

## Werking van ankerbouten in enkele soorten ondergrond

*Een simulatie-onderzoek naar verschillen in weerstand en sterkte en de invloed daarvan op de werking van een barrier*

R-96-53

Ing. W.H.M. van de Pol

Leidschendam, 1997

Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV

## Documentbeschrijving

Rapportnummer:	R-96-53
Titel	Werking van ankerbouten in enkele soorten ondergrond
Ondertitel	Een simulatie-onderzoek naar verschillen in weerstand en sterkte en de invloed daarvan op de werking van een barrier
Auteur(s)	Ing. W.H.M. van de Pol
Plv. onderzoeksmanager:	Ir. L.T.B. van Kampen
Projectnummer SWOV:	55.415
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, simulation, program (computer), car, lorry, collision, anchorage, design (overall design), deflection.
Projectinhoud:	In 1995 heeft de SWOV een simulatie-onderzoek uitgevoerd naar de werking van de stalen RWS-barriers zoals toegepast op het proefterrein van de Rijksdienst voor het Wegverkeer. Tijdens het modelleren van de verankering in het model zijn enkele onzekerheden naar voren gekomen over het gedrag van de ankerbouten onder belasting in verschillende soorten wegdek. Om meer inzicht te verkrijgen in de relatie tussen de sterkte- en stijfheidseigenschappen van de ankerbouten en de uitkomst daarvan op een aanrijding, zijn aanvullende simulaties verricht. Dit rapport doet hiervan verslag.
Aantal pagina's:	20 pp. + 178 pp.
Prijs:	f 163,-
Uitgave.	SWOV, Leidschendam, 1997

Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV



Stichting  
Wetenschappelijk    Postbus 1090  
Onderzoek            2260 BB Leidschendam  
Verkeersveiligheid    Duindoorn 32  
SWOV                 telefoon 070-3209323  
                             telex 070-3201261

## Samenvatting

In opdracht van de Bouwdienst van Rijkswaterstaat te Apeldoorn zijn door de SWOV simulaties verricht om in verschillende soorten wegdek de werking te beoordelen van ankerbouten in de stalen RWS-barrier.

De opdracht was het gevolg van gebleken onzekerheden tijdens het modelleren van deze verankering, bij een vorige opdracht die in 1995 werd uitgevoerd (de werking van de stalen RWS-barriers zoals toegepast op het proefterrein van de RDW).

Om de werking van de verankering in verschillende soorten ondergrond (wegdek) te simuleren zijn bij de onderhavige opdracht de horizontale en verticale vervorming van de verankering gevarieerd. Tevens werd de locatie van de verankering op een barrier-element gevarieerd.

Er zijn vooral simulaties uitgevoerd met een bus (TB52) en één simulatie met een personenauto (TB11).

Bij de simulatie met de personenauto gedraagt de barrier zich ongeacht het wegdek als een starre constructie, waardoor de ASI-waarde hoger ligt dan de vanuit veiligheidsredenen toegestane waarde ( $ASI \leq 1.4$ ).

Bij de simulatie met de bus wordt de barrier niet doorbroken, ondanks het feit dat er één of meer verankeringen bezwijken. Bij verkleining van de verticale bewegingsvrijheid van de ankerbouten (zoals bij een betonnen wegdek) wordt duidelijk een ongunstiger resultaat bereikt. Dat is ook het geval indien de verankering verspreid over een barrier-element wordt aangebracht in plaats van geconcentreerd op één uiteinde.

Aanbevolen wordt dan ook de verankering van een element op één plaats te concentreren.

Uit de simulaties blijkt dat een gecontroleerde toegelaten verplaatsing van de ankerbouten door de ondergrond een gunstig effect heeft op de sterkte van de verankering.

Aangezien de juiste keuze van waarden in het computermodel voor zijdelingse (horizontale) vervorming van de verankering niet op basis van beschikbare literatuur kon worden gerealiseerd, verdient het aanbeveling om een standaard verankering, vier ankerbouten M 24 4.6, zowel in beton als in ZOAB, zijdelings te beproeven.

## Summary

### **Performance of anchor bolts on various types of road surface**

At the request of the Civil Engineering Division of the Department of Public Works (RWS) in Apeldoorn, SWOV Institute for Road Safety Research carried out simulations to assess the performance of anchor bolts used in the steel barriers installed by RWS on various types of road surface. The study was commissioned in response to doubts raised during the modelling of these bolts for a previous simulation carried out in 1995 (the steel RWS barrier applied to the test track of the RDW Department of Roads Transport).

In order to simulate the performance of the anchor unit on various types of road surface, SWOV decided to vary their horizontal and vertical modelling. The location of the anchor unit on a barrier element was also varied

Most of the simulations were carried out using a bus (TB52); one simulation was carried out using a passenger car (TB11)

During the simulation using the passenger car, the barrier acted as a rigid construction, regardless of the type of road surface involved. This raised the ASI value above the permitted safety value of  $ASI \leq 1.4$ .

During the simulation using the bus, the barrier was not breached, despite the fact that one or more bolts gave way. When the vertical freedom of movement of the anchor bolts was reduced (for example on a concrete road surface), this clearly gave a less favourable result. The same thing occurred when the anchor units were fixed at intervals across the barrier element rather than being concentrated at one end.

It is therefore recommended that the anchoring of an element is concentrated in a single place.

The simulations also showed that a controlled relocation of anchor bolts along the road surface improves their performance.

Since the correct choice of values for the oblique (horizontal) remodelling of the anchor units could not be realised on the computer model on the basis of available literature, it is recommended that a standard anchor unit (four M 24 4.6 anchor bolts) be tested obliquely, both on a concrete and on an open asphaltic concrete road surface.

# Inhoud

1.	<i>Inleiding</i>	6
2.	<i>Probleemstelling</i>	7
3.	<i>Opzet en uitvoering van het onderzoek</i>	8
4.	<i>De RWS-barrier</i>	10
4.1.	Model parameters	10
4.2.	Testsimulaties	10
5.	<i>Resultaten simulaties</i>	12
5.1.	Simulatie met de lichte personenauto, elementverankering aan één uiteinde (simulatie A)	12
5.2.	Simulatie met de bus, elementverankering aan één uiteinde (simulatie B t/m F)	13
5.3.	Simulatie met de bus, elementverankering aan één uiteinde (simulatie G)	16
5.4.	Simulatie met de bus, elementverankering aan twee uiteinden (simulatie H)	16
6.	<i>Bespreking resultaten</i>	18
7.	<i>Conclusies en aanbevelingen</i>	20
	<i>Literatuur</i>	21
	<i>Bijlage 1 t/m 3</i>	23

## 1. Inleiding

De Bouwdienst van Rijkswaterstaat (DIW) te Apeldoorn had de SWOV in 1995 opdracht verleend voor het uitvoeren van een simulatie-onderzoek, waarvan de resultaten zijn neergelegd in het SWOV-rapport *De stalen RWS-barrier toegepast op het proefterrein van de RDW* (Van de Pol, 1995).

De bij dat onderzoek gesimuleerde RWS-barrier heeft een lengte van 174 meter, 29 elementen van 6 meter. De eerste drie elementen en de laatste drie elementen zijn aan het wegdek verankerd door één verankering per element. Elke verankering bestaat uit vier M24 4,6 ankerbouten en bevindt zich op 400 mm van een uiteinde van het element.

Tijdens het modelleren van de verankering in het model voor dit reeds uitgevoerde onderzoek waren enkele onzekerheden naar voren gekomen over het gedrag van de ankerbouten onder belasting in verschillende soorten wegdek.

In samenspraak met de heer F. Verwey en de heer R. Hendriks van de Bouwdienst Apeldoorn, alsmede de heer Th. Huisman van de Bouwdienst Zoetermeer, leek het gewenst om door middel van enkele aanvullende simulaties meer inzicht te verkrijgen in de relatie tussen de sterkte- en stijfheidseigenschappen van de ankerbouten en de uitkomst daarvan op een aanrijding.

## 2. Probleemstelling

Tijdens het modelleren van de verankering van de stalen RWS-barrier in verschillende typen ondergrond kwam het volgende probleem naar boven: hoe gedraagt de ankerbout zich als deze in het 'wegdek' is ingelijmd?

Als het 'wegdek' star is, zoals bijvoorbeeld een betonnen schampkant van een viaduct, gedraagt de ankerbout zich naar alle waarschijnlijkheid anders dan wanneer het 'wegdek' meer flexibel is, bijvoorbeeld in het zogenoemde ZOAB (zeer open asfaltbeton). In de starre ondergrond beweegt de ankerbout maar (zeer) weinig, voordat er breuk optreedt. In de meer flexibele ondergrond zal er meer beweging van de ankerbout door de ondergrond optreden, dan wel de ondergrond zelf zal meer vervormen voordat er breuk optreedt.

Ook de plaats van de verankering van een element kan invloed hebben op het gedrag van de ankerbouten. Bij de elementen van de stalen RWS-barrier is de verankering, vier ankerbouten M 24 4.6, op 400 mm van een uiteinde van het element geplaatst. Nagegaan moet worden of een meer gelijke verdeling van de ankerbouten, twee aan elk uiteinde van het element, niet een betere oplossing is dan de gekozen oplossing, vier aan één uiteinde. De verankeringskrachten worden met de eerstgenoemde optie meer gelijkmatig over de elementen (barrierlengte) verdeeld.

Tot op heden zijn bij de SWOV drie series trekproeven op ankerbouten bekend. Bij één van de serie proeven waren de ankerbouten, behalve in beton, ook in asfalt verlijmd. Het grootste verschil tussen beton en asfalt is het bezwijken van de verlijming van de ankerbout. Het beton breekt/scheurt, terwijl het asfalt eerst uitbolt; het vervormt plastisch. De verbinding blijft langer intact.

Alle uitgevoerde trekproeven zijn ook inderdaad uitsluitend *trek*proeven. Proeven waarbij de ankerbouten zijdelings zijn belast, zijn vanuit de literatuur niet bekend. Het gedrag van een ankerbout onder een belasting in zijdelingse richting, zoals dit wordt 'vertaald' in een computersimulatie, kan niet door proefgegevens gestaafd worden. Bij de in het onderhavige onderzoek uitgevoerde simulaties wordt het zijdelingse gedrag van de ankerbouten 'vertaald' door vijf verschillende grootten van (horizontale) vervorming.

### 3. Opzet en uitvoering van het onderzoek

Voorgesteld wordt om de simulaties uit te voeren met de 13 tons bus bij een inrijnsnelheid van 70 km/uur en een inrijhoek van 20 graden. Deze simulatie geeft aansluiting met de proeven op ware schaal, uitgevoerd door het Laboratoire d'essais Inrets Equipements de la Route (L.I.E.R.) te Lyon in Frankrijk (Quincy 1996a t/m 1996c), proef TB 51 uit de NEN-EN 1317 norm. Tevens wordt een simulatie met de lichte personenauto uitgevoerd, TB 11 uit de NEN-EN norm. Als barrier wordt de stalen RWS barrier uit (Van de Pol, 1996) gesimuleerd.

Bij de 'vertaling' van de werking van de ankerbouten (in de computer-simulatie), wordt het uitgangspunt gehanteerd dat beton weinig of geen vervorming in de drie belastingsrichtingen toelaat. ZOAB daarentegen laat naar verwachting wel enige vervorming in de drie verplaatsingsrichtingen toe. Deze vervorming kan voor een (groot) deel uit plastische vervorming bestaan. Dit betekent dat de verankering (veel) langer intact blijft tijdens een aanrijding.

De simulaties worden uitgevoerd met vijf verschillende groottes van 'doorploegen' van de ankerbouten door de ondergrond. De geselecteerde verplaatsingen zijn 0 mm, 5 mm, 10 mm, 15 mm en 20 mm in horizontale richting en 10 mm en 30 mm in verticale richting. Bij deze geselecteerde verplaatsingen wordt aangenomen, dat de 10, 15 en 20 mm in horizontale richting en de 30 mm in verticale richting voor een meer plastische ondergrond staat en de andere maten voor een meer starre ondergrond. Enige zettings- en elastische vervorming is altijd wel aanwezig. Deze vervorming is op 5 mm aangenomen.

Uit de hierboven genoemde proeven op ware schaal in Frankrijk blijkt dat de ankerbouten in verticale richting uit het beton getrokken worden, maar dat in horizontale richting de verbinding daardoor nog niet is verbroken. De ankerbouten zitten nog steeds in het boorgat. Er kunnen dus nog altijd krachten en momenten in langs- en dwarsrichting (van de barrier) worden overgebracht.

De plaats van de vier ankerbouten aan een uiteinde van het element wordt veranderd in tweemaal ankerbouten aan beide uiteinden van het element. De afstand van de ankerbouten tot het uiteinde van het element blijft 400 mm.

De simulaties worden uitgevoerd met een lichte personenauto (TB 11) en een 13 tons bus (TB 51). In onderstaande tabel zijn tevens de inrijcondities gegeven.

Voertuig	Inrijnsnelheid [km/uur]	Inrijhoek [grd]	Massa [kg]	Botsenergie [kNm]
TB11	100	20	900	41
TB51	70	20	13000	287



De eerste serie simulaties bestaat uit vijf simulaties met de bus (simulaties B t/m F) en één simulatie met de lichte personenauto (simulatie A).

De simulaties vinden plaats met de barrier, waarvan de elementen aan één uiteinde zijn verankerd. Een tweede serie simulaties omvat dezelfde simulaties als hierboven, maar de verticale verplaatsing wordt van 30 mm teruggebracht naar 10 mm (simulatie G). Een derde serie simulaties omvat dezelfde simulaties als uit serie één, maar de elementen zijn aan de twee uiteinden van de elementen verankerd (simulatie H).

In principe zijn drie series van vijf simulaties met de bus en één simulatie met de lichte personenauto voorgenomen, in totaal zestien simulaties.

De simulatie-opstelling is weergegeven in *Afbeelding 3* (zie *Bijlage 1*).

## 4. De RWS-barrier

De datasets van de RWS-barrier die in dit simulatie-onderzoek worden gebruikt, zijn overgenomen uit het verificatie-onderzoek (Van de Pol, 1996). Deze datasets zijn in dat onderzoek aan de hand van resultaten uit proeven op ware schaal geverifieerd.

### 4.1. Model-parameters

Bij de berekeningen zijn de volgende waarden gebruikt:

Element				
oppervlak	A	$1,1193 \cdot 10^2$	$m^2$	
traagheidsmoment	$I_x$	$1,3435 \cdot 10^7$	$m^4$	*
traagheidsmoment	$I_y$	$6,7909 \cdot 10^4$	$m^4$	
traagheidsmoment	$I_z$	$3,0757 \cdot 10^4$	$m^4$	
Materiaaleigenschappen				
treksterkte	$\sigma_t$	$400 \cdot 10^6$	$N/m^2$	
stuksterkte	$\sigma_{st}$	$400 \cdot 10^6$	$N/m^2$	
afschuifsterkte	$\tau$	$240 \cdot 10^6$	$N/m^2$	(0,6 treksterkte)
vloeisterkte	$\sigma_{vl}$	$240 \cdot 10^6$	$N/m^2$	
elasticiteitsmodulus	E	$210 \cdot 10^9$	$N/m^2$	
glijdingsmodulus	G	$81 \cdot 10^9$	$N/m^2$	
Bout M16 (4.6)				
oppervlak	$A_s$	$1,57 \cdot 10^{-4}$	$m^2$	
Materiaaleigenschappen				
treksterkte	$\sigma_t$	$400 \cdot 10^6$	$N/m^2$	
stuksterkte	$\sigma_{st}$	$400 \cdot 10^6$	$N/m^2$	
afschuifsterkte	$\tau$	$240 \cdot 10^6$	$N/m^2$	(0,6 treksterkte)
vloeisterkte	$\sigma_{vl}$	$240 \cdot 10^6$	$N/m^2$	

### 4.2. Testsimulaties

Deze testsimulaties met de personenauto en de vrachtauto zijn uitgevoerd om vast te stellen in hoeverre de 'vertaling' van de sterkte van de koppeling overeenkomt met 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

\* Het traagheidsmoment ( $I_z$ ) van het element om zijn lengteas is moeilijk vast te stellen. Het is een open constructie met vier dwarsverbindingen in de voet. De invloed van deze dwarsverbindingen is alleen via een proefopstelling goed vast te stellen. De invloed van de dwarsverbindingen is kennelijk veel groter dan in eerste instantie aangenomen. De dempingscoëfficiënten moeten wat lager gekozen worden, om de numerieke stabiliteit in de simulatie voldoende groot te maken. Om dezelfde reden zijn de (rotatie)stijfheidscoëfficiënten kleiner gekozen.

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

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

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

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

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

## 5. Resultaten simulaties

De RWS-barrier is met elk element aan het wegdek verankerd door middel van vier M24 4.6 ankerbouten per element. De barrierlengte is 96 meter, zestien elementen van zes meter (*Afbeeldingen 1 en 2*).

Van de zestien voorgenomen simulaties zijn er uiteindelijk acht uitgevoerd (simulaties A t/m H). De voorgenomen simulatie met de personenauto is uitgevoerd en ook de eerste serie simulaties met de bus is volledig uitgevoerd. De tweede serie simulaties is na één simulatie afgebroken, omdat het resultaat van deze simulatie negatief was.

In onderstaande tabel zijn de uitgevoerde simulaties nog eens samengevat.

		Bus			Personenauto
Verplaatsing	mm				
Horizontaal	0	B			
	5	C			A
	10	D		H	
	15	E			
	20	F	G		
Verticaal	10		G		
	30	B t/m F	H		A
Verankering element					
een uiteinde		B t/m F			A
twee uiteinden			H		

### 5.1. Simulatie met de lichte personenauto, elementverankering aan één uiteinde (simulatie A)

In de simulaties met de lichte personenauto is de speling tussen de ankerbouten en de barrier niet veranderd. De 'bewegingsvrijheid' (het doorploegen) van de ankerbouten in de ondergrond is op 5 mm genomen. In verticale richting is de 'bewegingsvrijheid' 30 mm. Deze maten zijn voor de simulatie willekeurig, omdat de botsenergie van de lichte personenauto te klein is om de invloed van deze maten naar voren te laten komen.

#### *Ankerbouten kunnen 5 mm bewegen*

De lichte personenauto wordt in korte tijd omgeleid, na ongeveer 0,2 seconde is het voertuig evenwijdig aan de constructie en na ongeveer 0,5 seconde verlaat het voertuig de constructie weer. Tijdens de aanrijding worden achttien elementen in meer of mindere mate verplaatst. De uitbuiging heeft een vloeiend verloop (*Afbeelding A1*). De golfhoogte van de uitbuiging bedraagt 108 meter. De dynamische uitbuiging bedraagt ongeveer 2 cm, de statische uitbuiging bedraagt ongeveer 1 cm (*Afbeelding A11*). De uiteinden van de barrier worden niet verplaatst.

In *Afbeelding A2* is te zien dat de rolbeweging van de lichte personenauto nogal heftig is, de rolhoek loopt in korte tijd (0,5 seconde) op tot 36 graden. In ongeveer gelijke tijd wordt de rolhoek weer 0 graden. De uitrijhoek van de lichte personenauto bedraagt ongeveer 6 graden. De hoek wordt kleiner. Het snelheidsverschil voor en na de aanrijding bedraagt circa 19 km/uur (*Afbeelding A3*). De ASI-waarde voor het zwaartepunt van de lichte personenauto bedraagt 1,60 (*Afbeelding A6*) hetgeen betekent dat de ASI-waarde boven het niveau B ASI = 1,4 ligt. Tijdens de primaire botsing treedt de grootste vertraging op. Deze bedraagt ongeveer 20,4 G in het zwaartepunt van de lichte personenauto. De grootste botskracht bedraagt ongeveer 380 kN (*Afbeeldingen A4 en A5*).

De gesimuleerde belastingen op de koppelingen tussen de elementen in de botszone blijven onder de ingevoerde maximale waarden. Dit geldt voor zowel de krachten als de momenten (*Afbeelding A7*). De barriër blijft intact. De ankerbouten van de elementen 19 t/m 21 bezwijken niet (*Afbeeldingen A8, A9 en A10*).

## 5.2. Simulatie met de bus, elementverankering aan één uiteinde (simulatie B t/m F)

In de simulaties met de bus is de speling tussen de ankerbouten en de barriër niet veranderd. Alleen de 'bewegingsvrijheid' (het doorploegen) van de ankerbouten in de ondergrond is van 0 mm met stappen van 5 mm vergroot tot 20 mm. In verticale richting is de 'bewegingsvrijheid' bij deze vijf simulaties op 30 mm gesteld.

### *Ankerbouten kunnen 0 mm bewegen*

De bus wordt in korte tijd omgeleid. In 0,4 seconde is de bus tot evenwijdig aan de constructie en na ongeveer 1,5 seconden verlaat de bus de barriër weer. Tijdens de aanrijding worden zeven elementen in meer of mindere mate verplaatst. De uitbuiging heeft daarbij een vloeiend verloop (*Afbeelding B1*). De golflengte van de uitbuiging bedraagt 42 meter. De dynamische uitbuiging bedraagt ongeveer 85 cm, de statische uitbuiging bedraagt ongeveer 55 cm (*Afbeelding B10*). Het 'rear end'-effect (de achterkant van de bus komt in aanraking met de constructie) heeft een grote invloed op de grootte van de uitbuiging. De uitbuiging wordt van circa 6 cm naar 85 cm vergroot.

Uit *Afbeelding B2* blijkt, dat de rolbeweging van de bus circa 2 graden bedraagt. De uitrijhoek van de bus bedraagt ongeveer 8 graden. De hoek 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 4,7 G in het zwaartepunt van de bus, hetgeen de botskracht van ongeveer 508 kN veroorzaakt (*Afbeeldingen B4 en B5*).

De gesimuleerde belastingen op de koppelingen tussen de elementen in de botszone blijven onder de ingevoerde maximale waarden. Dit geldt voor zowel de krachten als de momenten (*Afbeelding B6*). De barriër blijft

intact. De ankerbouten van de elementen 19 t/m 23 bezwijken *Afbeeldingen B7 t/m B9* laten de vier bezweken ankerbouten van de elementen 19 t/m 21 zien

#### *Ankerbouten kunnen 5 mm bewegen*

De bus wordt in korte tijd omgeleid. In 0,4 seconde is de bus tot evenwijdig aan de constructie omgeleid. Tijdens de aanrijding worden vier elementen in meer of mindere mate verplaatst. De uitbuiging heeft daarbij een vloeiend verloop (*Afbeelding C1*). De dynamische uitbuiging bedraagt ongeveer 16 cm, de statische uitbuiging bedraagt ongeveer 8 cm (*Afbeelding C10*). Het 'rear end'-effect (de achterkant van de bus komt in aanraking met de constructie) heeft een grote invloed op de grootte van de uitbuiging. De uitbuiging wordt van circa 2 cm naar 16 cm vergroot.

Uit *Afbeelding C2* blijkt, dat de rolbeweging van de bus circa 13 graden bedraagt. De uitrijhoek van de bus bedraagt ongeveer 4 graden. De hoek wordt kleiner.

Het snelheidsverschil voor en na de aanrijding bedraagt ongeveer 10 km/uur (*Afbeelding C3*).

Tijdens het 'rear-end' effect treedt de grootste vertraging op. Deze bedraagt ongeveer 6,4 G in het zwaartepunt van de bus, hetgeen de botskracht van ongeveer 688 kN veroorzaakt (*Afbeeldingen C4 en C5*).

De gesimuleerde belastingen op de koppelingen in de botszone blijven onder de ingevoerde maximale waarden. Dit geldt voor zowel de krachten als de momenten (*Afbeelding C6*).

De ankerbouten van element 20 bezwijken alle vier (*Afbeelding C8*).

De ankerbouten van de elementen 19 en 21 bezwijken niet (*Afbeeldingen C7 en C9*).

#### *Ankerbouten kunnen 10 mm bewegen*

De bus wordt in korte tijd omgeleid. In 0,4 seconde is de bus tot evenwijdig aan de constructie omgeleid. Tijdens de aanrijding worden vier elementen in meer of mindere mate verplaatst. De uitbuiging heeft daarbij een vloeiend verloop (*Afbeelding D1*). De dynamische uitbuiging bedraagt ongeveer 8 cm, de statische uitbuiging bedraagt ongeveer 3 cm (*Afbeelding D10*). Het 'rear end'-effect (de achterkant van de bus komt in aanraking met de constructie) heeft een grote invloed op de grootte van de uitbuiging. De uitbuiging wordt van circa 2 cm naar 8 cm vergroot.

Uit *Afbeelding D2* blijkt, dat de rolbeweging van de bus circa 12 graden bedraagt. De uitrijhoek van de bus bedraagt ongeveer 4 graden. De hoek 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 6,4 G in het zwaartepunt van de bus, hetgeen de botskracht van ongeveer 688 kN veroorzaakt (*Afbeeldingen D4 en D5*).

De gesimuleerde belastingen op de koppelingen in de botszone blijven onder de ingevoerde maximale waarden. Dit geldt voor zowel de krachten als de momenten (*Afbeelding D6*).

De ankerbouten van element 20 bezwijken alle vier (*Afbeelding D8*). De ankerbouten van de elementen 19 en 21 bezwijken niet (*Afbeeldingen D7 en D9*).

#### *Ankerbouten kunnen 15 mm bewegen*

De bus wordt in korte tijd omgeleid. In 0,4 seconde is de bus tot evenwijdig aan de constructie omgeleid. Tijdens de aanrijding worden vier elementen in meer of mindere mate verplaatst. De uitbuiging heeft daarbij een vloeiend verloop (*Afbeelding E1*). De dynamische uitbuiging bedraagt ongeveer 8 cm, de statische uitbuiging bedraagt ongeveer 5 cm (*Afbeelding E10*). Het 'rear end'-effect (de achterkant van de bus komt in aanraking met de constructie) heeft een grote invloed op de grootte van de uitbuiging. De uitbuiging wordt van circa 2 cm naar 8 cm vergroot.

Uit *Afbeelding E2* blijkt, dat de rolbeweging van de bus circa 12 graden bedraagt. De uitrijhoek van de bus bedraagt ongeveer 4 graden. De hoek wordt kleiner.

Het snelheidsverschil voor en na de aanrijding bedraagt ongeveer 10 km/uur (*Afbeelding E3*).

Tijdens het 'rear-end'-effect treedt de grootste vertraging op. Deze bedraagt ongeveer 6,4 G in het zwaartepunt van de bus, hetgeen de botskracht van ongeveer 688 kN veroorzaakt (*Afbeeldingen E4 en E5*).

De gesimuleerde belastingen op de koppelingen in de botszone blijven onder de ingevoerde maximale waarden. Dit geldt voor zowel de krachten als de momenten (*Afbeelding E6*).

De ankerbouten van element 20 bezwijken alle vier (*Afbeelding E7*).

De ankerbouten van de elementen 19, 20 en 21 bezwijken niet (*Afbeeldingen E7, E8 en E9*).

#### *Ankerbouten kunnen 20 mm bewegen*

De bus wordt in korte tijd omgeleid. In 0,4 seconde is de bus tot evenwijdig aan de constructie omgeleid. Tijdens de aanrijding worden vier elementen in meer of mindere mate verplaatst. De uitbuiging heeft daarbij een vloeiend verloop (*Afbeelding F1*). De dynamische uitbuiging bedraagt ongeveer 8 cm, de statische uitbuiging bedraagt ongeveer 5 cm (*Afbeelding F10*). Het 'rear end'-effect (de achterkant van de bus komt in aanraking met de constructie) heeft een grote invloed op de grootte van de uitbuiging. De uitbuiging wordt van circa 2 cm naar 8 cm vergroot.

Uit *Afbeelding F2* blijkt, dat de rolbeweging van de bus circa 12 graden bedraagt. De uitrijhoek van de bus bedraagt ongeveer 4 graden. De hoek wordt kleiner.

Het snelheidsverschil voor en na de aanrijding bedraagt ongeveer 10 km/uur (*Afbeelding F3*).

Tijdens het 'rear-end' effect treedt de grootste vertraging op. Deze bedraagt ongeveer 6,4 G in het zwaartepunt van de bus, hetgeen de botskracht van ongeveer 688 kN veroorzaakt (*Afbeeldingen F4 en F5*).

De gesimuleerde belastingen op de koppelingen in de botszone blijven onder de ingevoerde maximale waarden. Dit geldt voor zowel de krachten als de momenten (*Afbeelding F6*).

Geen van de verankeringen is bezwiken (*Afbeeldingen F7, F8 en F9*).

### 5.3. Simulatie met de bus, elementverankering aan één uiteinde (simulatie G)

In de simulaties met de bus is de speling tussen de ankerbouten en de barrier niet veranderd. In verticale richting wordt de 'bewegingsvrijheid' in stappen verkleind van 30 mm tot 10 mm. In de eerste simulatie is gekozen voor de 20 mm 'bewegingsvrijheid' (het doorploegen) van de ankerbouten in de ondergrond, omdat bij de kleinere maten breuk in de ankerbouten optreedt.

#### *Ankerbouten kunnen 20 mm bewegen*

De bus wordt in korte tijd omgeleid. In 0,4 seconde is de bus tot evenwijdig aan de constructie omgeleid. Tijdens de aanrijding worden vier elementen in meer of mindere mate verplaatst. De uitbuiging heeft daarbij een vloeiend verloop (*Afbeelding G1*). De dynamische uitbuiging bedraagt ongeveer 13 cm, de statische uitbuiging bedraagt ongeveer 3 cm (*Afbeelding G10*). Het 'rear end'-effect (de achterkant van de bus komt in aanraking met de constructie) heeft een grote invloed op de grootte van de uitbuiging. De uitbuiging wordt van circa 2 cm naar 13 cm vergroot.

Uit *Afbeelding G2* blijkt, dat de rolbeweging van de bus circa 12 graden bedraagt. De uitrijhoek van de bus bedraagt ongeveer 4 graden. De hoek wordt kleiner.

Het snelheidsverschil voor en na de aanrijding bedraagt ongeveer 10 km/uur (*Afbeelding G3*).

Tijdens het 'rear-end' effect treedt de grootste vertraging op. Deze bedraagt ongeveer 6,3 G in het zwaartepunt van de bus, hetgeen de botskracht van ongeveer 688 kN veroorzaakt (*Afbeeldingen G4 en G5*).

De gesimuleerde belastingen op de koppelingen in de botszone blijven onder de ingevoerde maximale waarden. Dit geldt voor zowel de krachten als de momenten (*Afbeelding G6*).

De ankerbouten van de elementen 19 en 20 bezwijken alle vier (*Afbeeldingen G7 en G8*). De ankerbouten van element 21 bezwijken niet (*Afbeelding G9*).

De resultaten van deze simulatie zijn zo slecht, dat de simulaties met andere bewegingsmogelijkheden niet meer zijn uitgevoerd.

### 5.4. Simulatie met de bus, elementverankering aan twee uiteinden (simulatie H)

In de simulaties met de bus is de speling tussen de ankerbouten en de barrier niet veranderd. Uit de eerste serie simulaties blijkt, dat bij 10 mm 'bewegingsvrijheid' (het doorploegen) van de ankerbouten in de ondergrond nog breuk in een verankering optreedt. Bij een grotere 'bewegingsvrijheid' treedt geen breuk meer op. Voor deze serie simulaties is dan ook voor deze maat gekozen om te beginnen. In verticale richting is de 'bewegingsvrijheid' 30 mm gehouden.

#### *Ankerbouten kunnen 10 mm bewegen*

Uit *Afbeelding H1* blijkt dat de verdeling van de vier ankerbouten paarsgewijs over de lengte van een element niet goed werkt. De barrier is in tegendeel veel zwakker. De bus 'root' de barrier. Een sterke geconcen-



treerde verankering is beter dan een meer verdeelde, maar in totaliteit even sterke verankering

De resultaten van deze simulatie zijn zo slecht, dat de simulaties met andere bewegingsmogelijkheden niet meer zijn uitgevoerd.

## 6. Bespreking resultaten

In de simulaties met de lichte personenauto en de bus is de speling tussen de ankerbouten en de barrier niet veranderd. De speling in de verankering bedraagt 36 mm in langsrichting van de barrier en 6 mm in dwarsrichting van de barrier. In de koppeling tussen de elementen bedraagt de speling 8 mm. Alleen de 'bewegingsvrijheid' (het doorploegen) van de ankerbouten in de ondergrond is van 0 mm met stappen van 5 mm vergroot tot 20 mm. In verticale richting is de 'bewegingsvrijheid' altijd 30 mm, behoudens bij simulatie G.

Uit de simulatie met de lichte personenauto (simulatie A, 5 mm horizontale verplaatsing, 30 mm verticale verplaatsing) blijkt, dat de barrier als een starre constructie op de lichte personenauto werkt. De maximaal optredende vertraging in het zwaartepunt bedraagt dan 20,4 G. De ASI-waarde is aan de hoge kant, namelijk 1,6. De ASI-waarde ligt daarmee boven de toegestane waarde van niveau B ( $ASI \leq 1,4$ ).

Dit alles is het gevolg van het feit dat alle afzonderlijke elementen van de barrier verankerd zijn, in tegenstelling tot de oorspronkelijke simulatie van de RWS-barrier (Van de Pol, 1995) waarbij alleen de beide uiteinden van de barrier verankerd waren.

Uit de simulaties met de bus blijkt, dat de barrier niet wordt doorbroken, ook al bezwijken één of meer verankeringen. Bij de simulatie, waarbij de ankerbouten min of meer 'spontaan' - zonder afschuiven ankerbouten en vervorming ondergrond (simulatie B, 0 mm) - breken, ontstaat een uitbuiging van ongeveer 85 cm. Vijf verankeringen zijn verbroken. De koppelingen tussen de elementen breken niet. Het afbreken van de verankeringen wordt veroorzaakt door het 'rear-end'-effect van de bus.

De bewegingen van de bus zijn bij de andere vier uitgevoerde simulatie (C t/m F en 5, 10, 15, 20 mm), waarbij wel enige verplaatsing aanwezig is, nagenoeg gelijk. De bus wordt in korte tijd omgeleid waarbij de rolhoek en de uitrijhoek klein blijven; respectievelijk 12 graden en 4 graden.

Het snelheidsverlies door de aanrijding bedraagt ongeveer 10 km/uur.

De optredende vertragingen zijn altijd het grootst tijdens het 'rear-end'-effect. De maximaal optredende vertraging in het zwaartepunt bedraagt dan 6,4 G. De daarbij behorende maximale botskracht is 688 kN.

Wanneer de mogelijke verplaatsing 15 mm of meer bedraagt (simulatie E en F en 15, 20 mm), vindt geen breuk meer plaats in de verankeringen. Tijdens deze verplaatsing wordt zoveel energie vernietigd, dat er geen ankerbouten meer afbreken. De maximaal optredende vertraging en de maximale botskracht blijven van gelijke grootte-orde.

De 'bewegingsvrijheid' in verticale richting is van 30 mm teruggebracht tot 10 mm (simulatie G). In horizontale richting is de 'bewegingsvrijheid' op 20 mm gehouden, gelijk aan simulatie F. De ankerbouten van de elementen 19 en 20 bezwijken, maar de barrier wordt niet doorbroken. De barrier buigt iets verder uit, 13 mm, in plaats van 8 mm. In tegenstelling tot simulatie F bezwijken bij deze simulatie wel verankeringen. Gezien het slechtere resultaat van deze simulatie ten opzichte van simulatie F zijn de simulaties met de andere maten niet meer uitgevoerd.

Wordt de verankering over de lengte van het element verdeeld, hier twee ankerbouten aan het beging van het element en twee aan het eind, dan wordt de barrier 'van de weg gereden' (simulatie H, 30 mm). Bij de uitgevoerde simulatie bedraagt de mogelijke verplaatsing 10 mm. Deze simulatie is verder gelijk aan simulatie D. De spreiding van de ankerbouten over de lengte van het element heeft een duidelijk negatief effect op de sterkte van de verankering. De simulaties met de andere maten zijn dan ook niet meer uitgevoerd.

Uit de literatuur zijn tot nu toe twee onderzoeken bekend, waarbij trekproeven op ware schaal op ankerbouten zijn uitgevoerd. De beproefde ankerbouten waren M16 8.8 bouten en niet, zoals in dit onderzoek, M24 4.6 bouten. Beide typen bouten hebben een vergelijkbare treksterkte, maar hun vloeigedrag is totaal anders.

Ook proeven waarbij de ankerbouten zijdelings zijn belast, zijn niet uit de literatuur bekend. Het gedrag van een ankerbout onder een belasting in zijdelingse richting is 'vertaald' in een computersimulatie, een dergelijke vertaling kan alleen berusten op gevoel en wordt niet door proefgegevens gestaafd.

## 7. Conclusies en aanbevelingen

In dit rapport zijn de resultaten opgenomen van enkele series simulaties ter beproeving van de stalen RWS-barrier in verschillende soorten wegdek. Bij de simulaties zijn (a) de horizontale en verticale verplaatsing van de ankerbouten gevarieerd en (b) verschillende soorten bevestiging beproefd (aan één uiteinde van elk element respectievelijk aan beide uiteinden).

De simulaties zijn uitgevoerd met een personenauto en een bus. Voor de simulatie met de lichte personenauto (TB11) geldt dat de barrier als een starre constructie werkt. De ASI-waarde ligt daarbij boven het toegestane niveau B ( $ASI \leq 1.4$ ). Dit heeft vooral te maken met het feit dat de barrier-elementen ieder afzonderlijk zijn verankerd. Voor de simulaties met de bus (TB51) geldt dat de barrier niet wordt doorbroken, ondanks het feit dat er één of meer verankeringen bezwijken. Voorts blijkt dat bij verkleining van de verticale bewegingsvrijheid van de ankerbouten een ongunstiger resultaat wordt bereikt. Dat is ook het geval als de verankering in plaats van geconcentreerd aan één uiteinde wordt aangebracht aan twee uiteinden. Bij deze meer gespreide verdeling van de krachten op de verankering wordt de barrier door de bus 'gerooid'. Om die reden wordt aanbevolen de verankering op één plaats te concentreren.

Zoals op voorhand mocht worden aangenomen is gebleken dat een verankering in een starre ondergrond (weinig of geen horizontale verplaatsing) eerder bezwijkt dan een verankering in een meer 'plastische' ondergrond. Een gecontroleerde toegelaten verplaatsing van de ankerbouten door de ondergrond heeft een gunstig effect op de sterkte van de verankering. Om dit werkingsmechanisme nader te kunnen concretiseren, zijn echter eerst praktijkproeven nodig.

### *Praktijkproeven*

Door gebrek aan literatuurgegevens kon in de simulaties het zijdelingse gedrag van de ankerbouten door de grond alleen bij benadering worden gesimuleerd. Om die reden wordt aanbevolen een standaard verankering van de RWS-barrier, vier ankerbouten M 24 4.6, zowel in beton als in ZOAB zijdelings te beproeven.

In deze proevenserie moet tevens worden nagegaan in hoeverre het mogelijk is een voorgeprogrammeerd gedrag van een ankerbout te verwezenlijken. Hierbij wordt gedacht aan het verplaatsen van de ankerbouten door de ondergrond bij onder een bepaalde belasting. De verplaatsing vindt zowel in horizontale als in verticale richting plaats.

## 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 (1995). *De stalen RWS-barrier toegepast op het proefterrein van de Rijksdienst voor het Wegverkeer*. R-95-64. SWOV, Leidschendam.

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.



## Bijlage 1 t/m 3

1. *Afbeeldingen 1 t/m 3*
- 2A. *Afbeeldingen A1 t/m A11*
- 2B. *Afbeeldingen B1 t/m B10*
- 2C. *Afbeeldingen C1 t/m C10*
- 2D. *Afbeeldingen D1 t/m D10*
- 2E. *Afbeeldingen E1 t/m E10*
- 2F. *Afbeeldingen F1 t/m F10*
- 2G. *Afbeeldingen G1 t/m G10*
- 2H. *Afbeelding H1*
3. *Korte beschrijving van de werking van het computerprogramma VEDYAC*



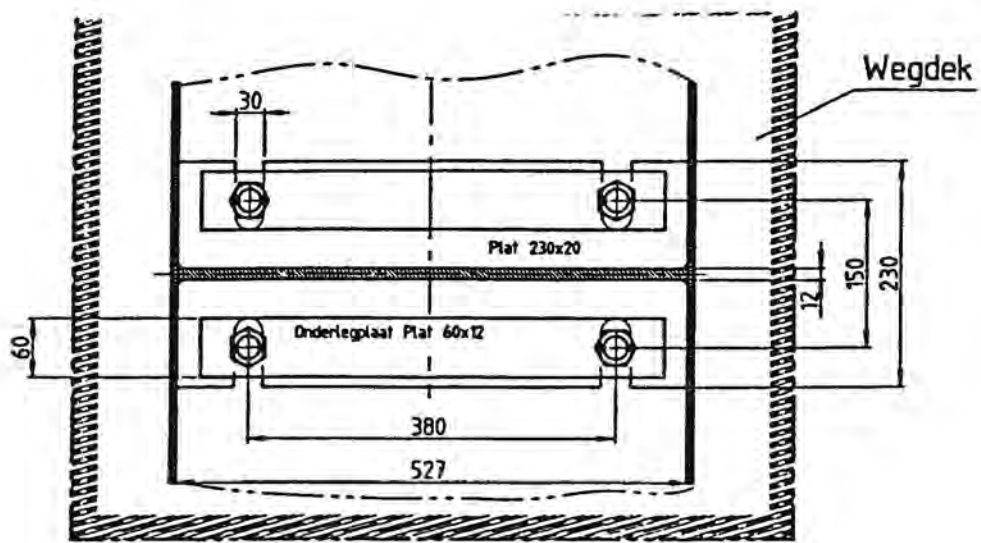


## Bijlage 1

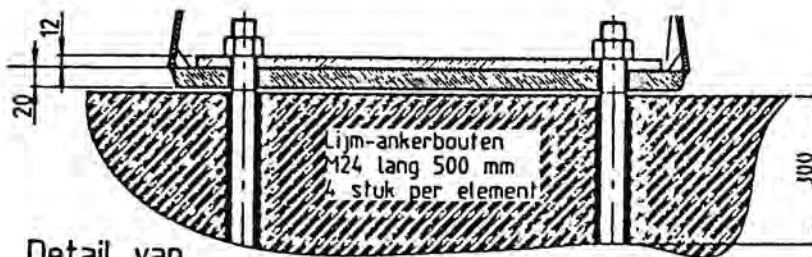
## Afbeeldingen 1 t/m 3

1. *Overzicht van de verankering van de RWS barrier.*
2. *Overzicht van de plaats van de verankering in de RWS-barrier.*
3. *Overzicht van de simulatieopstelling van de RWS barrier met de bus en de lichte personenauto.*





Doorsnede I-I



Detail van Verankering

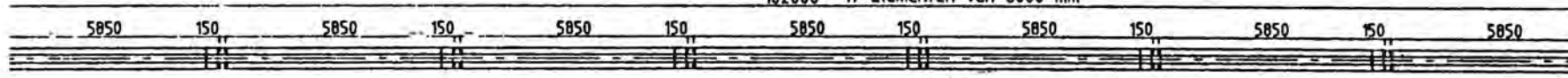
Doorsnede B-B

Afbeelding 1. Overzicht van de verankering van de RWS-barrier.

