnde 24000 N.

4.2.7. Grootte wrijvingsmoment

De grootte van het wrijvingsmoment is in eerste instantie geraamd op de waarde, die aan de hand van de proef is vastgesteld, zijnde 14400 Nm.

In onderstaande tabel zijn de parameters van de POINT-verbinding tussen de elementen, die de invloed van de speling en de wrijving weergeven, opgenomen.

| kracht component | fa+ [N] | p [m] | fa- [N] | p [m] |
|------------------|----------|---------|----------|---------|
| in x-as | 2,4E4 | 0,004 | -2,4E4 | 0,004 |
| moment component | fa+ [Nm] | p [rad] | fa- [Nm] | p [rad] |
| om z-as | 1,44E4 | 0,002 | -1,44E4 | 0,002 |

In onderstaande tabel zijn de parameters van de POINT-verbinding tussen de elementen opgenomen.

| kracht component | k [N/m] | d [Ns/m] | el+ [N] | b+ [m] | el- [N] | b- [m] |
|------------------|---------------|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| in x-as | 9,0E7 | 3,4E4 | 9,0E5 | 0,02 | -5,4E6 | -0,02 |
| in y-as | 2,7E8 | 5,8E4 | 2,7E6 | 0,02 | -2,7E6 | -0,02 |
| in z-as | 2,7E8 | 5,8E4 | 2,7E6 | 0,02 | -2,7E6 | -0,02 |
| moment component | k [Nm/rad] | d [Nms/rad] | el+ [Nm] | b+ [rad] | el- [Nm] | b- [rad] |
| om x-as | 1,6E4 | 4,5E2 | 7,9E1 | 1,0 | -7,9E1 | -1,0 |
| om y-as | 2,1E7 | 1,6E4 | 7,1E5 | 0,1 | -7,1E5 | -0,1 |
| om z-as | 6,6E7 | 9,0E3 | 2,2E5 | 0,13 | -2,2E5 | -0,13 |

Zie voor de verklaring van de gebruikte parameteraanduidingen *Bijlage 3*.

4.3. Testsimulaties

Deze testsimulaties met de personenauto en de vrachtauto zijn uitgevoerd om vast te stellen in hoe verre de 'vertaling' van de sterkte van de koppeling overeen komt sterkte van de koppeling bij de proeven op ware schaal. Uit deze simulaties zijn de volgende conclusies getrokken:

- de torsiestijfheid van de elementen is veel groter dan berekend;
- de wrijvingskracht in de koppeling is groter dan aangenomen;
- het wrijvingsmoment in de koppeling is groter dan aangenomen;
- de dempingscoëfficiënten (d) zijn te groot;
- de (rotatie)stijfheidscoëfficiënten (k) zijn te groot.

N.B.

Het traagheidsmoment (I_x) van het element om zijn lengteas is moeilijk vast te stellen.

Het is een open constructie met vier dwarsverbindingen in de voet. De invloed van deze dwarsverbindingen is alleen via een proefopstelling goed vast te stellen. De invloed van de dwarsverbindingen is kennelijk veel groter dan in eerste instantie aangenomen.

De dempingscoëfficiënten moeten wat lager gekozen worden, om de numerieke stabiliteit in de simulatie voldoende groot te maken. Om dezelfde reden zijn de (rotatie)stijfheidscoëfficiënten kleiner gekozen.

De uiteindelijke in de simulatie gebruikte parameters van de POINT-verbinding tussen de elementen zijn in onderstaande tabel samengevat.

| kracht component | k [N/m] | d [Ns/m] | el+ [N] | b+ [m] | el- [N] | b- [m] |
|------------------|---------------|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| in x-as | 5,0E7 | 3,4E3 | 9,0E5 | 0,02 | -5,4E6 | -0,02 |
| in y-as | 2,7E8 | 5,8E4 | 2,7E6 | 0,02 | -2,7E6 | -0,02 |
| in z-as | 2,7E8 | 5,8E4 | 2,7E6 | 0,02 | -2,7E6 | -0,02 |
| moment component | k [Nm/rad] | d [Nms/rad] | el+ [Nm] | b+ [rad] | el- [Nm] | b- [rad] |
| om x-as | 1,6E4 | 1,0E2 | 7,9E2 | 1,0 | -7,9E2 | -1,0 |
| om y-as | 4,5E6 | 7,5E2 | 7,1E5 | 0,1 | -7,1E5 | -0,1 |
| om z-as | 5,3E6 | 6,1E3 | 2,2E5 | 0,3 | -2,2E5 | -0,3 |

In onderstaande tabel zijn de parameters van de POINT-verbinding tussen de elementen, die de invloed van de speling en de wrijving weergeven, opgenomen.

| kracht component | fa+ [N] | p [m] | fa- [N] | p [m] |
|---------------------|-------------|------------|-------------|------------|
| in x-as | 7,4E4 | 0,004 | -7,4E4 | 0,004 |
| moment component | fa+ [Nm] | p [rad] | fa- [Nm] | p [rad] |
| om z-as | 3,5E4 | 0.002 | -3,5E4 | 0,002 |

Zie voor de verklaring van de gebruikte parameteraanduidingen *Bijlage 3*.

5. Resultaten simulaties

De simulaties worden uitgevoerd met een zware personenauto (TB 21) en een 10 tons vrachtauto (TB 41). In onderstaande tabel zijn tevens de inrijcondities gegeven.

| voertuig | inrijsnelheid [km/uur] | inrijhoek [grd] | massa [kg] | botsenergie [kJ] |
|----------|---------------------------|--------------------|---------------|---------------------|
| TB 21 | 80 | 8 | 1300 | 6 |
| TB 41 | 70 | 8 | 10000 | 37 |

De RWS-barrier staat los op de weg. De wrijvingscoëfficiënt tussen de RWS-barrier en het wegdek is op 0,35 gesteld. De barrierelengte is 240 meter en de uiteinden zijn niet verankerd. De simulatieopstelling is weer gegeven in *Afbeelding 7*.

5.1. Simulatie met de zware personenauto

De zware personenauto wordt in korte tijd omgeleid, na ongeveer 0,2 seconde is het voertuig evenwijdig aan de constructie en na ongeveer 0,50 seconde verlaat het voertuig de constructie weer. Tijdens de aanrijding worden 18 elementen in meerdere of mindere mate verplaatst. De uitbuiging heeft een vloeiend verloop (*Afbeelding A1*). De golflengte van de uitbuiging bedraagt 108 meter. De dynamische uitbuiging bedraagt ongeveer 13 cm, evenals de statische uitbuiging (*Afbeelding A6*). De uiteinden van de barrier worden niet verplaatst.

In *Afbeelding A2* is te zien dat de rolbeweging van de zware personenauto klein is (minder dan 3 graden).

Het snelheidsverschil voor en na de aanrijding bedraagt circa 3 km/uur (*Afbeelding A3*).

De uitrijhoek van de snelheid bedraagt ongeveer 3 graden. De gierhoek van de zware personenauto is groter. Het voertuig heeft een slipbeweging naar de constructie toe (*Afbeelding A1*).

De ASI-waarde voor het zwaartepunt van de zware personenauto bedraagt 0,35 (*Afbeelding A4*) hetgeen betekent dat de ASI-waarde voldoet aan niveau A ASI = 1.

De koppelingen in de botszone worden niet tot hun maximum belast. Uit *Afbeelding A5* blijkt dat bij de koppelingen in de botszone de speling enigszins wordt aangesproken. Het moment om de z-as overschrijdt het belastingsniveau van speling eruit.

5.2. Simulatie met de 10 tons vrachtauto

De 10 tons vrachtauto wordt geleidelijk omgeleid. Na ongeveer 1 seconde is de bus tot evenwijdig aan de constructie omgeleid. Na ongeveer 3 seconden verlaat de 10 tons vrachtauto de barrier. Tijdens de aanrijding worden 28 elementen in meer of mindere mate verplaatst. De uitbuiging

heeft daarbij een vloeiend verloop (*Afbeelding B1*). De golflengte van de uitbuiging bedraagt 168 meter. De dynamische uitbuiging bedraagt ongeveer 124 cm, de statische uitbuiging bedraagt ongeveer 120 cm (*Afbeelding B5*). Uit *Afbeelding B7* blijkt dat het begin van de constructie iets in lengterichting verplaatst is. Deze verplaatsing bedraagt circa 3 cm. Het 'rear end'-effect (de achterkant van de vrachtauto komt in aanraking met de constructie) heeft een grote invloed op de grootte van de uitbuiging. De uitbuiging wordt van circa 0,35 meter naar 1,24 meter vergroot.

Uit *Afbeelding B2* blijkt dat de rolbeweging van de vrachtauto klein is: maximaal 1,5 graden.

Het snelheidsverschil voor en na de aanrijding bedraagt ongeveer 10 km/uur (*Afbeelding B3*).

De uitrijhoek van de 10 tons vrachtauto en de snelheid bedragen beide ongeveer 3 graden.

De gesimuleerde belastingen op de koppelingen in de botszone blijven onder de ingevoerde maximale waarden. Dit geldt voor zowel de krachten als de momenten.

6. Resultaten proeven op ware schaal

De resultaten van de proeven op ware schaal zijn vastgelegd in de rapporten BAST/93 7 S 002/ELL en BAST/93 7 S 003/ELL (Ellmers & Schulte 1993a; 1993b).

De geteste constructie heeft een lengte van 240 meter, 40 elementen. De constructie staat los op het wegdek en is aan de uiteinden niet verankerd. Het botspunt ligt bij element 16/17.

In onderstaande tabel wordt een overzicht gegeven van de inrijcondities;

| voertuig | inrijsnelheid [km/uur] | inrijhoek [grd] | massa [kg] | botsenergie [Knm] |
|------------------------------------|---------------------------|--------------------|---------------|----------------------|
| BAST-proeven op ware schaal (1993) | | | | |
| | 82,9 | 7,1 | 1286 | 5,2 |
| | 72,9 | 8 | 9951 | 39,5 |

N.B. De waarden in de tabel vallen binnen de in de voorlopige CEN-voorschriften genoemde toleranties.

De beschikbare rapporten over de proeven op ware schaal geven een beperkt overzicht over de werking van de constructie en het gedrag van de voertuigen tijdens de aanrijding. Zo worden in de rapporten bijvoorbeeld geen overzicht gegeven van de werking van de koppelingen in de botszone. Een belangrijk gegeven in het verificatieproces is de werking van de koppeling; wordt de beschikbare speling in de koppeling gebruikt en treedt er schuif- en/of stuikbelasting in de boutverbinding op. Het kan het verschil in het belastingsniveau zijn tussen de proef met de personenauto en de vrachtauto. Ook de golflengten zijn niet vermeld. Tevens worden geen uitrijhoeken en -snelheden in getalwaarden gegeven.

De wel beschikbare gegevens zijn samengevat in onderstaande tabel.

| | barrierverplaatsing dwars | | element nummer | langs [cm] | element nummer | contact lengte bar/vrtg [cm] |
|-----|------------------------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------------------------------|
| | dyn. [cm] | stat. [cm] | | | | |
| PKW | 13 | 13 | 17/18 | -- | -- | 1330 |
| LKW | 126 | 126 | 18/19 | 7,2 3 | 15/16 1 | 4070 |

Gezien het feit dat alleen bij de proef met de vrachtauto langsverplaatsing wordt vermeld, wordt aangenomen dat de speling alleen bij de proef met de vrachtauto wordt gebruikt en niet, dan wel in beperkte mate, bij de proef met de personenauto.

Het gedrag van het voertuig tijdens de aanrijding is in de rapporten summier beschreven. In onderstaande tabel zijn de beschikbare gegevens samengevat.

| | voertuig hoeken | | | | klimhoogte wielen | | voertuig los van wegdek | ASI | THIV |
|-----|--------------------|---------------|--------------|-----------------|----------------------|--------|-------------------------------|------|-------|
| | pitch [grd] | roll [grd] | yaw [grd] | uitrij [grd] | voor [cm] | achter | | | [m/s] |
| PKW | # | # | # | < | 60 | 60 | ja | 0,31 | 2,46 |
| LKW | # | # | # | < | 20 | -- | neen | * | * |

niet gemeten

* wordt voor vrachtauto niet berekend

De schade aan de constructie is bij beide aanrijdingen beperkt gebleven tot veeg- en krassporen. Er is geen blijvende vervorming geconstateerd. Ook aan de voertuigen zijn geen grote schaden geconstateerd. De schade beperkt zich tot veeg- en krassporen en kleine vervormingen aan bumper en spatborden.

