

## De halve STEP-barrier toegepast op gerenoveerde viaducten

*Een simulatie onderzoek naar het gedrag van de halve STEP-barrier tijdens een aanrijding met een lichte personenauto (TB 11) en een bus (TB 51)*

R-97-5

Ing. W H M . van de Pol

Leidschendam, 1997

Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV

## Documentbeschrijving

|                         |   |
|-------------------------|---|
| Rapportnummer:          | R-97-5  |
| Titel:                  | Halve STEP-barrier toegepast op gerenoveerde viaducten  |
| Ondertitel:             | Een simulatie-onderzoek naar het gedrag van de halve STEP-barrier tijdens een aanrijding met een lichte personenauto (TB 11) en een bus (TB 51)   |
| Auteur(s):              | Ing. W.H.M. van de Pol  |
| Plv. onderzoeksmanager: | Ir. L.T.B. van Kampen   |
| Projectnummer SWOV:     | 55.416  |
| 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.   |
| Trefwoord(en):          | Safety fence, steel, design (overall design), simulation, program (computer), safety, deformation, lorry, car, Netherlands.   |
| Projectinhoud:          | Dit rapport doet verslag van vier simulaties op de halve stalen STEP-barrier met stijlfstanden van 2.000 mm en 1.333 mm. Deze proef werd uitgevoerd met een lichte personenauto (TB 11) en een bus (TB 51). |
| Aantal pagina's:        | 18 pp. + 108 pp.  |
| Prijs:                  | f 90,-  |
| Uitgave:                | SWOV, Leidschendam, 1997  |

Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV  
Postbus 170  
2260 AD Leidschendam  
Telefoon 070-3209323  
Telefax 070-3201261

## Samenvatting

In opdracht van de Bouwdienst van Rijkswaterstaat te Apeldoorn zijn simulaties uitgevoerd om de werking van de zogenaamde halve stalen STEP-barrier te kunnen beoordelen.

De halve stalen STEP-barrier moet voldoen aan het H2-niveau uit de NEN-EN 1317-1 en NEN-EN 1317-2 norm. Deze norm houdt een proef met een lichte personenauto (TB 11) en een proef met een bus (TB 51) in. De TB-11-test is een test met een lichte personenauto met een massa van 900 kg, een snelheid van 100 km/uur en een inrijhoek van 20 graden. De TB-51-test is een test met een bus met een massa van 13.000 kg, een snelheid van 70 km/uur en een inrijhoek van 20 graden.

Dit rapport doet verslag van vier uitgevoerde simulaties op de halve stalen STEP-barrier met stijlafstanden van 2.000 mm en 1.333 mm.

De simulaties laten een bevredigend verloop zien. De simulaties met de lichte personenauto verlopen redelijk. De uitrijhoeken blijven binnen de toegestane waarden: 3 graden. De ASI-waarden liggen net boven het niveau B, namelijk: 1,44 tegen 1,4.

De simulaties met de bus verlopen goed. De uitrijhoeken blijven klein: maximaal 1 graad. De barriers worden niet doorbroken, maar zijn goed in staat de aanrijdingen te doorstaan.

De halve stalen STEP-barrier, met stijlen van HEB 100-profiel en stijlafstanden van 2.000 mm en 1.333 mm, voldoen aan het 'higher containment level' H2.

Om dit resultaat te kunnen bereiken, wordt geadviseerd de schoren op dezelfde plaats te monteren als de stijlen.

## Summary

### **Use of the half steel STEP barrier on renovated viaducts**

At the request of the Construction Service of the Department of Public Works in Apeldoorn, simulations were carried out to evaluate the functioning of the half STEP barrier made of steel.

The half steel STEP barrier must satisfy the H2 level in the NEN-EN 1317-1 and NEN-EN 1317-2 standard. This standard requires a test involving a light passenger car (TB 11) and a test involving a bus (TB 51). The TB 11 test employs a 900 kg passenger car with a speed of 100 km/hour and a collision angle of 20 degrees. The TB 51 test uses a 13,000 kg bus with a speed of 70 km/hour and a collision angle of 20 degrees.

This report describes four simulations carried out on the half steel STEP barrier with 2,000 mm and 1,333 mm spacings between the uprights.

The simulations yielded satisfactory results. The tests using a light passenger car were acceptable. The exit angles remained within the permitted values: 3 degrees. The ASI values were slightly above level B i.e. 1.44 as against 1.4.

The simulations with the bus were highly satisfactory. The exit angles remained small: a maximum of 1 degree. The barriers remained intact, and stood up to the collisions well.

The half steel STEP barrier, with HEB 100 profile uprights and 2,000 mm and 1,333 mm spacings in between, consequently satisfy the 'higher containment level' H2.

To achieve this result, it is recommended that the struts are mounted in the same place as the uprights.

# Inhoud

|      |  |    |
|------|--|----|
| 1.   | <i>Inleiding</i>                             | 6  |
| 2.   | <i>Criteria</i>                              | 7  |
| 3.   | <i>Probleemstelling</i>                      | 8  |
| 4.   | <i>Opzet en uitvoering van het onderzoek</i> | 9  |
| 5.   | <i>De halve stalen STEP-barrier</i>          | 10 |
| 5.1. | Werking halve stalen STEP-barrier            | 10 |
| 5.2. | Modellering halve stalen STEP-barrier        | 10 |
| 5.3. | Modellering boutverbindingen elementen       | 11 |
| 6.   | <i>Resultaten simulaties</i>                 | 12 |
| 6.1. | Simulatie met de lichte personenauto         | 12 |
| 6.2. | Simulatie met de bus                         | 13 |
| 7.   | <i>Bespreking resultaten</i>                 | 15 |
| 8.   | <i>Conclusies en aanbevelingen</i>           | 16 |
|      | <i>Literatuur</i>                            | 17 |
|      | <i>Bijlage 1 t/m 4</i>                       | 19 |

## 1. Inleiding

Bij de renovaties van kunstwerken blijkt in toenemende mate dat het niet altijd mogelijk dan wel wenselijk is om de geleiderail te herplaatsen. Vaak is ruimtegebrek hier de oorzaak van; er moet dan ook naar andere oplossingen worden gezocht. Eén van de oplossingen is het toepassen van een halve stalen STEP-barrier met HEB 100 stijlen.

De Bouwdienst Rijkswaterstaat (DIW) te Apeldoorn heeft de SWOV opdracht gegeven een aantal simulaties met deze halve stalen STEP-barrier uit te voeren. De halve stalen STEP-barrier moet voldoen aan het H2-niveau uit de NEN-EN 1317-1 en NEN-EN 1317-2 norm. Deze norm houdt een proef met een lichte personenauto (TB 11) en een proef met een bus (TB 51) in.

## 2. Criteria

De eisen die in het algemeen aan afschermvoorzieningen worden gesteld gelden ook voor de halve stalen STEP-barrier.

Deze eisen zijn:

1. Het botsende voertuig mag niet door de constructie breken, er overheen rijden of kantelen, dan wel eronderdoor schieten.
2. Letsel bij inzittenden, schade aan de constructie en schade aan het voertuig moeten zo beperkt mogelijk blijven.
3. Het voertuig mag niet door de constructie in de eigen verkeersstroom worden teruggekaatst.
4. De constructie moet na een aanrijding zijn werking zo veel mogelijk blijven behouden.
5. De begin- en eindverankering mogen niet bezwijken.

Behalve op deze algemene eisen wordt bij de beoordeling van de constructie ook gelet op de voertuigbewegingen, te weten: roll, pitch en yaw, en het loskomen van de weg.

Voorts wordt nog gekeken naar de voertuigvertragingen, die in de ASI-waarde worden vertaald. In de voorlopige CEN-voorstellen<sup>1</sup> (CEN, 1994a; 1994b) worden twee ASI-waarden gegeven:

- niveau A:  $ASI \leq 1$
- niveau B:  $ASI \leq 1,4$ .

Deze waarden gelden voor het zwaartepunt van het voertuig.

De veronderstelling hierbij is, dat indien de vertragingen beneden niveau A blijven, er geen ernstig letsel van inzittenden zou hoeven optreden.

Voor stijve respectievelijk starre constructies wordt niveau B ook nog acceptabel geacht.

De ASI-waarden worden alleen voor de personenauto's bepaald.

De halve stalen STEP-barrier moet voldoen aan het H2-niveau uit de NEN-EN 1317-1 en NEN-EN 1317-2 norm.

<sup>1</sup> 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.

### 3. Probleemstelling

Het Comité Européen de Normalisation (CEN) stelt voor Europa normen op waaraan afschermvoorzieningen moeten voldoen; ook wordt bepaald onder welke inrijcondities de proeven op deze afschermvoorzieningen moeten worden uitgevoerd.

De stalen STEP-barrier, waarbij elk element aan het wegdek is verankerd, is met goed gevolg getest op H2-niveau (Quincy, 1996a; 1996b; 1996c).

De halve stalen STEP-barrier met HEB 100 stijlen is nog niet op H2-niveau getest. De constructieve verschillen tussen de stalen STEP-barriers en de halve stalen STEP-barrier zijn zo groot, dat niet zonder meer aangenomen kan worden dat de halve stalen STEP-barrier zich net zo gedraagt als een hele stalen STEP-barrier. Behalve deze constructieve verschillen, loopt ook de wijze van verankeren van beide typen stalen STEP-barriers nogal sterk uiteen. De halve stalen STEP-barrier wordt meestal op een hoge schampkant van vijftien tot twintig centimeter geplaatst. De hele stalen STEP-barrier wordt op het wegdek gemonteerd.

Een halve stalen STEP-barrier kan als alternatief voor een geleiderailconstructie worden geplaatst. De stijlen hebben een HEB 100 profiel en de stijlafstand kan 1.333 mm of 2.000 mm h.o.h. zijn.

De simulaties worden uitgevoerd om meer inzicht te krijgen in het gedrag van de halve stalen STEP-barrier met HEB 100 stijlen, wanneer deze barrier wordt aangereden.



#### 4. Opzet en uitvoering van het onderzoek

Voorgesteld wordt om de simulaties met VEDYAC als volgt uit te voeren. Er wordt gebruik gemaakt van de bestaande datasets van de lichte personenauto (TB11) en de bus (TB51).

Van de halve stalen STEP-barrier met HEB 100 stijlen worden twee modellen gemaakt: één met een stijlafstand van 1.333 mm en één met een stijlafstand van 2.000 mm. De schampkant heeft een hoogte van 150 mm. De keuze van de hoogte van de schampkant wordt mede bepaald door het feit dat de stijllengte groter is dan bij een schampkanthoogte van 200 mm. De belasting op de verankering is groter door de langere momentarm. In *Tabel 1* wordt een overzicht van de vier simulaties gegeven, die uitgevoerd zullen worden. Deze vier simulaties zijn nodig om de twee varianten van de halve stalen STEP-barrier op H2-niveau te kunnen beoordelen.

*Afbeelding 3* geeft een overzicht van de simulatie-opstelling van de halve stalen STEP-barrier met een stijlafstand van 2000 mm.

| Barrier                             | Simulatie | Inrijconditie |       |        | Botsenergie |
|-------------------------------------|-----------|---------------|-------|--------|-------------|
|                                     |           | [kmpu]        | [grd] | [kg]   | [kNm]       |
| halve STEP<br>stijlafstand 1.333 mm | TB 11     | 100           | 20    | 900    | 41          |
| halve STEP<br>stijlafstand 1.333 mm | TB 51     | 70            | 20    | 13 000 | 287         |
| halve STEP<br>stijlafstand 2.000 mm | TB 11     | 100           | 20    | 900    | 41          |
| halve STEP<br>stijlafstand 2 000 mm | TB 51     | 70            | 20    | 13.000 | 287         |

*Tabel 1. Overzicht van de vier simulaties die worden uitgevoerd op de halve stalen STEP-barrier.*

## 5. De halve stalen STEP-barrier

De halve stalen STEP-barrier is een ontwikkeling uit de hele stalen STEP-barrier, met als doel deze op viaducten toe te passen. Bij renovatie van viaducten komt het steeds vaker voor dat het herplaatsen van de geleiderail-constructies wegens ruimtegebrek niet meer mogelijk is. De halve stalen STEP-barrier is smaller en naar verwachting ook beter in staat om zware aanrijdingen met goed gevolg te doorstaan.

De halve stalen STEP-barrier wordt op de oude verankeringsplaatsen vast gemaakt. Dit betekent dat de stijlafstand 2.000 mm of 1.333 mm moet zijn.

De stijl van de halve stalen STEP-barrier heeft het HEB 100 profiel.

De sterkte van deze stijl komt overeen met de sterkte van de oude stijl, de zogenaamde Plooyerstijl (zie *Afbeelding 1* en *2*).

### 5.1. Werking halve stalen STEP-barrier

Tijdens de aanrijding worden de botskrachten via het halve STEP-profiel en de stijlen op de schampkant van het viaduct overgebracht. Ook de onderkant van het halve STEP-profiel zal, door het afsteunen tegen de schampkant, een deel van de botskrachten op de schampkant overbrengen. Het halve STEP-profiel is aan de bovenkant van de stijl aan de stijl zelf gekoppeld door vier bouten M16 4.6. Deze boutverbinding en de top van het halve STEP-profiel worden tijdens de aanrijding het zwaarst belast. Plastische vervorming en uitscheuren van deze punten (*Afbeelding 2* plaatsen A) lijkt zeer waarschijnlijk.

Een geheel ander belastingsgeval ontstaat wanneer de verstevigingsschoren op dezelfde plaats zijn aangebracht als de stijlen. Tijdens een aanrijding zullen deze schoren, na een kleine vervorming van het halve STEP-profiel, tegen de stijlen gaan afsteunen. Een groot deel van de botskrachten wordt via deze schoren op de stijlen overgebracht. De boutverbinding wordt hierdoor sterk ontlast. Ook de top van het halve STEP-profiel zal minder vervormen. De rest van de botskrachten wordt via de onderkant van het halve STEP-profiel op de schampkant overgebracht (*Afbeelding 3*).

Een groot voordeel van deze benadering van het verloop van de aanrijding is een betrekkelijk eenvoudig botsmodel. De botskrachten worden via de vier (of drie) stijlen op de schampkant overgebracht en via de onderkant van het halve STEP-profiel op de schampkant. Het element zelf blijft één geheel, zonder onderverdeling in verschillende massa's en bout-verbindingen.

### 5.2. Modelleren halve stalen STEP-barrier

Bij de 'vertaling' van de halve stalen STEP-barrier in het simulatie-model worden de volgende aannamen gedaan:

- gezien de vormgeving/werking van de barrier, treedt er geen breuk op door krachten in de y- en z-richting in de elementverbinding;
- gezien de vormgeving/werking van de barrier, treedt er geen breuk op door momenten om de y-as in de elementverbinding;
- gezien de vormgeving en de lage torsiestijfheid van de barrier om de x-as, treedt er geen breuk op om de x-as in de elementverbinding;
- breuk van de stijl treedt alleen op in x- en y-richting;
- breuk van de stijl om de z-as treedt niet op.

### 5.3. Modelling boutverbindingen elementen

De boutverbinding tussen de elementen is als volgt gesimuleerd: de krachten en momenten worden in één punt (zwaartepunthoogte) geconcentreerd. Deze punten worden in het verslag verder als POINT-verbinding aangeduid.

De voet van de stijl is zodanig geconstrueerd, dat het bezwijken van de stijl daar plaatsvindt en niet in de boutverbindingen van de voetplaat aan de schampkant. Ook dit punt wordt verder in het verslag als een POINT-verbinding aangeduid. In *Bijlage 3* wordt nader uitleg gegeven over de POINT-verbinding.

In *Bijlage 4* (Modelling modelcomponenten van de halve stalen STEP-barrier) wordt nader ingegaan op de uitwerking en details van het voor de simulaties ontwikkelde specifieke model van de barrier.

## 6. Resultaten simulaties

De simulaties zijn uitgevoerd met een lichte personenauto (TB 11) en een bus (TB 51). In onderstaande tabel zijn tevens de inrijcondities gegeven.

| Voertuig | Inrijnsnelheid | Inrijhoek | Massa | Botsenergie |
|----------|----------------|-----------|-------|-------------|
|          | [km/uur]       | [grd]     | [kg]  | [kNm]       |
| TB 11    | 100            | 20        | 900   | 41          |
| TB 51    | 70             | 20        | 13000 | 287         |

Tabel 2. *Inrijcondities bij de simulatie met een lichte personenauto (TB 11) en een bus (TB 51).*

De halve stalen STEP-barrier met HEB 100 stijen staat op een schampkant van vijftien centimeter hoog. Er zijn twee varianten van de halve stalen STEP-barrier gesimuleerd: één met een stijlafstand van 2.000 mm en één met een stijlafstand van 1.333 mm. De twee simulaties met de personenauto worden respectievelijk A en C genoemd; voor de bus is dit B en D. De simulatie-opstelling is weergegeven in *Afbeelding 3*.

### 6.1. Simulatie met de lichte personenauto

#### *Halve stalen STEP-barrier met stijlafstand 2.000 mm (simulatie A)*

De lichte personenauto wordt in korte tijd omgeleid; na ongeveer 0,1 seconde is het voertuig evenwijdig aan de constructie en na ongeveer 0,25 seconde verlaat het voertuig de constructie weer. Tijdens de aanrijding worden drie elementen in meer of mindere mate verplaatst. De uitbuiging is op de afbeelding niet waar te nemen, maar heeft een vloeiend verloop (*Afbeelding A1*). De golflengte van de uitbuiging bedraagt 18 meter. De dynamische uitbuiging bedraagt ongeveer 0,9 cm, de statische uitbuiging bedraagt ongeveer 0,3 cm (*Afbeelding A9*).

In *Afbeelding A2* is te zien dat de rolbeweging van de lichte personenauto tot circa 38 graden opboust, voordat deze weer kleiner wordt. De uitrijhoek van de lichte personenauto bedraagt ongeveer 3 graden en wordt groter. Het snelheidsverschil voor en na de aanrijding bedraagt circa 18 km/uur (*Afbeelding A3*).

Tijdens de primaire aanrijding treedt de grootste vertraging op. Deze bedraagt ongeveer 17 G in het zwaartepunt van de lichte personenauto; dit veroorzaakt een botskracht van ongeveer 127 kN (*Afbeelding A4 en A5*). De ASI-waarde voor het zwaartepunt van de lichte personenauto bedraagt 1,44 (*Afbeelding A6*) hetgeen betekent dat de ASI-waarde net niet voldoet aan niveau B: ASI = 1,4.

De koppelingen in de botszone tussen de elementen worden niet tot hun maximum belast. Uit *Afbeelding A7* blijkt dat bij de koppelingen in de botszone de speling enigszins wordt aangesproken. Ook de koppelingen van de stijen met de schampkant worden niet tot hun maximale waarden belast.

Uit *Afbeelding A8* blijkt dat bij de stijlen in de botszone de speling enigszins wordt aangesproken.

*Halve stalen STEP-barrier met stijlafstand 1.333 mm. (simulatie C)*

De lichte personenauto wordt in korte tijd omgeleid; na ongeveer 0,1 seconde is het voertuig evenwijdig aan de constructie en na ongeveer 0,25 seconde verlaat het voertuig de constructie weer. Tijdens de aanrijding worden drie elementen in meer of mindere mate verplaatst. De uitbuiging is op de afbeelding niet waar te nemen, maar heeft een vloeiend verloop (*Afbeelding C1*). De golflengte van de uitbuiging bedraagt 16 meter. De dynamische uitbuiging bedraagt ongeveer 0,6 cm, de statische uitbuiging bedraagt ongeveer 0,3 cm (*Afbeelding C9*).

In *Afbeelding C2* is te zien dat de rolbeweging van de lichte personenauto tot circa 37 graden oploopt, voordat deze weer kleiner wordt. De uitrijhoek van de lichte personenauto bedraagt ongeveer drie graden en wordt iets groter.

Het snelheidsverschil voor en na de aanrijding bedraagt circa 16 km/uur (*Afbeelding C3*).

Tijdens de primaire aanrijding treedt de grootste vertraging op. Deze bedraagt ongeveer 17 G in het zwaartepunt van de lichte personenauto; dit veroorzaakt een botskracht van ongeveer 128 kN (*Afbeelding C4 en C5*). De ASI-waarde voor het zwaartepunt van de lichte personenauto bedraagt 1,44 (*Afbeelding C6*), hetgeen betekent dat de ASI-waarde net niet voldoet aan niveau B: ASI = 1,4.

De koppelingen in de botszone tussen de elementen worden niet tot hun maximum belast. Uit *Afbeelding C7* blijkt dat bij de koppelingen in de botszone de speling enigszins wordt aangesproken. Ook de koppelingen van de stijlen met de schampkant worden niet tot hun maximale waarden belast. Uit *Afbeelding C8* blijkt dat bij de stijlen in de botszone de speling enigszins wordt aangesproken.

## 6.2 Simulatie met de bus

*Halve stalen STEP-barrier met stijlafstand 2000 mm. (simulatie B)*

De bus wordt in korte tijd omgeleid. Na ongeveer 0,4 seconde is de bus tot evenwijdig aan de barrier en na ongeveer 0,6 seconde verlaat de bus de barrier, maar volledig los komt de bus niet van de barrier. Tijdens de aanrijding worden drie elementen in meer of mindere mate verplaatst. De uitbuiging is op de afbeelding niet waar te nemen maar heeft een vloeiend verloop (*Afbeelding B1*). De golflengte van de uitbuiging bedraagt 18 meter. De dynamische uitbuiging bedraagt ongeveer 6 cm; de statische uitbuiging bedraagt ongeveer 1 cm.

Het 'rear end' -effect (de achterkant van de bus komt in aanraking met de constructie) heeft invloed op de grootte van de uitbuiging. De uitbuiging wordt van circa 3 cm naar 6 cm vergroot.

Uit *Afbeelding B2* blijkt dat de rolbeweging van de bus bij de primaire botsing klein blijft, ongeveer 2,5 graden. Na het 'rear end' -effect wordt de rolbeweging veel groter namelijk 12 graden. De uitrijhoek van de bus bedraagt ongeveer 3 graden en wordt kleiner.

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

Tijdens het 'rear end'-effect treedt de grootste vertraging op. Deze bedraagt ongeveer 7,9 G in het zwaartepunt van de bus; dit veroorzaakt een botskracht van ongeveer 860 kN (*Afbeelding B4 en B5*).

De koppelingen in de botszone tussen de elementen worden niet tot hun maximum belast. Uit *Afbeelding B6* blijkt dat bij de koppelingen in de botszone de speling enigszins wordt aangesproken. Ook de koppelingen van de stijlen met de schampkant worden niet tot hun maximale waarden belast. Uit *Afbeelding B7* blijkt dat bij de stijlen in de botszone speling enigszins wordt aangesproken.

*Halve stalen STEP-barrier met stijlafstand 1.333 mm. (simulatie D)*

De bus wordt in korte tijd omgeleid. Na ongeveer 0,4 seconde is de bus tot evenwijdig aan de barrier en na ongeveer 0,6 seconde verlaat de bus de barrier; de bus komt echter niet volledig los van de barrier. Tijdens de aanrijding worden drie elementen in meer of mindere mate verplaatst. De uitbuiging is op de afbeelding niet waar te nemen, maar heeft een vloeiend verloop (*Afbeelding D1*). De golflengte van de uitbuiging bedraagt 16 meter. De dynamische uitbuiging bedraagt ongeveer 4 cm; de statische uitbuiging bedraagt ongeveer 0,5 cm (*Afbeelding D9*).

Het 'rear end'-effect (de achterkant van de bus komt in aanraking met de constructie) heeft invloed op de grootte van de uitbuiging. De uitbuiging wordt van circa 2,5 cm naar 4 cm vergroot.

Uit *Afbeelding D2* blijkt dat de rolbeweging van de bus bij de primaire botsing klein blijft, ongeveer 2,5 graden. Na het 'rear end'-effect wordt de rolbeweging veel groter, namelijk 12 graden. De uitrijhoek van de bus bedraagt ongeveer 3 graden en wordt kleiner.

Het snelheidsverschil voor en na de aanrijding bedraagt ongeveer 10 km/uur (*Afbeelding D3*).