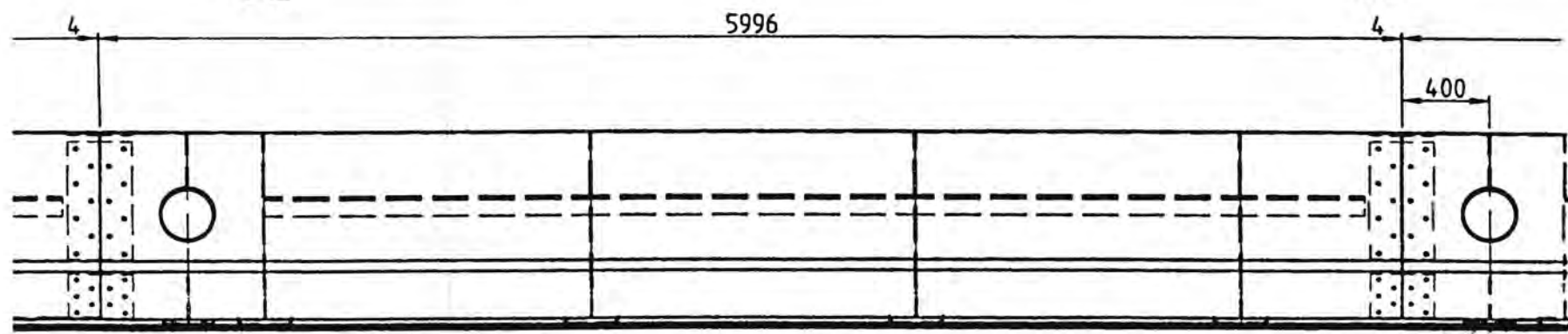
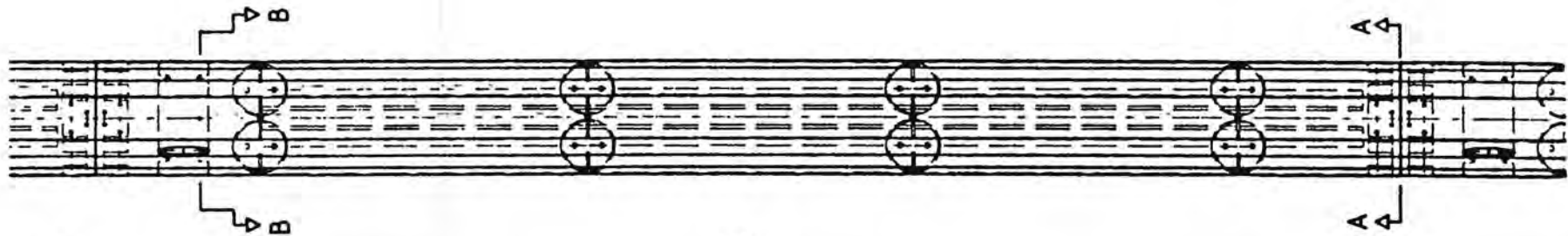


# OVERZICHT TESTOPSTELLING

102000 17 Elementen van 6000 mm



INRIJCHTING  
CRASH DIRECTION



Lijm-ankers M24-4.6 te lijmen anker-lengte 300 mm

150 Glued anchors length of anchorage 5850

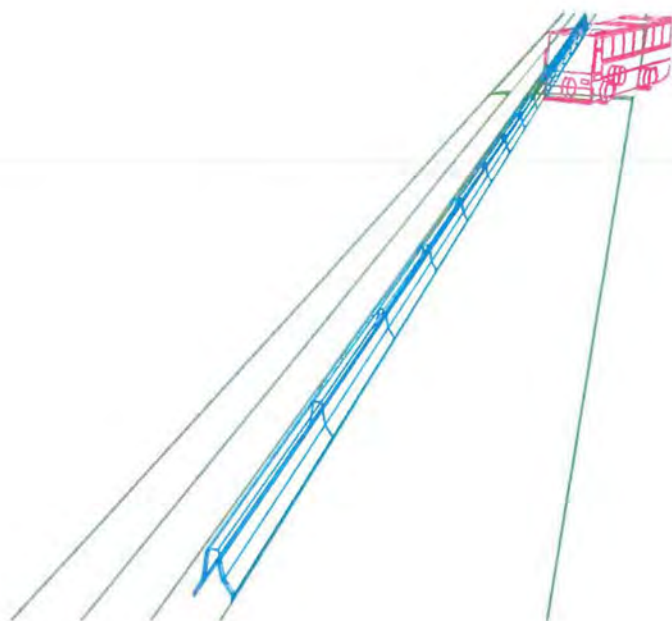
verankeringpunt  
fixingpoint

6000

verankeringpunt  
fixingpoint

Afbeelding 2. Overzicht van de plaats van de verankerung in de RWS-barrier.





Afbeelding 3. Overzicht van de simulatieopstelling van RWS-barrier met bus en lichte personenauto.

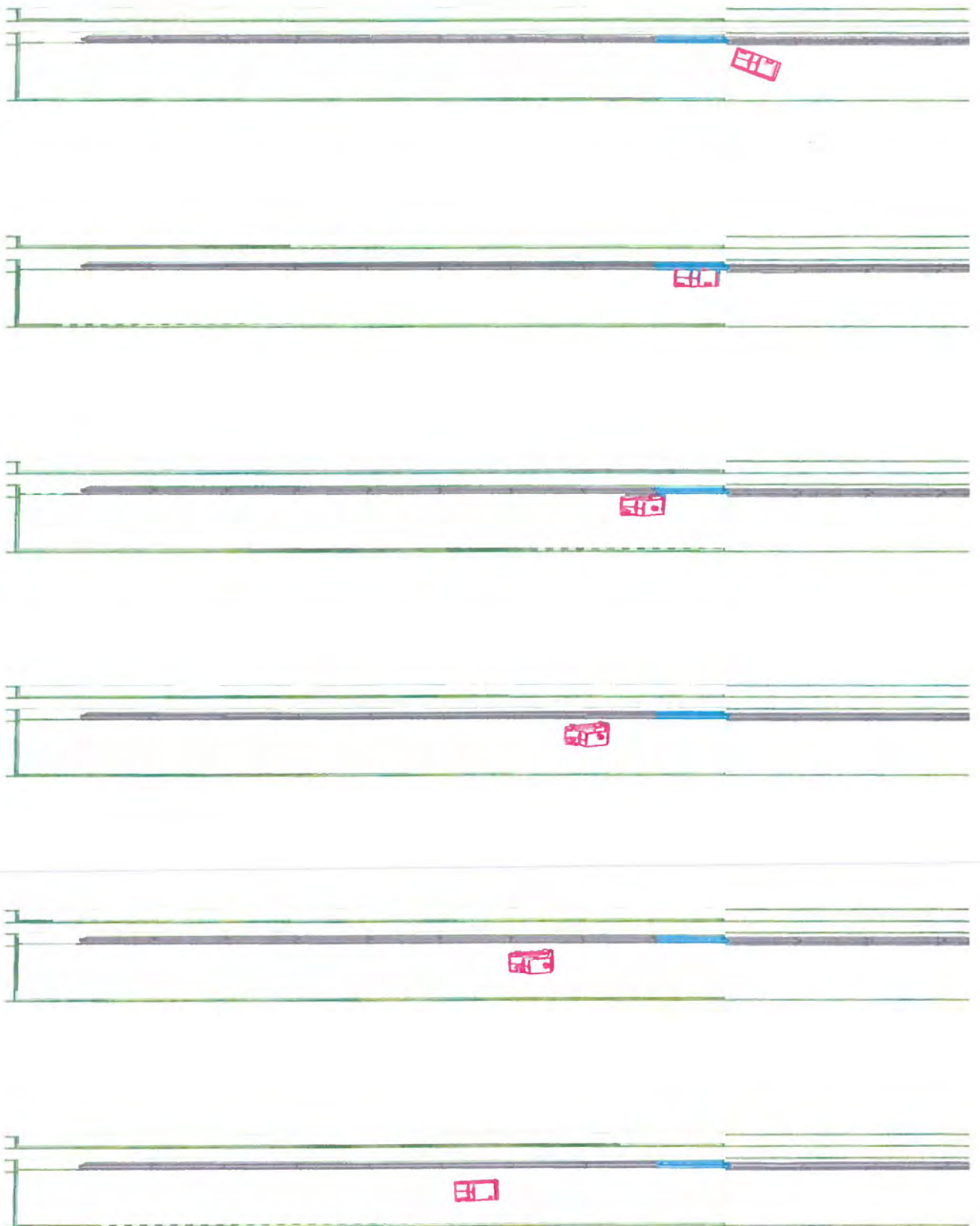




**Simulaties met de lichte personenauto tegen de RWS-barrier, verankering aan één uiteinde element, 5 mm vervorming in ondergrond, verticaal 30 mm.**

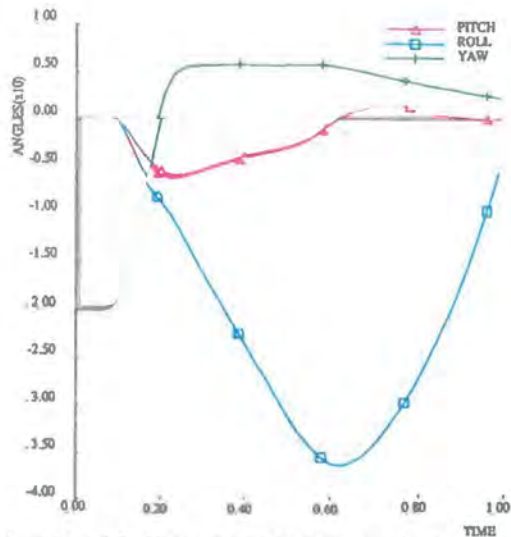
- A1. *Overzicht aanrijding met de lichte personenauto tegen de RWS-barrier.*
- A2. *Verloop van de roll-, pitch- en yawhoek van de lichte personenauto tegen de tijd tijdens de aanrijding tegen de RWS-barrier.*
- A3. *Verloop van de snelheid tegen de tijd tijdens de aanrijding met de lichte personenauto tegen de RWS-barrier.*
- A4. *Verloop van de vertragingen in het zwaartepunt van de lichte personenauto tegen de tijd tijdens de aanrijding met de lichte personenauto tegen de RWS-barrier.*
- A5. *Verloop van de krachten in het zwaartepunt van de lichte personenauto tegen de tijd tijdens de aanrijding met de lichte personenauto tegen de RWS-barrier.*
- A6. *De ASI-waarde van het zwaartepunt van de lichte personenauto tegen de tijd tijdens de aanrijding met de lichte personenauto tegen de RWS-barrier.*
- A7. *Verloop van de krachten en momenten in de koppeling tussen de elementen 19/20, 20/21 en 21/22 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de lichte personenauto tegen de RWS-barrier.*
- A8. *Verloop van de krachten en momenten in de vier ankerbouten van element 19 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de lichte personenauto tegen de RWS-barrier.*
- A9. *Verloop van de krachten en momenten in de vier ankerbouten van element 20 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de lichte personenauto tegen de RWS-barrier.*
- A10. *Verloop van de krachten en momenten in de vier ankerbouten van element 21 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de lichte personenauto tegen de RWS-barrier.*
- A11. *Verloop van de uitbuiging van de elementen 19, 20 en 21 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de lichte personenauto tegen de RWS-barrier.*



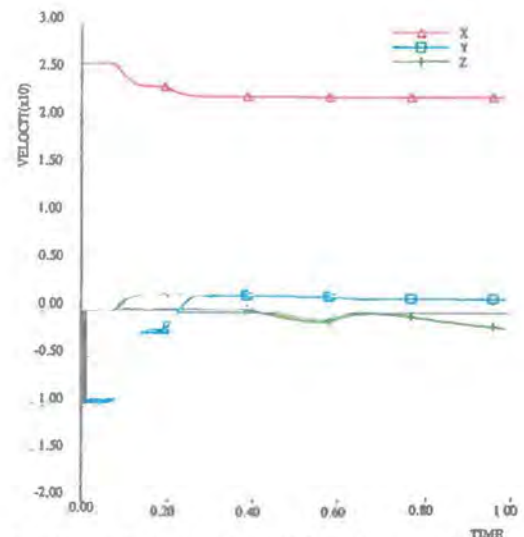


Afbeelding A1. Overzicht aanrijding met de lichte personenauto tegen de RWS-barrier.

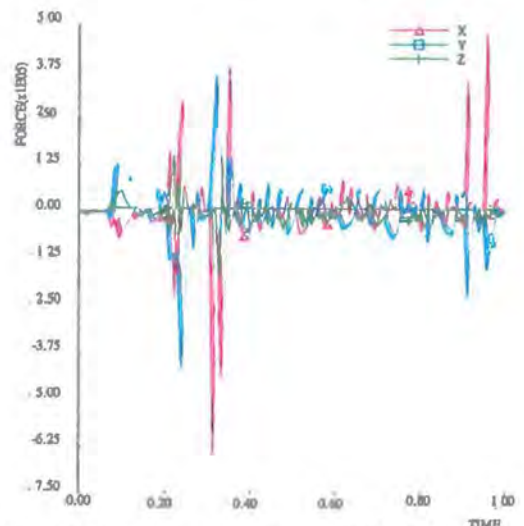
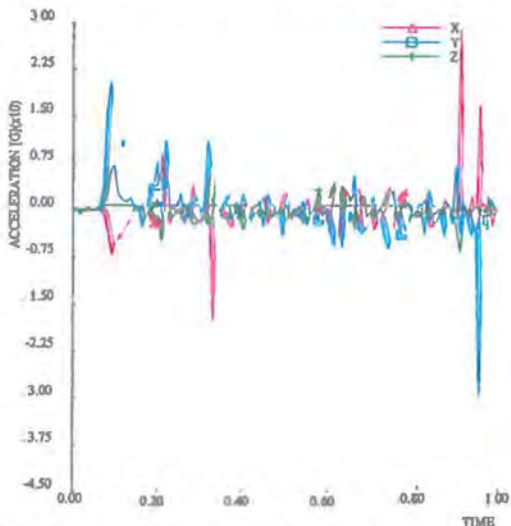




Afbeelding A2. Verloop van de roll-, pitch- en yawhoek van de lichte personenauto tegen de tijd tijdens de aanrijding tegen de RWS-barrière.

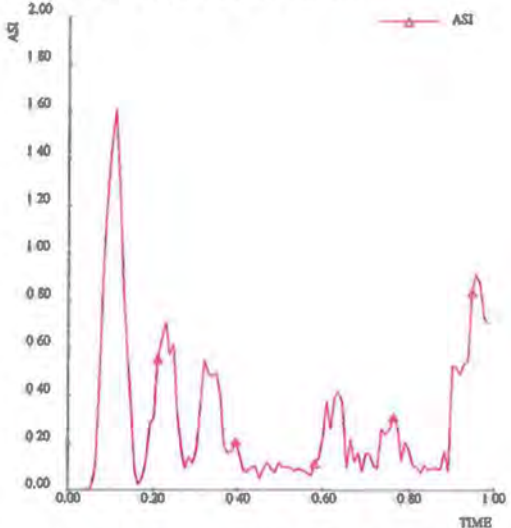


Afbeelding A3. Verloop van de snelheid tegen de tijd tijdens de aanrijding met de lichte personenauto tegen de RWS-barrière.



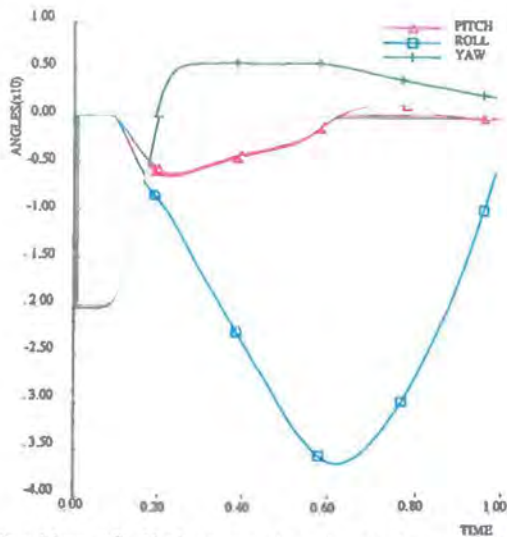
Afbeelding A4. Verloop van de vertragingen in het zwaartepunt van de bus lichte personenauto tegen de tijd tijdens de aanrijding met de lichte personenauto tegen de RWS-barrière.

Afbeelding A5. Verloop van de krachten in het zwaartepunt van de lichte personenauto tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrière.

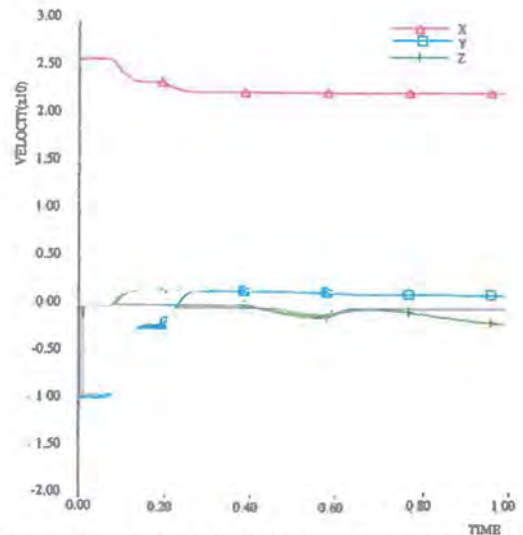


Afbeelding A6. De ASI-waarde in het zwaartepunt van de lichte personenauto tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrière.

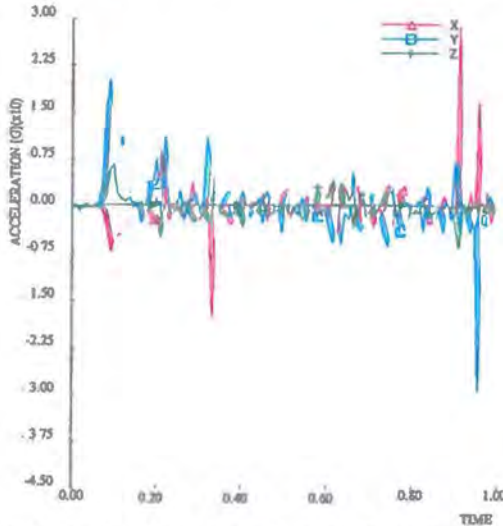




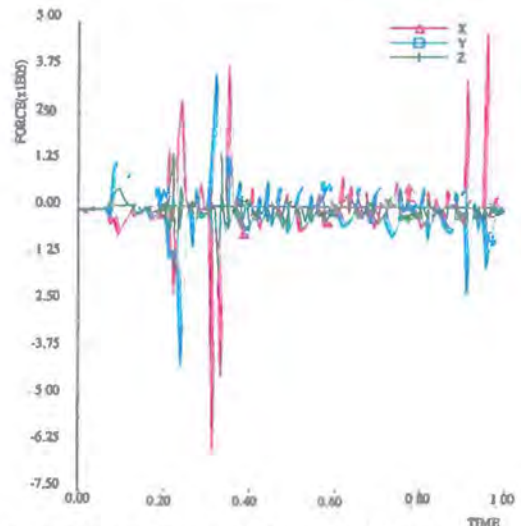
Afbeelding A2. Verloop van de roll-, pitch- en yawhoek van de lichte personenauto tegen de tijd tijdens de aanrijding tegen de RWS-barrier.



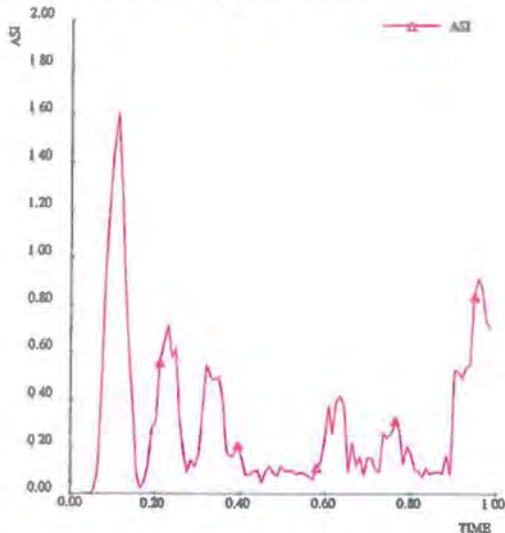
Afbeelding A3. Verloop van de snelheid tegen de tijd tijdens de aanrijding met de lichte personenauto tegen de RWS-barrier.



Afbeelding A4. Verloop van de vertragingen in het zwaartepunt van de bus lichte personenauto tegen de tijd tijdens de aanrijding met de lichte personenauto tegen de RWS-barrier.



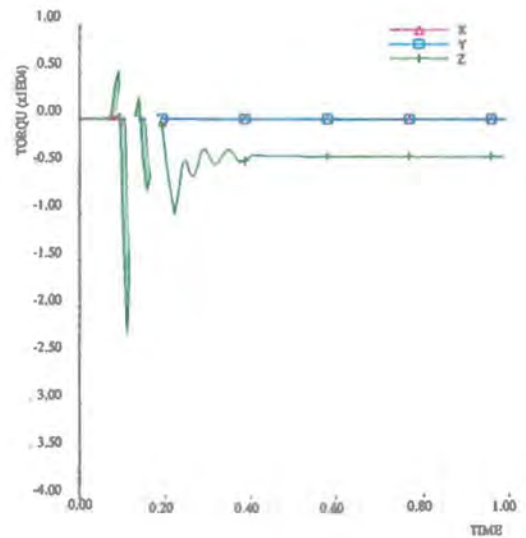
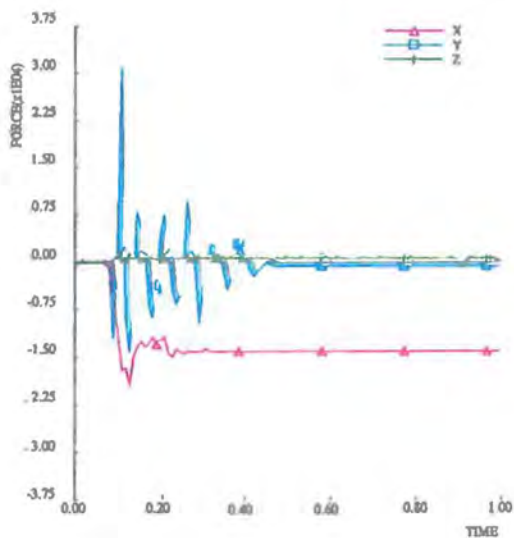
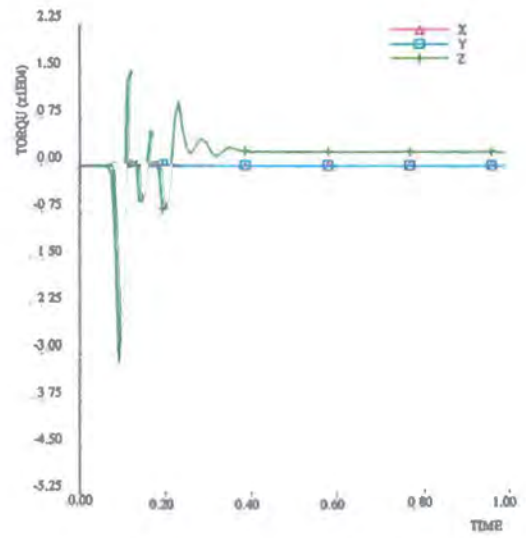
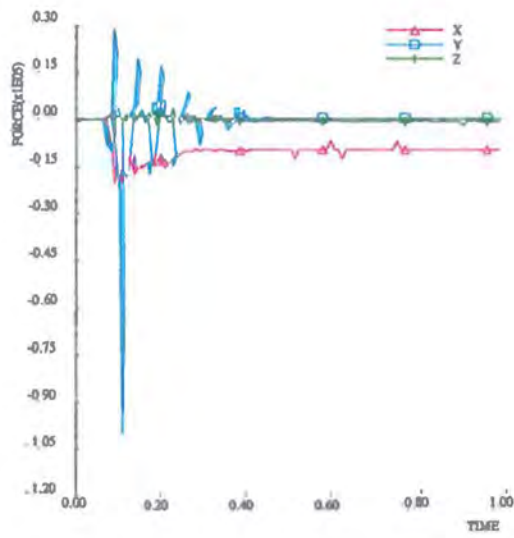
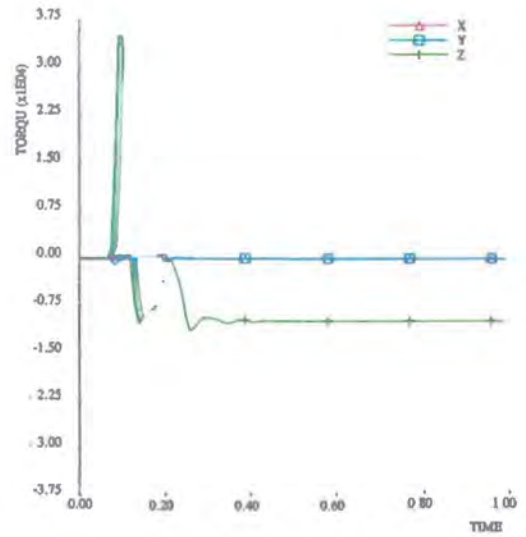
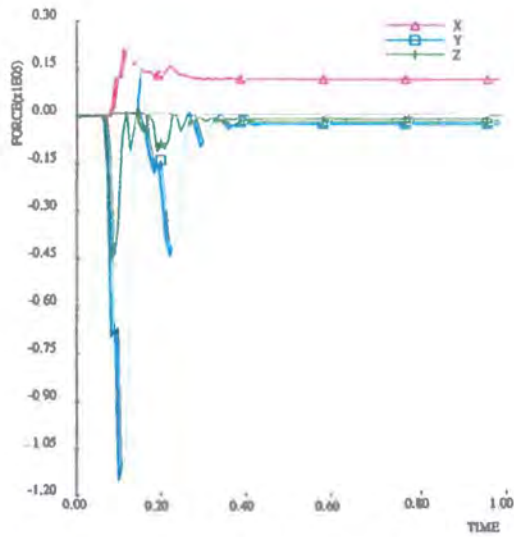
Afbeelding A5. Verloop van de krachten in het zwaartepunt van de lichte personenauto tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.



Afbeelding A6. De ASI-waarde in het zwaartepunt van de lichte personenauto tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.

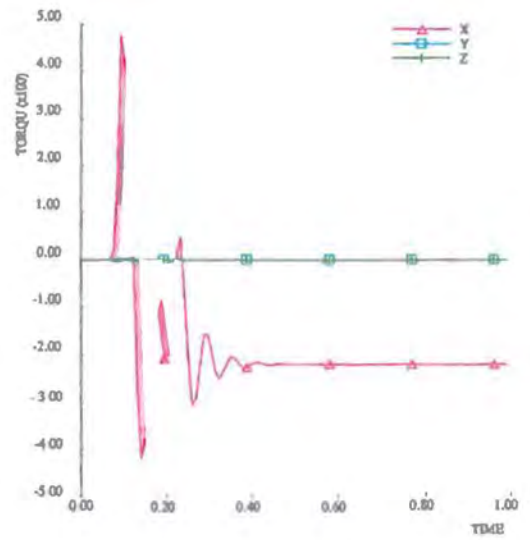
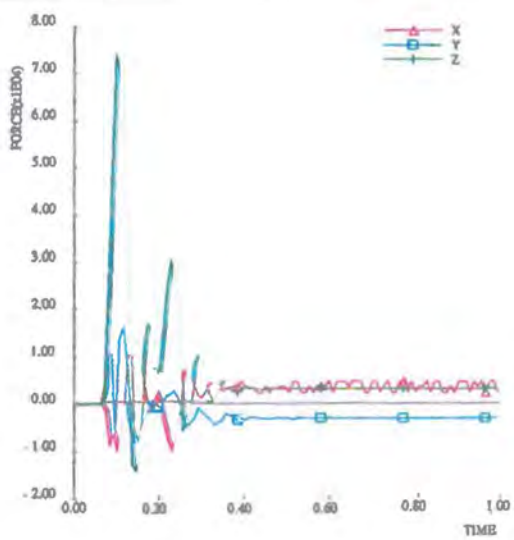
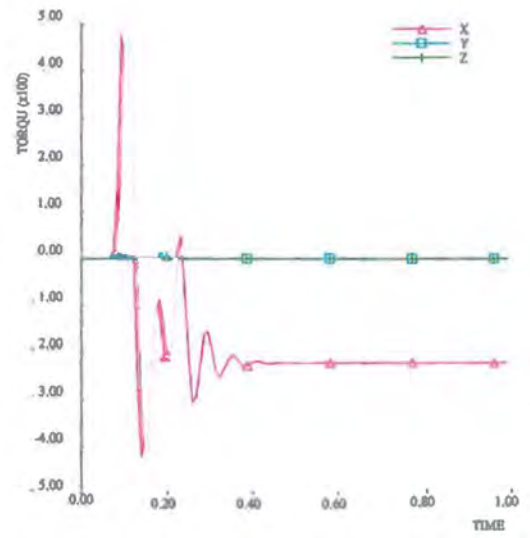
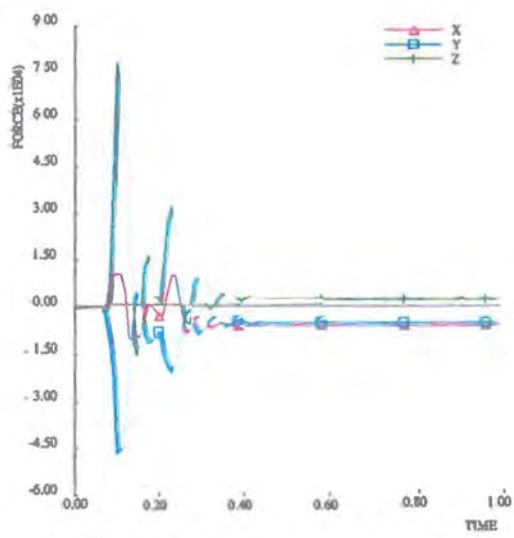
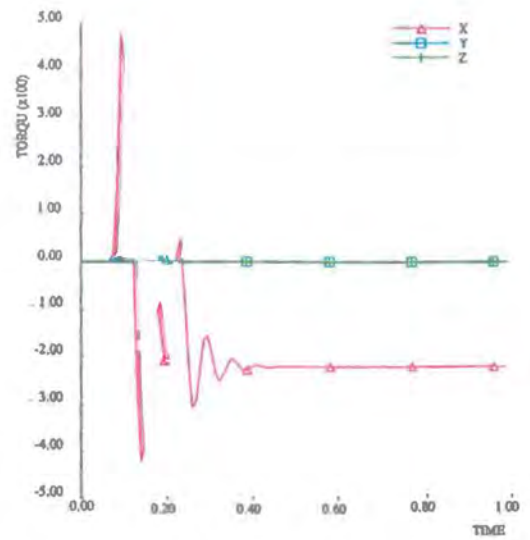
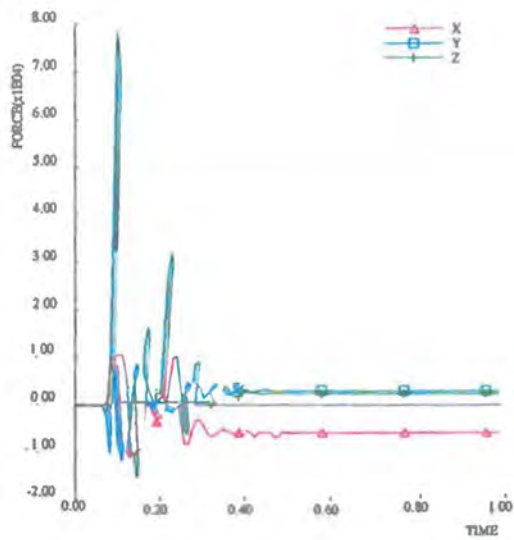






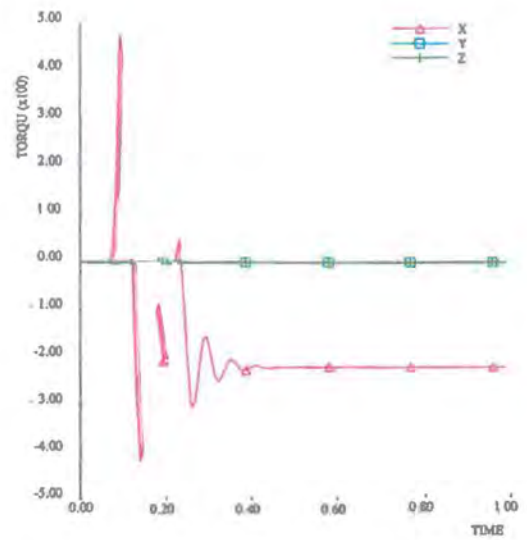
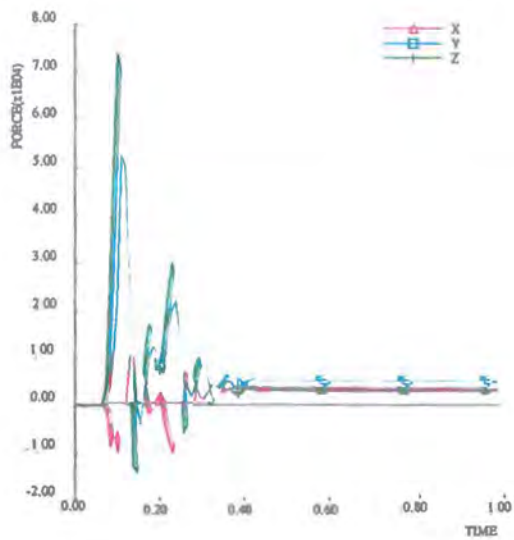
Afbeelding A7. Verloop van de krachten en momenten in de koppeling tussen de elementen 19/20, 20/21 en 21/22 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de lichtte personenauto tegen de RWS-barrière.





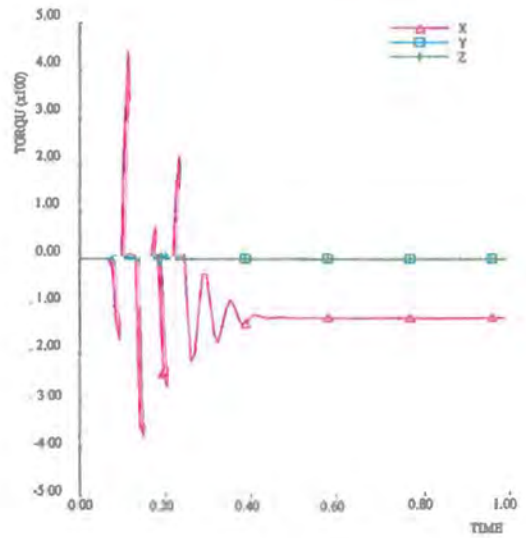
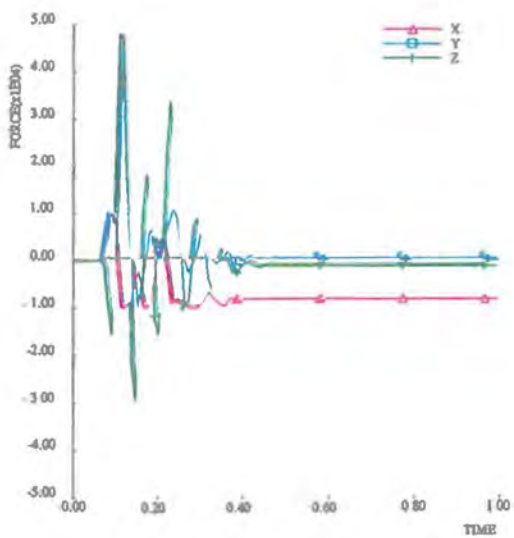
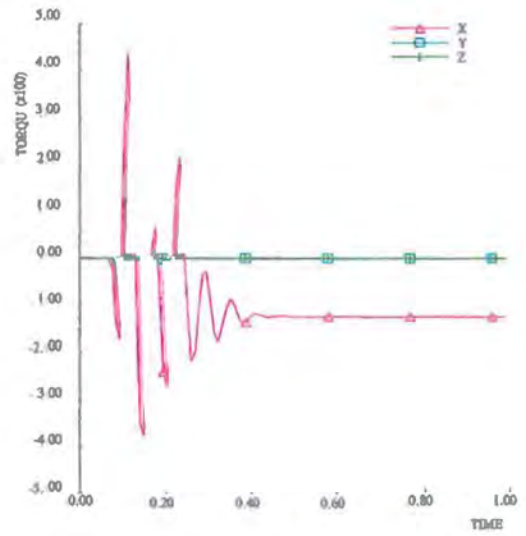
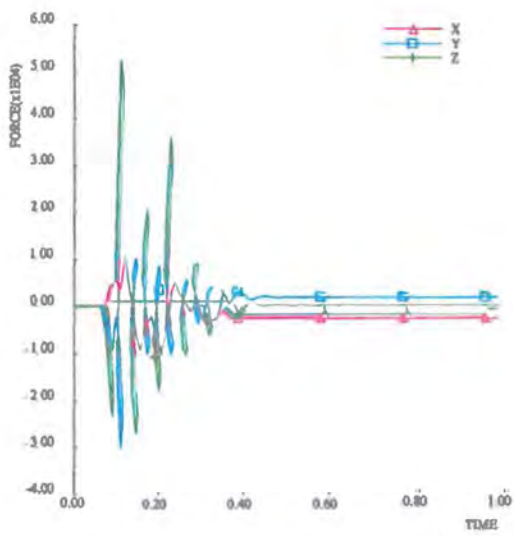
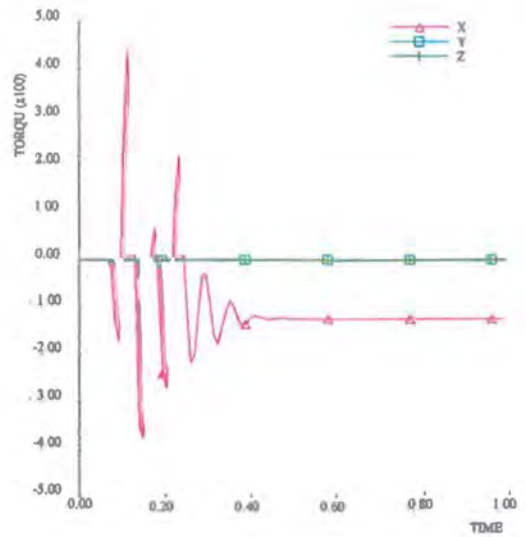
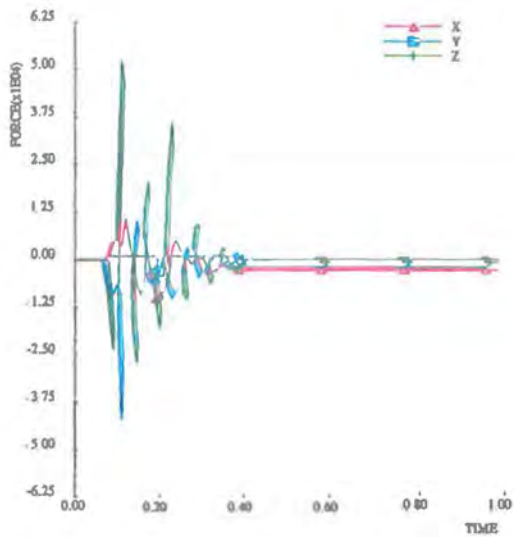
Afbeelding A8 (Zie ook volgende blad). Versloop van de krachten en momenten in de vier ankerbouten van de meet 19 kg met de tijd tijdens de aanrijding met de lichte personenauto tegen de RWS-barrier.





Afbeelding A8. Verloop van de krachten en momenten in de vier ankerbouten van element 19 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de lichte personenauto tegen de RWS-barrier.

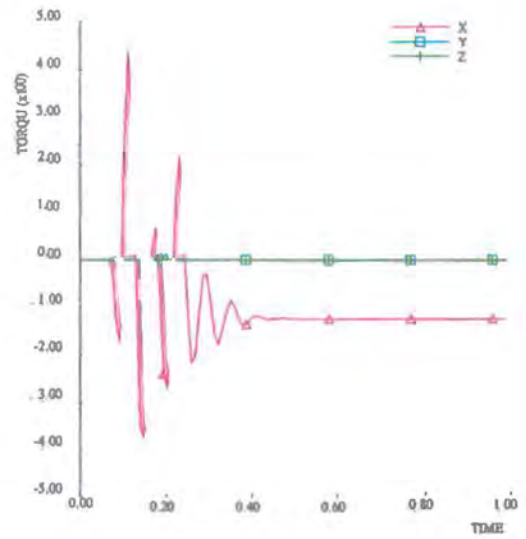
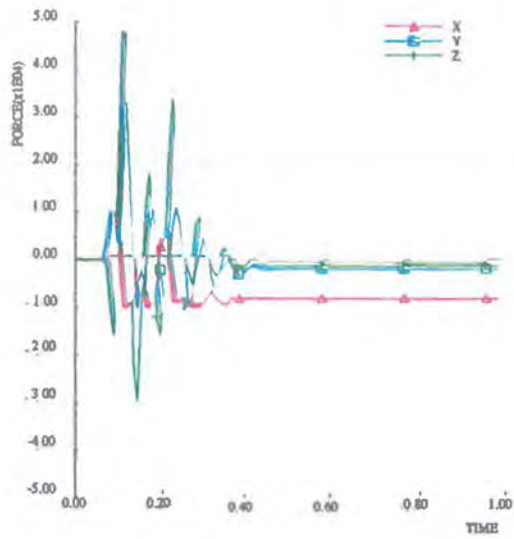




Afbeelding A9 (zie ook volgende blad). Verloop van de krachten en momenten in de vier assen (x, y, z en t) tegen de tijd tijdens de aanrijding met de lichte personenauto tegen de RWS-barrier.

