

De stalen RWS-barrier toegepast op het proefterrein van de Rijksdienst voor het Wegverkeer

Een beperkt simulatie-onderzoek

R-95-64

Ing. W.H.M. van de Pol

Leidschendam, 1995

Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV

Documentbeschrijving

Rapportnummer: R-95-64
Titel: De stalen RWS-barrier toegepast op het proefterrein van de
Rijksdienst voor het Wegverkeer
Ondertitel: Een beperkt simulatie-onderzoek
Auteur(s): Ing. W.H.M. van de Pol
Onderzoeksmanager: Ir. F.C.M. Wegman
Projectnummer SWOV: 55.436
Opdrachtgever: De inhoud van dit rapport berust op gegevens verkregen in het
kader van een project, dat is uitgevoerd in opdracht van de
Bouwdienst Rijkswaterstaat

Trefwoorden: Safety fence, steel, design (overall design), simulation, program
(computer), safety, deformation, lorry, car, Netherlands.

Projectinhoud: Dit rapport doet verslag van een beperkt simulatie-onderzoek naar
de mogelijkheden om de RWS-barrier toe te passen op het proef-
terrein van de Rijksdienst voor het Wegverkeer (RDW), nabij
Lelystad.

Aantal pagina's: 44 pp + 32 pp
Prijs: f 78,50
Uitgave: SWOV, Leidschendam, 1995

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

Postadres gewijzigd in:
Postbus 1090
2260 BB Leidschendam

Samenvatting

De Bouwdienst van Rijkswaterstaat heeft aanbevolen om op een bepaald traject van de testbaan van de Rijksdienst voor het Wegverkeer (nabij Lelystad) de stalen RWS-barrier als afschermvoorziening toe te passen. Het af te schermen baanvak is ongeveer 170 meter lang. De RWS-barrier scheidt twee testfaciliteiten.

De SWOV heeft door het uitvoeren van een aantal simulaties de bruikbaarheid van de voorgestelde oplossing getoetst. De SWOV heeft hierbij gebruik gemaakt van het computerprogramma VEDYAC. Er zijn simulaties uitgevoerd met een personenauto en een 10 tons en een 30 tons vrachtauto.

Uit de computersimulaties blijkt dat de RWS-barrier de uitgevoerde aanrijdingen goed doorstaat, ook onder de meer ongunstige inrijcondities. Een aanrijding met een personenauto verloopt rustig; de uitbuiging van de barrier blijft beperkt en de ASI-waarde is onder de norm.

Bij de aanrijdingen met de vrachtauto's blijkt duidelijk dat de eindverankerungen een wezenlijk aandeel in het omleiden van het voertuig hebben. Bij de 10 tons vrachtauto is er geen sprake van breuk, noch in de barrier zelf, noch in de verankering.

Een aanrijding met de 30 tons vrachtauto op circa 50 meter voor de eindverankering veroorzaakt wel breuk, zowel in de verankering als in de barrier.

Geconcludeerd is, dat de voorgestelde voorziening (de 170 meter lange RWS-barrier alleen aan de uiteinden verankerd) een beperkte werkingslengte heeft. De grootte van de uitbuiging van de barrier beperkt de bruikbaarheid van de testfaciliteit achter de barrier.

Een aanrijding met een 30 tons vrachtauto toont aan, dat de RWS-barrier met elk element verankerd een betere en toereikende oplossing is. Daarmee wordt namelijk de invloed van de aanrijding op de opvolgende elementen snel kleiner; de effectieve werkingslengte van de barrier wordt daardoor veel groter.

Aanbevolen wordt dan ook om elk element van de RWS-barrier te verankeren, teneinde de barrier ook bij de meest ongunstige botsomstandigheden te kunnen laten voldoen aan de gestelde eisen.

Summary

The steel RWS barrier applied to the proving ground of the Ministry of Transport Industries

The Construction Department of the Ministry of Public Works has recommended that a certain section of the test course of the Department of Road Transport (near Lelystad) be fitted with the steel RWS barrier to serve as a protective shield. The section of road to be screened off is about 170 m in length. The RWS barrier divides two test facilities.

The SWOV has assessed the practicability of the proposed solution by performing a number of simulations utilising the computer programme VEDYAC. Simulations were conducted with a passenger car and with two lorries weighing 10 ton and 30 ton, respectively.

The computer simulations show that the RWS barrier is well able to withstand the collisions performed, also under the most favourable angle of approach.

A collision with the passenger car occurs sedately; the distortion of the barrier is minor and the ASI value remains below the standard value. With the lorry collisions, it is clear that the end anchor plays an important role in deflecting the vehicle. With the 10 ton lorry, there is no question of breakage, either in the barrier itself or in the anchoring of the barrier. A collision with the 30 ton lorry does lead to fracture, both in the anchoring and in the barrier, at approx 50 m from the end anchor.

It is concluded that the proposed facility (which anchors the 170 m long RWS barrier only at the extremities) has a limited effective length. The degree of distortion of the barrier restricts the practicability of the test facility behind the barrier.

A collision with a 30 ton lorry indicated that if the RWS barrier is anchored at each element, this offers a better and more satisfactory solution, since the influence of the collision on the adjacent elements is reduced; the effective working length of the barrier therefore becomes much longer.

It is therefore recommended to anchor each element of the RWS barrier so that it may meet the specified requirements, even under the most unfavourable collision conditions.

Inhoud

1.	<i>Inleiding</i>	6
2.	<i>Criteria</i>	7
3.	<i>Opzet en uitvoering van het onderzoek</i>	8
3.1.	De RWS-barrier	8
3.2.	Modellering ankerbouten	9
3.2.1.	Model parameters	9
3.2.2.	Lineaire componenten van de POINT-verbinding	9
3.3.	Simulaties	11
4.	<i>SWOV-simulaties</i>	13
4.1.	Simulatie met personenauto, uiteinden verankerd	13
4.2.	Simulatie met 10 tons vrachtauto, uiteinden verankerd	13
4.3.	Simulatie met 30 tons vrachtauto, uiteinden verankerd	14
4.4.	Simulatie 30 tons vrachtauto, op eindverankering	15
4.5.	Simulatie 30 tons vrachtauto, elk element verankerd.	15
5.	<i>Conclusies en aanbevelingen</i>	17
	<i>Literatuur</i>	19
	<i>Bijlage 1 t/m 3</i>	21

1. Inleiding

De Bouwdienst van Rijkswaterstaat heeft aanbevolen om op een bepaald traject van de testbaan van de Rijksdienst voor het Wegverkeer (RDW), nabij Lelystad, de stalen RWS-barrier als afschermvoorziening toe te passen. Het af te schermen baanvak is ongeveer 170 meter lang. Het doel van het onderzoek is het uitvoeren van een beperkte hoeveelheid simulaties om te bepalen of de voorgestelde constructie-uitvoering van de afschermvoorziening op de testbaan van de RDW voldoet. Voor de simulatielengte van de RWS-barrier is 174 meter genomen: 29 elementen van 6 meter. De eerste drie elementen en de laatste drie elementen zijn aan het wegdek verankerd door middel van vier ankerbouten M 24 per element. De simulaties worden uitgevoerd met een personenauto en twee vrachtauto's, één van 10 ton en één van 30 ton.

2. Criteria

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

Deze eisen zijn:

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

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

Voorts wordt nog gelet op de voertuigvertragingen, die in de ASI-waarde wordt vertaald. In de voorlopige CEN-voorstellen¹ (CEN, 1994a, 1994b) worden twee ASI-waarden gegeven; niveau A: $ASI \leq 1$ en niveau B: $ASI \leq 1,4$. Deze waarden gelden voor het zwaartepunt van het voertuig.

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

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

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

¹ Het CEN (Comité Européen de Normalisation) stelt voor Europa normen op waaraan afschermvoorzieningen moeten voldoen; ook wordt bepaald onder welke inrijcondities de proeven op deze afschermvoorzieningen moeten worden uitgevoerd.

3. Opzet en uitvoering van het onderzoek

3.1. De RWS-barrier

In 1990-1991 heeft de SWOV, in opdracht van de Adviesdienst Verkeer en Vervoer van Rijkswaterstaat, simulatieonderzoek uitgevoerd naar de werking van een stalen New Jersey-barrier (Van de Pol, 1990; 1991). Dit onderzoek heeft in 1994 een vervolg gehad met het uitvoeren van twee proeven op ware schaal (Ellmers & Schulte 1993a; 1993b). De resultaten van deze full scale-tests zijn gebruikt om de gegevens waaruit het model van het simulatieprogramma VEDYAC is opgebouwd, te verifiëren en te optimaliseren (Van de Pol, 1995).

Met behulp van het verbeterde model van de stalen RWS-barrier wordt nu de toepasbaarheid van de RWS-barrier voor het proefterrein van de Rijksdienst voor het Wegverkeer (RDW) bekeken.

Zowel uit de proeven op ware schaal (Ellmers & Schulte 1993a en b) als uit het verificatie-onderzoek (Van de Pol, 1995) - simulaties TB 21 en TB 41 - blijkt, dat een 174 meter lange RWS-barrier veel te kort is om de simulaties met goed gevolg te kunnen doorstaan. Uit beide onderzoeken blijkt, dat reeds bij deze lichte inrijcondities (massa/snelheid/hoek 10000/70/8) van de vrachtauto de volledige lengte van 240 meter van de geplaatste constructie, aan de beproeving deelneemt. De hier geplaatste constructie is veel korter en de inrijcondities (massa/snelheid/hoek 10000/70/15) zijn veel zwaarder.

Dit geldt zeker voor de aanrijdingen met de twee vrachtauto's. De constructie moet aan de uiteinden verankerd zijn. Zowel de eerste drie elementen als de laatste drie elementen zijn aan het wegdek verankerd. De verankering bestaat uit vier ankerbouten M 24 kwaliteit 4.6. Een en ander is weergegeven in *Afbeeldingen 1* en *2*.

In onderstaande twee tabellen zijn de parameters van de verbindingscomponenten in de POINT-verbinding tussen de elementen uit het verificatie-onderzoek (Van de Pol, 1995) gegeven.

Parameters van de verbindingscomponenten in de POINT-verbinding:

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

Parameters van de verbindingscomponenten in de POINT-verbinding totdat de speling er uit wordt getrokken:

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

3.2. Modelling ankerbouten

Afbeelding 2 geeft een overzicht van de uitvoering van de verankering. De verankering bestaat uit vier ankerbouten M 24 4.6. De onderlinge afstand van de verankeringen bedraagt 6 meter; zie *Afbeelding 4*. Bij de ‘vertaling’ van de werking van de verankering zijn enkele aannamen gedaan, omdat bij Rijkswaterstaat geen gegevens beschikbaar zijn omtrent het gedrag van een ankerbout verlijmd in het wegdek. De aannamen hebben betrekking op de vervormingsweerstand van het wegdek, breuk respectievelijk loskomen van de ankerbout.

3.2.1. Model parameters

Bij de berekeningen zijn de volgende waarden gebruikt:

Bout M 24 (4.6)			
oppervlak	A_s	$3,53 \cdot 10^{-4}$	m^2
materiaaleigenschappen			
treksterkte	σ_t	$390 \cdot 10^6$	N/m^2
afschuifsterkte	τ	$235 \cdot 10^6$	N/m^2 (0,6 treksterkte)
vloeisterkte	σ_{vl}	$235 \cdot 10^6$	N/m^2

De SWOV heeft aan de hand van deze gegevens een ‘vertaling’ van de sterkte van de ankerbouten gemaakt.

3.2.2. Lineaire componenten van de POINT-verbinding

De ankerbouten worden met een zogenoemde POINT-verbinding gesimuleerd. De POINT-verbinding neemt krachten op in x-, y- en z-richting. In x- en y-richting is speling aanwezig. In de verankering zitten 4 M 24 4.6 bouten. Het aantal POINT-verbindingen per verankering is dus vier. De parameters in de point-verbinding zijn als volgt berekend.

plasticiteitsgrens (el+ en el-) in x-richting is berekend met behulp van de formule:

$$F_x = \sigma_t \cdot A_s \cdot 1,3$$

Uit de formule volgt dat, met $\sigma_{v1} = 235 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$ en $A_s = 3,53 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$,

$$F_z = 1,1E5$$

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

plasticiteitsgrensen (el+ en el-) in x- en y-richting worden berekend met behulp van de formule:

$$F_{x,y} = \tau \cdot A_s$$

Uit de formule volgt dat, met $\tau = 235 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$ en $A_s = 3,53 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$,

$$F_{x,y} = 8,3E4$$

De *stijfheidscoëfficiënten* (k) worden bepaald uit de plasticiteitsgrens (el+ en el-) en de mogelijke elastische vervorming in de ankerbout-verbinding. De grootte van deze vervorming wordt op 0,001 m in x- en y-richting en 0,004 m in z-richting aangenomen. De *stijfheidscoëfficiënten* worden berekend met behulp van de formule:

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

Uit de formule volgt dat, met $F_{pl(x,y)} = 8,3E4 \text{ N}$, $F_{plz} = 1,1E5 \text{ N}$ en $f_{F(x,y)} = 0,001 \text{ m}$, $f_{Fz} = 0,004 \text{ m}$.

$$k_{k(x,y)} \text{ is } 8,3E6 \text{ N/m. en}$$

$$k_{kz} \text{ is } 2,7E7 \text{ N/m.}$$

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

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

Uit de formule volgt dat, met $m = 630 \text{ kg}$ (massa 6 meter-element), $n = 4$ (aantal verbindingen per element) en k_{kx} , k_{ky} en k_{kz} respectievelijk $8,3E6 \text{ N/m}$, $8,3E6 \text{ N/m}$ en $2,7E7 \text{ N/m}$ voor de krachten de kritische dempingswaarden d_{kr} kunnen worden uitgerekend.

Ten behoeve van numerieke stabiliteit in de simulatie is het gebruikelijk om voor de demping ééntiende van de kritische demping te nemen ($d_{kr}/10$). Deze waarde wordt over de vier ankerbouten per element verdeeld. Voor de demping in de simulaties geldt dus $d = d_{kr}/40$.

De demping in de simulaties voor de krachten in x-, y- en z-richting zijn respectievelijk $5,9E3 \text{ Ns/m}$, $5,9E3 \text{ Ns/m}$ en $9,6E3 \text{ Ns/m}$.

De *breekverplaatsingen* (b+ en b-) in x- en y-richting zijn aangenomen op 0,10 meter en in de z-richting op 0,05 meter.

Onderstaande twee tabellen geven een overzicht van de berekende parameters van de verbindingscomponenten in de POINT-verbinding tussen de elementen.

kracht component	k [N/m]	d [Ns/m]	el+ [N]	b+ [m]	el- [N]	b- [m]
in x-as	8,3E6	5,9E3	8,3E4	0,10	-8,3E4	-0,10
in y-as	8,3E6	5,9E3	8,3E4	0,10	-8,3E4	-0,10
in z-as	2,7E7	9,6E3	1,1E5	0,05	-2,2E5	-0,05

Parameters van de verbindingcomponenten in de POINT-verbinding totdat de speling er uit wordt getrokken:

kracht component	fa+ [N]	p [m]	fa- [N]	p [m]
in x-as	1,0E4	0,018	-1,0E4	0,018
in y-as	1,0E4	0,003	-1,0E4	0,003

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

3.3. Simulaties

In nader overleg met de Bouwdienst Apeldoorn zijn de volgende simulaties afgesproken:

voertuig	massa [kg]	inrijhoek [grd]	inrijsnelheid [km/uur]	botsenergie [kJ]
personenauto	1300	15	100	34
vrachtauto	10000	15	70	127
vrachtauto	34000	8	70	125

De simulatie met de 34 tons vrachtauto is enigszins aangepast. Een 34 tons vrachtauto is niet voorhanden, een 30 tons vrachtauto daarentegen wel. In overleg met de Bouwdienst is besloten de 30 tons vrachtauto niet aan te passen naar 34 ton, maar de inrijsnelheid enigszins te verhogen. De botsenergie blijft hierdoor toch gelijk.

voertuig	massa [kg]	inrijhoek [grd]	inrijsnelheid [km/uur]	botsenergie [kJ]
vrachtauto	30000	8	74,5	125

De voertuigcondities bij de simulaties zijn:

voertuig	massa [kg]	inrijhoek [grad]	inrijsnelheid [km/uur]	botsenergie [kNm]
personenauto	1300	15	100	34
vrachtauto	10000	15	70	127
vrachtauto	30000	8	74,5	125

De uitgevoerde simulaties zijn:

- A personenauto uiteinden verankerd
- B 10t vrachtauto uiteinden verankerd
- C 30t vrachtauto uiteinden verankerd
- D 30t vrachtauto uiteinden verankerd
aanrijding op uiteinde
- E 30t vrachtauto elk element verankerd

Afbeelding 3 geeft een overzicht van de simulatie-opstelling.

4. SWOV-simulaties

4.1. Simulatie met personenauto, uiteinden verankerd

De afbeeldingen van de simulatie zijn ondergebracht in *Bijlage 2A* (*Afbeeldingen A1 t/m A7*).

Uit de simulatie blijkt dat de RWS-barrier voor de personenauto als een stijve constructie reageert. De blijvende uitbuiging bedraagt 46 cm voor element 21. De dynamische uitbuiging is iets groter, namelijk 48 cm; zie *Afbeelding A6*. Uit de belasting, die tijdens de aanrijding op de ankerbouten wordt uitgeoefend, blijkt dat de begin- en eindverankeringen een aandeel hebben in het omleiden van de personenauto (*Afbeelding A7*).

Het voertuig wordt in korte tijd omgeleid. De eigenlijke botsing duurt ongeveer 0,5 seconde. Bij het verlaten van de constructie heeft het voertuig een rollhoek van circa 12 graden, die daarna snel kleiner wordt, zie *Afbeelding A2*. De uitrijhoek bedraagt circa 3 graden, gemeten op de snelheid. Het voertuig heeft een hoek van circa 3 graden. Na het verlaten van de barrier vertoont de personenauto enige slip. De uitrij snelheid bedraagt ongeveer 92 km/uur (*Afbeelding A3*). De ASI-waarde bedraagt 0,74 (*Afbeelding A4*).

De belasting op de koppelingen in de botszone is weergegeven in *Afbeelding A5*. De koppeling tussen elementen 20 en 21 wordt het zwaarste belast, de maximale dwarskracht bedraagt ongeveer 62 kN. De maximale langskracht is kleiner, te weten ongeveer 29 kN en het buigmoment om de z-as bedraagt maximaal circa 135 kNm. Zowel de krachten als de momenten blijven ver onder de ingevoerde waarden van de tabel in § 3.1.2.

De maximale krachten in de ankerbouten van element 12 zijn; $F_x = 5$ kN, $F_y = 4,5$ kN en $F_z = 8$ kN (*Afbeelding A7*). De maximale krachten in de ankerbouten van element 36 blijven beperkt tot maximaal 2,5 kN. De ankerbouten worden nauwelijks belast, de optredende krachten komen niet boven de wrijvingskrachten uit.

4.2. Simulatie met 10 tons vrachtauto, uiteinden verankerd

De afbeeldingen van de simulatie zijn ondergebracht in *Bijlage 2B* (*Afbeeldingen B1 t/m B7*).

Uit de simulatie blijkt dat de RWS-barrier deze als zwaar aan te merken aanrijding goed doorstaat. De blijvende uitbuiging is 266 cm van element 22. De dynamische uitbuiging is iets groter, namelijk 268 cm; zie *Afbeelding B5*. Uit de belasting, die tijdens de aanrijding op de ankerbouten wordt uitgeoefend, blijkt dat de begin- en eindverankeringen een wezenlijk aandeel hebben in het omleiden van de vrachtauto (*Afbeelding B6 en B7*).

Het voertuig wordt geleidelijk omgeleid. De optredende roll- en pitchhoeken blijven klein, niet groter dan circa 2 graden, zie *Afbeelding B2*. De uitrijhoek bedraagt circa 3 graden, gemeten op de snelheid.

Het voertuig heeft ook een hoek van circa 3 graden. De uitrijnsnelheid bedraagt ongeveer 60 km/uur (*Afbeelding B3*).

De belasting op de koppelingen in de botszone is weergegeven in *Afbeelding B4*. De koppeling tussen elementen 20, 21 en 21, 22 worden het zwaarste belast, de maximale dwarskracht blijft beperkt tot circa 60 kN. De maximale langskracht is groter, namelijk circa 125 kN en het buigmoment om de z-as bedraagt maximaal circa 220 kNm.

Uit *Afbeelding B5* blijkt, dat het zogenaamde 'rear end'-effect grote invloed heeft op de grootte van de uitbuiging. Tijdens de primaire botsing (voorkant vrachtauto) wordt de uitbuiging ongeveer 90 cm. Tijdens de secundaire botsing het 'rear end'-effect (achterkant vrachtauto) wordt de uitbuiging veel groter, te weten ongeveer 268 cm.

De maximale krachten in de ankerbouten van element 12 zijn; $F_x = 10$ kN, $F_y = 14$ kN en $F_z = 25$ kN. De maximale krachten in de ankerbouten van element 36 zijn; $F_x = 10$ kN, $F_y = 10$ kN en $F_z = 8$ kN (*Afbeeldingen B6 en B7*).

Uit deze ankerboutbelastingen blijkt, dat de kracht in langsrichting het niveau van de wrijvingskracht haalt. Zowel in dwarsrichting als in verticale richting blijven de krachten onder de maximaal toelaatbare kracht.

4.3. Simulatie met 30 tons vrachtauto, uiteinden verankerd

De afbeeldingen van de simulatie zijn ondergebracht in *Bijlage 2C* (*Afbeeldingen C1 t/m C7*).

Uit de simulatie blijkt dat de RWS-barrier deze als zwaar aan te merken aanrijding goed doorstaat. De blijvende uitbuiging van element 28 is 314 cm. De dynamische uitbuiging is iets groter, namelijk 325 cm; zie *Afbeelding C5*. Uit de belasting die tijdens de aanrijding op de ankerbouten wordt uitgeoefend, blijkt dat de begin- en eindverankerungen een wezenlijk aandeel hebben in het omleiden van de vrachtauto (*Afbeelding C6 en C7*).

Het voertuig wordt geleidelijk omgeleid. De optredende roll- en pitch-hoeken blijven klein, niet groter dan circa 1 graad; zie *Afbeelding C2*. De uitrijhoek bedraagt ongeveer 6 graden, gemeten op de snelheid. Het voertuig heeft een hoek van ongeveer 5 graden. De uitrijnsnelheid bedraagt ongeveer 55 km/uur (*Afbeelding C3*).

De belasting op de koppelingen in de botszone is weergegeven in *Afbeelding C4*. De koppeling tussen elementen 21 t/m 25 worden het zwaarste belast; de maximale dwarskracht bedraagt circa 20 kN. De maximale langskracht is groter, namelijk 150 kN en het buigmoment om de z-as bedraagt maximaal circa 200 kNm.

De maximale krachten in de ankerbouten van element 12 zijn; $F_x = 16$ kN, $F_y = 5$ kN en $F_z = 11$ kN. De maximale krachten in de ankerbouten van element 36 zijn; $F_x = 10$ kN, $F_y = 38$ kN en $F_z = 34$ kN (*Afbeeldingen C6 en C7*).

Uit deze ankerboutbelastingen blijkt, dat de kracht in langsrichting het niveau van de wrijvingskracht haalt. Zowel in dwarsrichting als in verticale richting blijven de krachten onder de maximaal toelaatbare kracht.

4.4. Simulatie 30 tons vrachtauto, op eindverankering

Uit de voorgaande drie simulaties blijkt, dat de RWS-barrier met begin- en eindverankering de aanrijding met goed gevolg kan doorstaan. De aanrijdingen vinden echter wel plaats op het meest ideale punt, namelijk op één derde van de totale lengte van de constructie. Een aanrijding veel dicht bij de eindverankering zal naar verwachting veel zwaarder uitvallen.

De afbeeldingen van de simulatie zijn ondergebracht in *Bijlage 2D* (*Afbeeldingen D1 t/m D7*).