7. Conclusies en aanbevelingen

In 1993 zijn twee proeven op ware schaal uitgevoerd van aanrijdingen tegen de RWS-barrier, één met een personenauto en één met een vrachtauto. De resultaten van deze twee proeven op ware schaal zijn vastgelegd in de rapporten BAST/93 7 S 002/ELL en BAST/93 7 S 003/ELL (Ellmers & Schulte 1993a; 1993b). De resultaten van deze proeven zijn gebruikt om de reeds bestaande dataset van de stalen RWS-barrier te verifiëren en eventueel verder te optimaliseren, teneinde te bewerkstelligen dat simulaties met deze nieuwe dataset bij andere inrijcondities een betrouwbaarder beeld geven.

De dataset uit 1990 heeft enkele aanpassingen ondergaan. Deze aanpassingen worden gedeeltelijk veroorzaakt door het gewijzigde VEDYAC2-computerprogramma en hebben gedeeltelijk ook te maken met doorgevoerde verfijningen in het modelleren van de koppeling tussen de elementen.

De uitbuigingen van de simulatie en van de proef op ware schaal met de zware personenauto zijn gelijk, te weten 13 cm. Deze maximale uitbuiging vindt op dezelfde plaats (element-nummer) gemeten. De lengte van de uitbuiging wordt in het rapport niet gegeven. Bij de simulatie bedraagt deze ongeveer 108 meter. De contactlengte tussen barrier en voertuig bedraagt ongeveer 12 meter.

De bewegingen van de personenauto tijdens de simulatie en de aanrijding zijn niet met elkaar te vergelijken, daar de bewegingen van de personenauto niet in het rapport (als getalwaarde) zijn vermeld. Uit HS-opnamen valt af te leiden, dat de bewegingen bij de simulatie wat heftiger zijn dan de bewegingen bij de proef op ware schaal.

De ASI-waarde bij de simulatie komt goed overeen met de ASI-waarde van de proef op ware schaal, 0,35 tegen 0,31.

De uitbuigingen van de simulatie en van de proef op ware schaal met de 10 tons vrachtauto komen goed met elkaar overeen; respectievelijk 124 cm tegen 126 cm. Deze maximale uitbuiging wordt op dezelfde plaats (element-nummer) gemeten. De lengte van de uitbuiging wordt in het rapport van de proef op ware schaal niet gegeven. Bij de simulatie bedraagt deze ongeveer 168 meter. De lengte van de uitbuiging wordt in het rapport niet gegeven. Het eerste element verplaatst tijdens de aanrijding circa 3 cm. De contactlengte tussen barrier en voertuig bedraagt ongeveer 42 meter.

Ook voor de 10 tons vrachtauto geldt, dat de bewegingen van de 10 tons vrachtauto tijdens de simulatie en de aanrijding niet met elkaar te vergelijken zijn, daar de bewegingen van de personenauto niet in het rapport (als getalwaarde) zijn vermeld. Uit HS-opnamen valt af te leiden, dat de bewegingen bij de simulatie van gelijke grootte orde zijn dan de bewegingen bij de proef op ware schaal. De vrachtauto wordt geleidelijk omgeleid.

De simulaties komen goed overeen met de proeven op ware schaal. De ontwikkelde dataset voor de stalen RWS-barrier voldoet derhalve goed voor beide typen aanrijdingen.

Dit resultaat geeft vertrouwen in de kwaliteit van de dataset in de computersimulatie en in het gebruik van computersimulaties voor dit doel in het algemeen.

Literatuur

Pol, W.H.M. van de (1990). *Stalen geleidebarrier met New Jersey profiel*. R-90-7. SWOV, Leidschendam.

Pol, W.H.M. van de (1991). *Stalen geleidebarrier met New Jersey profiel deel II*. R-91-20. SWOV, Leidschendam.

Ellmers, U. & Schulte, W. (1993a). *Bericht über einen PKW-Anprallversuch an die mobile Stahlschutzwand "RWS-Barrier" der Firma Laura metaal, Holland*. In BAST/93 7 S 002/ELL.

Ellmers, U. & Schulte, W. (1993b). *Bericht über einen LKW-Anprallversuch an die mobile Stahlschutzwand "RWS-Barrier" der Firma Laura metaal, Holland*. In BAST/93 7 S 003/ELL.

Huisman, Th. (1991). *Proef met geleidebarrier voor tijdelijke voorzieningen*. Bouwdienst Zoetermeer RWS. (Niet gepubliceerd).

Comité Européen de Normalisation (CEN) (1994a). *Road restraint systems. Part 1: Terminology and general criteria for tests methods*. Draft; Ref.No. PrEN 1317-1.

Comité Européen de Normalisation (CEN) (1994b). *Road restraint systems. Part 1: Safety barriers. Performance classes, impact test acceptance criteria and test methods*. Draft; Ref.No. PrEN 1317-2.

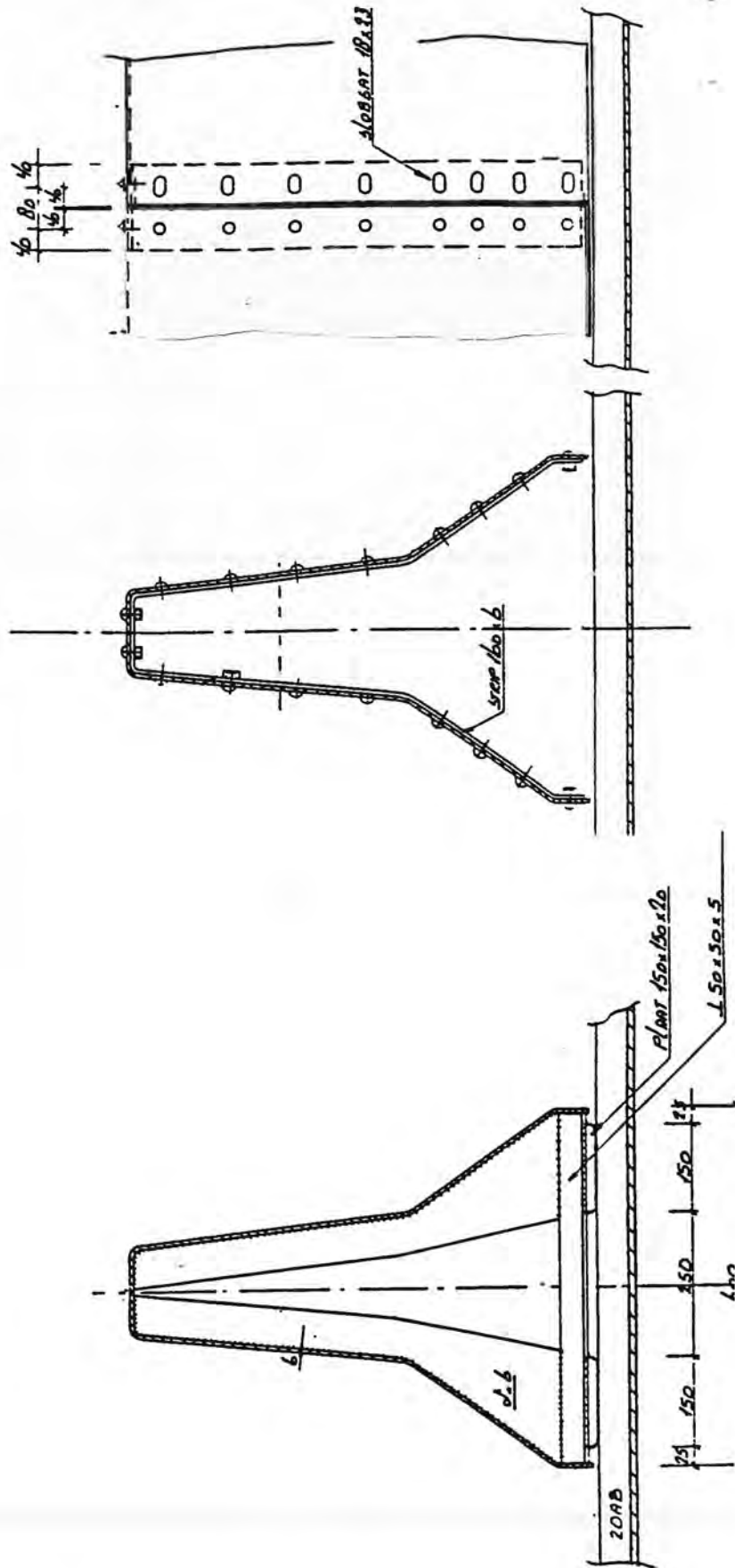
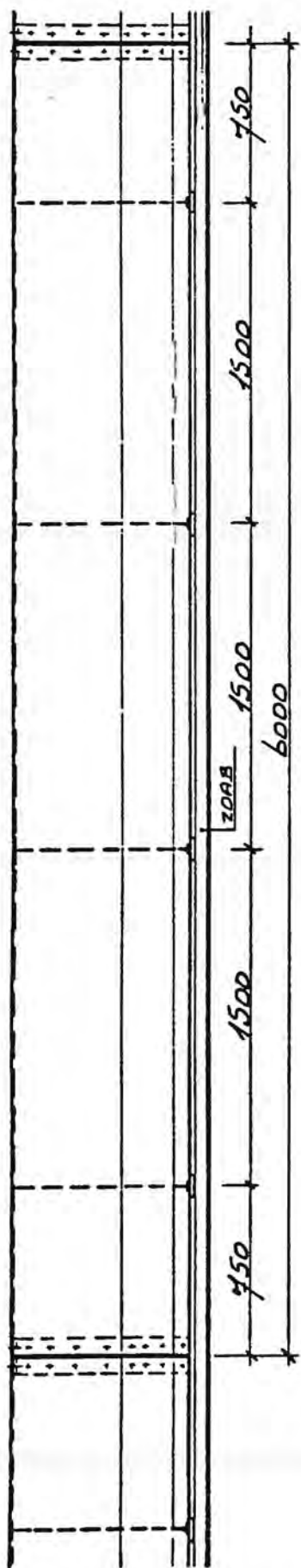
Bijlage 1 t/m 3

1. *Afbeeldingen 1 t/m 7*
- 2A. *Afbeeldingen A1 t/m A7*
- 2B. *Afbeeldingen B1 t/m B8*
3. *Korte beschrijving van de werking van het computerprogramma VEDYAC*