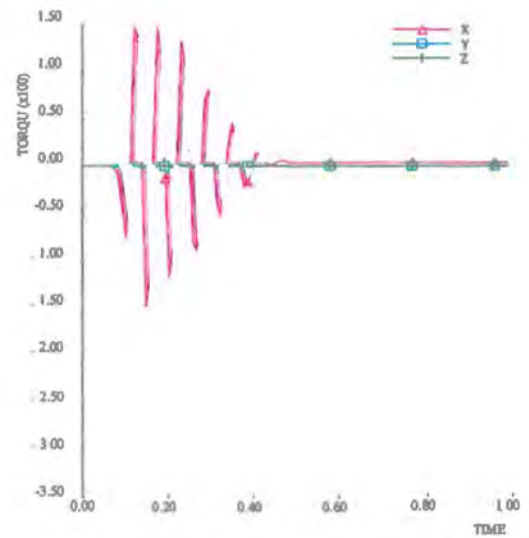
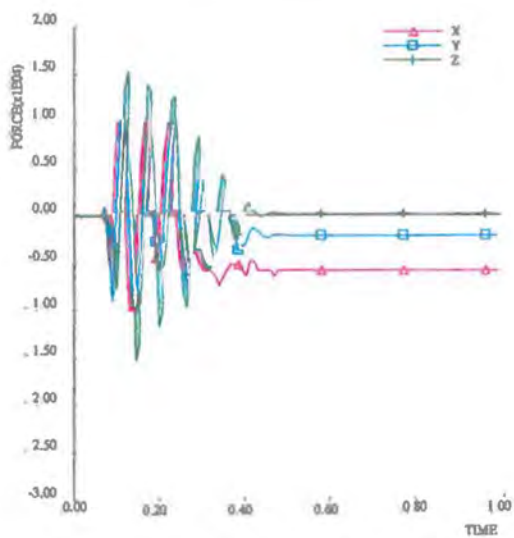
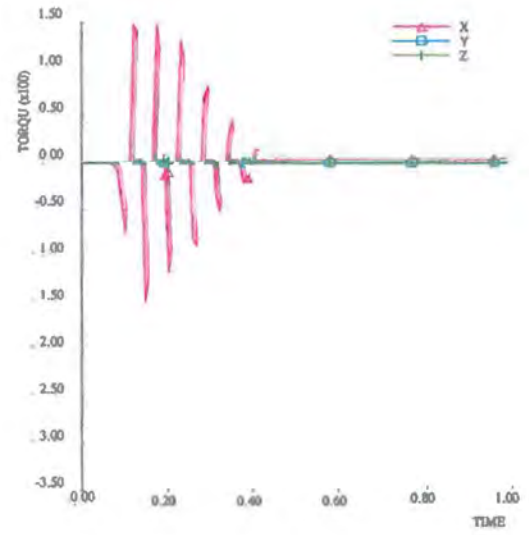
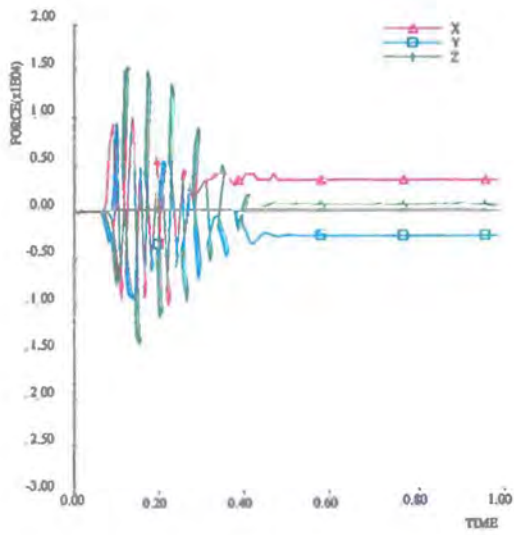
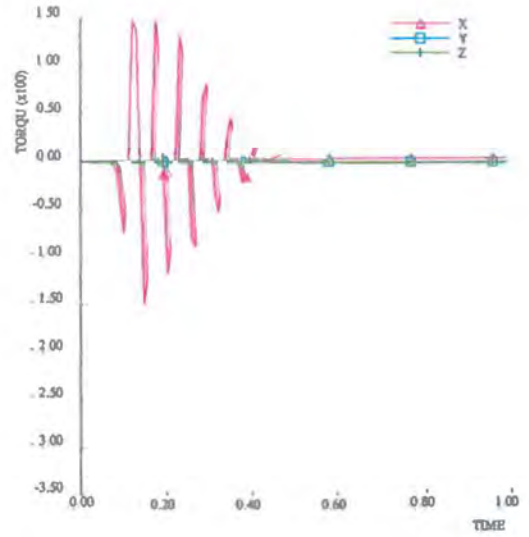
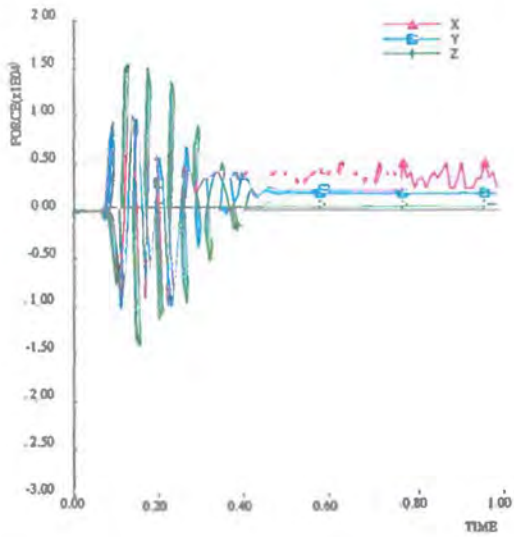






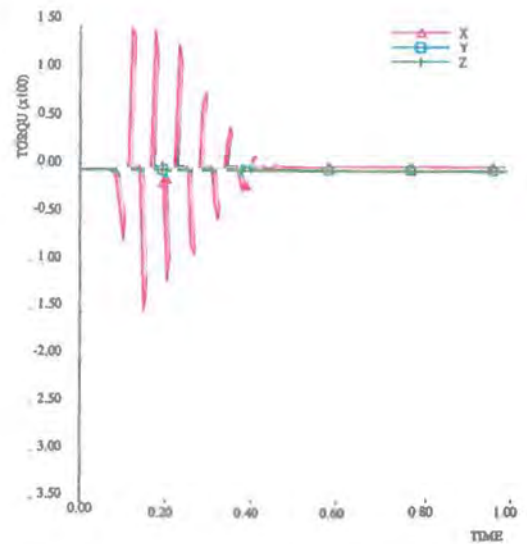
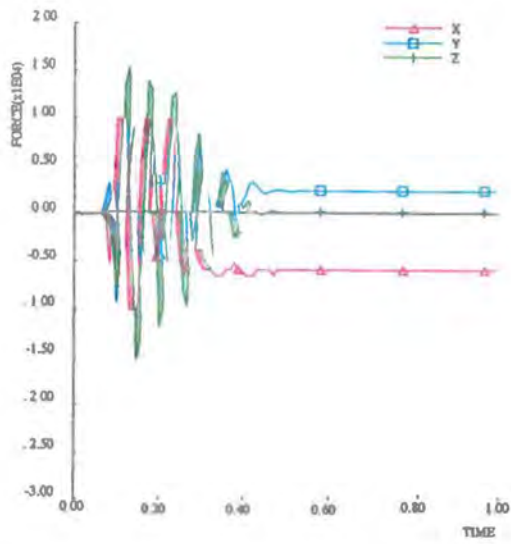
Afbeelding A9. Verloop van de krachten  $F_x$   $F_y$   $F_z$  en momenten  $M_x$   $M_y$   $M_z$  in de vier  $ax$  kerboutes van element 20 tegen de tijd  $t$  tijdens de aanrijding met de lichte personenauto tegen de RWS-barrière.





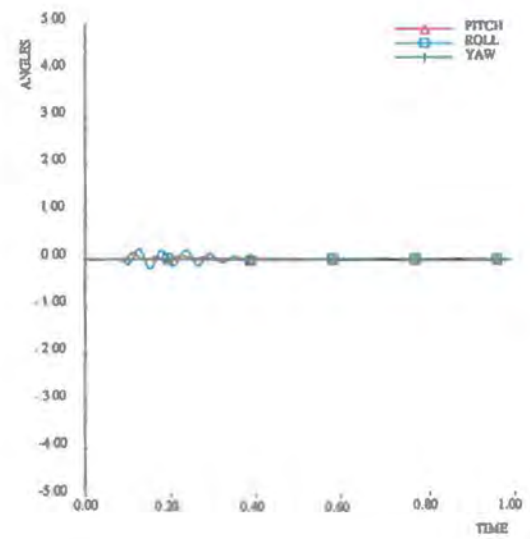
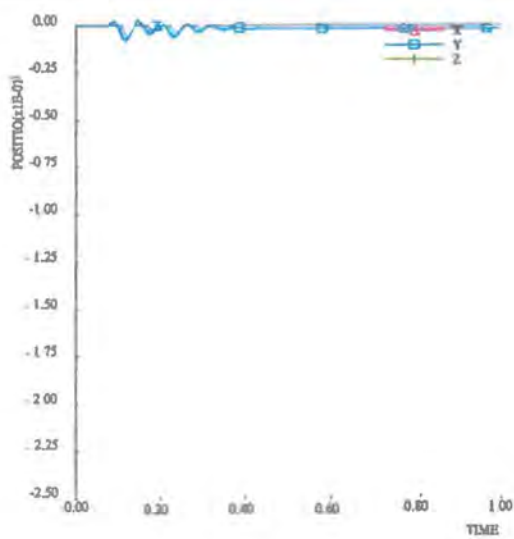
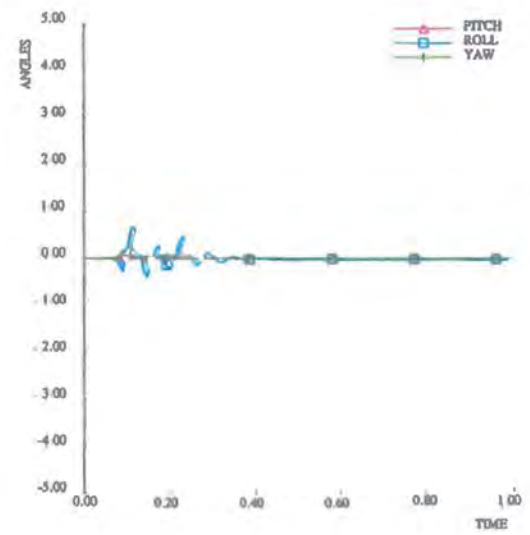
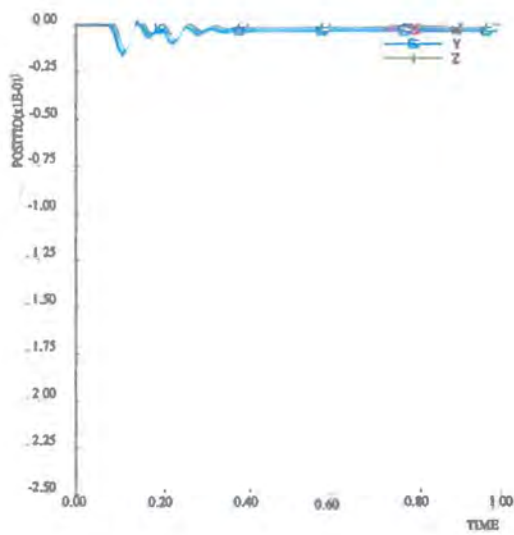
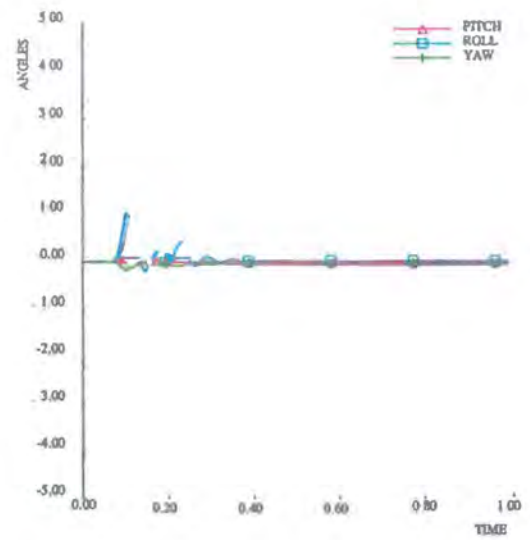
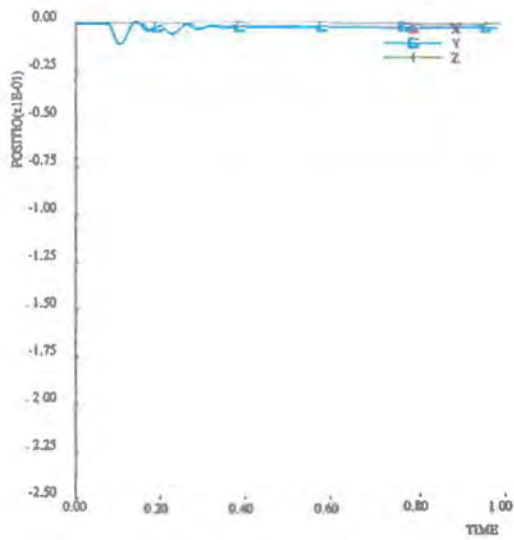
Abbeelding A10 (zie ook volgende blad). Veel oop van de krachten en momenten in de vier ankerbouten van element 21 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de lichte personenauto tegen de RWS-barrier.





Afbeelding A10. Verloop van de krachten en momenten in de vier ankerbouten van element 21 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de hoge personenauto tegen de RWS barrière.





Afbeelding A11. Verloop van de uitbuiging van de elementen 19, 20 en 21 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de lichte persoonsauto tegen de RWS barrière.

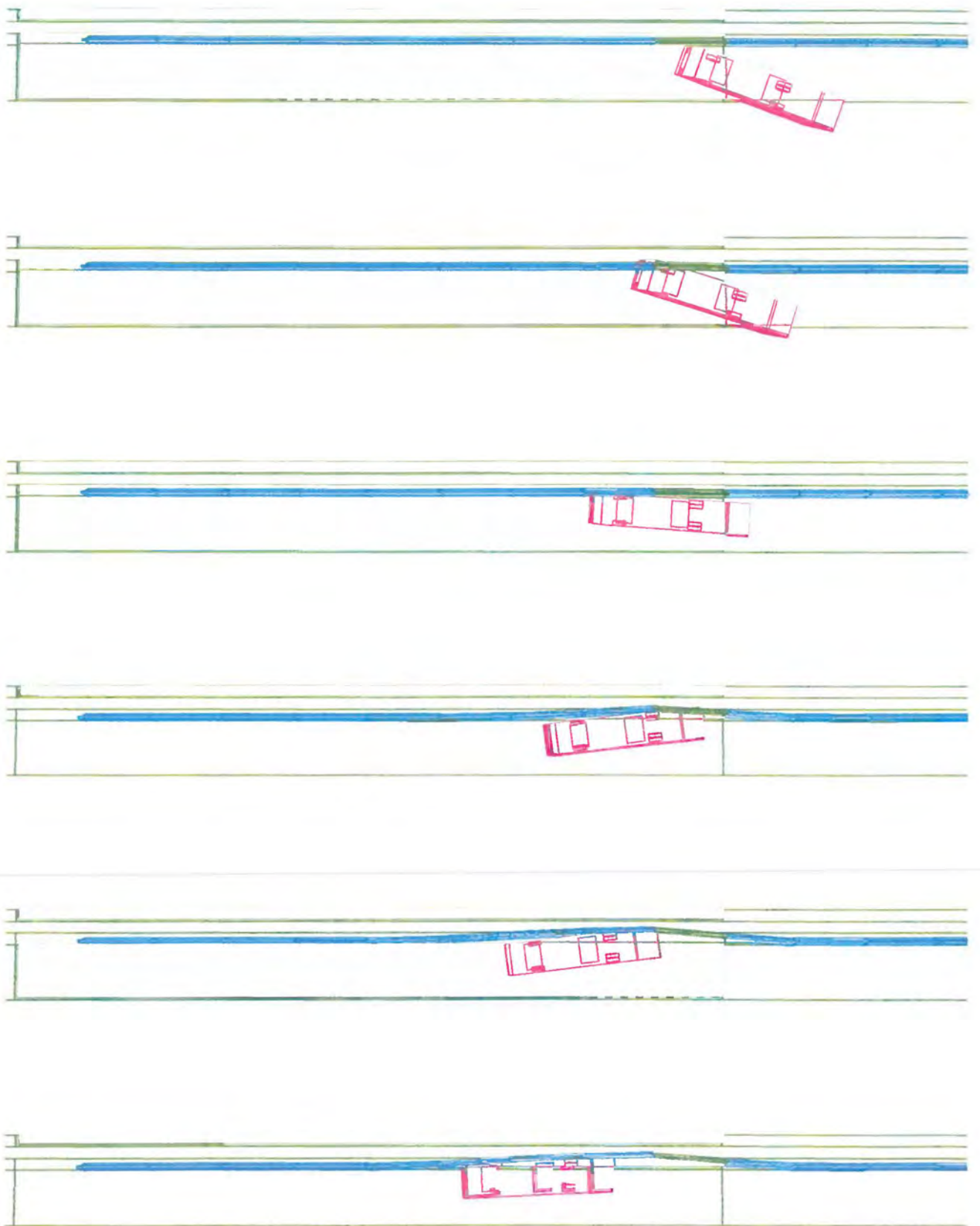




**Simulatie met de bus tegen de RWS-barrier, verankering aan één uiteinde element, 0 mm vervorming in ondergrond, verticaal 30 mm.**

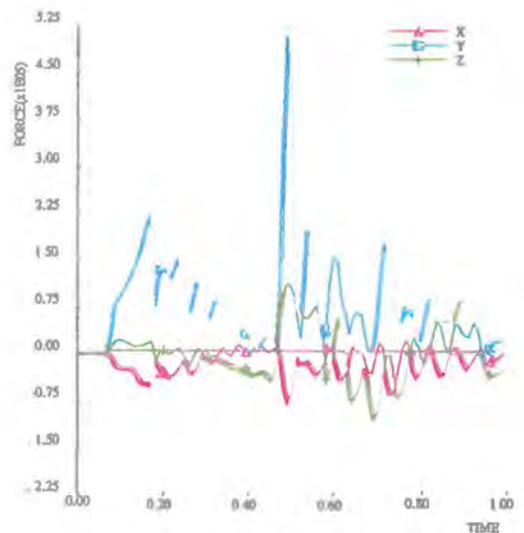
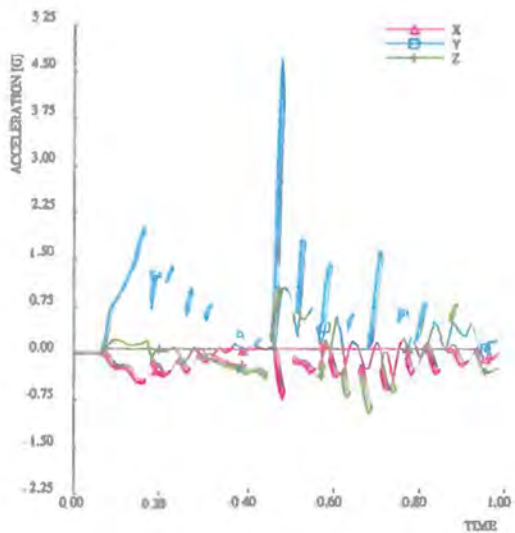
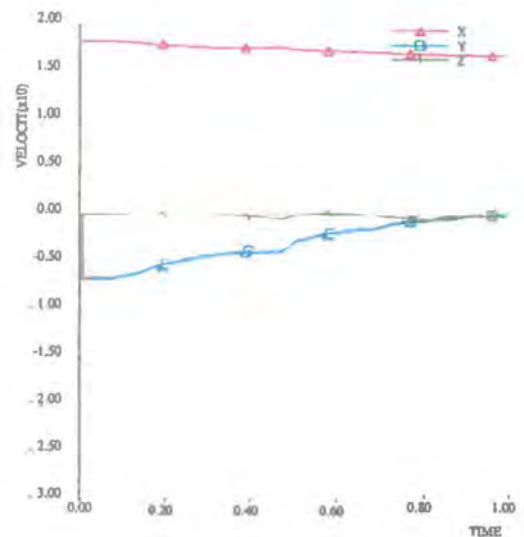
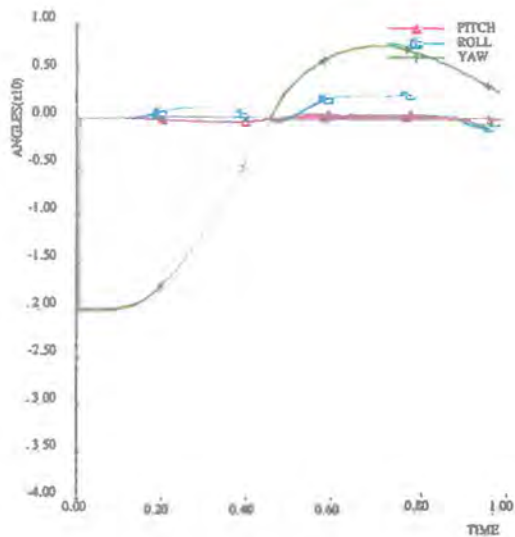
- B1. *Overzicht aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.*
- B2. *Verloop van de roll-, pitch- en yawhoek van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding tegen de RWS-barrier.*
- B3. *Verloop van de snelheid tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.*
- B4. *Verloop van de vertragingen in het zwaartepunt van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.*
- B5. *Verloop van de krachten in het zwaartepunt van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.*
- B6. *Verloop van de krachten en momenten in de koppeling tussen de elementen 19/20, 20/21 en 21/22 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.*
- B7. *Verloop van de krachten en momenten in de vier ankerbouten van element 19 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.*
- B8. *Verloop van de krachten en momenten in de vier ankerbouten van element 20 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.*
- B9. *Verloop van de krachten en momenten in de vier ankerbouten van element 21 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.*
- B10. *Verloop van de uitbuiging van de elementen 19, 20 en 21 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.*





Afbeelding B1. Overzicht aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.





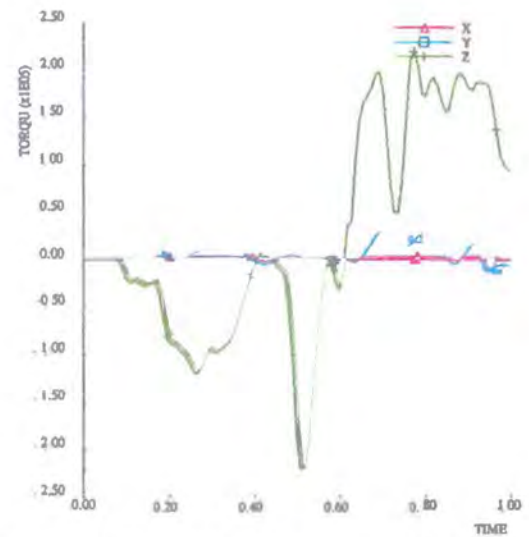
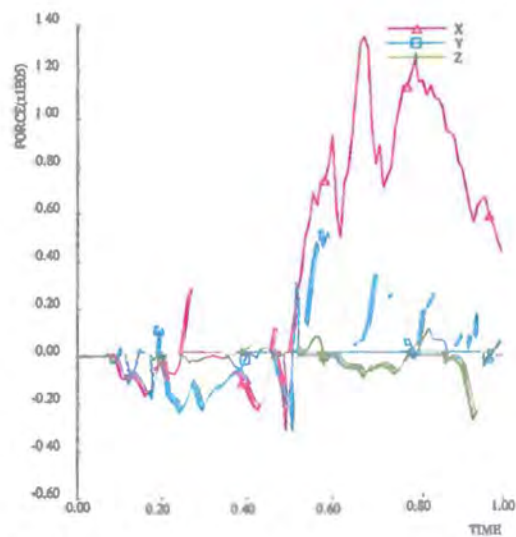
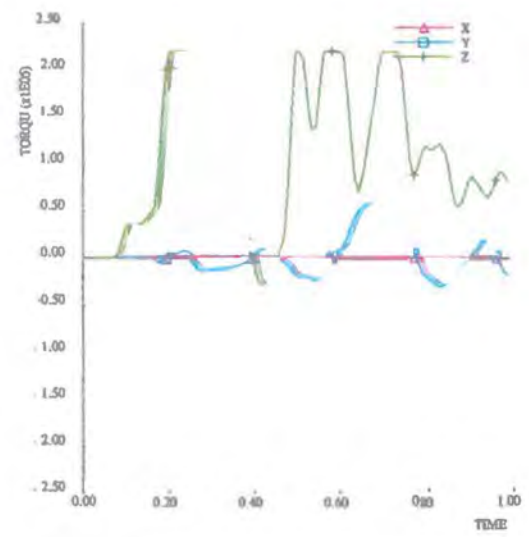
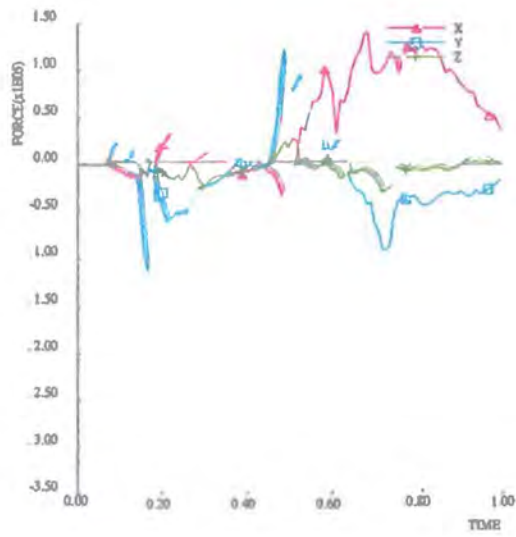
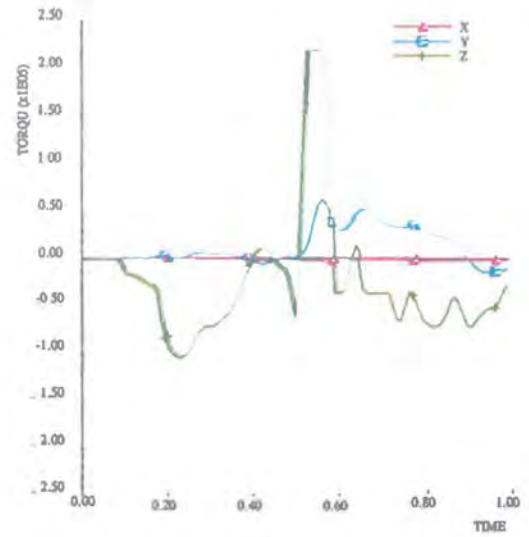
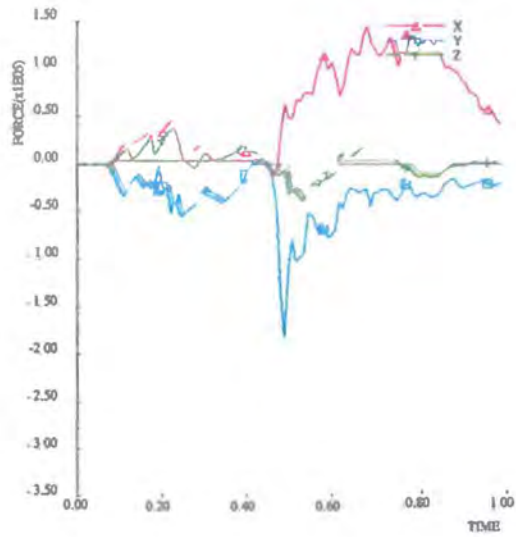
Afbeelding B2. Verloop van de roll-, pitch en yawhoek van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding tegen de RWS-barrier.

Afbeelding B3. Verloop van de snelheid tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.

Afbeelding B4. Verloop van de vertragingen in het zwaartepunt van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.

Afbeelding B5. Verloop van de krachten in het zwaartepunt van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.

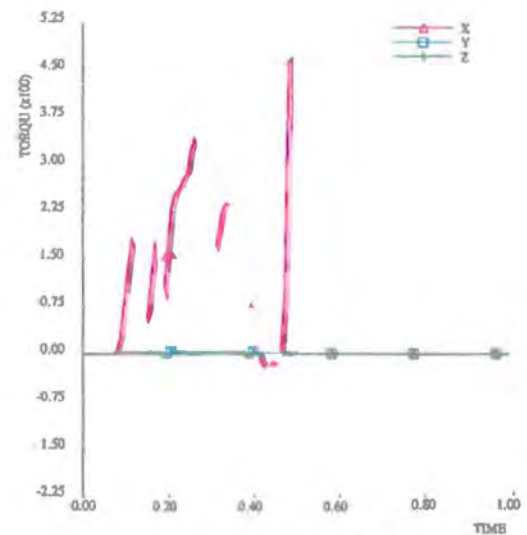
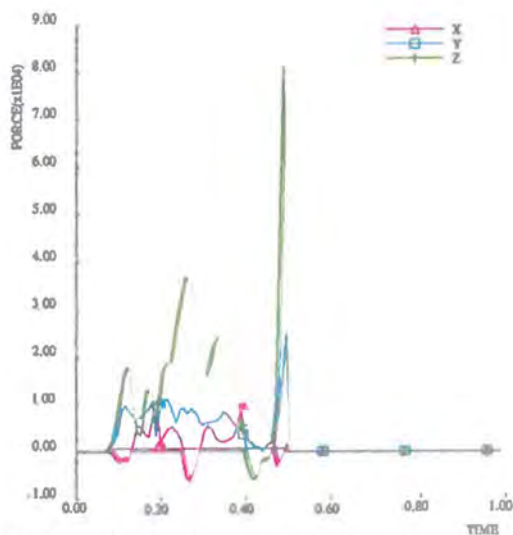
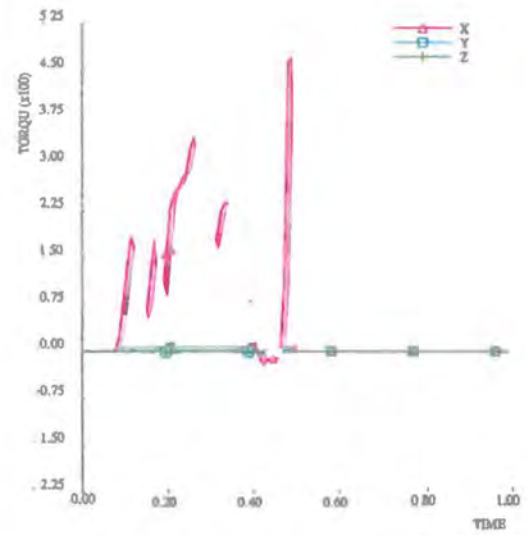
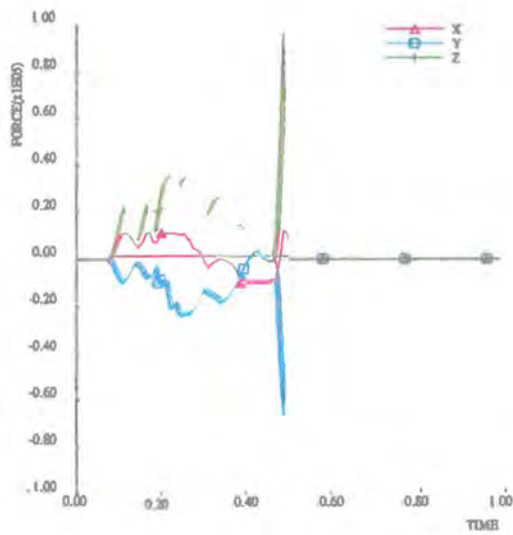
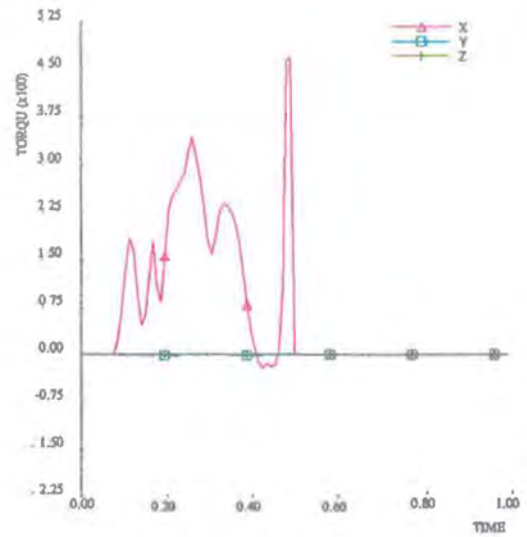
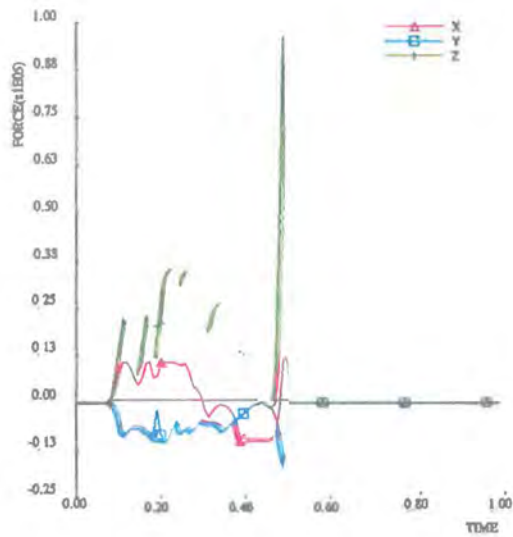




Afbeelding B6. Verloop van de krachten en momenten in de koppeling tussen de deuren 19/20, 20/21 en 21/22 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS barriër.

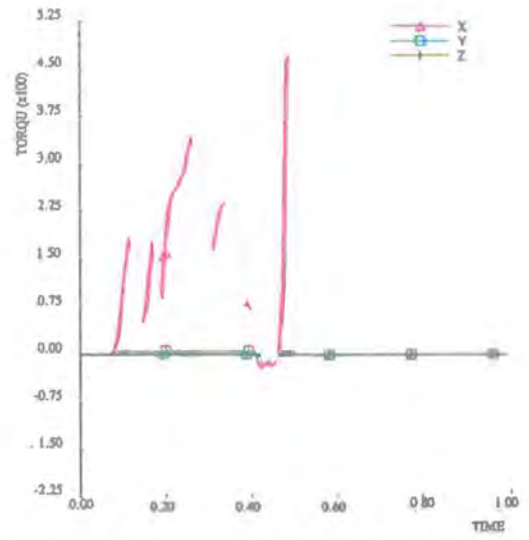
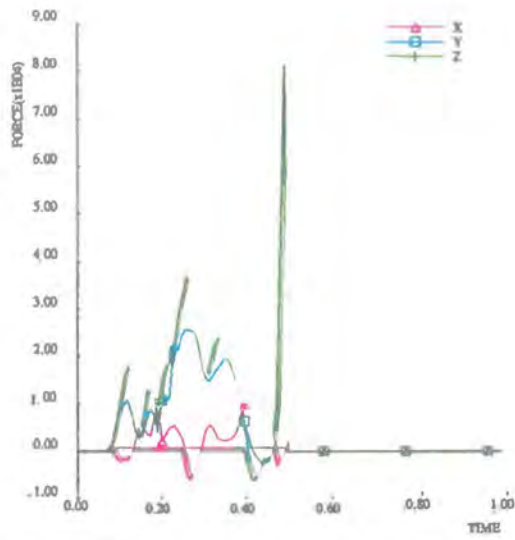






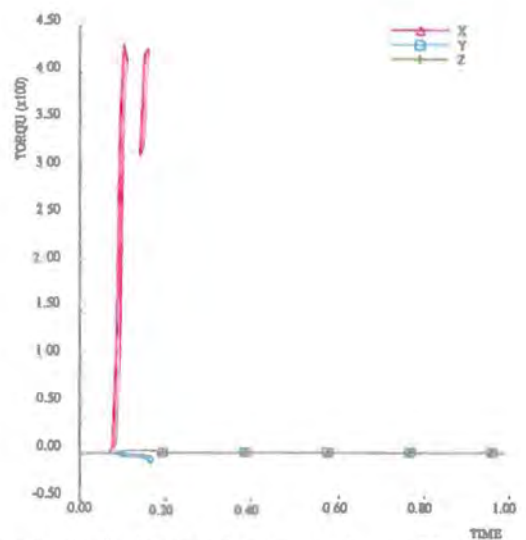
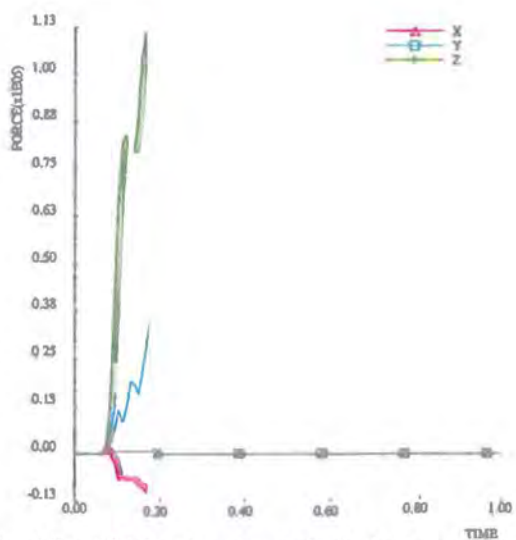
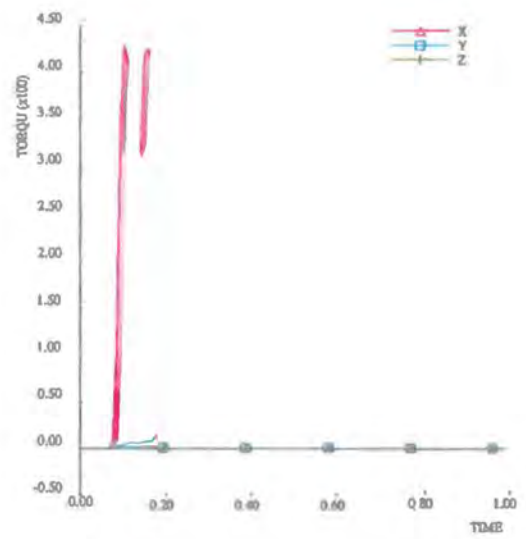
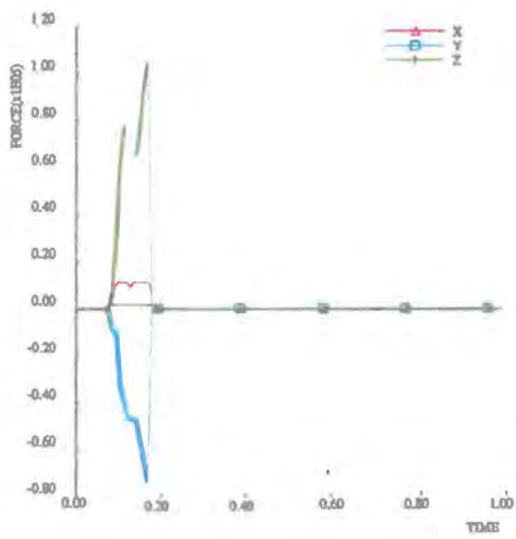
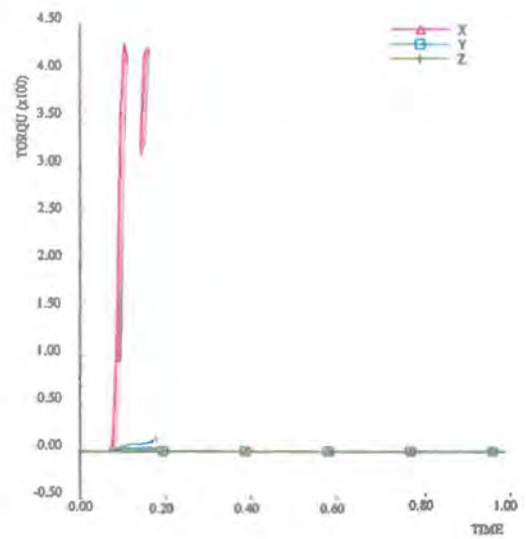
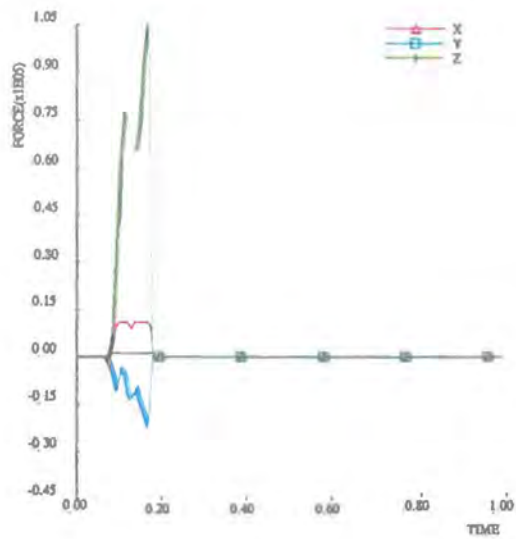
Afbeelding B7 (zie ook volgende blad). Verloop van de krachten en momenten in de vier ankerbouten van de motor 19 tegen de tijd tijdens de aansluiting met de bus tegen de RWS-lijer.





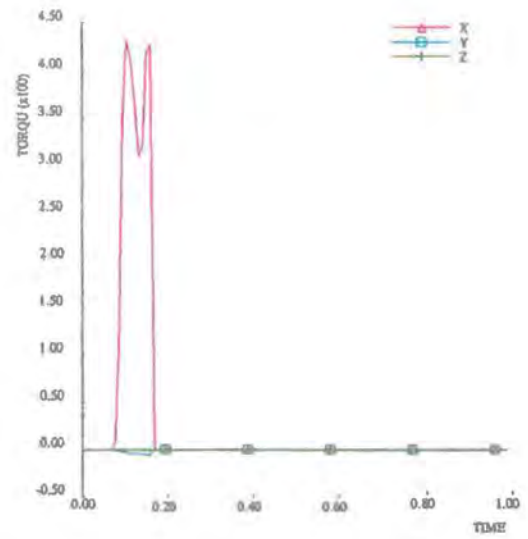
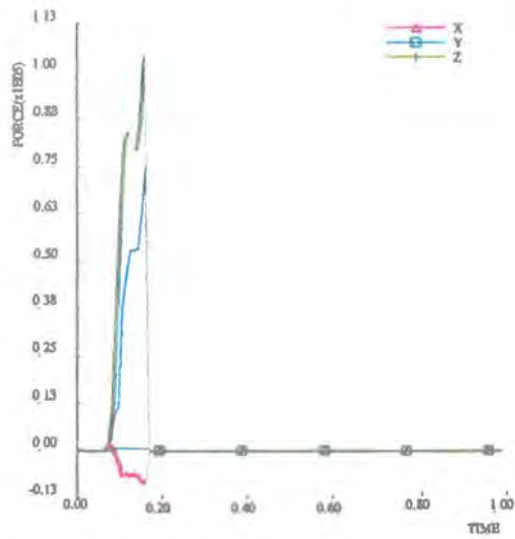
Afbeelding B7. Verloop van de krachten en momenten in de vier ankerbouten van element 19 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.





Afbeelding B8 (zie ook volgende blad). Verloop van de krachten en momenten in de vier ankerbolten van element 20 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de lichte personenauto tegen de RWS-barrière.

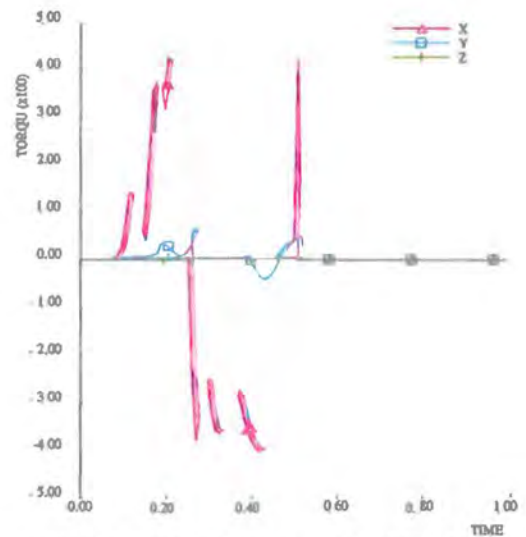
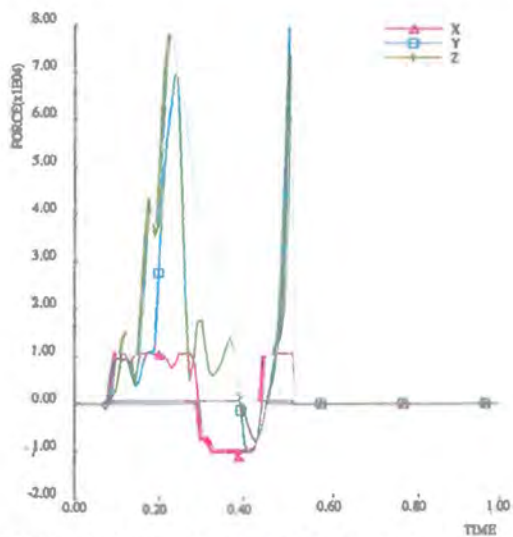
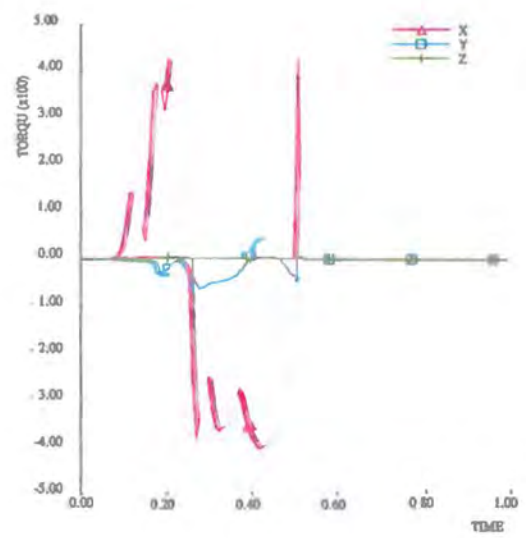
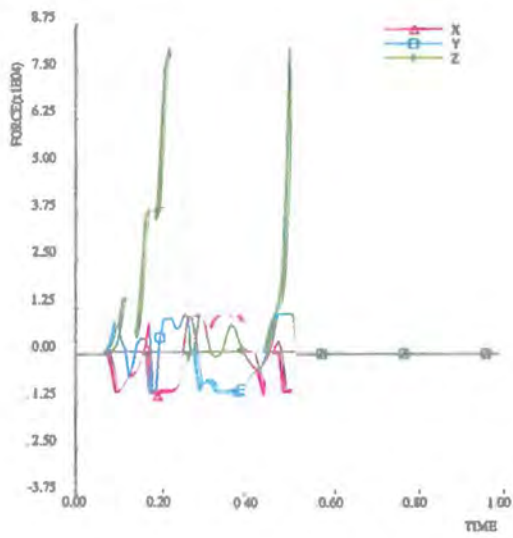
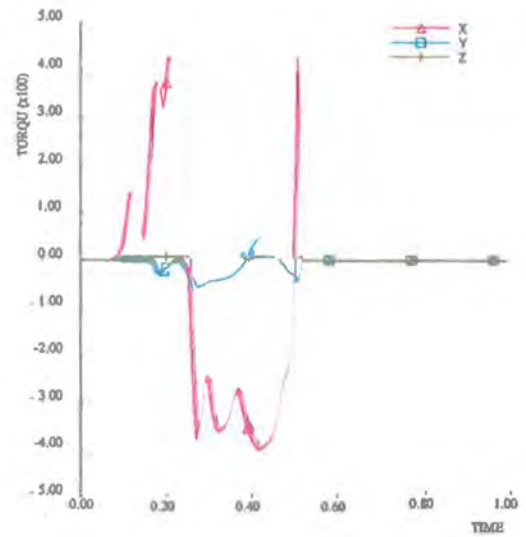
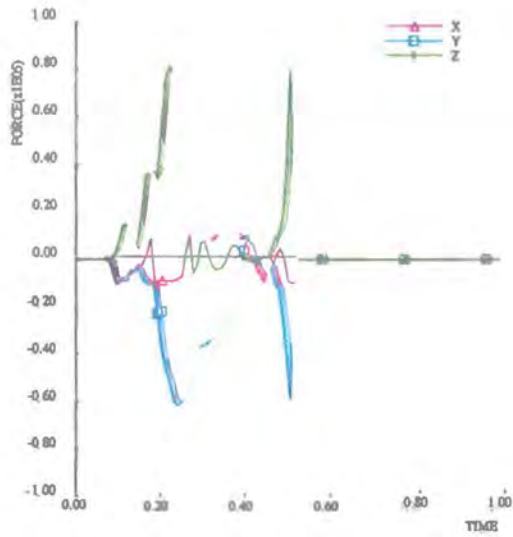




Afbeelding B8. Verloop van de krachten en momenten in de vier ankerbouten van element 20 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.