Tijdens het 'rear end'-effect treedt de grootste vertraging op. Deze bedraagt ongeveer 8,4 G in het zwaartepunt van de bus; dit veroorzaakt een botskracht van ongeveer 924 kN (*Afbeelding D4 en D5*).

De koppelingen in de botszone tussen de elementen worden niet tot hun maximum belast. Uit *Afbeelding D6* blijkt dat bij de koppelingen in de botszone de speling enigszins wordt aangesproken. Ook de koppelingen van de stijlen met de schampkant worden niet tot hun maximale waarden belast. Uit *Afbeelding D7* blijkt dat bij de stijlen in de botszone speling enigszins wordt aangesproken.

## 7. Bespreking resultaten

Er zijn nauwelijks verschillen tussen de aanrijding met de lichte personenauto tegen de halve stalen STEP-barrier met stijlfstand 2.000 mm of 1.333 mm. De botsenergie van de lichte personenauto is hiervoor te klein. Beide typen halve stalen STEP-barriers reageren als een starre constructie op de lichte personenauto. Enige elastische vervorming is wel aanwezig, waardoor de lichte personenauto enigszins wordt 'teruggegooid' en een nogal forse rolhoek ontstaat. De ASI-waarde ligt net boven de maximaal toegestane ASI-waarde van niveau B; 1,44 in plaats van 1,4. De gesimuleerde vertraging in het zwaartepunt van de lichte personenauto bedraagt 17 G, die een maximale botskracht van 128 kN veroorzaakt. De uitrijhoeken zijn ongeveer 3 graden.

Door de veel grotere botsenergie van de bus is er wel verschil in aanrijding met de bus tegen de beide typen halve stalen STEP-barrier. De barrier met de stijlfstand van 2.000 mm reageert wat flexibeler dan de barrier met de stijlfstand van 1.333 mm. De gesimuleerde vertraging in het zwaartepunt van de bus bedraagt 7,9 G bij de 2.000 mm stijlfstand, die een maximale botskracht van 860 kN veroorzaakt. De gesimuleerde vertraging in het zwaartepunt van de bus bij de 1333 mm stijlfstand bedraagt 8,4 G; dit veroorzaakt een maximale botskracht van 924 kN. De uitrijhoeken zijn klein, de bus komt eigenlijk niet los van de barrier.

In verhouding met de proeven in Frankrijk is de verankering van de halve stalen STEP-barrier per element drie tot vier maal zo sterk.

Uit de simulaties komt naar voren dat de verschillen tussen de halve stalen STEP-barrier met stijlfstand 2.000 mm en 1.333 mm klein zijn.

Zoals in § 5.1 is aangegeven, gelden de resultaten alleen wanneer is voldaan aan de daar gestelde uitgangspunten. De stijlen en de schoren moeten op dezelfde plaats in het element zitten. Alleen op deze manier worden de belastingen, die door de aanrijding op het halve STEP-profiel worden uitgeoefend, rechtstreeks op de stijlen overgebracht.

## 8. Conclusies en aanbevelingen

Op grond van de resultaten van vier uitgevoerde simulaties zijn de volgende conclusies te trekken, uitgaande van de in § 5.1. beschreven belastingsituatie (met name de bevestiging van de schoren op dezelfde plaats als de stijlen).

Voor de personenauto geldt dat de gesimuleerde barriers als starre constructies werken, waarbij het voor de beoordeling van de veiligheid belangrijke ASI-criterium heel licht overschreden wordt. Er is bijna geen verschil tussen beide typen barriers.

Voor de bus geldt dat de gesimuleerde constructies in alle opzichten een bevredigend verloop vertonen. Er is sprake van een klein verschil in werking tussen de beide typen barriers.

Gezien het gunstige resultaat van de bussimulaties kan verondersteld worden dat de halve STEP-barrier tot meer in staat is.

Als algemene conclusie wordt gesteld, dat de halve stalen STEP-barrier met stijlfstand 2.000 mm dan wel stijlfstand 1.333 mm voldoet aan het 'higher containment level' H2, onder de in § 5.1 voorgestelde verandering.

Om dit resultaat te bereiken moeten de stijlen en de schoren op dezelfde plaats in het element zitten. Alleen op deze manier worden de belastingen, die tijdens de aanrijding op het halve STEP-profiel worden uitgeoefend, rechtstreeks op de stijlen overgebracht.

*Aanbevolen wordt dan ook deze correctie direct in de tekeningen aan te brengen en waar mogelijk nog in de praktijk aan te passen.*



## Literatuur

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.

Pol. W.H.M. van de (1996). *Verificatie-onderzoek simulatieresultaten RWS-barrier*. R-96-6. SWOV, Leidschendam.

Quincy, R., Mounier, B., Yagüe, N. & Mounier, H. (1996a). *STEP-barrier in steel SWOV*. L.I.E.R Laboratoire d'essais Inrets Equipements de la Route. SWO/STB-05/103.

Quincy, R., Mounier, B., Yagüe, N. & Mounier, H. (1996b). *STEP-barrier in steel SWOV*. L.I.E.R Laboratoire d'essais Inrets Equipements de la Route. SWO/STB-06/104.

Quincy, R., Mounier, B., Yagüe, N. & Mounier, H. (1996c). *STEP-barrier in steel SWOV*. L.I.E.R Laboratoire d'essais Inrets Equipements de la Route. SWO/STB-07/124.

Rijkswaterstaat directie Bruggen. *Bermbeveiliging op kunstwerken*. Voorburg (Intern verslag).



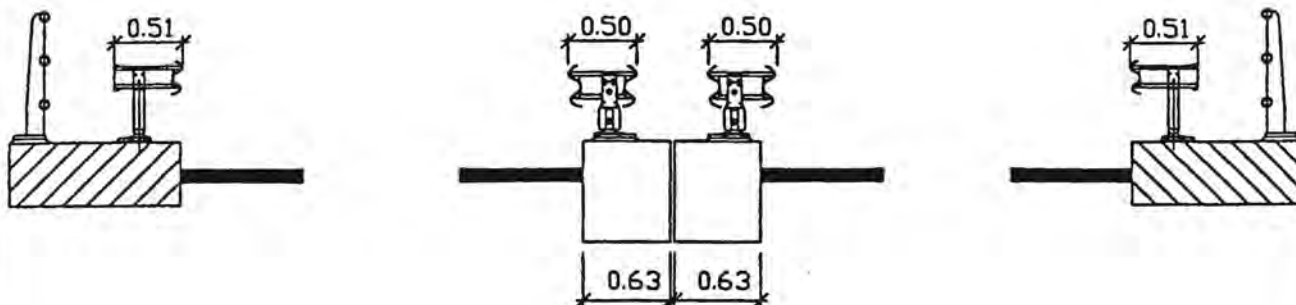
## Bijlage 1 t/m 4

1. *Afbeeldingen 1 t/m 5*
- 2A. *Afbeeldingen A1 t/m A9*
- 2B. *Afbeeldingen B1 t/m B8*
- 2C. *Afbeeldingen C1 t/m C9*
- 2D. *Afbeeldingen D1 t/m D8*
3. *Korte beschrijving van de werking van het computer-programma VEDYAC*
4. *Modellering modelcomponenten van de halve stalen STEP-barrier*

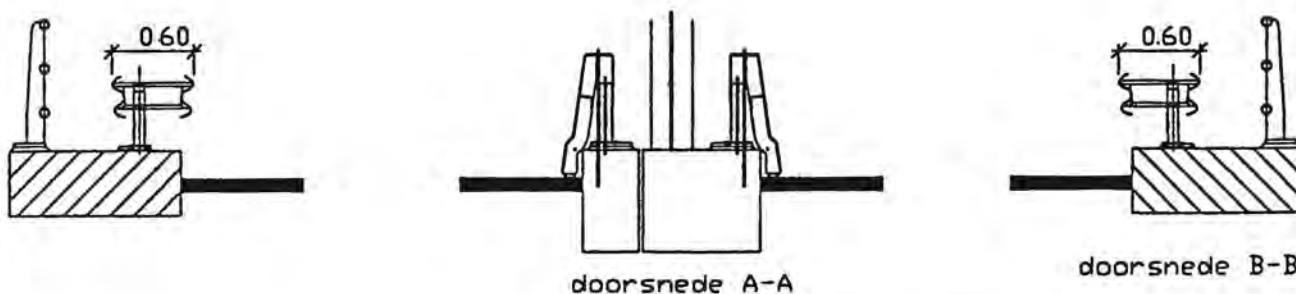
## Bijlage 1

## Afbeeldingen 1 t/m 5

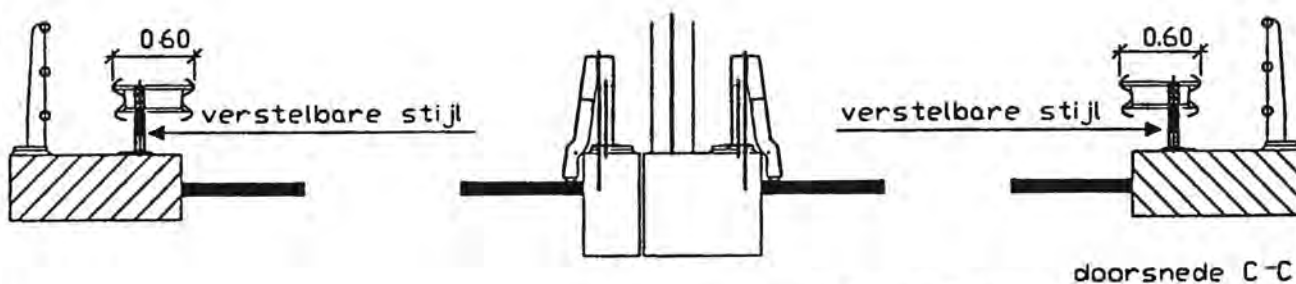
1. *Overzicht bestaande situatie en nieuwe situatie.*
2. *Halve stalen STEP-barrier.*
3. *Overzicht plaats verstevigingsschoren ten opzichte van de HEB-100 stijlen.*
4. *Overzicht POINT-verbindingen tussen de elementen en de stijlen met de schampkant.*
5. *Overzicht simulatie-opstelling van de halve stalen STEP-barrier, met HEB 100 stijl en stijlafstand 2.000 mm.*



bestaande situatie



nieuwe situatie



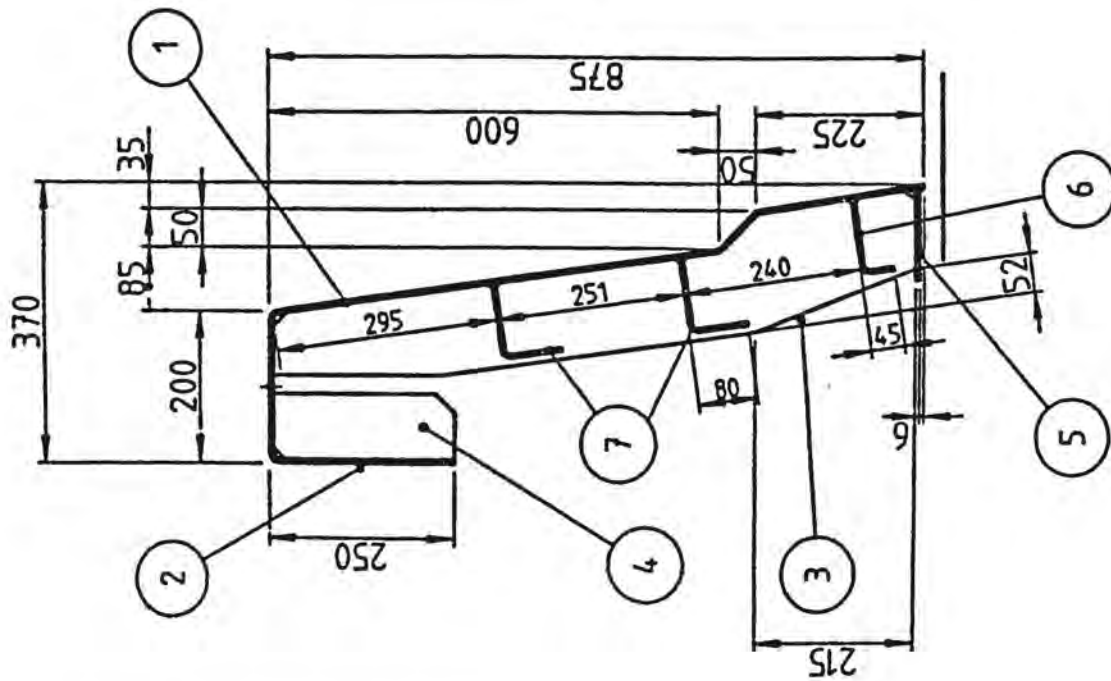
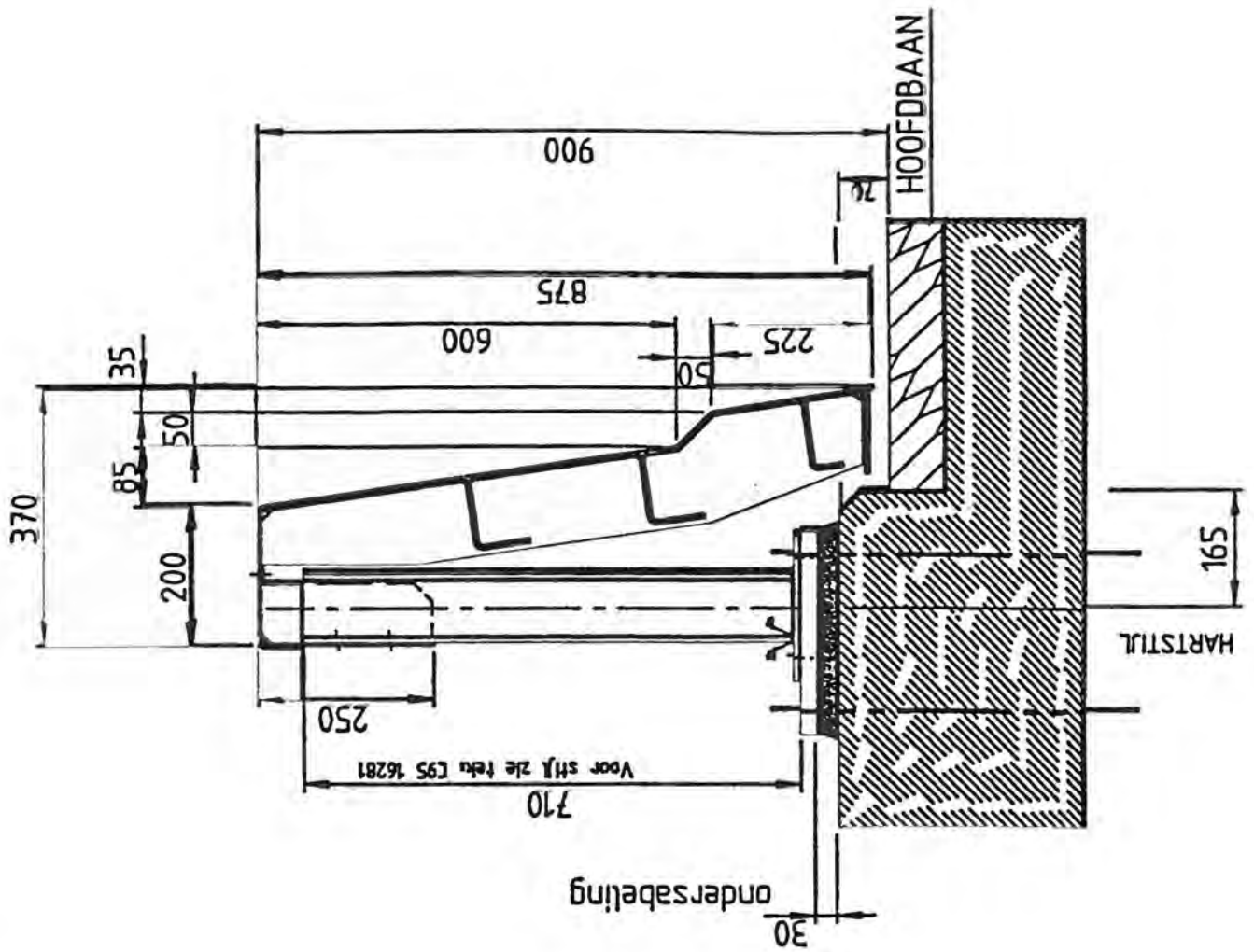
nieuwe situatie

bouwdienst R.W.S.  
afd. wegontw. apeldoorn

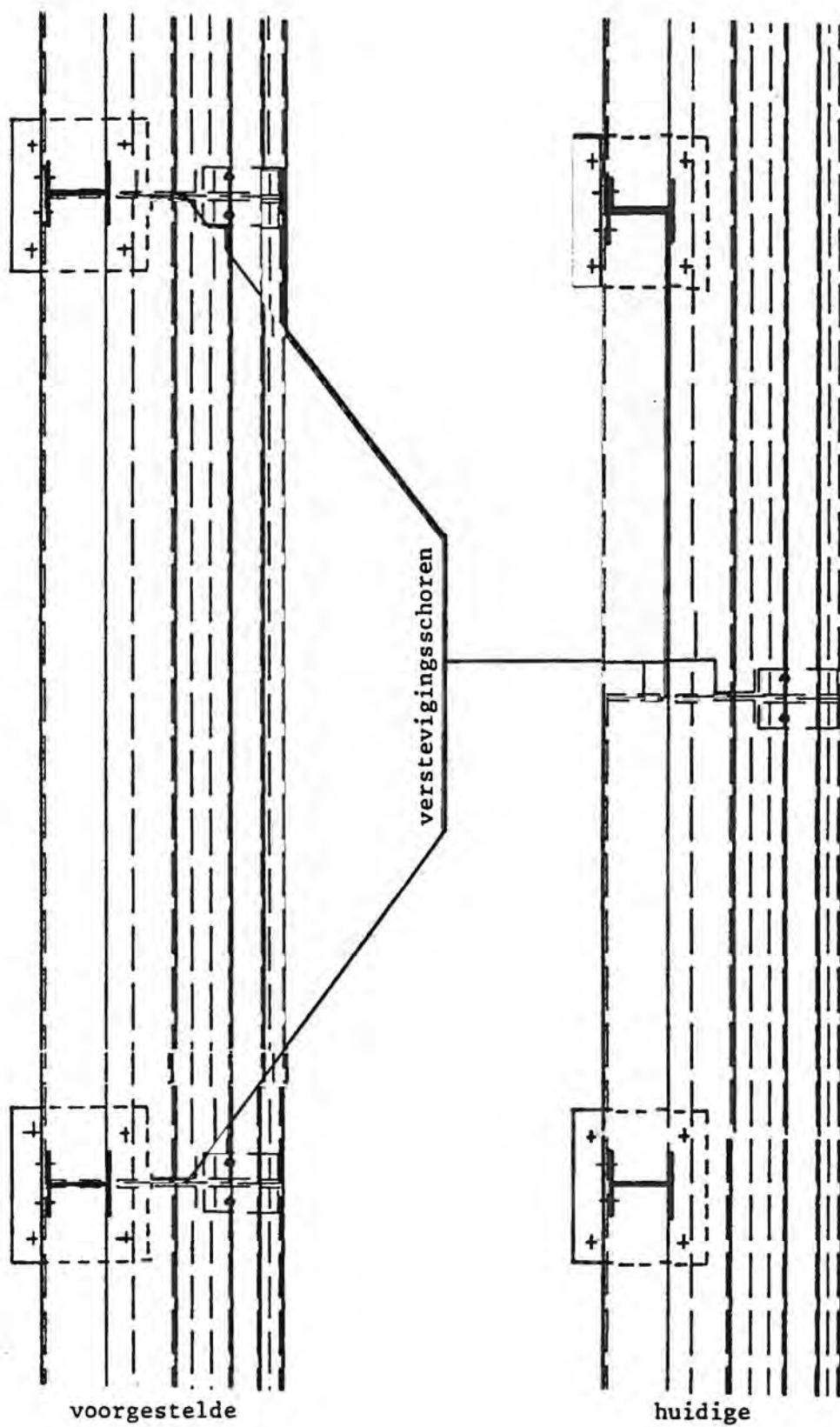


|       |        |
|-------|--------|
| getek | accord |
| 祝     | 祝      |

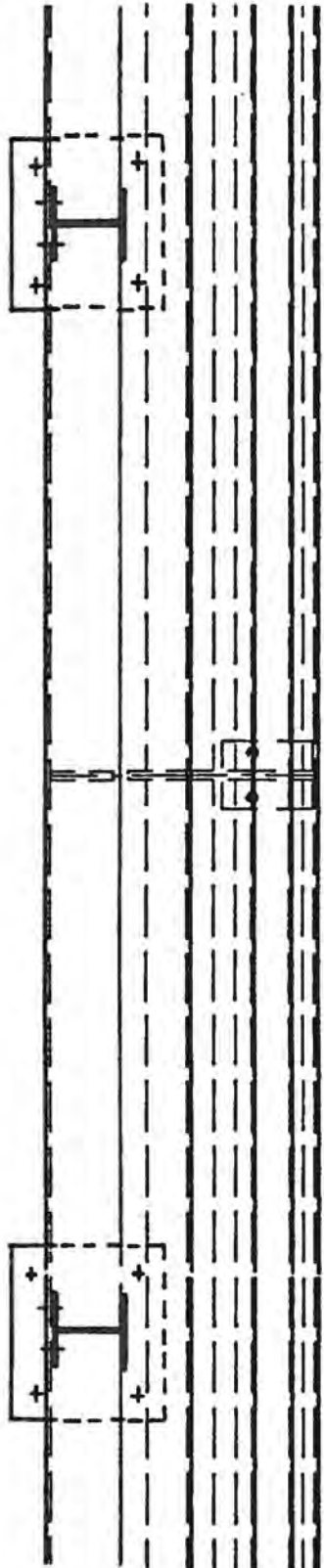
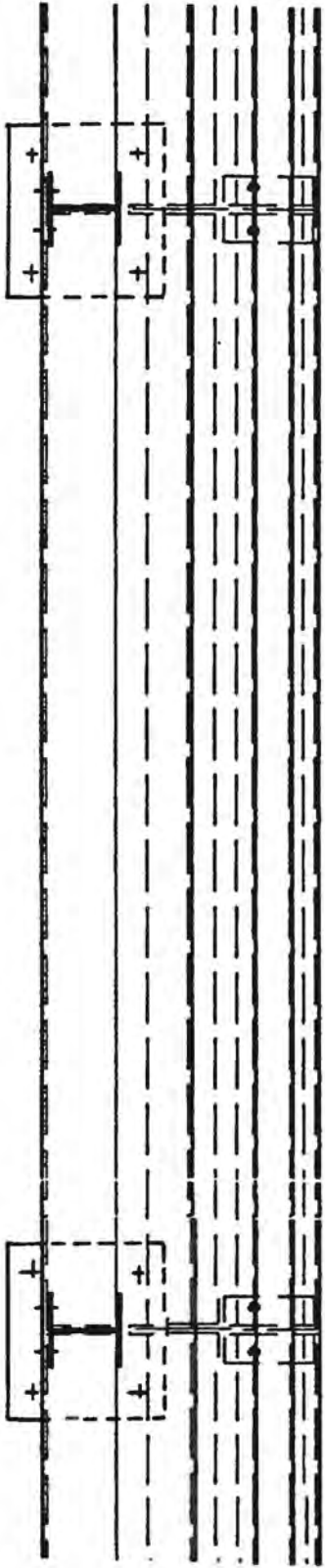
Afbeelding 1 - Overzicht bestaande situatie en nieuwe situatie.