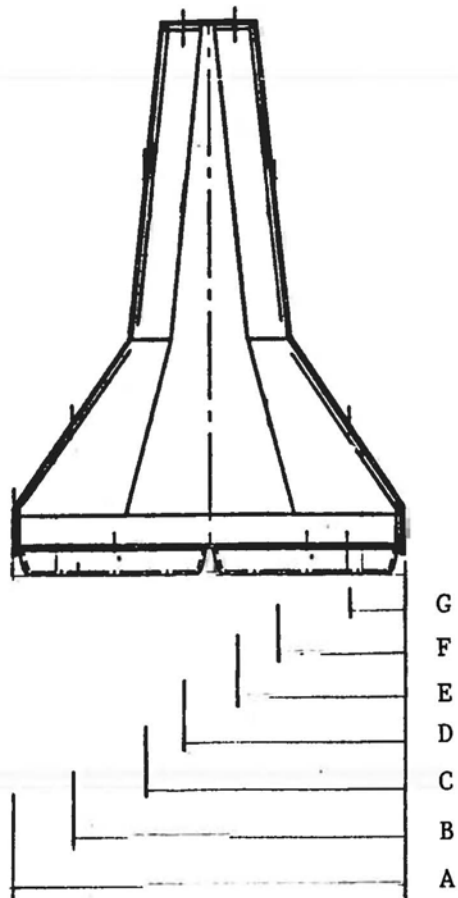
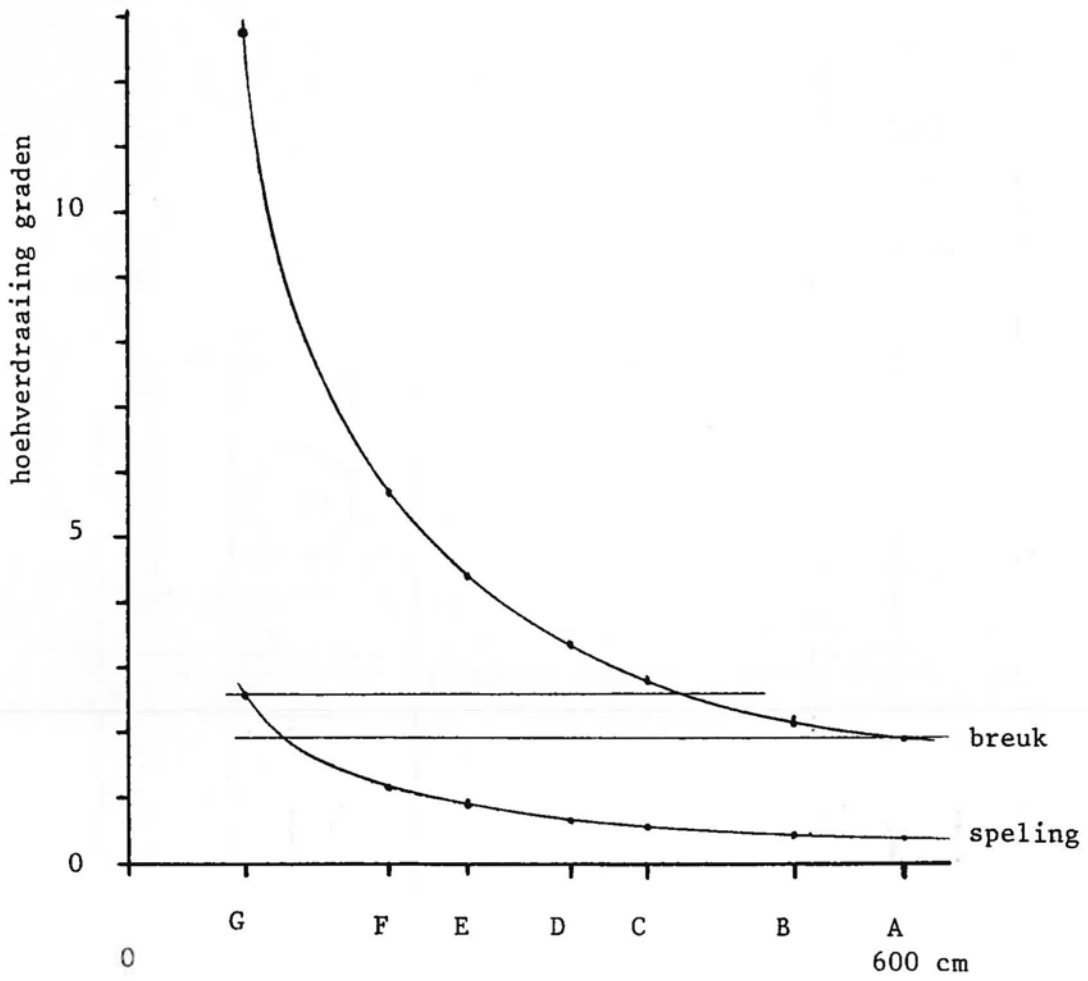
Bijlage 1

Afbeeldingen 1 t/m 7

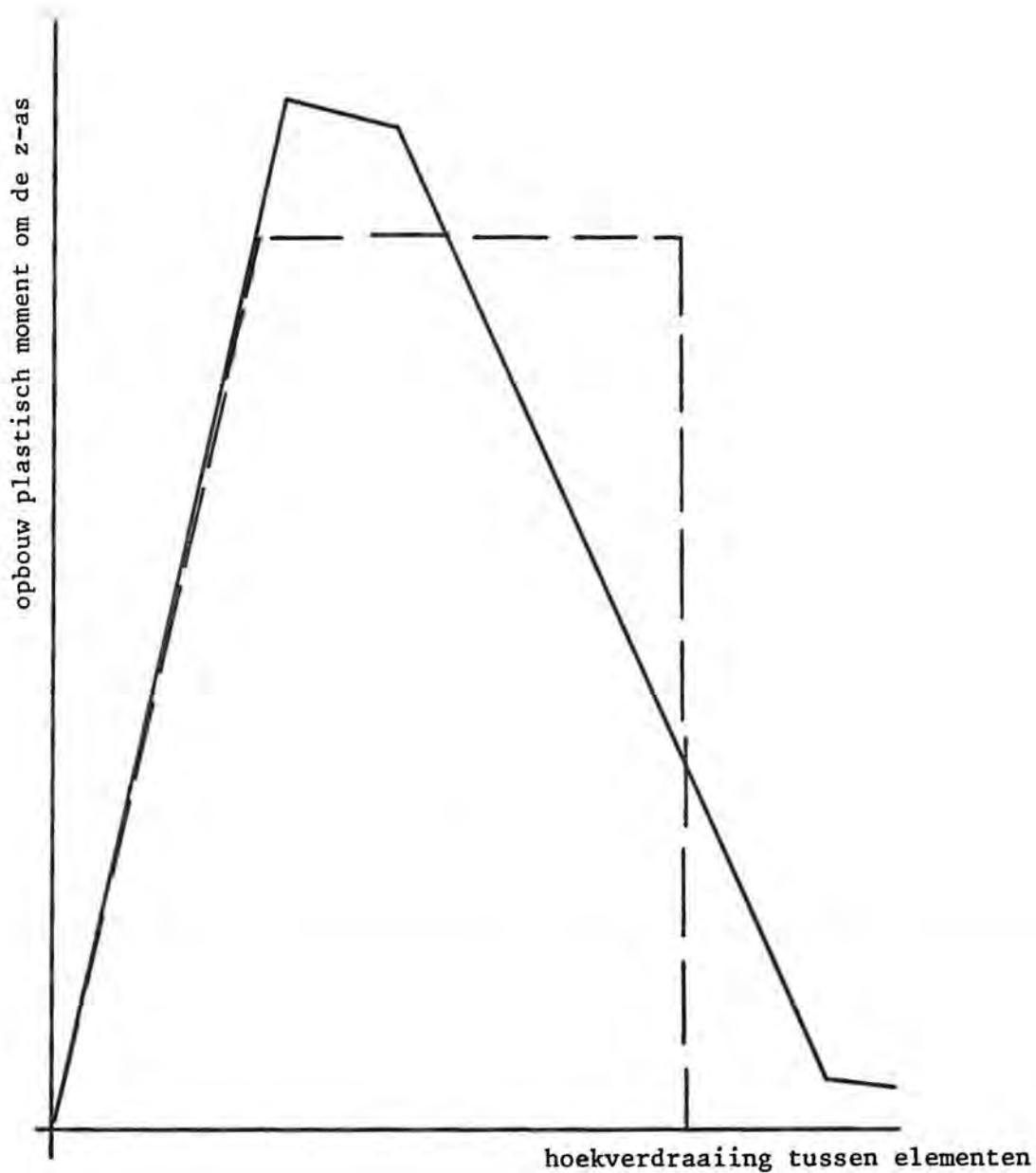
1. *Overzicht koppeling bij gesimuleerde RWS-barrier.*
2. *Overzicht koppeling bij beproefde RWS-barrier.*
3. *Moment van verbruik speling en afschuiven bouten in de koppeling bij hoekverdraaiing om de z-as.*
4. *Opbouw van het moment door de bouten in de koppeling tussen de elementen.*
5. *Optredende trekkracht tegen verplaatsing vrije uiteinde.*
6. *Opstelling trekproef RWS-barrier.*
7. *Overzicht simulatieopstelling.*



Afbeelding 1. Overzicht koppeling bij gesimuleerde RWS-barrier.

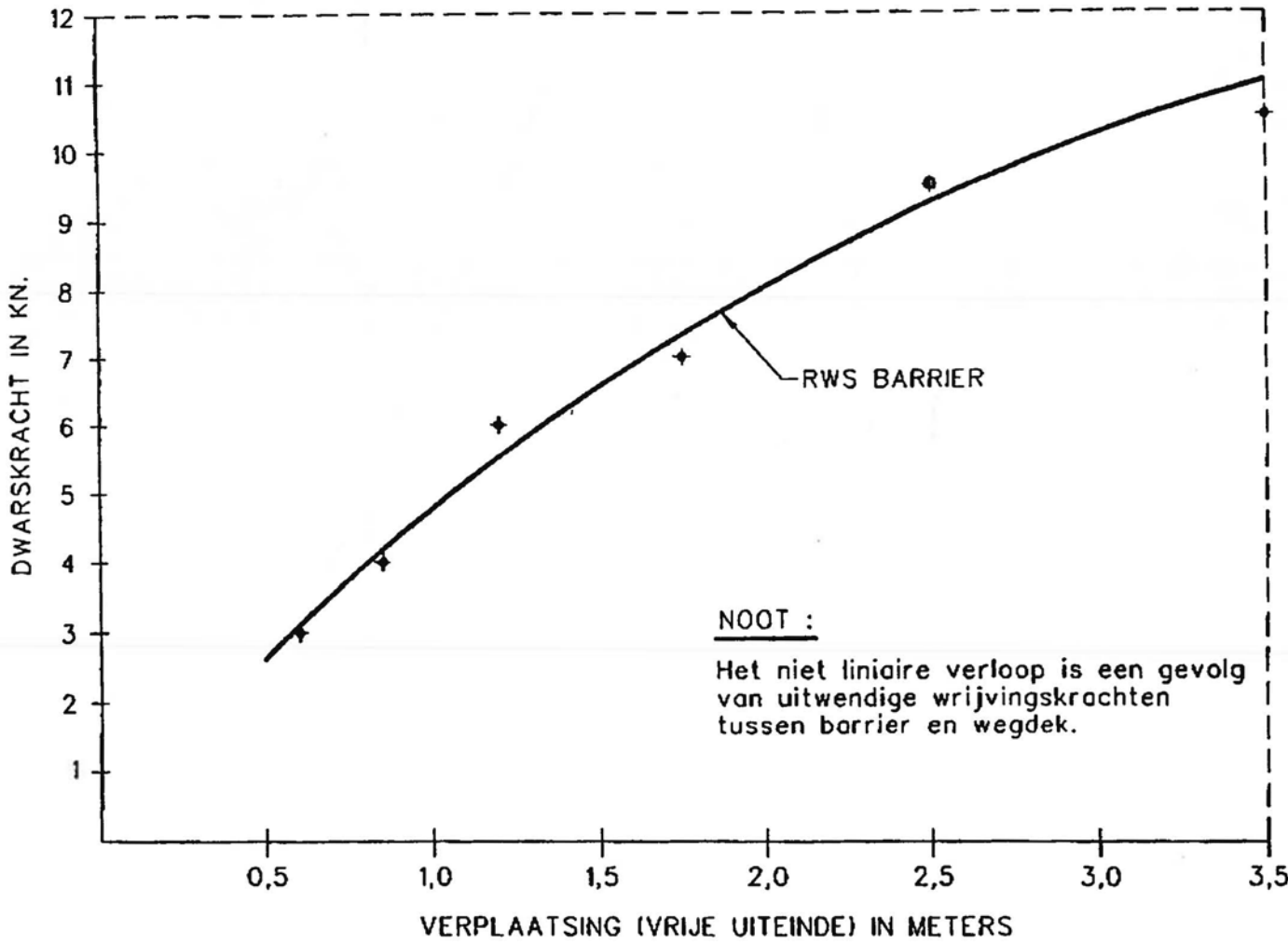


Afbeelding 3. Moment van verbruik speling en afschuiven bouten in de koppeling bij hoeverdraaiing om de z-as.