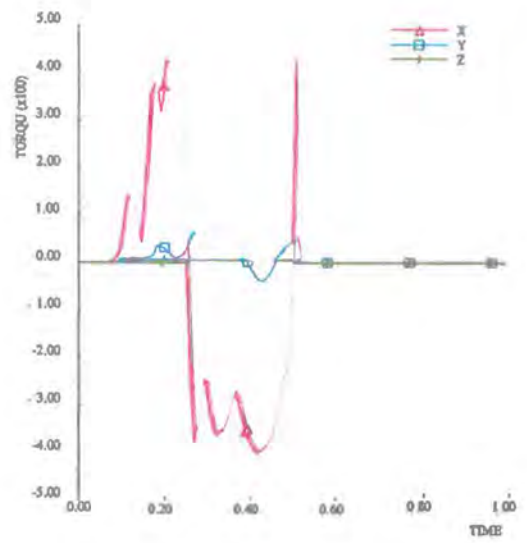
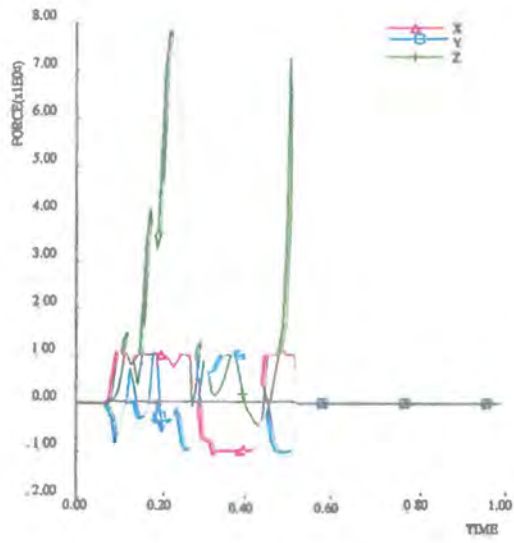






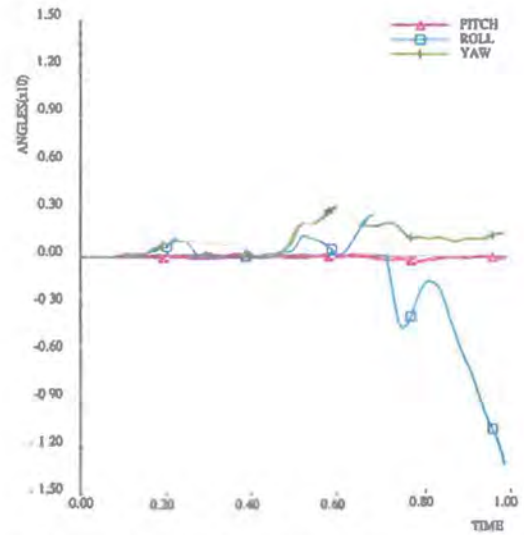
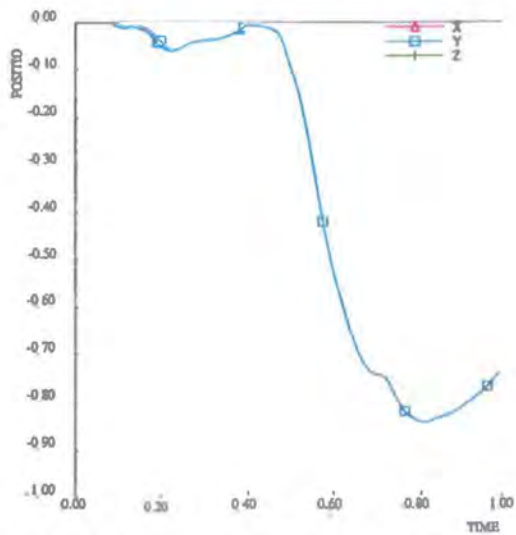
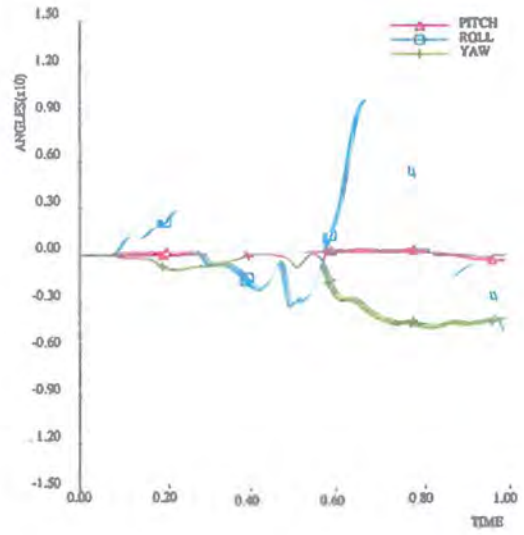
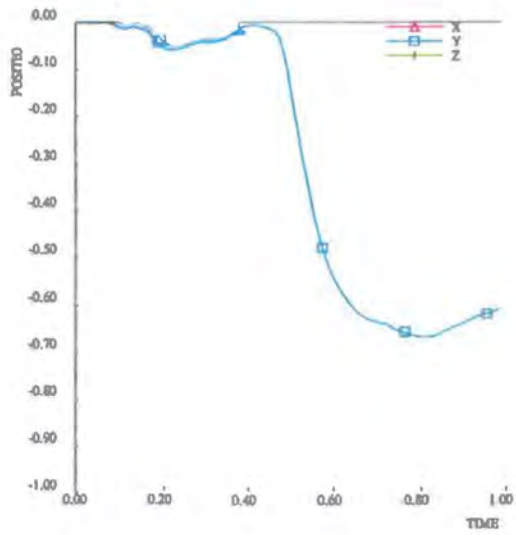
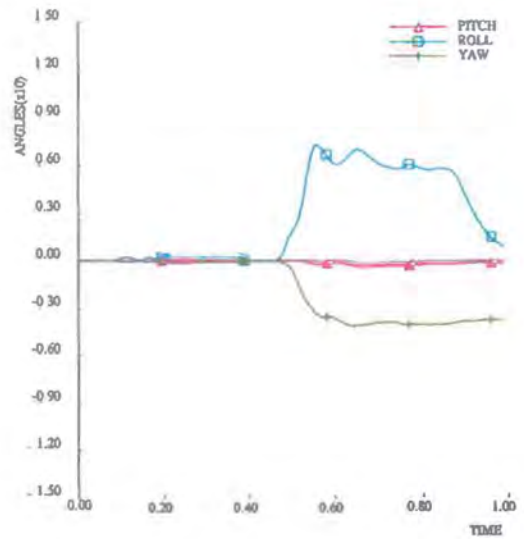
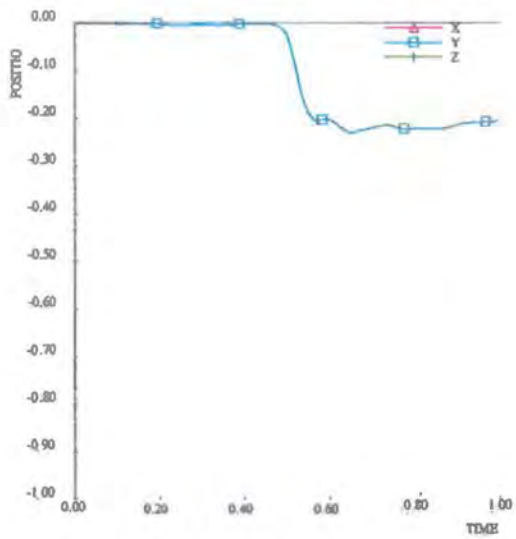
Afbeelding B9 (zie ook volgende blad). Verloop van de krachten en momenten in de vier ankerbouten van element 21 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de lichte personenauto tegen de RWS barrière.





Abbeelding B9. Verloop van de krachten en momenten in de vier ankerbouten van element 21 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.





Afbeelding B10. Verloop van de uitwijking van de elementen 19, 20 en 21 tegen de tijd tijdens de aanrijding, net de bus tegen de RWS-barrier.



**Simulatie met de bus tegen de RWS-barrier, verankering aan één uiteinde element, 5 mm vervorming in ondergrond, verticaal 30 mm.**

- C1. *Overzicht aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.*
- C2. *Verloop van de roll-, pitch- en yawhoek van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding tegen de RWS-barrier.*
- C3. *Verloop van de snelheid tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.*
- C4. *Verloop van de vertragingen in het zwaartepunt van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.*
- C5. *Verloop van de krachten in het zwaartepunt van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.*
- C6. *Verloop van de krachten en momenten in de koppeling tussen de elementen 19/20, 20/21 en 21/22 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.*
- C7. *Verloop van de krachten en momenten in de vier ankerbouten van element 19 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.*
- C8. *Verloop van de krachten en momenten in de vier ankerbouten van element 20 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.*
- C9. *Verloop van de krachten en momenten in de vier ankerbouten van element 21 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.*
- C10. *Verloop van de uitbuiging van de elementen 19, 20 en 21 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.*

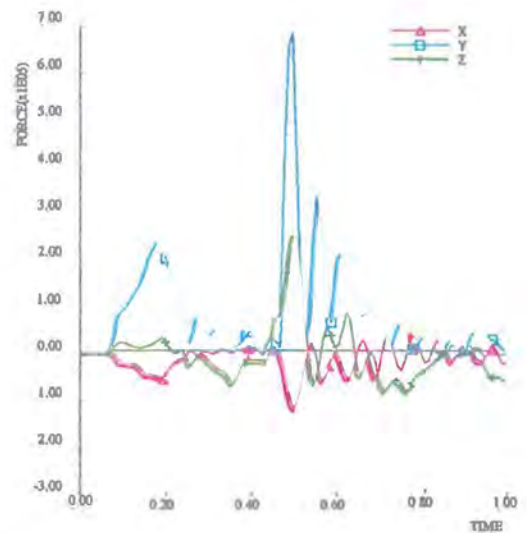
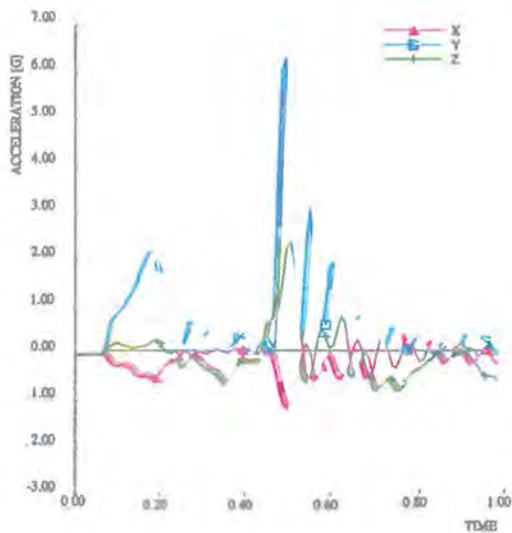
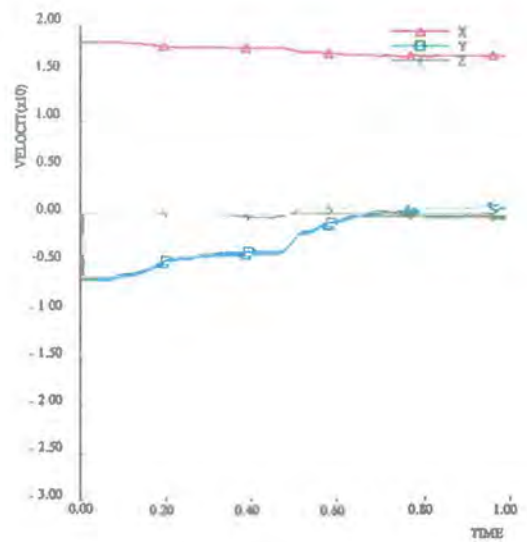
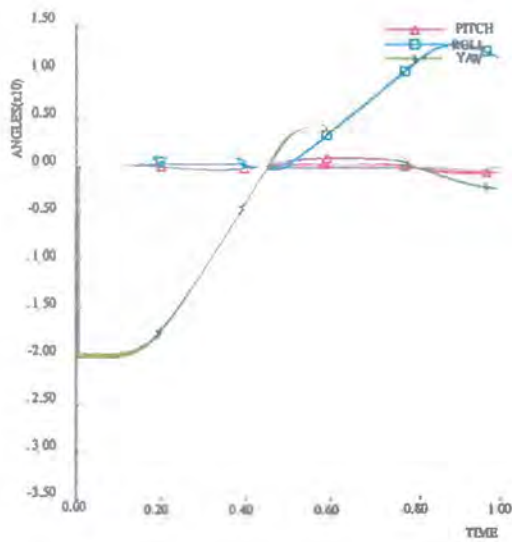






Afbeelding C1. *Overzicht aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.*





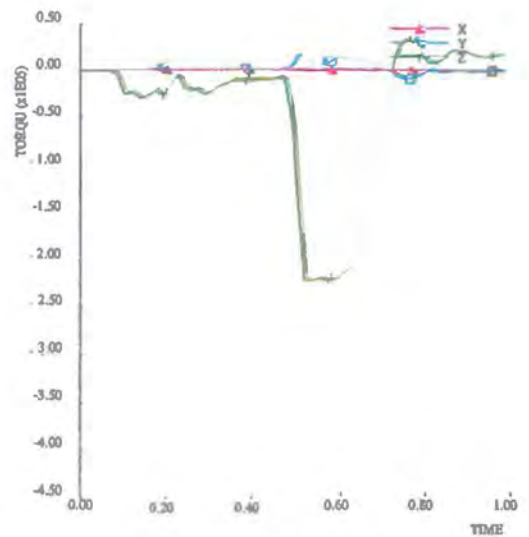
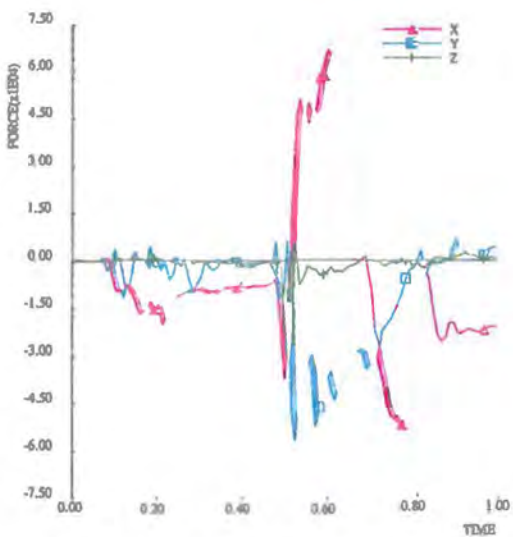
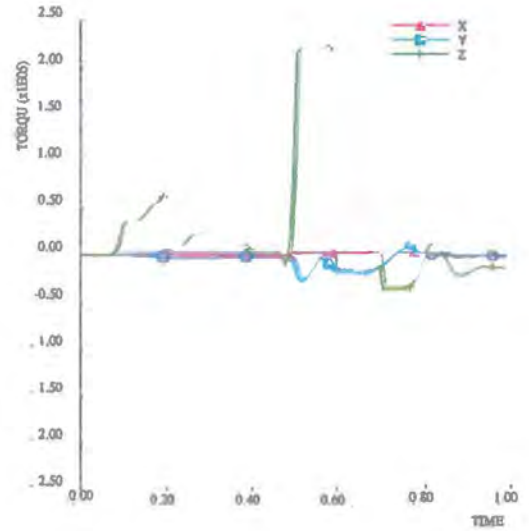
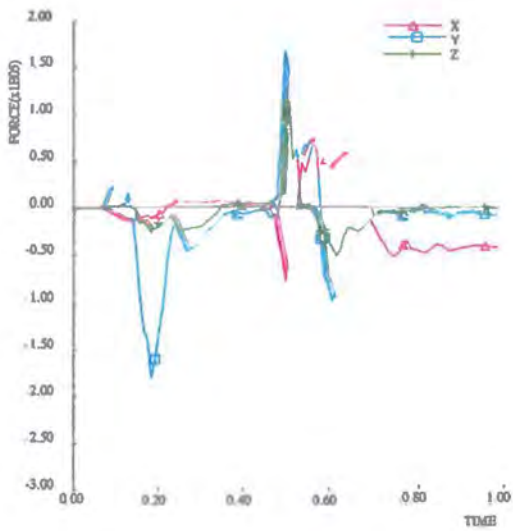
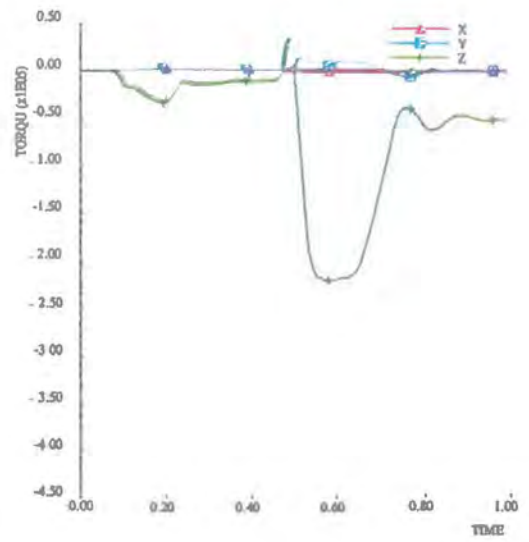
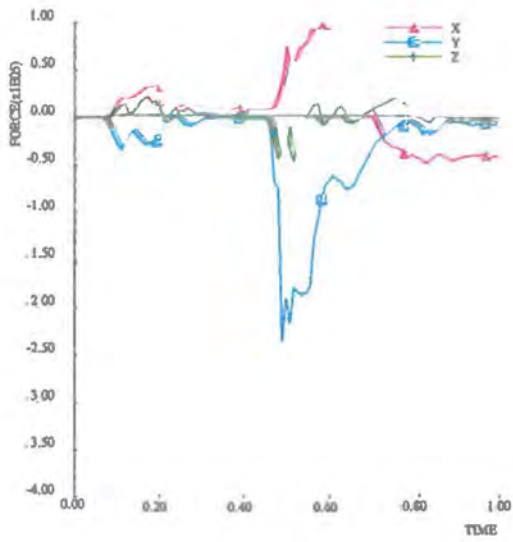
Afbeelding C2. Verloop van de roll-, pitch- en yawhoek van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding tegen de RWS-barrier.

Afbeelding C3. Verloop van de snelheid tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.

Afbeelding C4. Verloop van de vertragingen in het zwaartepunt van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.

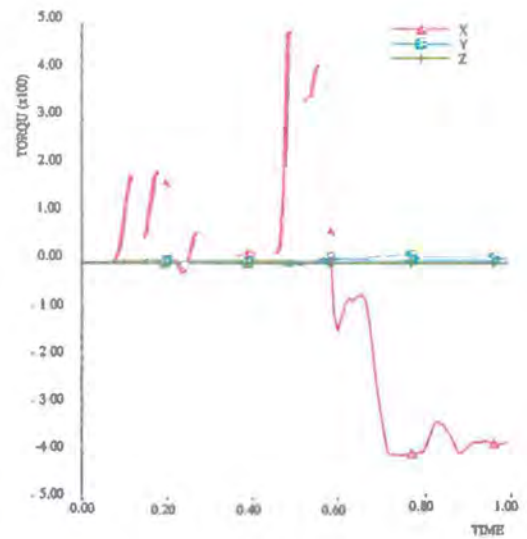
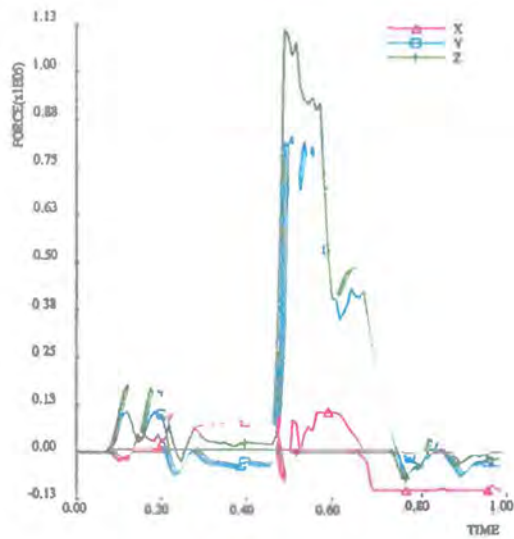
Afbeelding C5. Verloop van de krachten in het zwaartepunt van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.





Afbeelding C6. Verloop van de kracht en momenten in de koppeling tussen de elementen 19/20, 20/21 en 21/22 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrière.

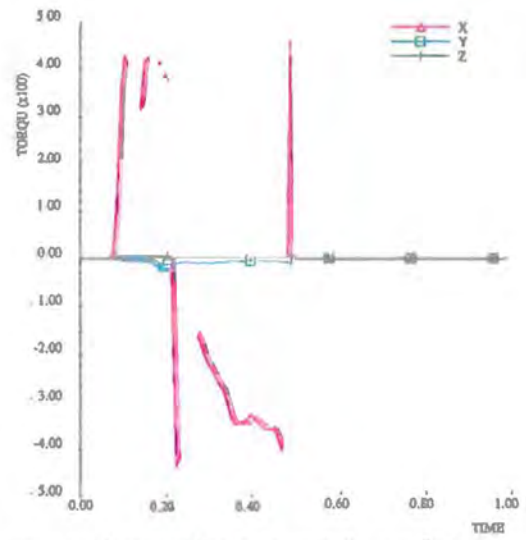
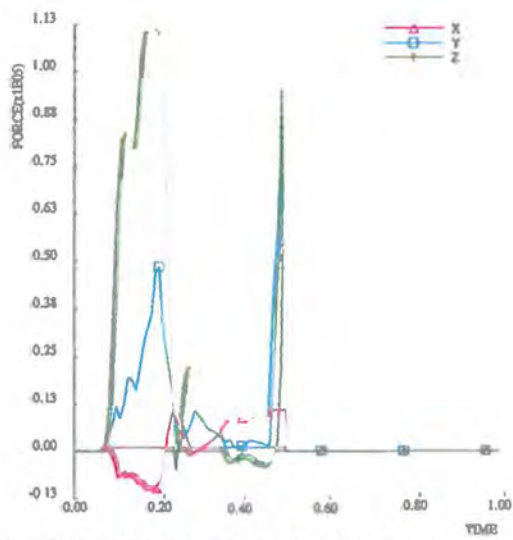
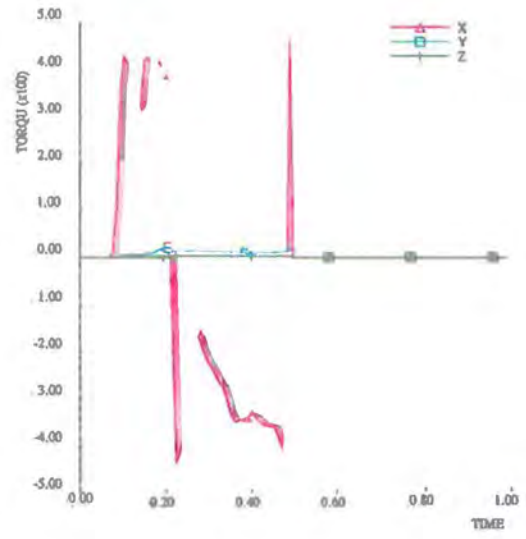
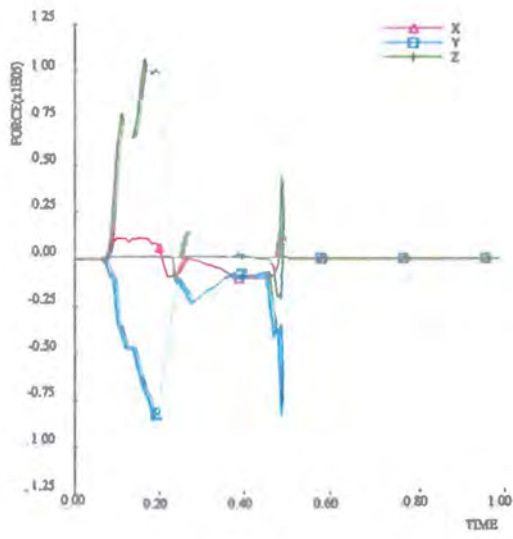
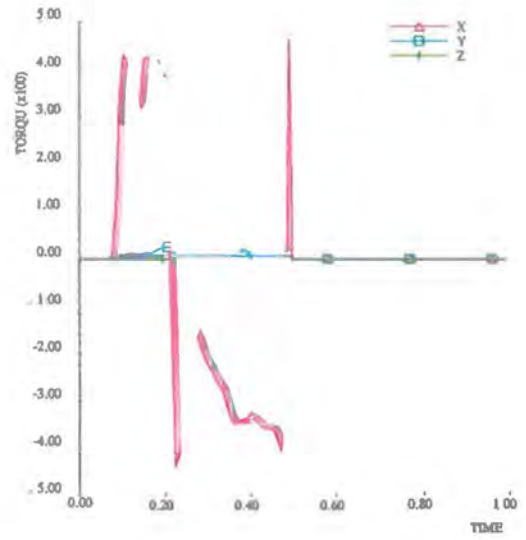
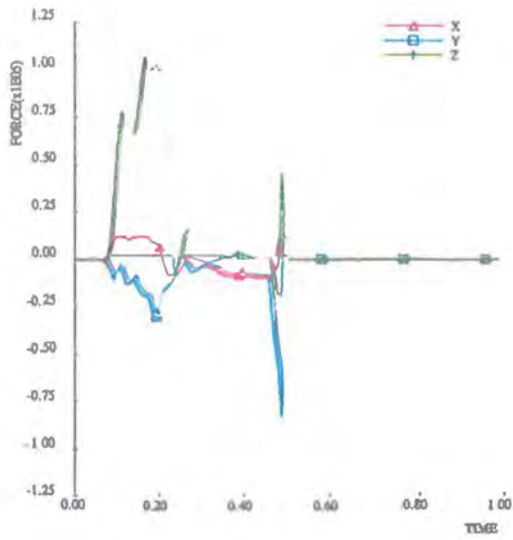




Afbeelding C7. Verloop van de krachten en momenten in de vier ankerbouten van element 19 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.

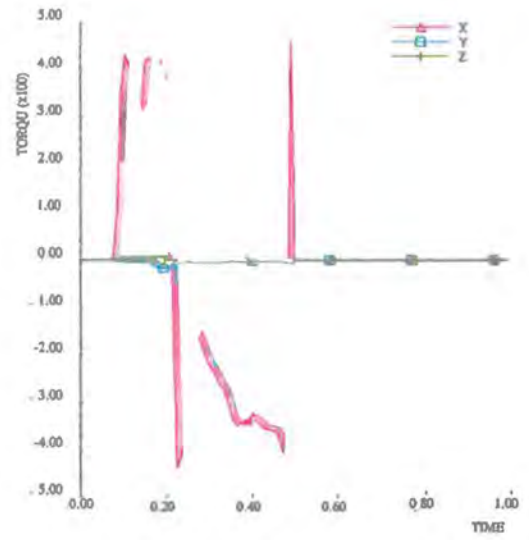
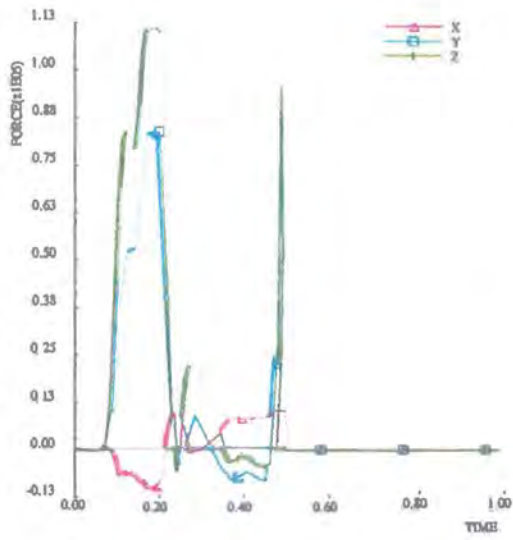






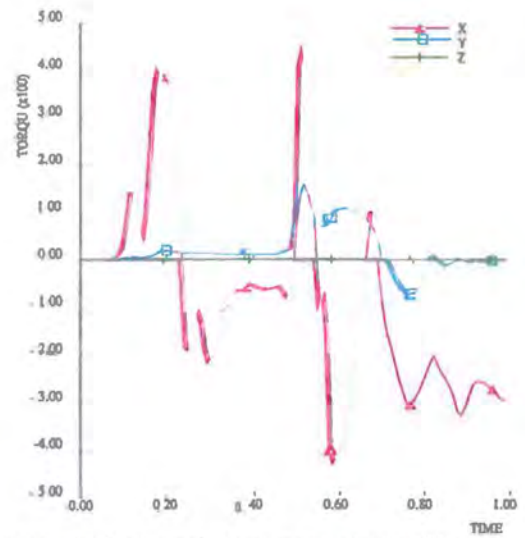
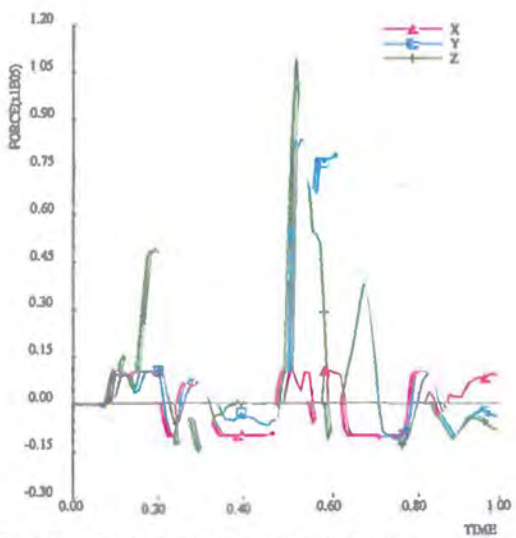
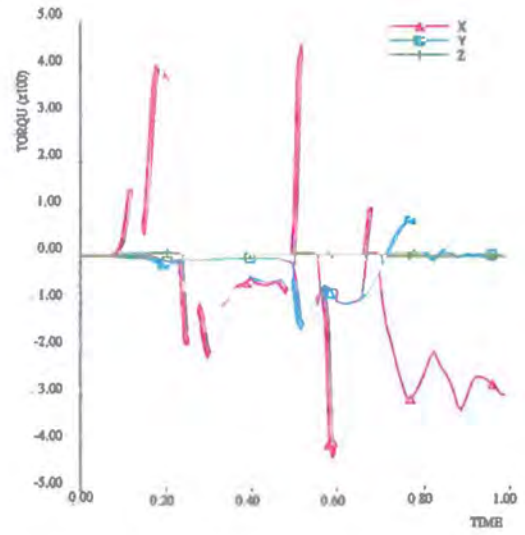
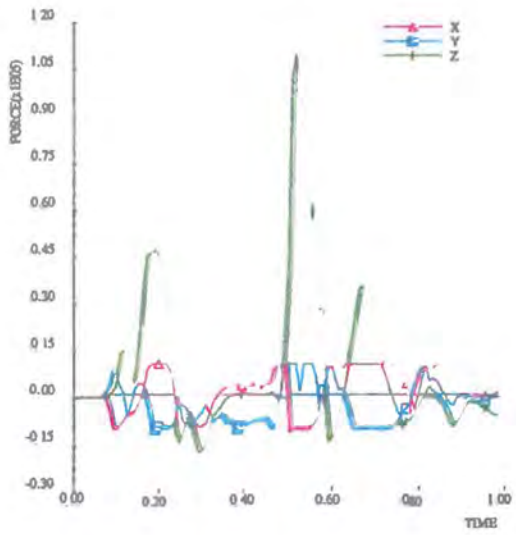
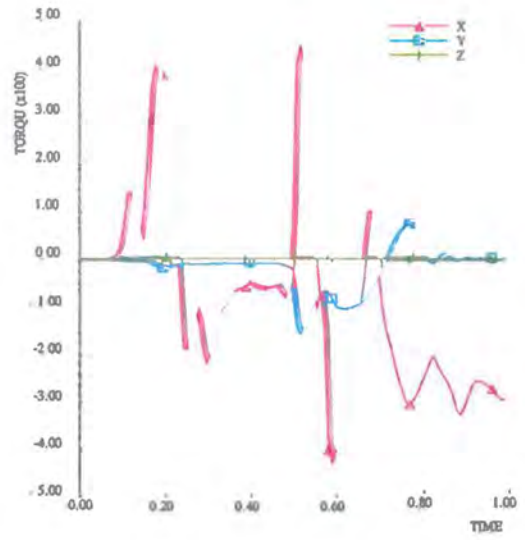
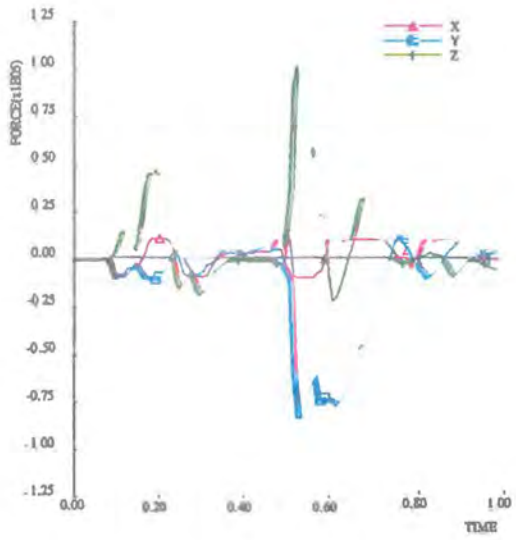
Afbeelding C8 (zie ook volgende blad). Verloop van de krachten en momenten in de vier inkeuthoeken van element  $\bar{A}$  tegen de tijd tijdens de aanrijding met de fichte personeelsto tegen de RWS- $\bar{A}$ -rier.





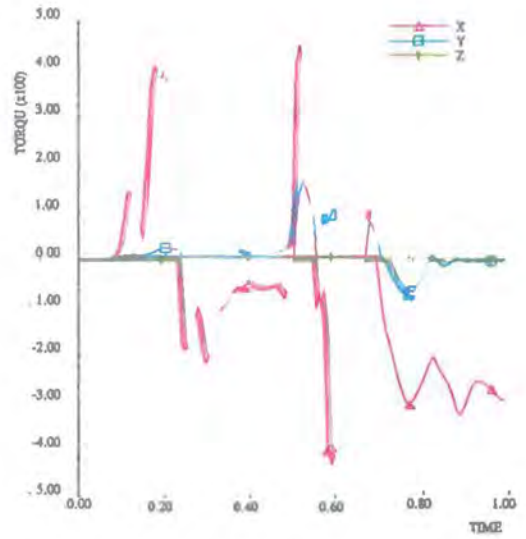
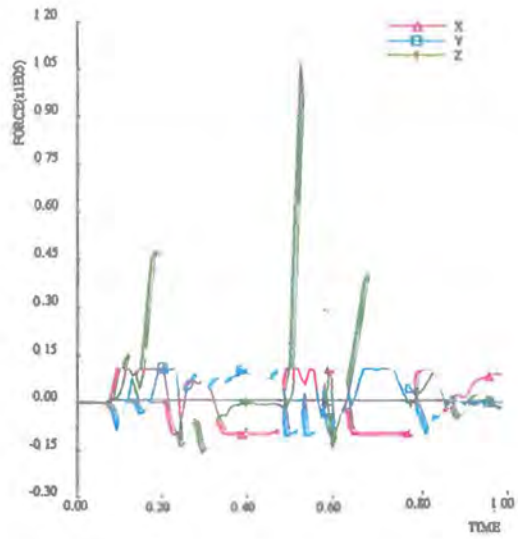
Afbeelding C8. Verloop van de krachten en momenten in de vier ankerbouten van element 20 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.





Abbeelding C9 (zie ook volgende bladzijde). Verloop van de krachten en momenten in de vier ankerbouten van element 21 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de lichte persoon naar tegen de RWS-barrier

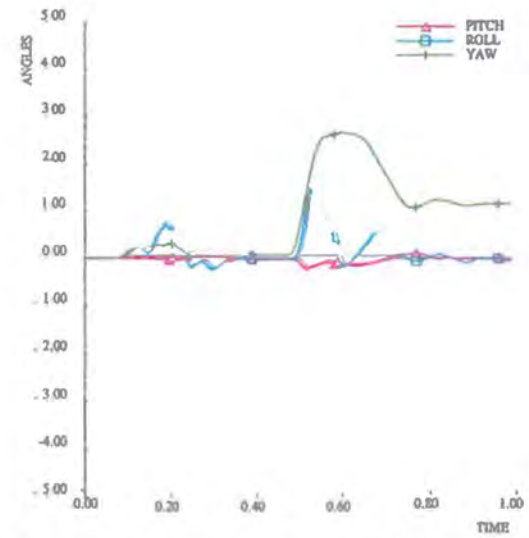
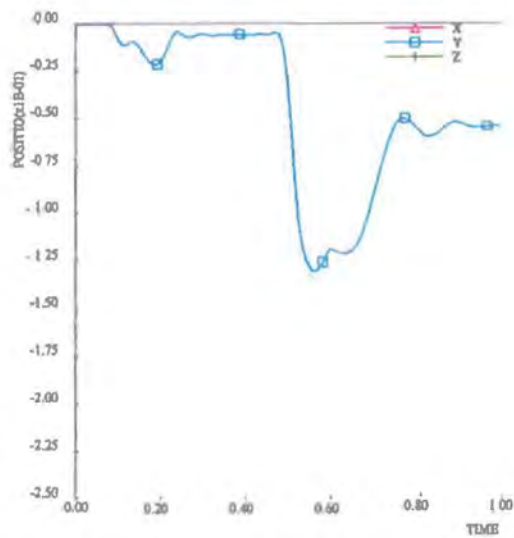
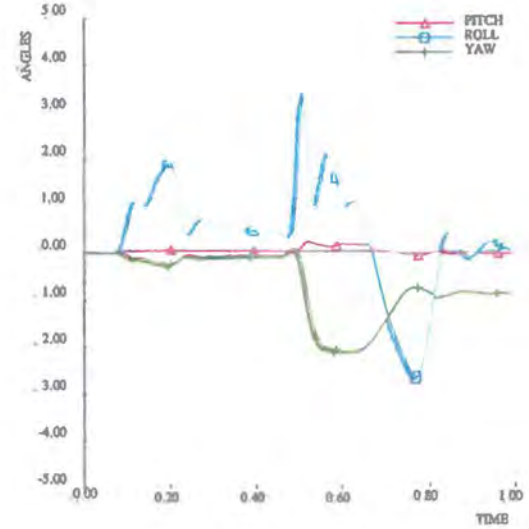
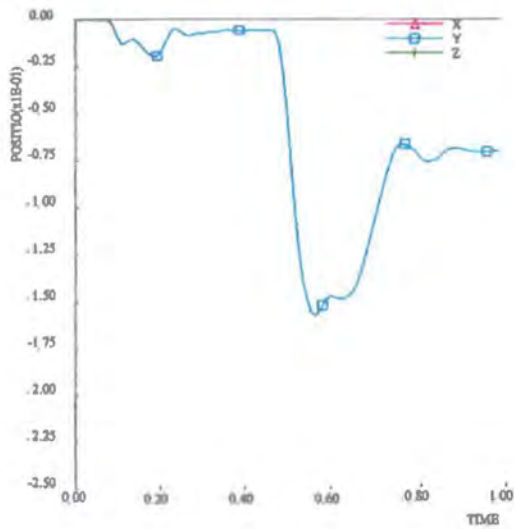
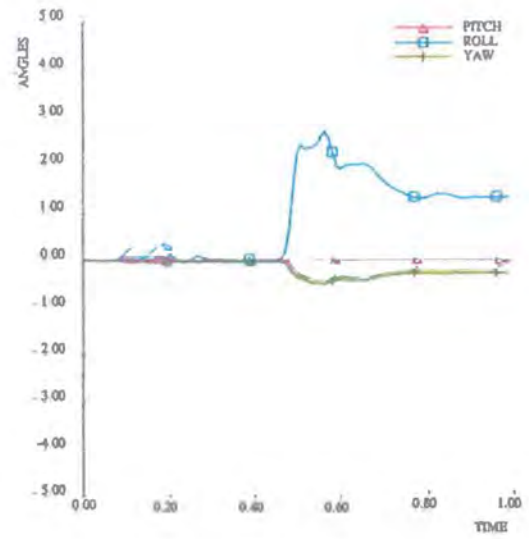
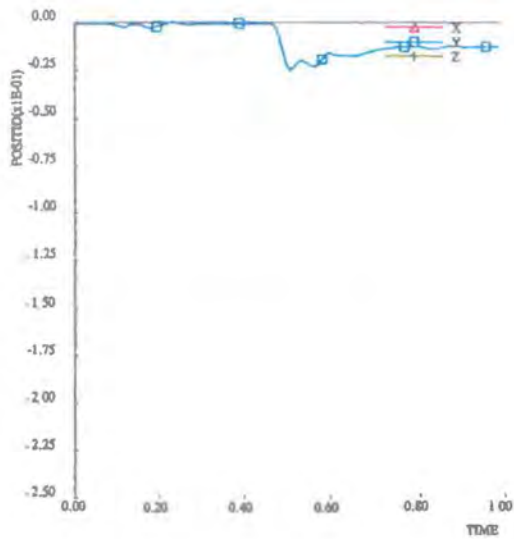




Afbeelding C9. Verloop van de krachten en momenten in de vier ankerbouten van element 21 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.