Uit de simulatie blijkt dat, wanneer de aanrijding te dicht op de verankering (in dit geval de eindverankering) plaatsvindt, er breuk optreedt in de verankering (*Afbeelding D1*). De aanrijding vindt ongeveer 50 meter voor de eindverankering plaats. In eerste instantie verloopt de aanrijding goed. De 30 tons vrachtauto wordt geleidelijk omgeleid en de barrier buigt vloeiend uit. Wanneer de vrachtauto dicht bij de verankering komt, krijgt de uitbuiging een steeds toenemende asymmetrische vorm. De eerste verankering en de koppeling tussen dit element en het daarop volgende element wordt in steeds toenemende mate belast en uiteindelijk overbelast. Zowel de koppeling als de verankering breken; zie *Afbeeldingen D4* en *D5*.

Het voertuig wordt geleidelijk omgeleid. De optredende roll- en pitchhoeken blijven klein, niet groter dan circa 1 graad; zie *Afbeelding D2*. Op het moment van breken van de barrier heeft de vrachtauto geen zijdelingse beweging meer. De voorwaartse snelheid bedraagt ongeveer 60 km/uur (*Afbeelding D3*).

4.5. Simulatie 30 tons vrachtauto, elk element verankerd.

Omdat op het testterrein van de RDW de hier voor gesimuleerde aanrijding kunnen plaatsvinden, wordt ook een simulatie gedaan op de RWS-barrier, waarvan elk element is verankerd.

De afbeeldingen van de simulatie zijn ondergebracht in *Bijlage 2E* (*Afbeeldingen E1 t/m E8*).

Uit de simulatie blijkt dat de RWS-barrier met elk element verankerd deze als zwaar aan te merken aanrijding goed doorstaat. De blijvende uitbuiging is 3 cm van element 21. De dynamische uitbuiging is iets groter, te weten 7 cm; zie *Afbeelding E5*.

Het voertuig wordt in korte tijd omgeleid. De eigenlijke botsing duurt ongeveer 0,5 seconde. De optredende roll- en pitchhoeken blijven klein, de maximale rollhoek wordt niet groter dan circa 6 graden; zie *Afbeelding E2*. De uitrijhoek bedraagt circa 4 graden, gemeten op de snelheid. Het voertuig heeft een hoek van circa 2 graden. De uitrijnsnelheid bedraagt ongeveer 71 km/uur (*Afbeelding E3*).

De belasting op de koppelingen in de botszone is weergegeven in *Afbeelding E4*. De koppeling tussen elementen 20 en 21 wordt het zwaarste belast. De maximale dwarskracht bedraagt circa 280 kN. De maximale langskracht is kleiner, namelijk 60 kN en het buigmoment om de z-as bedraagt maximaal circa 175 kNm.

De maximale krachten in de ankerbouten van element 19 zijn; $F_x = 10$ kN, $F_y = 15$ kN en $F_z = 53$ kN. De maximale krachten in de ankerbouten van element 20 zijn; $F_x = 10$ kN, $F_y = 60$ kN en $F_z = 110$ kN. De maximale krachten in de ankerbouten van element 21 zijn; $F_x = 10$ kN, $F_y = 60$ kN en $F_z = 110$ kN (*Afbeeldingen E6, E7 en E8*).

Uit deze ankerboutbelastingen blijkt, dat de kracht in langsrichting het niveau van de wrijvingskracht haalt. In dwarsrichting blijft de kracht onder de maximaal toelaatbare kracht en in verticale richting wordt de maximaal toelaatbare kracht gehaald.

5. Conclusies en aanbevelingen

De Bouwdienst van Rijkswaterstaat heeft aanbevolen om op een bepaald traject van de testbaan van de Rijksdienst voor het Wegverkeer (nabij Lelystad) de stalen RWS-barrier als afschermvoorziening toe te passen. Het af te schermen baanvak is ongeveer 170 meter lang.

Voor de simulatielengte van de RWS-barrier is 174 meter genomen: 29 elementen van 6 meter. De eerste drie elementen en de laatste drie elementen zijn aan het wegdek verankerd door middel van vier ankerbouten M 24 per element.

De simulaties worden uitgevoerd met een personenauto en twee vrachtauto's, één van 10 ton en één van 30 ton.

Bij de aanrijding met de personenauto reageert de RWS-barrier als een stijve constructie op de personenauto. De aanrijding verloopt rustig en de uitbuiging van de barrier heeft een vloeiend verloop. De uitbuiging wordt niet groter dan ongeveer 48 cm. De bewegingen van de personenauto zijn niet overdreven heftig. De ASI-waarde blijft beperkt tot 0,74.

Bij de aanrijdingen met de vrachtauto's blijkt duidelijk dat de eindverankeringen een wezenlijk aandeel hebben in het omleiden van de voertuigen. De vrachtauto's worden geleidelijk omgeleid en de uitbuigingen hebben een vloeiend verloop. Voor de 10 tons vrachtauto bedraagt de uitbuiging ongeveer 268 cm en voor de 30 tons vrachtauto ongeveer 325 cm.

Noch de belastingen in de koppelingen, noch de belasting op de ankerbouten geven aanleiding om te veronderstellen dat er overbelasting is opgetreden.

Uit de drie simulaties kan geconcludeerd worden dat de RWS-barrier, met begin- en eindverankering, dergelijke aanrijdingen goed zal doorstaan. De plaats van aanrijden in de simulaties is echter de meest ideale plaats; er blijft voldoende barrierlengte over om de voertuigen om te leiden. Een aanrijding dichterbij de eindverankering leidt tot een veel kritischer situatie.

Bij de aanrijding met de 30 tons vrachtauto op ongeveer 50 meter voor de eindverankering blijkt dat de barrier en de verankering niet sterk genoeg zijn om een dergelijke aanrijding met goed gevolg te doorstaan. De eerste verankering van de drie verankeringen van de eindverankering, evenals de daarop volgende koppeling, breken. Door de steeds verder oplopende belasting in de eindverankering krijgt de uitbuiging ook een asymmetrische vorm.

Uit deze simulatie blijkt tevens, dat het laatste deel van de 174 meter lange barrier niet effectief is. Hoe lang deze lengte is, is niet uit een enkele simulatie af te leiden. Voor de beginverankering geldt voor een deel hetzelfde. Deze lengte zal kleiner zijn, omdat de aanrijding van de beginverankering af is. De te plaatsen barrier moet dus veel langer zijn, om effectief de 174 meter te kunnen afschermen.

Uit de aanrijding met de 30 tons vrachtauto op de RWS-barrier (waarbij elk element is verankerd) blijkt, dat het effectieve werkingslengte van de

barrier veel groter wordt. De barrier krijgt een star karakter en de invloed van de aanrijding op de opvolgende elementen neemt snel af. De uitbuiging bedraagt slechts ongeveer 7 cm. Ook hier geldt, dat de barrier langer zou moeten zijn dan 174 meter.

Voor plaatsing van de RWS-barrier beveelt de SWOV aan, om elk element te verankeren.

Hierbij moet nog altijd rekening worden gehouden met het feit, dat begin en eind van de barrier niet aan de gestelde criteria zullen voldoen.

Literatuur

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

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

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

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

Pol, W.H.M. van (1996). *Verificatie-onderzoek simulatieresultaten RWS-Barrier.* SWOV, Leidschendam. (nog te verschijnen).

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

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

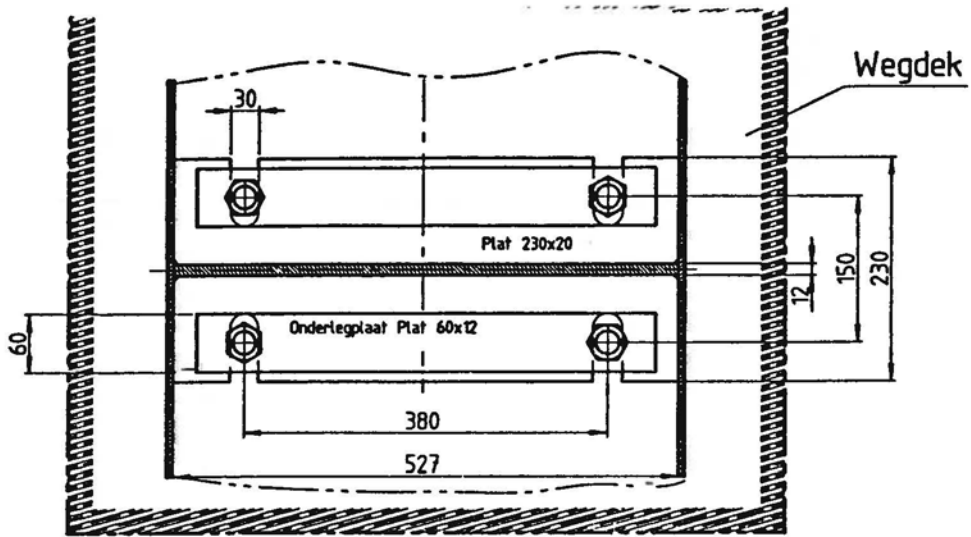
Bijlage 1 t/m 3

1. *Afbeeldingen 1 t/m 4*
- 2A. *Afbeeldingen A1 t/m A7*
- 2B. *Afbeeldingen B1 t/m B7*
- 2C. *Afbeeldingen C1 t/m C7*
- 2D. *Afbeeldingen D1 t/m D5*
- 2E. *Afbeeldingen E1 t/m E8*
3. *Korte beschrijving van de werking van het computerprogramma VEDYAC*

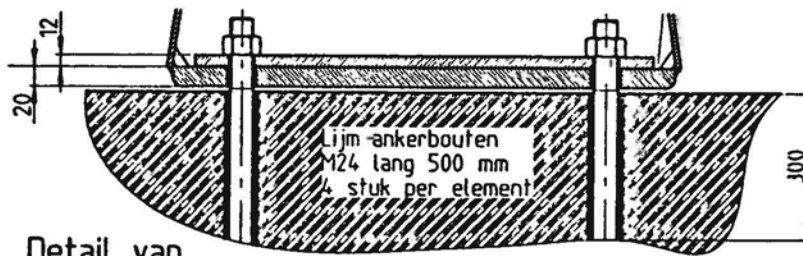
Bijlage 1

Afbeeldingen 1 t/m 4

1. *Overzicht van de RWS-barrier.*
2. *Overzicht van de verankering van de RWS-barrier.*
3. *Simulatieopstelling.*
4. *Overzicht plaats verankering.*



Doorsnede I-I



Detail van Verankering

Doorsnede B-B

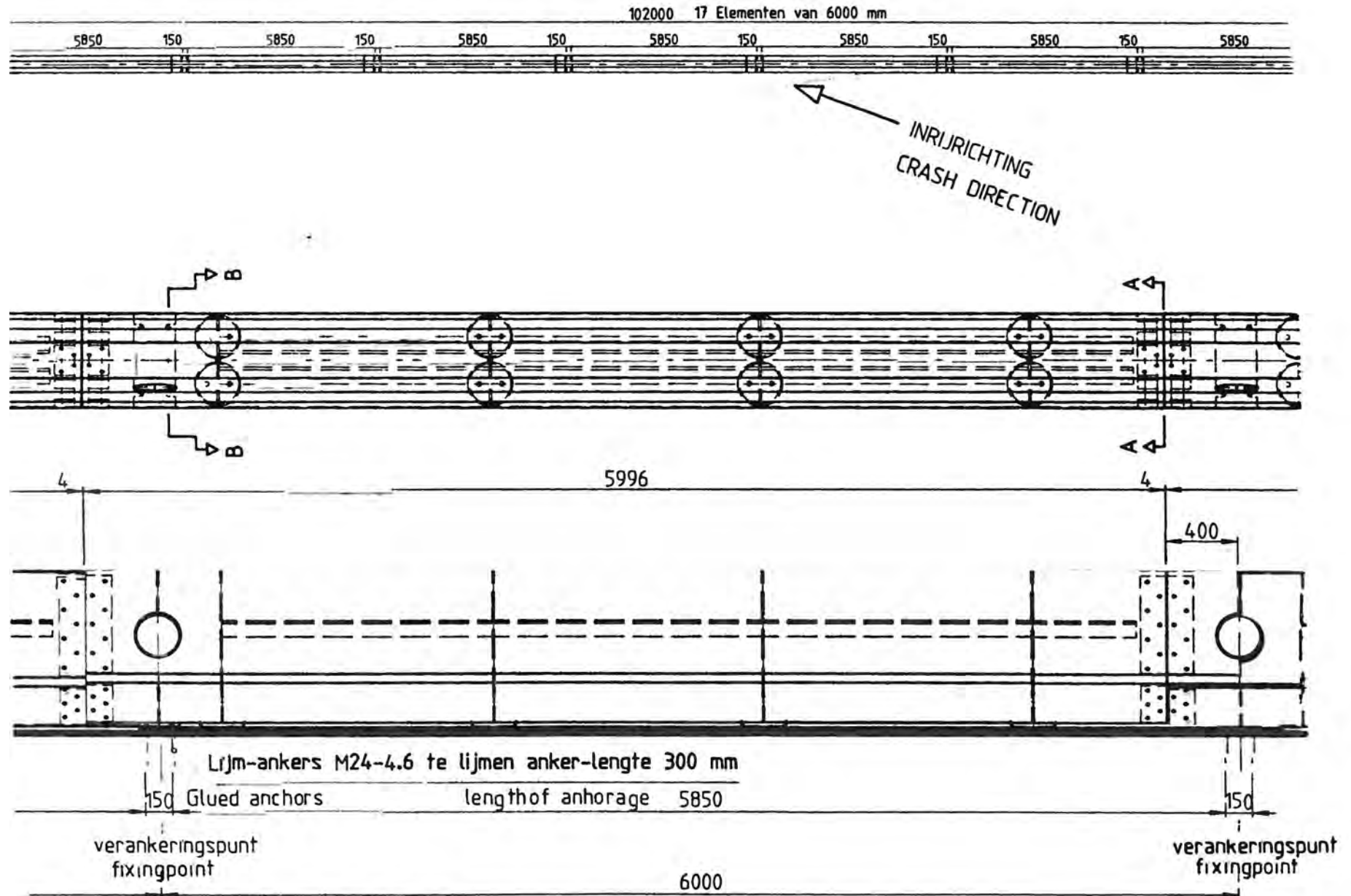
Afbeelding 2. Overzicht van de verankering van de RWS-barrier.



Afbeelding 3. Overzicht simulatieopstelling.

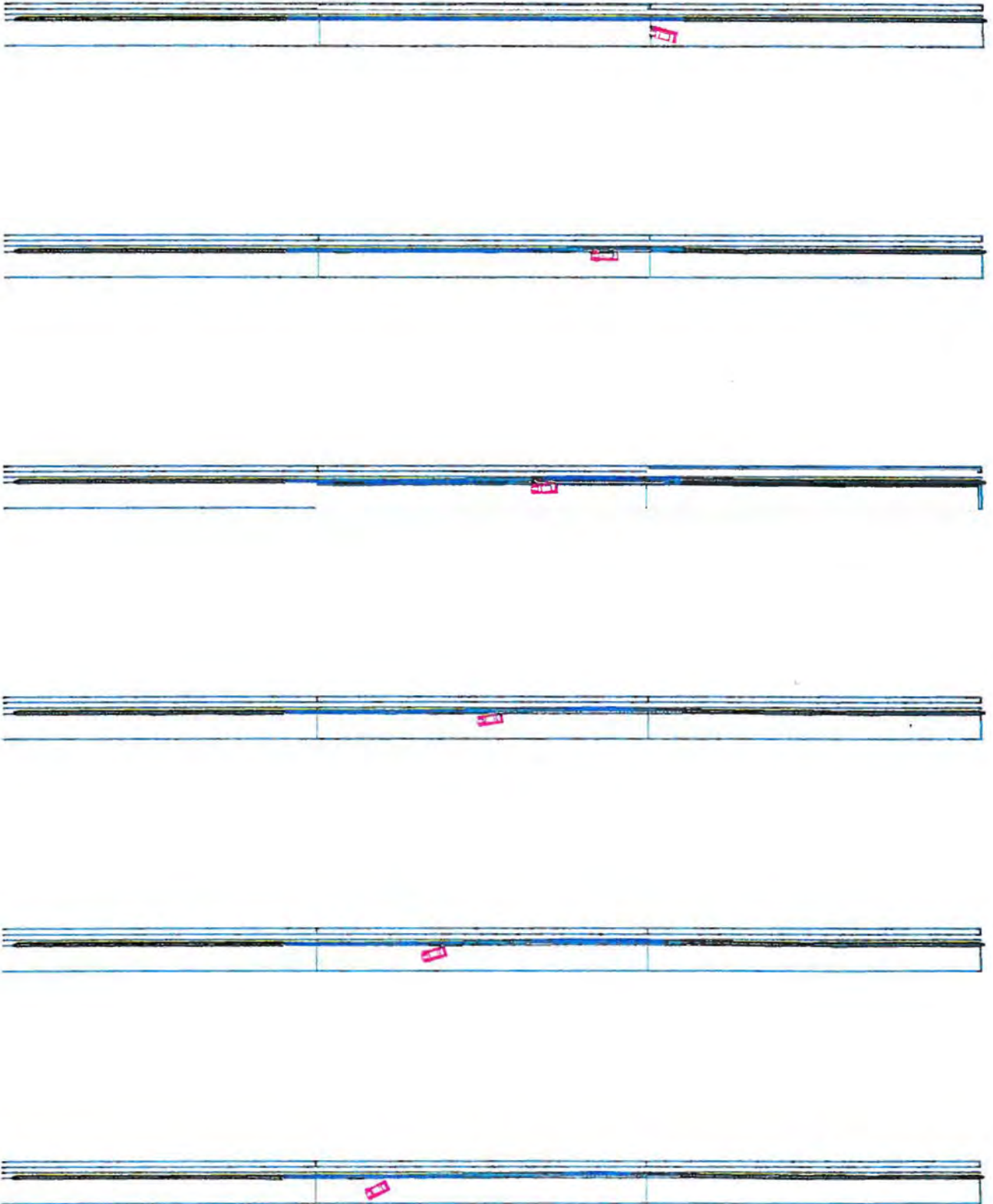
Afbeelding 4. Overzicht plaats verankering.

OVERZICHT TESTOPSTELLING

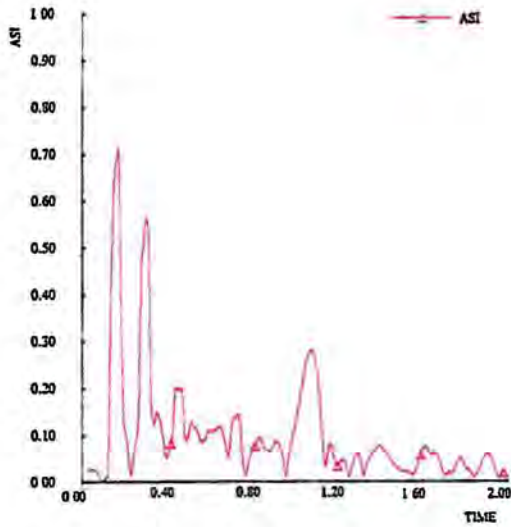
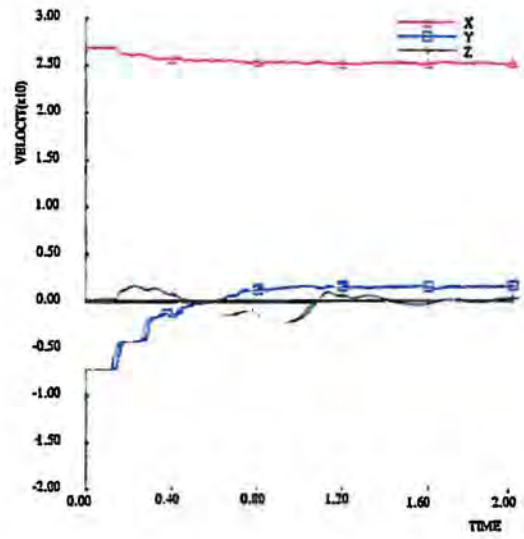
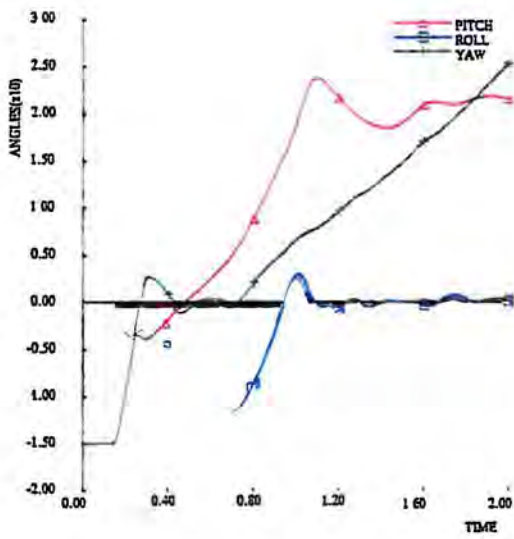


Simulatie met de personenauto tegen de RWS-barrier aan de uiteinden verankerd

- A1. Overzicht aanrijding met de personenauto tegen de RWS-barrier.
- A2. Verloop van de roll-, pitch- en yawhoek van de personenauto tegen de tijd tijdens de aanrijding tegen de RWS-barrier.
- A3. Verloop van de snelheid tegen de tijd tijdens de aanrijding met de personenauto tegen de RWS-barrier.
- A4. De ASI-waarde van het zwaartepunt voertuig tegen de tijd tijdens de aanrijding met de personenauto tegen de RWS-barrier.
- A5. Verloop van de krachten en momenten in de koppeling tussen de elementen 19/20, 20/21 en 21/22 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de personenauto tegen de RWS-barrier.
- A6. Verloop van de uitbuiging van de elementen 20, 21 en 22 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de personenauto tegen de RWS-barrier.
- A7. Verloop van de krachten in drie ankerbouten in de verankering van element 12 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de personenauto tegen de RWS-barrier.