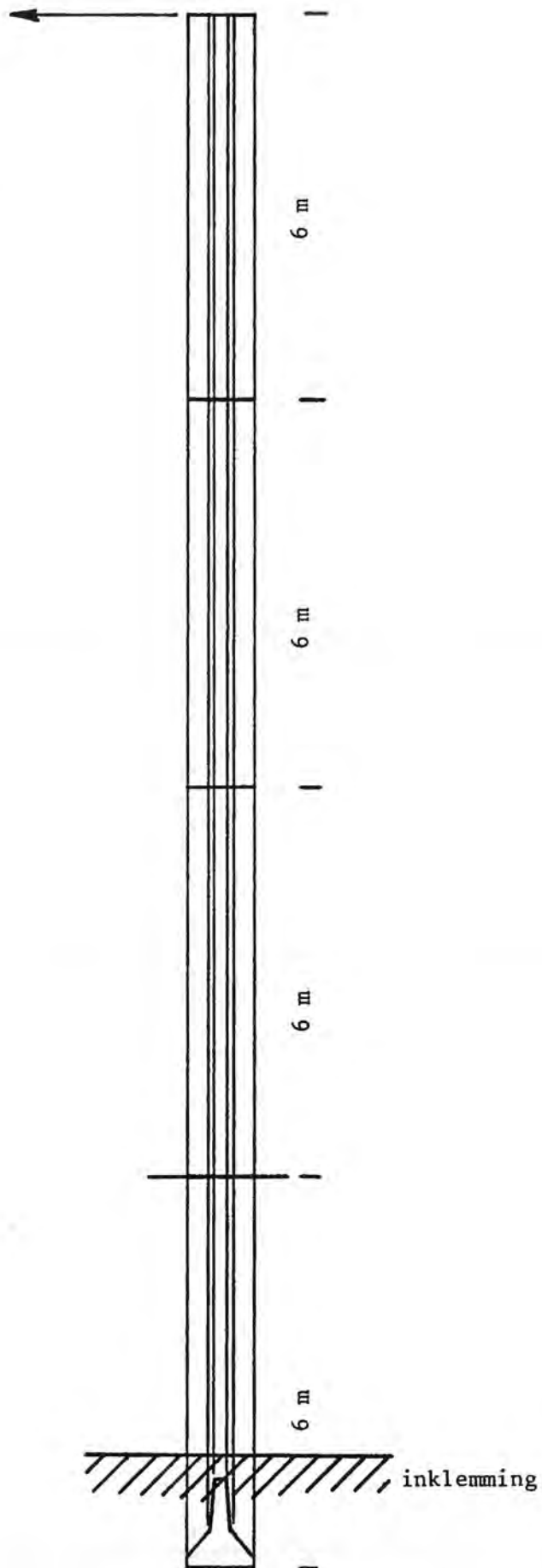


Afbeelding 4. Opbouw van het moment door de bouten in de koppeling tussen de elementen.

VERPLAATSING / DWARSKRACHT DIAGRAM



Afbeelding 5. Optredende trekkracht tegen verplaatsing vrije uiteinde.



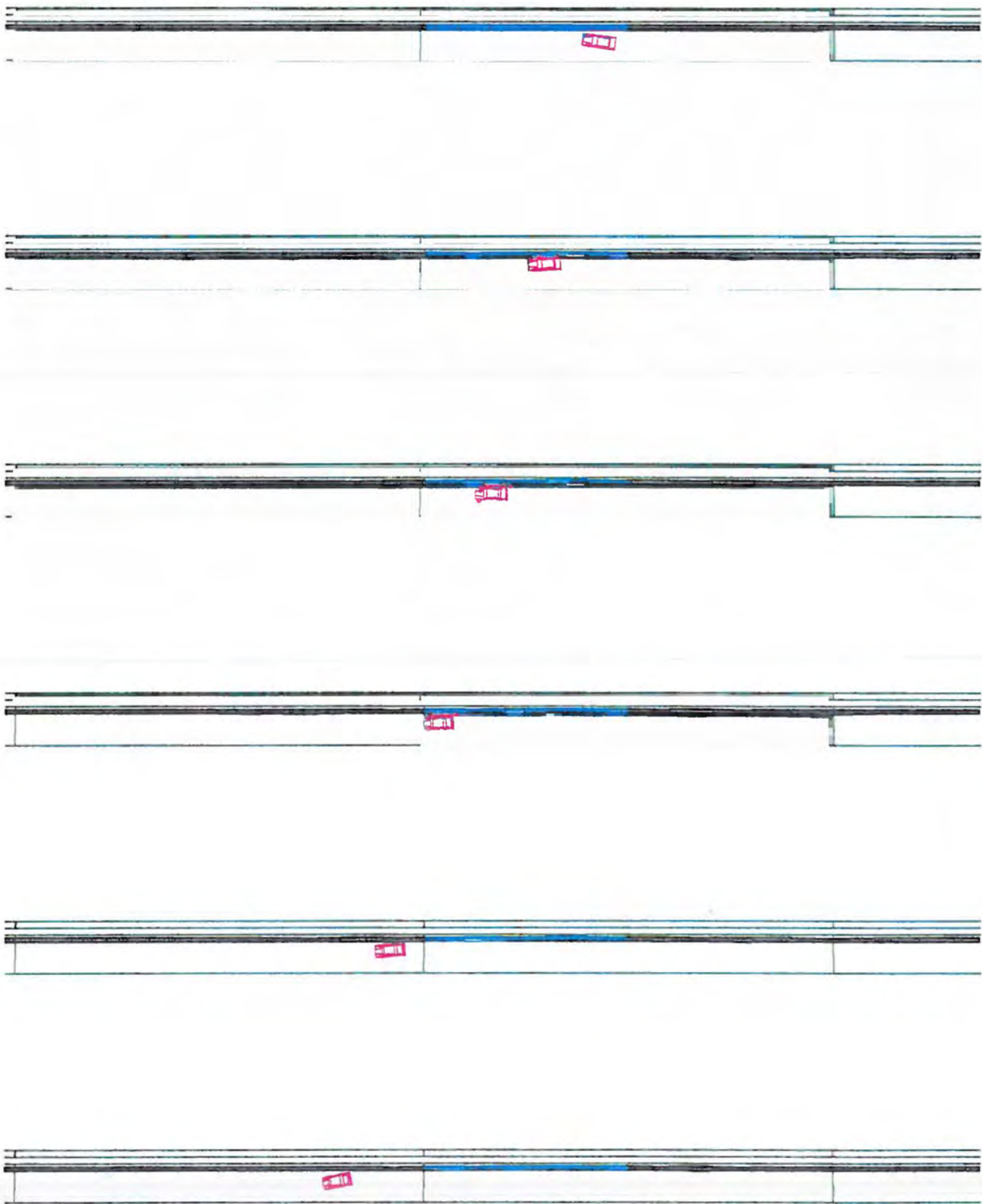
Afbeelding 6. Opstelling trekproef RWS-barrier.



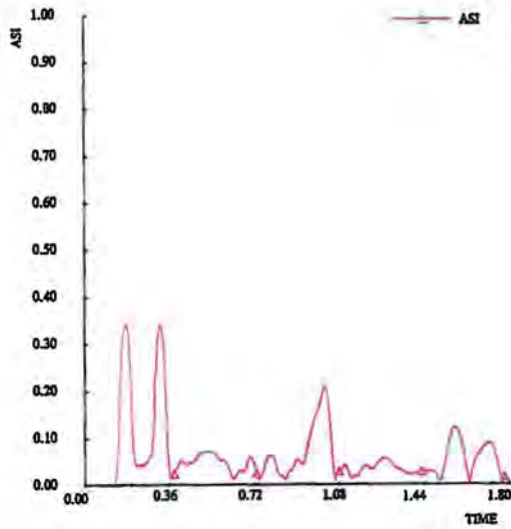
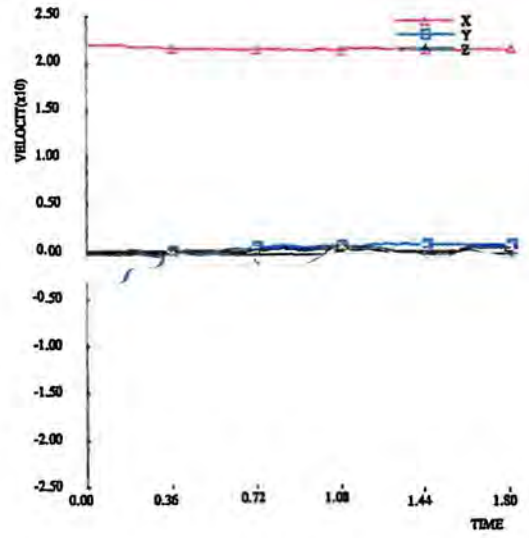
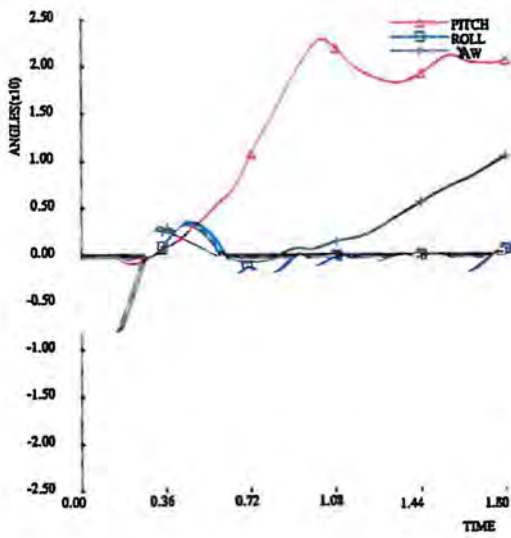
Afbeelding 7. *Overzicht simulatieopstelling.*

Simulaties met de personenauto

- A1. *Overzicht aanrijding met de personenauto tegen de RWS-barrier.*
- A2. *Verloop van de roll-, pitch- en yawhoek van de personenauto tegen de tijd tijdens de aanrijding tegen de RWS-barrier.*
- A3. *Verloop van de snelheid tegen de tijd tijdens de aanrijding met de personenauto tegen de RWS-barrier.*
- A4. *De ASI-waarde van het zwaartepunt voertuig tegen de tijd tijdens de aanrijding met de personenauto tegen de RWS-barrier.*
- A5. *Verloop van de krachten en momenten in de koppeling tussen de elementen 25/26, 26/27 en 27/28 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de personenauto tegen de RWS-barrier.*
- A6. *Verloop van de uitbuiging van de elementen 25, 26 en 27 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de personenauto tegen de RWS-barrier.*



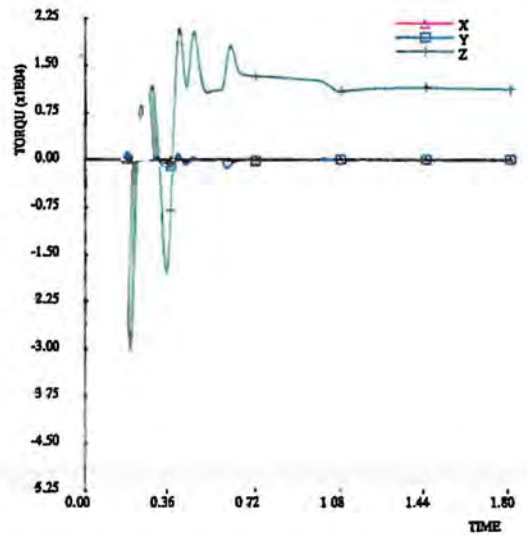
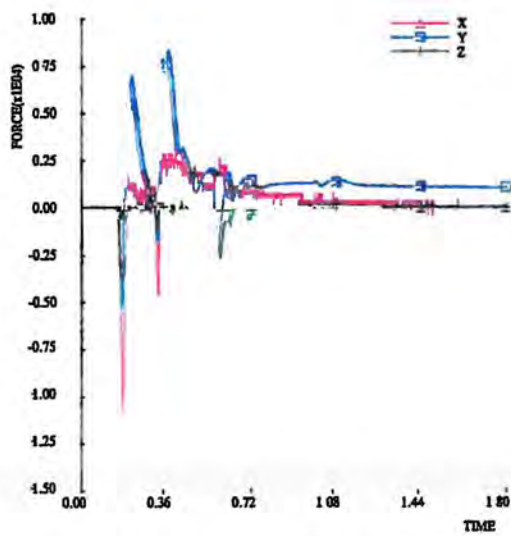
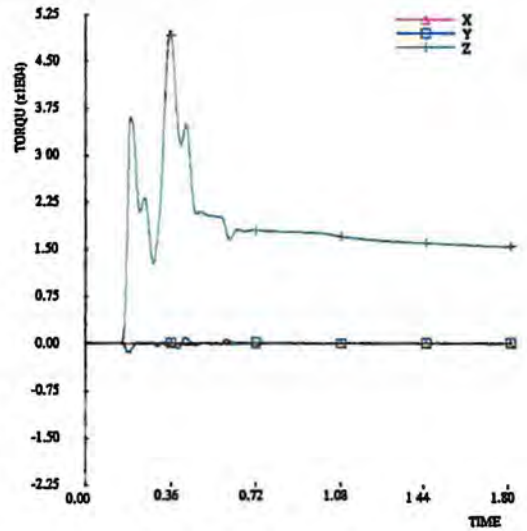
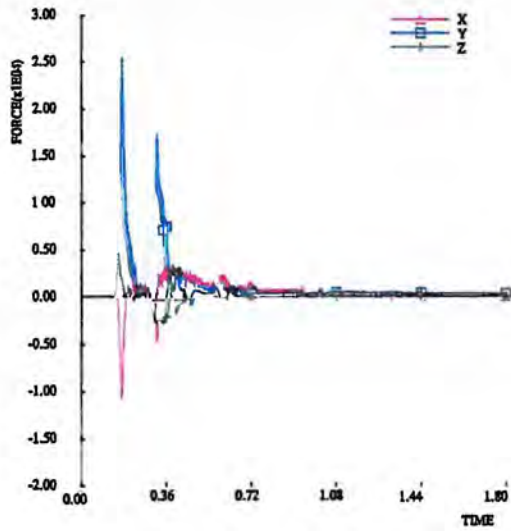
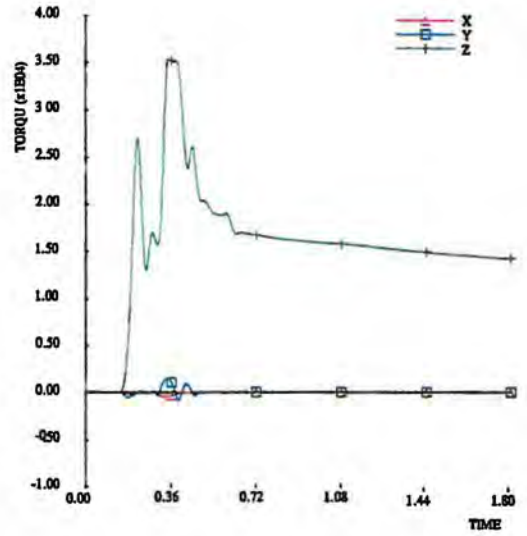
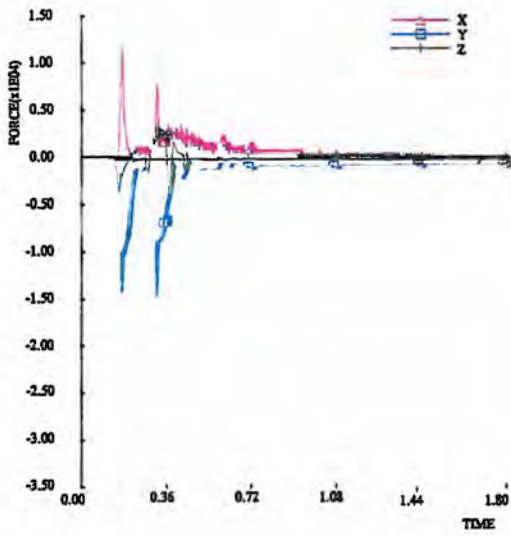
Afbeelding A1. *Overzicht aanrijding met de personenauto tegen de RWS-barrier.*