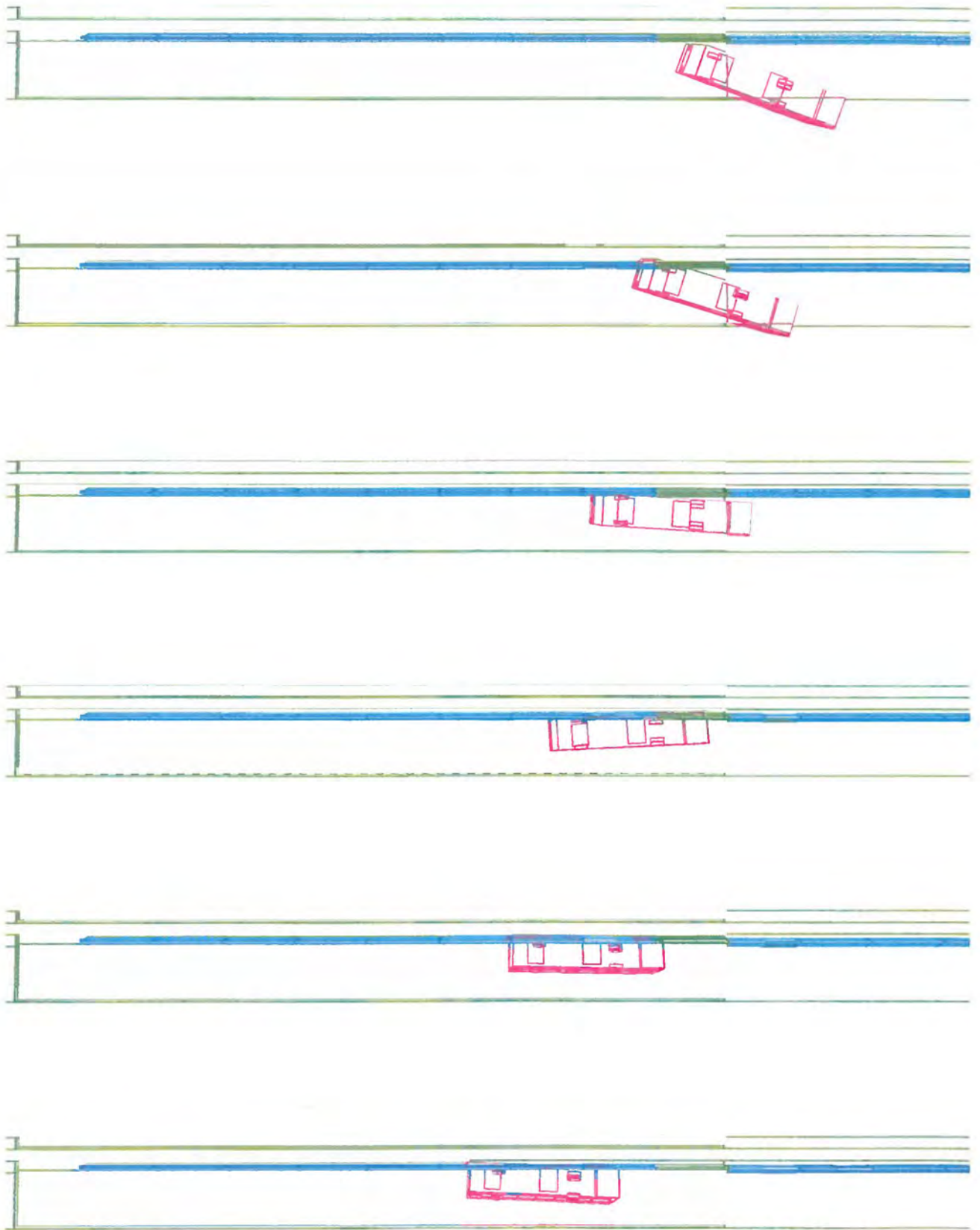
Afbeelding C10. Verloop van de uitwijking van de elementen 19, 20 en 21 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-berrier.



**Simulatie met de bus tegen de RWS-barrier, verankering aan één uiteinde element, 10 mm vervorming in ondergrond, verticaal 30 mm.**

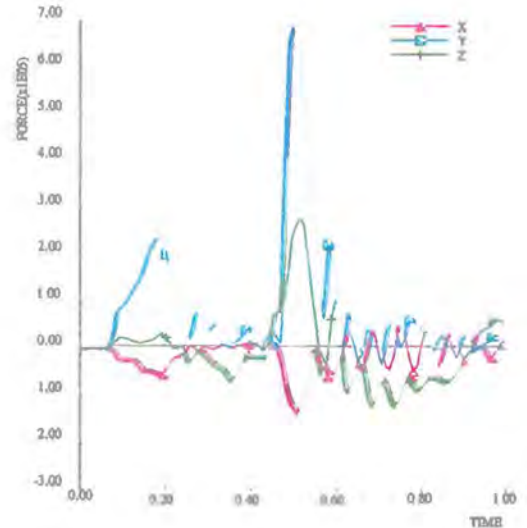
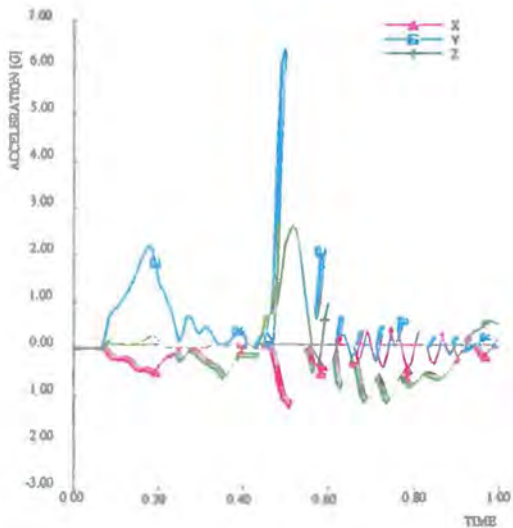
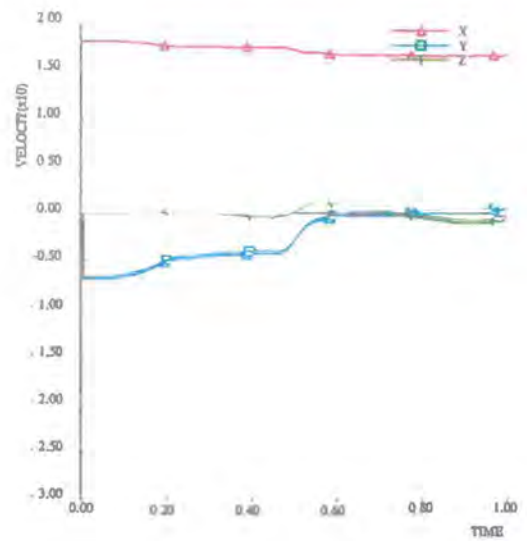
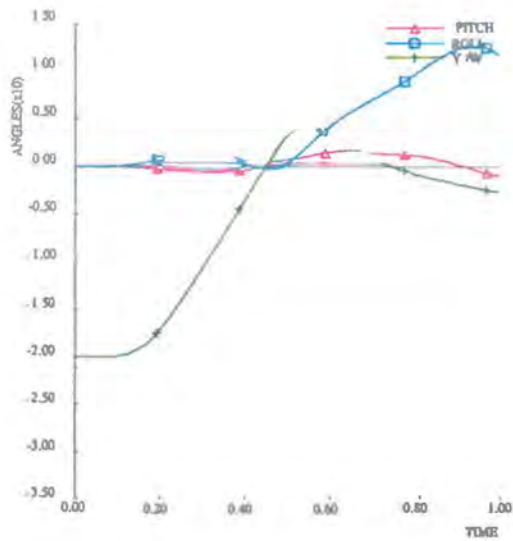
- D1. *Overzicht aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.*
- D2. *Verloop van de roll-, pitch- en yawhoek van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding tegen de RWS-barrier.*
- D3. *Verloop van de snelheid tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.*
- D4. *Verloop van de vertragingen in het zwaartepunt van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.*
- D5. *Verloop van de krachten in het zwaartepunt van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.*
- D6. *Verloop van de krachten en momenten in de koppeling tussen de elementen 19/20, 20/21 en 21/22 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.*
- D7. *Verloop van de krachten en momenten in de vier ankerbouten van element 19 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.*
- D8. *Verloop van de krachten en momenten in de vier ankerbouten van element 20 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.*
- D9. *Verloop van de krachten en momenten in de vier ankerbouten van element 21 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.*
- D10. *Verloop van de uitbuiging van de elementen 19, 20 en 21 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.*





Afbeelding D1. Overzicht aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.





Afbeelding D2. Verloop van de roll-, pitch- en yawhoek van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding tegen de RWS-barrier.

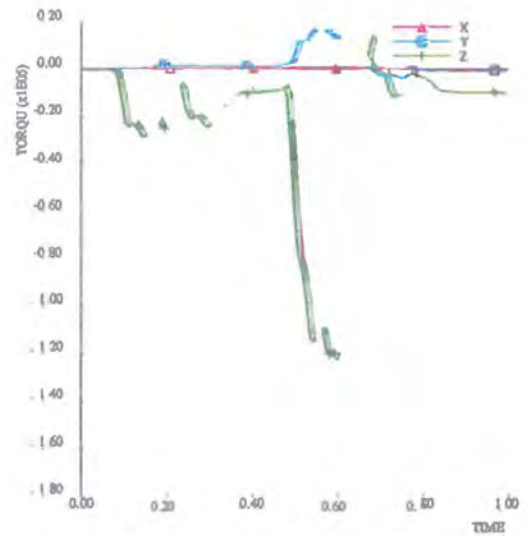
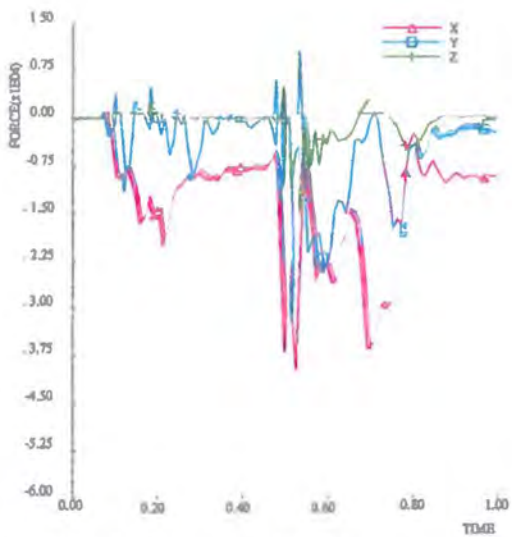
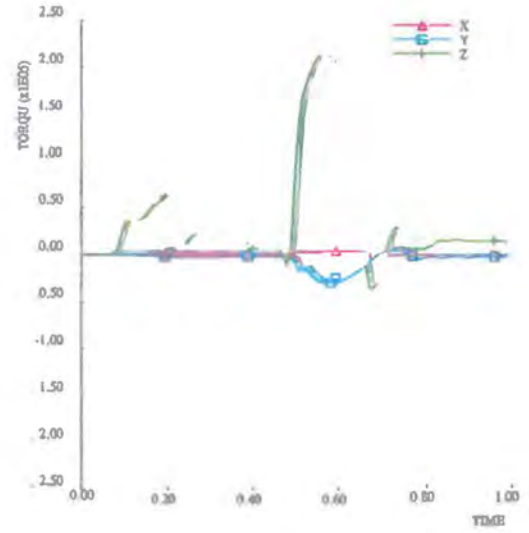
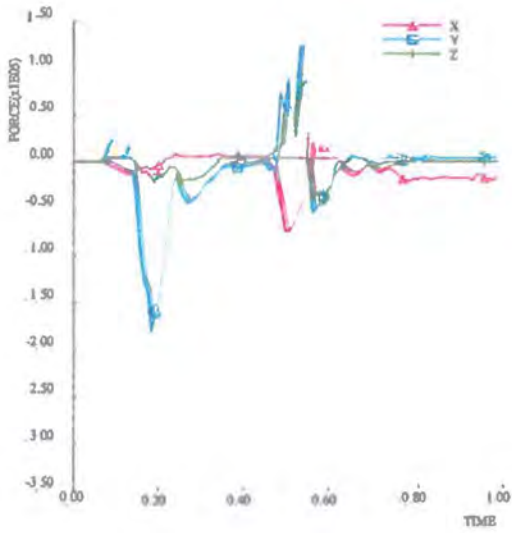
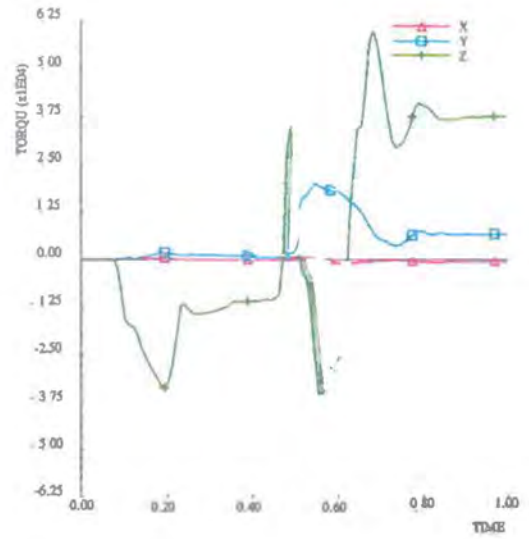
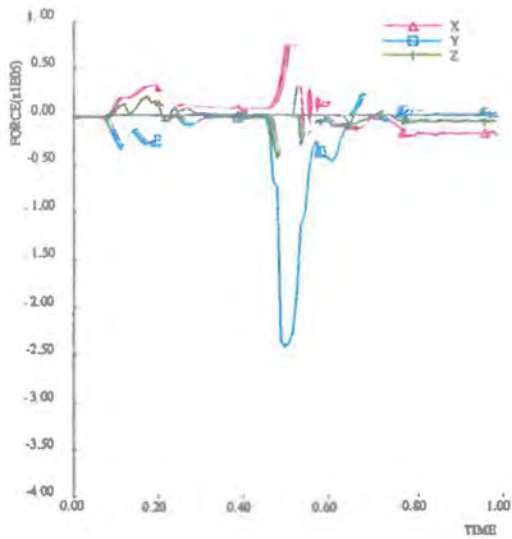
Afbeelding D3. Verloop van de snelheid tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.

Afbeelding D4. Verloop van de vertragingen in het zwaartepunt van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.

Afbeelding D5. Verloop van de krachten in het zwaartepunt van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.

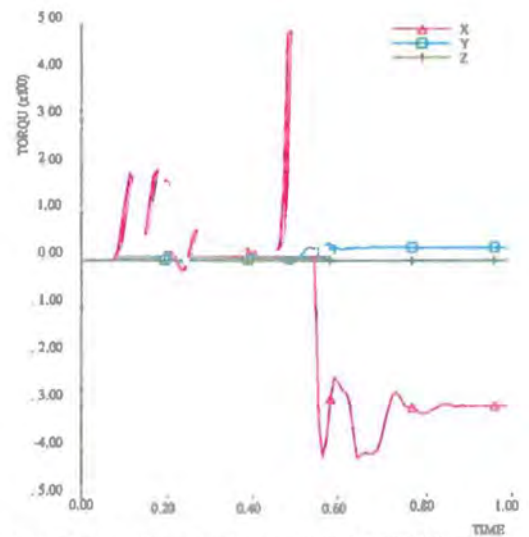
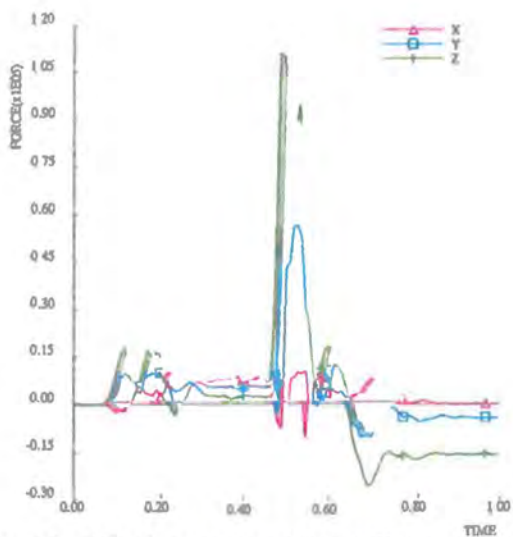
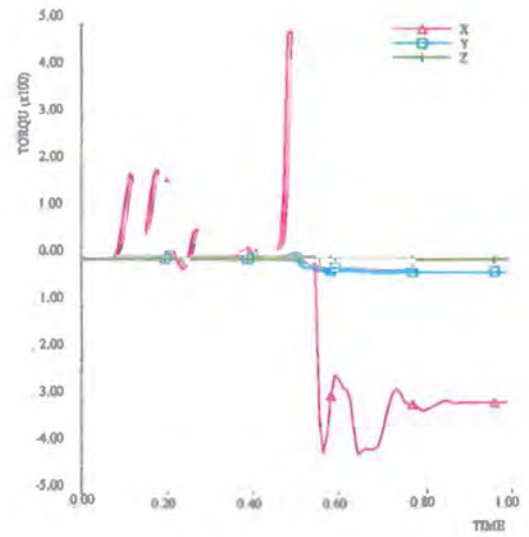
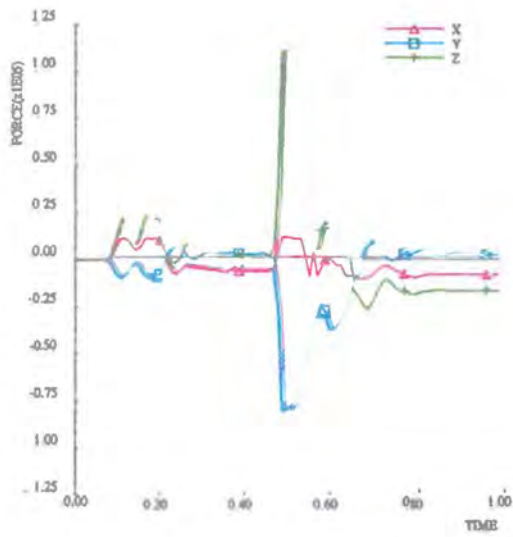
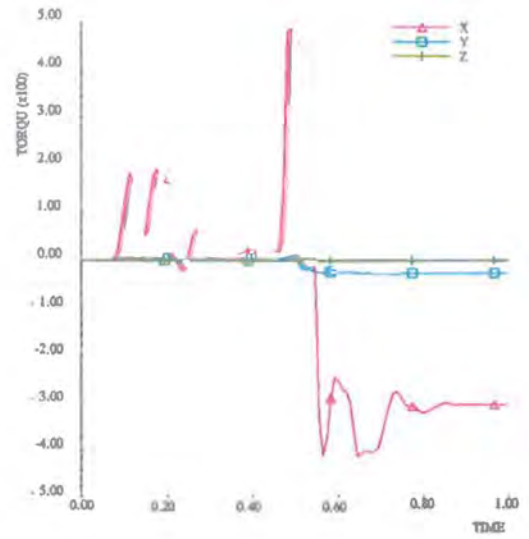
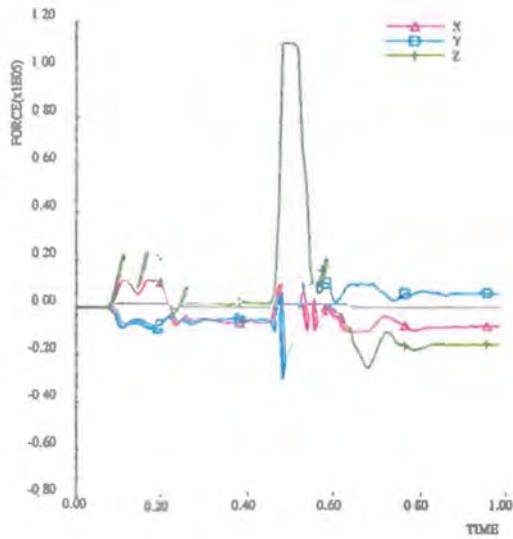






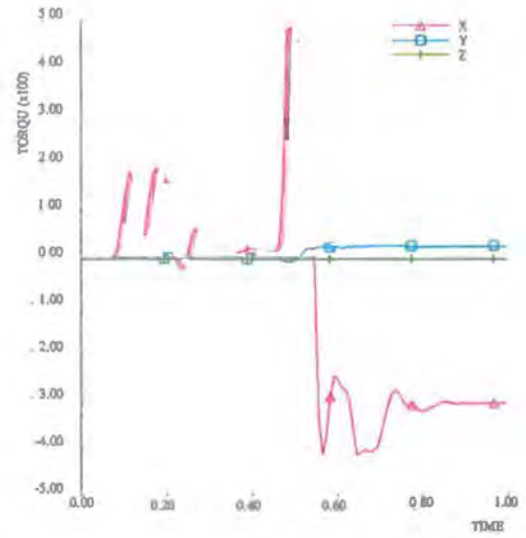
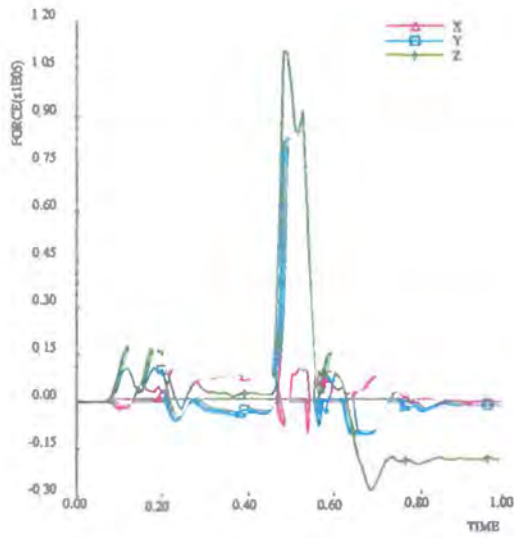
Afbeelding D6. Verloop van de krachten en momenten in de koppeling tussen de elementen 19/20, 20/21 en 21/22 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrière.





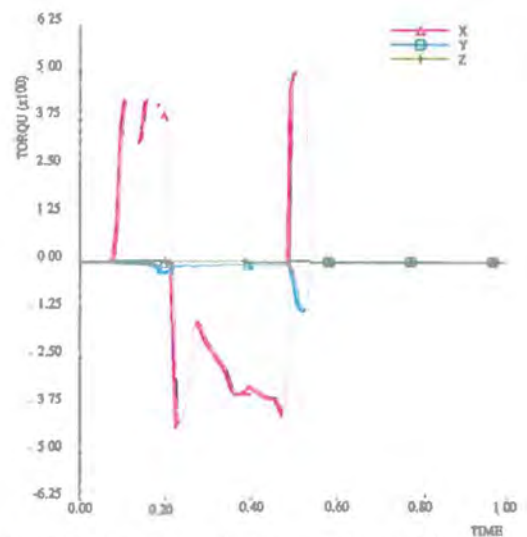
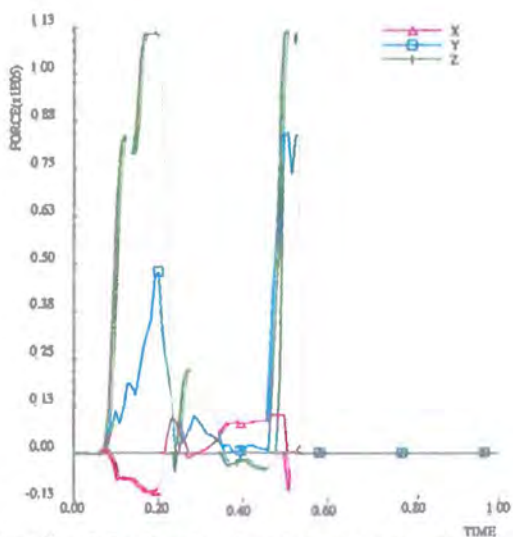
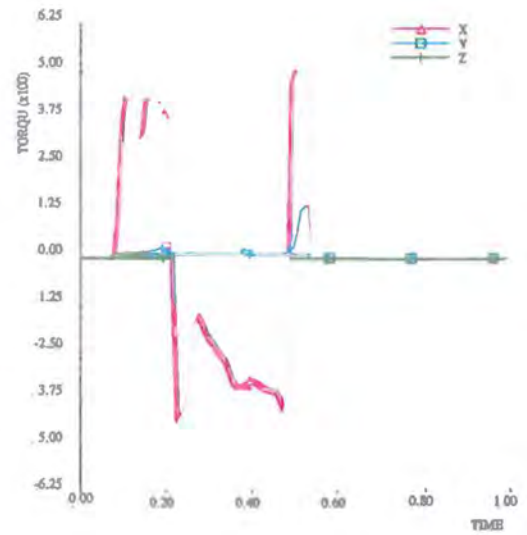
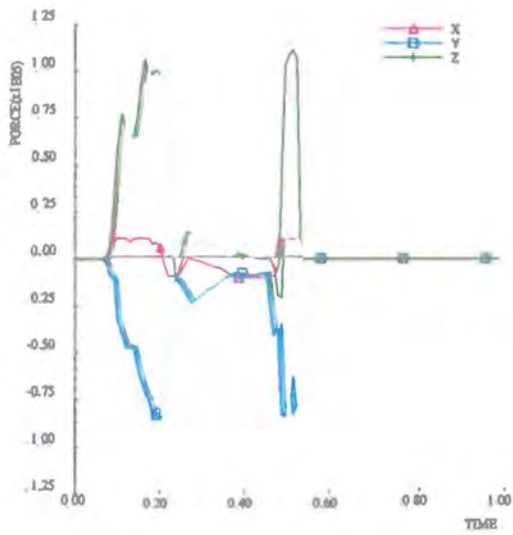
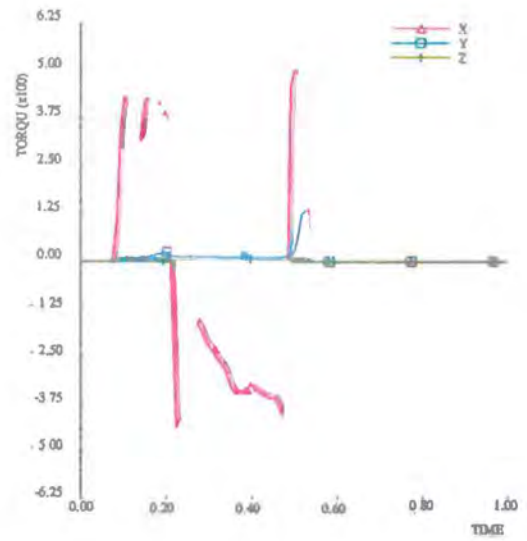
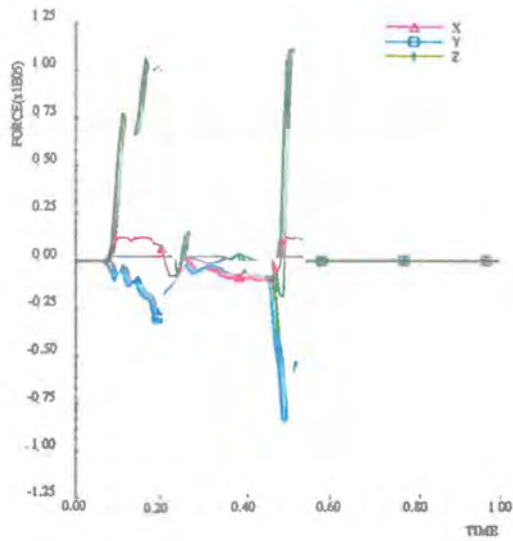
Afbeelding 177 (zie ook volgende blad). Verloop van de krachten en momenten in de vier ankerbouten van element 19 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrière.





Afbeelding D7. Verloop van de krachten en momenten in de vier, unkerbouwen van element 19 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.

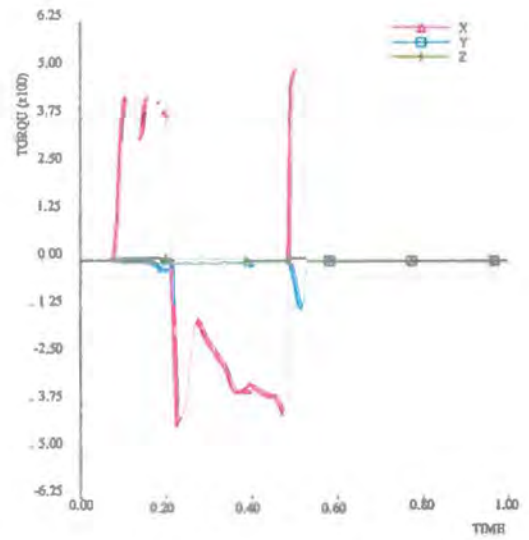
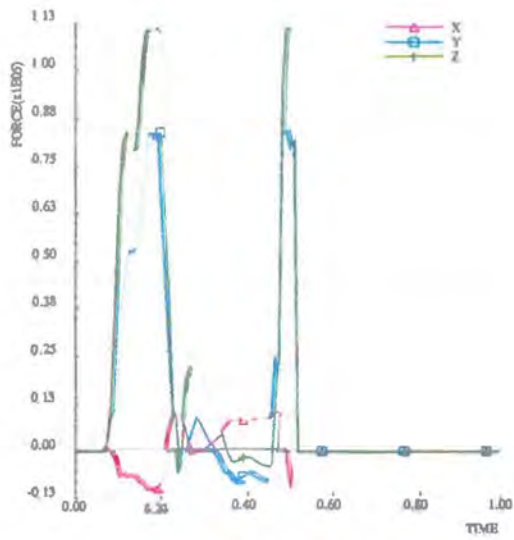




Afbecding D8 (zie ook volgende blad). *Verloop van de krachten en momenten in de vier ankerbouten van element 20 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de lichte personenauto tegen de RWS barrière.*

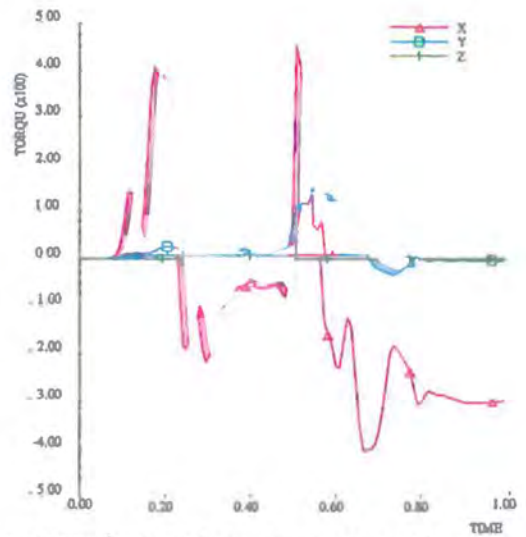
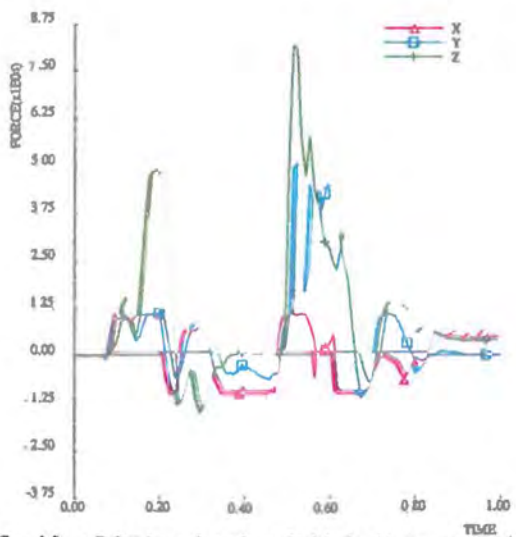
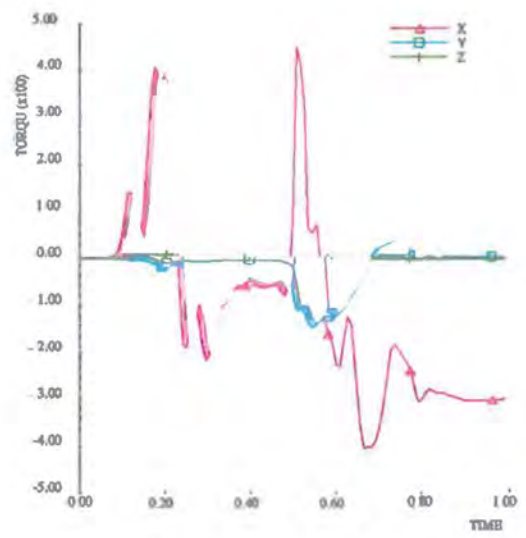
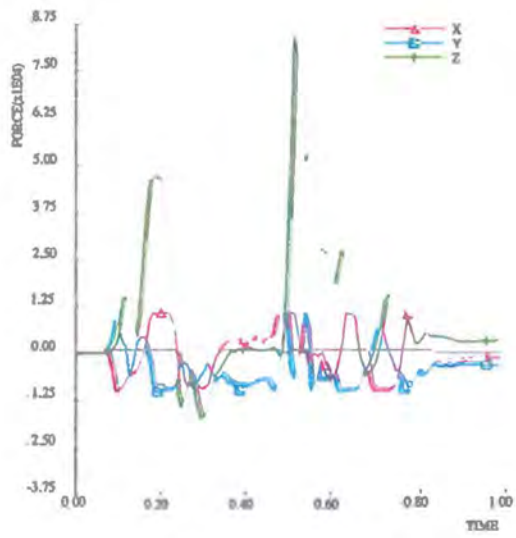
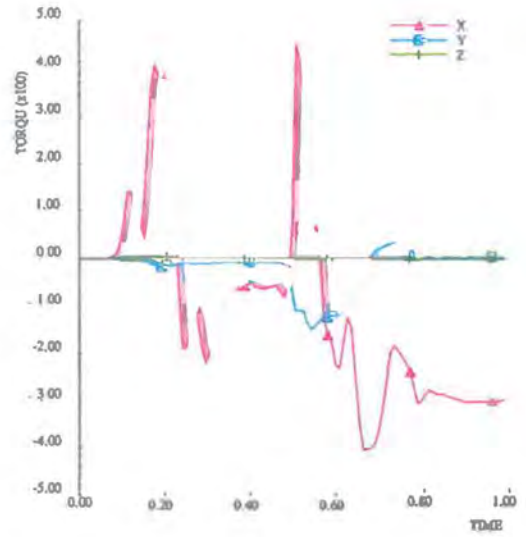
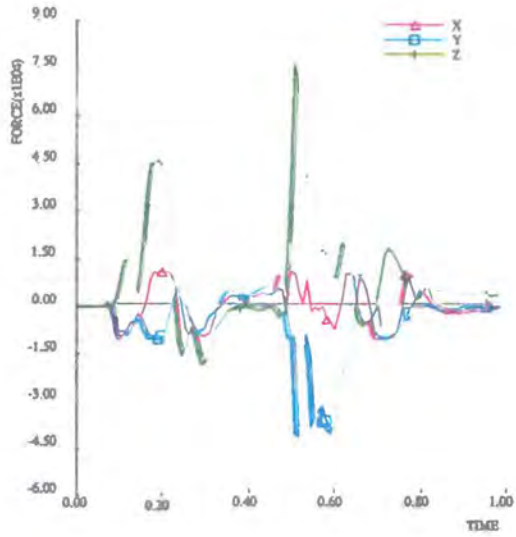






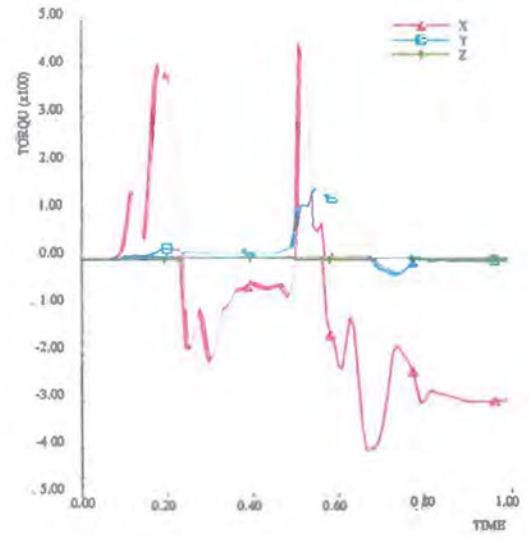
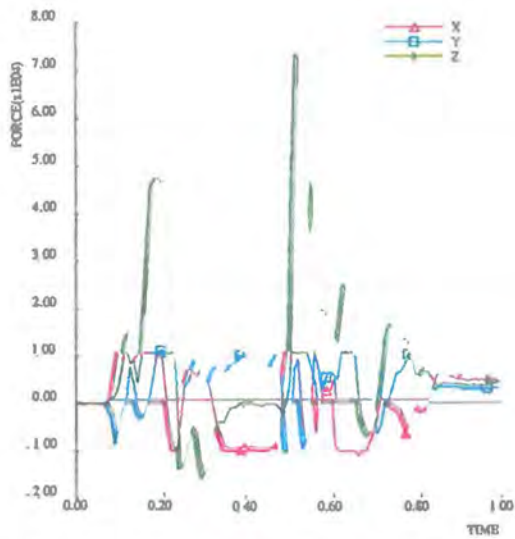
Afbeelding D8. Verloop van de krachten  $q_1$  en momenten in de vier ankerbouten van element 20 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS barrière.





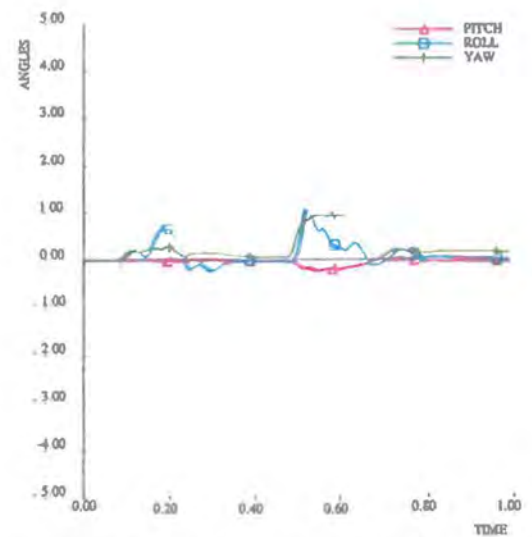
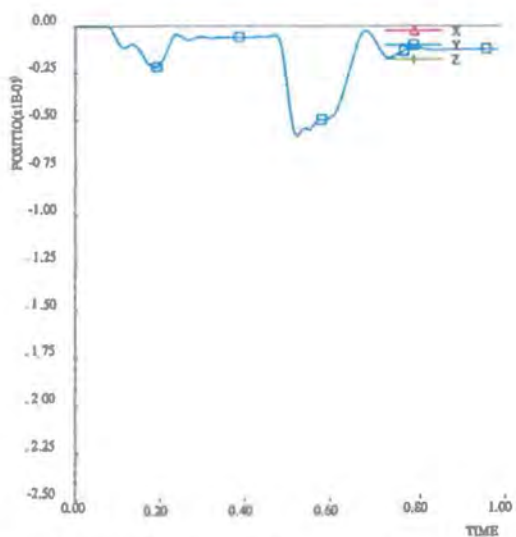
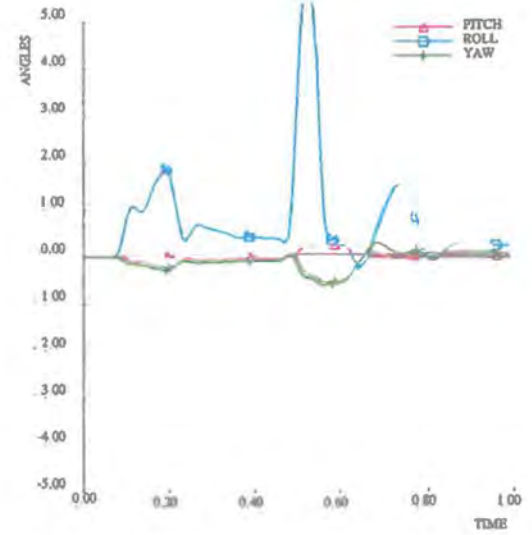
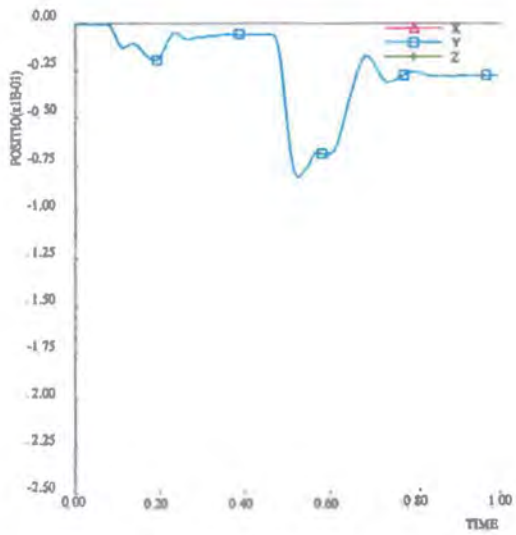
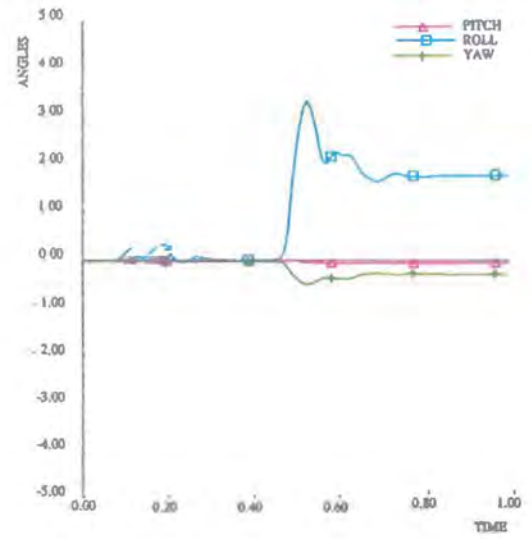
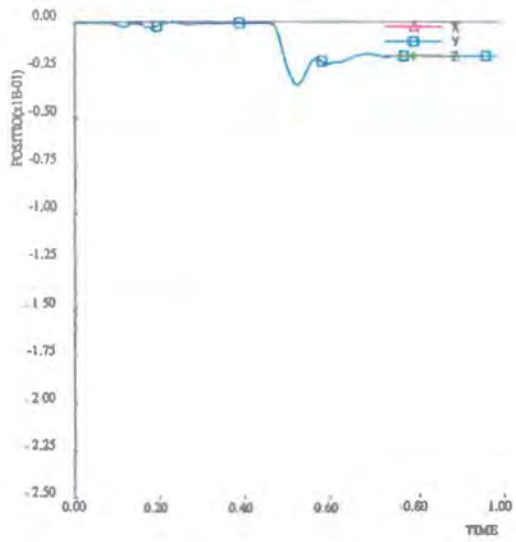
Afbeelding D9 (zie ook volgende blad). *Verloop van de krachten en momenten in de vier ankerhouts van de enent 21 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de lichte personenauto tegen de RWS-barrier.*





Afbeelding D9. Verloop van de krachten en momenten in de vier ankerbouten van element 21 tegen de tijd tijdens de aanrijding  $t_1$  en de bus tegen de RWS-barrier.





Afbeelding D10. Verloop van de uitbarsting van de elementen 19, 20 en 21 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrière.