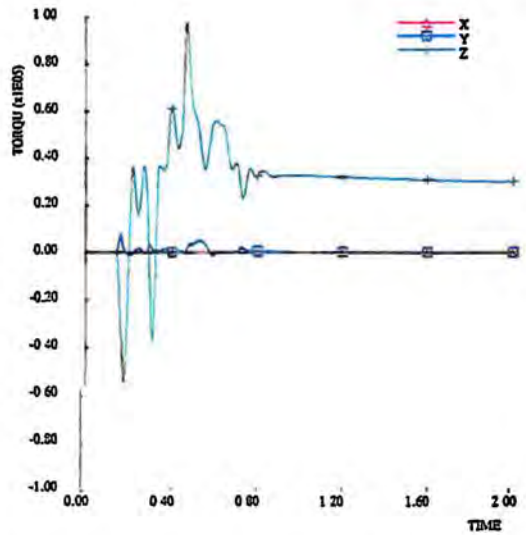
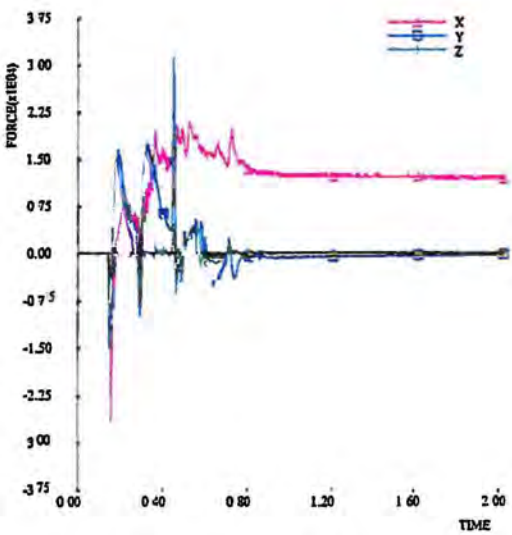
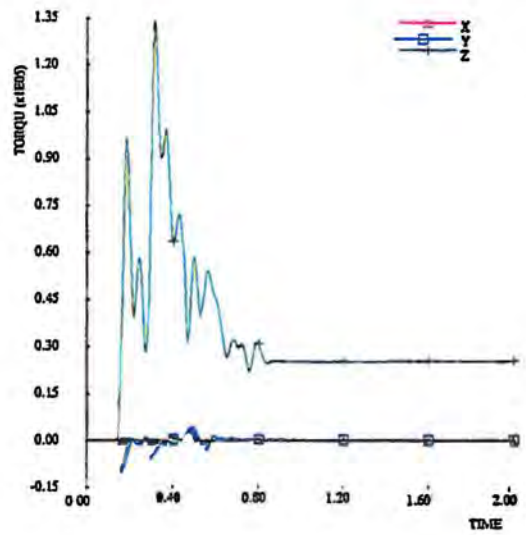
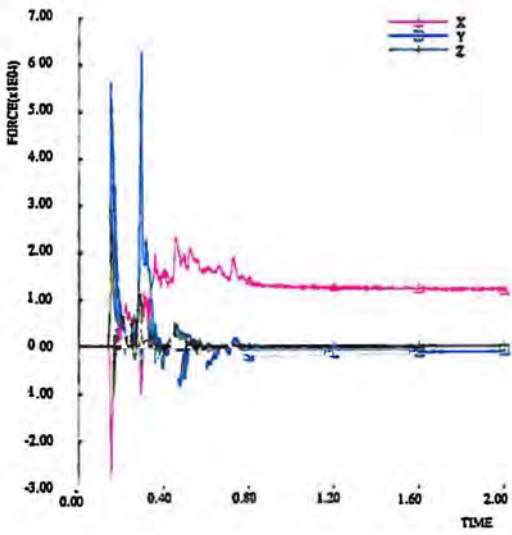
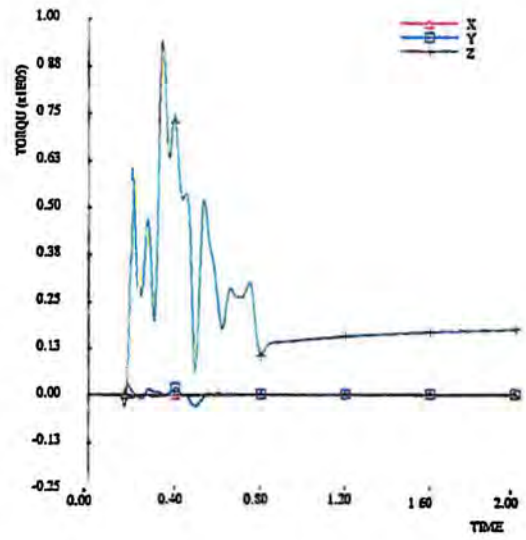
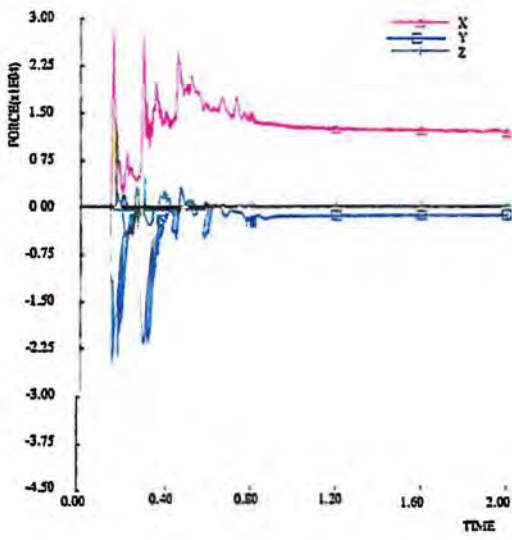
Afbeelding A1. *Overzicht aanrijding met de personenauto tegen de RWS-barrier.*



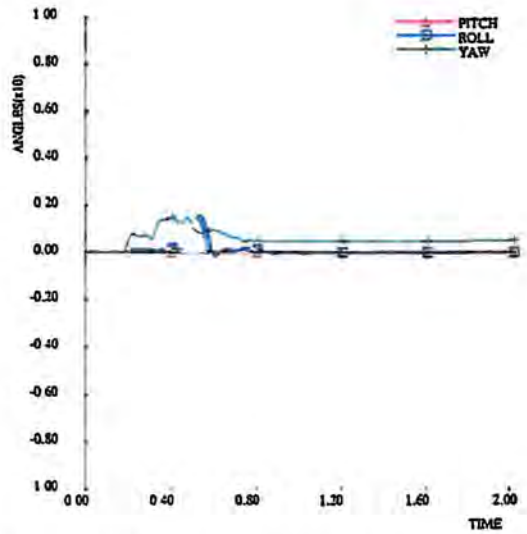
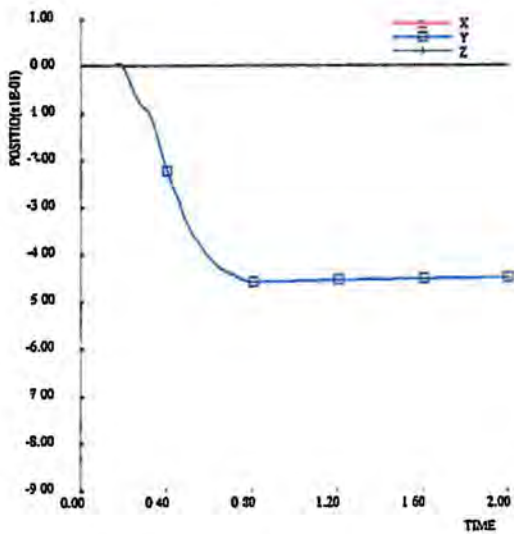
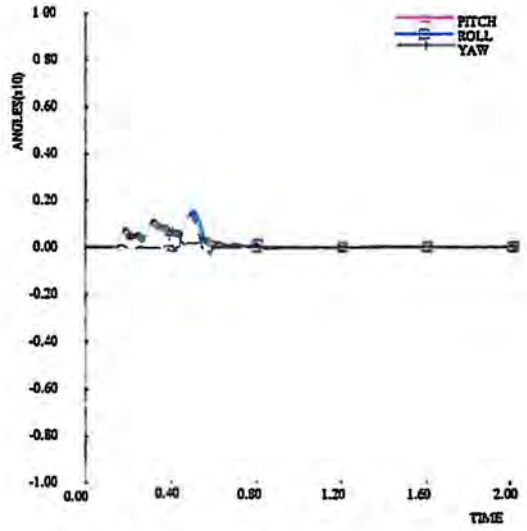
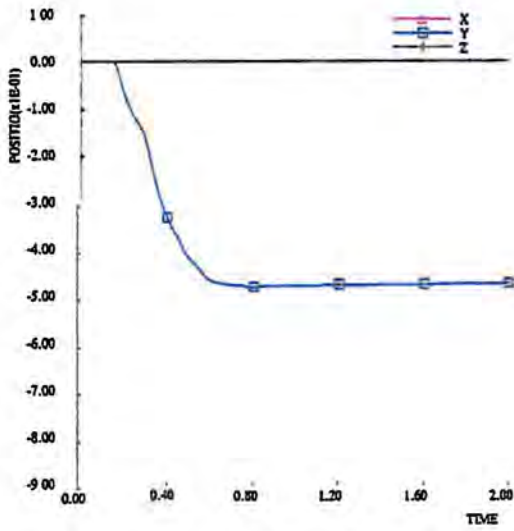
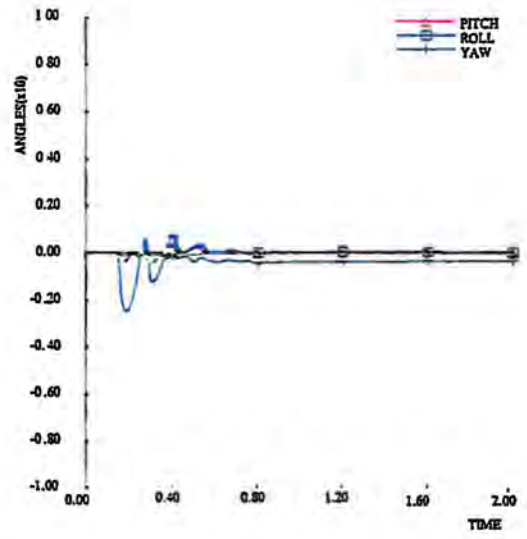
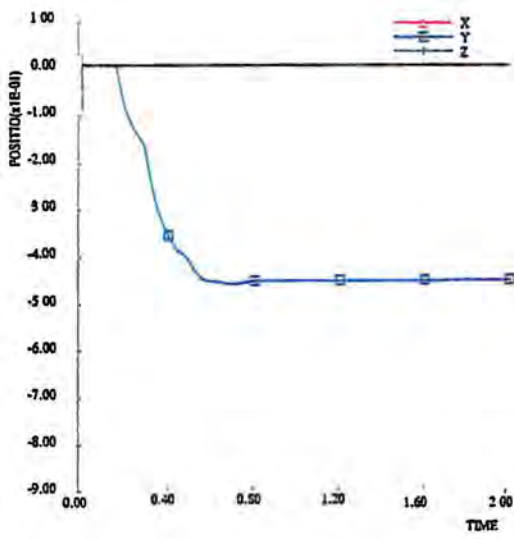
Afbeelding A2. Verloop van de roll-, pitch- en yawhoek van de personenauto tegen de tijd tijdens de aanrijding tegen de RWS-barrier.

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

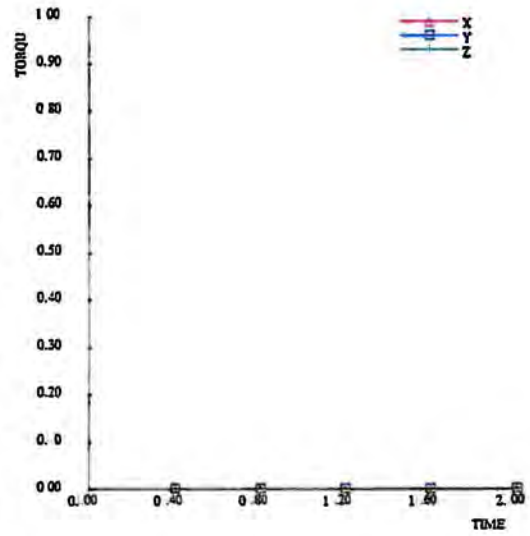
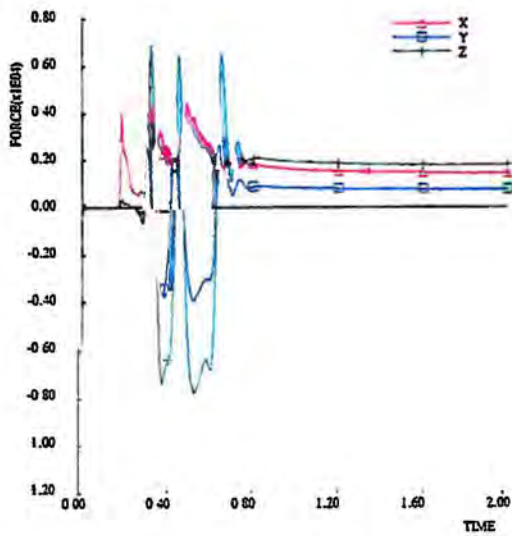
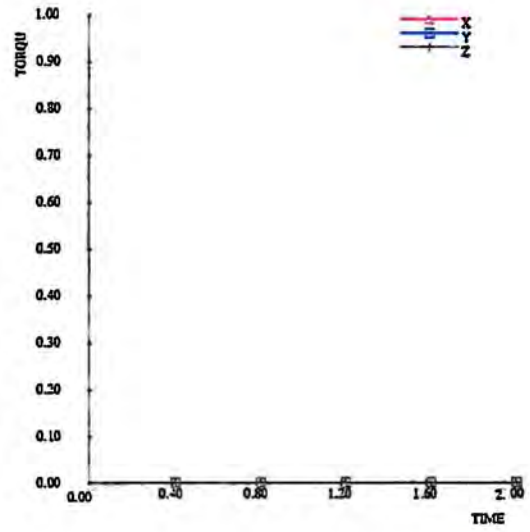
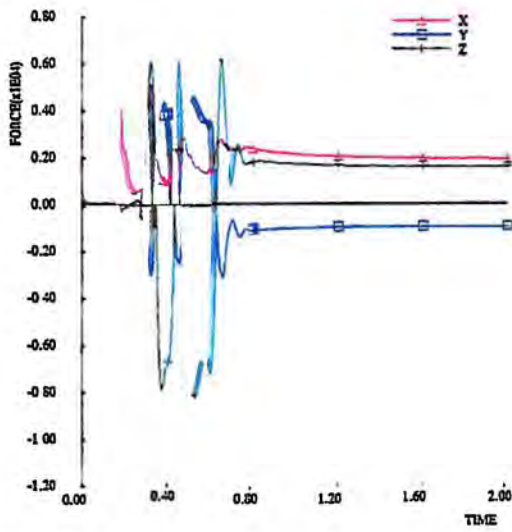
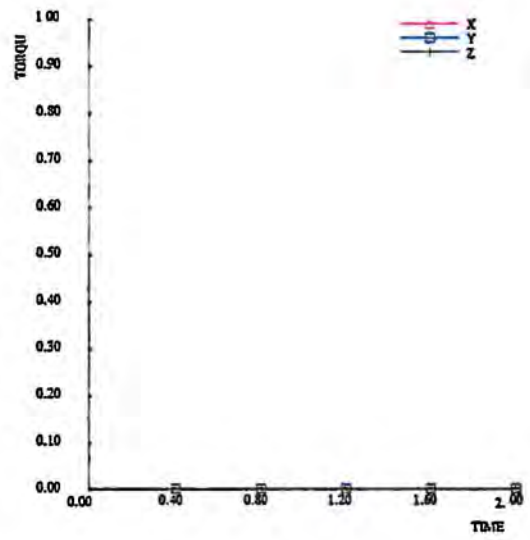
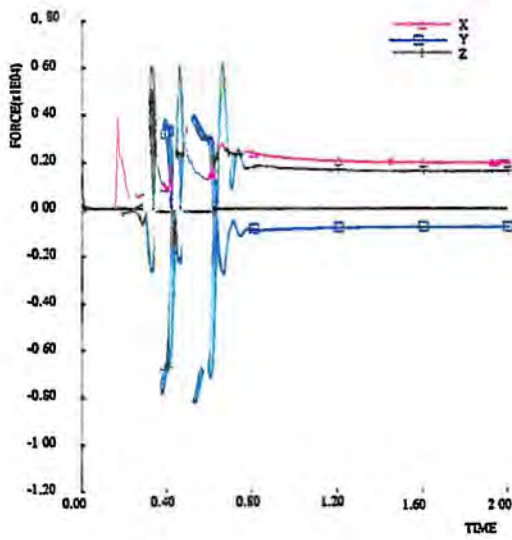
Afbeelding A4. De ASI waarde van het zwaartepunt personenauto tegen de tijd tijdens de aanrijding met de personenauto tegen de RWS-barrier.



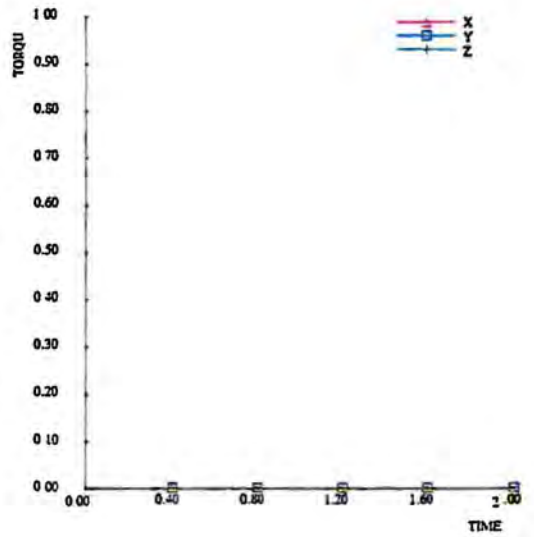
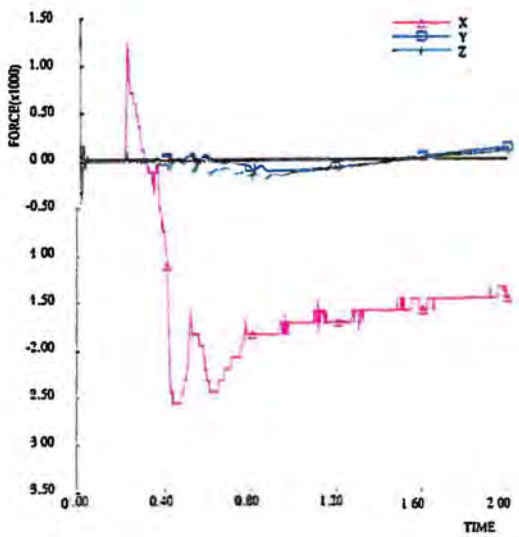
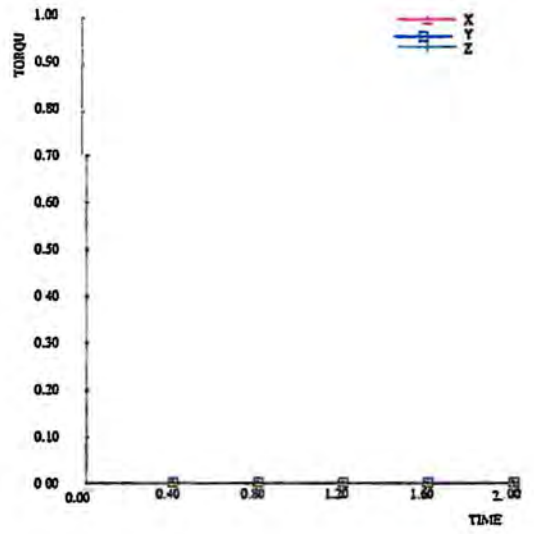
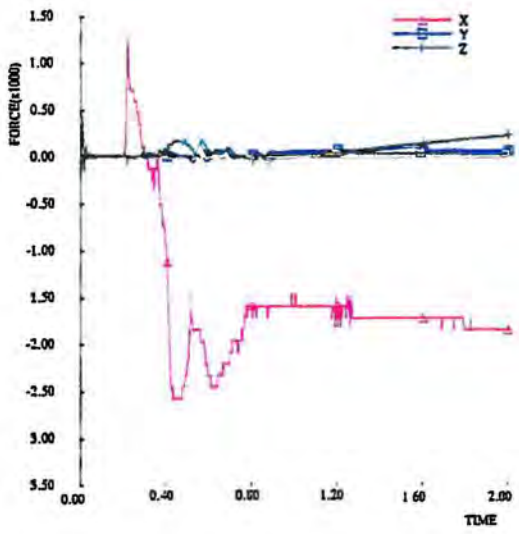
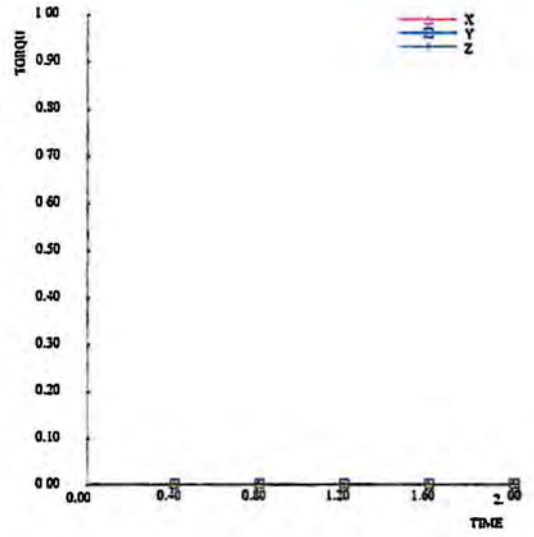
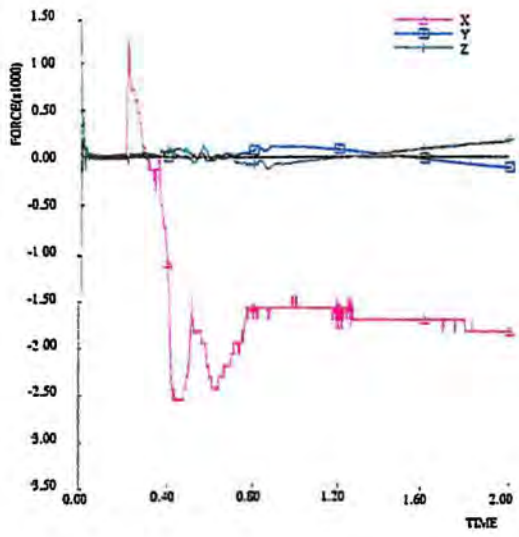
Afbeelding A5. Verloop van de krachten en momenten in de koppeling tussen de elementen 19/20, 20/21 en 21/22 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de personenauto tegen de RWS-barrier.



Afbeelding A6 . Verloop van de uitbuiging van de elementen 20, 21 en 22 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de personenauto tegen de RWS-barrier.

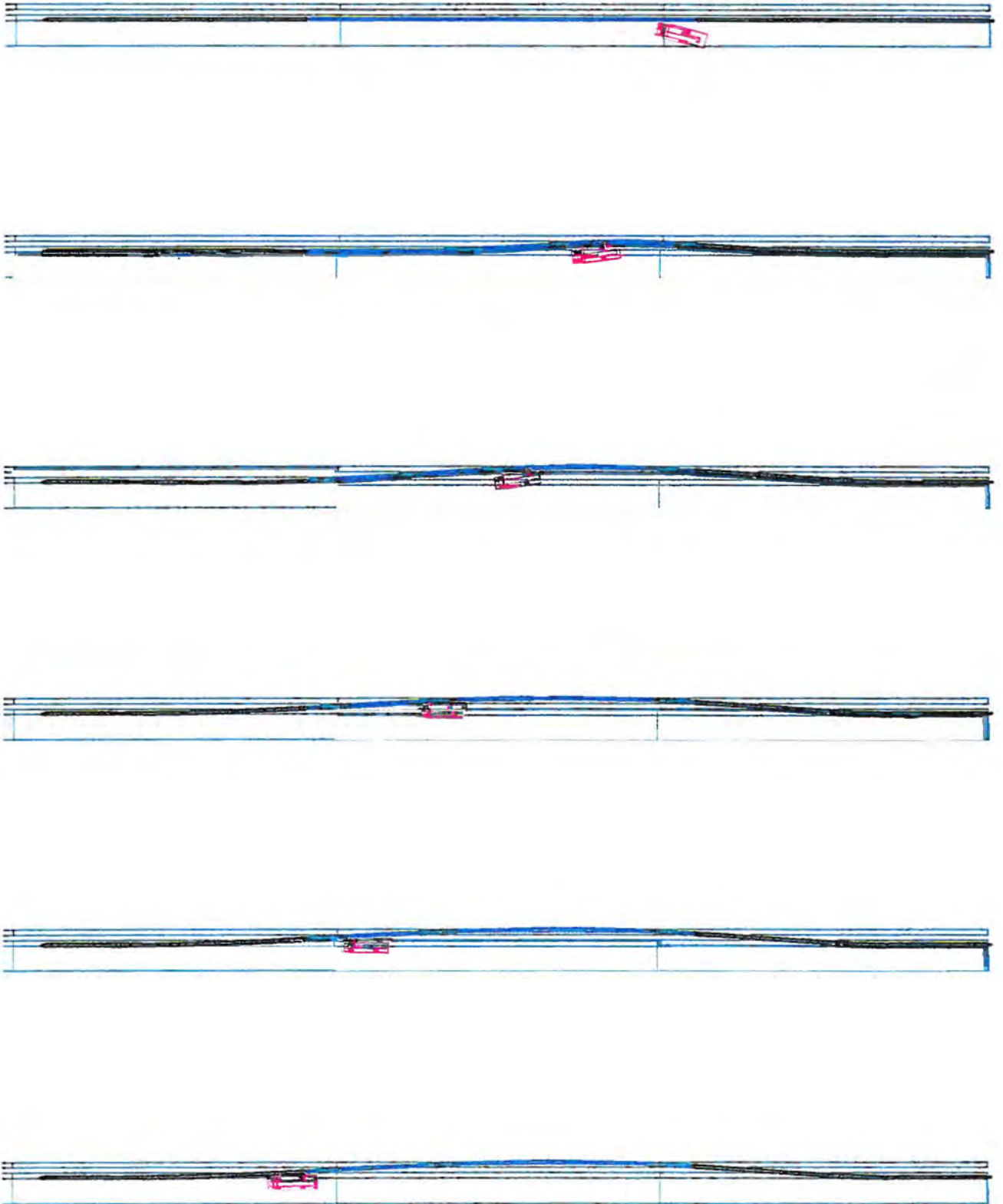


Afbeelding A7 . Verloop van de krachten in drie ankerbouten in de verankering van element 12 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de personenauto tegen de RWS-barrier.