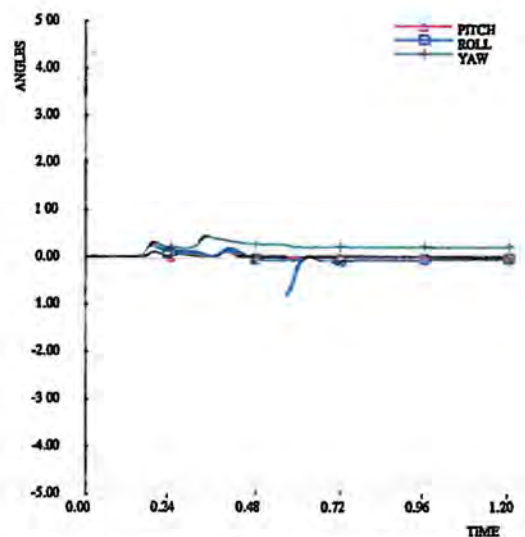
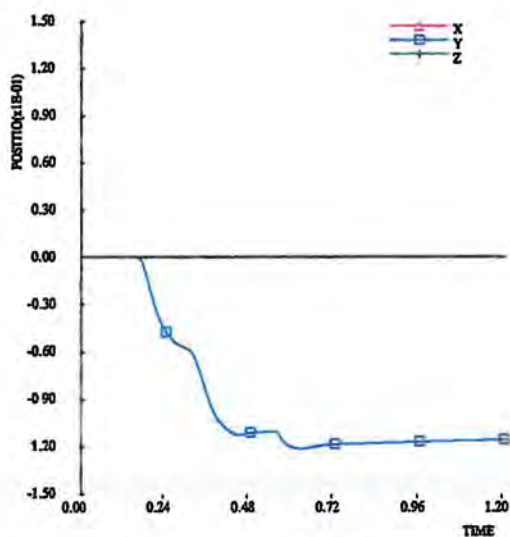
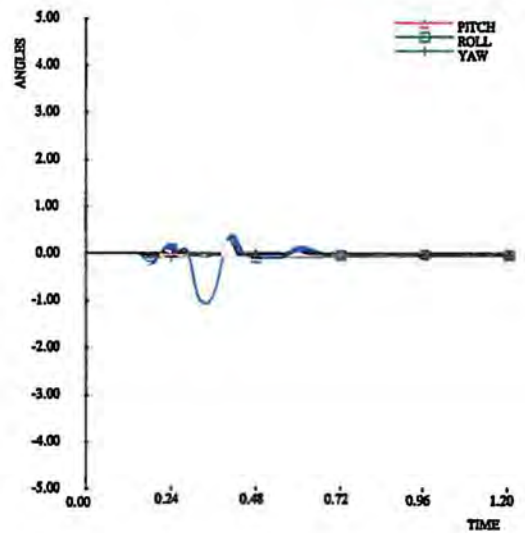
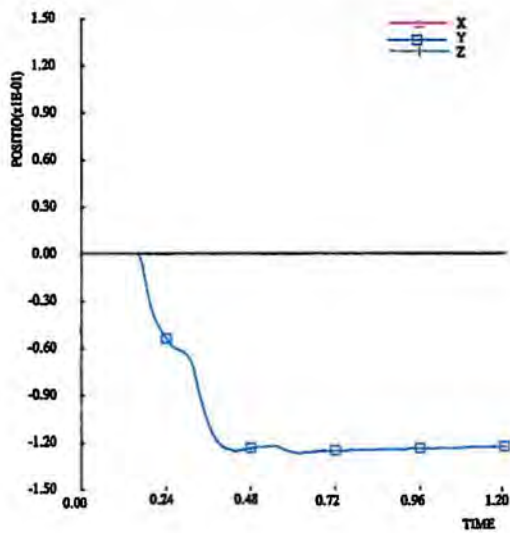
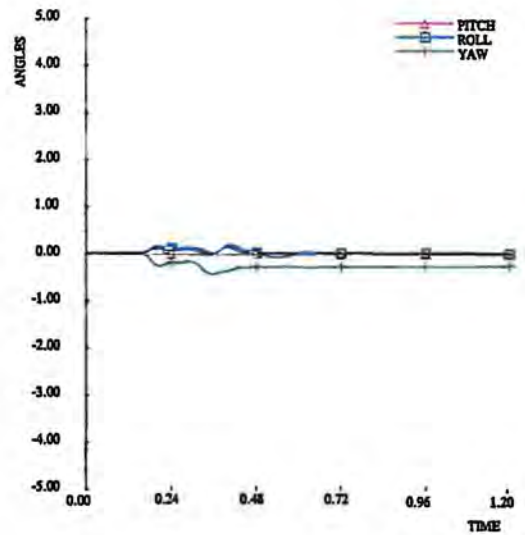
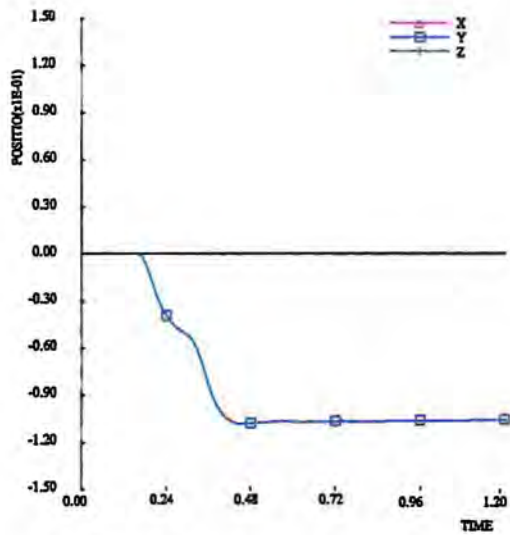
Afbeelding A2. Verloop van de roll-, pitch- en yawhoek van de personenauto tegen de tijd tijdens de aanrijding tegen de RWS-barrier.

Afbeelding A3. Verloop van de snelheid tegen de tijd tijdens de aanrijding met de personenauto tegen de RWS-barrier.

Afbeelding A4. De ASL-waarde van het zwaartepunt voertuig tegen de tijd tijdens de aanrijding met de personenauto tegen de RWS-barrier.



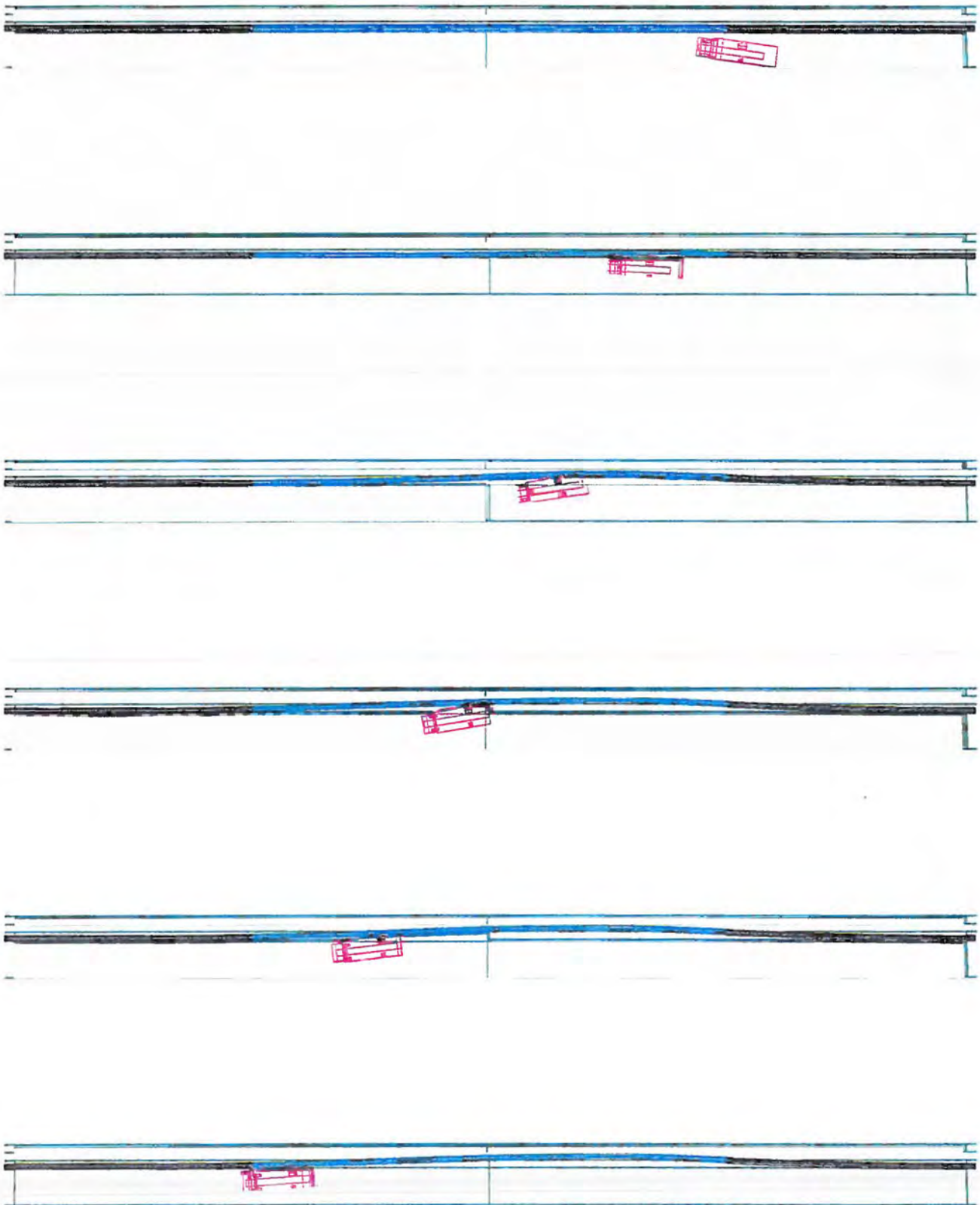
Afbeelding A5. Verloop van de krachten en momenten in de koppeling tussen de elementen 25/26, 26/27 en 27/28 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de personenauto tegen de RWS-barrier.