**Simulatie met de bus tegen de RWS-barrier, verankering aan één uiteinde element, 15 mm vervorming in ondergrond, verticaal 30 mm.**

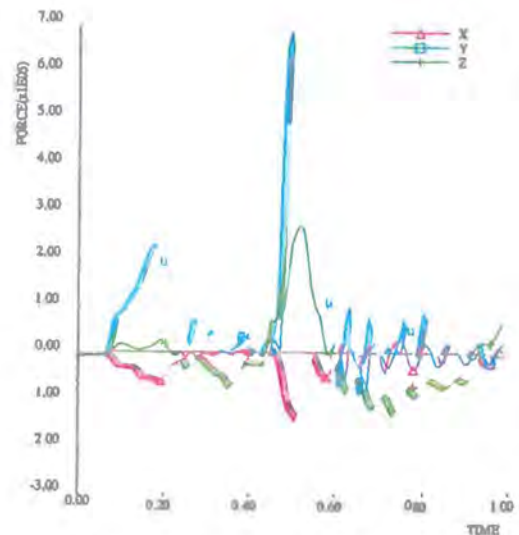
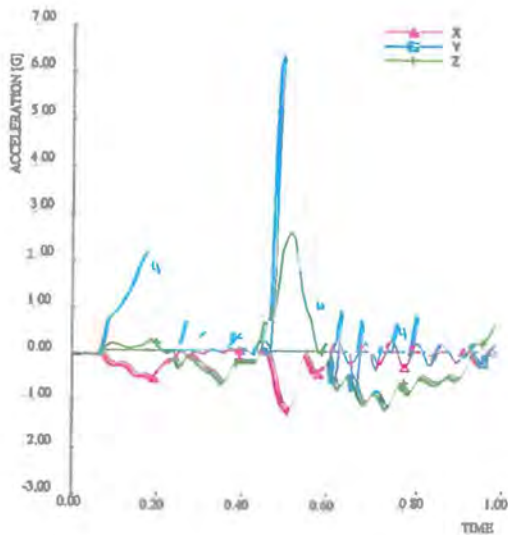
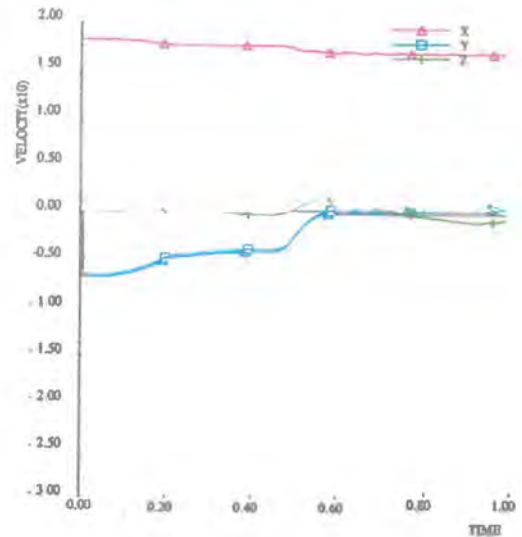
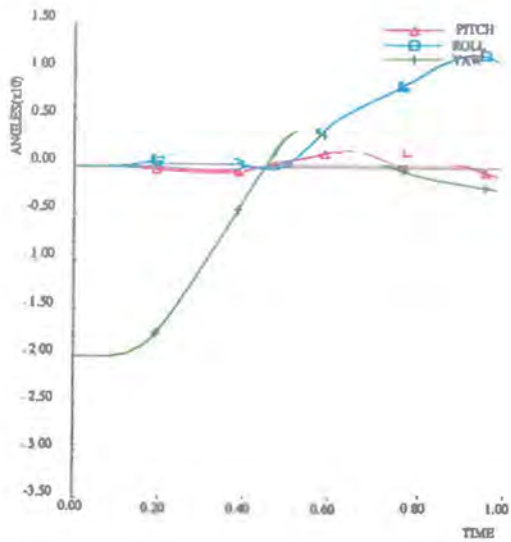
- E1. *Overzicht aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.*
- E2. *Verloop van de roll-, pitch- en yawhoek van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding tegen de RWS-barrier.*
- E3. *Verloop van de snelheid tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.*
- E4. *Verloop van de vertragingen in het zwaartepunt van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.*
- E5. *Verloop van de krachten in het zwaartepunt van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.*
- E6. *Verloop van de krachten en momenten in de koppeling tussen de elementen 19/20, 20/21 en 21/22 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.*
- E7. *Verloop van de krachten en momenten in de vier ankerbouten van element 19 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.*
- E8. *Verloop van de krachten en momenten in de vier ankerbouten van element 20 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.*
- E9. *Verloop van de krachten en momenten in de vier ankerbouten van element 21 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.*
- E10. *Verloop van de uitbuiging van de elementen 19, 20 en 21 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.*





Afbeelding E1. Overzicht aanrijding met de bus tegen de RWS-barrière.





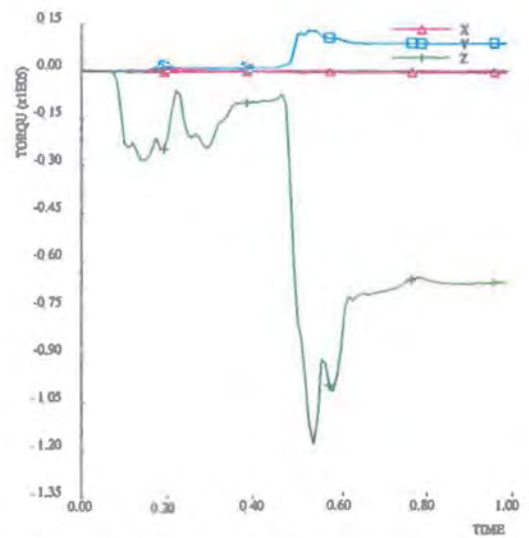
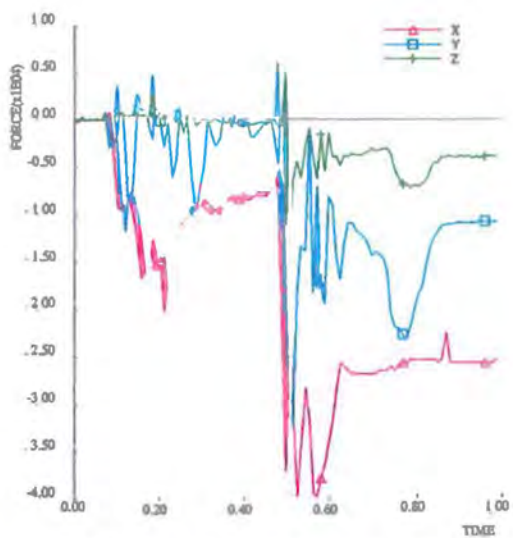
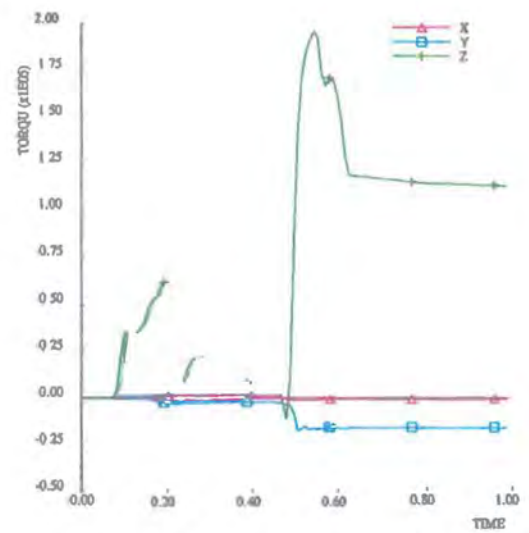
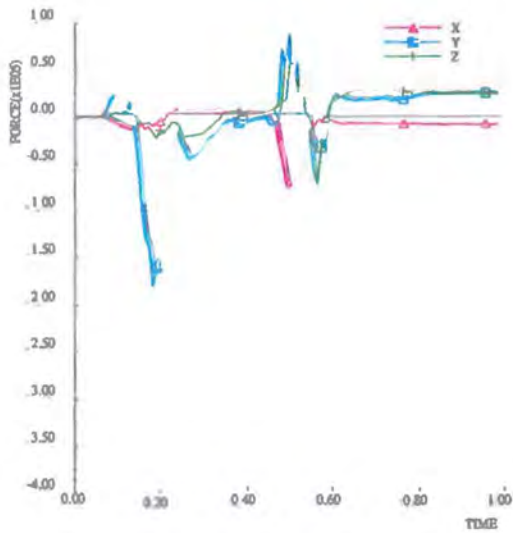
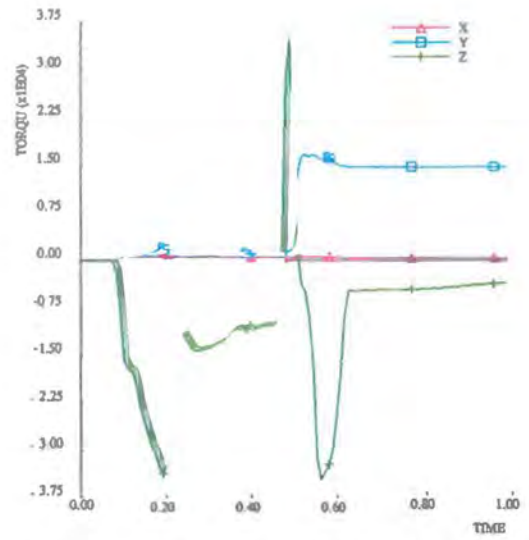
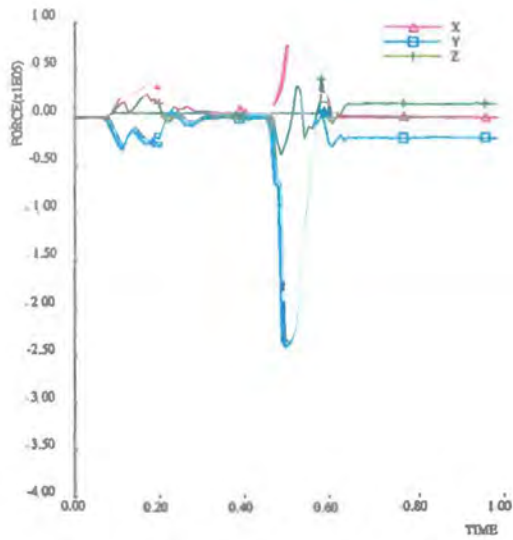
Afbeelding E2. Verloop van de roll-, pitch- en yawhoek van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding tegen de RWS-barrier.

Afbeelding E3. Verloop van de snelheid tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.

Afbeelding E4. Verloop van de vertragingen in het zwaartepunt van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.

Afbeelding E5. Verloop van de krachten in het zwaartepunt van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.

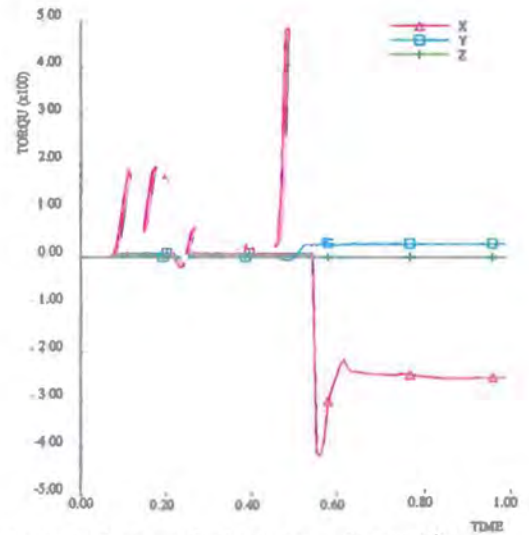
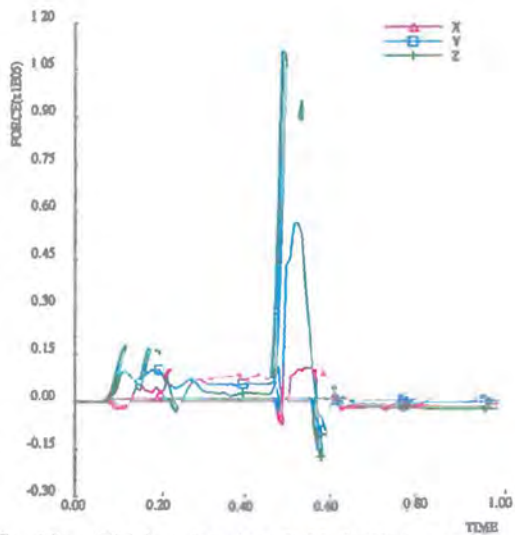
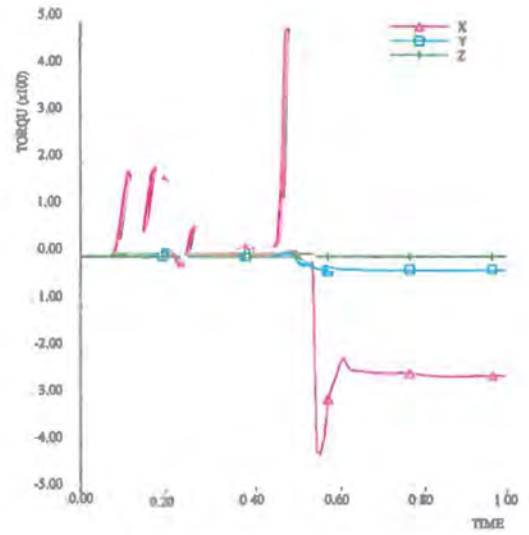
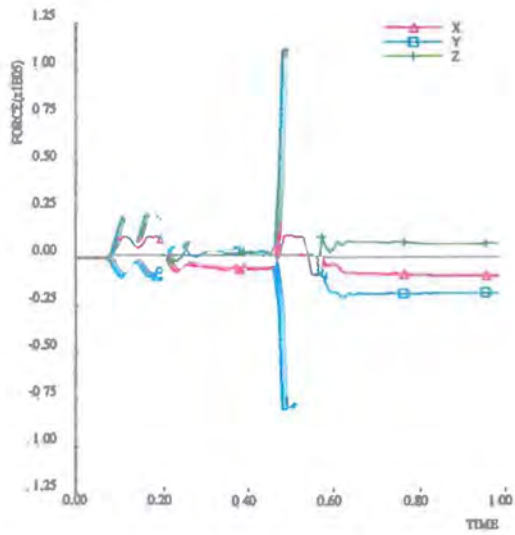
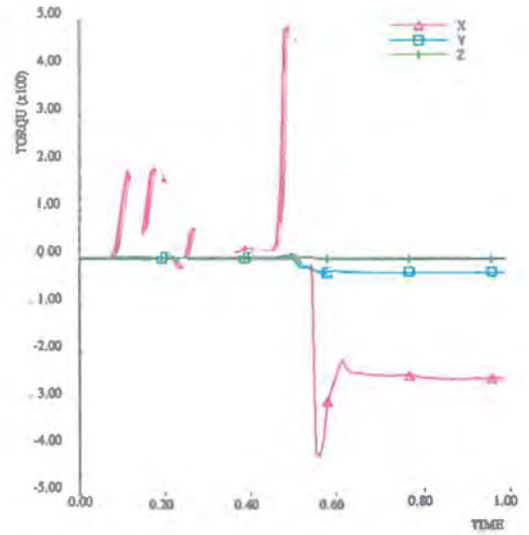
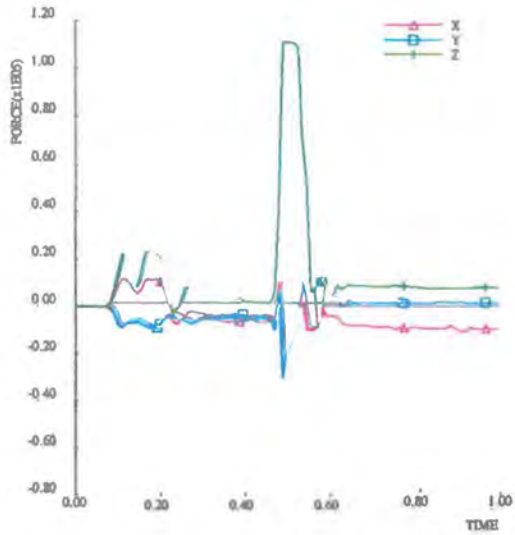




Afbeelding E6, Verloop van de krachten en momenten in de koppeling tussen de elementen 19/20, 20/21 en 21/22 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.

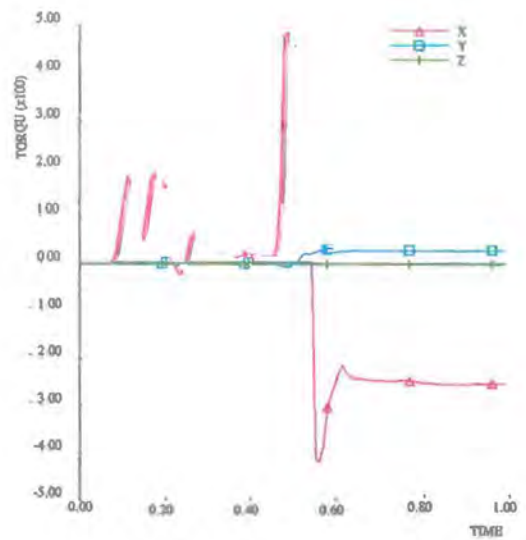
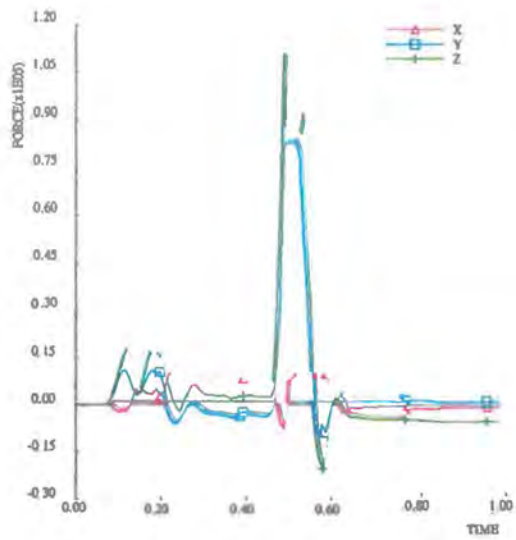






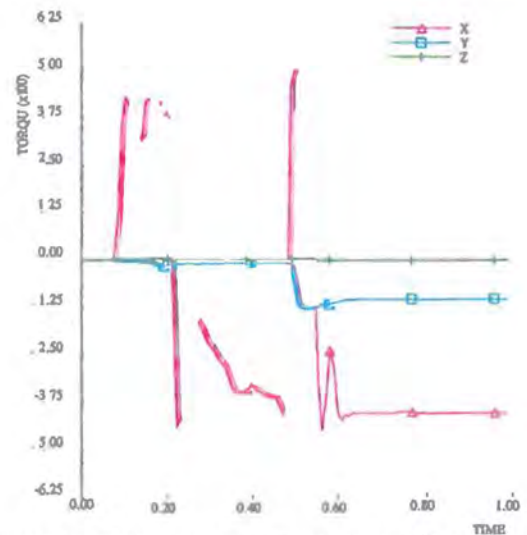
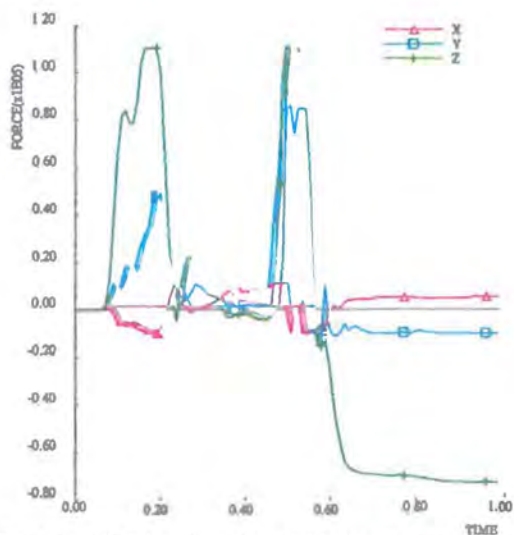
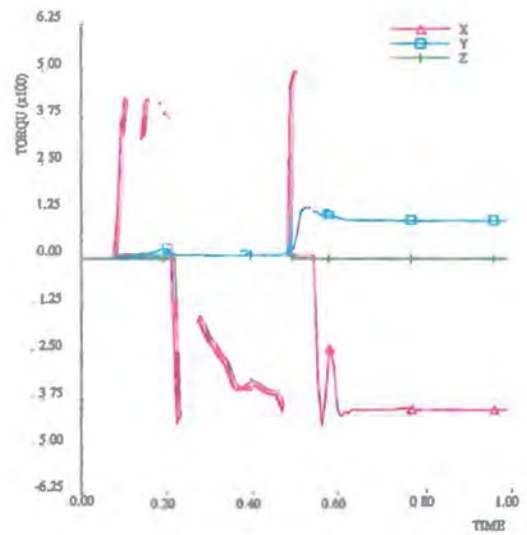
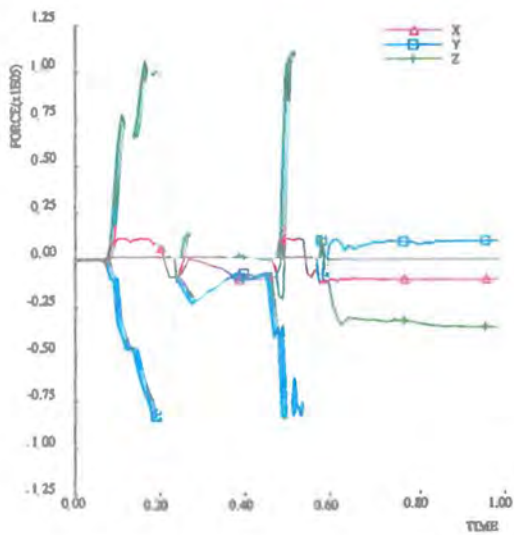
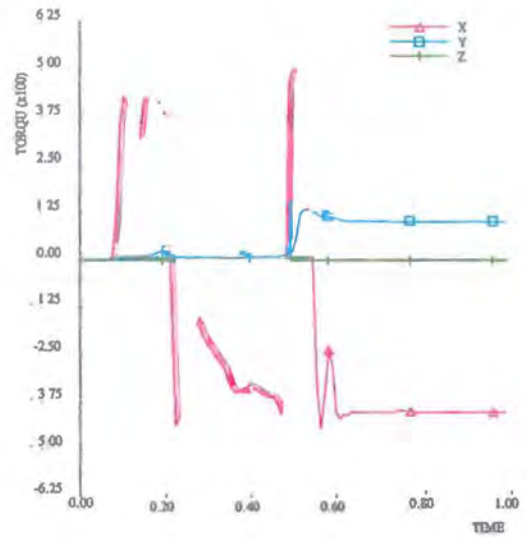
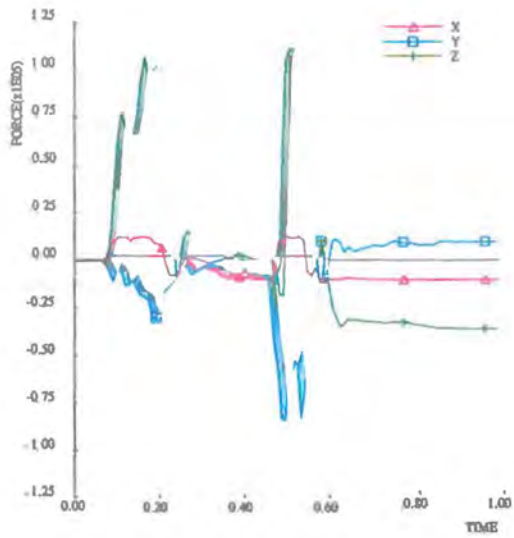
Afbeelding E7 (zie ook volgende bladzijde). Verloop van de krachten en momenten in de vier ankerbouten van element 19 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.





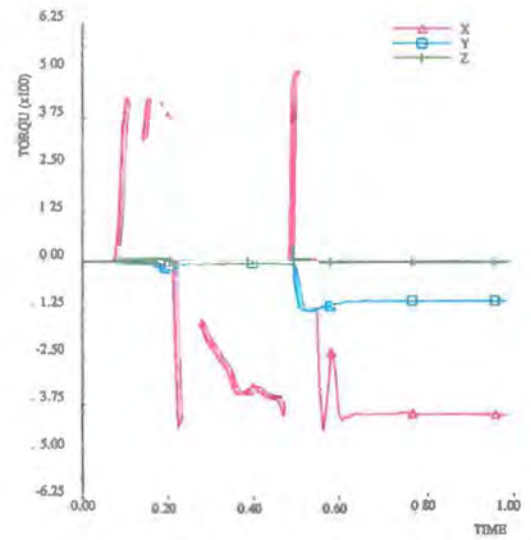
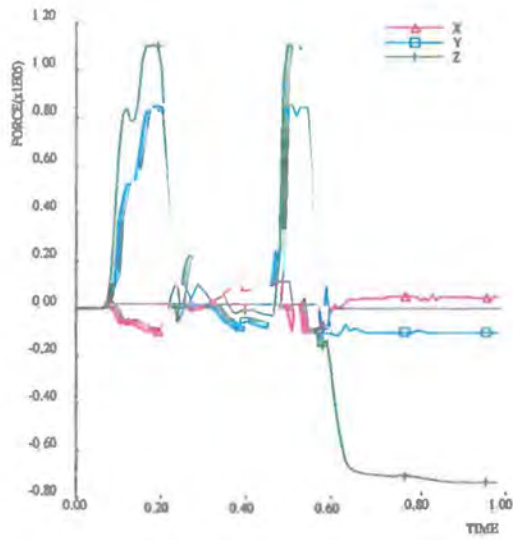
Afbeelding E7. Verloop van de krachten en momenten in de vier oeffeningspunten van element 19 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.





Afbeelding E8 (zie ook volgende blad). Verloop van de krachten en momenten in de vier ankerhaken van element 20 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de lichte personenauto tegen de RWS barrière.

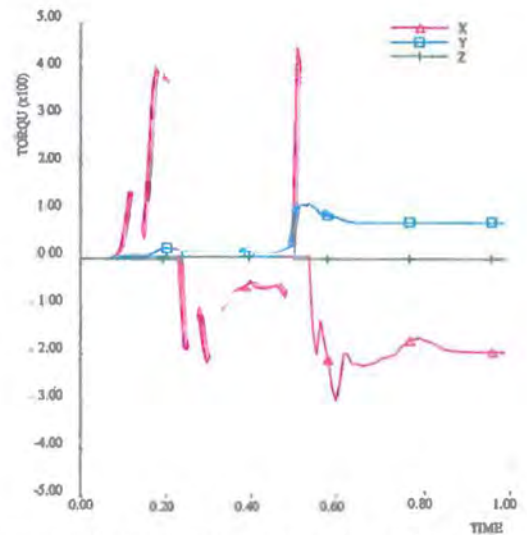
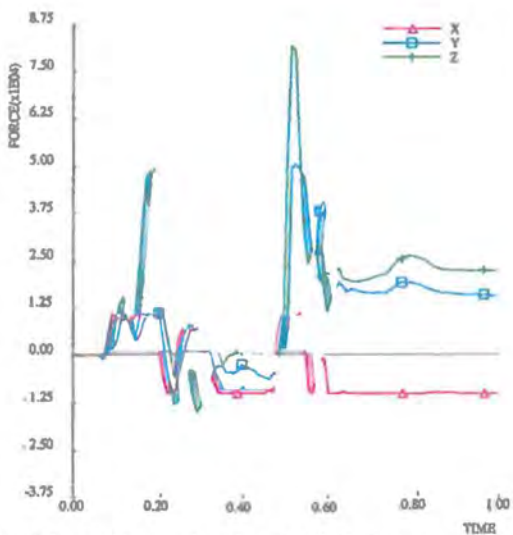
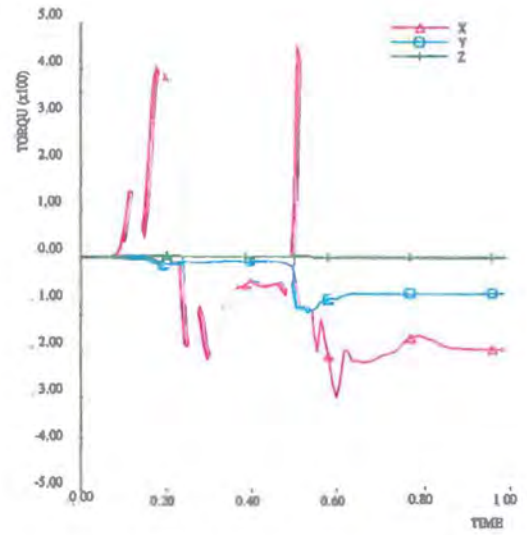
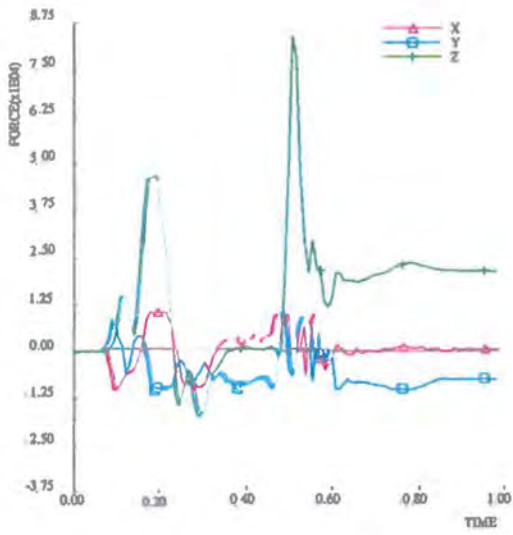
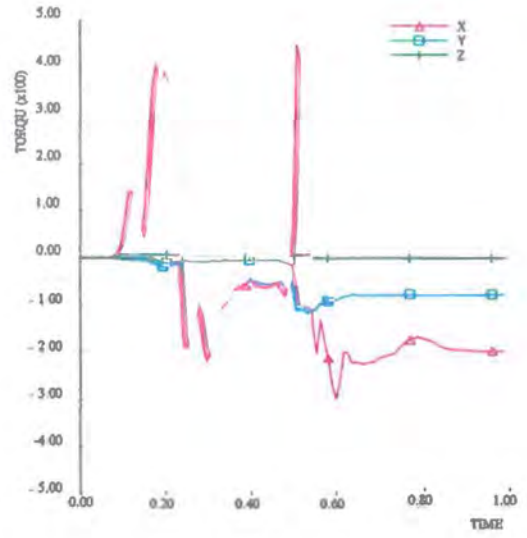
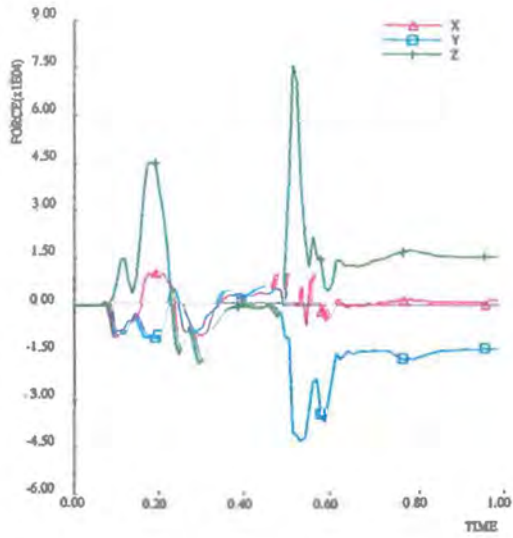




Afbeelding E8. Verloop van de krachten en momenten in de vier ankerbouten van element 20 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.

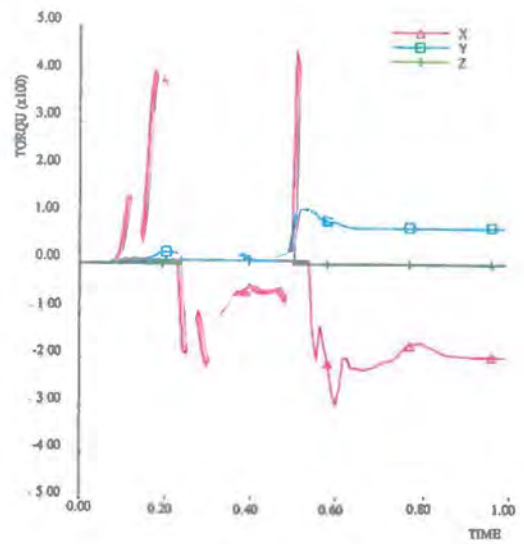
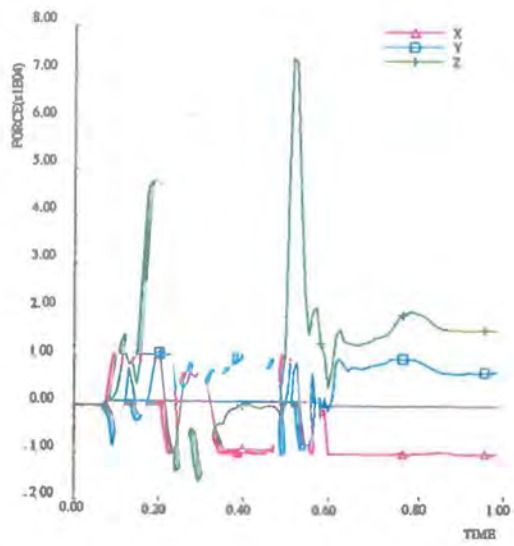






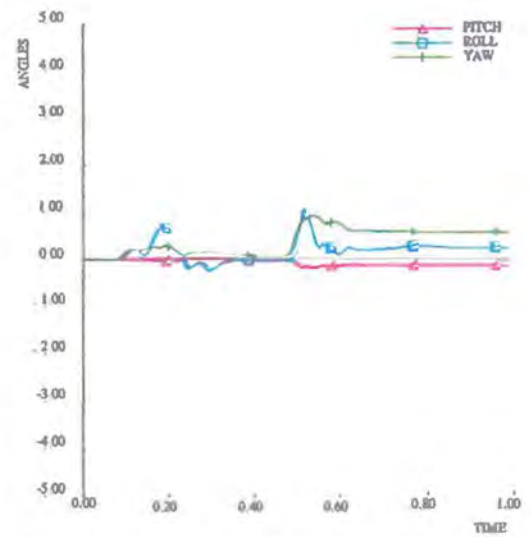
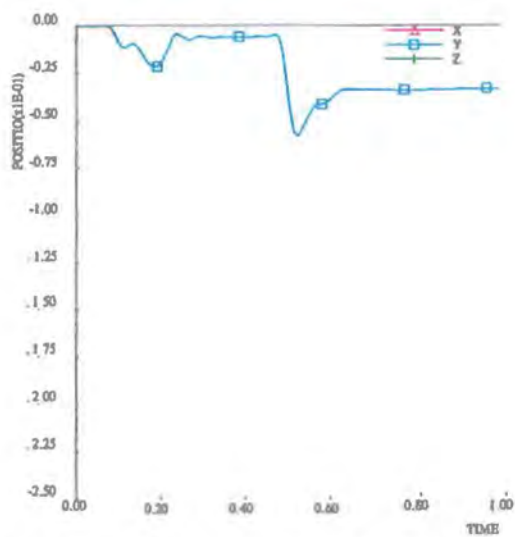
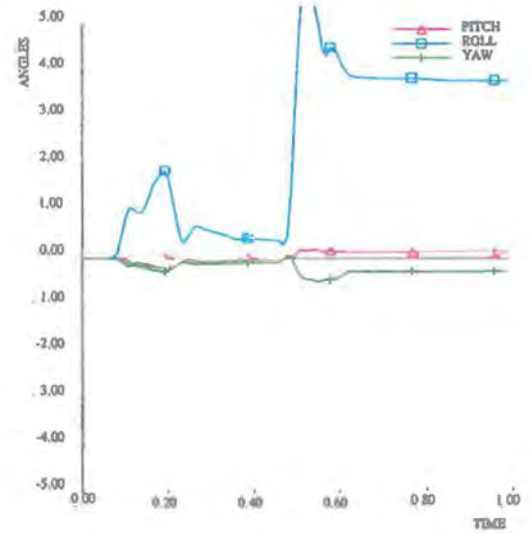
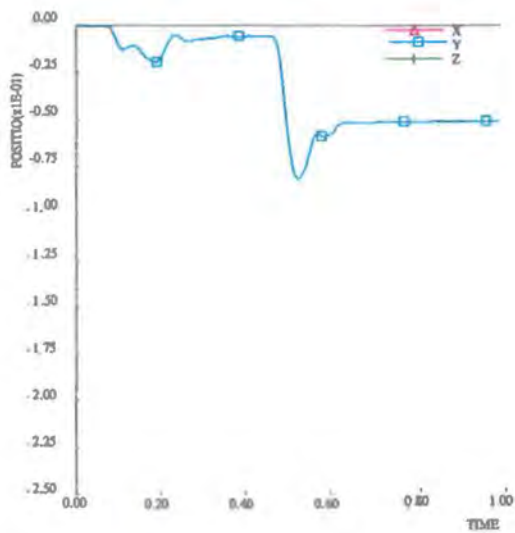
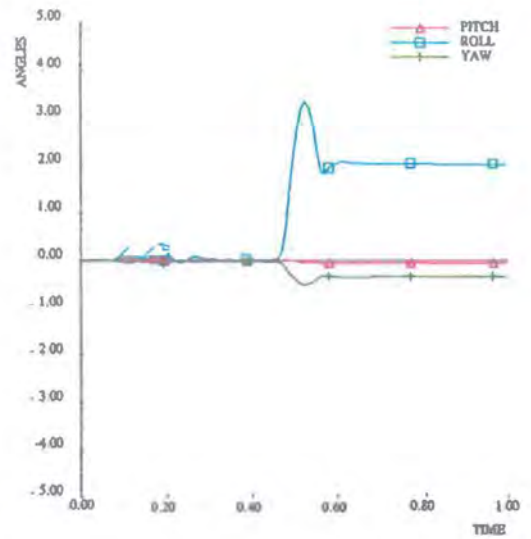
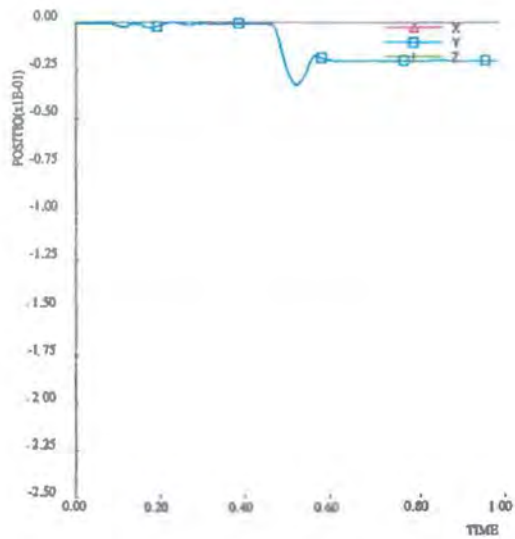
Afbeelding E9 (zie ook volgend e blad) *Veel  $\alpha$*  van de krachten en momenten in de vier ankerbouten van de emmer 21 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de lichte personenauto tegen de RVS-barrier.





Afbeelding E9. Verloop van de krachten en momenten in de vier ankerbouten van element 21 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS barrier.





Afbeelding E10. Verloop van de uitbuiging van de elementen 19, 20 en 21 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.



**Simulatie met de bus tegen de RWS-barrier, verankering aan één uiteinde element, 20 mm vervorming in ondergrond, verticaal 30 mm.**

- F1. *Overzicht aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.*
- F2. *Verloop van de roll-, pitch- en yawhoek van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding tegen de RWS-barrier.*
- F3. *Verloop van de snelheid tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.*
- F4. *Verloop van de vertragingen in het zwaartepunt van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.*
- F5. *Verloop van de krachten in het zwaartepunt van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.*
- F6. *Verloop van de krachten en momenten in de koppeling tussen de elementen 19/20, 20/21 en 21/22 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.*
- F7. *Verloop van de krachten en momenten in de vier ankerbouten van element 19 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.*
- F8. *Verloop van de krachten en momenten in de vier ankerbouten van element 20 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.*
- F9. *Verloop van de krachten en momenten in de vier ankerbouten van element 21 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.*
- F10. *Verloop van de uitbuiging van de elementen 19, 20 en 21 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.*

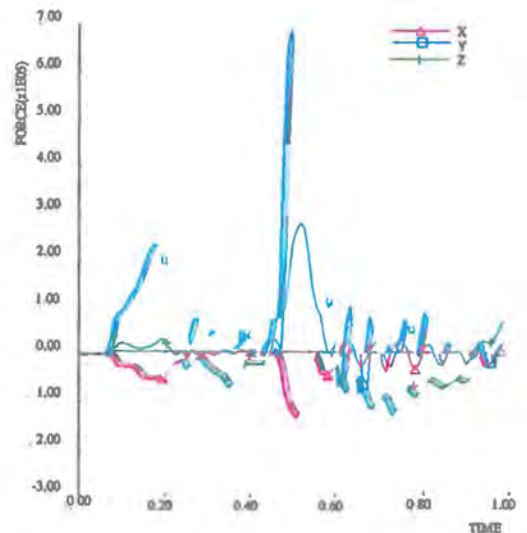
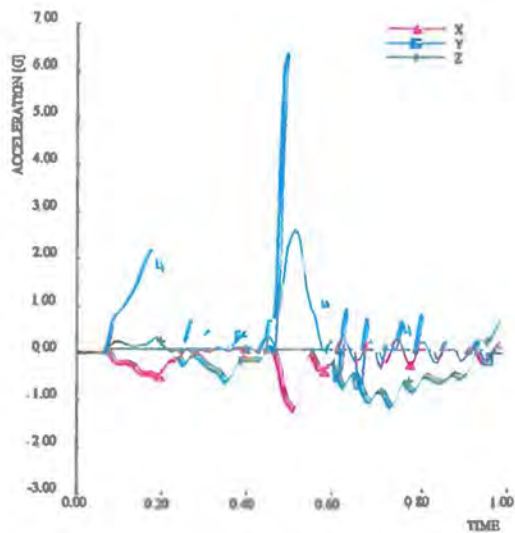
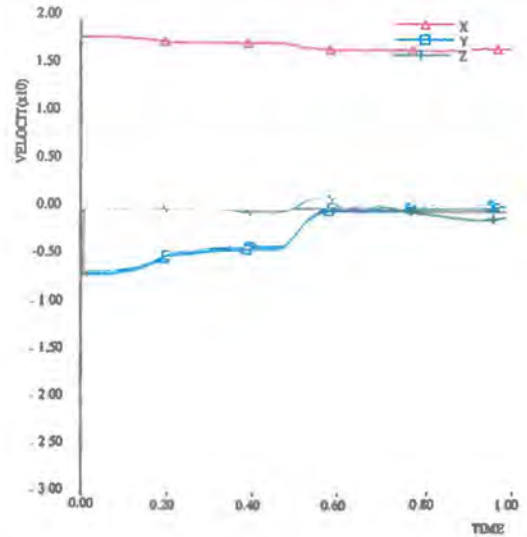
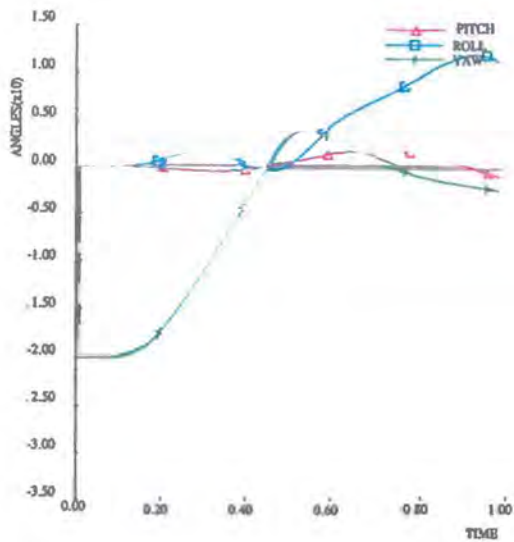






11





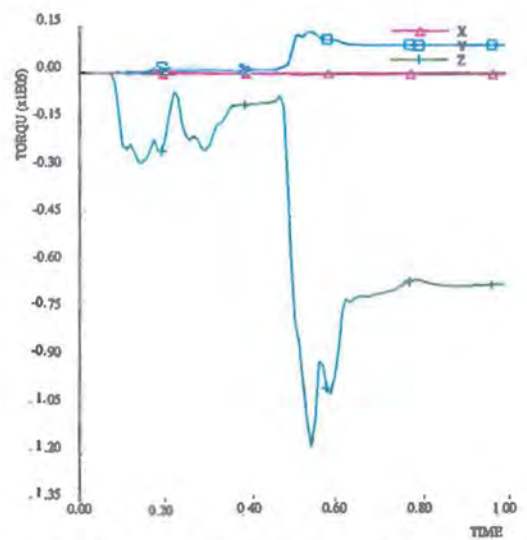
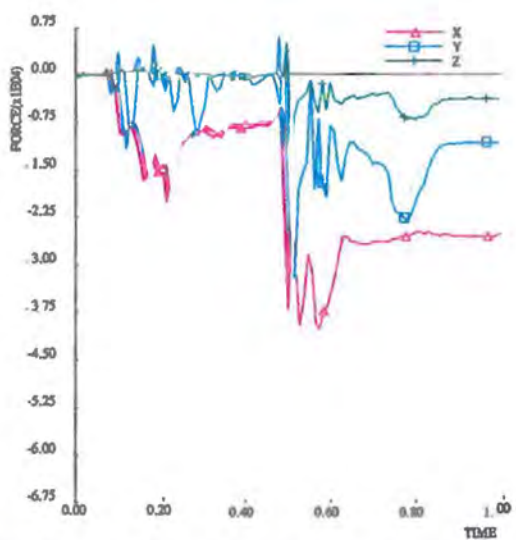
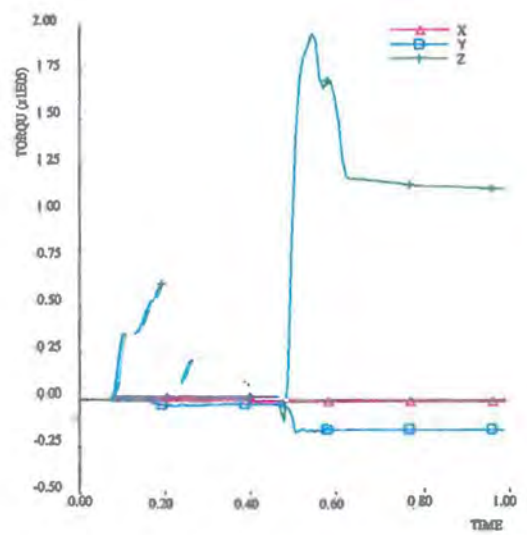
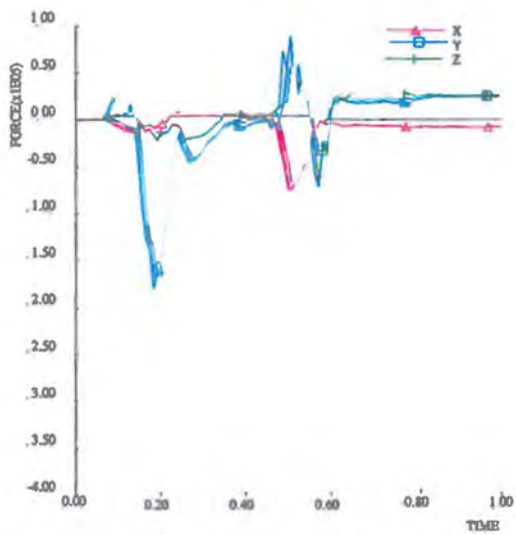
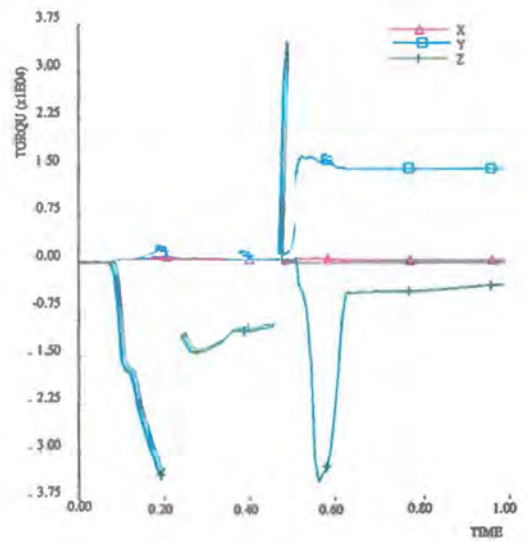
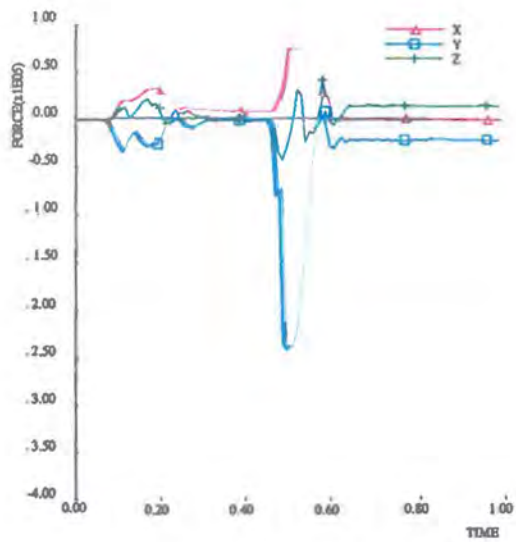
Afbeelding F2. Verloop van de roll-, pitch- en yawhoek van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding tegen de RWS-barrier.