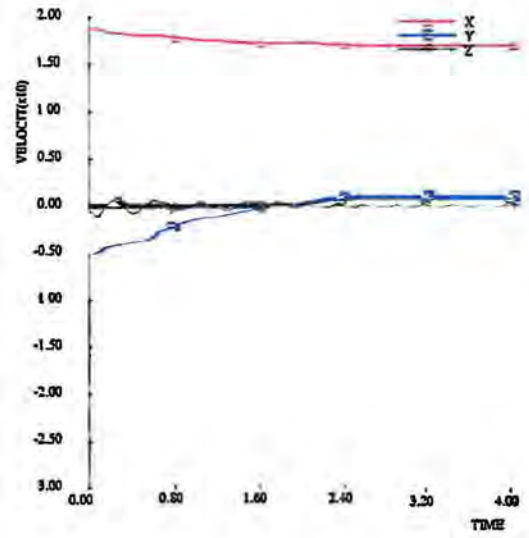
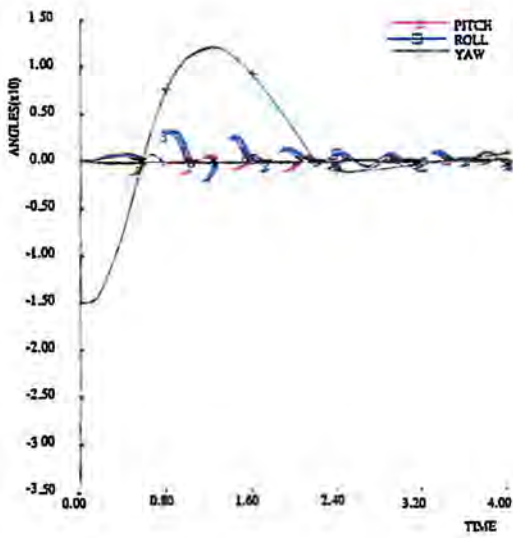


Simulatie met de 10 tons vrachtauto tegen RWS-barrier aan uiteinden verankerd.

- B1. Overzicht aanrijding met de 10 tons vrachtauto tegen de RWS-barrier.
- B2. Verloop van de roll-, pitch- en yawhoek van de 10 tons vrachtauto tegen de tijd tijdens de aanrijding tegen de RWS-barrier.
- B3. Verloop van de snelheid tegen de tijd tijdens de aanrijding met de 10 tons vrachtauto tegen de RWS-barrier.
- B4. Verloop van de krachten en momenten in de koppeling tussen de elementen 20/21, 21/22 en 22/23 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de 10 tons vrachtauto tegen de RWS-barrier.
- B5. Verloop van de uitbuiging van de elementen 21, 22 en 23 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de 10 tons vrachtauto tegen de RWS-barrier.
- B6. Verloop van de krachten in drie ankerbouten in de verankering van element 12 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de 10 tons vrachtauto tegen de RWS-barrier.
- B7. Verloop van de krachten in drie ankerbouten in de verankering van element 36 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de 10 tons vrachtauto tegen de RWS-barrier.

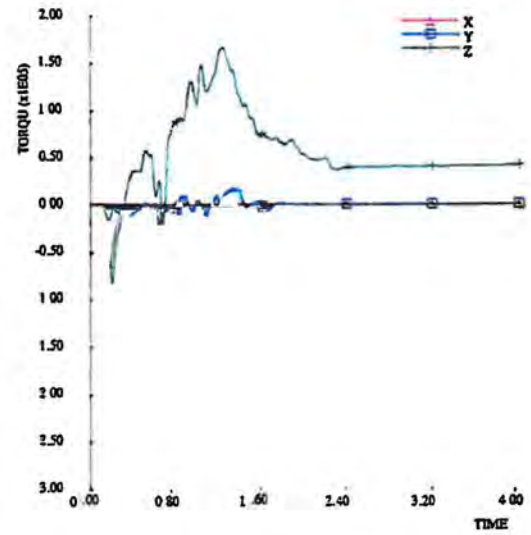
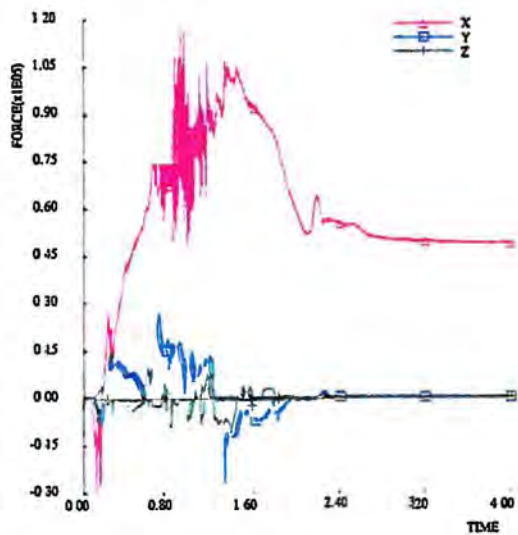
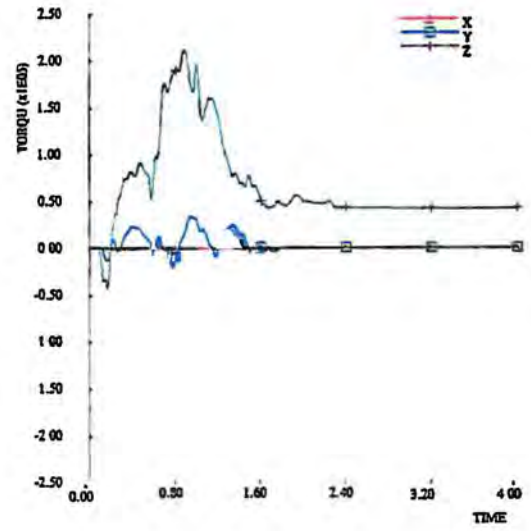
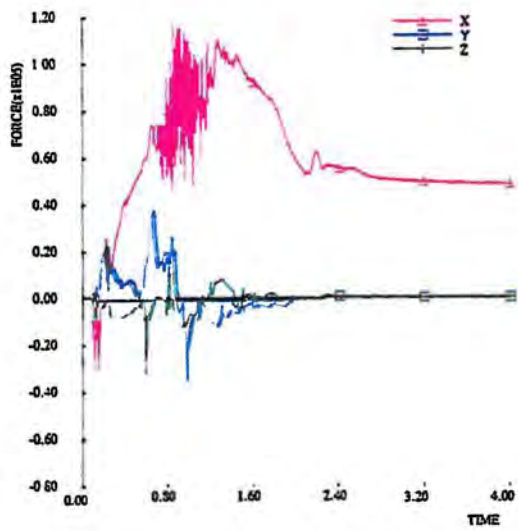
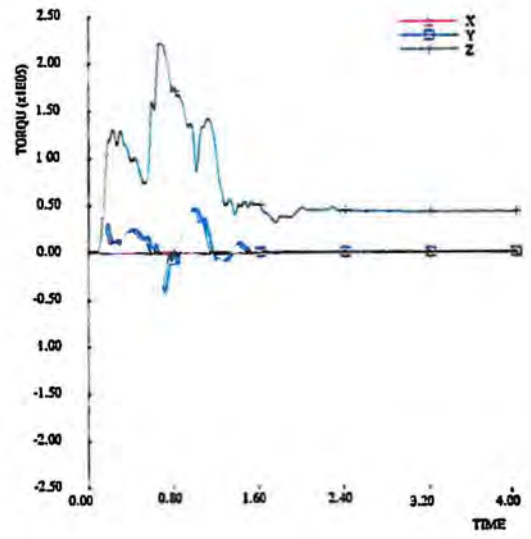
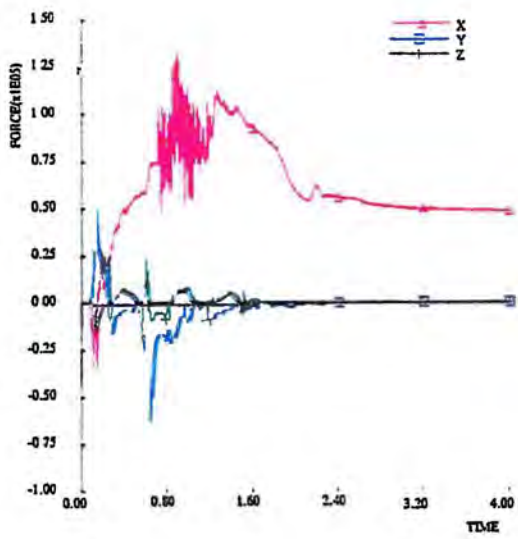


Afbeelding B1. *Overzicht aanrijding met de 10 tons vrachtauto tegen de RWS-barrier.*

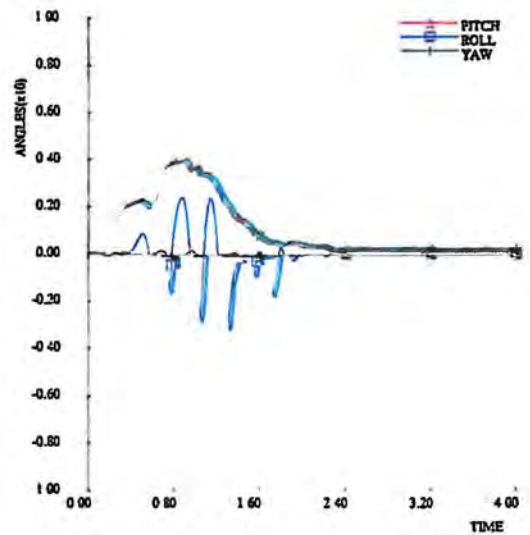
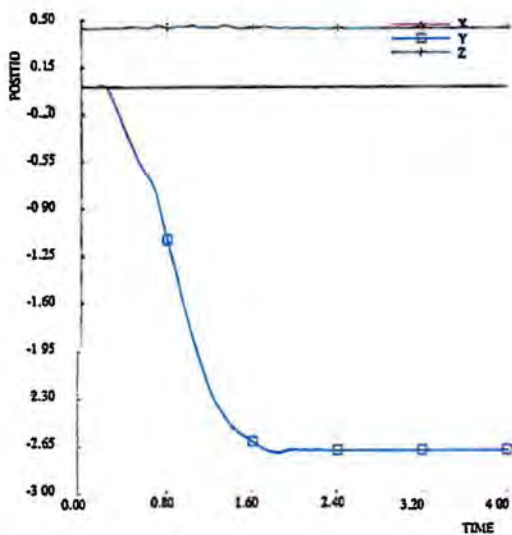
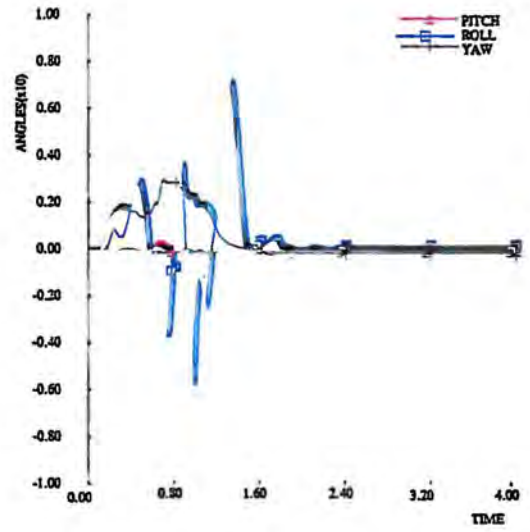
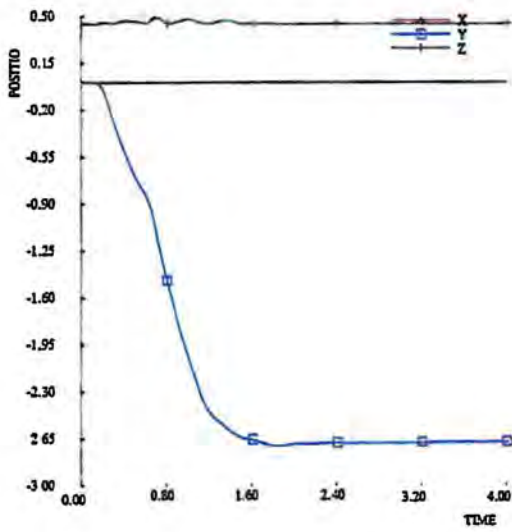
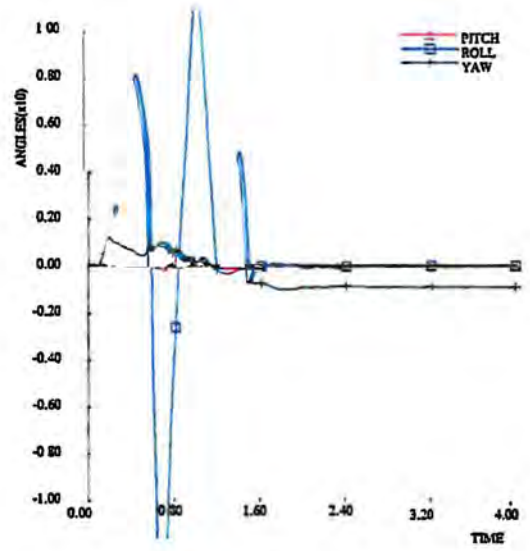
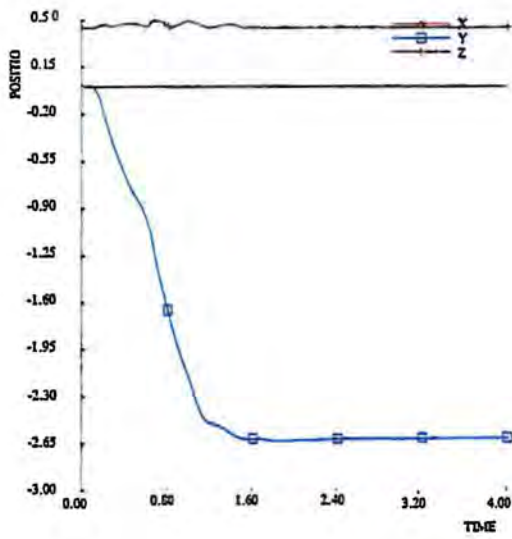


Afbeelding B2. Verloop van de roll-, pitch- en yawhoek van de 10 tons vrachtauto tegen de tijd tijdens de aanrijding tegen de RWS barrier.

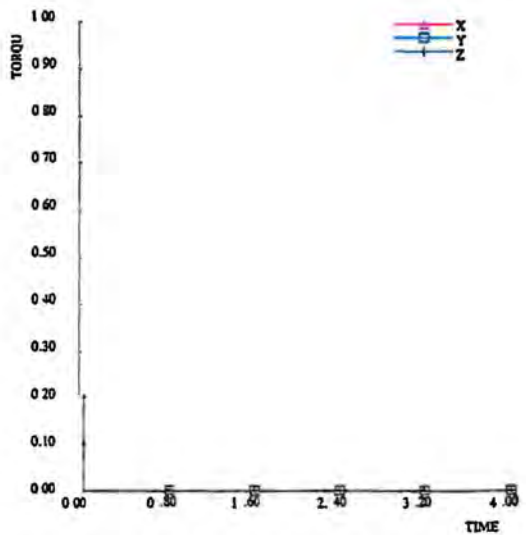
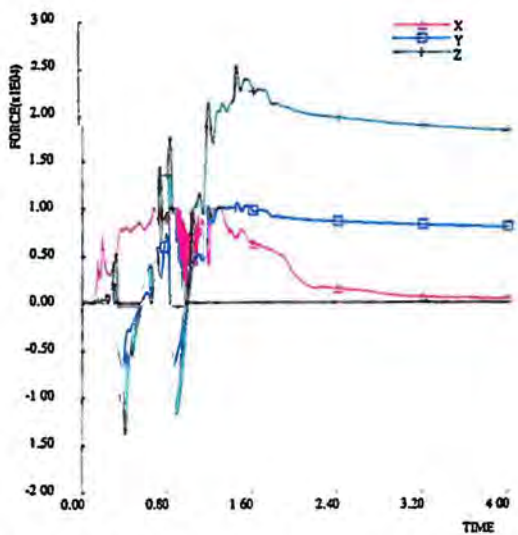
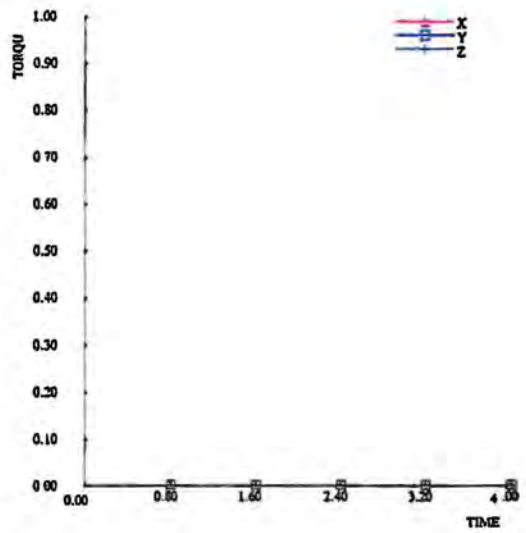
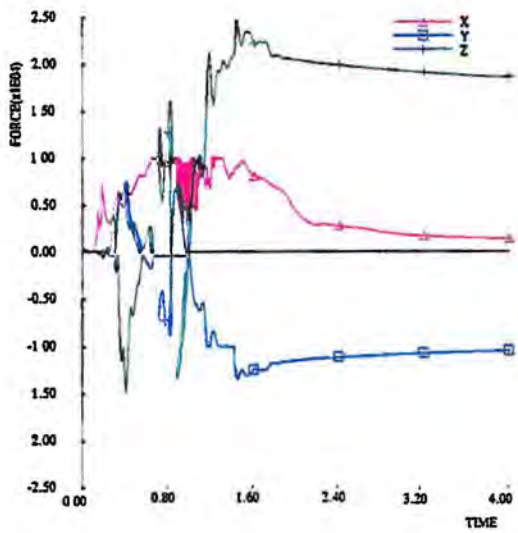
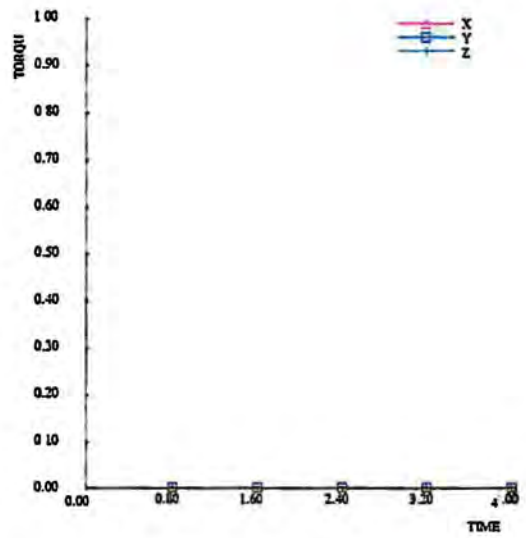
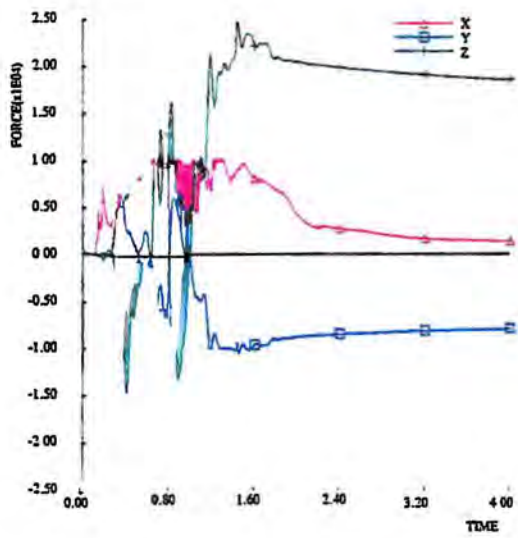
Afbeelding B3. Verloop van de snelheid tegen de tijd tijdens de aanrijding met de 10 tons vrachtauto tegen de RWS barrier.



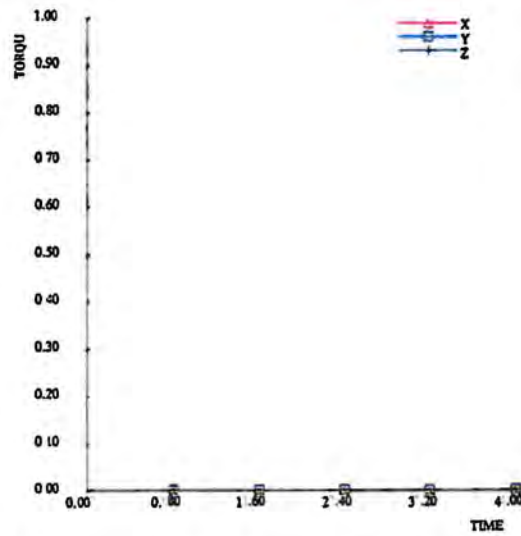
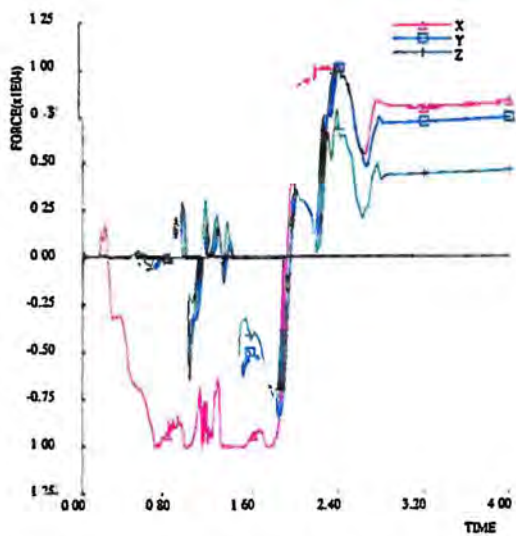
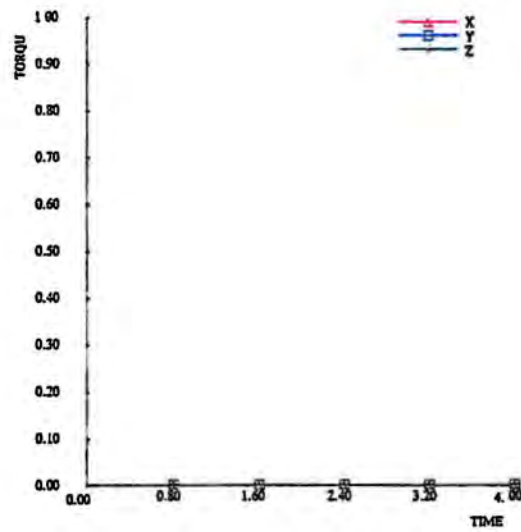
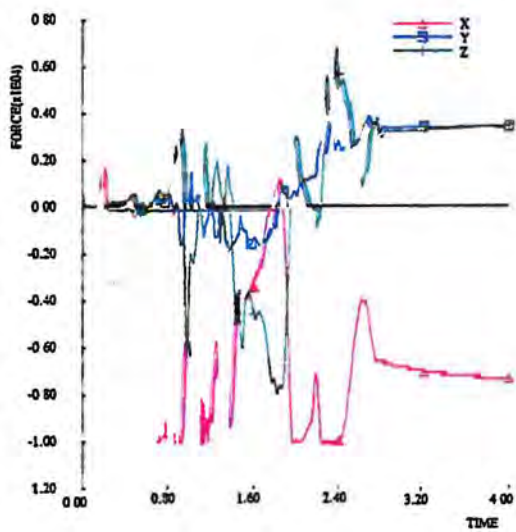
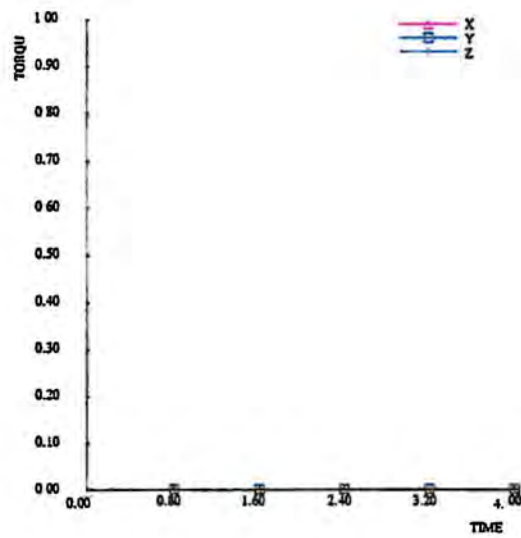
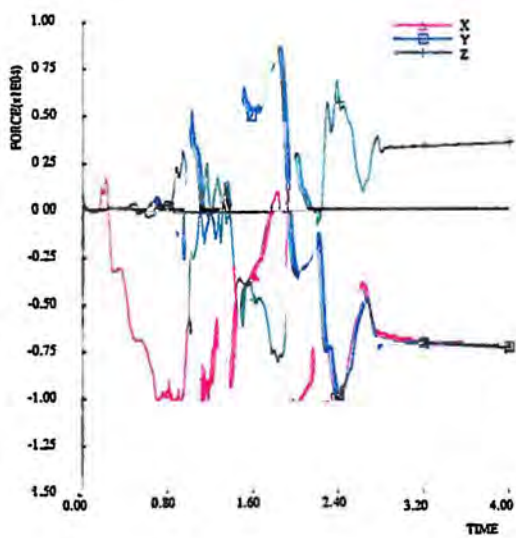
Afbeelding B4. Verloop van de krachten en momenten in de koppeling tussen de elementen 20/21, 21/22 en 22/23 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de 10 tons vrachtauto tegen de RWS-barrier.