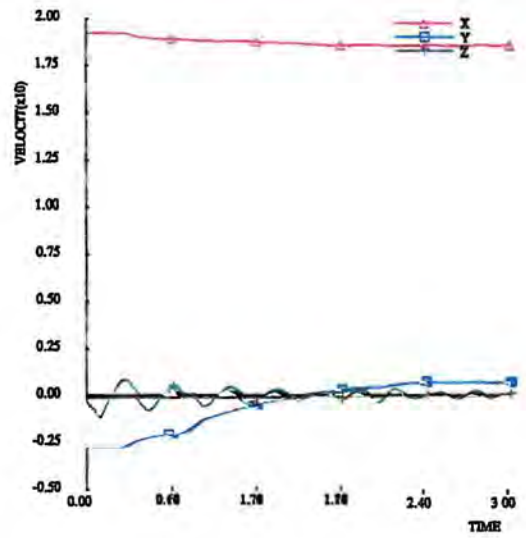
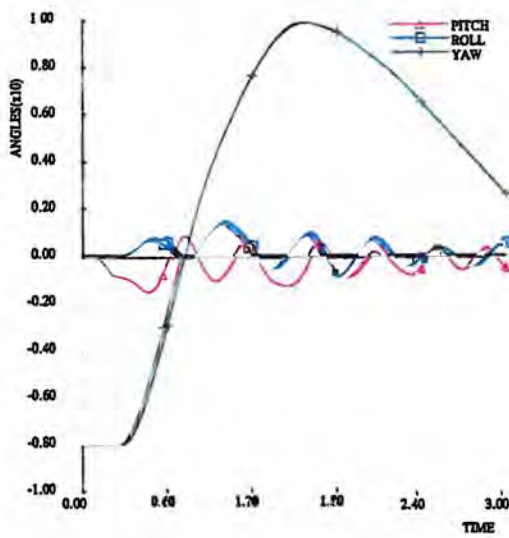
Afbeelding A6. Verloop van de uitbuiging van de elementen 25, 26 en 27 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de personenauto tegen de RWS-barrier.

Simulatie met de 10 tons vrachtauto

- B1. *Overzicht aanrijding met de 10 tons vrachtauto tegen de RWS-barrier.*
- B2. *Verloop van de roll-, pitch- en yawhoek van de 10 tons vrachtauto tegen de tijd tijdens de aanrijding tegen de RWS-barrier.*
- B3. *Verloop van de snelheid tegen de tijd tijdens de aanrijding met de 10 tons vrachtauto tegen de RWS-barrier.*
- B4. *Verloop van de krachten en momenten in de koppeling tussen de elementen 26/27, 27/28 en 28/29 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de 10 tons vrachtauto tegen de RWS-barrier.*
- B5. *Verloop van de uitbuiging van de elementen 27, 28 en 29 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de 10 tons vrachtauto tegen de RWS-barrier.*
- B6. *Verloop van de uitbuiging van het voorste element 10 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de 10 tons vrachtauto tegen de RWS-barrier.*

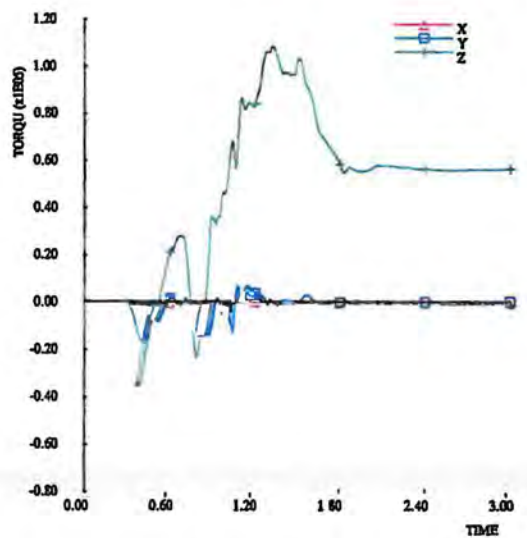
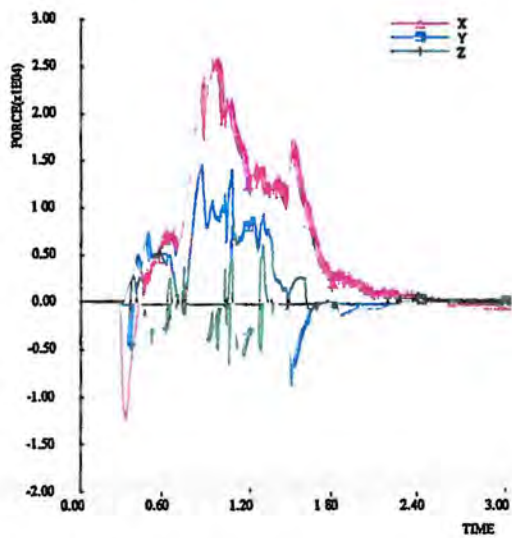
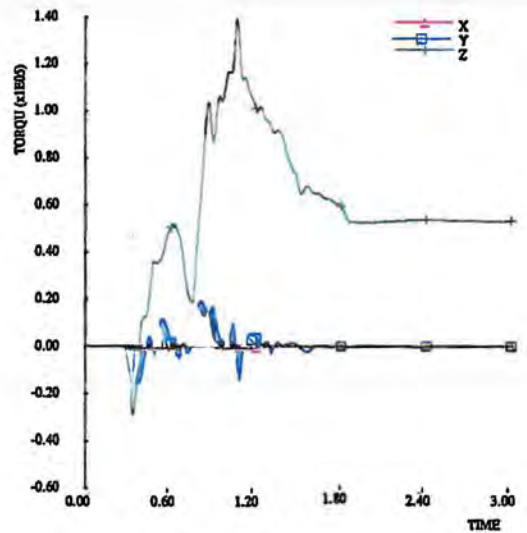
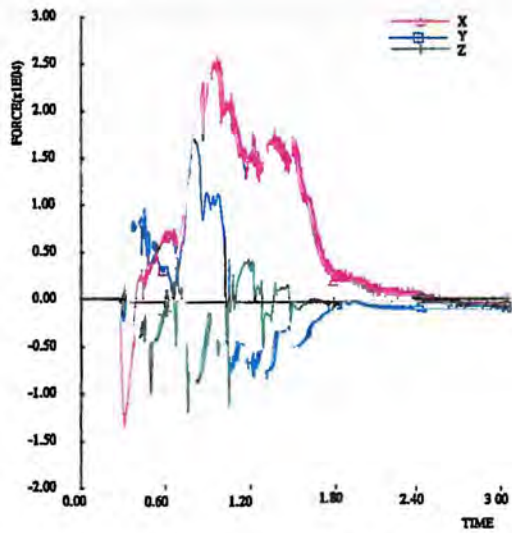
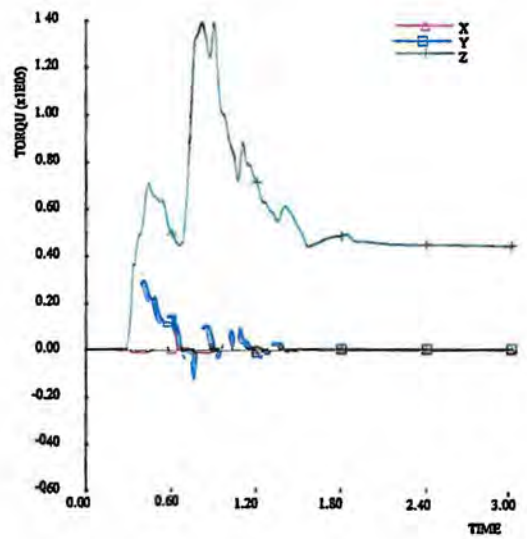
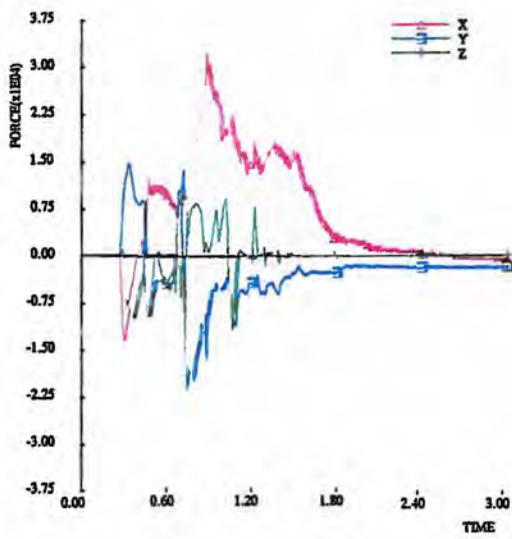


Afbeelding B1. *Overzicht aanrijding met de 10 tons vrachtauto tegen de RWS-barrier.*

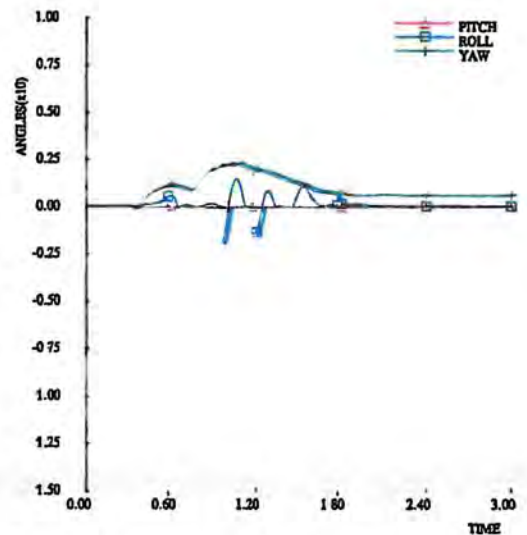
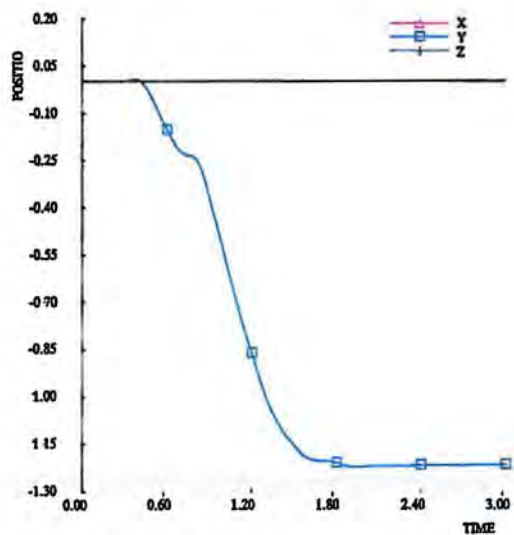
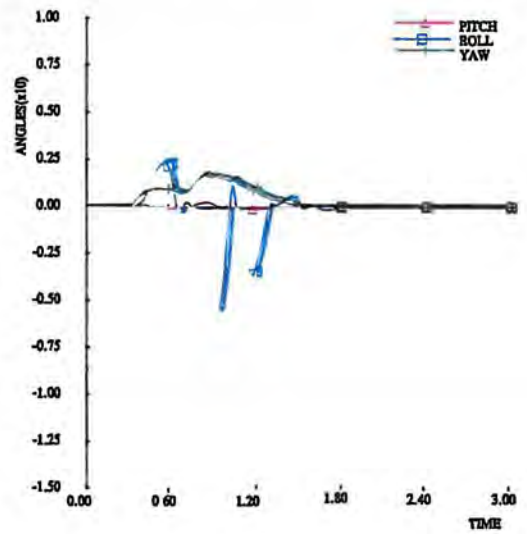
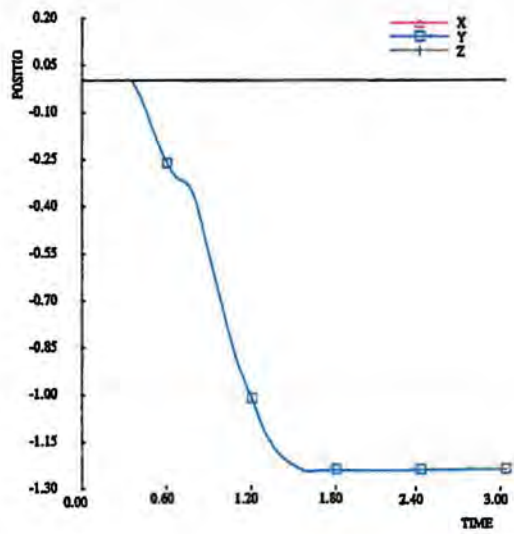
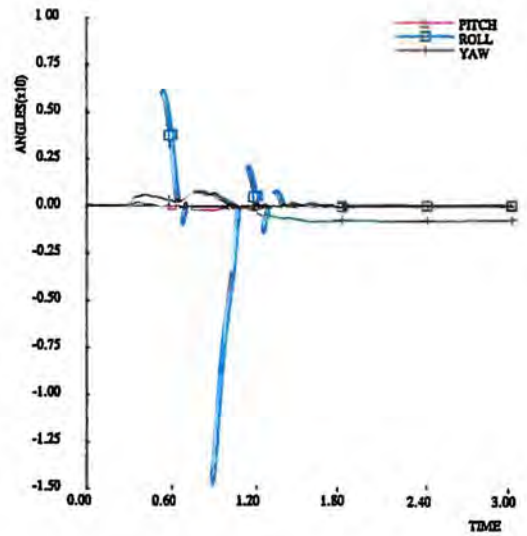
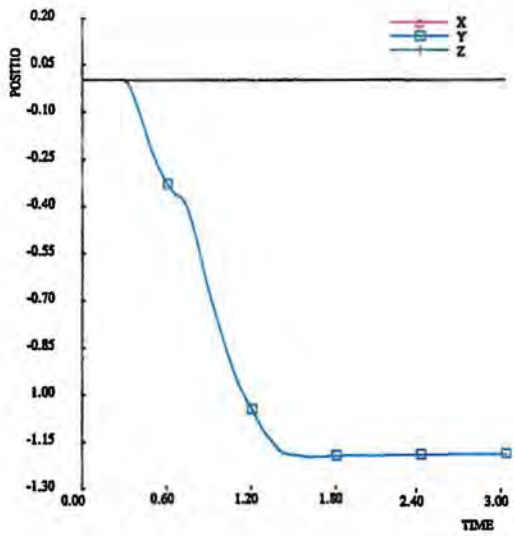