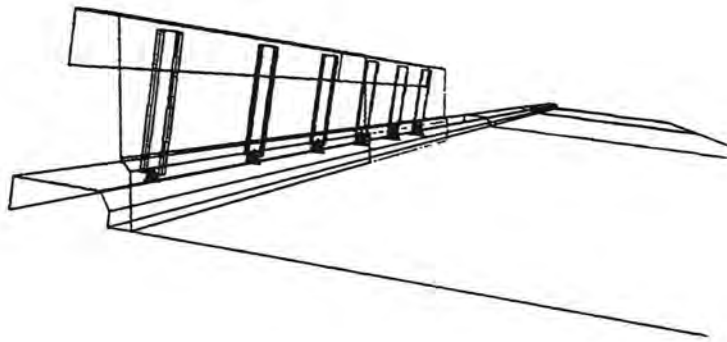
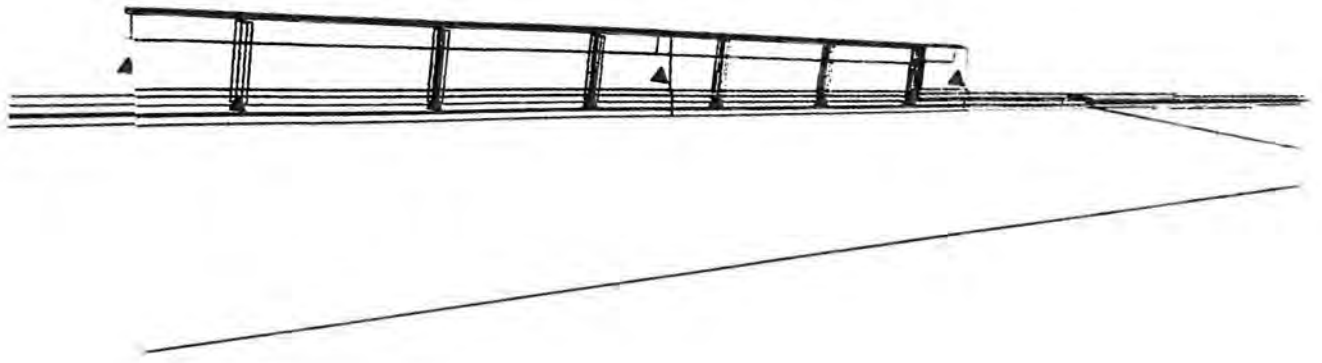
Afbeelding 2. Halve stalen STEP-barrier.



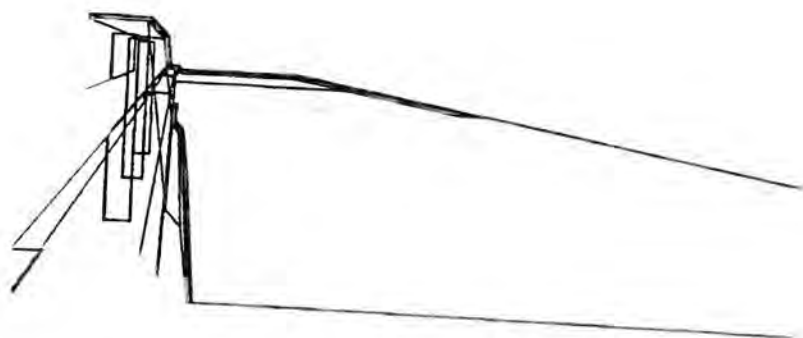
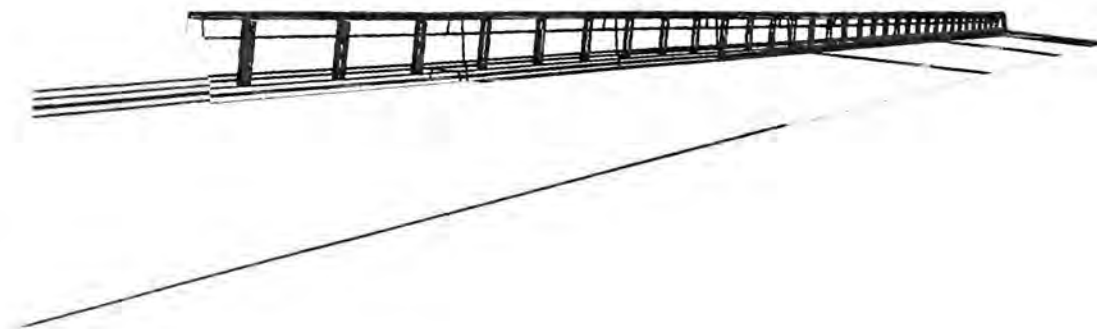
Afbeelding 3. Overzicht plaats verstevingsschoren t.o.v. de HEB-100 stijlen.







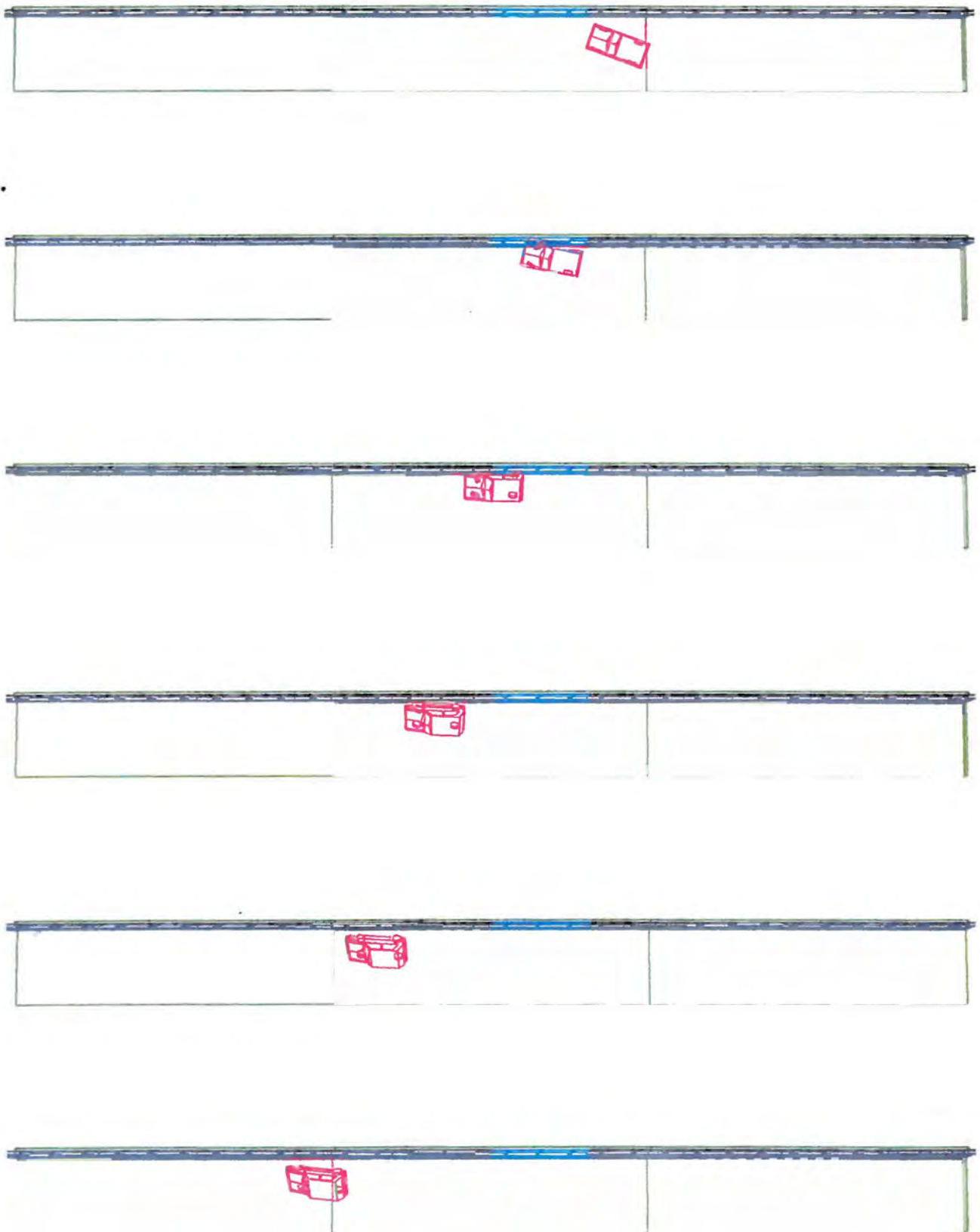
Afbeelding 4. Overzicht POINT-verbindingen tussen de elementen en de stijlen met de schamkant.



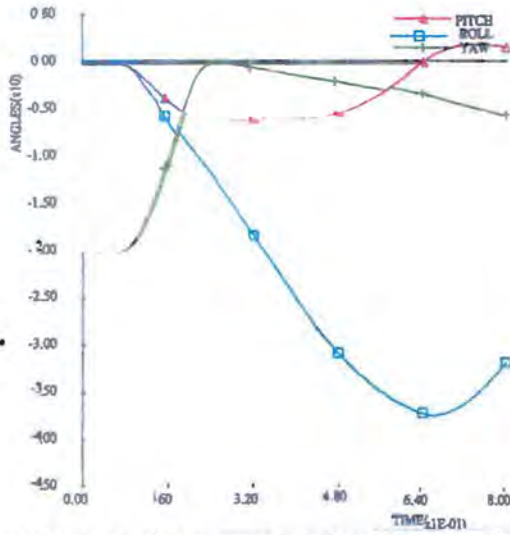
Afbeelding 5. Overzicht simulatieopstelling van de halve stalen STEP-barrier, met HEB 100 stijl en stijlafstand 2000 mm.

**Simulaties met de lichte personenauto tegen de halve stalen STEP-barrier met stijlafstand 2.000 mm.**

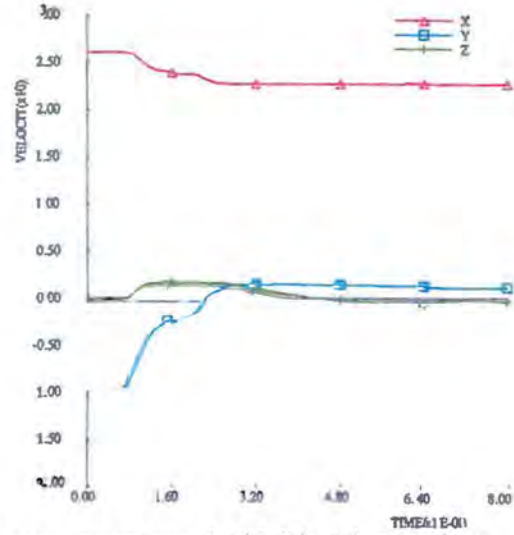
- A1. *Overzicht aanrijding met de lichte personenauto tegen de halve stalen STEP-barrier, stijlafstand 2.000 mm.*
- A2. *Verloop van de roll-, pitch- en yawhoek van de lichte personenauto tegen de tijd tijdens de aanrijding tegen de halve stalen STEP-barrier, stijlafstand 2.000 mm.*
- A3. *Verloop van de snelheid tegen de tijd tijdens de aanrijding met de lichte personenauto tegen de halve stalen STEP-barrier, stijlafstand 2.000 mm.*
- A4. *Verloop van de vertragingen in het zwaartepunt van de lichte personenauto tegen de tijd tijdens de aanrijding met de lichte personenauto tegen de halve stalen STEP-barrier, stijlafstand 2.000 mm.*
- A5. *Verloop van de krachten in het zwaartepunt van de lichte personenauto tegen de tijd tijdens de aanrijding met de lichte personenauto tegen de halve stalen STEP-barrier, stijlafstand 2.000 mm.*
- A6. *De ASI-waarde in het zwaartepunt van de lichte personenauto tegen de tijd tijdens de aanrijding met de lichte personenauto tegen de halve stalen STEP-barrier, stijlafstand 2.000 mm.*
- A7. *Verloop van de krachten en momenten in de koppeling tussen de elementen 12/13, 13/14 en 14/15 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de lichte personenauto tegen de halve stalen STEP-barrier, stijlafstand 2.000 mm.*
- A8. *Verloop van de krachten en momenten in de drie stijlen van element 14 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de lichte personenauto tegen de halve stalen STEP-barrier, stijlafstand 2.000 mm.*
- A9. *Verloop van de uitbuiging van de elementen 13, 14 en 15 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de lichte personenauto tegen de halve stalen STEP-barrier, stijlafstand 2.000 mm.*



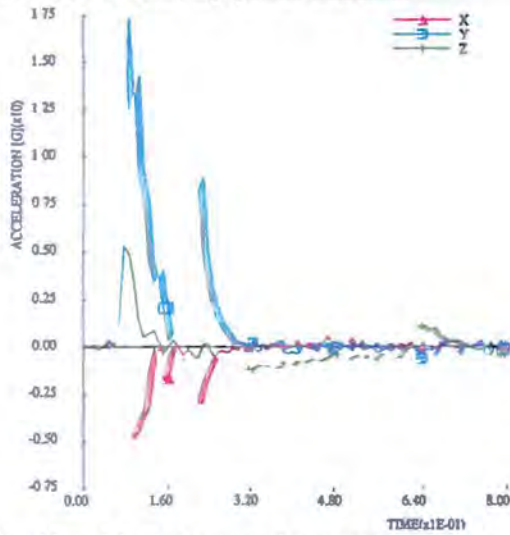
Afbeelding A1. Overzicht aanrijding met de lichte personenauto tegen de halve stalen STEP-barrier, stijfstand 2000 mm.



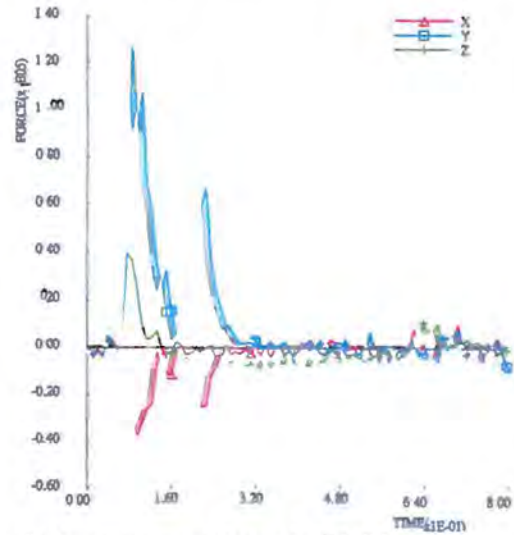
Afbeelding A2. Verloop van de roll-, pitch- en yawhoek van de lichte personenauto tegen de tijd tijdens de aanrijding tegen de halve stalen STEP-barrier, stijlfstand 2000 mm.



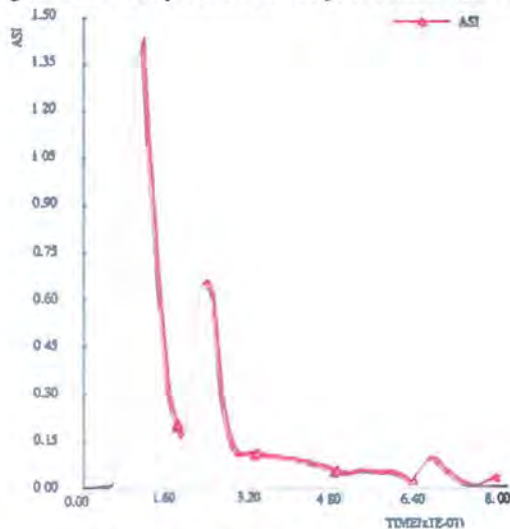
Afbeelding A3. Verloop van de snelheid tegen de tijd tijdens de aanrijding met de lichte personenauto tegen de halve stalen STEP-barrier, stijlfstand 2000 mm.



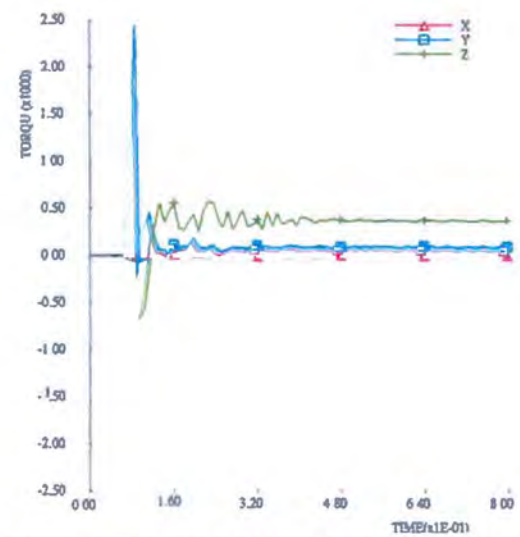
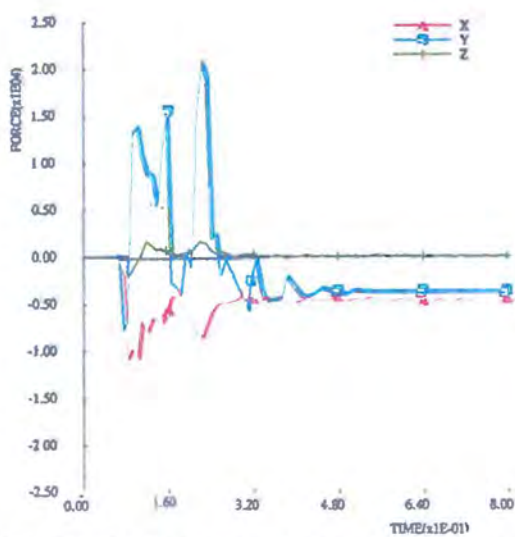
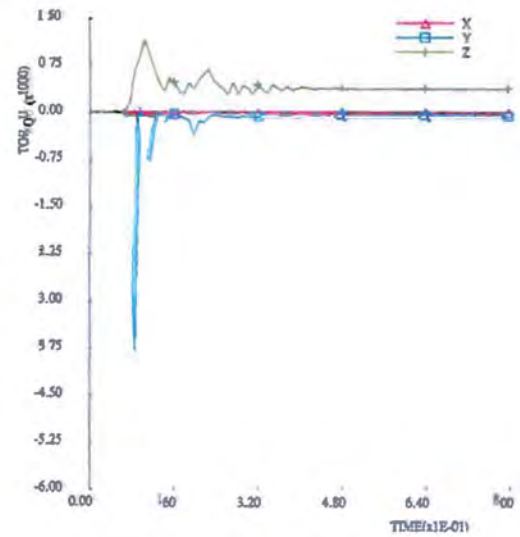
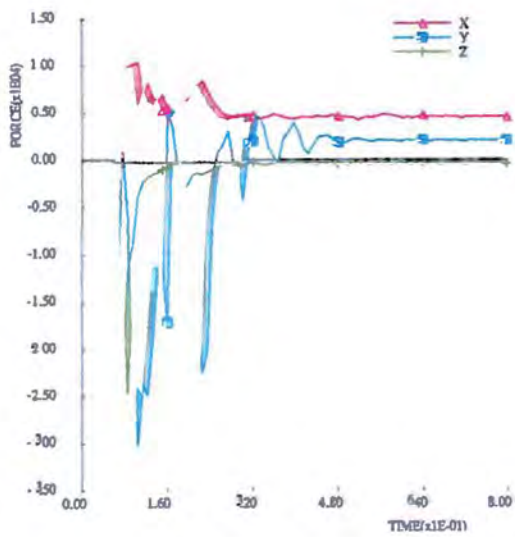
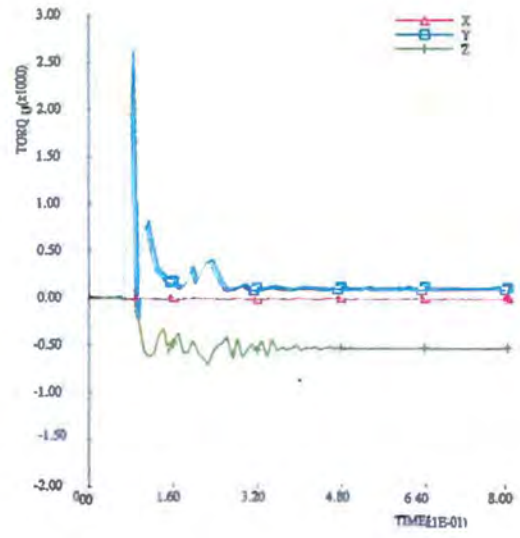
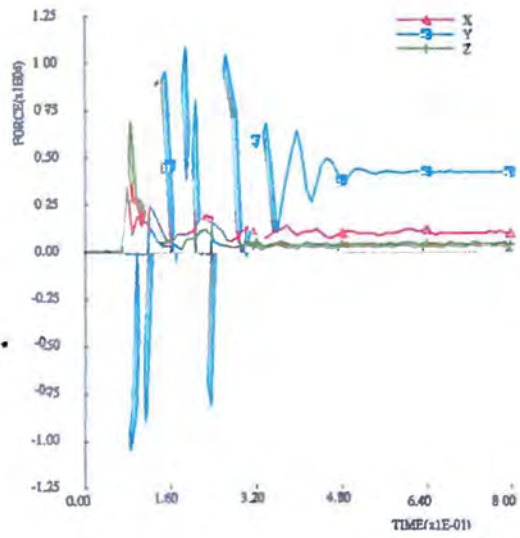
Afbeelding A4. Verloop van de vertragingen in het zwaartepunt van de lichte personenauto tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de halve stalen STEP-barrier, stijlfstand 2000 mm.



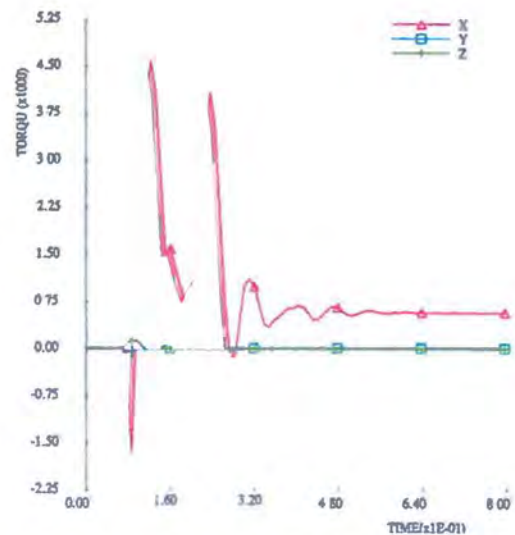
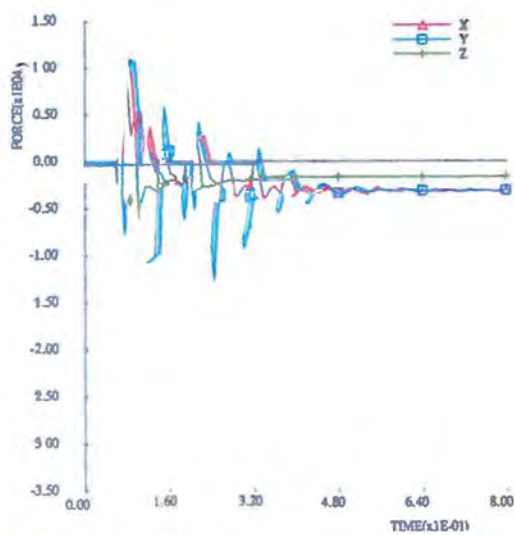
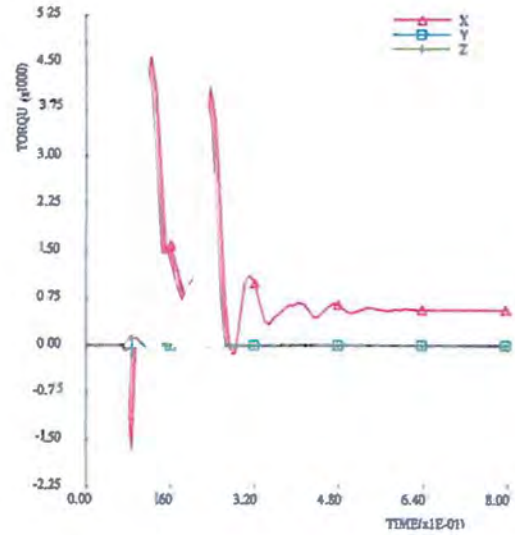
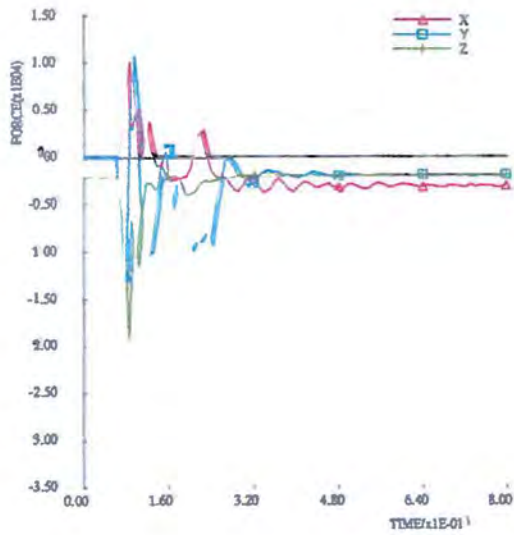
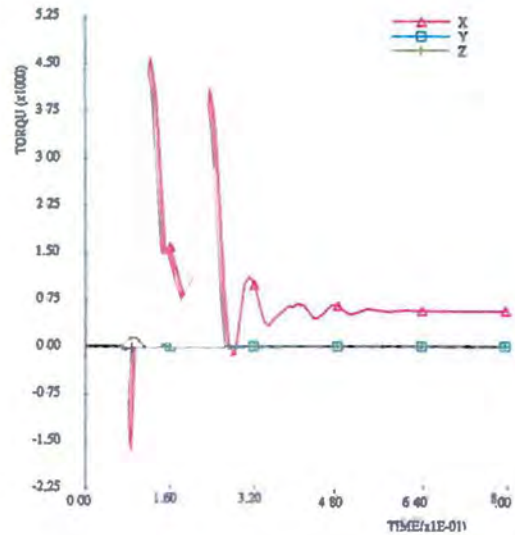
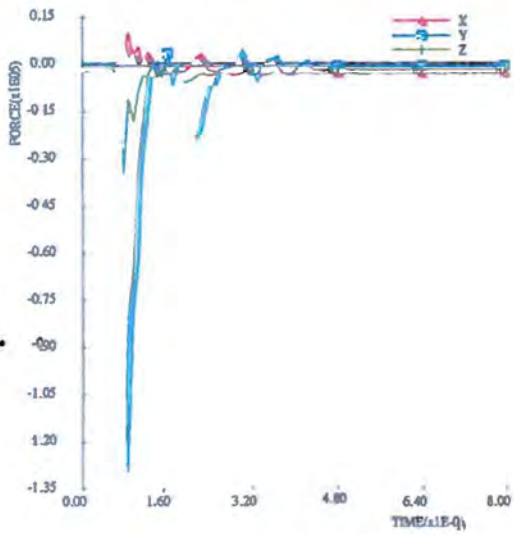
Afbeelding A5. Verloop van de krachten in het zwaartepunt van de lichte personenauto tegen de tijd tijdens de aanrijding met de lichte personenauto tegen de halve stalen STEP-barrier, stijlfstand 2000 mm.