Afbeelding B5 . Verloop van de uitbuiging van de elementen 21, 22 en 23 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de 10 tons vrachtauto tegen de RWS-barrier.



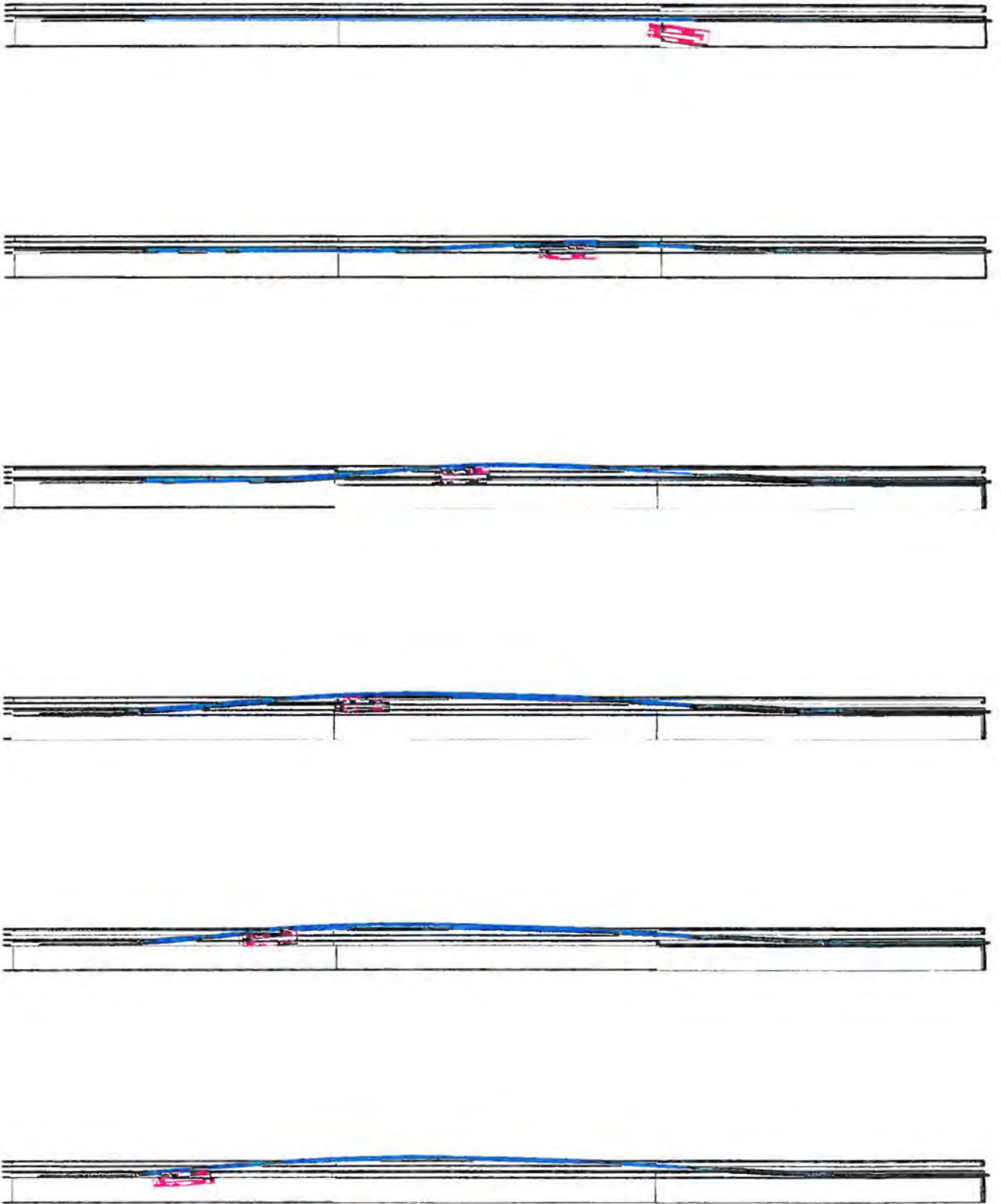
Afbeelding B6. Verloop van de krachten in drie ankerbouten in de verankering van element 12 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de 10 tons vrachtauto tegen de RWS-barrier.



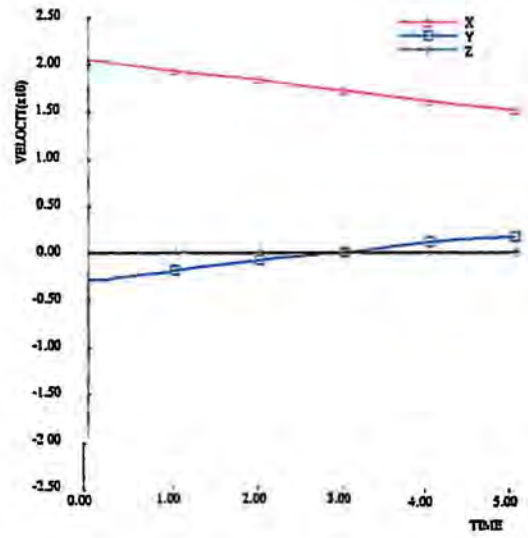
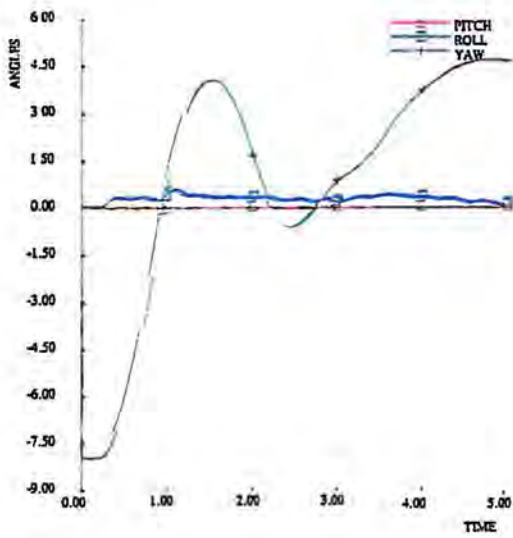
Afbeelding B7. Verloop van de krachten in drie ankerbouten in de verankering van element 36 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de 10 tons vrachtauto tegen de RWS barrier.

Simulatie met de 30 tons vrachtauto tegen RWS-barrier aan uiteinden verankerd.

- C1. Overzicht aanrijding met de 30 tons vrachtauto tegen de RWS-barrier.
- C2. Verloop van de roll-, pitch- en yawhoek van de 30 tons vrachtauto tegen de tijd tijdens de aanrijding tegen de RWS-barrier.
- C3. Verloop van de snelheid tegen de tijd tijdens de aanrijding met de 30 tons vrachtauto tegen de RWS-barrier.
- C4. Verloop van de krachten en momenten in de koppeling tussen de elementen 22/23, 23/24 en 24/25 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de 30 tons vrachtauto tegen de RWS-barrier.
- C5. Verloop van de uitbuiging van de elementen 26, 27 en 28 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de 30 tons vrachtauto tegen de RWS-barrier.
- C6. Verloop van de krachten in drie ankerbouten in de verankering van element 12 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de 30 tons vrachtauto tegen de RWS-barrier.
- C7. Verloop van de krachten in drie ankerbouten in de verankering van element 36 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de 30 tons vrachtauto tegen de RWS-barrier.

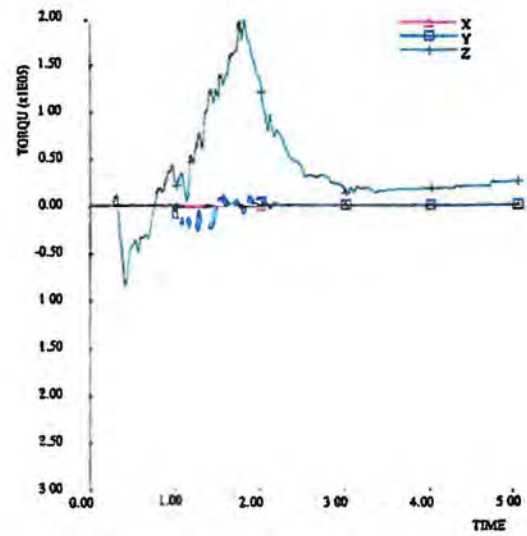
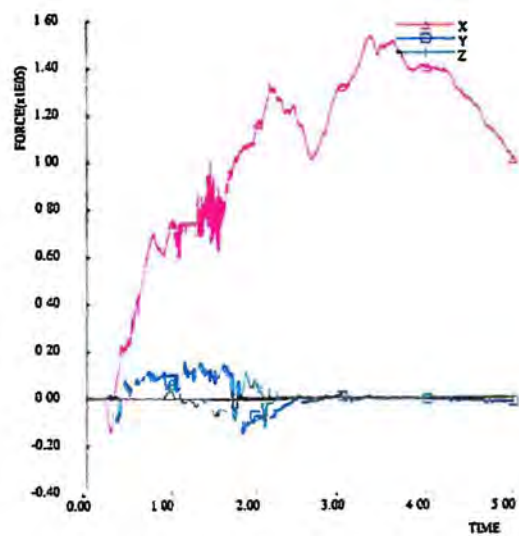
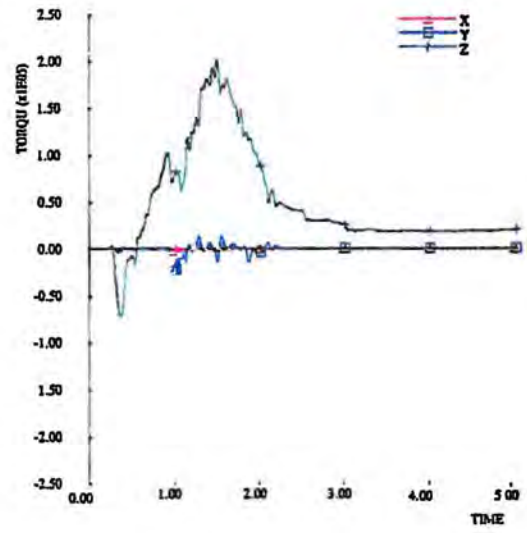
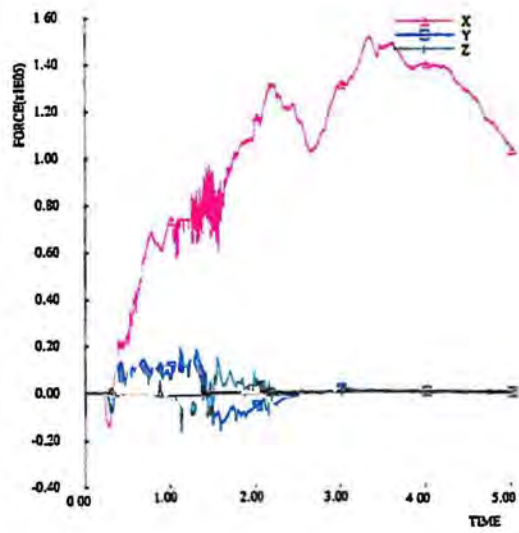
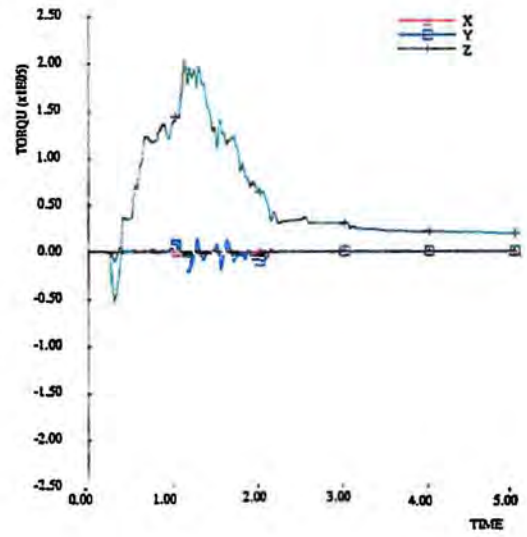
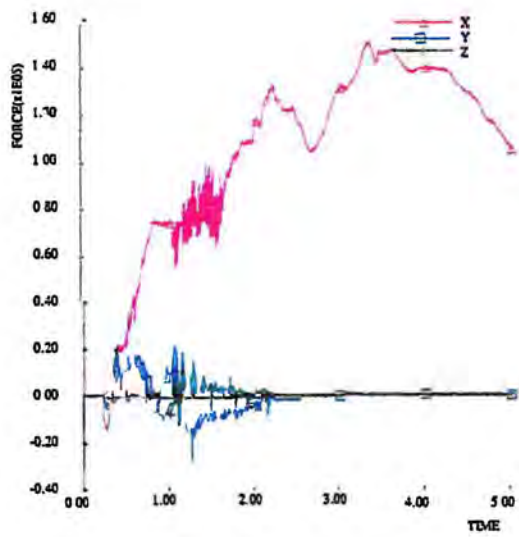


Afbeelding C1. *Overzicht aanrijding met de 30 tons vrachtauto tegen de RWS barrière.*

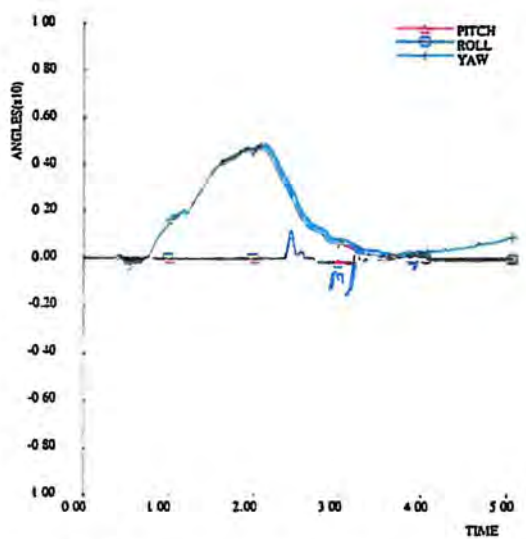
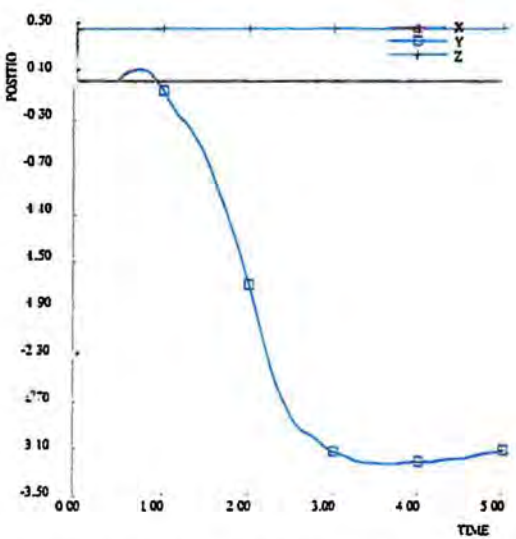
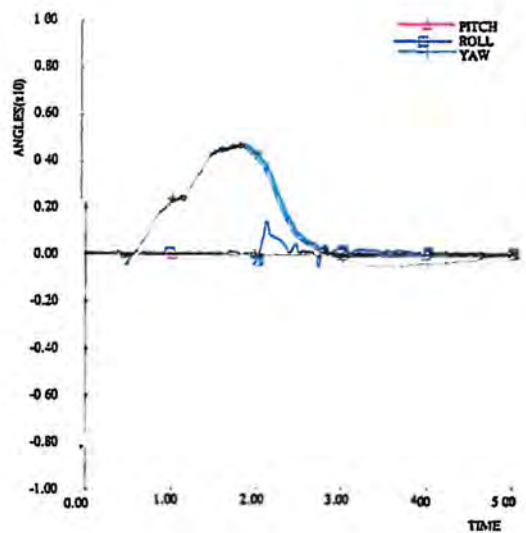
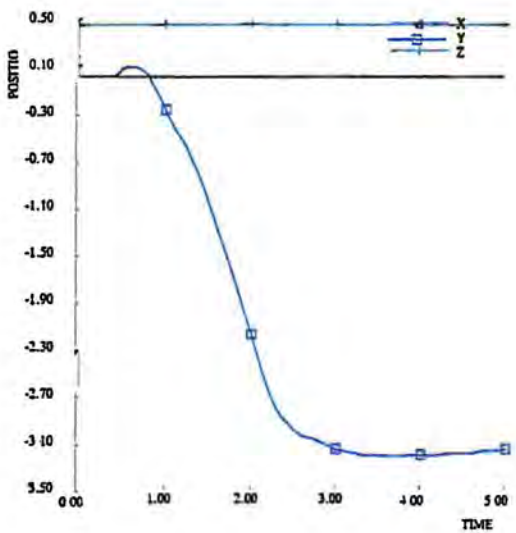
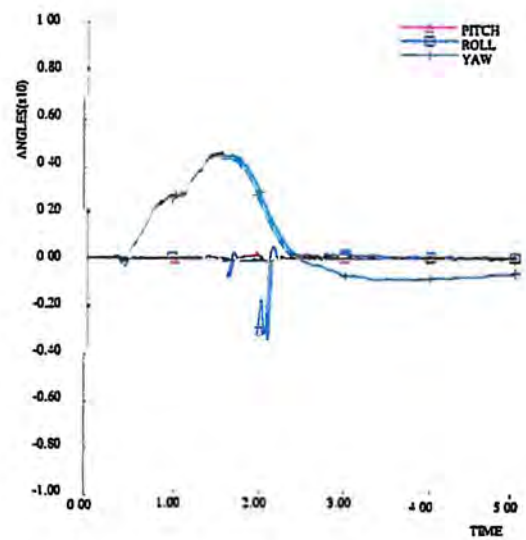
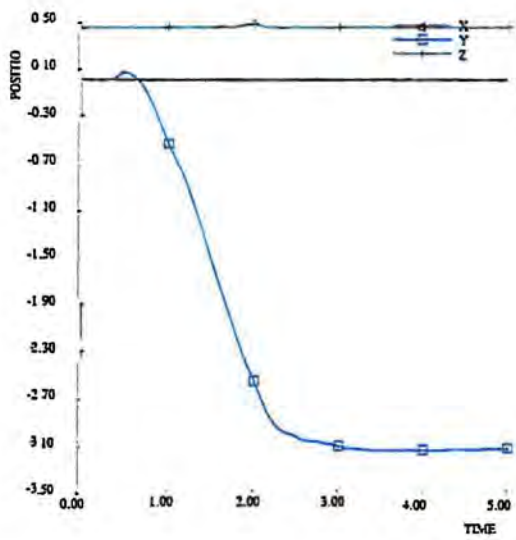


Afbeelding C2. Verloop van de roll-, pitch- en yawhoek van de 30 tons vrachtauto tegen de tijd tijdens de aanrijding tegen de RWS-barrier.

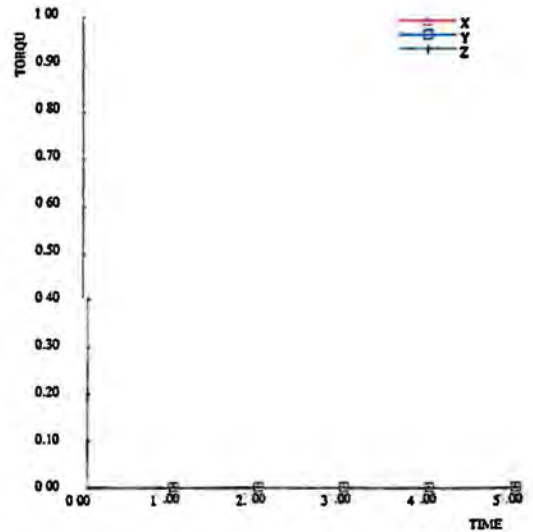
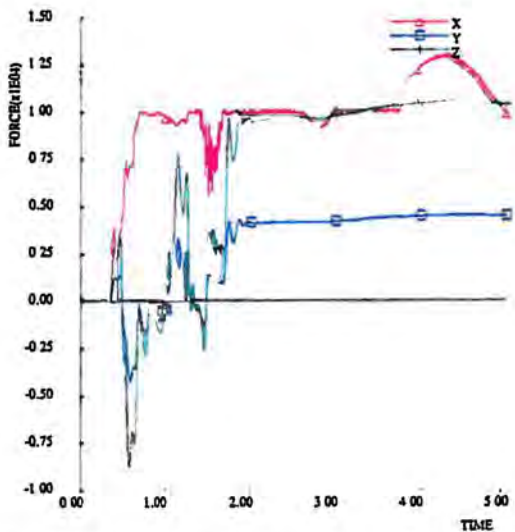
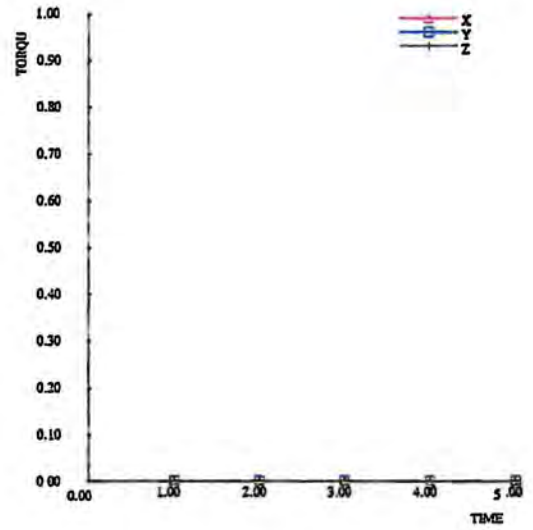
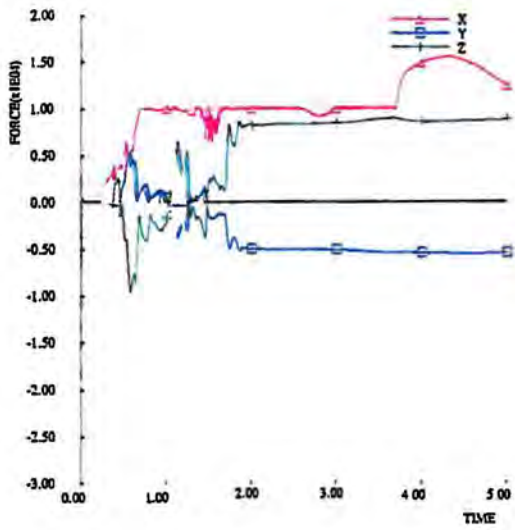
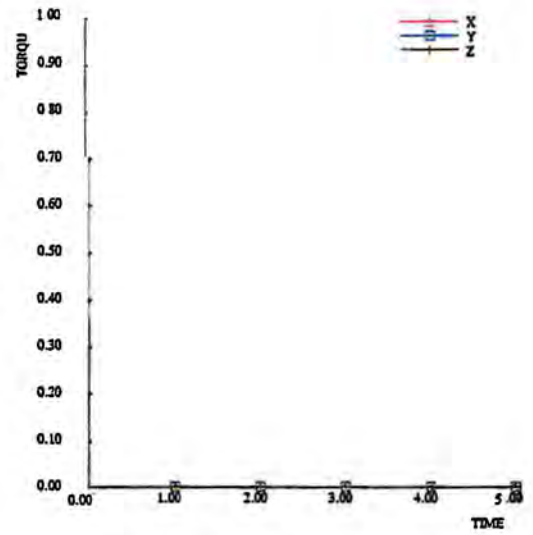
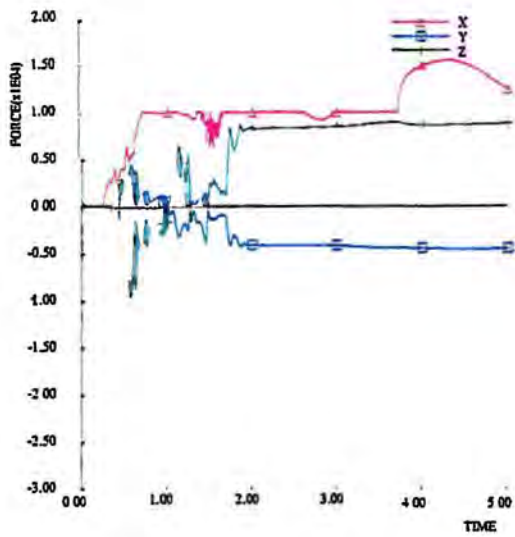
Afbeelding C3. Verloop van de snelheid tegen de tijd tijdens de aanrijding met de 30 tons vrachtauto tegen de RWS-barrier.