Afbeelding F3. Verloop van de snelheid tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.

Afbeelding F4. Verloop van de vertragingen in het zwaartepunt van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.

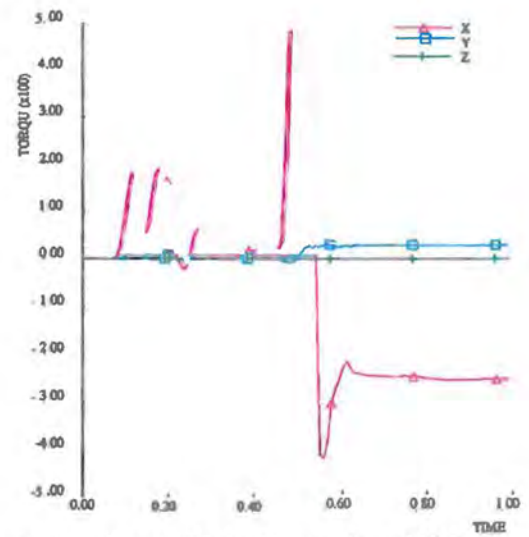
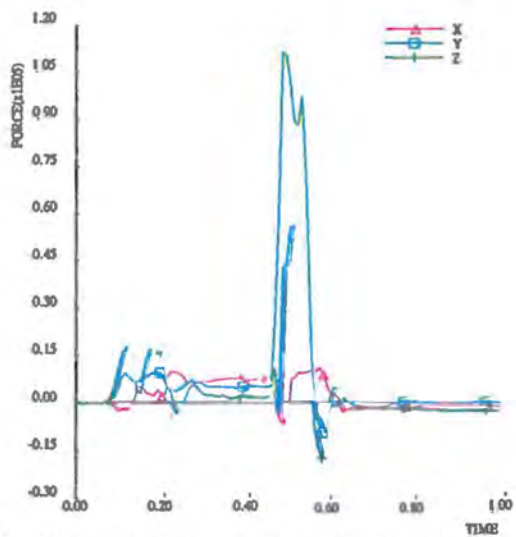
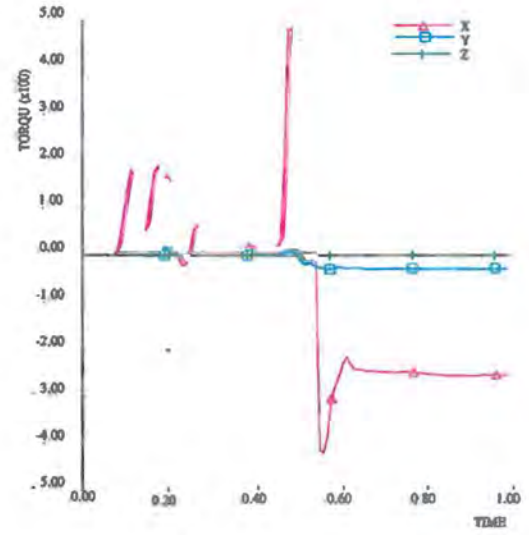
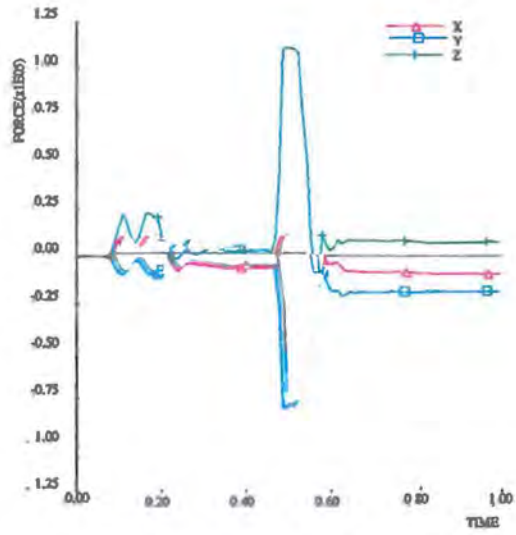
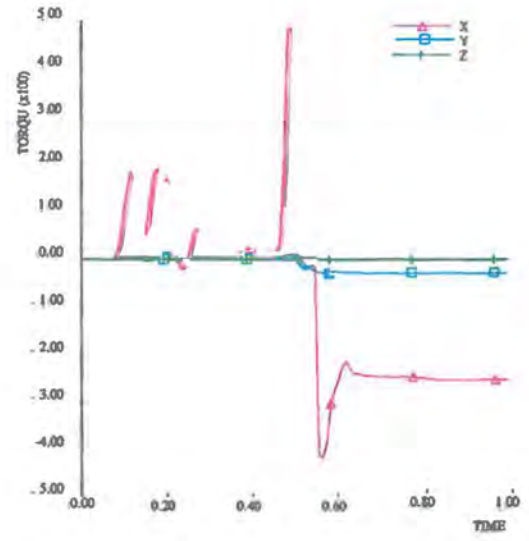
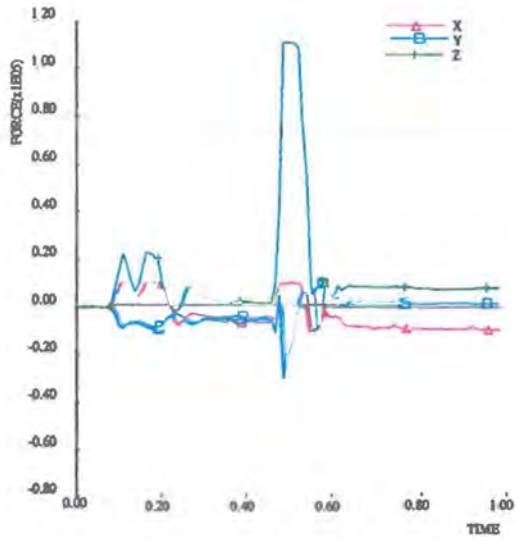
Afbeelding F5. Verloop van de krachten in het zwaartepunt van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.





Afbeelding F6. Verloop van de krachten en momenten in de koppeling tussen de elementen 19/20, 20/21 en 21/22 tegen de tijd tijdens de aanrijding, net de bus tegen de RWS-barrier.

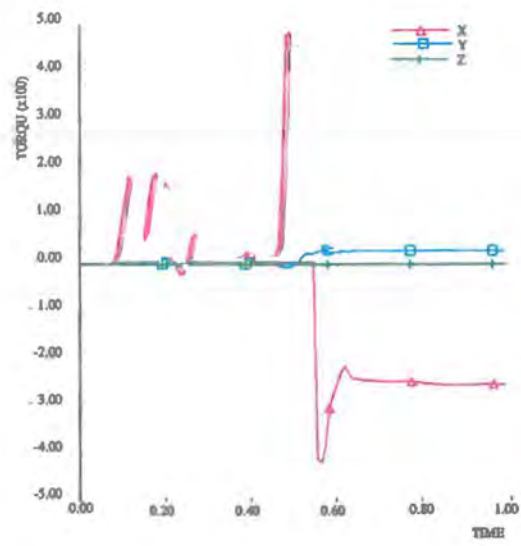
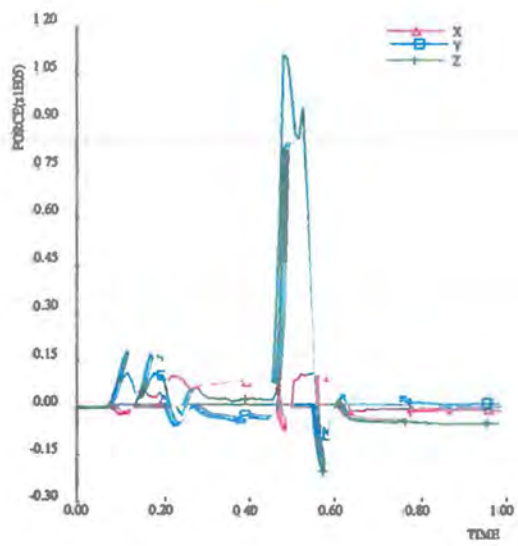




Afbeelding F7 (zie ook volgende blad). Verloop van de krachten en momenten en in de vier ankerbouten van element 19 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrière.

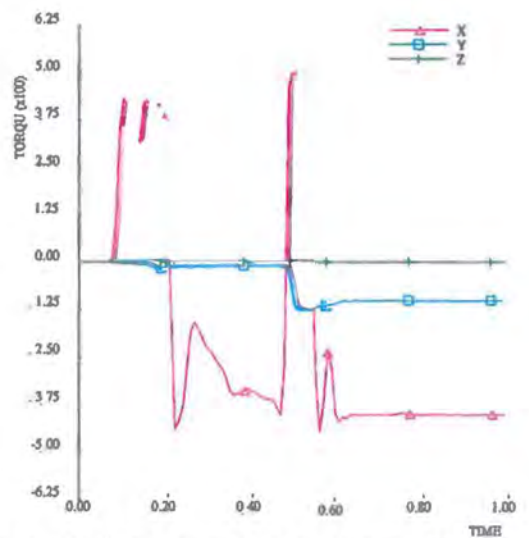
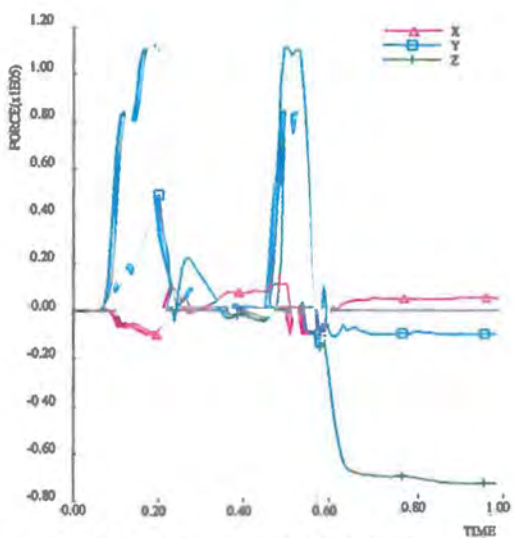
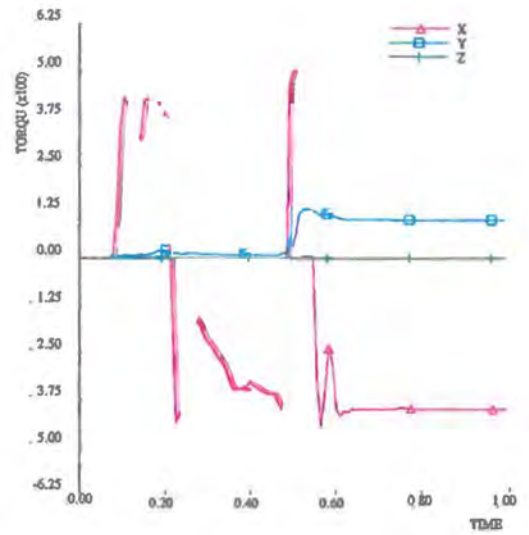
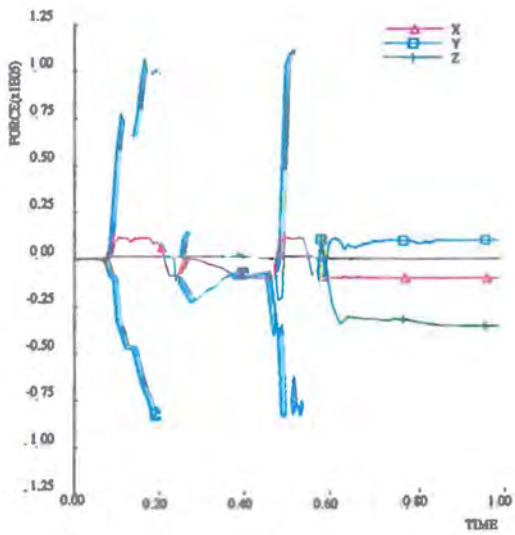
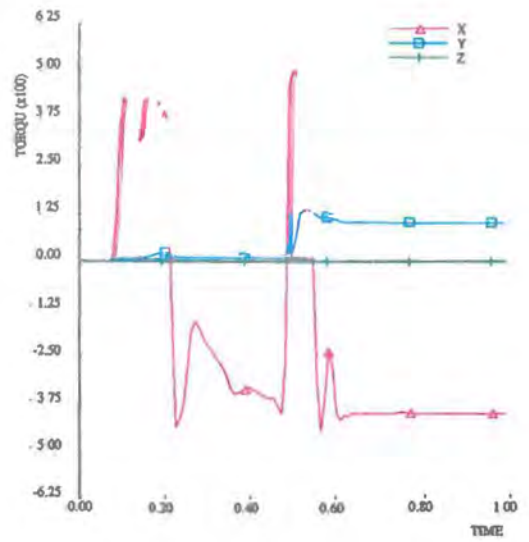
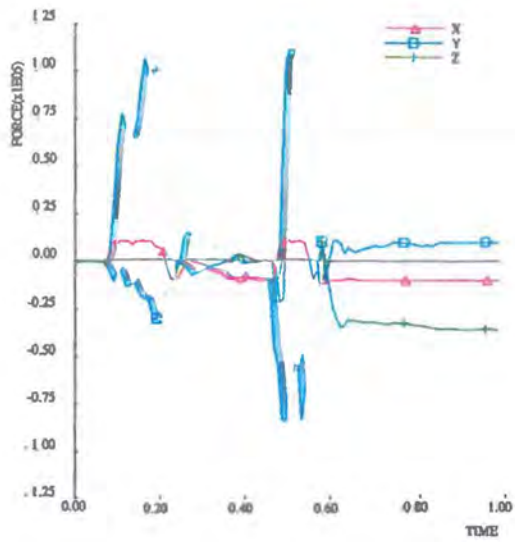






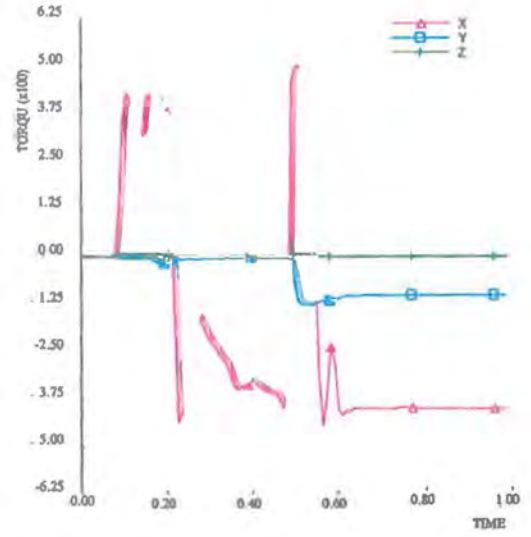
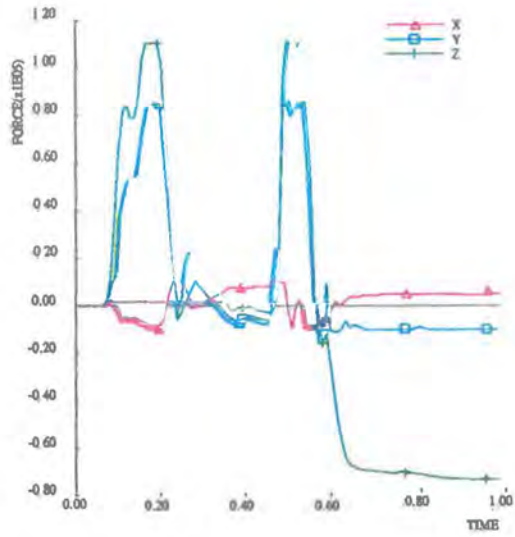
Afbeelding F7. Verloop van de krachten en momenten in de verbindingsbout van element 19 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.





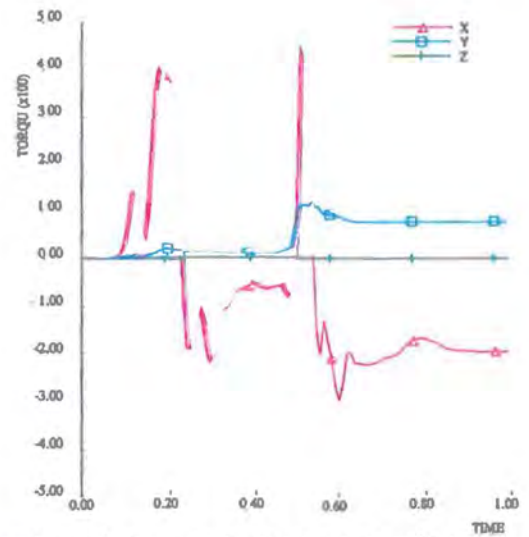
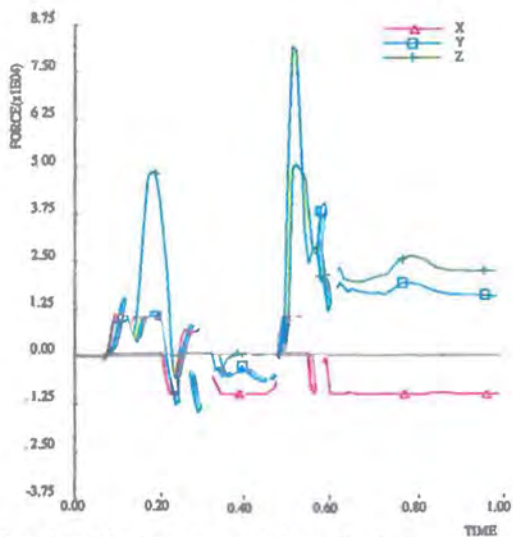
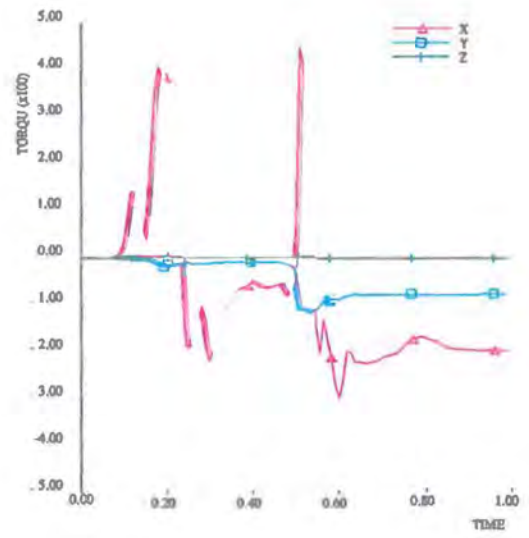
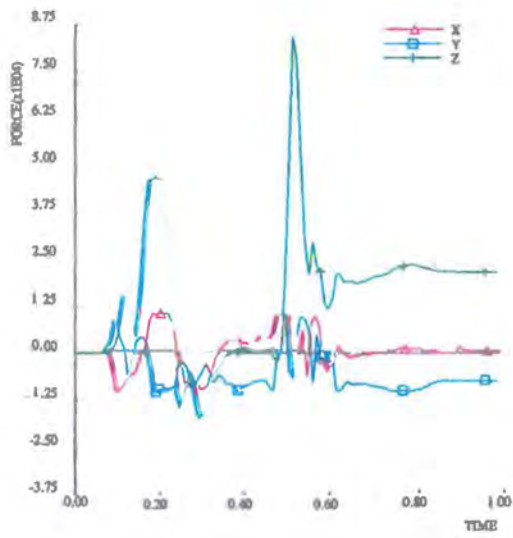
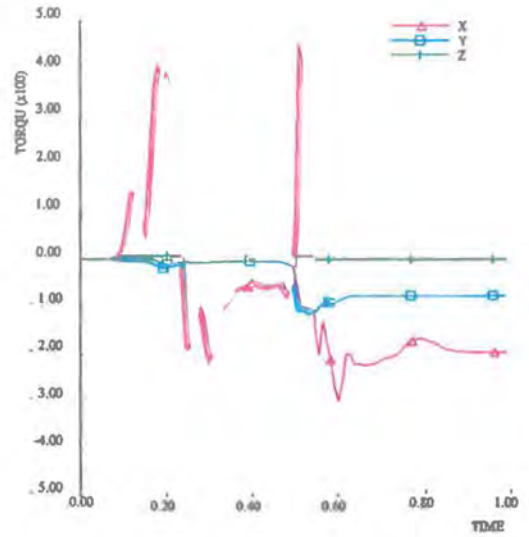
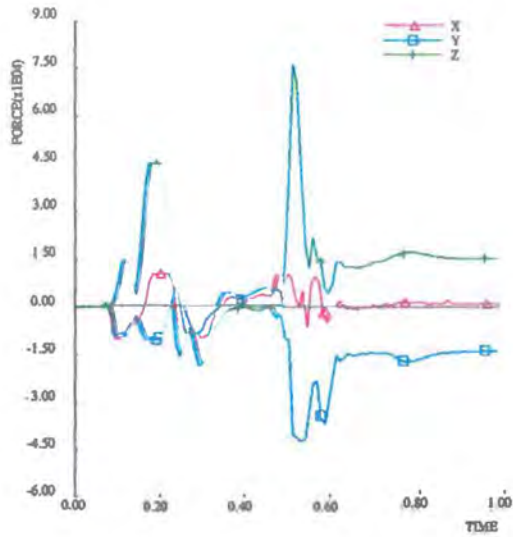
Afbeelding F8 (zie ook volgende blad). Verloop van de krachten en momenten in de vier ankerbalken van en ont 2) tegen de tijd tijdens de aanrijding met de lichte personenauto tegen de RWS-barrière.





Afbeelding F8. Verloop van de krachten en momenten in de vier ankerbouten van element 20 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.

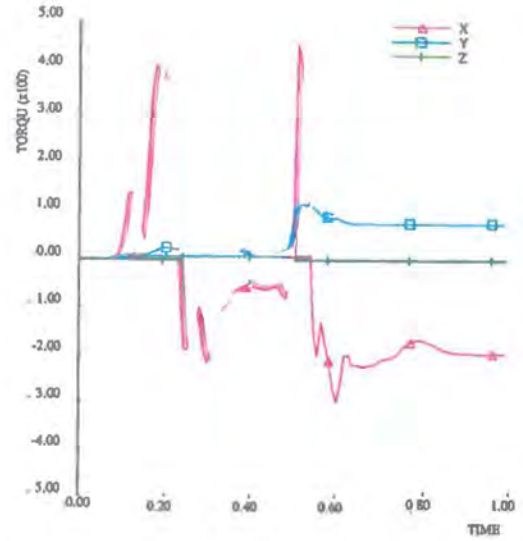
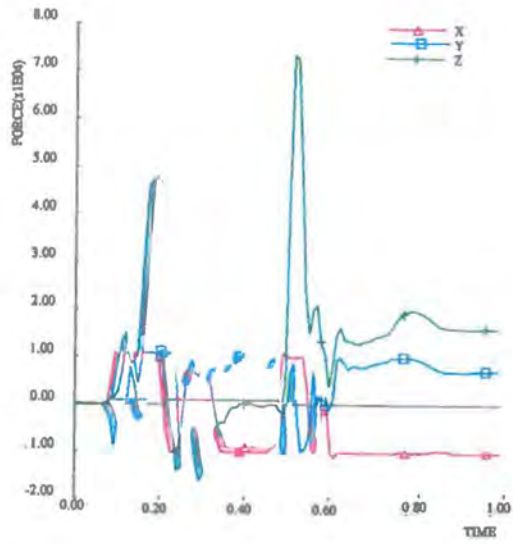




Afbeelding F9 (Zie ook volgende blad). Verloop van de krachten en momenten in de vier ankerbouten van delement 21 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de lichte personenauto tegen de RWS-barrier.

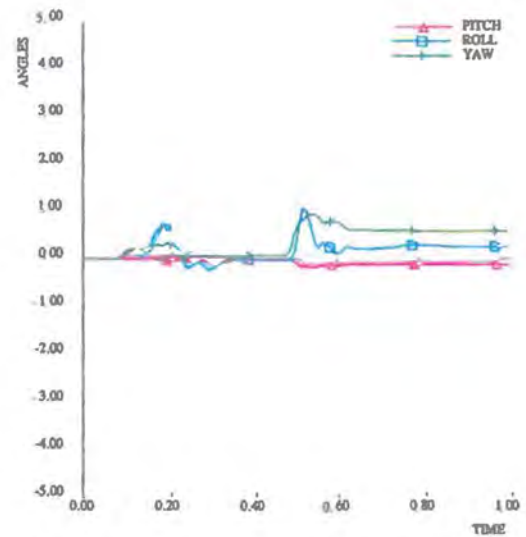
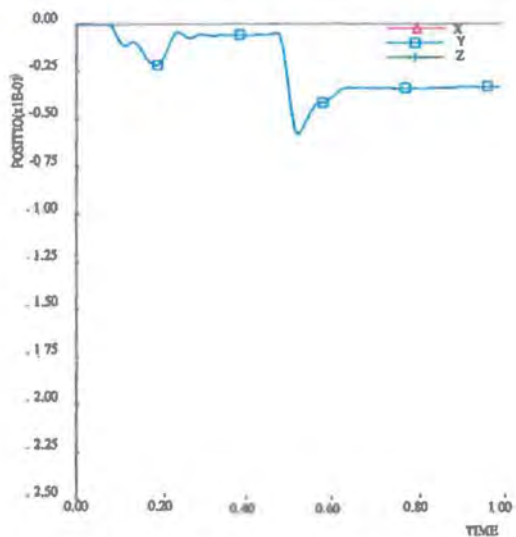
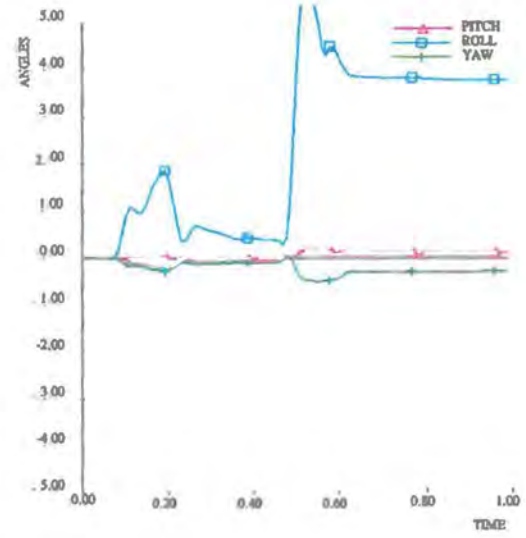
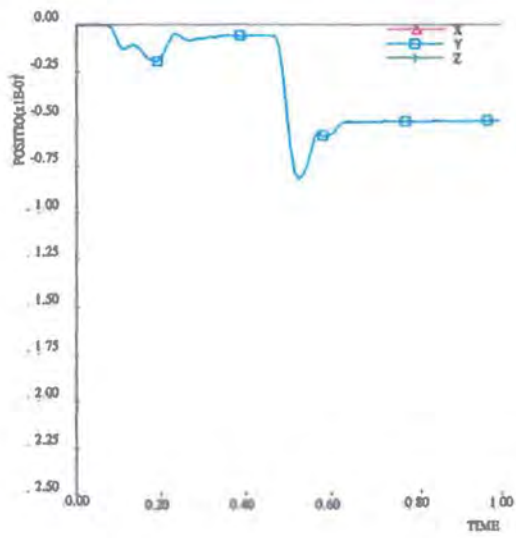
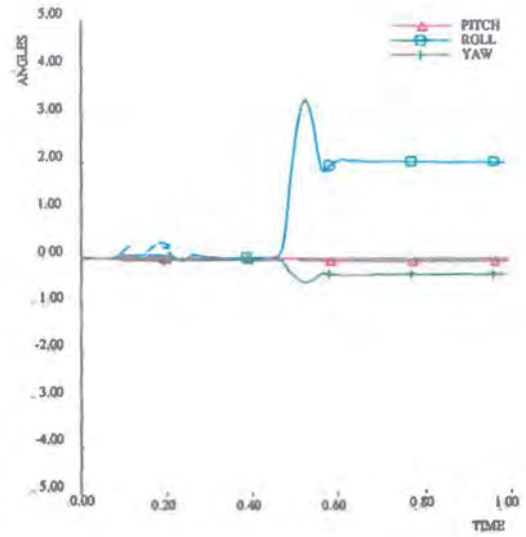
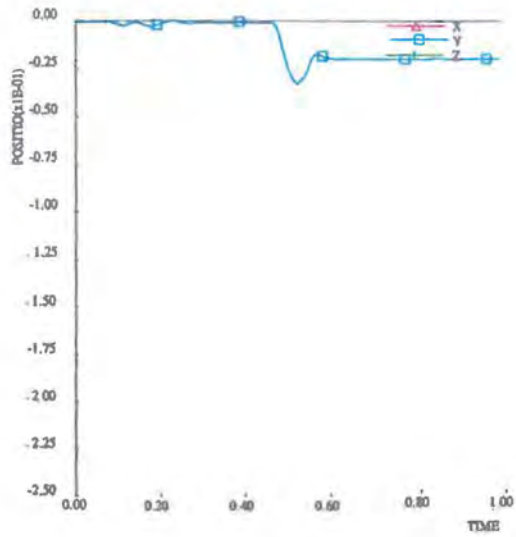






Afbeelding F9. Verloop van de krachten en momenten in de vier ankerbouten van element 21 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.





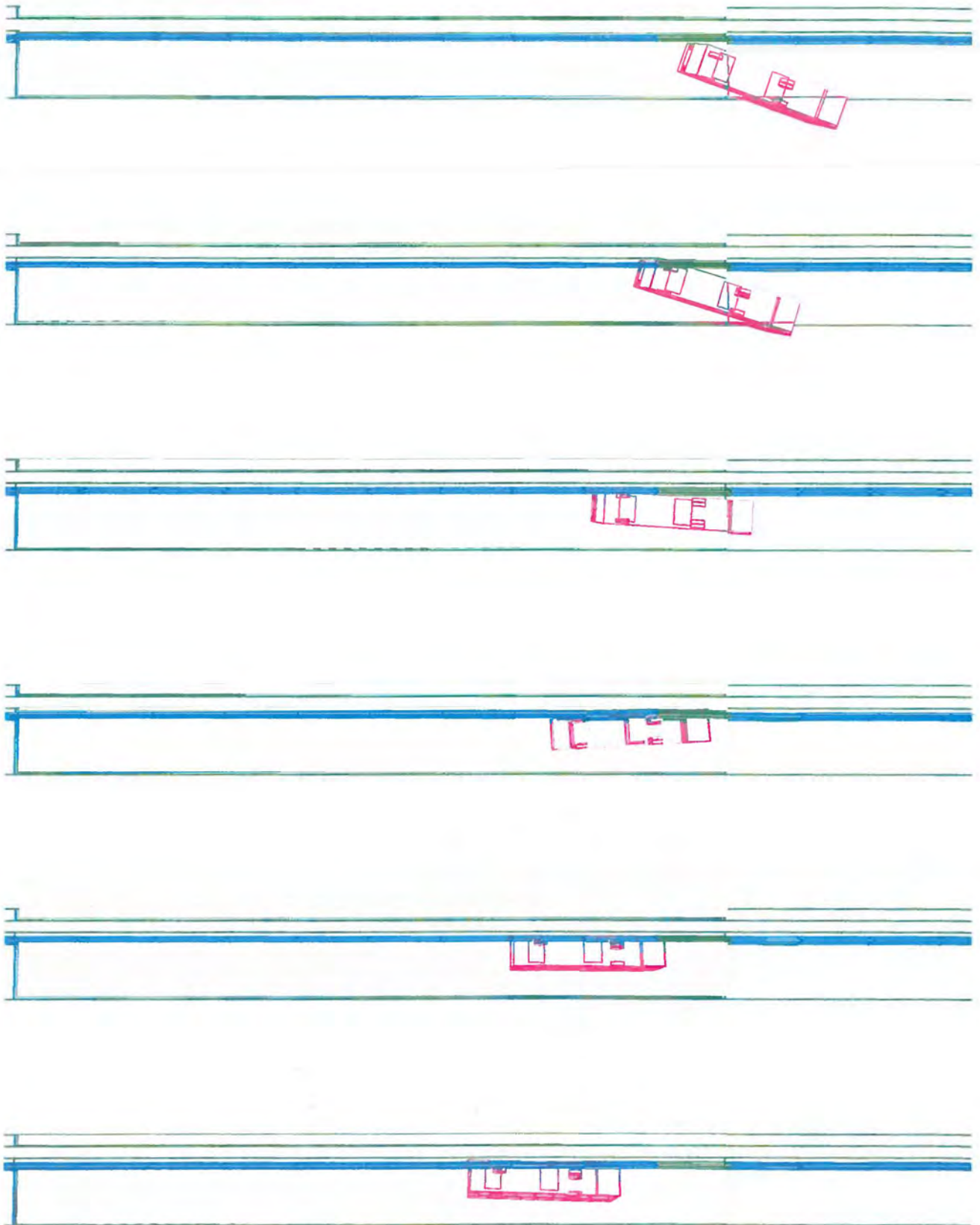
Afbeelding F10. Verloop van de uitbuiging van de elementen 19, 20 en 21 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.



**Simulatie met de bus tegen de RWS-barrier, verankering aan één uiteinde element, 20 mm vervorming in ondergrond, verticaal 10 mm.**

- G1. *Overzicht aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.*
- G2. *Verloop van de roll-, pitch- en yawhoek van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding tegen de RWS-barrier.*
- G3. *Verloop van de snelheid tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.*
- G4. *Verloop van de vertragingen in het zwaartepunt van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.*
- G5. *Verloop van de krachten in het zwaartepunt van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.*
- G6. *Verloop van de krachten en momenten in de koppeling tussen de elementen 19/20, 20/21 en 21/22 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.*
- G7. *Verloop van de krachten en momenten in de vier ankerbouten van element 19 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.*
- G8. *Verloop van de krachten en momenten in de vier ankerbouten van element 20 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.*
- G9. *Verloop van de krachten en momenten in de vier ankerbouten van element 21 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.*
- G10. *Verloop van de uitbuiging van de elementen 19, 20 en 21 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.*

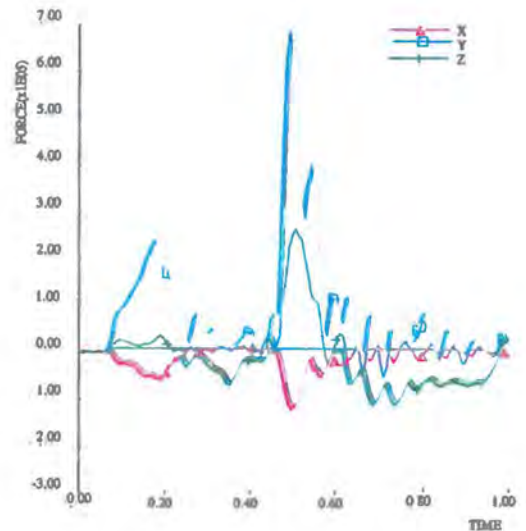
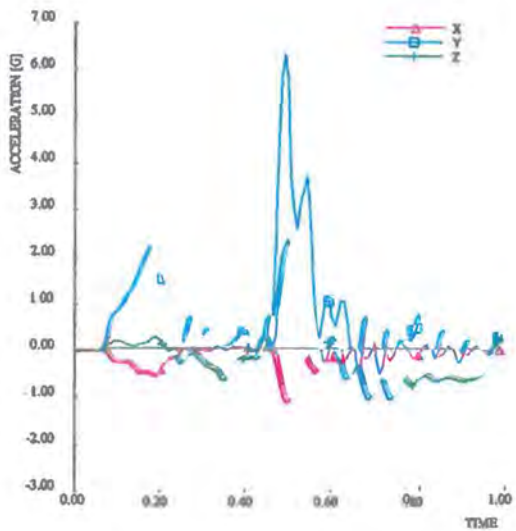
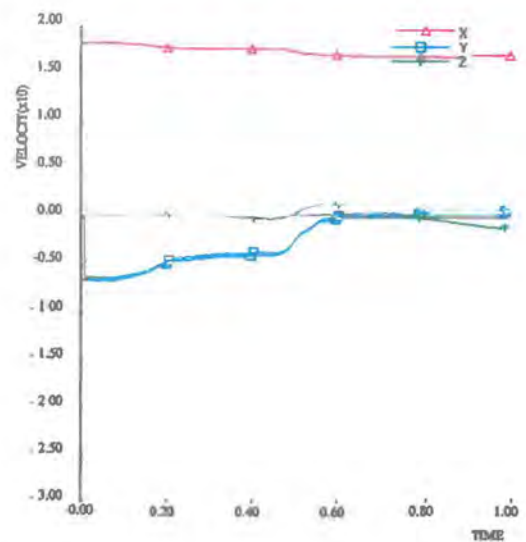
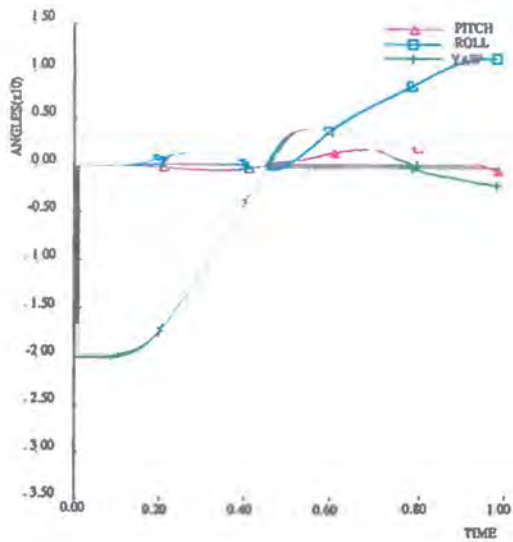




Afbeelding G1. Overzicht aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.







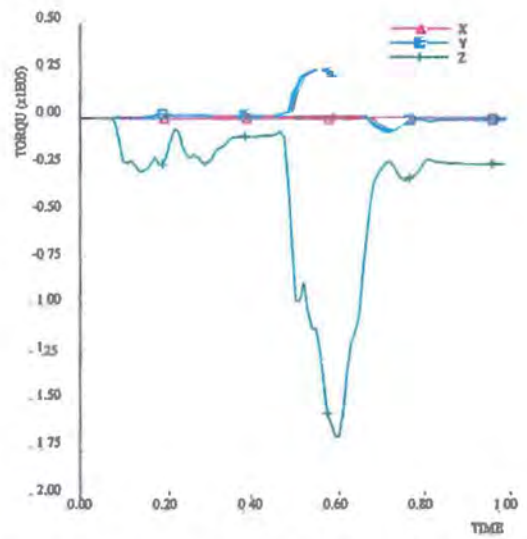
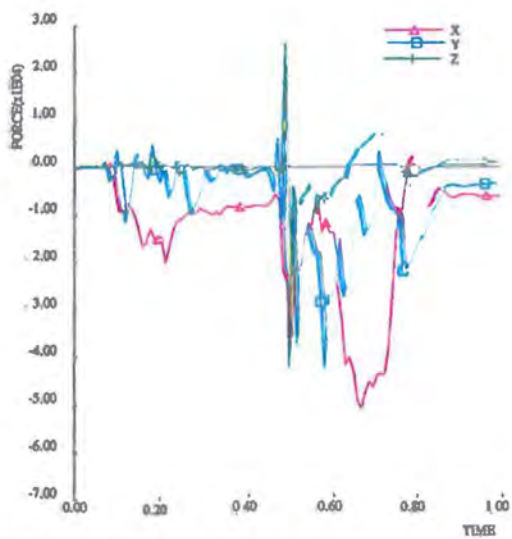
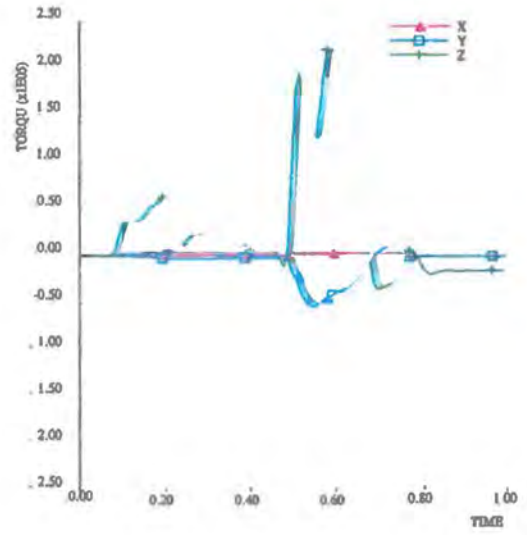
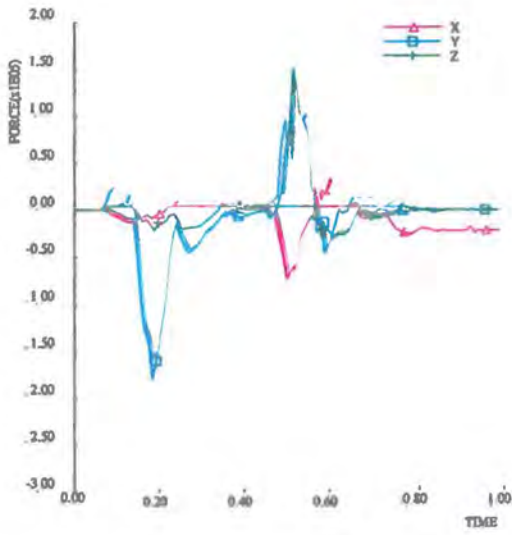
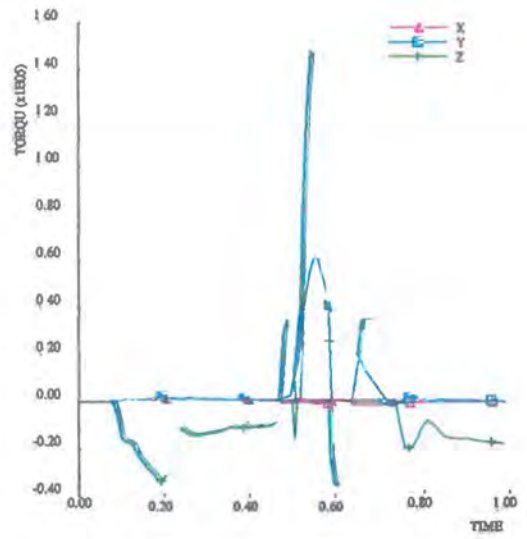
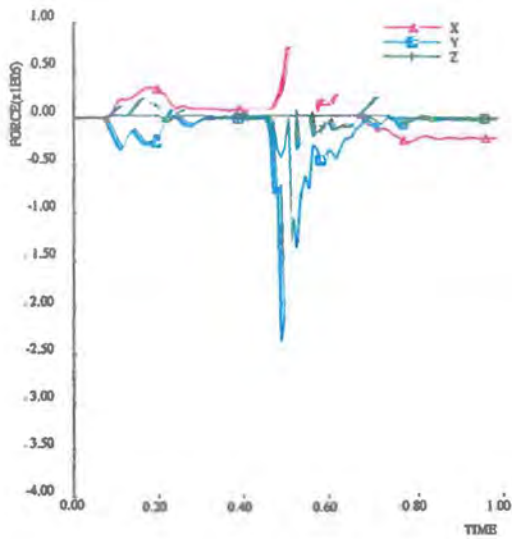
Afbeelding G2. Verloop van de roll-, pitch- en yawhoek van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding tegen de RWS-barrier.