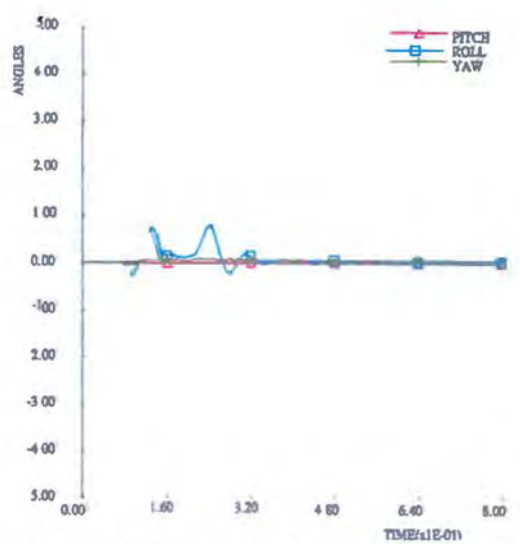
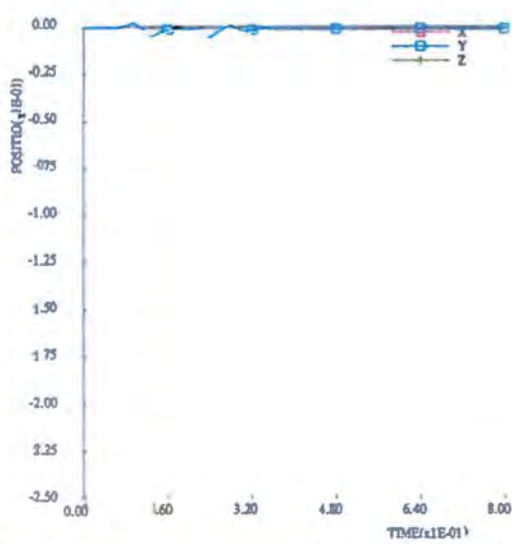
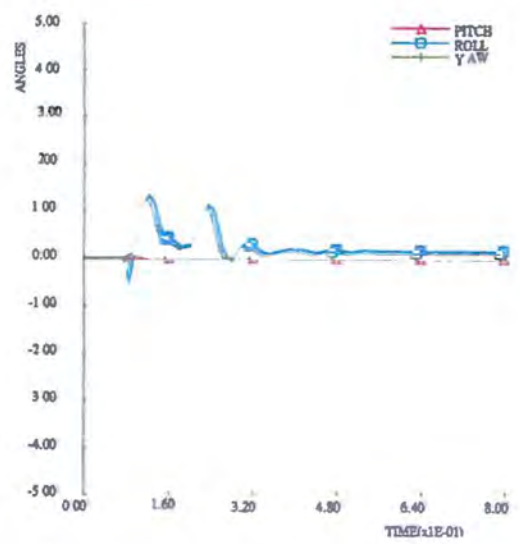
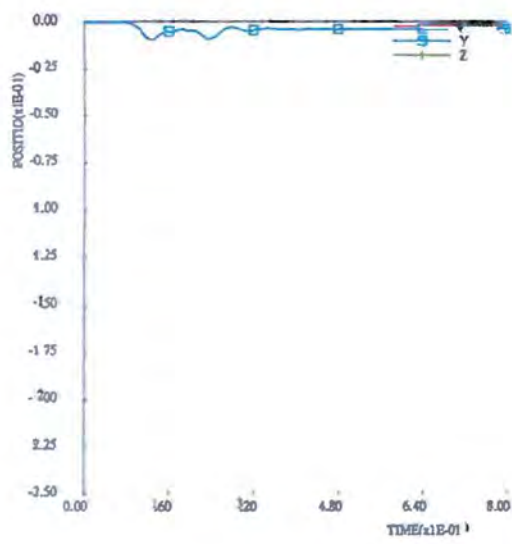
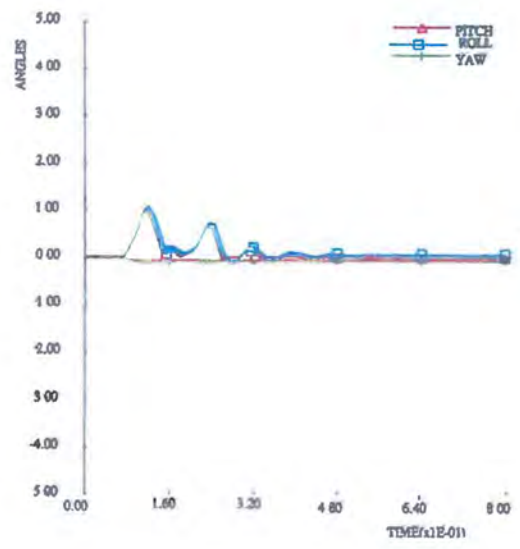
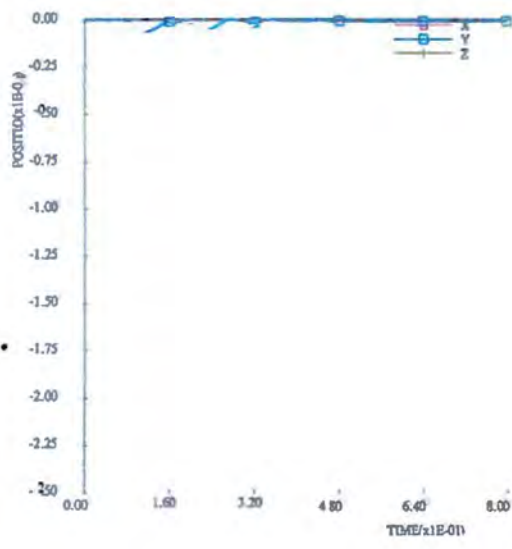
Afbeelding A6. Verloop van de ASI-waarde in het zwaartepunt van de lichte personenauto tegen de tijd tijdens de aanrijding met de lichte personenauto tegen de halve stalen STEP-barrier, stijlfstand 2000 mm.



Afbeelding A7. Verloop van de krachten en momenten in de koppeling tussen de elementen 12/13, 13/14 en 14/15 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de lichte personenauto tegen de halve stalen STEP-barrier, stijfstand 2000 mm.



Afbeelding A8. Verloop van de krachten en momenten in de drie slijen van element 14 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de lichte personenvoertuig tegen de halve stalen STEP-barrier, slijafstand 2000 mm.

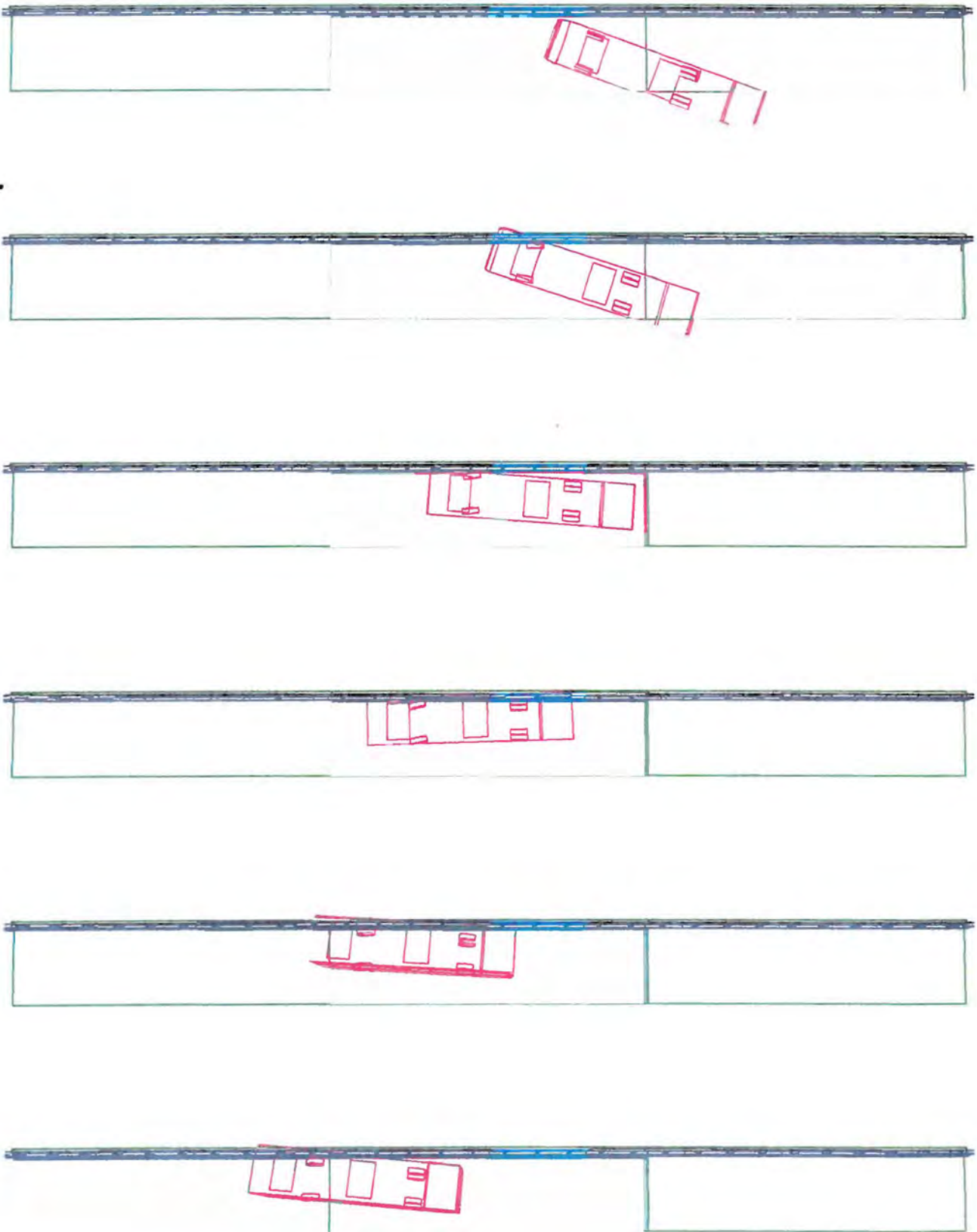


Afbeelding A9. Verloop van de uitbuiging van de elementen 13, 14 en 15 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de lichte personenauto tegen de halve stalen STEP-barrier, stijfstand 2000 mm.

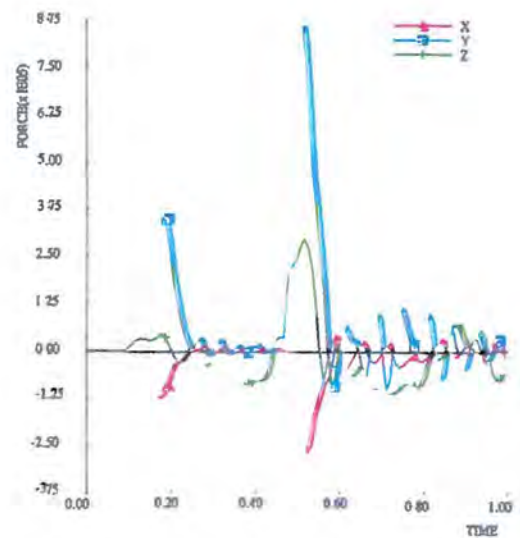
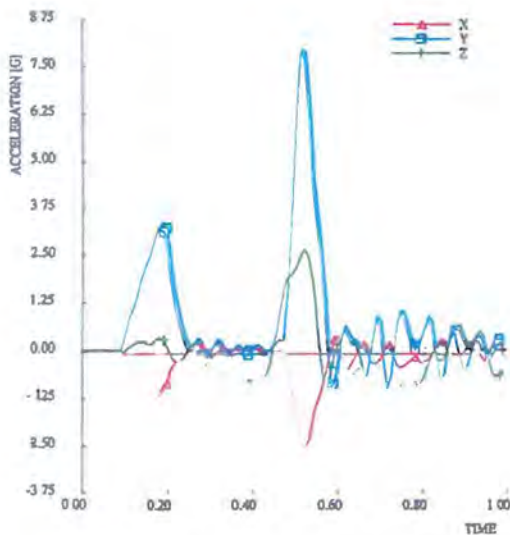
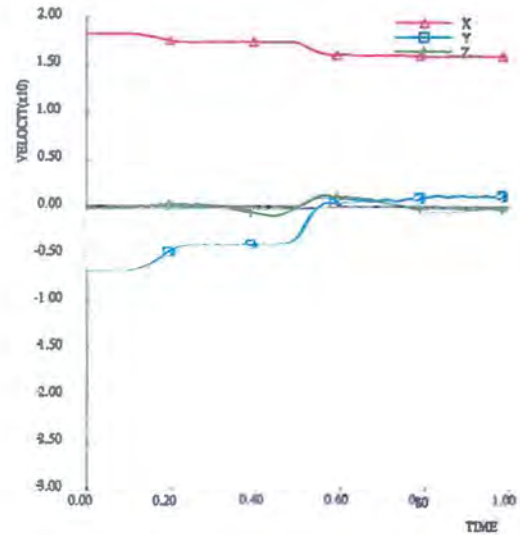
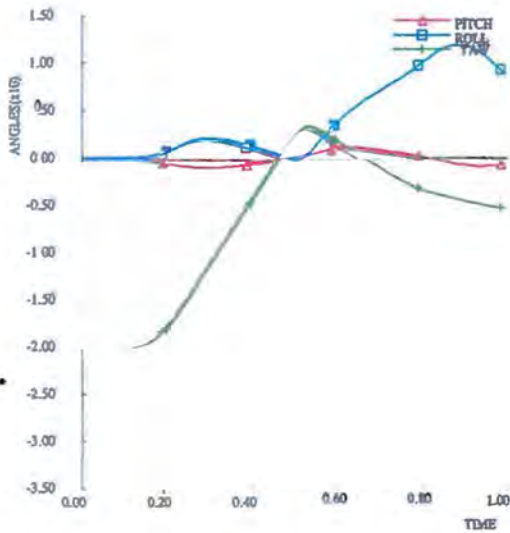


**Simulatie met de bus tegen de halve stalen STEP-barrier met stijlafstand 2.000 mm.**

- B1. *Overzicht aanrijding met de bus tegen de halve stalen STEP-barrier, stijlafstand 2.000 mm.*
- B2. *Verloop van de roll-, pitch- en yawhoek van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding tegen de halve stalen STEP-barrier, stijlafstand 2.000 mm.*
- B3. *Verloop van de snelheid tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de halve stalen STEP-barrier, stijlafstand 2.000 mm.*
- B4. *Verloop van de vertragingen in het zwaartepunt van bus tegen de tijd tijdens de aanrijding met de lichte personenauto tegen de halve stalen STEP-barrier, stijlafstand 2.000 mm.*
- B5. *Verloop van de krachten in het zwaartepunt van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding met de lichte personenauto tegen de halve stalen STEP-barrier, stijlafstand 2.000 mm.*
- B6. *Verloop van de krachten en momenten in de koppeling tussen de elementen 13/14, 14/15 en 15/16 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de halve stalen STEP-barrier, stijlafstand 2.000 mm.*
- B7. *Verloop van de krachten en momenten in de drie stijlen van element 14 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de halve stalen STEP-barrier, stijlafstand 2.000 mm.*
- B8. *Verloop van de uitbuiging van de elementen 14, 15 en 16 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de halve stalen STEP-barrier, stijlafstand 2.000 mm.*



Afbeelding B1. Overzicht aanrijfing net de bus tegen de halve stalen STEP-barrier, stijfstand 2000 mm.

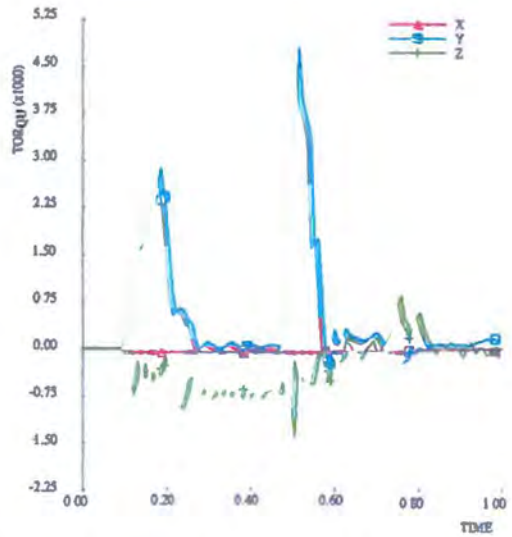
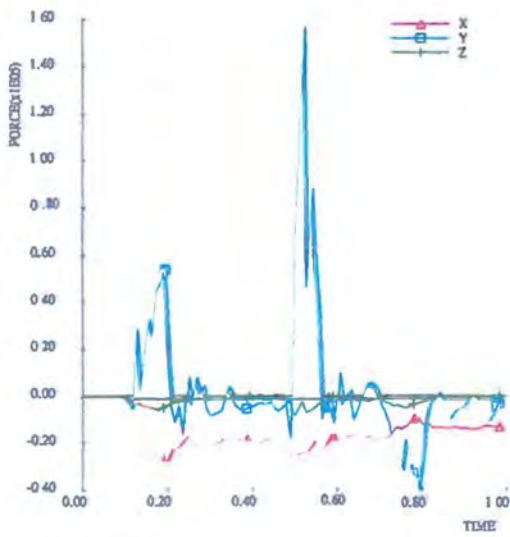
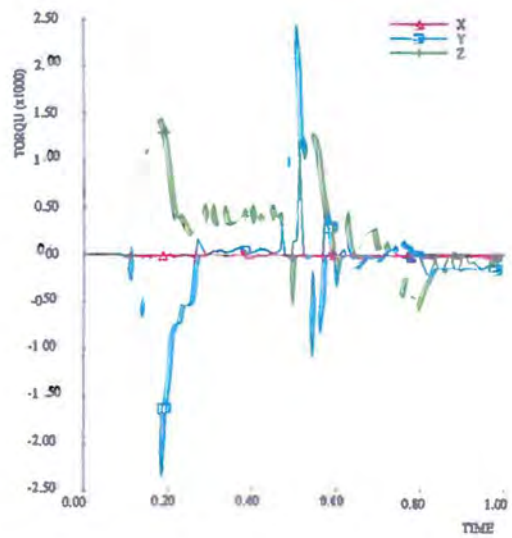
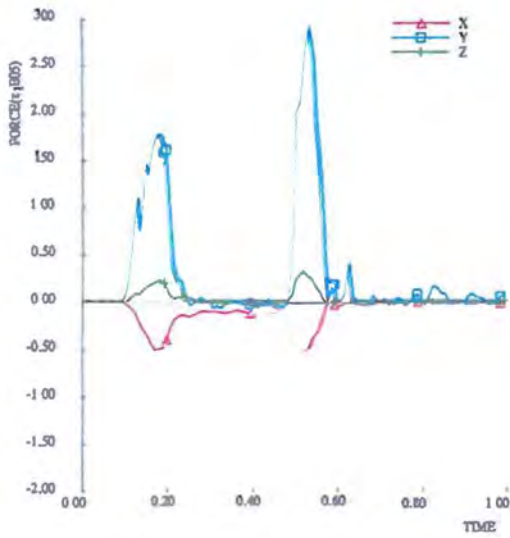
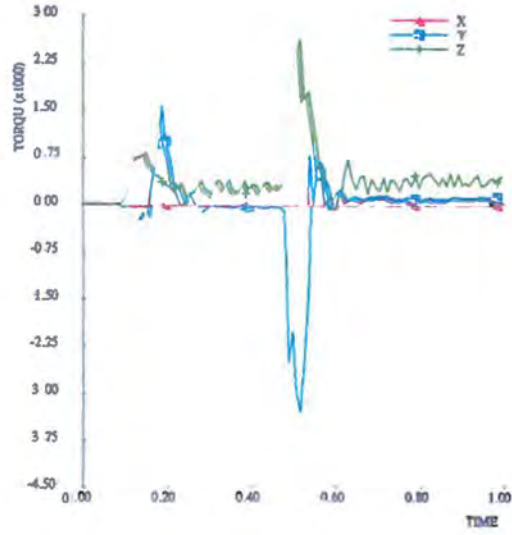
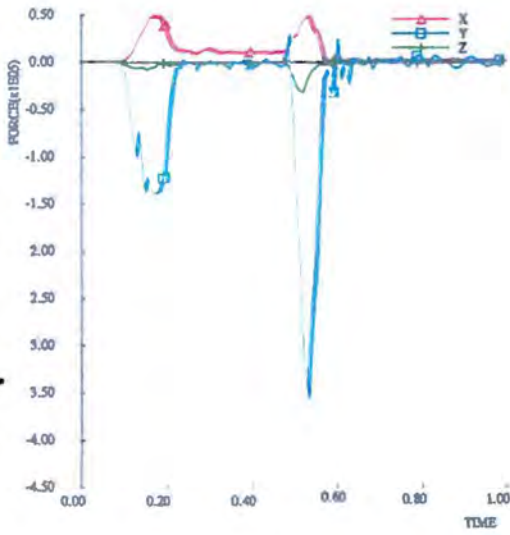


Afbeelding B2. Verloop van de roll-, pitch- en yawhoek van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding tegen de halve stalen STEP-barrier, stijlfstand 2000 mm.