Afbeelding B2. Verloop van de roll-, pitch- en yawhoek van de 10 tons vrachtauto tegen de tijd tijdens de aanrijding tegen de RWS-barrier.

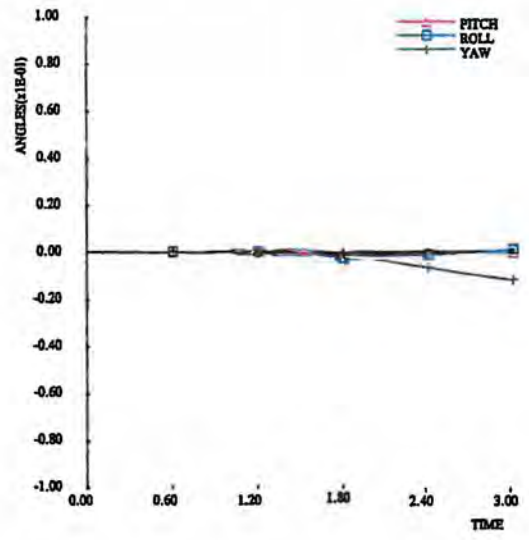
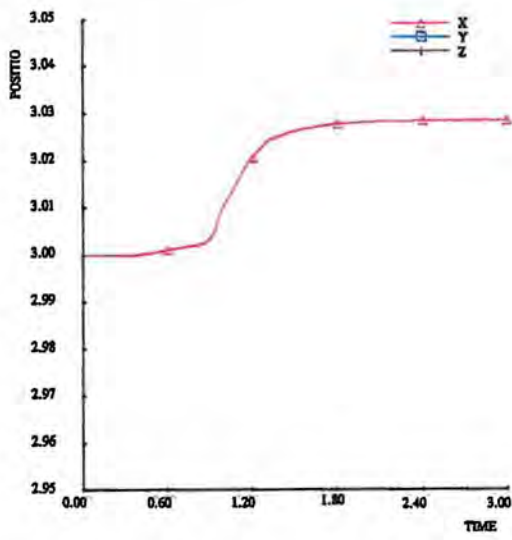
Afbeelding B3. Verloop van de snelheid tegen de tijd tijdens de aanrijding met de 10 tons vrachtauto tegen de RWS-barrier.



Afbeelding B4. Verloop van de krachten en momenten in de koppeling tussen de elementen 26/27, 27/28 en 28/29 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de 10 tons vrachtauto tegen de RWS-barrier.



Afbeelding B5 · Verloop van de uitbuiging van de elementen 27, 28 en 29 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de 10 tons vrachtauto tegen de RWS-barrier.



Afbeelding B6 - Verplaatsing van het eerste element in langsricting en de hoekverdraaiingen van dat element tegen de tijd tijdens de aanrijding met de 10 tons vrachtauto tegen de RWS-barrier.

Bijlage 3

Korte beschrijving van de werking van het computerprogramma VEDYAC

Ir. J. van der Sluis

Leidschendam, 1991

Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV

A. Inleiding

VEDYAC (VEHicle DYnamics And Crash) is een computerprogramma waarmee allerlei dynamica-problemen gesimuleerd kunnen worden; ook botsingen zijn daarbij mogelijk. Het programma is geschreven door V. Giavotto et al. in nauwe samenwerking met de SWOV.

De mogelijkheden die een simulatieprogramma biedt wordt bepaald door het gereedschap dat het programma geeft om fysische objecten te modelleren en de handigheid van de modelontwerper om de geboden gereedschappen optimaal te benutten. In het volgende wordt kort ingegaan op:

- de gereedschappen van VEDYAC;
- het ontwikkelen van een VEDYAC model;
- de manier waarop het programma rekent;
- de mogelijkheden die het programma biedt om resultaten te presenteren;
- de gebruikersinterface.

De bedoeling van dit schrijven is de lezer een globale indruk te geven van VEDYAC - wat ermee mogelijk is en hoe het werkt.

B. De Gereedschappen

De basis-gereedschappen zijn:

- *puntmassa (MASS)*

Met behulp van puntmassa's moeten de traagheidseigenschappen van objecten gemodelleerd worden. De continue massaverdeling van een lichaam moet dus gediscrètiseerd worden. Een star lichaam kan met behulp van één puntmassa gemodelleerd worden. Met een puntmassa worden 7 eigenschappen gedefinieerd, de massa, drie traagheidsmomenten en drie traagheidsprodukten om drie assen van een orthogonaal assenstelsel. De eventueel aanwezige zwaartekracht versnelling grijpt aan op de puntmassa.

- *punten (NODES)*

Een NODE is een geometrisch punt dat star aan een MASS vastzit.

NODES worden gebruikt voor het definiëren van verbindingen tussen de puntmassa's en voor het definiëren van contactlichamen.

In de definitie van een verbinding worden twee nodes genoemd waartussen de verbinding wordt gemaakt (verbindings nodes). Afhankelijk van het type verbinding zijn één of twee nodes nodig om de oriëntatie van de verbinding vast te leggen (referentie nodes).

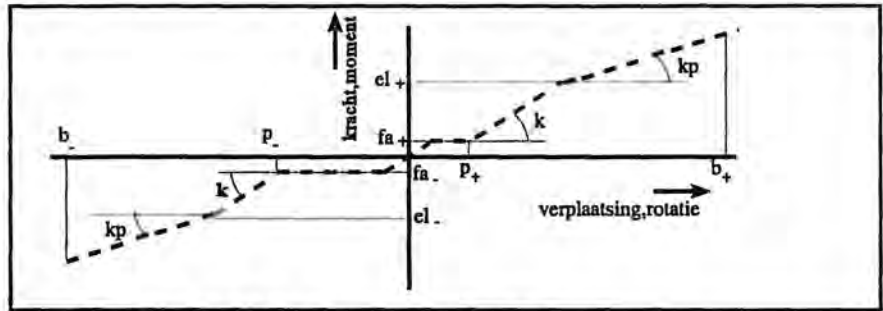
- *verbindingen (DEFORMABLE ELEMENTS)*

Verbindingen worden tussen twee nodes gedefinieerd en beperken de relatieve beweging van deze twee nodes. De relatieve beweging van twee nodes is te beschrijven door drie translaties en drie rotaties respectievelijk langs en rond de assen van een orthogonaal assenstelsel. Er zijn vier types verbindingen:

1. ROD
2. POINT
3. BEAM
4. DUMPER

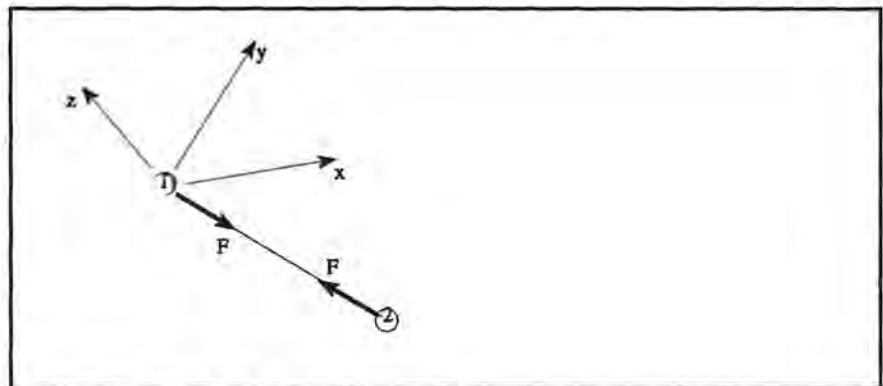
Iedere verbinding legt beperking op aan een aantal componenten van de relatieve beweging van de verbonden NODES. De ROD beperkt de verandering van de onderlinge afstand van de puntmassa's. De POINT verbinding beperkt alle zes de componenten, waarbij de te verbinden NODES op dezelfde plaats mogen liggen. De BEAM verbinding beperkt net als de POINT de beweging van alle zes de componenten van de relatieve beweging van de twee verbonden nodes. Bij een BEAM moeten de verbonden NODES op een afstand van elkaar af liggen.

De tegenwerkende kracht voor een bepaalde bewegingscomponent wordt bepaald door een door de gebruiker gedefinieerd kracht-verplaatsing of moment-rotatie diagram en een dempingscoëfficiënt (c).

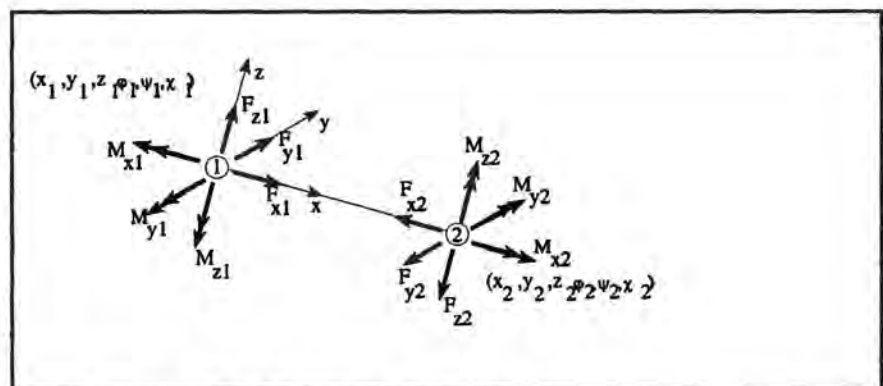


Afbeelding B1. Het kracht-verplaatsingsdiagram.