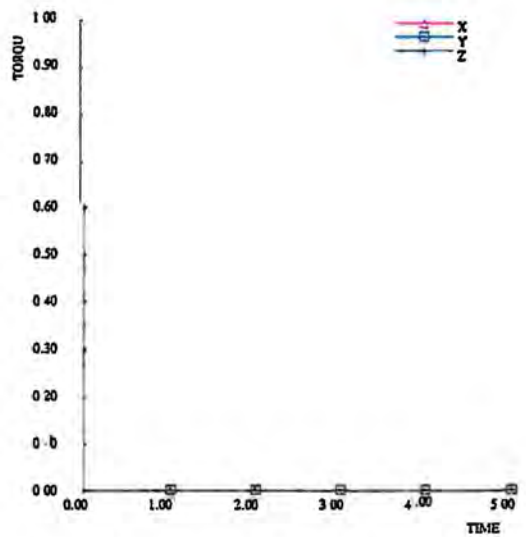
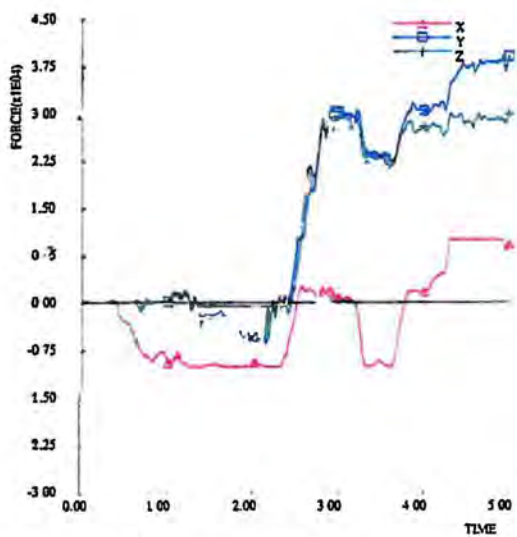
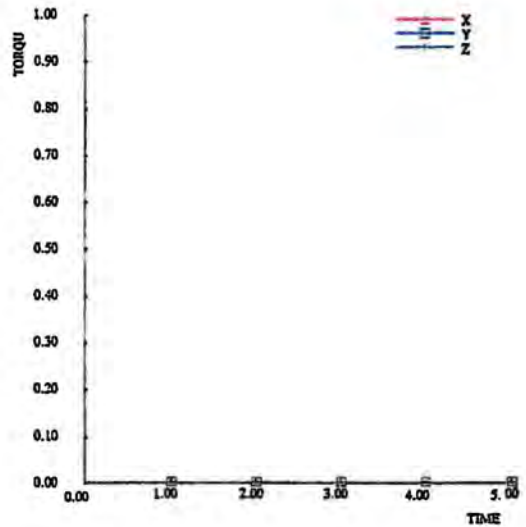
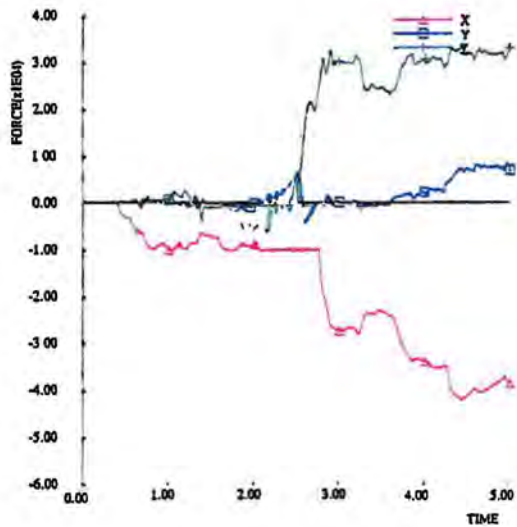
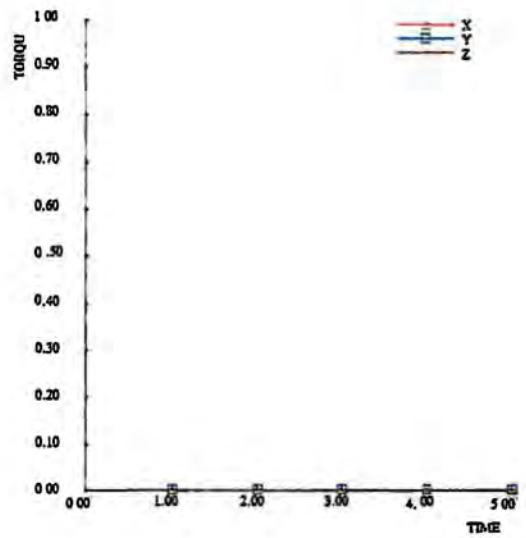
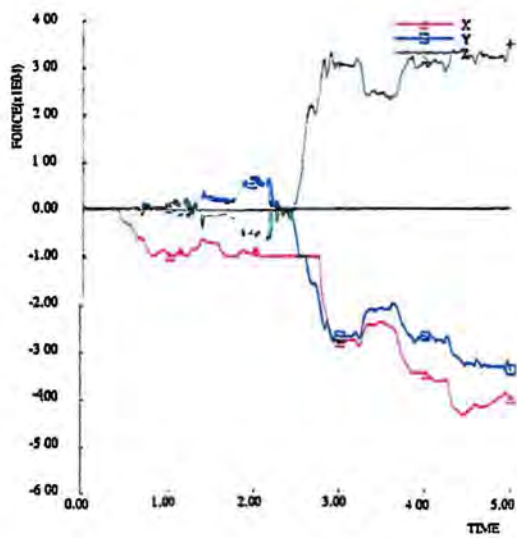
Afbeelding C4. Verloop van de krachten en momenten in de koppeling tussen de elementen 22/23, 23/24 en 24/25 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de 30 tons vrachtauto tegen de RWS-barrier.



Afbeelding C5. Verloop van de uitbuiging van de elementen 26, 27 en 28 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de 30 tons vrachtauto tegen de RWS-barrier.



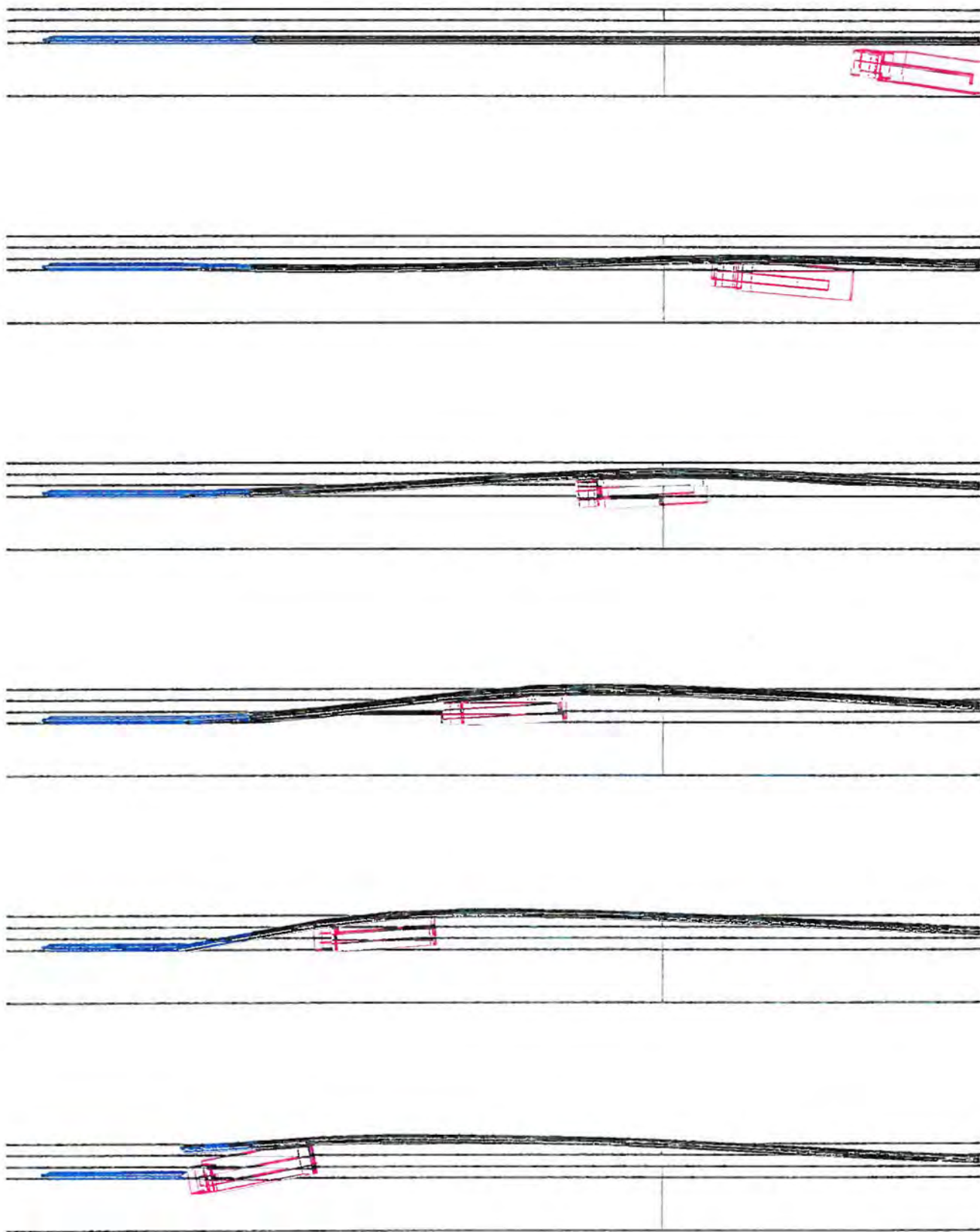
Afbeelding C6 . Verloop van de krachten in drie ankerbouten in de verankering van element 12 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de 30 tons vrachtauto tegen de RWS barrier .



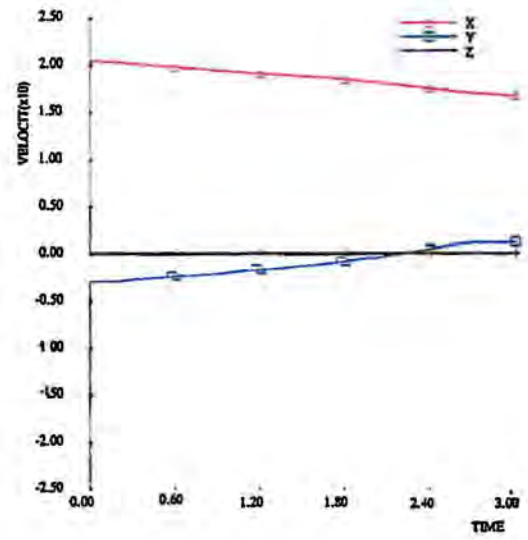
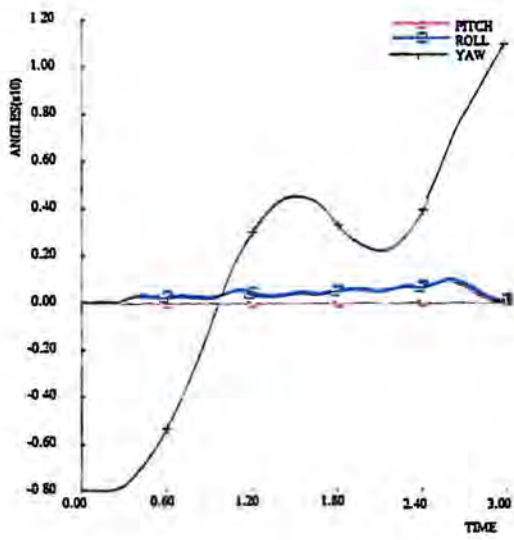
Afbeelding C7 - Verloop van de krachten in drie ankerbouten in de verankering van element 36 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de 30 tons vrachtauto tegen de RWS-barrier.

Simulatie met de 30 tons vrachtauto tegen RWS-barrier op eindverankering.

- D1. Overzicht aanrijding met de 30 tons vrachtauto tegen de RWS-barrier.
- D2. Verloop van de roll-, pitch- en yawhoek van de 30 tons vrachtauto tegen de tijd tijdens de aanrijding tegen de RWS-barrier.
- D3. Verloop van de snelheid tegen de tijd tijdens de aanrijding met de 30 tons vrachtauto tegen de RWS-barrier.
- D4. Verloop van de krachten en momenten in de koppeling tussen de elementen 35/36, 36/37 en 37/38 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de 30 tons vrachtauto tegen de RWS-barrier.
- D5. Verloop van de krachten in drie ankerbouten in de verankering van element 36 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de 30 tons vrachtauto tegen de RWS-barrier.
- D6. Verloop van de krachten in drie ankerbouten in de verankering van element 37 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de 30 tons vrachtauto tegen de RWS-barrier.
- D7. Verloop van de krachten in drie ankerbouten in de verankering van element 38 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de 30 tons vrachtauto tegen de RWS-barrier.

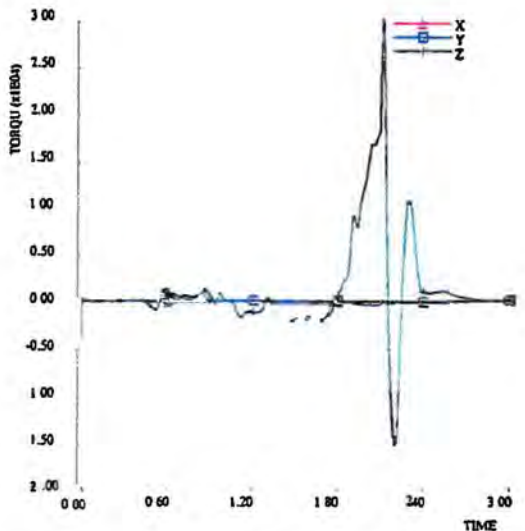
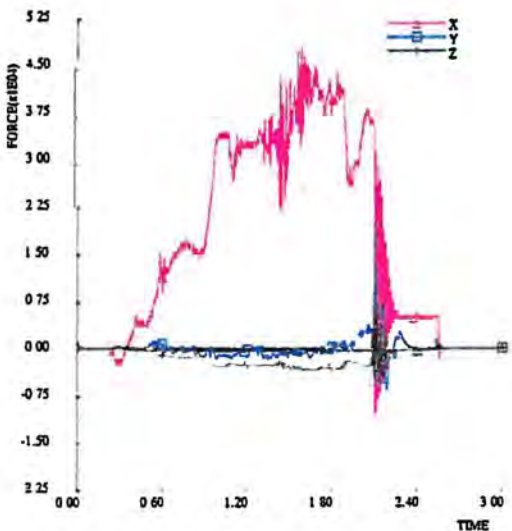
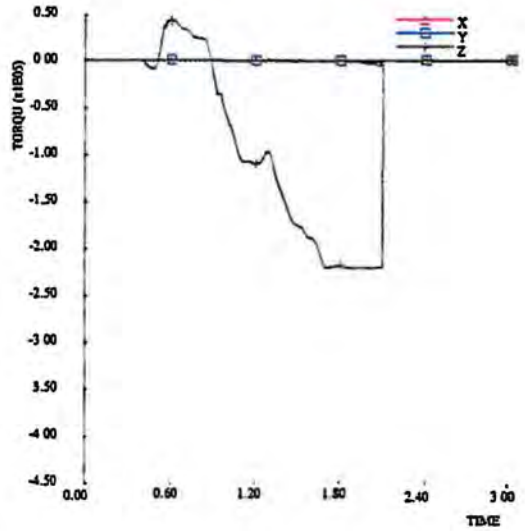
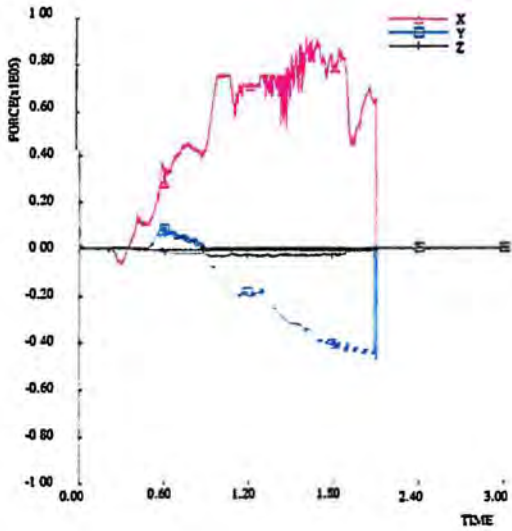
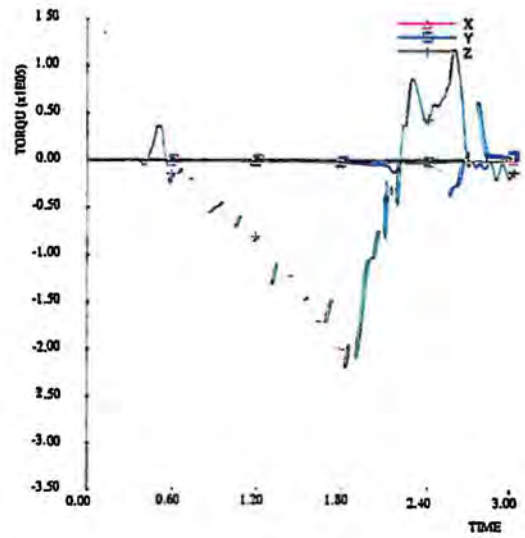
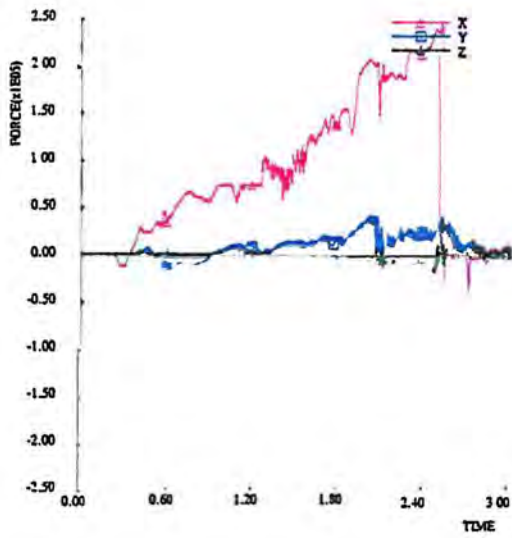


Afbeelding D1. Overzicht aanrijding met de 30 tons vrachtauto tegen de RWS-barrier.

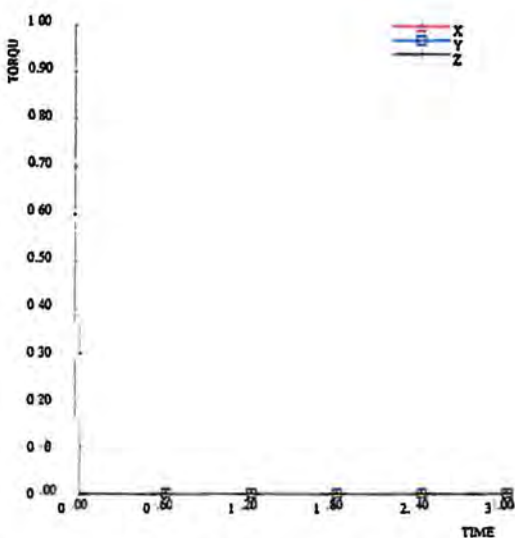
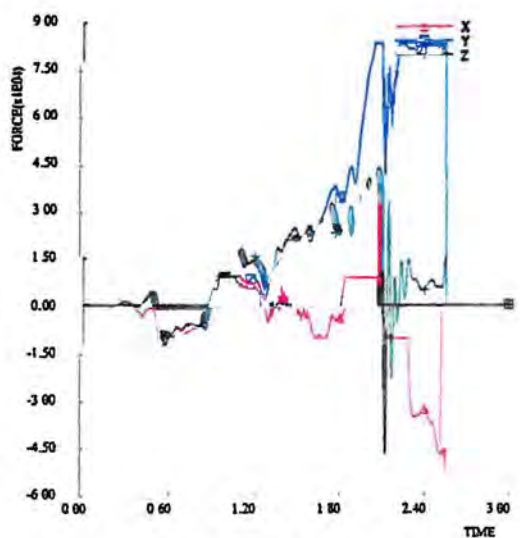
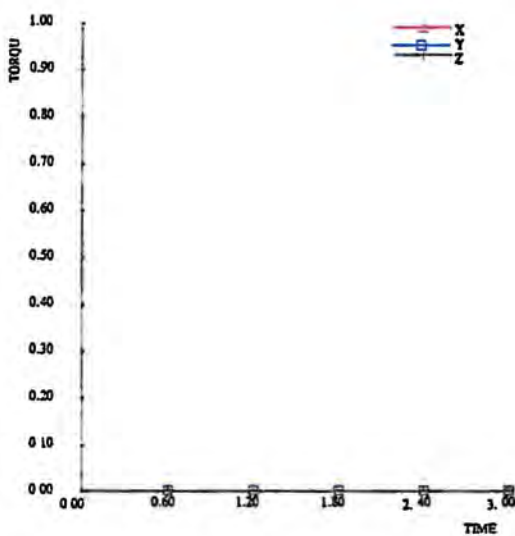
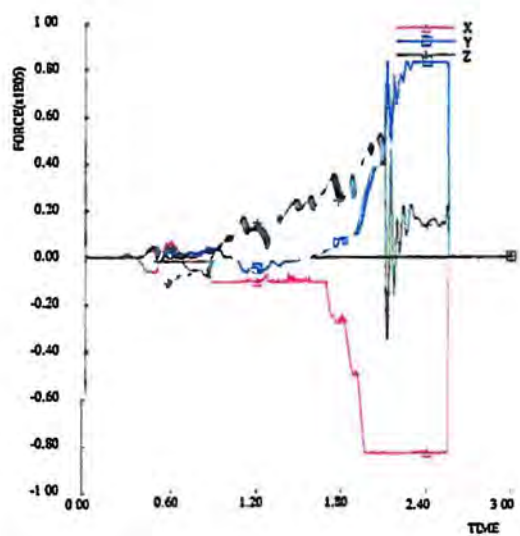
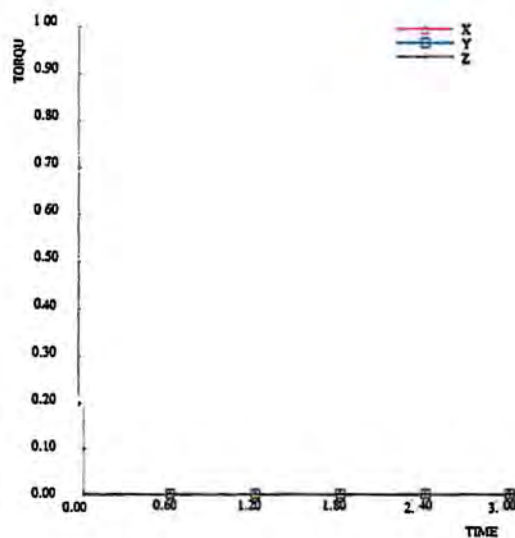
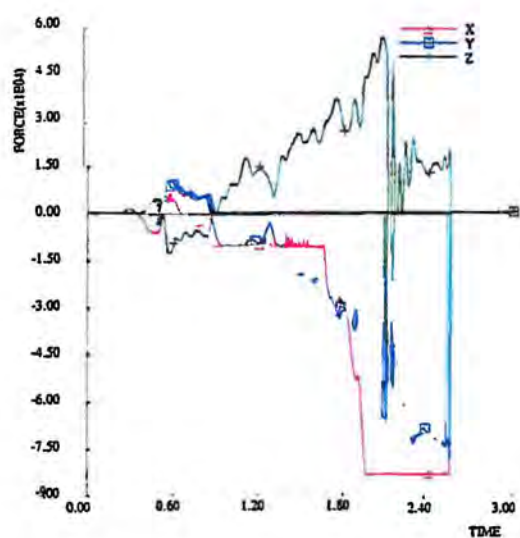


Afbeelding D2. Verloop van de roll-, pitch- en yawhoek van de 30 tons vrachtauto tegen de tijd tijdens de aanrijding tegen de RWS-barrier.