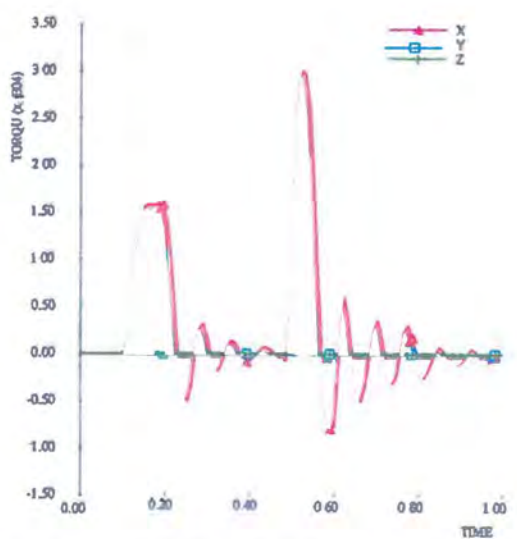
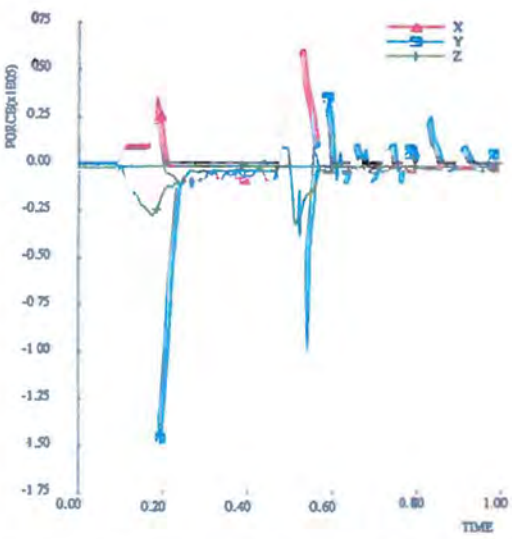
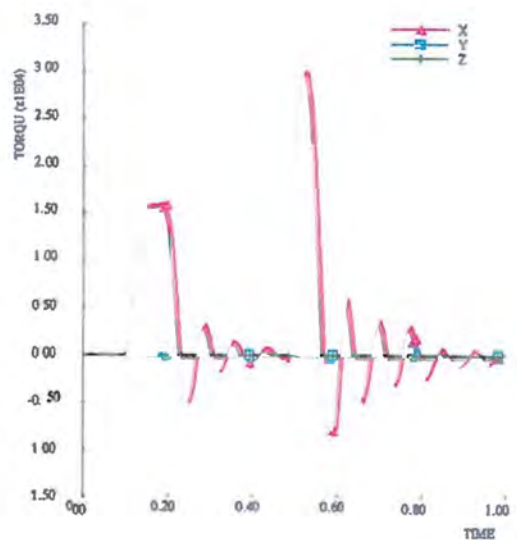
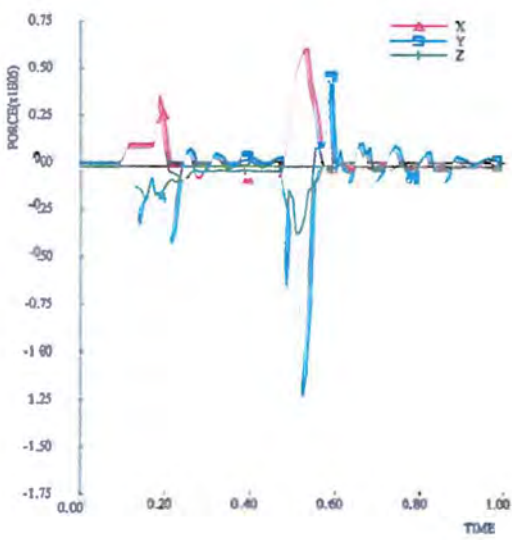
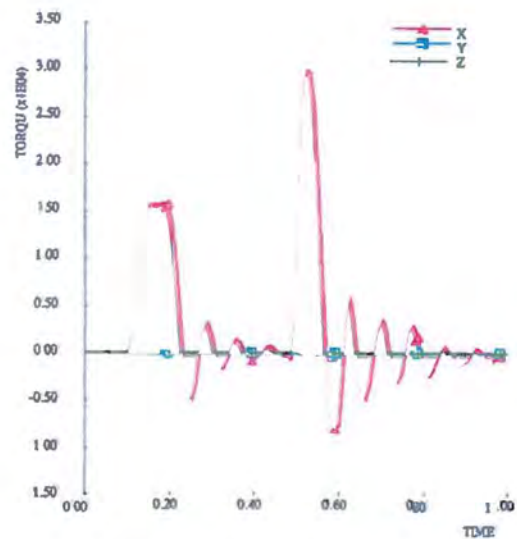
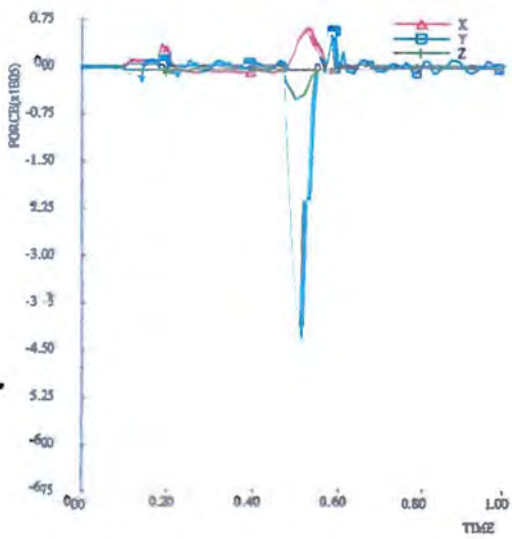
Afbeelding B3. Verloop van de snelheid tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de halve stalen STEP-barrier, stijlfstand 2000 mm.

Afbeelding B4. Verloop van de vertragingen in het zwaartepunt van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de halve stalen STEP-barrier, stijlfstand 2000 mm.

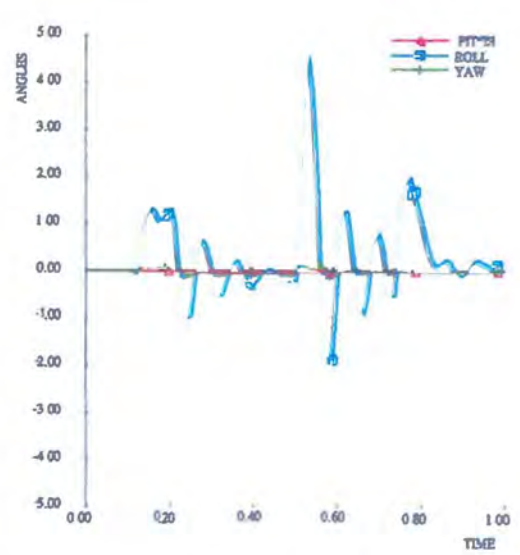
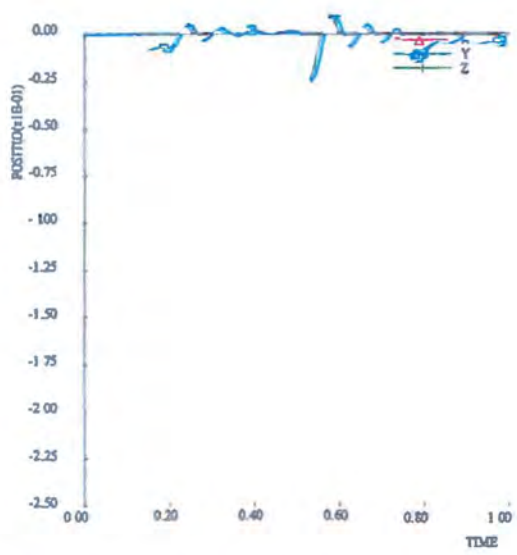
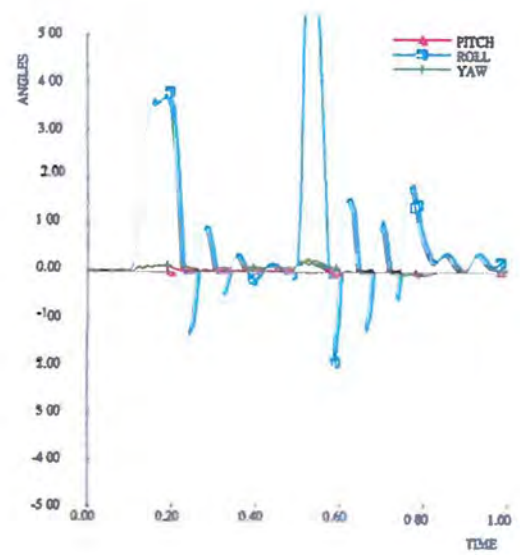
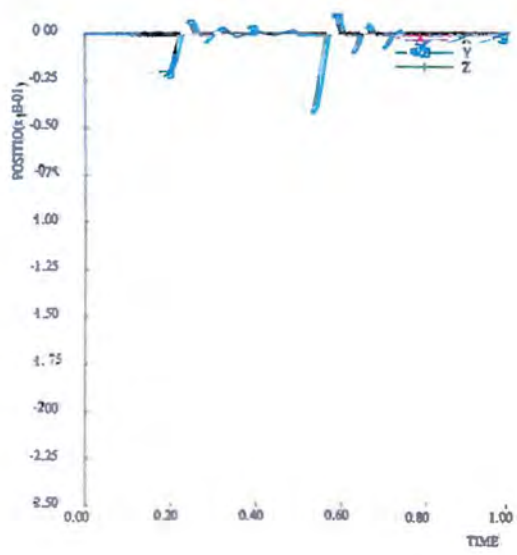
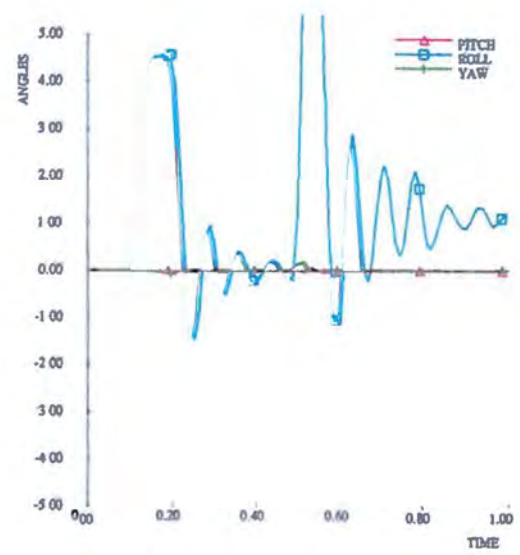
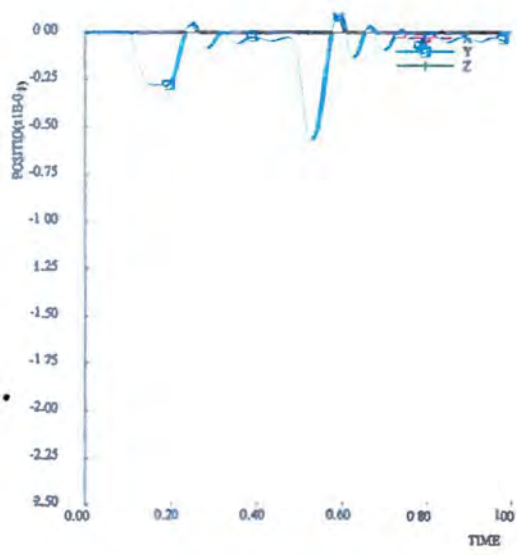
Afbeelding B5. Verloop van de krachten in het zwaartepunt van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de halve stalen STEP-barrier, stijlfstand 2000 mm.



Afbeelding B6. Verloop van de krachten en momenten in de koppeling tussen de elementen 13/14, 14/15 en 15/16 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de halve stalen STEP barrier, snijafstand 2000 mm.



Afbeelding B7. Verloop van de krachten en momenten in de drie richtingen van element 14 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de halve stalen STEP-barrière, slijfstand 2000 mm.



Afbeelding B8. Verloop van de uitbuiging van de elementen 14, 15 en 16 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de halve stalen STEP-barrier, stijfstand 2000 mm.

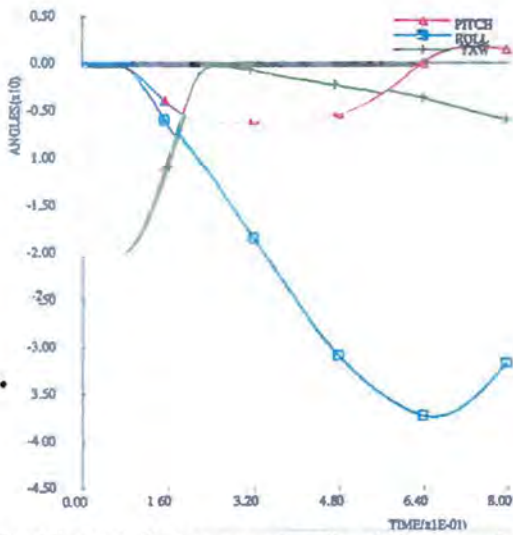
**Simulaties met de lichte personenauto tegen de halve stalen STEP-barrier met stijlafstand 1.333 mm.**

- C1. *Overzicht aanrijding met de lichte personenauto tegen de halve stalen STEP-barrier, stijlafstand 1.333 mm.*
- C2. *Verloop van de roll-, pitch- en yawhoek van de lichte personenauto tegen de tijd tijdens de aanrijding tegen de halve stalen STEP-barrier, stijlafstand 1.333 mm.*
- C3. *Verloop van de snelheid tegen de tijd tijdens de aanrijding met de lichte personenauto tegen de halve stalen STEP-barrier, stijlafstand 1.333 mm.*
- C4. *Verloop van de vertragingen in het zwaartepunt van de lichte personenauto tegen de tijd tijdens de aanrijding met de lichte personenauto tegen de halve stalen STEP-barrier, stijlafstand 1.333 mm.*
- C5. *Verloop van de krachten in het zwaartepunt van de lichte personenauto tegen de tijd tijdens de aanrijding met de lichte personenauto tegen de halve stalen STEP-barrier, stijlafstand 1.333 mm.*
- C6. *De ASI-waarde in het zwaartepunt van de lichte personenauto tegen de tijd tijdens de aanrijding met de lichte personenauto tegen de halve stalen STEP-barrier, stijlafstand 1.333 mm.*
- C7. *Verloop van de krachten en momenten in de koppeling tussen de elementen 12/13, 13/14 en 14/15 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de lichte personenauto tegen de halve stalen STEP-barrier, stijlafstand 1.333 mm.*
- C8. *Verloop van de krachten en momenten in de drie stijlen van element 14 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de lichte personenauto tegen de halve stalen STEP-barrier, stijlafstand 1.333 mm.*
- C9. *Verloop van de uitbuiging van de elementen 13, 14 en 15 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de lichte personenauto tegen de halve stalen STEP-barrier, stijlafstand 1.333 mm.*

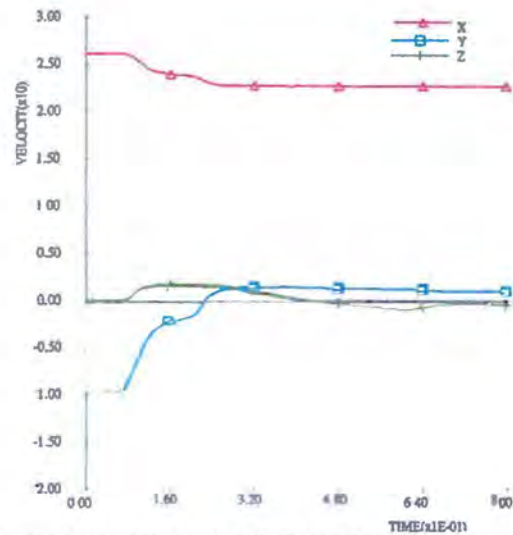


Afbeelding C1. Overzicht aanrijding met de lichte personenauto tegen de halve schalen STEP-barrier, rijlafschild 1333 mm.

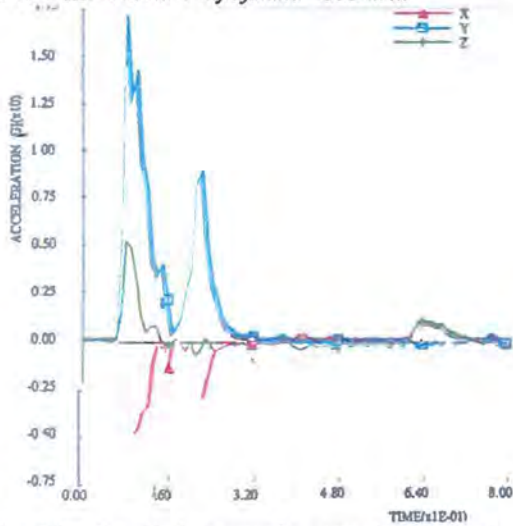




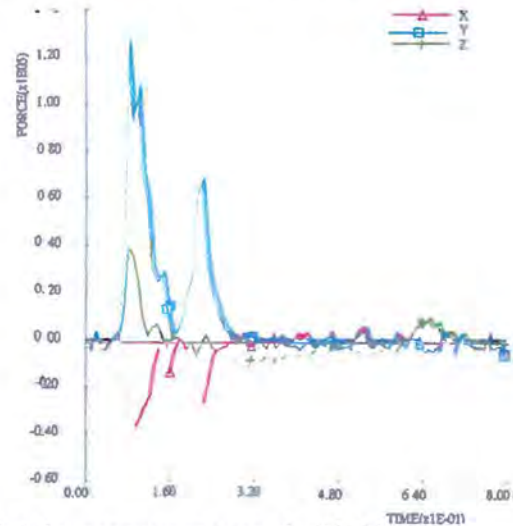
Afbeelding C2. Verloop van de roll-, pitch- en yawhoek van de lichte personenauto tegen de tijd tijdens de aanrijding tegen de halve stalen STEP-barrier, stijfstand 1333 mm.



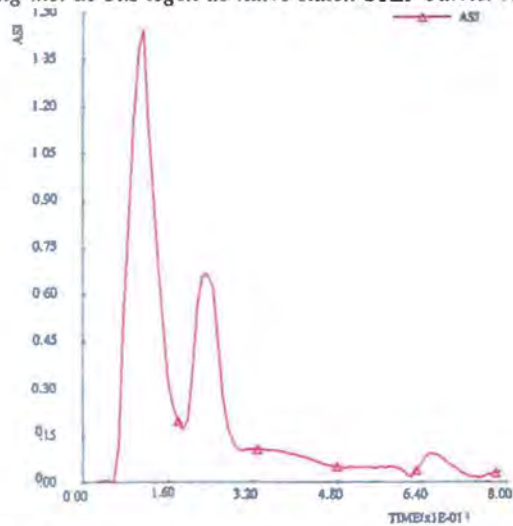
Afbeelding C3. Verloop van de snelheid tegen de tijd tijdens de aanrijding met de lichte personenauto tegen de halve stalen STEP-barrier, stijfstand 1333 mm.



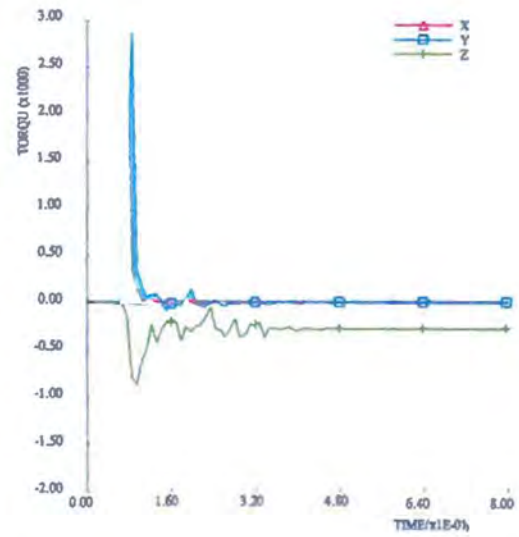
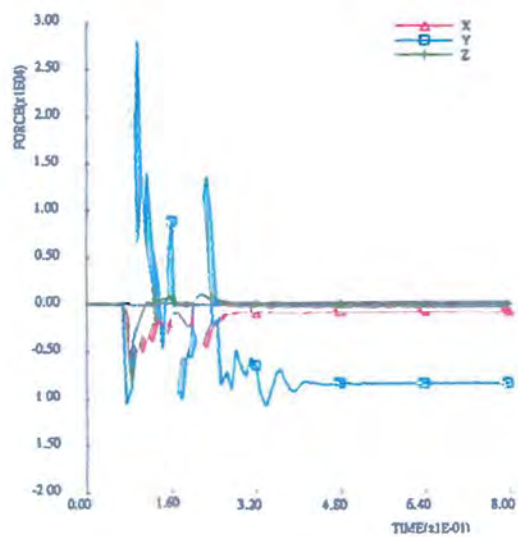
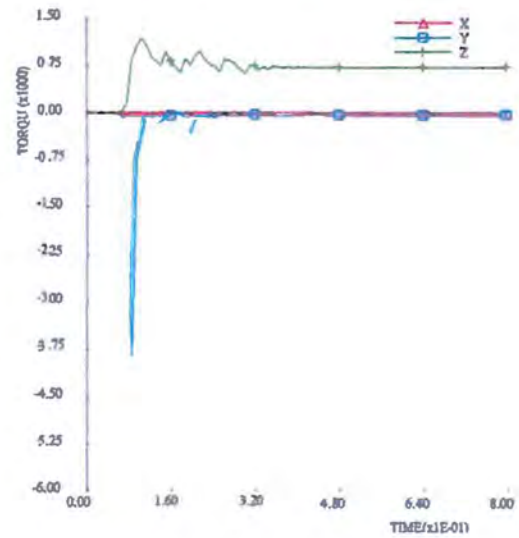
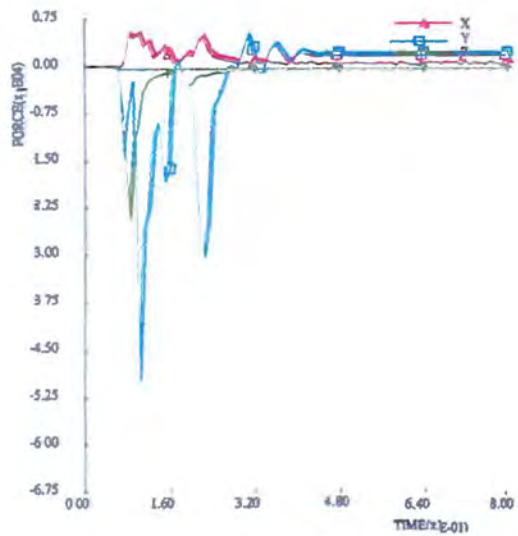
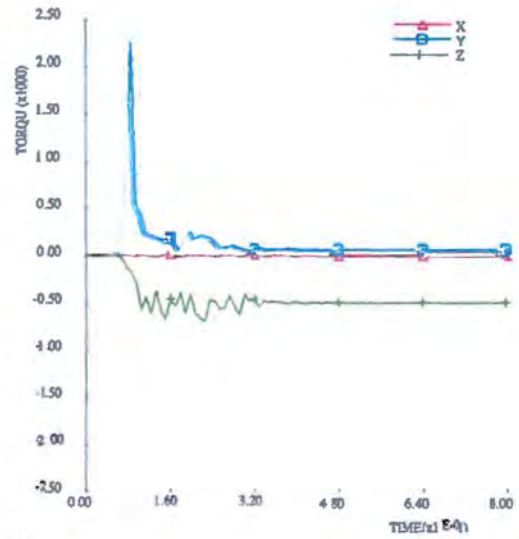
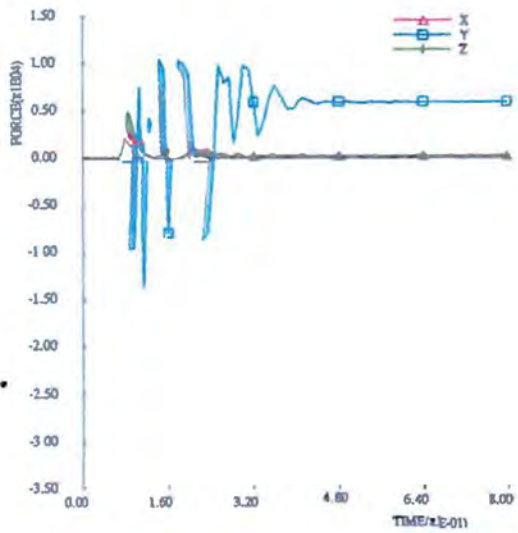
Afbeelding C4. Verloop van de vertragingen in het zwaartepunt van de lichte personenauto tegen de tijd tijdens de aanrijding met de lichte personenauto tegen de halve stalen STEP-barrier, stijfstand 1333 mm.