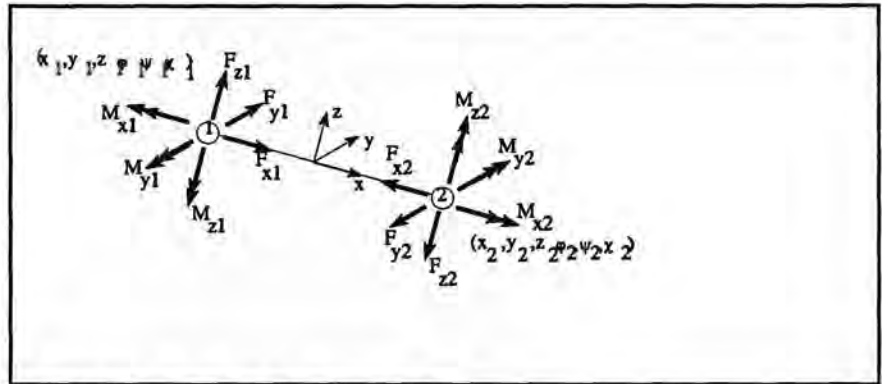
De vorm van een kracht-verplaatsing dan wel moment-rotatie diagram is gegeven in *Afbeelding B1*. De karakteristiek in *Afbeelding B1* wordt beschreven door de stijfheid (k), de speling (p_+, p_-), de spelingsweerstand (f_{a+}, f_{a-}), de plasticiteitsgrens (e_{l+}, e_{l-}), de plastische stijfheid (k_p), en de breek-verplaatsing/-rotatie (b_+, b_-). Voor iedere verbindingcomponent moet er een dergelijke diagram gedefinieerd worden. Daar de parameters van iedere component apart gedefinieerd zijn bestaat de mogelijkheid om anisotrope eigenschappen te beschrijven. In de *Afbeeldingen B2 t/m B4* zijn drie verbindingstypes getekend waarbij de krachten en momenten zijn aangegeven als gevolg van verplaatsingen en rotaties.



Afbeelding B2. De ROD-verbinding.



Afbeelding B3. De POINT-verbinding.



Afbeelding B4. De BEAM-verbinding.

De DUMPER-verbinding is een demper en genereert krachten evenredig aan het snelheidsverschil van de verbonden puntmassa's. De dempingskarakteristiek wordt met behulp van een aantal getalparen gedefinieerd.

- *contactlichamen* (CONTACT ELEMENTS)

Met contactlichamen worden botsingen tussen lichamen mogelijk gemaakt. De contactlichamen worden met behulp van NODES gedefinieerd en zijn dus star aan een MASS verbonden. Er zijn vijf typen contactlichamen:

1. SPHERE
2. CYLINDER
3. PLANE
4. POLYHEDRON
5. REVOLUTION BODY

In *Afbeelding B5* is aangegeven tussen welke contactlichamen contactkrachten worden berekend.

| | SPHERE | CYLINDER | PLANE | POLYHEDRON | REVOLUTION_BODY |
|-----------------|--------|----------|-------|------------|-----------------|
| SPHERE | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| CYLINDER | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| PLANE | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| POLYHEDRON | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| REVOLUTION_BODY | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |

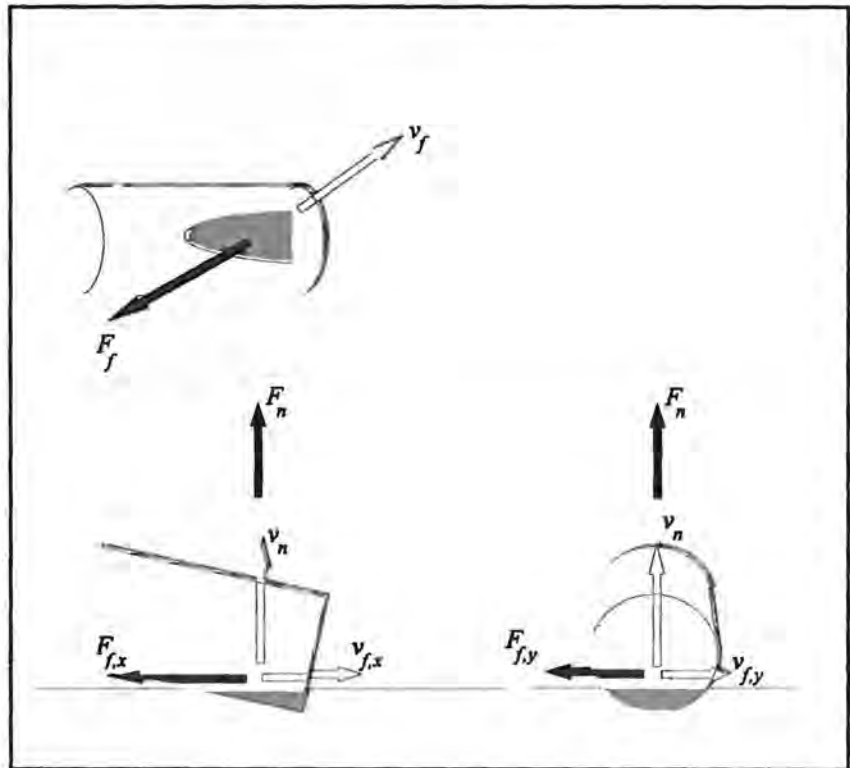
Afbeelding B5. Matrix van mogelijke contacten tussen de verschillende contactlichamen.

In *Afbeelding B5* betekent een 1 dat het programma contact tussen beide contactlichamen kent, een 0 betekent dat het programma geen contacten tussen beide contactlichamen kent. Er worden contactkrachten berekend wanneer het programma een gemeenschappelijk volume of intersectie heeft gevonden tussen twee contactlichamen waartussen contact mogelijk is.

De berekening van de contactkrachten gebeurt op basis van de polytrophe gaswet zoals weergegeven in *Formule 1*.

$$P = P_0 \left[\frac{v_0}{v_0 - v} \right]^c \quad (1)$$

Aan ieder contactlichaam wordt een referentiedruk (p_0) en een referentie volume (v_0) toegekend. Met deze twee parameters wordt een door *Formule 1* beschreven grafiek vastgelegd waarmee de hardheid van het te beschrijven object wordt gemodelleerd. De exponent (c) is een simulatieconstante en is voor ieder contactlichaam gelijk. Wanneer er een intersectie optreedt, dan wordt er op basis van de twee karakteristieken van de beide contactlichamen een resulterende karakteristiek bepaald. Met het volume van de intersectie wordt uit de resulterende kromme een contactdruk bepaald. De contactdruk wordt vermenigvuldigd met het doorsnijdingsoppervlak (A_n) hetgeen resulteert in de contactkracht (F_n).



Afbeelding B6. Contact tussen een PLANE en een CYLINDER.

In *Afbeelding B6* is ter illustratie het contact weergegeven tussen een PLANE en een CYLINDER. Naast de contactkracht worden er nog een wrijvingskracht (F_f) berekend. De grootte van de krachten worden berekend volgens de *Formules 2* en *3* en de richting is aangegeven in *Afbeelding B6*.

$$F_n = A_n P_c \left[1 + \tanh \left[\frac{v_n}{v_{n0}} \right] \right] \quad (2)$$

$$F_f = \mu_1 \mu_2 F_n \tanh \left[\frac{v_t}{v_{lim}} \right] \quad (3)$$

- *wielen* (WHEELS)

De wielen zijn bijzondere CYLINDERS waaraan niet alleen contact-eigenschappen worden toegekend maar ook traagheidseigenschappen. Bovendien worden er dwarskrachten berekend.

C. Het rekenen

VEDYAC kent een heel eenvoudig rekenschema. Bij het begin van een rekenstap zijn positie en snelheid en alle krachten die op de puntmassa's werken bekend. Voor iedere puntmassa wordt met de krachtvector en de traagheidsvector met behulp van de impulswet de versnellingsvector bepaald. De versnellingsvectoren worden vervolgens geïntegreerd over één tijdstap hetgeen de snelheidsvector van iedere puntmassa oplevert. De positie van de puntmassa's volgt uit integratie van de snelheidsvector.

Op grond van deze nieuwe toestand worden de verbindingsskrachten en de contactkrachten opnieuw bepaald. Alle krachten en momenten die op een verschillende plaatsen aangrijpen worden samengesteld tot drie krachten en drie momenten die werken op de bijbehorende puntmassa. Daarna kan een nieuwe tijdstap beginnen.

In VEDYAC wordt een expliciete integratie methode gebruikt. Bij expliciete integratie is de keus van de tijdstapgrootte waarmee gesimuleerd zeer belangrijk. De numerieke stabiliteit bij expliciete integratie wordt hierdoor bepaald. Een vuistregel is dat de tijdstap tien maal kleiner moet zijn dan de trillingstijd van grootste eigenfrequentie die er in het model voorkomt. Bij VEDYAC kunnen er niet alleen numerieke problemen ontstaan vanwege de hoge eigenfrequenties waardoor er een zeer kleine tijdstap nodig is, maar ook doordat er plotseling zeer hoge contactkrachten kunnen optreden. Te grote sprongen in de contactkrachten worden door VEDYAC voorkomen door een kleinere tijdstap te kiezen wanneer één van de berekende versnellingscomponenten een bepaalde waarde overschrijdt. De kleinst mogelijke tijdstap en het criterium waarbij een kleinere tijdstap genomen wordt, worden bepaald door de gebruiker.

D. De presentatie van de resultaten

De uitkomsten van een simulatie kunnen op een aantal manieren door het programma uitgevoerd worden:

- *numeriek*

Van ieder puntmassa kunnen de krachten, positie, snelheid en de versnelling als functie van de tijd in tabellen opgevraagd worden. Zo ook de krachten die optreden in verbindingselementen en contactlichamen.

- *animatie en plots*

Ieder systeem waarin contactlichamen zijn opgenomen of waaraan grafische data is gekoppeld kan getekend worden op ieder berekend tijdstip.

Het programma biedt de gebruiker de mogelijkheid om de gesimuleerde 'scène' te beschouwen doormiddel van een camera. De instelling en de positie van de camera worden door de gebruiker bepaald. Dit geeft de mogelijkheid om naast de numerieke uitvoer de simulatie-resultaten met behulp van plaatjes te interpreteren. Men kan de resultaten ook animeren door een aantal opnames, op opeenvolgende tijdstippen opgenomen, snel achterelkaar te presenteren op een beeldscherm.

- *grafieken*

Alle gegevens die in tabelvorm beschikbaar zijn kunnen ook in de vorm van grafieken gepresenteerd worden.

Ook is het mogelijk een ASI-evaluatie te laten uitvoeren op vooraf in het model gedefinieerde punten. De ASI-waarden worden als functie van de tijd in een grafiek gepresenteerd.

E. De gebruikersinterface

Het computerprogramma VEDYAC is opgedeeld in een aantal deelprogramma's. Ieder deelprogramma heeft een specifieke functie. Er is een deelprogramma voor data-invoer en het bouwen van de matrices, voor het rekenen, voor het creëren van numerieke uitvoer, voor het creëren van grafieken en voor het maken van plots en animaties.

Ieder deelprogramma presenteert zich aan de gebruiker met behulp van een menu.

F. Het modelleren met VEDYAC

Met het aangeven van de mogelijkheden van VEDYAC heeft men nog niet een model waarmee gesimuleerd kan worden. Het ontwikkelen van een model waarmee door VEDYAC een betrouwbaar beeld van de werkelijkheid berekend kan worden is vaak een tijdrovende aangelegenheid. De SWOV beschikt echter over een grote bibliotheek van voertuigmodellen, waardoor de ontwikkeltijd aanzienlijk bekort wordt.

Bij het ontwikkelen van modellen komen de volgende zaken aan de orde:

- *discretiseren*

Grote continue lichamen moeten in stukken opgedeeld worden. Aan ieder stuk, ook wel als element aangeduid, worden vervolgens traagheidseigenschappen toegekend doormiddel van één massapunt. In de praktijk zal één element overeenkomen met één systeem in een VEDYAC-model. De stijfheidseigenschappen van het continue lichaam worden gemodelleerd door verbindingen tussen de elementen aan te brengen. De vragen die zich hierbij voordoen zijn:

In hoeveel stukken moet het continue lichaam opgedeeld worden?

Hoeveel nodes en waar moeten ze gepositioneerd worden?

Welk type verbinding verdient de voorkeur?

- *contactparameters*

Er is geen eenduidige relatie tussen de parameters waaruit VEDYAC de contactkrachten berekend en de parameters waarmee in de mechanica botsingen worden beschreven.

- *rekening*

De rekening voor een simulatie is afhankelijk van een aantal factoren.

De belangrijkste zijn de snelheid van de computer, het aantal massapunten in het model, de hoeveelheid contacten die mogelijk zijn en de rekenstap waarmee gerekend kan worden.

Het is gebleken dat ervaring en creativiteit vereist zijn voor de ontwikkeling van VEDYAC-modellen. Dit is niet alleen van toepassing op VEDYAC maar geldt voor ieder simulatie-programma en 'eindig elementen'-programma. De SWOV heeft tientallen jaren ervaring in het simuleren van botsingen met behulp van VEDYAC. Dit heeft geleid tot resultaten die de vergelijking met experimentele simulaties goed kunnen doorstaan.