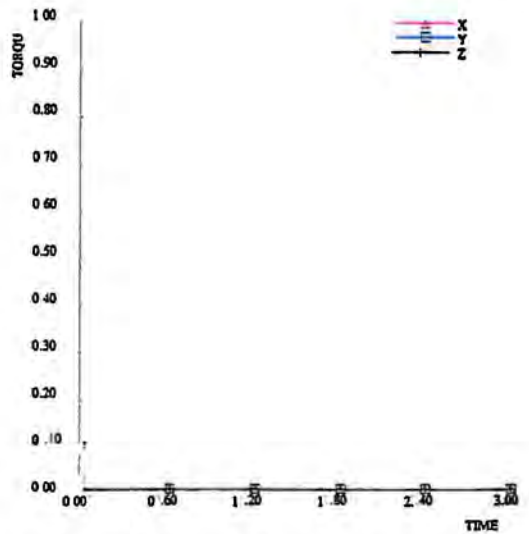
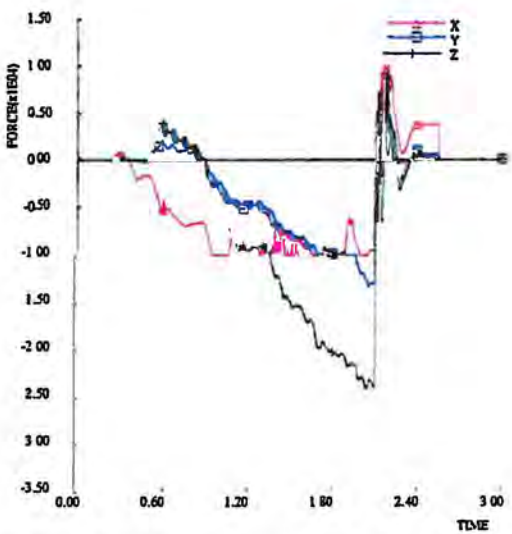
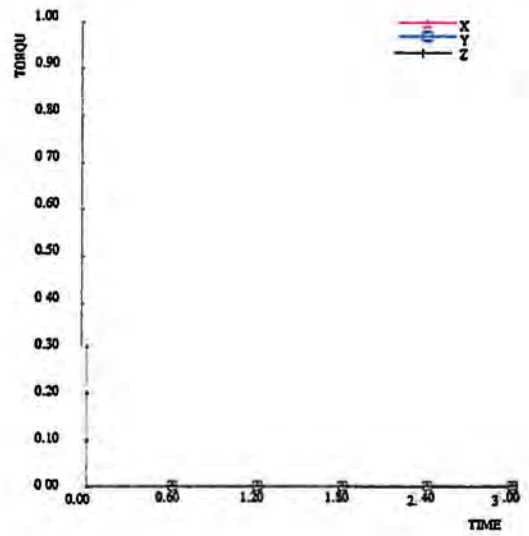
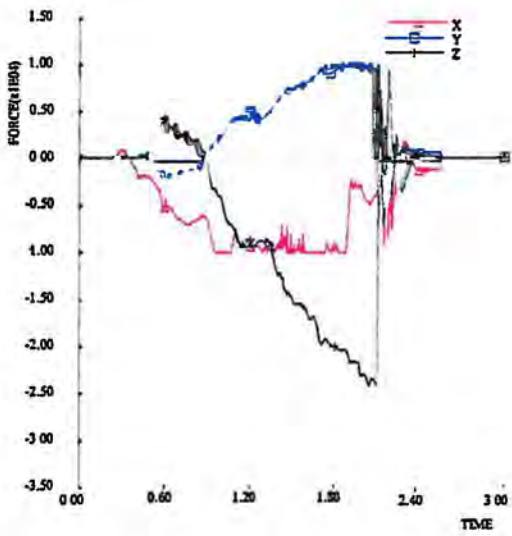
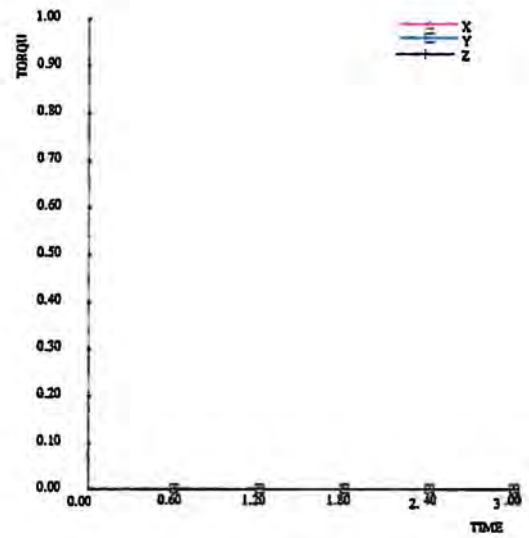
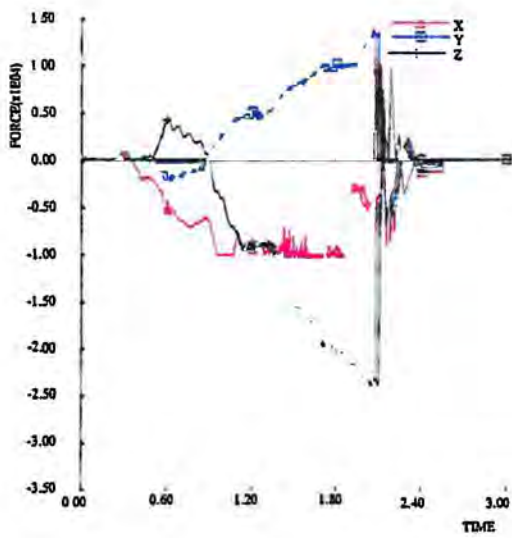
Afbeelding D3. Verloop van de snelheid tegen de tijd tijdens de aanrijding met de 30 tons vrachtauto tegen de RWS-barrier.



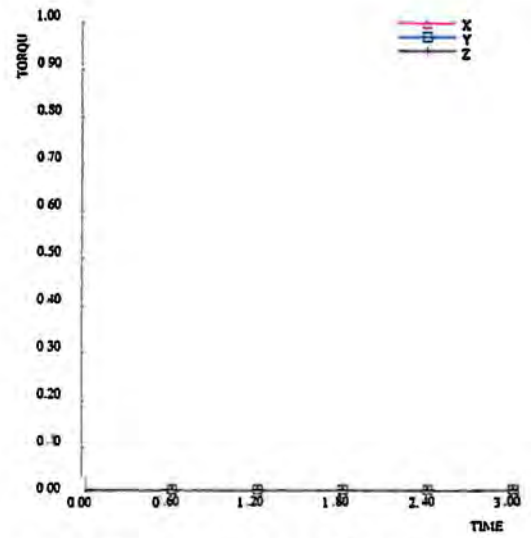
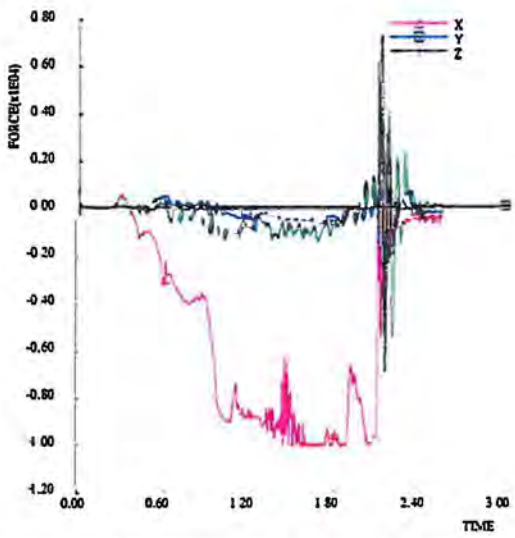
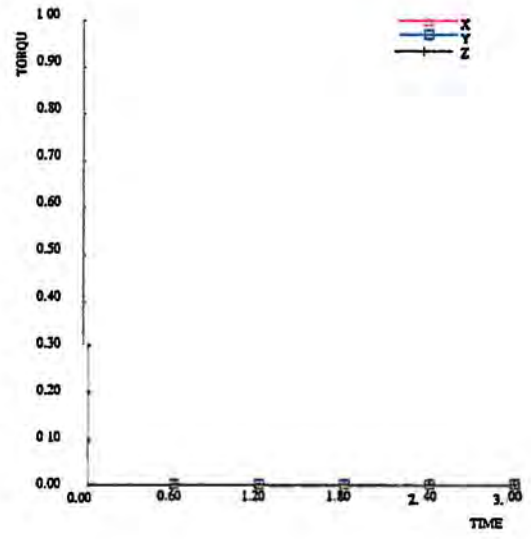
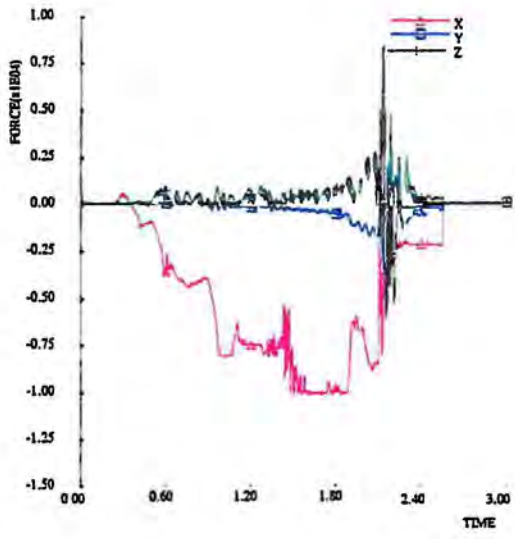
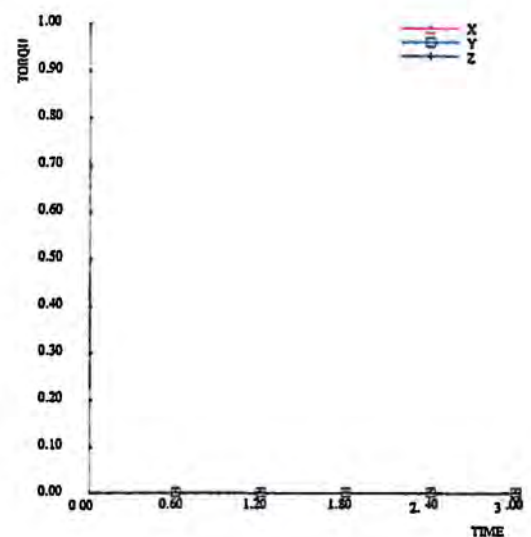
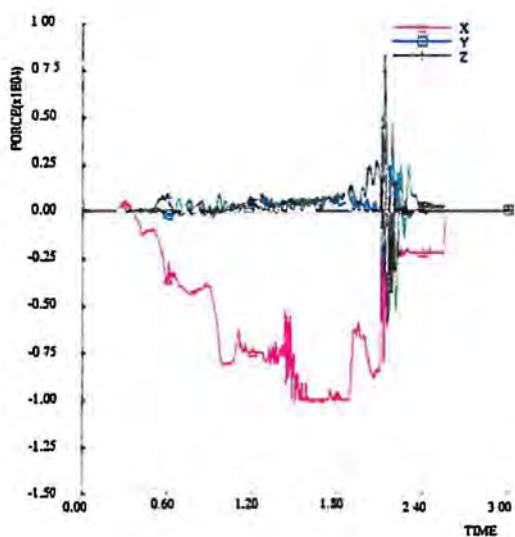
Afbeelding D4. Verloop van de krachten en momenten in de koppeling tussen de elementen 35/36, 36/37 en 37/38 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de 30 tons vrachtauto tegen de RWS barrière.



Afbeelding D5 - Verloop van de kracht in drie ankerbouten in de verankering van element 36 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de 30 tons vrachtauto tegen de RWS barrière.



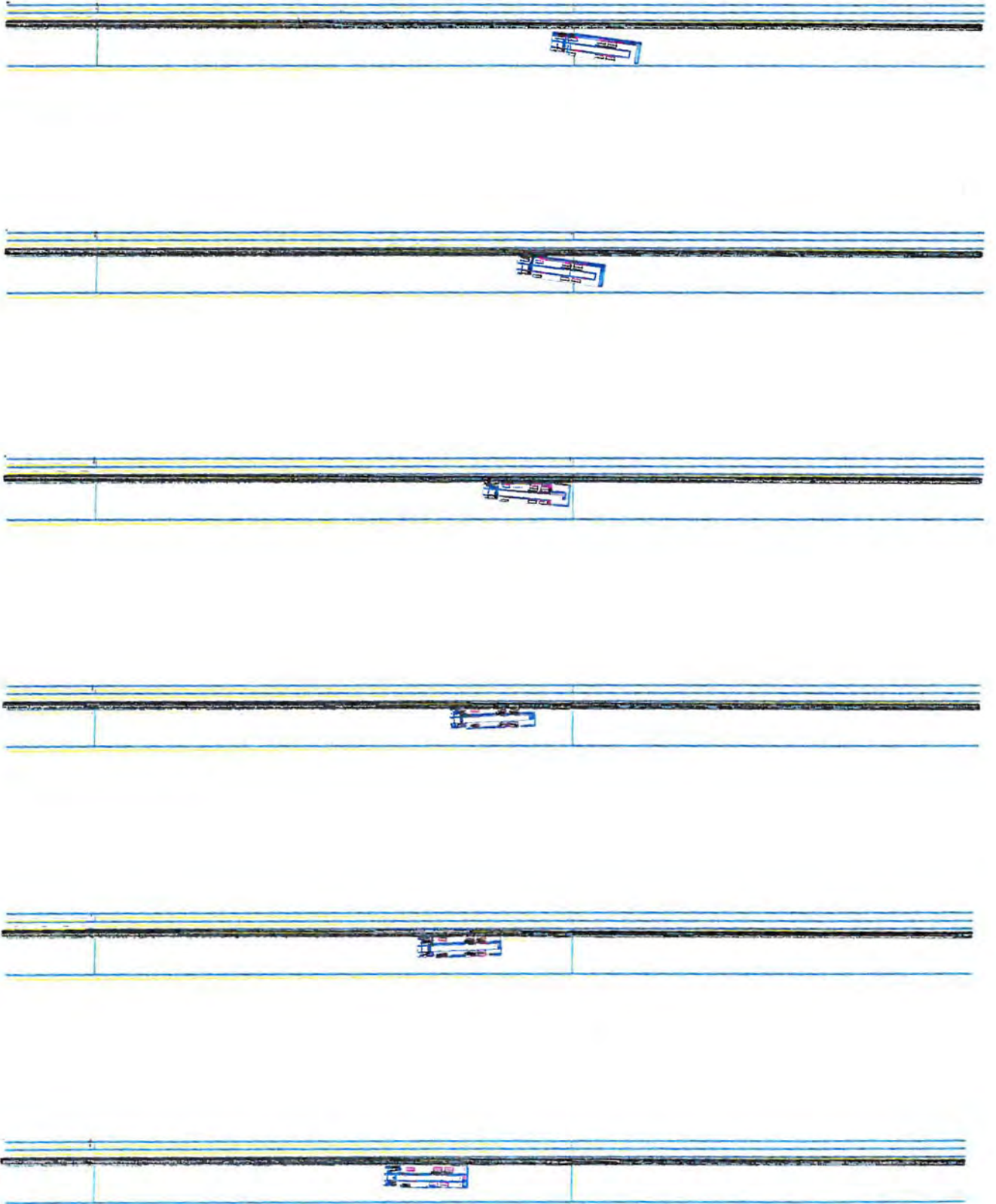
Afbeelding D6. Verloop van de krachten in drie ankerbouten in de verankering van element 37 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de 30 tons vrachtauto tegen de RWS barrière.



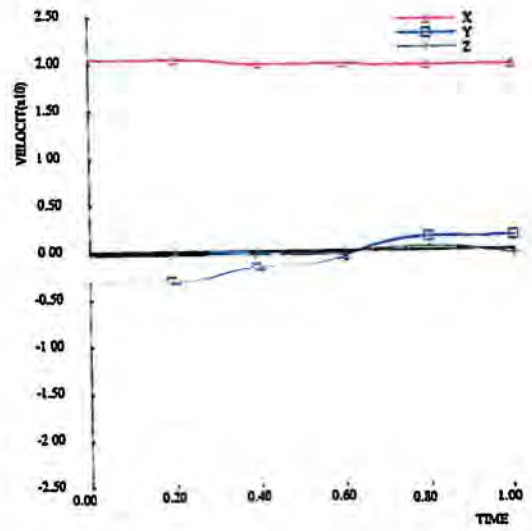
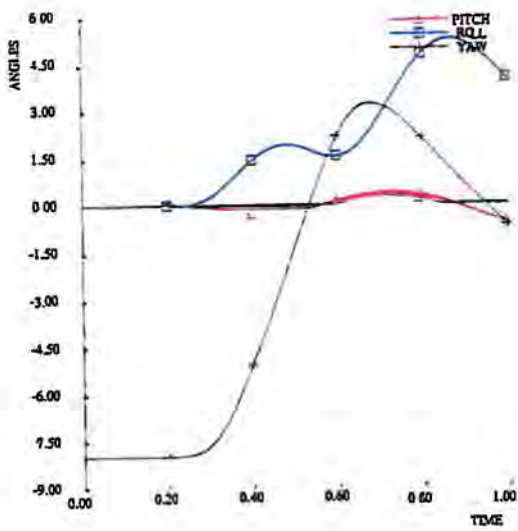
Afbeelding D7. Verloop van de krachten in drie ankerhouten in de verankering van element 38 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de 30 tons vrachtauto tegen de RWS-barrier.

Simulatie met de 30 tons vrachtauto tegen RWS-barrier elk element verankerd.

- E1. Overzicht aanrijding met de 30 tons vrachtauto tegen de RWS-barrier.
- E2. Verloop van de roll-, pitch- en yawhoek van de 30 tons vrachtauto tegen de tijd tijdens de aanrijding tegen de RWS-barrier.
- E3. Verloop van de snelheid tegen de tijd tijdens de aanrijding met de 30 tons vrachtauto tegen de RWS-barrier.
- E4. 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 30 tons vrachtauto tegen de RWS-barrier.
- E5. Verloop van de uitbuiging van de elementen 19, 20 en 21 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de 30 tons vrachtauto tegen de RWS-barrier.
- E6. Verloop van de krachten in drie ankerbouten in de verankering van element 19 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de 30 tons vrachtauto tegen de RWS-barrier.
- E7. Verloop van de krachten in drie ankerbouten in de verankering van element 20 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de 30 tons vrachtauto tegen de RWS-barrier.
- E8. Verloop van de krachten in drie ankerbouten in de verankering van element 21 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de 30 tons vrachtauto tegen de RWS-barrier.

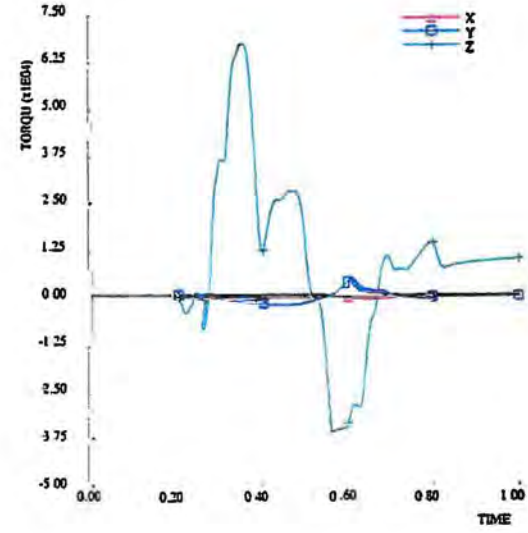
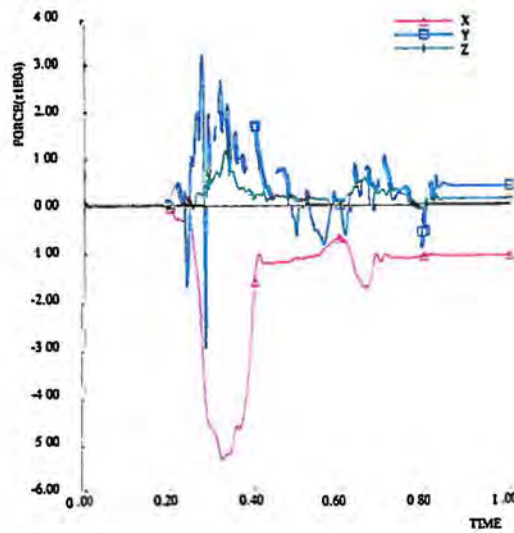
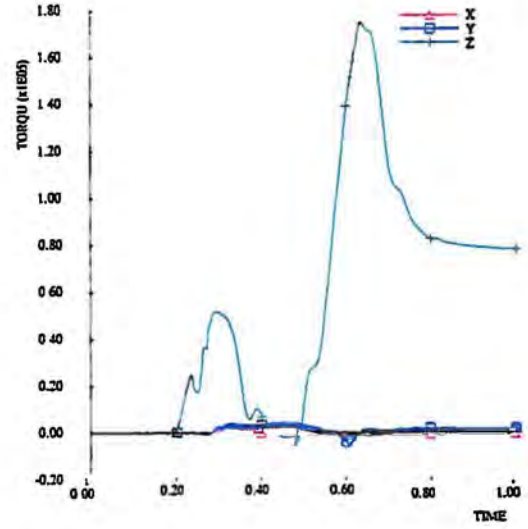
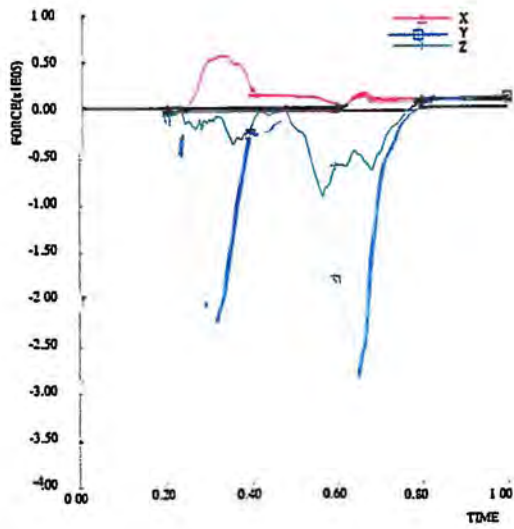
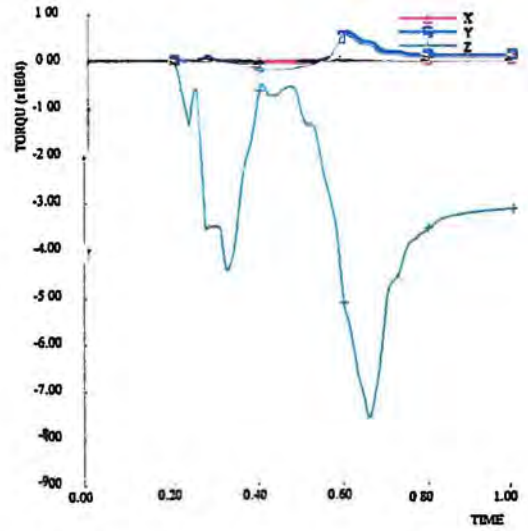
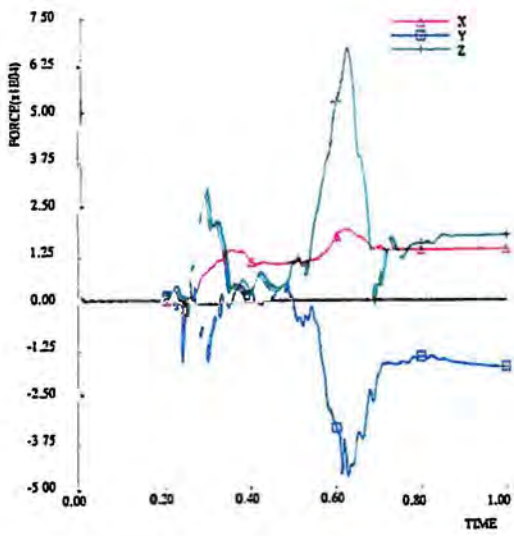