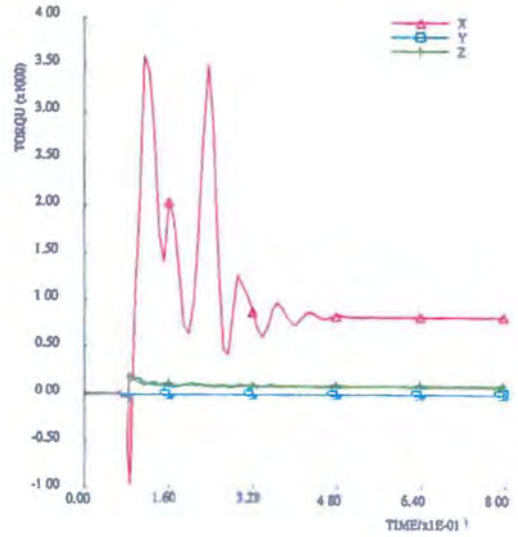
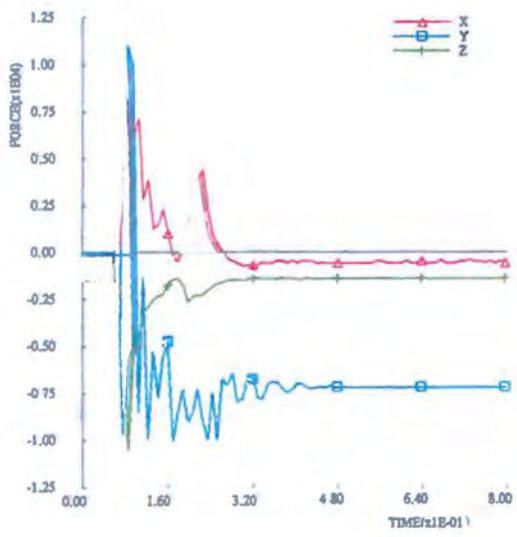
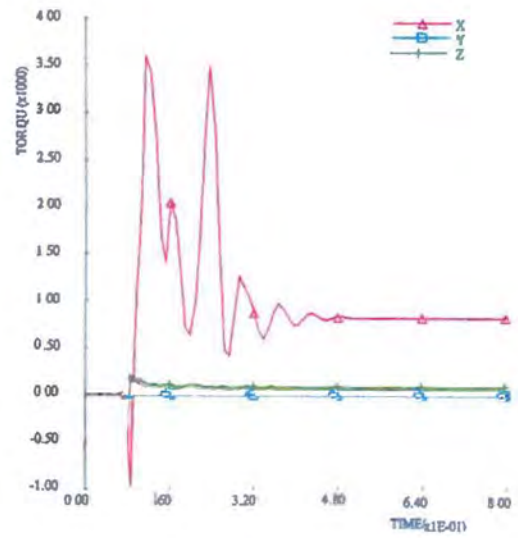
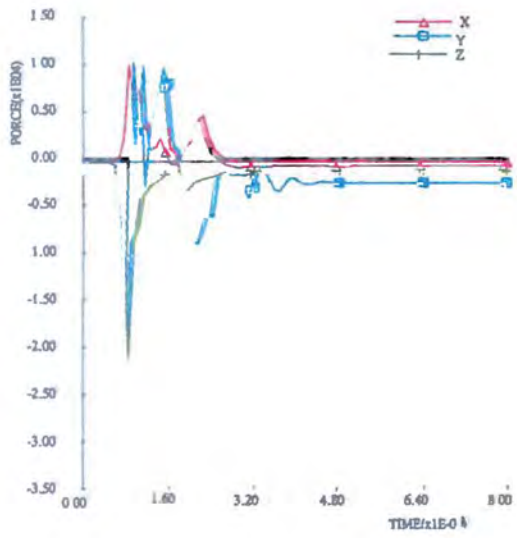
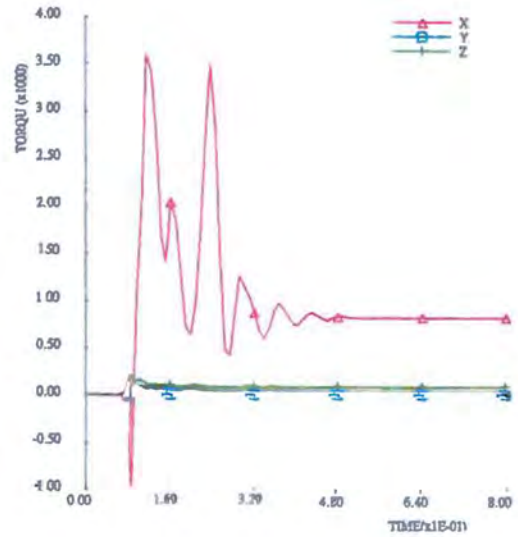
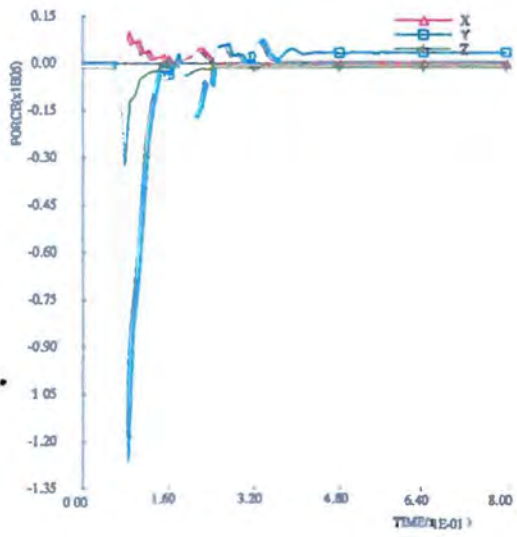
Afbeelding C5. Verloop van de krachten in het zwaartepunt van de lichte personenauto tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de halve stalen STEP-barrier, stijfstand 1333 mm.

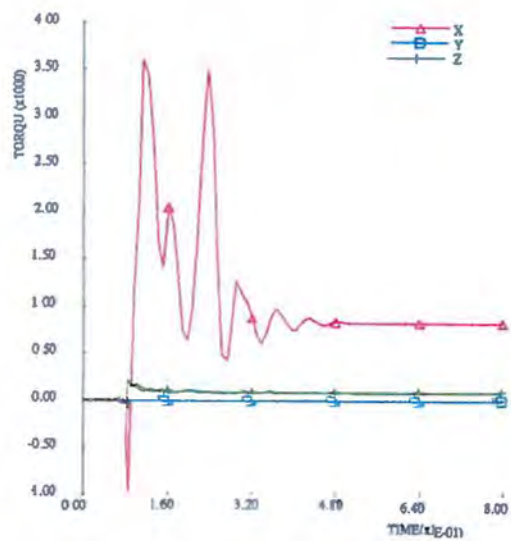
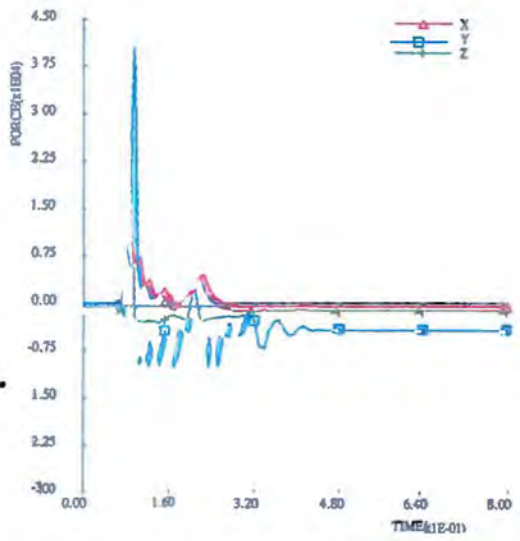


Afbeelding C6. Verloop van de ASI-waarde in het zwaartepunt van de lichte personenauto tegen de tijd tijdens de aanrijding met de lichte personenauto tegen de halve stalen STEP-barrier, stijfstand 1333 mm.

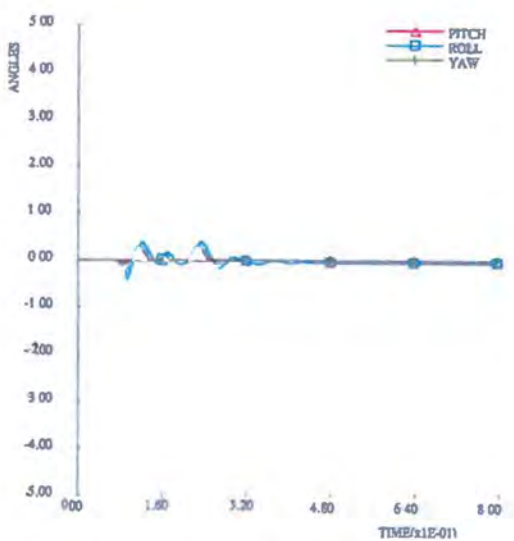
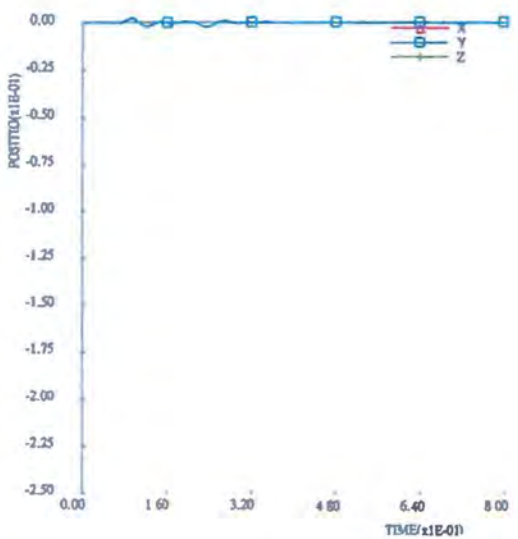
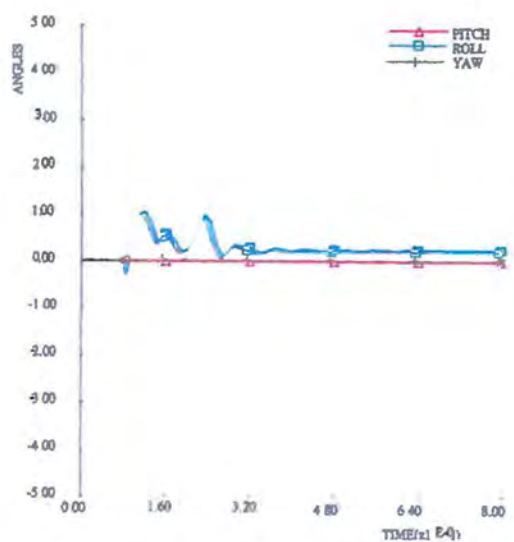
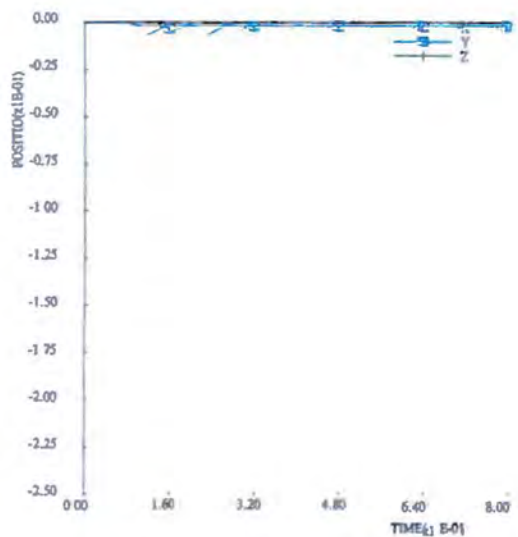
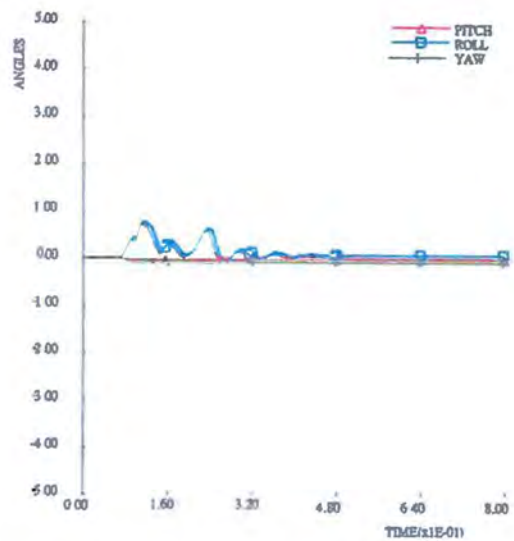
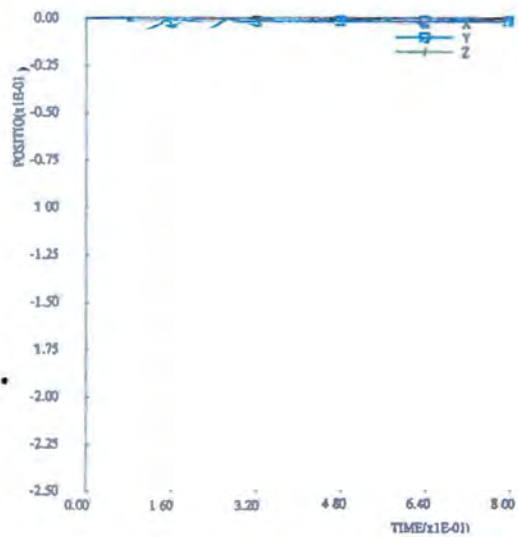


Afbeelding C7. Verloop van de krachten en momenten in de koppeling tussen de elementen 12/13, 13/14 en 14/15 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de lichte personenauto tegen de halve stalen STEP-barrier, stijfstand 1333 mm.





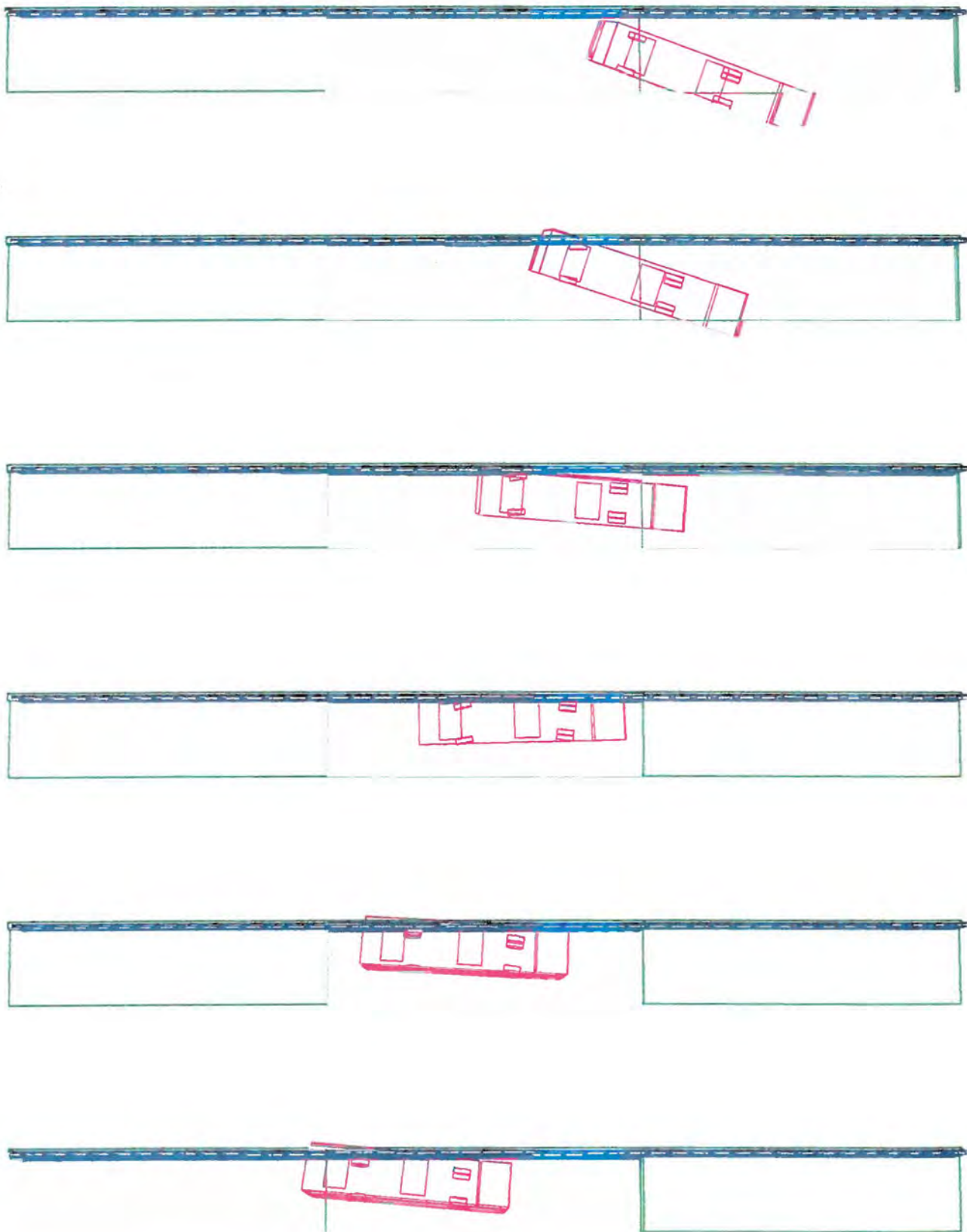
Afbeelding C8 · Verloop van de krachten en momenten in de vier stijlen van element 14 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de lichte personenauto tegen de halve stalen STEP-barrière, stijlfstand 1333 mm.



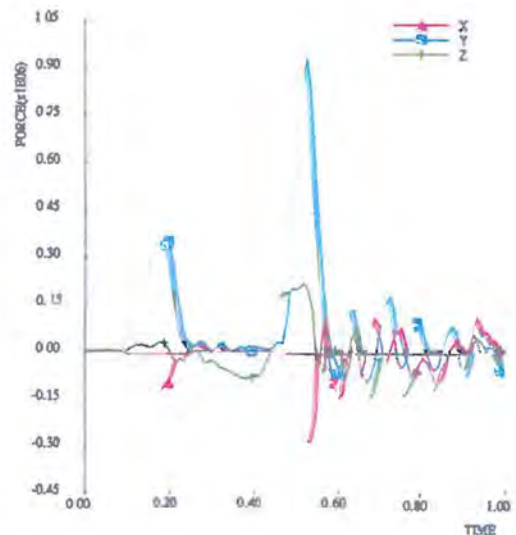
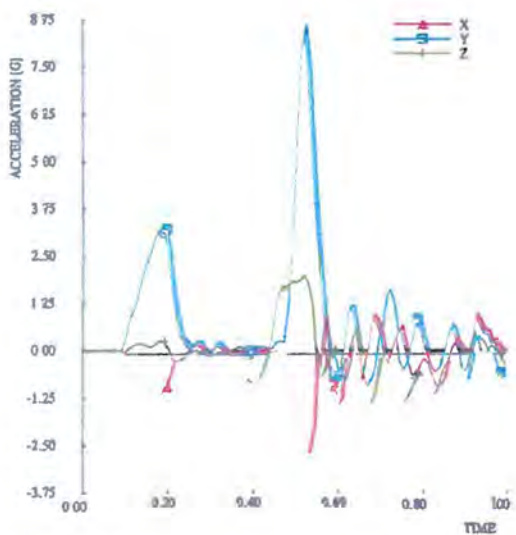
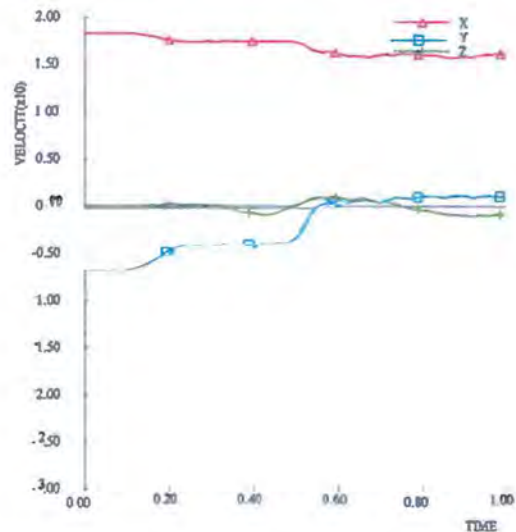
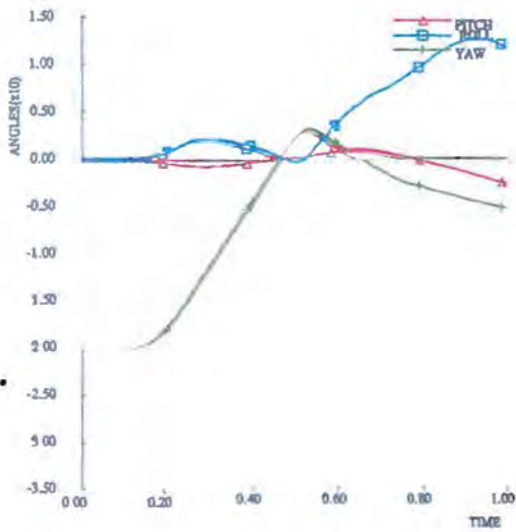
Afbeelding C9. Verloop van de uitbuiging van de elementen 13, 14 en 15 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de lichte personenauto tegen de halve stalen STEP-barrier, slijfstand 1333 mm.