Afbeelding G3. Verloop van de snelheid tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.

Afbeelding G4. Verloop van de vertragingen in het zwaartepunt van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.

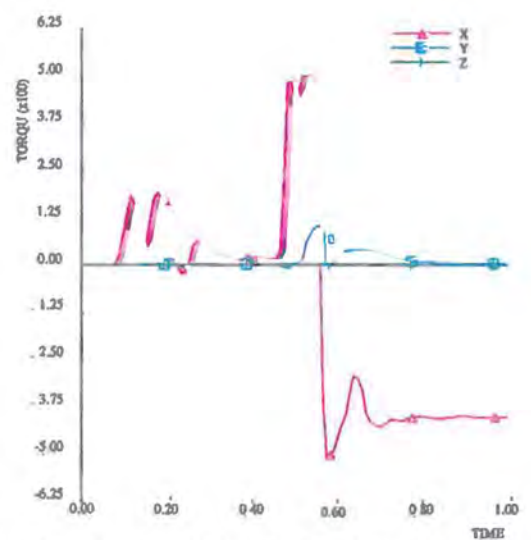
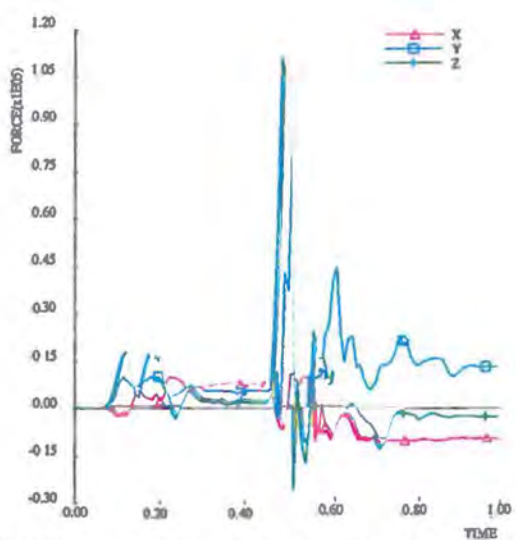
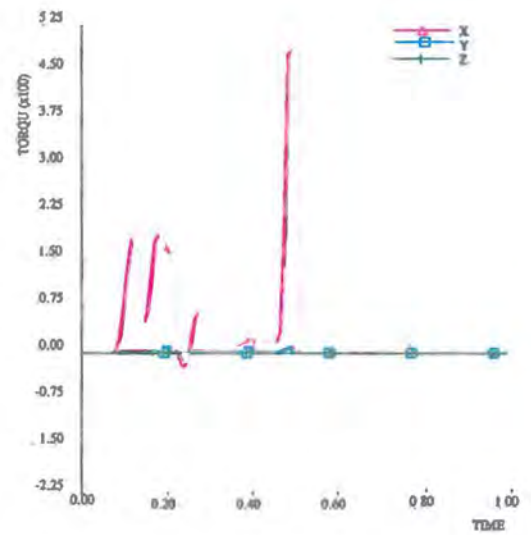
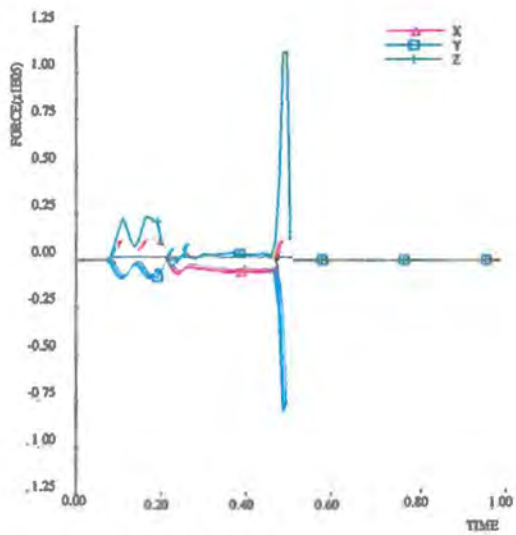
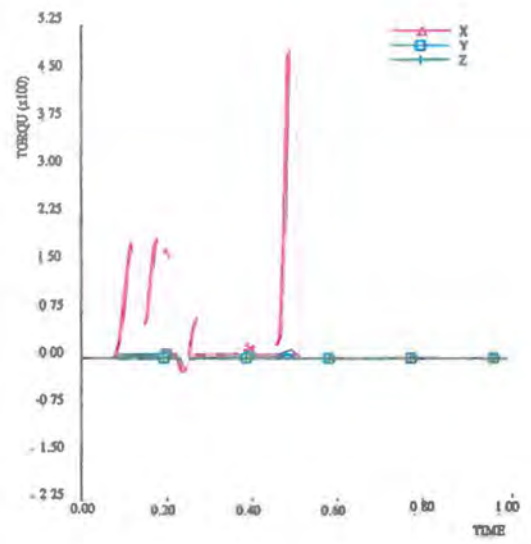
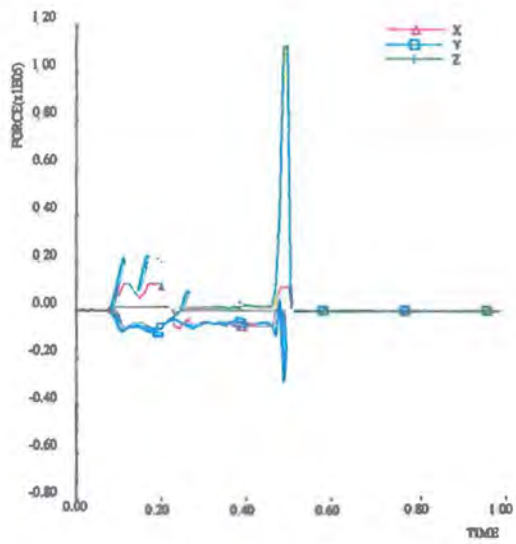
Afbeelding G5. Verloop van de krachten in het zwaartepunt van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.





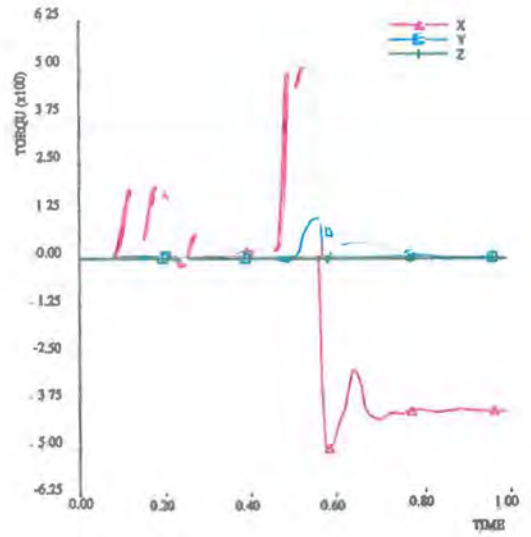
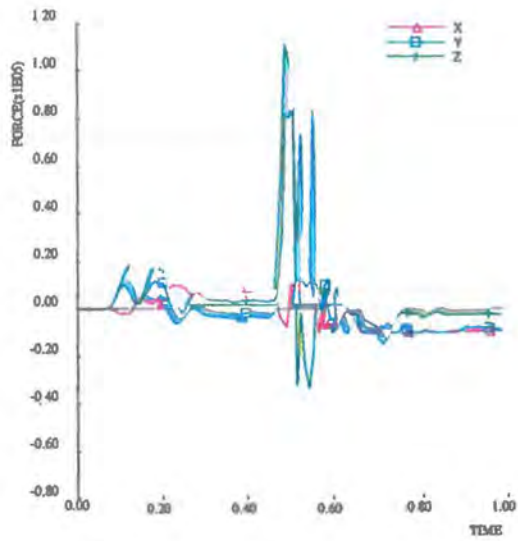
Afbeelding G6. Verloop van de krachten en momenten in de koppeling tussen de elementen 19/20, 20/21 en 21/22 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.





Afbeelding G7 (zie ook volgende blad). Verloop van de krachten en momenten in de vier ankerbolten van element 19 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.

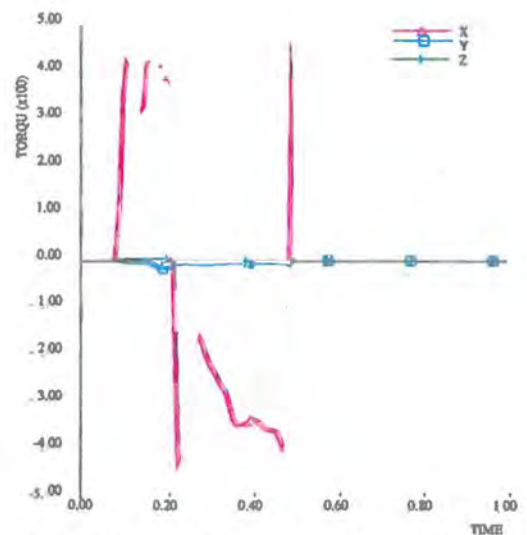
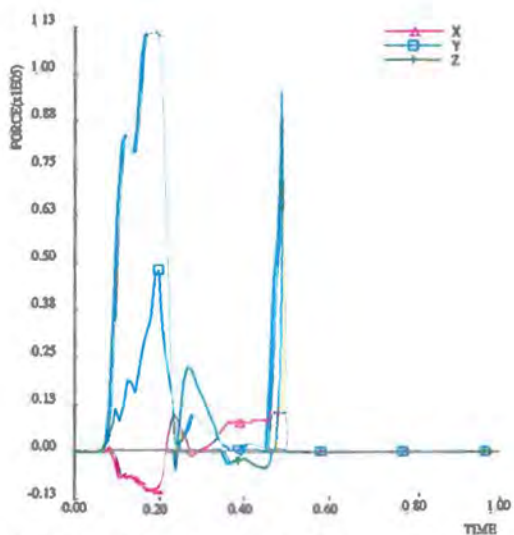
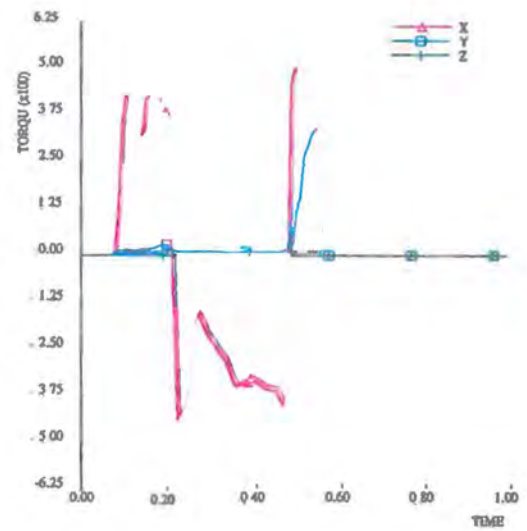
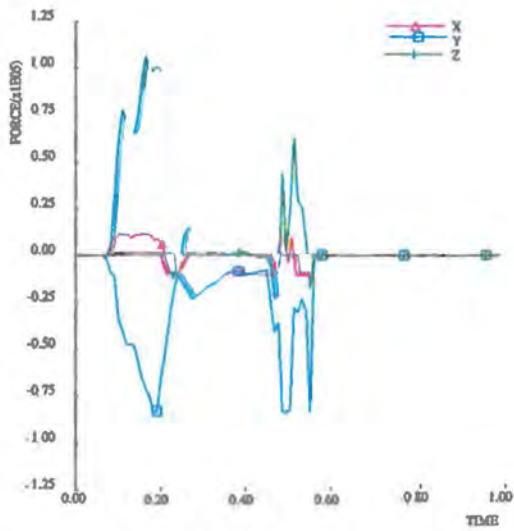
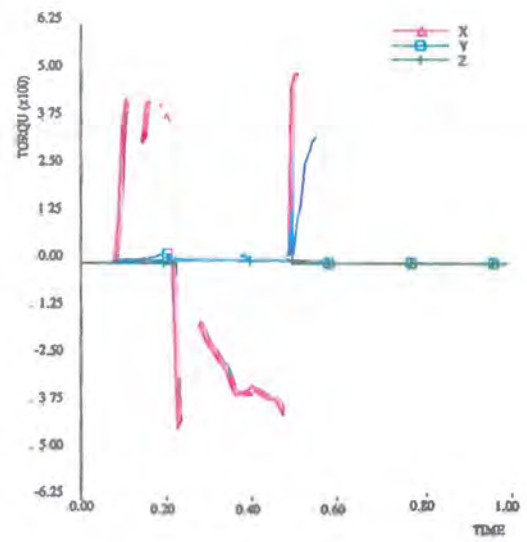
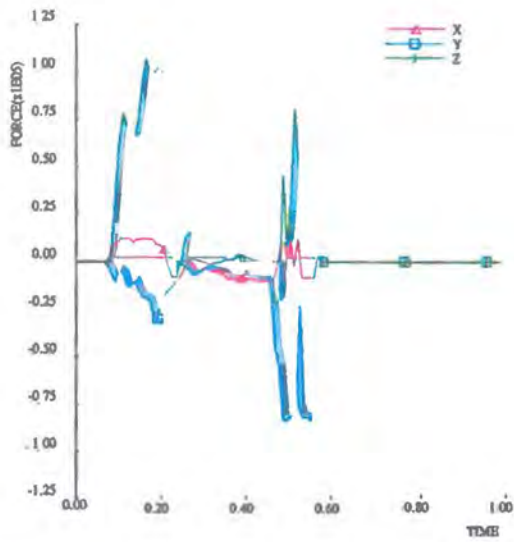




Afbeelding G7. Verloop van de krachten en momenten in de vier omliggende buizen van element 19 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.

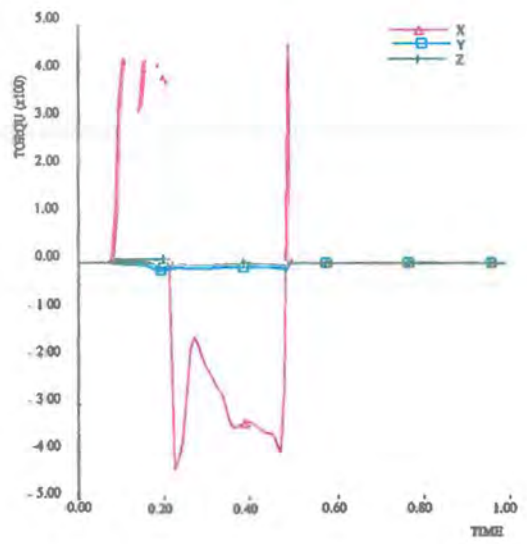
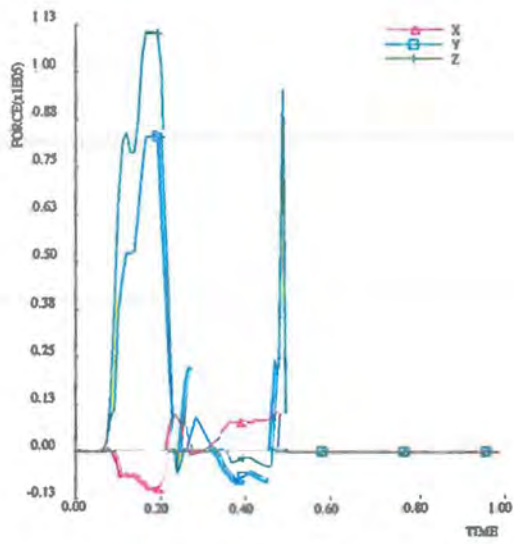






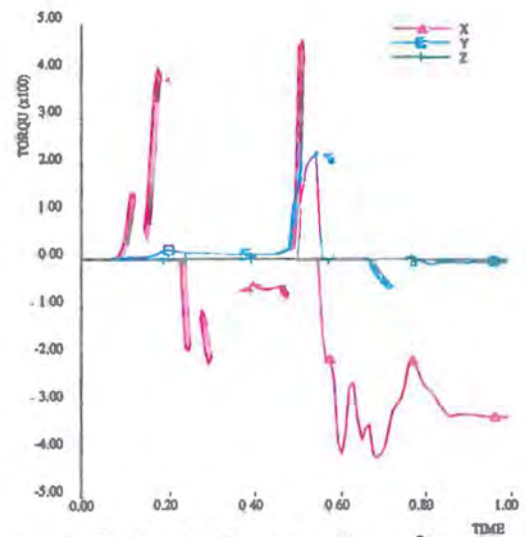
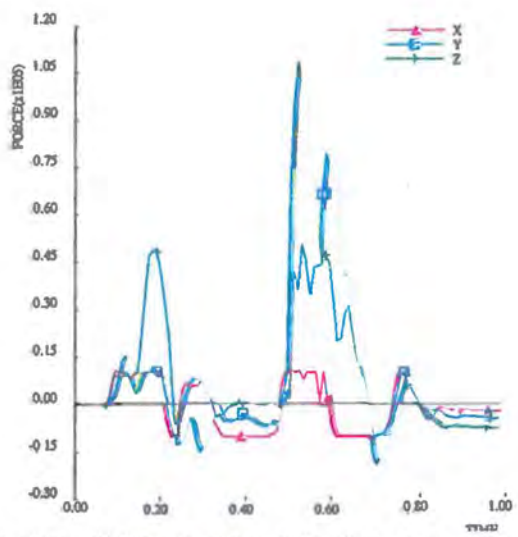
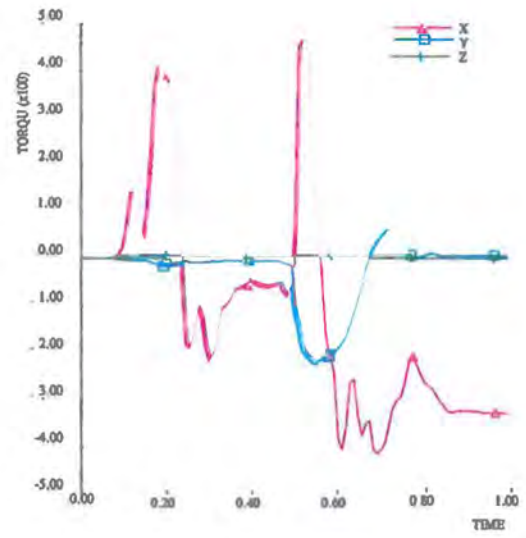
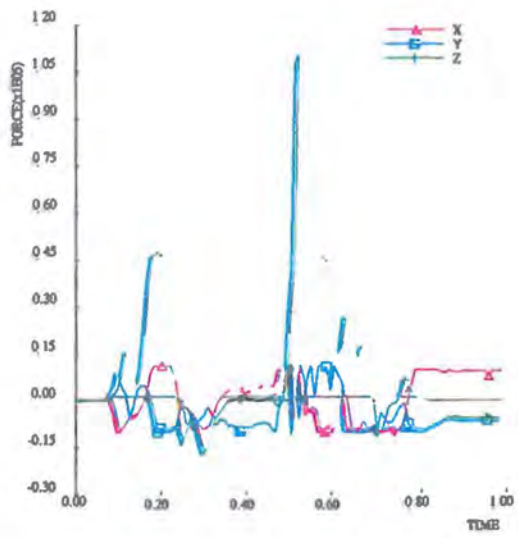
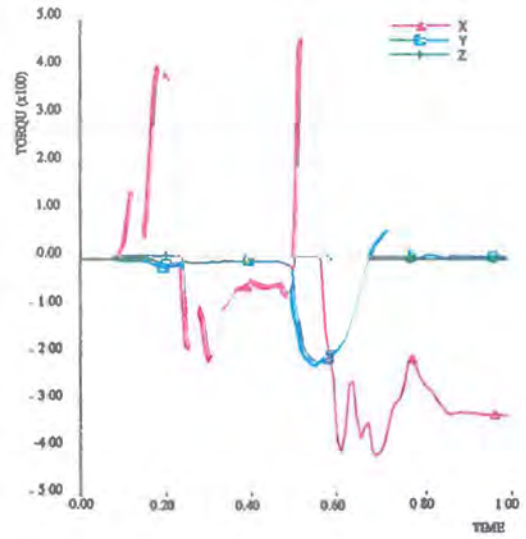
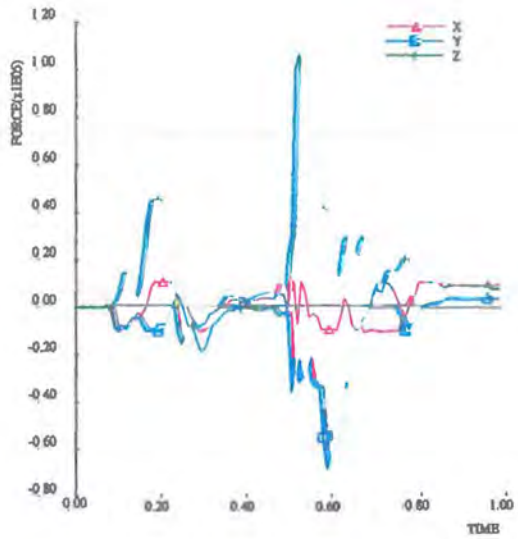
Afbeelding G8 (zie ook volgende blad) Verloop van de krachten en momenten in de vier ankerbaan en van de nent 20 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de lijdte personenvaart tegen de RVS barrier.





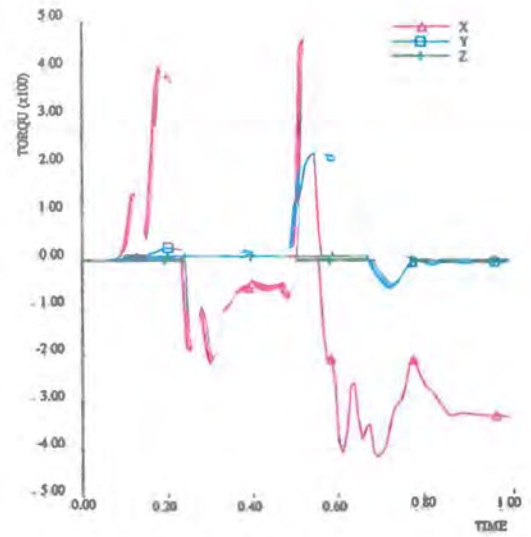
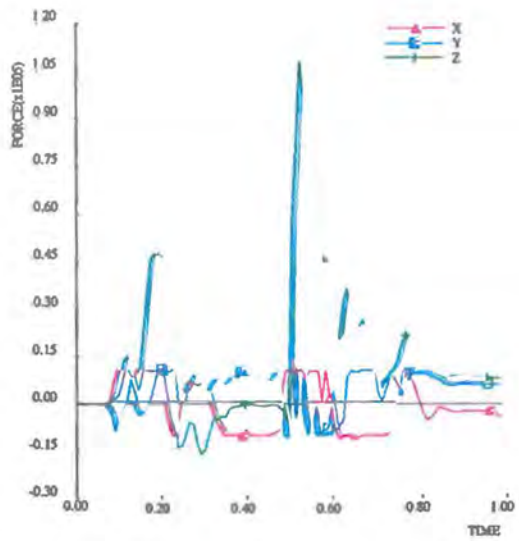
Afbeelding G8. Verloop van de kracht  $F_{t1}$  en moment  $M_{t1}$  in de vier assen van element 20 te gedurende de tijd  $t_1$  de ns de aanrijding met de bus  $t_{b2}$  en de RWS  $t_{b1}$  rier.





Afbeelding G9 (zie ook volgende blad). Verloop van de krachten en momenten in de vier ankerbouten van de nr 21 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de kleine personenauto tegen de RWS-barrier.

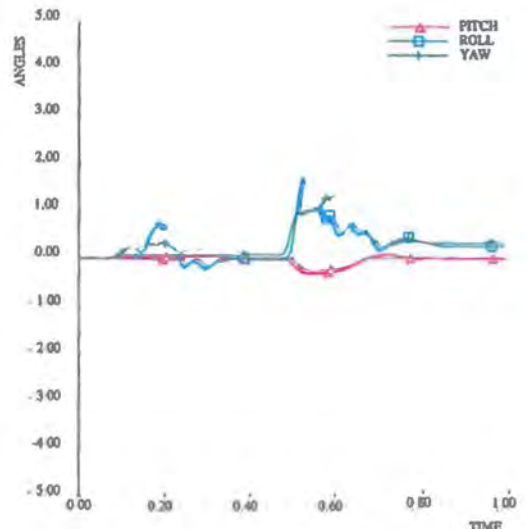
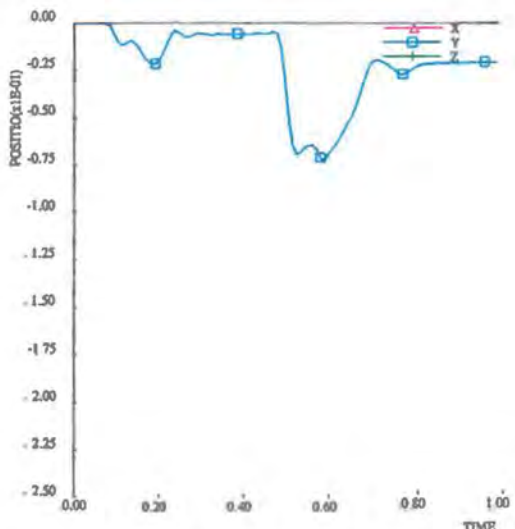
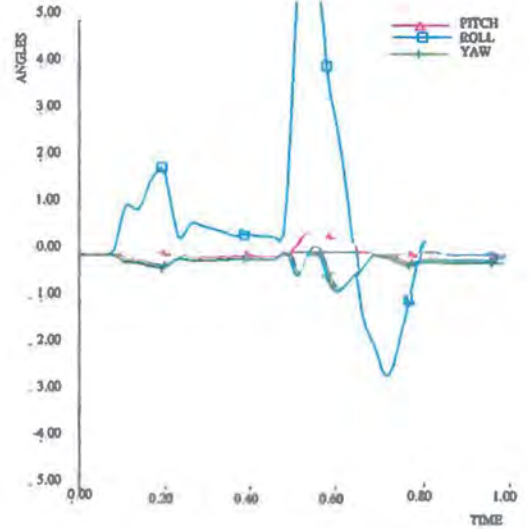
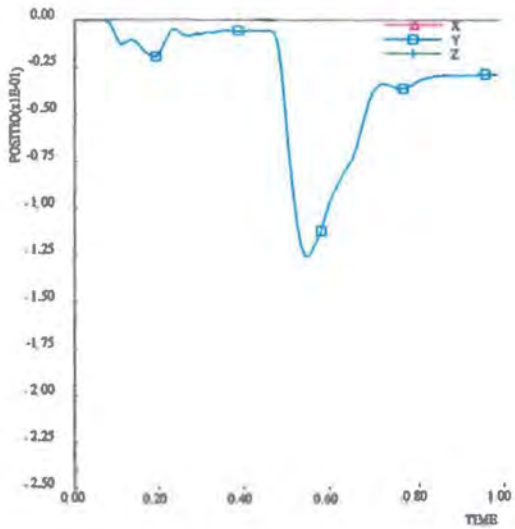
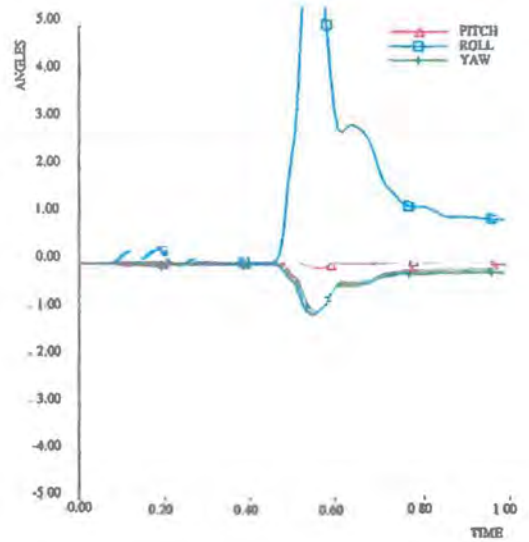
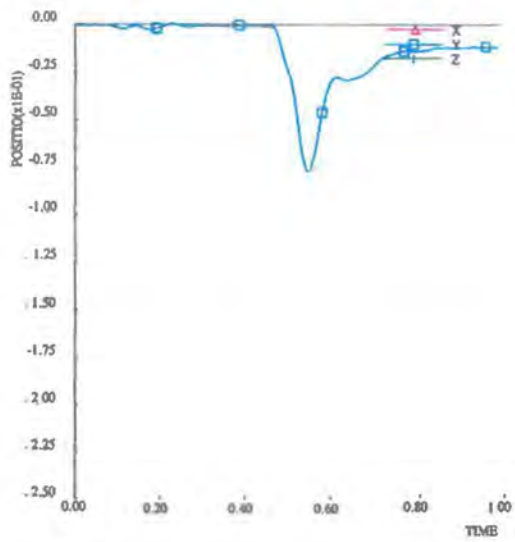




Afbeelding G9. Verloop van de krachten en momenten in de vier ankerbouten van element 21 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.







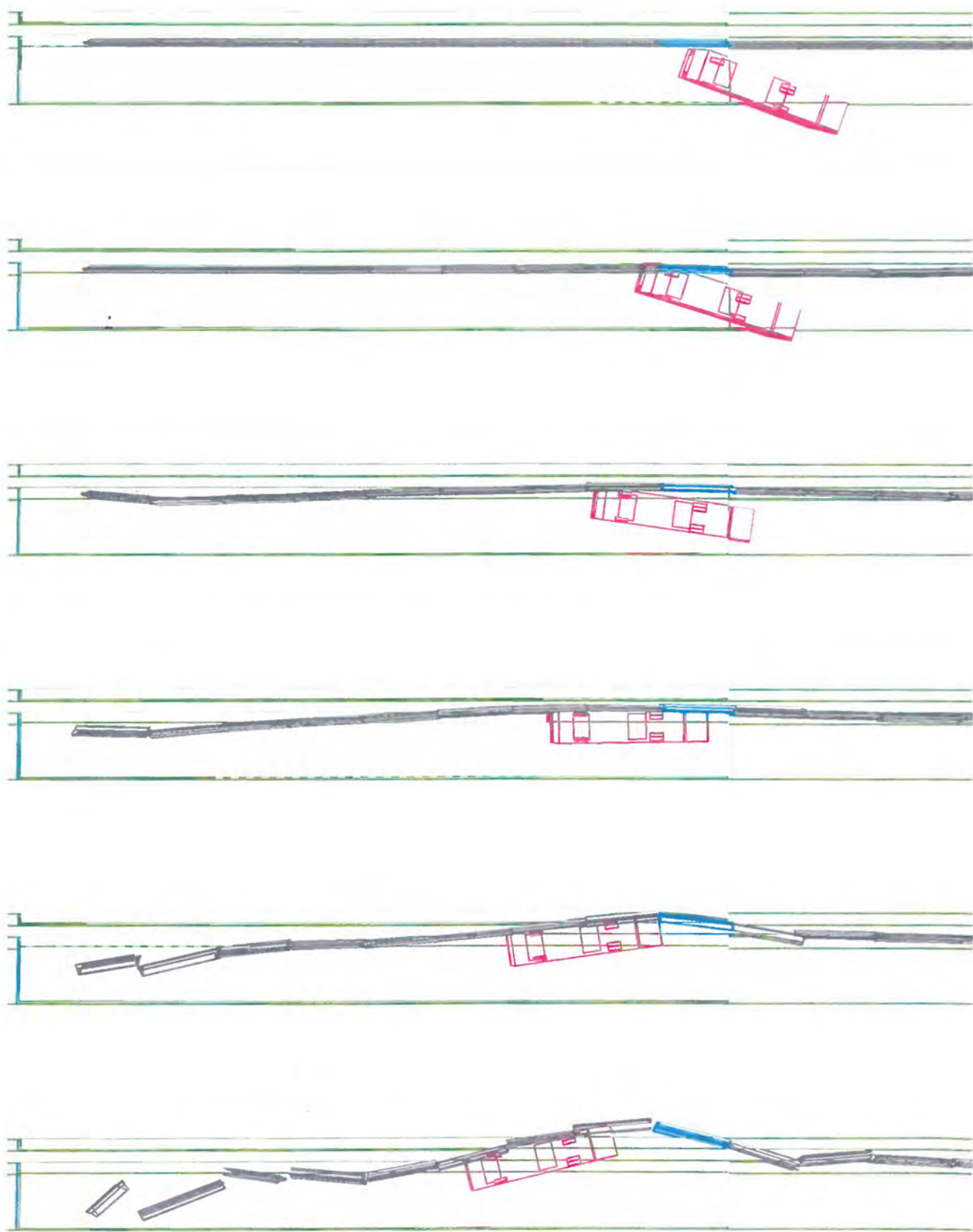
A fbeelding G10. Verloop van de uitbuiging van de elementen 19, 20 en 21 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de RWS-barrière.



**Simulatie met de bus tegen de RWS-barrier, verankering aan twee uiteinden element, 10 mm vervorming in ondergrond, verticaal 30 mm.**

H1. *Overzicht aanrijding met de bus tegen de RWS-barrier.*





Afbeelding H1. Overzicht oprijding met de bus tegen de RWS-barrier.



## 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 gediscrèteerd 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)*

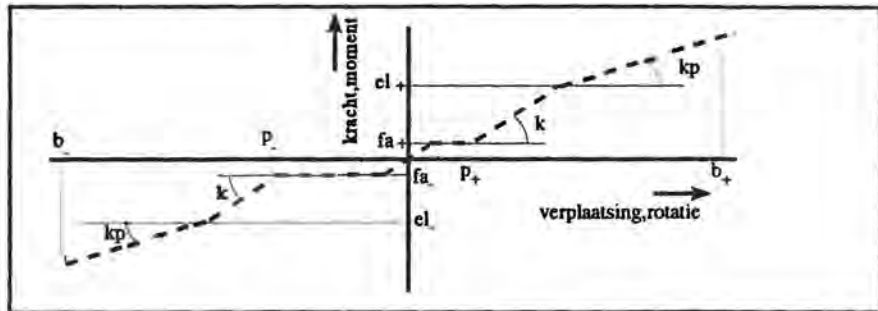
Verbindingen worden tussen twee nodes gedefinieerd en beperken de relatieve beweging van deze twee nodes. De relatieve beweging van twee nodes is te beschrijven door drie translaties en drie rotaties respectievelijk langs en rond de assen van een orthogonaal assenstelsel. Er zijn vier types verbindingen:

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.

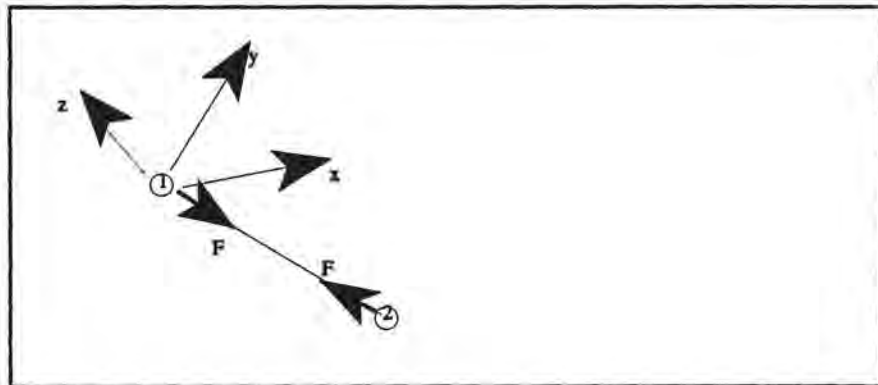
De tegenwerkende kracht voor een bepaalde bewegingscomponent wordt bepaald door een door de gebruiker gedefinieerd kracht-verplaatsing of moment-rotatie diagram en een dempingscoëfficiënt (c).



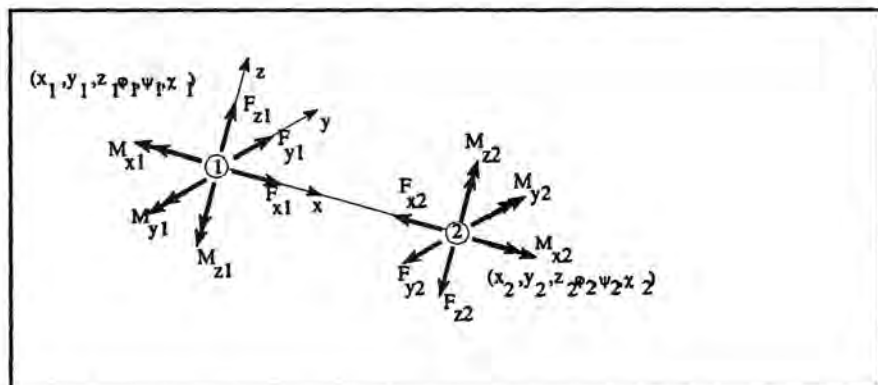


Afbeelding B1. Het kracht-verplaatsingsdiagram.

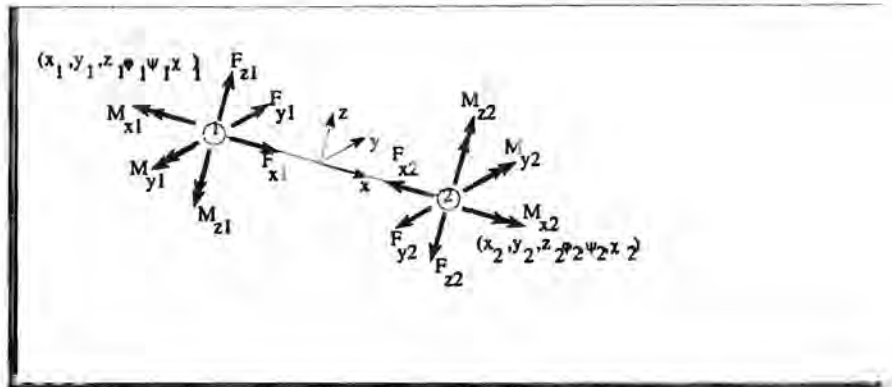
De vorm van een kracht-verplaatsing dan wel moment-rotatie diagram is gegeven in *Afbeelding B1*. De karakteristiek in *Afbeelding B1* wordt beschreven door de stijfheid ( $k$ ), de speling ( $p_+, p_-$ ), de spelingsweerstand ( $f_{a+}, f_{a-}$ ), de plasticiteitsgrens ( $e_{l+}, e_{l-}$ ), de plastische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



Afbeelding B2. De ROD-verbinding.



Afbeelding B3. De POINT-verbinding.



Afbeelding B4. De BEAM-verbinding

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

- *contactlichamen* (CONTACT ELEMENTS)

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

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

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

	SPHERE	CYLINDER	PLANE	POLYHEDRON	REVOLUTION_BODY
SPHERE	1	0	1	0	0
CYLINDER	0	0	1	1	0
PLANE	1	1	0	0	1
POLYHEDRON	0	1	0	0	0
REVOLUTION_BODY	0	0	1	0	0

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

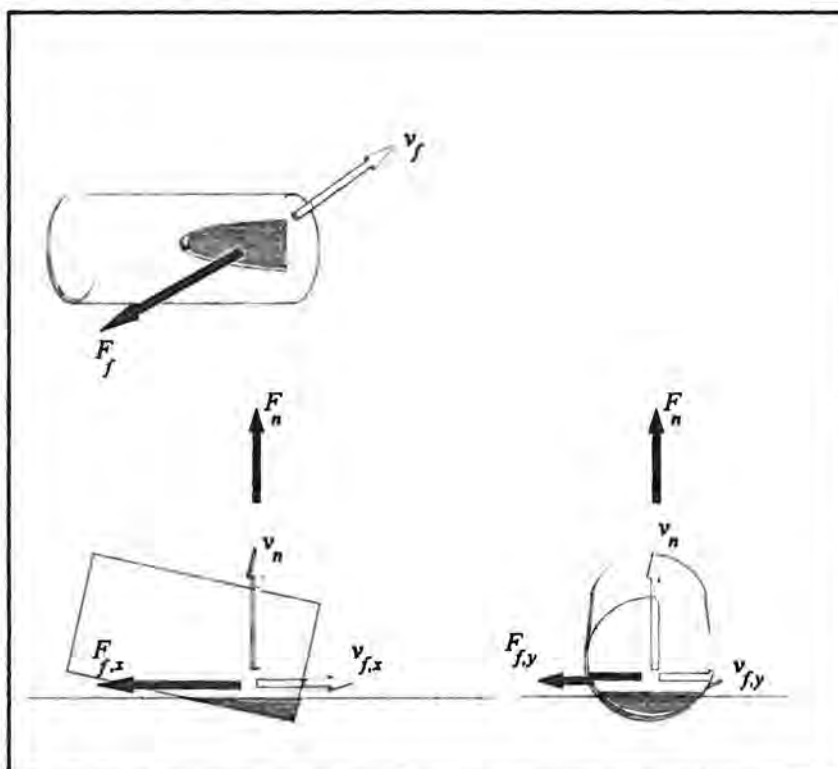
In *Afbeelding B5* betekent een 1 dat het programma contact tussen beide contactlichamen kent, een 0 betekent dat het programma geen contacten tussen beide contactlichamen kent. Er worden contactkrachten berekend

wanneer het programma een gemeenschappelijk volume of intersectie heeft gevonden tussen twee contactlichamen waartussen contact mogelijk is

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

$$p = p_0 \left[ \frac{v_0}{v_0 - v} \right]^c \quad (1)$$

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



Afbeelding B6. Contact tussen een PLANE en een CYLINDER

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

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

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

- *wielen* (WHEELS)

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

## C. Het rekenen

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

Op grond van deze nieuwe toestand worden de 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 rekening voor een simulatie is afhankelijk van een aantal factoren.

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

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