**Simulatie met de bus tegen de halve stalen STEP-barrier met stijlafstand 1.333 mm.**

- D1. *Overzicht aanrijding met de bus tegen de halve stalen STEP-barrier, stijlafstand 1.333 mm.*
- D2. *Verloop van de roll-, pitch- en yawhoek van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding tegen de halve stalen STEP-barrier, stijlafstand 1.333 mm.*
- D3. *Verloop van de snelheid tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de halve stalen STEP-barrier, stijlafstand 1.333 mm.*
- D4. *Verloop van de vertragingen in het zwaartepunt van bus tegen de tijd tijdens de aanrijding met de lichte personenauto tegen de halve stalen STEP-barrier, stijlafstand 1.333 mm.*
- D5. *Verloop van de krachten in het zwaartepunt van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding met de lichte personenauto tegen de halve stalen STEP-barrier, stijlafstand 1.333 mm.*
- D6. *Verloop van de krachten en momenten in de koppeling tussen de elementen 13/14, 14/15 en 15/16 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de halve stalen STEP-barrier, stijlafstand 1.333 mm.*
- D7. *Verloop van de krachten en momenten in de drie stijlen van element 14 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de halve stalen STEP-barrier, stijlafstand 1.333 mm.*
- D8. *Verloop van de uitbuiging van de elementen 14,15 en 16 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de halve stalen STEP-barrier, stijlafstand 1.333 mm.*



Afbeelding D1. *Overzicht aanrijding met de bus tegen de halve stalen STEP-barrier, stijfstand 1333 mm.*



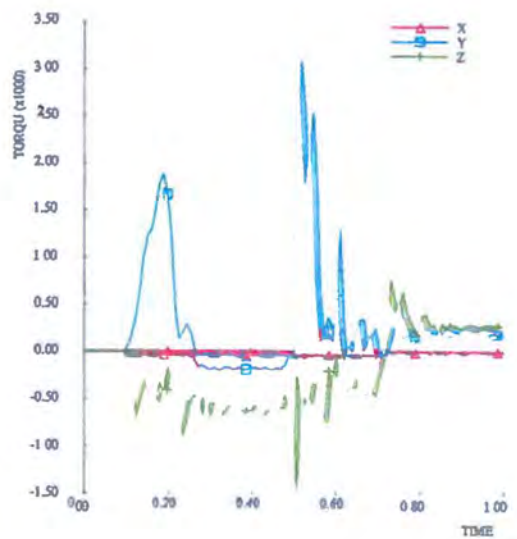
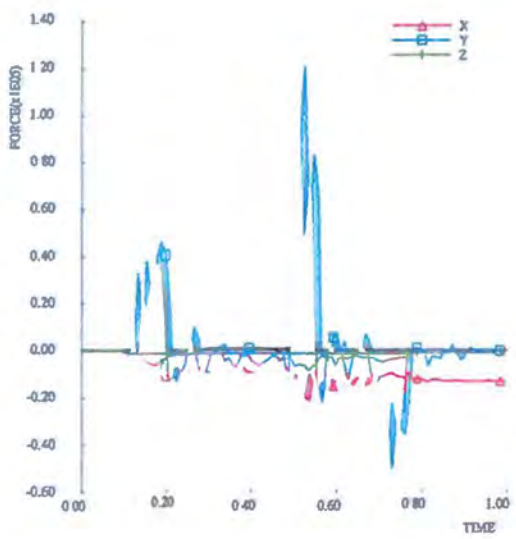
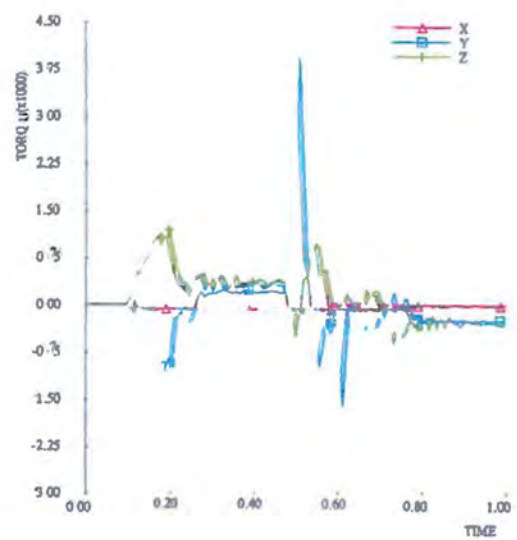
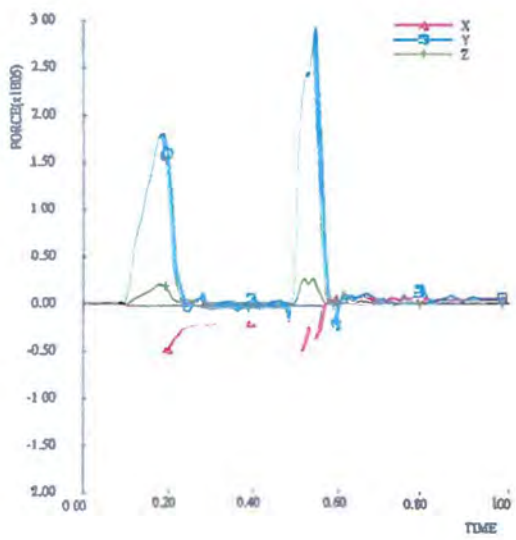
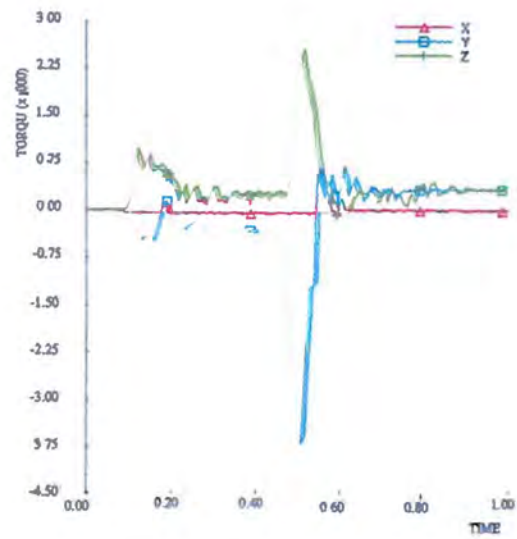
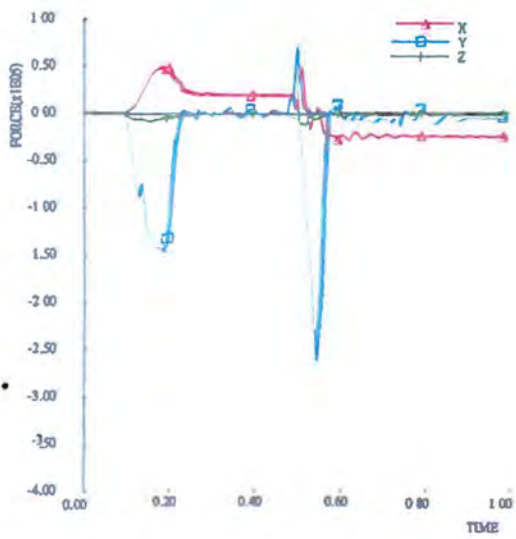
Afbeelding D2. Verloop van de roll-, pitch- en yawhoek van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding tegen de halve stalen STEP-barrier, stijfstand 1333 mm.

Afbeelding D3. Verloop van de snelheid tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de halve stalen STEP-barrier, stijfstand 1333 mm.

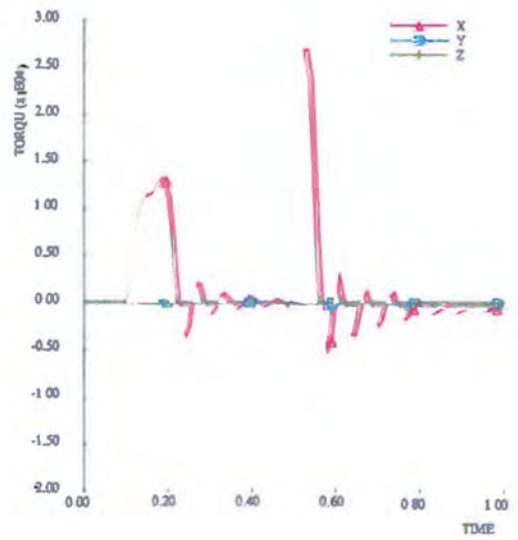
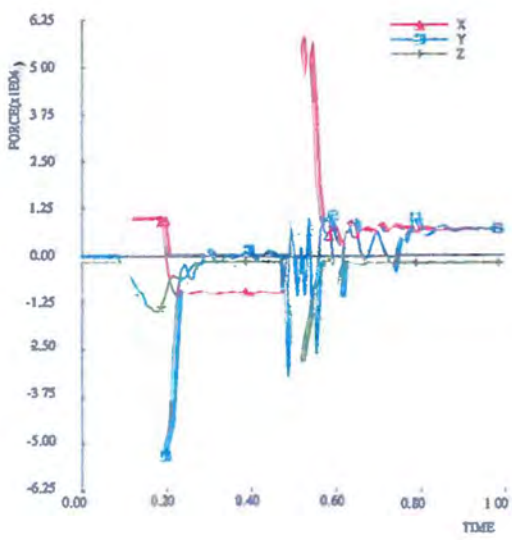
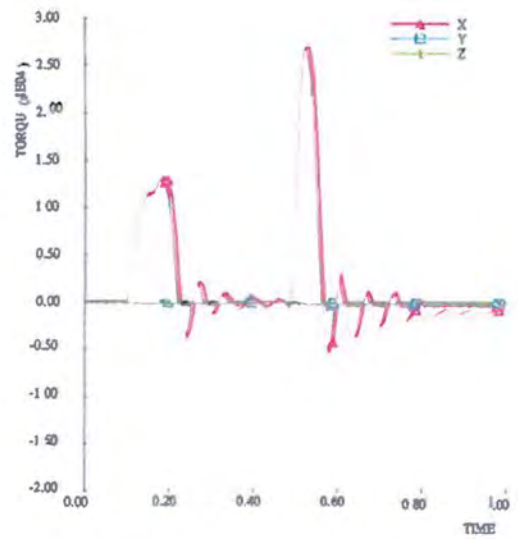
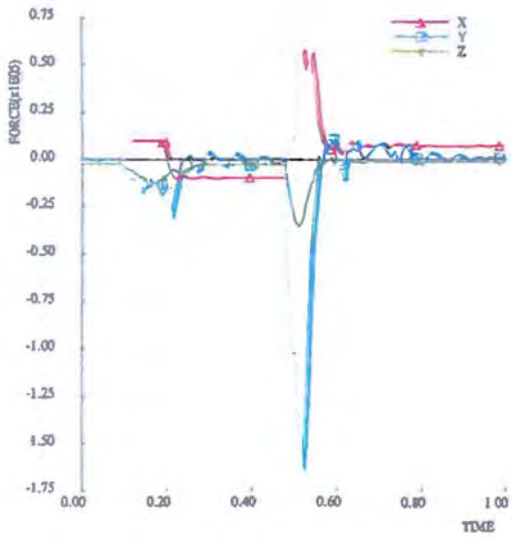
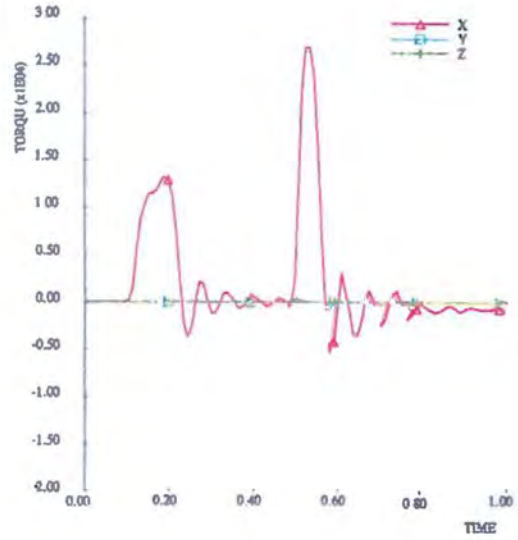
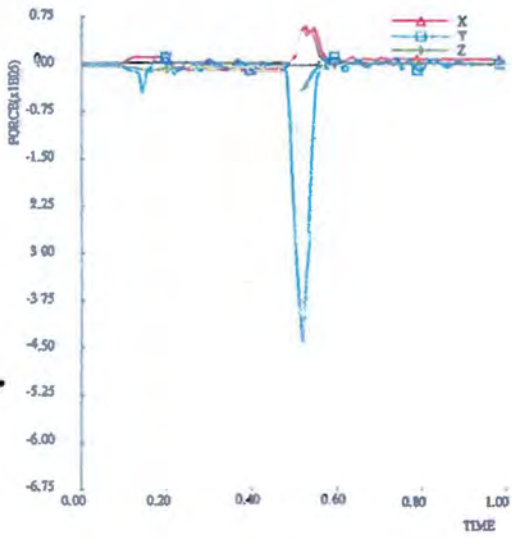
Afbeelding D4. Verloop van de vertragingen in het zwaartepunt van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de halve stalen STEP-barrier, stijfstand 1333 mm.

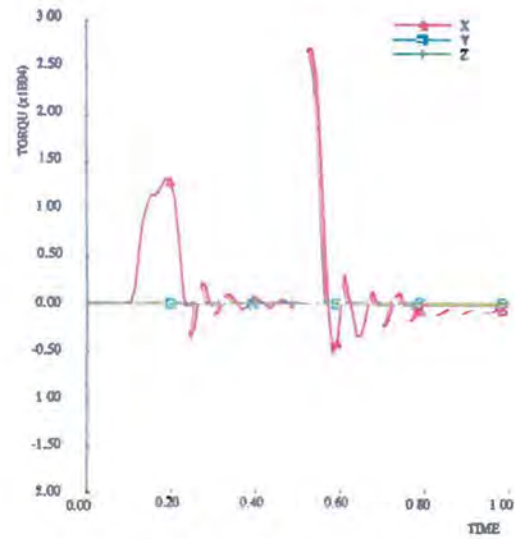
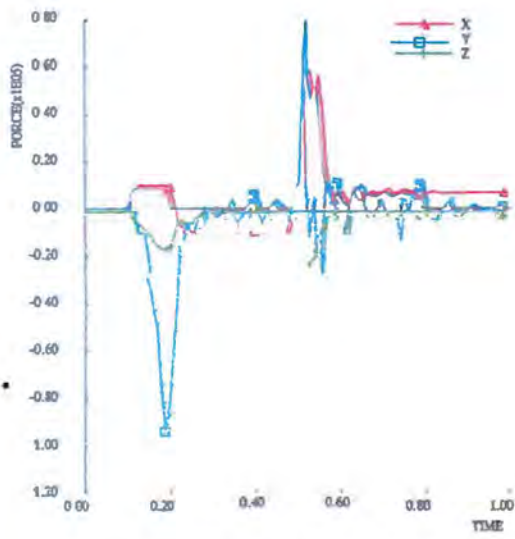
Afbeelding D5. Verloop van de krachten in het zwaartepunt van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de halve stalen STEP-barrier, stijfstand 1333 mm.



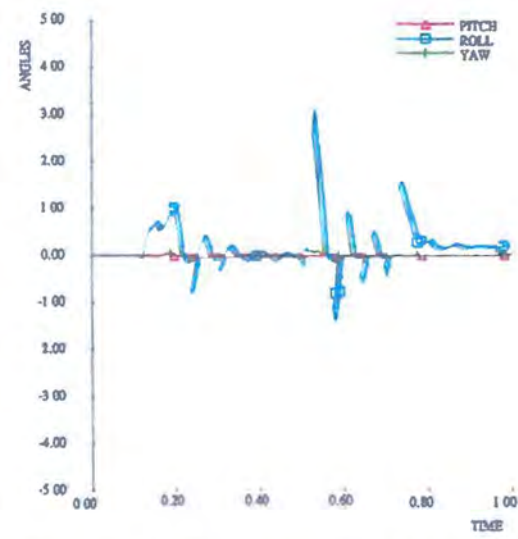
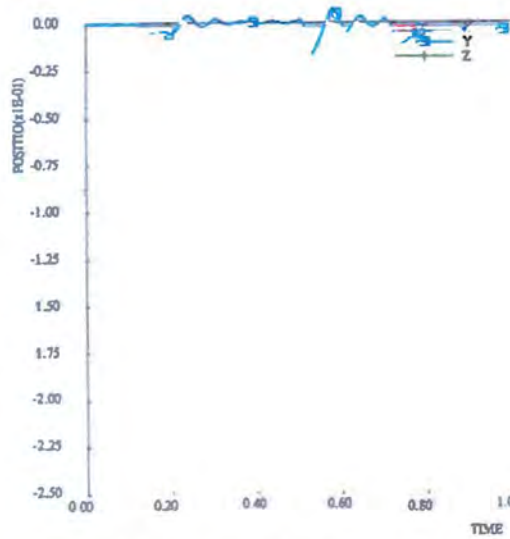
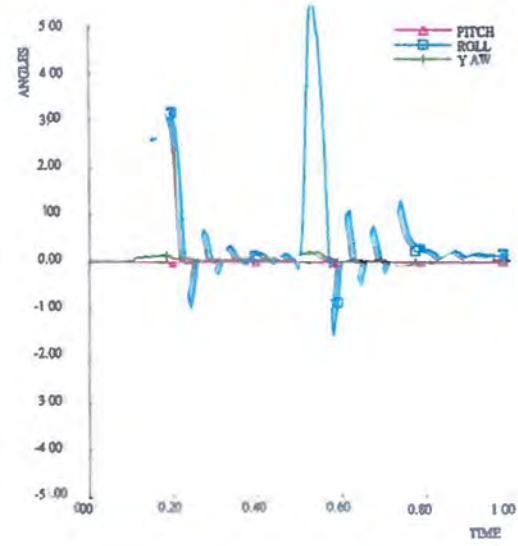
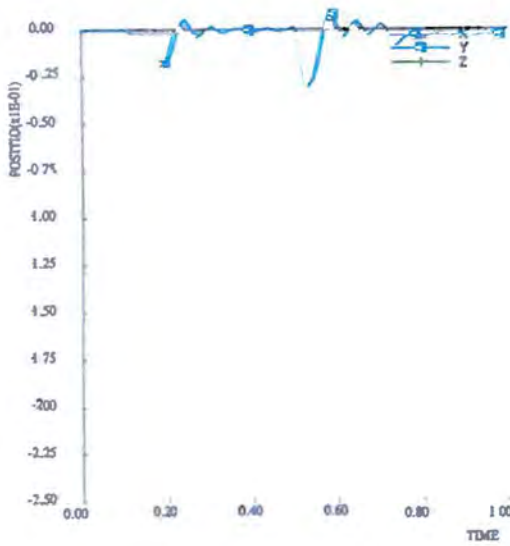
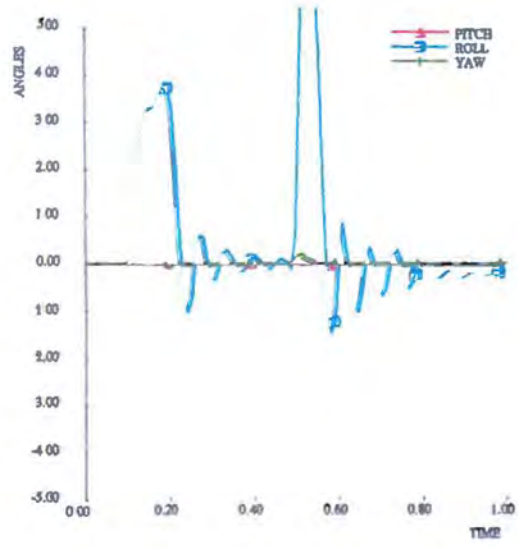
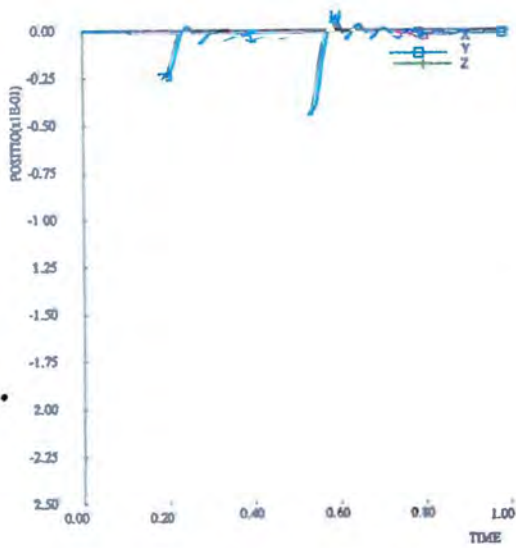


Afbeelding D6. Verloop van de krachten en momenten in de koppeling tussen de elementen 12/13, 13/14 en 14/15 tegen de rijs tijdens de aanrijding met de bus tegen de halve stalen STEP-barrière, snijafstand 1333 mm.





Afbeelding D7. Verloop van de krachten en momenten in de vier stijlen van element 14 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de halve stalen STEP-barrier, stijlfstand 1333 mm.



Afbeelding D8 - Verloop van de uitbuiging van de elementen 13, 14 en 15 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de twee stalen STEP-barreren, stijfstand 1333 mm.

## 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).

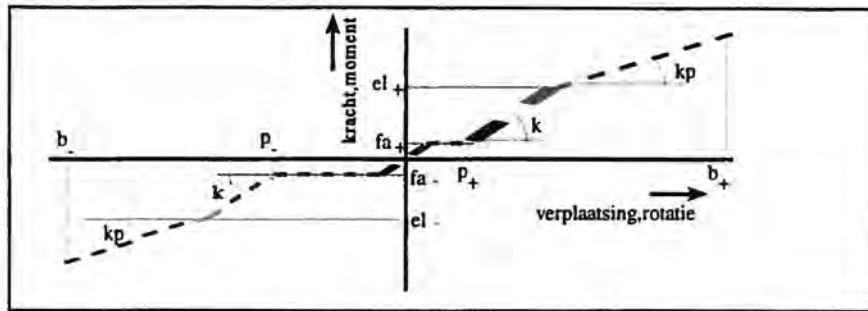
- *verbindingen ( DEFORMABLE ELEMENTS)*

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

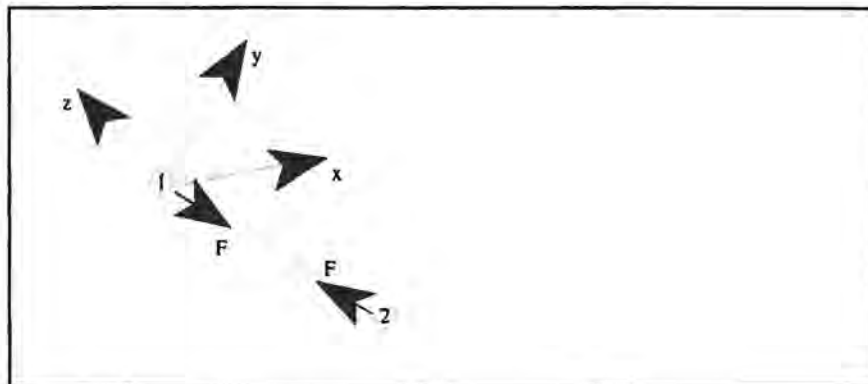
Iedere verbinding legt beperking op aan een aantal componenten van de relatieve beweging van de verbonden NODES. De ROD beperkt de verandering van de onderlinge afstand van de puntmassa's. De POINT verbinding beperkt alle zes de componenten, waarbij de te verbinden NODES op dezelfde plaats mogen liggen. 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).

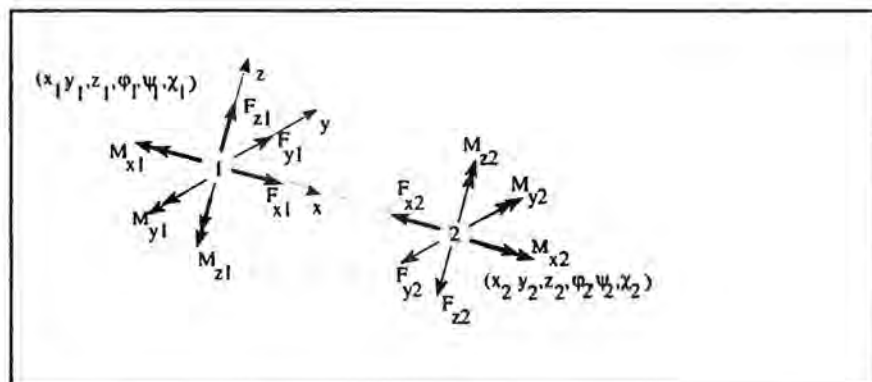


Afbeelding B1. Het kracht-verplaatsingsdiagram.

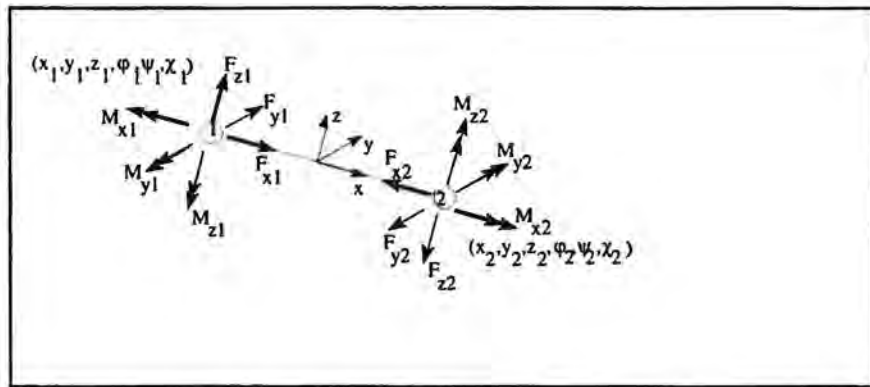
De vorm van een kracht-verplaatsing dan wel moment-rotatie diagram is gegeven in *Afbeelding B1*. De karakteristiek in *Afbeelding B1* wordt beschreven door de stijfheid ( $k$ ), de speling ( $p_+, p_-$ ), de spelingsweerstand ( $f_{a+}, f_{a-}$ ), de plasticiteitsgrens ( $e_{l+}, e_{l-}$ ), de plastische 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.

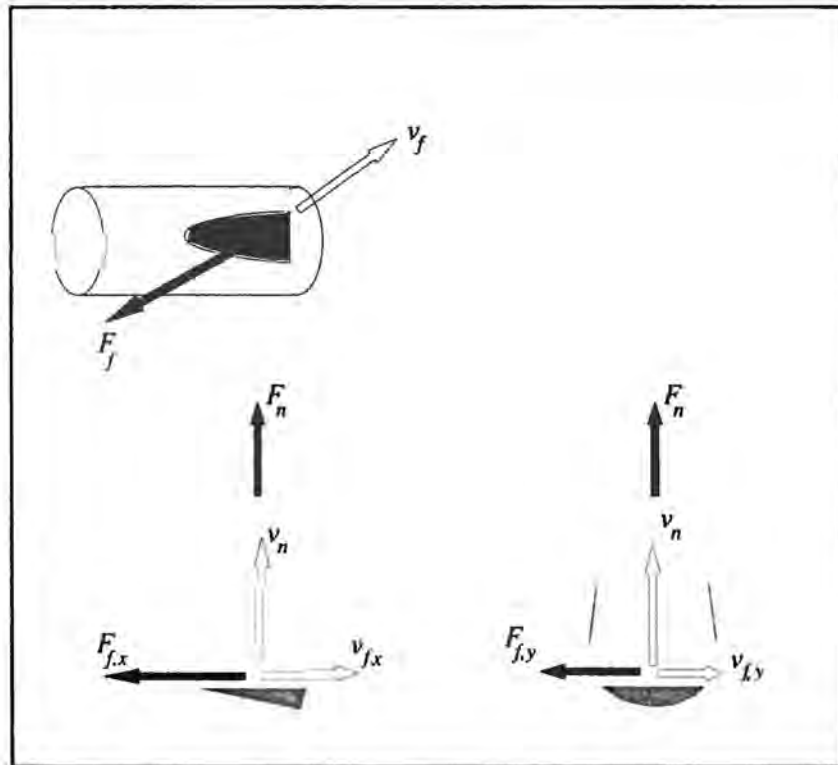
In *Afbeelding B5* betekent een 1 dat het programma contact tussen beide contactlichamen kent, een 0 betekent dat het programma geen contacten tussen beide contactlichamen kent. Er worden contactkrachten berekend wanneer het programma een gemeenschappelijk volume of intersectie heeft gevonden tussen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



De berekening van de contactkrachten gebeurt op basis van de polytrope 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 verbindingskrachten 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 rekestijd 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.

## Modellering modelcomponenten van de halve stalen STEP-barrier

### 1. Model-parameters

Bij de berekeningen zijn de volgende waarden gebruikt:

|                  |       |        |           |       |
|------------------|-------|--------|-----------|-------|
| Element          |       |        |           |       |
| oppervlak        | A     | 0,7974 | $10^{-2}$ | $m^2$ |
| traagheidsmoment | $I_x$ | 0,7389 | $10^{-7}$ | $m^4$ |
| traagheidsmoment | $I_y$ | 3,7350 | $10^{-4}$ | $m^4$ |
| traagheidsmoment | $I_z$ | 1,6916 | $10^{-4}$ | $m^4$ |

|                  |       |      |           |       |
|------------------|-------|------|-----------|-------|
| HEB 100 stijl    |       |      |           |       |
| oppervlak        | A     | 2,6  | $10^{-3}$ | $m^2$ |
| traagheidsmoment | $I_x$ | 4,5  | $10^{-6}$ | $m^4$ |
| traagheidsmoment | $I_y$ | 1,67 | $10^{-6}$ | $m^4$ |

#### Materiaaleigenschappen

|                      |               |     |        |                           |
|----------------------|---------------|-----|--------|---------------------------|
| treksterkte          | $\sigma_t$    | 400 | $10^6$ | $N/m^2$                   |
| stuijsterkte         | $\sigma_{st}$ | 400 | $10^6$ | $N/m^2$                   |
| afschuifsterkte      | $\tau$        | 240 | $10^6$ | $N/m^2$ (0,6 treksterkte) |
| vloeisterkte         | $\sigma_{vl}$ | 240 | $10^6$ | $N/m^2$                   |
| elasticiteitsmodulus | E             | 210 | $10^9$ | $N/m^2$                   |
| glijdingsmodulus     | G             | 081 | $10^9$ | $N/m^2$                   |

#### Bout M16 (4.6)

|           |       |                      |       |
|-----------|-------|----------------------|-------|
| oppervlak | $A_s$ | $1,57 \cdot 10^{-4}$ | $m^2$ |
|-----------|-------|----------------------|-------|

#### Materiaaleigenschappen

|                 |               |     |        |                           |
|-----------------|---------------|-----|--------|---------------------------|
| treksterkte     | $\sigma_t$    | 400 | $10^6$ | $N/m^2$                   |
| stuijsterkte    | $\sigma_{st}$ | 400 | $10^6$ | $N/m^2$                   |
| afschuifsterkte | $\tau$        | 240 | $10^6$ | $N/m^2$ (0,6 treksterkte) |
| vloeisterkte    | $\sigma_{vl}$ | 240 | $10^6$ | $N/m^2$                   |

### 2. Lineaire componenten van de POINT-verbinding tussen elementen

De POINT-verbinding neemt krachten op in de x-, y- en z-richting. Alleen in de x-richting is speling aanwezig. In de koppeling zitten 15 M16 4.6 bouten (Afbeelding 4).

Voor het uitrekenen van de benodigde verbindingsparameters 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  $A_s = 1,57 \cdot 10^{-4} m^2$ ,  $\tau = 240 \cdot 10^6 N/m^2$  en  $n = 15$  bouten,

$$F_{br} \text{ is } 565200 \text{ N.}$$

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

Uit de formule volgt, met  $A = 9,6 \cdot 10^{-5} m^2$ ,  $\sigma_{st} = 400 \cdot 10^6 N/m^2$  en  $n = 15$  bouten,  $F_{st}$  is 576000 N.

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

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

Uit de formule volgt, met  $A = 7,974 \cdot 10^3 \text{ m}^2$  (oppervlak dwarsdoorsnede van de barrier) en  $\sigma_{st} 400 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$ ,

$$F_{stb} \text{ is } 3189600 \text{ N.}$$

Uit de berekeningen blijkt, dat in de x-richting het afschuiven van de bouten in trekrichting de zwakste schakel is en niet de stuikbelasting op de bouten, 565200 N tegen 576000 N. In de y-, en z-richting is de verbinding veel sterker dan in de x-richting. In de simulatie wordt er dan ook van uitgegaan, dat de boutverbinding in deze richtingen 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 barrierdoorsnede samen, maatgevend. De maximale stuikbelasting bedraagt 3765600 N.

Voor de *plasticiteitsgrens* (el+ en el-) in de x-richting voor trek is de kleinste waarde aangehouden van de berekende waarden, dus  $5,7 \cdot 10^5 \text{ N}$ . Voor druk licht deze waarde veel hoger, te weten  $3,8 \cdot 10^6 \text{ N}$ . In y- en z-richting is de waarde  $1,7 \cdot 10^6 \text{ N}$  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  $F_{plx} = 5,7E5 \text{ N}$ ,  $F_{ply,z} = 1,7E6 \text{ N}$  en  $f_F = 0,01 \text{ m}$ ,  $k_{kx}$  is  $5,7E7 \text{ N/m}$ . en

$$k_{ky,z} \text{ is } 1,7E8 \text{ N/m.}$$

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  $m = 590 \text{ kg}$  (massa element),  $n = 6$  (aantal verbindingen per element) voor het 5,33 meter lange element en de stijfstand van 1,333 meter en met  $m = 640 \text{ kg}$  (massa element),  $n = 5$  (aantal verbindingen per element) voor het 6,00 meter lange element en de stijfstand van 2,000 meter en  $k_{kx} = 5,7E7 \text{ N/m}$  en  $k_{ky,z} = 1,7E8 \text{ N/m}$ ,

$$d_{kr(x)} \text{ is } 9,0E5 \text{ Ns/m}$$

$$d_{kr(y,z)} \text{ is } 1,5E6 \text{ Ns/m}$$

voor het 5,33 meter element en

$$d_{kr(x)} \text{ is } 8,5E5 \text{ Ns/m}$$

$$d_{kr(y,z)} \text{ is } 1,5E6 \text{ Ns/m}$$

voor het 6,00 meter element



Ten behoeve van numerieke stabijiteit in de simulatie is het gebruikelijk om voor de demping ééntiende van de kritische demping te nemen ( $d_c/10$ ). Deze waarde wordt over de zes of vijf, afhankelijk van de elementlengte, koppelingen per element verdeeld. Voor de demping in de berekening in de x-richting geldt de waarde  $d = 9,0E5 / 60 = 1,5E4$  Ns/m, en in de y- en z-richting  $d = 1,5E6 / 60 = 2,6E4$  Ns/m voor het 5,33 meter lange element en  $d = 8,5E5 / 50 = 1,7E4$  Ns/m; in de y- en z-richting  $d = 1,5E6 / 50 = 3,0E4$  Ns/m voor het 6,00 meter lange element.

De *breekverplaatsingen* (b+ en b-) in de y- en z-richting zijn groot genomen, omdat er vanuit wordt gegaan 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.

### 3. Rotatie componenten van de POINT-verbinding tussen elementen

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/m<sup>2</sup>,  $I_x = 0,7389 \cdot 10^7$  m<sup>4</sup>,  $I_y = 3,7350 \cdot 10^4$  m<sup>4</sup>,  $I_z = 1,6916 \cdot 10^4$  m<sup>4</sup>,  $e_x = 0,53$  m,  $e_y = 0,30$  m,  $e_z = 0,438$  m,

$$M_{plx} \text{ is } 43 \text{ Nm.}$$

$$M_{ply} \text{ is } 3,9E5 \text{ Nm.}$$

$$M_{plz} \text{ is } 1,2E5 \text{ Nm.}$$

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

De *rotatiestijfheidscoëfficiënt* (k) wordt bepaald uit de plasticiteitsgrens en de mogelijke elastische hoekverdraaiing  $\Phi$  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  $M_{plx} = 43$  Nm,  $M_{ply} = 3,9 \cdot 10^5$  Nm,  $M_{plz} = 1,2 \cdot 10^5$  Nm,  $\Phi_{Mx} = 1,0$  rad,  $\Phi_{My} = 0,033$  rad en  $\Phi_{Mz} = 0,033$  rad.

$$k_{mx} \text{ is } 43 \text{ Nm/rad.}$$

$$k_{my} \text{ is } 1,2E7 \text{ Nm/rad.}$$

$$k_{mz} \text{ is } 3,6E6 \text{ Nm/rad.}$$

De *demplingscoëfficiënten* (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  $m = 590$  kg (massa element),  $n = 6$  (aantal verbindingen per element) voor het 5,33 meter lange element en de stijfstand van 1,333 meter en met  $m = 640$  kg (massa element),  $n = 5$  (aantal verbindingen per element) voor het 6,00 meter lange element en de stijfstand van 2,000 meter en  $k_{mx} = 43$  Nm/rad,  $k_{my} = 1,2E7$  Nm/rad en  $k_{mz} = 3,6E6$  Nm/rad

$$d_{krx} \text{ is } 780 \text{ Nms/rad}$$

$$d_{kry} \text{ is } 4,1E5 \text{ Nms/rad}$$

$$d_{krz} \text{ is } 2,3E5 \text{ Nms/rad}$$

voor het 5,33 meter element en

$$d_{krx} \text{ is } 743 \text{ Nms/rad}$$

$$d_{kry} \text{ is } 3,9E5 \text{ Nms/rad}$$

$$d_{krz} \text{ is } 2,1E5 \text{ Nms/rad}$$

voor het 6,00 meter element.

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 zes of vijf, afhankelijk van de elementlengte, koppelingen per element verdeeld. Voor de demping in de berekening in x-richting geldt de waarde  $d = 780 / 60 = 13$  Ns/m., in y-richting  $d = 4,1E5 / 60 = 6,9E4$  Ns/m en z-richting  $d = 2,3E5 / 60 = 3,8E4$  Ns/m voor het 5,33 meter lange element en  $d = 742 / 50 = 15$  Ns/m, in y-richting  $d = 3,9E5 / 50 = 7,8E4$  Ns/m en z-richting  $d = 2,1E5 / 50 = 4,3E4$  Ns/m voor het 6,00 meter lange element.

De *breekverplaatsingen* ( $b+$  en  $b-$ ) om de x- en y-as zijn groot genomen, omdat er vanuit wordt gegaan, dat er geen breuk om de x-as (erg torsie-slap) 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. Lineaire componenten van de POINT-verbinding tussen stijl en schampkant

Afbeelding 2 geeft een overzicht van de wijze waarop de stijlen aan de schampkant worden bevestigd. De voetplaat van de stijl wordt met vier bouten M24 4 6 vastgemaakt aan de trapeziumvormige grondplaat. Deze grondplaat wordt aan de ankerbouten van de schampkant bevestigd. De HEB 100 stijl wordt aan de voetplaat gelast. Deze las is de zwakste schakel in de verbinding stijl-schampkant. Omdat de stijl bij de voetplaat afscheurt, wordt de verankering niet beschadigd tijdens een aanrijding. De lasverbinding stijl-voetplaat wordt in de simulatie door een POINT-verbinding vertegenwoordigd (afbeelding 4).

De POINT-verbinding neemt de krachten en de momenten op in x-, y- en z-richting. De aanwezige speling in de boutverbinding van de voetplaat is naar de POINT-verbinding in de stijlvoet verplaatst.

afschuiven stijlvoet  $F_{br} = A \tau$

Uit de formule volgt, met  $A = 2,6 \cdot 10^3 \text{ m}^2$  en  $\tau = 240 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$ ,

$$F_{br} \text{ is } 624000 \text{ N.}$$

trekkracht voetplaat  $F_t = A \sigma_t n$

Uit de formule volgt, met  $A = 2,6 \cdot 10^3 \text{ m}^2$ ,  $\sigma_t = 400 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$ ,

$$F_t \text{ is } 1040000 \text{ N.}$$

Voor de *plasticiteitsgrens* (el+ en el-) in x- en y-richting is de waarde  $6,2 \cdot 10^7 \text{ N}$ . Voor de z-richting is de waarde  $1,0 \cdot 10^8 \text{ N}$ .

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  $F_{plx} = 6,2E5 \text{ N}$ ,  $F_{ply} = 6,2E5 \text{ N}$ ,  $F_{plz} = 1,0E6 \text{ N}$  en  $f_F = 0,01 \text{ m}$ ,

$$k_{kx} \text{ is } 6,2E7 \text{ N/m.}$$

$$k_{ky} \text{ is } 6,2E7 \text{ N/m.}$$

$$k_{kz} \text{ is } 1,0E8 \text{ N/m.}$$

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  $m = 590 \text{ kg}$  (massa element),  $n = 6$  (aantal verbindingen per element) voor het 5,33 meter lange element en de stijfstand van 1,333 meter en met  $m = 640 \text{ kg}$  (massa element),  $n = 5$  (aantal verbindingen per element) voor het 6,00 meter lange element en de stijfstand van 2,000 meter en  $k_{kx} = 6,2E7 \text{ N/m}$ ,  $k_{ky} = 6,2E7 \text{ N/m}$  en  $k_{kz} = 1,0E8 \text{ N/m}$ ,

$$d_{krx} \text{ is } 9,4E5 \text{ Ns/m}$$

$$d_{kry} \text{ is } 9,4E5 \text{ Ns/m}$$

$$d_{krz} \text{ is } 1,2E6 \text{ Ns/m}$$

voor het 5,33 meter element en

$$d_{krx} \text{ is } 8,9E5 \text{ Ns/m}$$

$$d_{kry} \text{ is } 8,9E5 \text{ Ns/m}$$

$$d_{krz} \text{ is } 1,1E6 \text{ Ns/m}$$

voor het 6,00 meter element.

Ten behoeve van numerieke stabiliteit in de simulatie is het gebruikelijk om voor de demping ééntiende van de kritische demping te nemen ( $d_k/10$ ). Deze waarde wordt over de zes of vijf, afhankelijk van de elementlengte, koppelingen per element verdeeld. Voor de demping in de berekening in x-richting geldt de waarde  $d = 9,4E5 / 60 = 1,6E4 \text{ Ns/m}$ ., in y-richting  $d = 9,4E5 / 60 = 1,6E4 \text{ Ns/m}$ . en in z-richting  $d = 1,2E6 / 60 = 2,0E4 \text{ Ns/m}$  voor het 5,33 meter lange element en in x-richting  $d = 8,9E5 / 50 = 1,6E4 \text{ Ns/m}$ ., in y-richting  $d = 8,9E5 / 50 = 1,6E4 \text{ Ns/m}$ . en in z-richting  $d = 1,1E6 / 50 = 2,3E4 \text{ Ns/m}$  voor het 6,00 meter lange element.

De *breekverplaatsingen* (b+ en b-) in de y- en z-richting zijn groot genomen, omdat er vanuit wordt gegaan dat er geen breuk in die richtingen zal 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-sparing bedraagt 0,004 meter.

5. *Rotatie componenten van de POINT-verbinding tussen stijl en schampkant*  
In § 5.1 is aangenomen, dat in de stijl geen breuk om de z-as zal optreden. De grootte van deze waarden is niet zo belangrijk en is dan ook niet berekend maar overgenomen van de waarden om de y-as.

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

$$M_{pl(x,y)} = \sigma_v I_{x,y} / e$$

Uit de formule volgt dat, met  $\sigma_v = 240 \cdot 10^6 \cdot 1,3 \text{ N/m}^2$ ,  $I_x = 4,5 \cdot 10^6 \text{ m}^4$ ,  $I_y = 1,67 \cdot 10^6 \text{ m}^4$ ,  $e_x = 0,50 \text{ m}$ ,  $e_y = 0,50 \text{ m}$ ,

$$M_{plx} \text{ is } 3,0E4 \text{ Nm}$$

$$M_{ply} \text{ is } 1,5E4 \text{ Nm}$$

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

De *rotatiestijfheidscoëfficiënt* (k) wordt bepaald uit de plasticiteitsgrens en de mogelijke elastische hoekverdraaiing  $\Phi$ . De hoekverdraaiing om de x-as is op 0,175 rad, om de y-as 0,033 rad. De *rotatiestijfheidscoëfficiënten* worden berekend met behulp van de formule:

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

Uit de formule volgt dat, met  $M_{plx} = 3,0E4 \text{ Nm}$ ,  $M_{ply} = 1,5E4 \text{ Nm}$ ,  $\Phi_{Mx} = 1,0 \text{ rad}$ ,  $\Phi_{My} = 0,033 \text{ rad}$ .

$$k_{mx} \text{ is } 2,0E5 \text{ Nm/rad}$$

$$k_{my} \text{ is } 1,0E5 \text{ Nm/rad}$$

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

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

Uit de formule volgt dat, met  $m = 590$  kg (massa element),  $n = 6$  (aantal verbindingen per element) voor het 5,33 meter lange element en de stijfstand van 1,333 meter en met  $m = 640$  kg (massa element),  $n = 5$  (aantal verbindingen per element) voor het 6,00 meter lange element en de stijfstand van 2,000 meter en  $k_{mx} = 2,0E5$  Nm/rad,  $k_{my} = 1,0E5$  Nm/rad,

$$d_{krx} \text{ is } 5,3E4 \text{ Nms/rad}$$

$$d_{kry} \text{ is } 3,8E4 \text{ Nms/rad}$$

voor het 5,33 meter element en

$$d_{krx} \text{ is } 5,1E4 \text{ Nms/rad}$$

$$d_{kry} \text{ is } 3,6E4 \text{ Nms/rad}$$

voor het 6,00 meter element.

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 zes of vijf, afhankelijk van de elementlengte, koppelingen per element verdeeld. Voor de demping in de berekening in x-richting geldt de waarde  $d = 5,3E4 / 60 = 8,9E2$  Nms/rad., in y-richting  $d = 3,8E4 / 60 = 6,3E2$  Nms/rad voor het 5,33 meter lange element en in x-richting  $d = 5,1E4 / 50 = 1,0E3$  Nms/rad., in y-richting  $d = 3,6E4 / 50 = 7,2E2$  Nms/rad voor het 6,00 meter lange element.

De *breekverplaatsingen* ( $b+$  en  $b-$ ) om de x- en y-as zijn groot genomen, omdat er vanuit wordt gegaan, 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.

#### 6. Grootte wrijvingskrachten en wrijvingsmoment

De grootte van het wrijvingskrachten en wrijvingsmomenten is overgenomen uit het simulatieonderzoek (Van de Pol 1996).

In *Tabel 4.1* zijn de parameters van de POINT-verbinding tussen de elementen, die de invloed van de speling en de wrijving weergeven, opgenomen.

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

*Tabel 4.1 - Parameters van de POINT-verbinding tussen de elementen, die de invloed van de speling en de wrijving weergeven.*

In Tabel 4.2 zijn de parameters van de POINT-verbinding tussen de stijlen en de schampkant, die de invloed van de speling en de wrijving weergeven, opgenomen.

| Krachtcomponent | fa+   | p     | fa-    | p     |
|-----------------|-------|-------|--------|-------|
|                 | [N]   | [m]   | [N]    | [m]   |
| In x-as         | 2,4E4 | 0,004 | -2,4E4 | 0,004 |
| In y-as         | 2,4E4 | 0,004 | -2,4E4 | 0,004 |

Tabel 4.2. Parameters van de POINT-verbinding tussen de stijlen en de schampkant, die de invloed van de speling en de wrijving weergeven.

In Tabel 4.3 zijn de berekende parameters van de POINT-verbinding tussen de elementen opgenomen.

| Kracht component | k        | d         | el+   | b+    | el-    | b-    |
|------------------|----------|-----------|-------|-------|--------|-------|
|                  | [N/m]    | [Ns/m]    | [N]   | [m]   | [N]    | [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        | d         | el+   | b+    | el-    | b-    |
|                  | [Nm/rad] | [Nms/rad] | [Nm]  | [rad] | [Nm]   | [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 |

Tabel 4.3. Berekende parameters van de POINT-verbinding tussen de elementen.

Zie voor de verklaring van de gebruikte parameteraanduidingen Bijlage 3.

In de onderstaande tabel zijn de berekende parameters van de POINT-verbinding tussen de stijlen en de schampkant opgenomen.

| Kracht component | k        | d         | el+   | b+    | el-    | b-    |
|------------------|----------|-----------|-------|-------|--------|-------|
|                  | [N/m]    | [Ns/m]    | [N]   | [m]   | [N]    | [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        | d         | el+   | b+    | el-    | b-    |
|                  | [Nm/rad] | [Nms/rad] | [Nm]  | [rad] | [Nm]   | [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 |

Tabel 4.4. *Berekende parameters van de POINT-verbinding tussen de stijlen en de schampkant.*

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

#### *7. Testsimulaties*

Er zijn testsimulaties met de personenauto en de vrachtauto uitgevoerd om vast te stellen in hoe verre de 'vertaling' van de sterkte van de koppeling overeenkomt met de 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 deze reden zijn de (rotatie)stijfheidscoëfficiënten kleiner gekozen.

De uiteindelijk in de simulatie gebruikte parameters van de POINT-verbinding tussen de elementen zijn in *Tabel 4.5* samengevat.

| Kracht component | k     | d      | el+   | b+   | el-    | b-    |
|------------------|-------|--------|-------|------|--------|-------|
|                  | [N/m] | [Ns/m] | [N]   | [m]  | [N]    | [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        | d         | el+   | b+    | el-    | b-    |
|------------------|----------|-----------|-------|-------|--------|-------|
|                  | [Nm/rad] | [Nms/rad] | [Nm]  | [rad] | [Nm]   | [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  |

Tabel 4.5. De uiteindelijke in de simulatie gebruikte parameters van de POINT-verbinding tussen de elementen.

In Tabel 4.6 zijn de parameters van de POINT-verbinding tussen de elementen, die de invloed van de speling en de wrijving weergeven, opgenomen.

| Kracht component | fa+   | p     | fa-    | p     |
|------------------|-------|-------|--------|-------|
|                  | [N]   | [m]   | [N]    | [m]   |
| in x-as          | 7,4E4 | 0,004 | -7,4E4 | 0,004 |

| Moment component | fa+   | p     | fa-    | p     |
|------------------|-------|-------|--------|-------|
|                  | [Nm]  | [rad] | [Nm]   | [rad] |
| om z-as          | 3,5E4 | 0,002 | -3,5E4 | 0,002 |

Tabel 4.6. Parameters van de POINT-verbinding tussen de elementen, die de invloed van de speling en de wrijving weergeven.

Zie voor de verklaring van de gebruikte parameteraanduidingen Bijlage 3.