Abbeelding E1. *Overzicht aanrijding met de 30 tons vrachtauto tegen de RWS-barrier.*

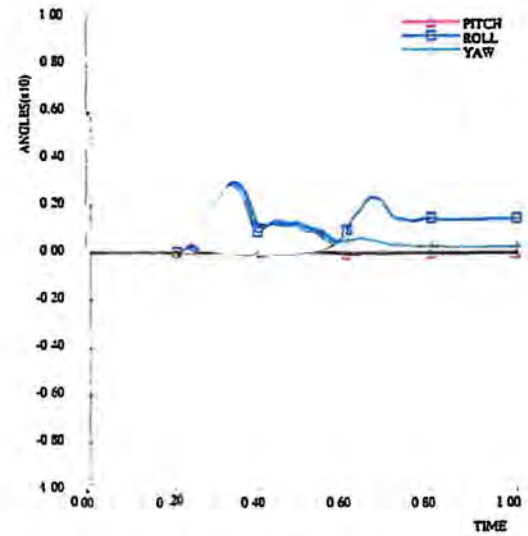
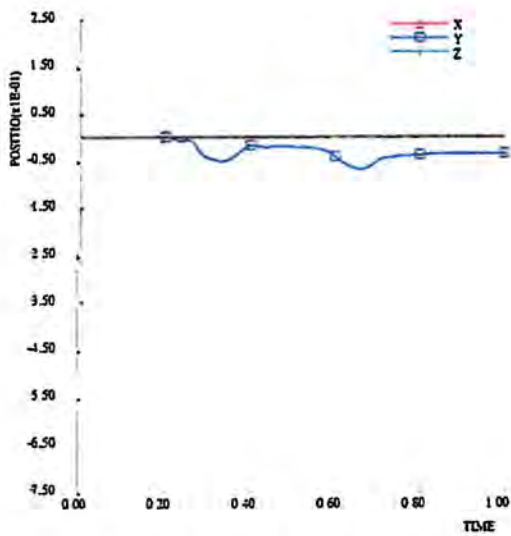
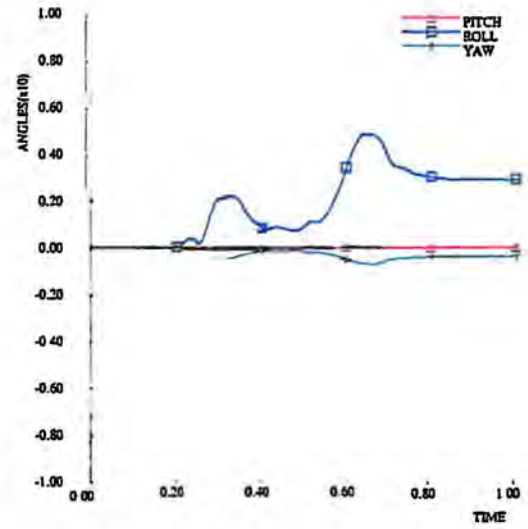
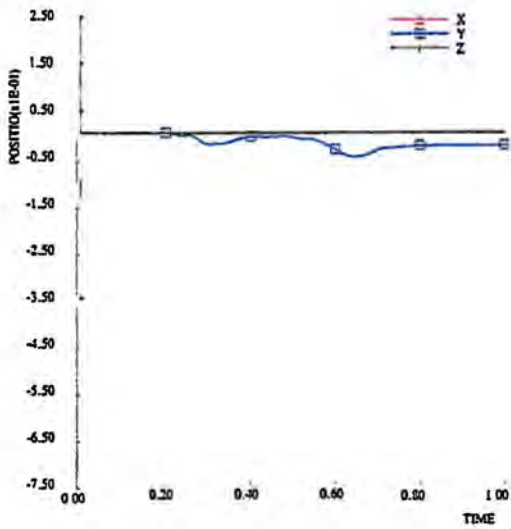
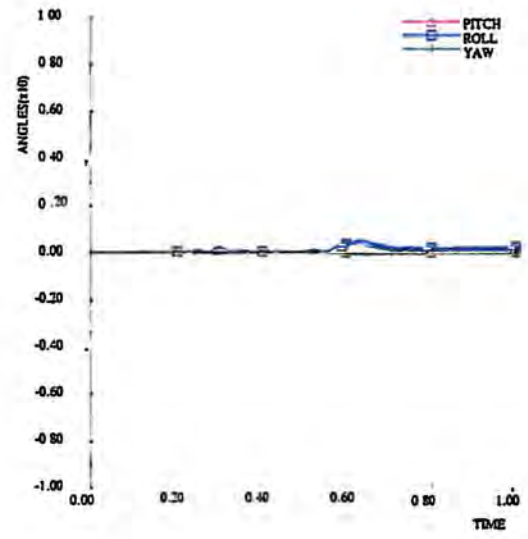
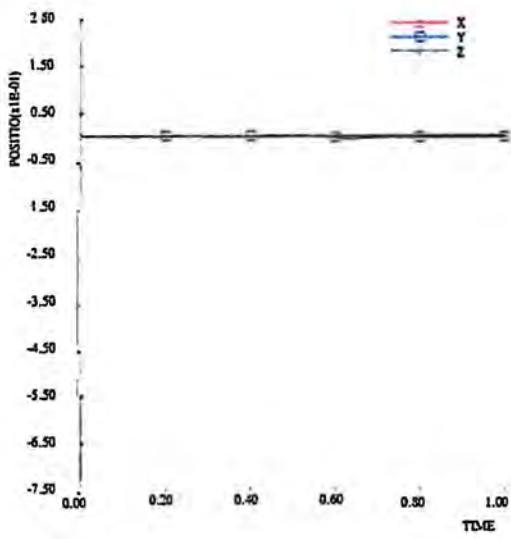


Afbeelding E2. Verloop van de roll-, pitch- en yawhoek van de 30 tons vrachtauto tegen de tijd tijdens de aanrijding tegen de RWS-barrier.

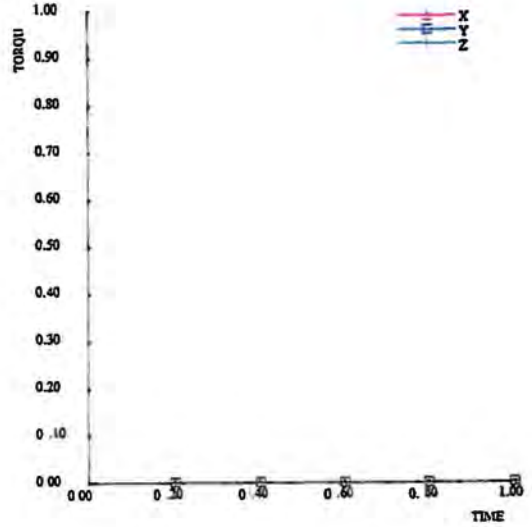
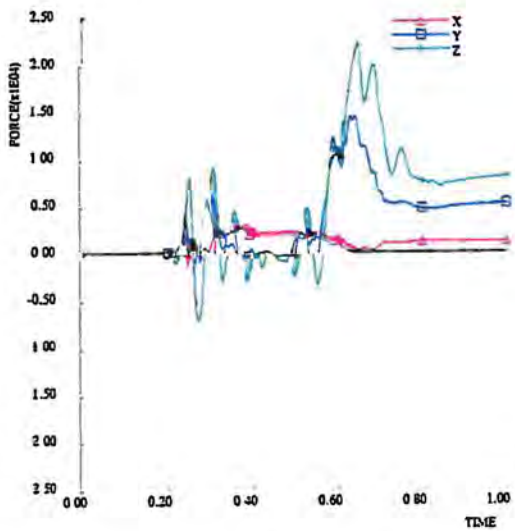
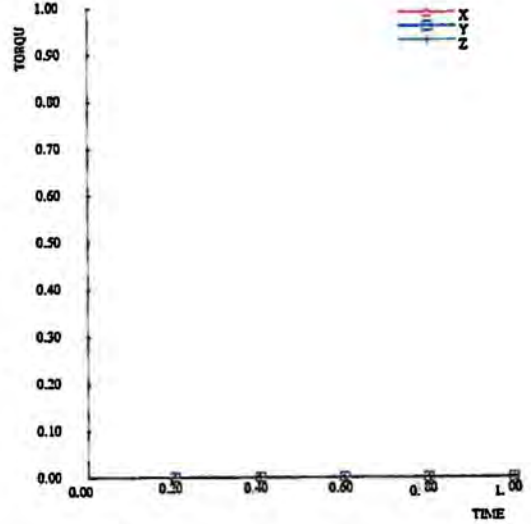
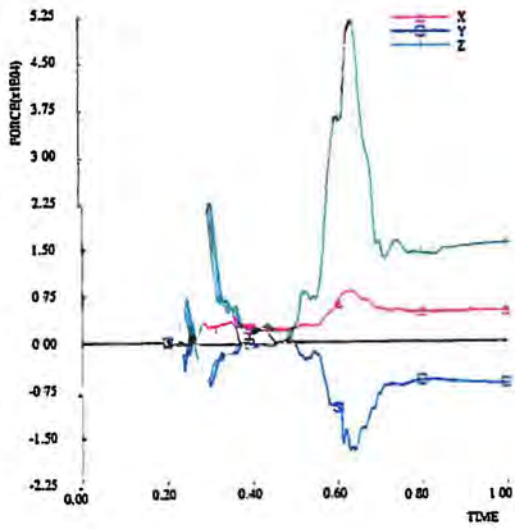
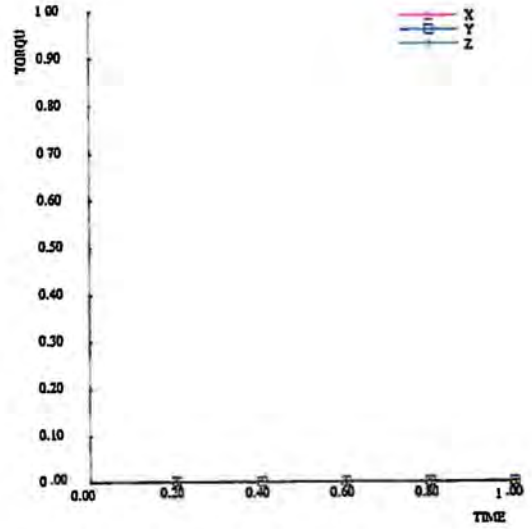
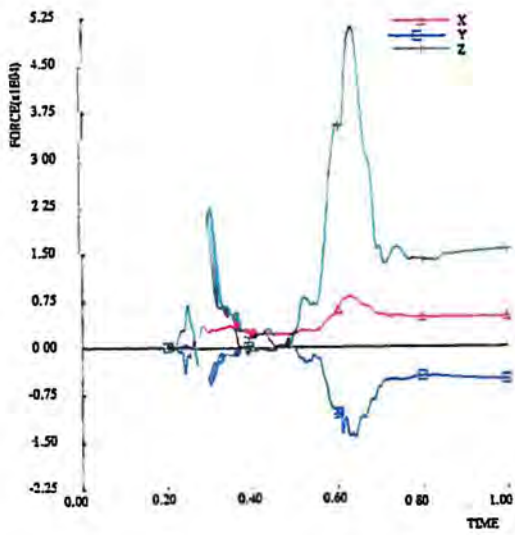
Afbeelding E3. Verloop van de snelheid tegen de tijd tijdens de aanrijding met de 30 tons vrachtauto tegen de RWS-barrier.



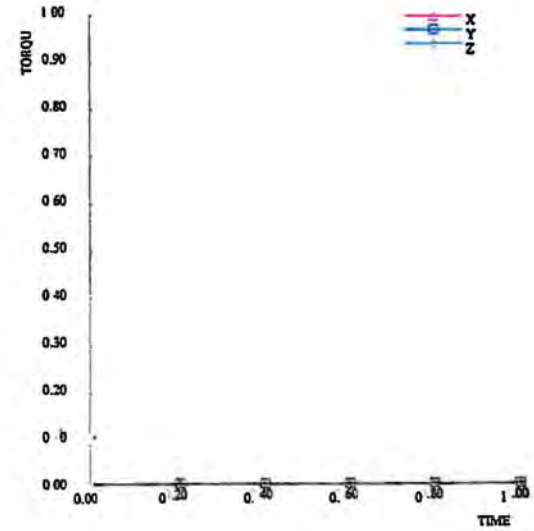
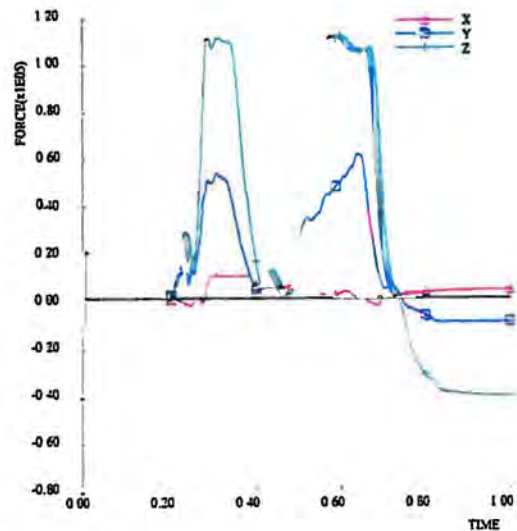
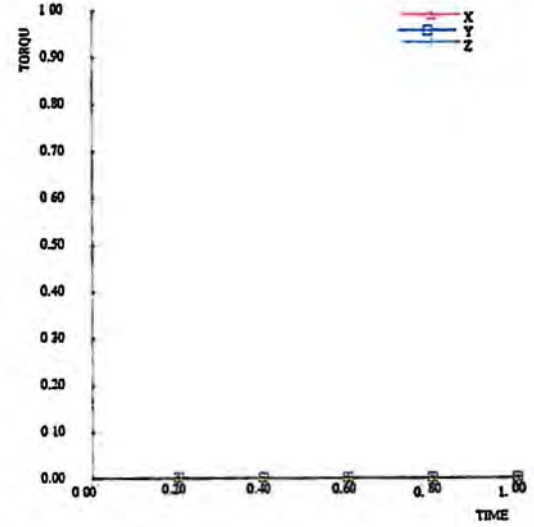
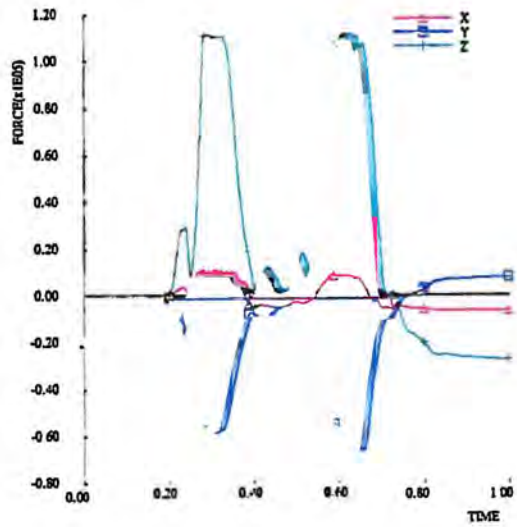
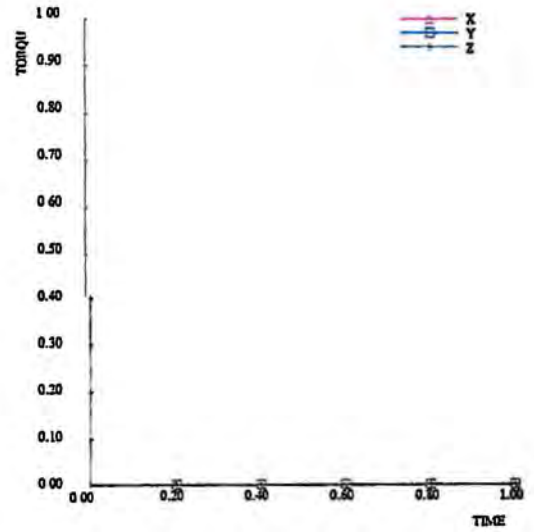
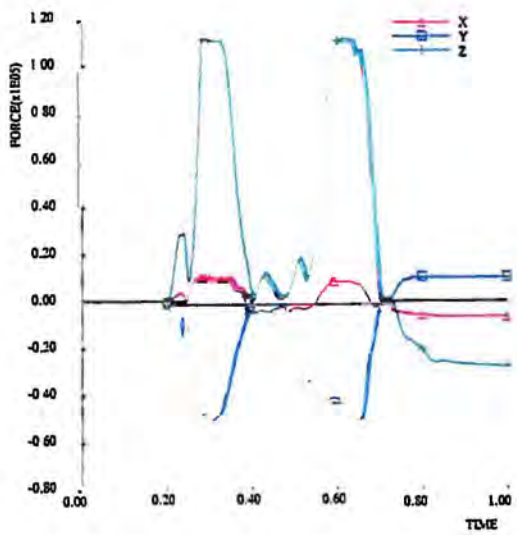
Afbeelding E4. Verloop van de krachten en momenten in de koppeling tussen de elementen 19/20, 20/21 en 21/22 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de 30 tons vrachtauto tegen de RWS-barrière.



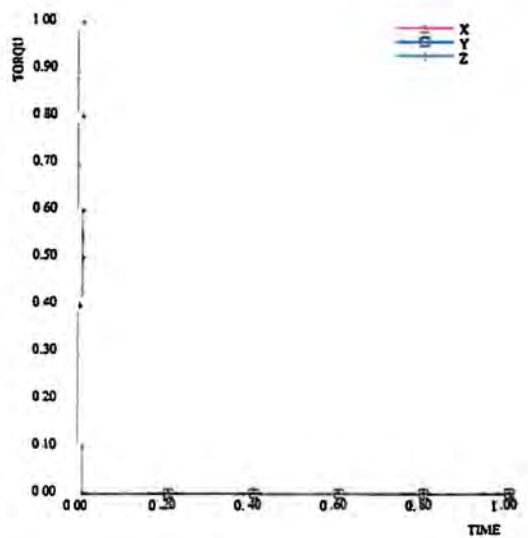
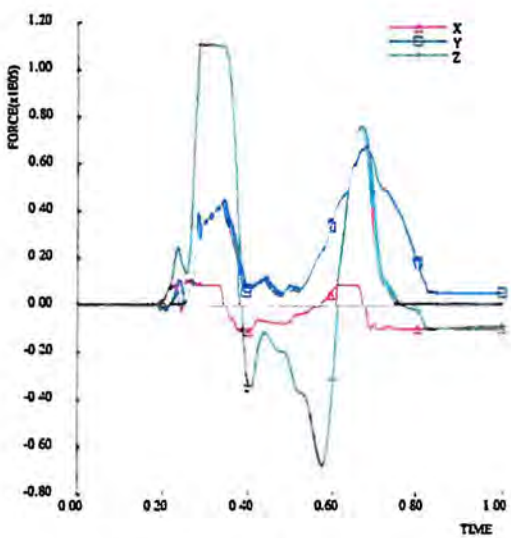
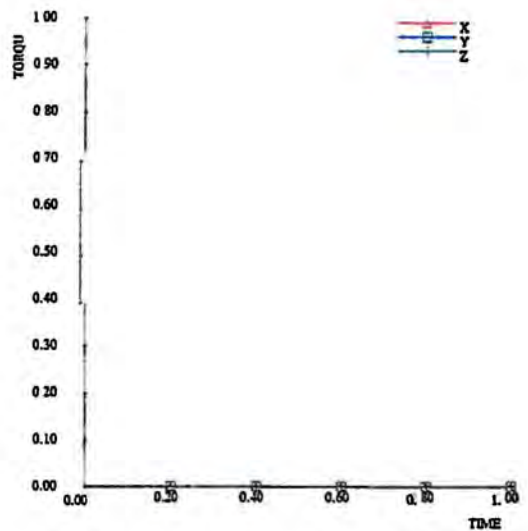
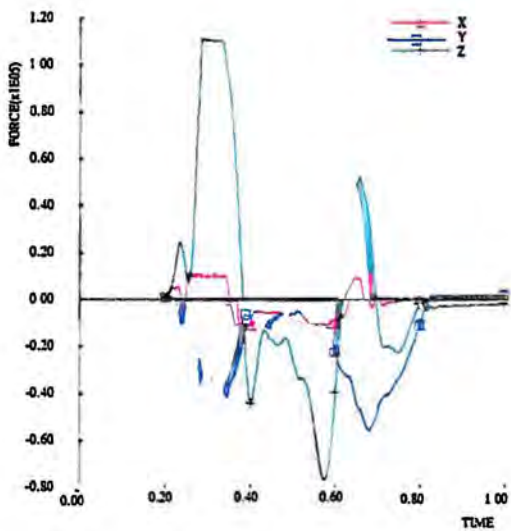
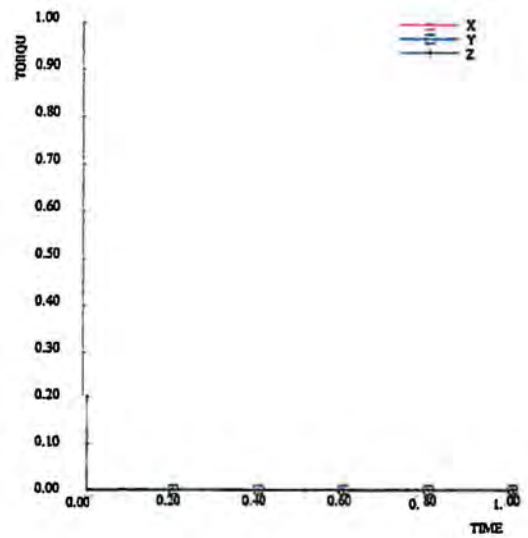
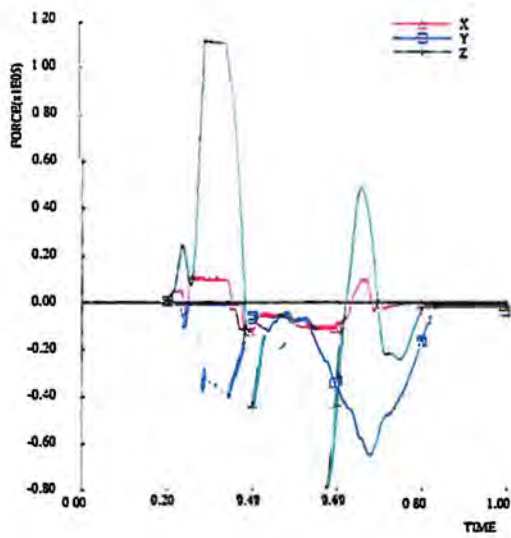
Afbeelding E5. Verloop van de uitbuiging van de elementen 19, 20 en 21 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de 30 tons vrachtauto tegen de RWS barrier.



Afbeelding E6 . Verloop van de krachten in drie ankerbouten in de verankering van element 19 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de 30 tons vrachtauto tegen de RWS-barrier .



Afbeelding E7 - Verloop van de krachten in drie ankerbouten in de verankering van element 20 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de 30 tons vrachtauto tegen de RWS barrier.



Afbeelding E8. Verloop van de krachten in drie ankerbouten in de verankering van element 21 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de 30 tons vrachtauto 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 gediscrètiseerd worden. Een star lichaam kan met behulp van één puntmassa gemodelleerd worden. Met een puntmassa worden 7 eigenschappen gedefinieerd, de massa, drie traagheidsmomenten en drie traagheidsprodukten om drie assen van een orthogonaal assenstelsel. De eventueel aanwezige zwaartekracht versnelling grijpt aan op de puntmassa.

- *punten (NODES)*

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

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

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

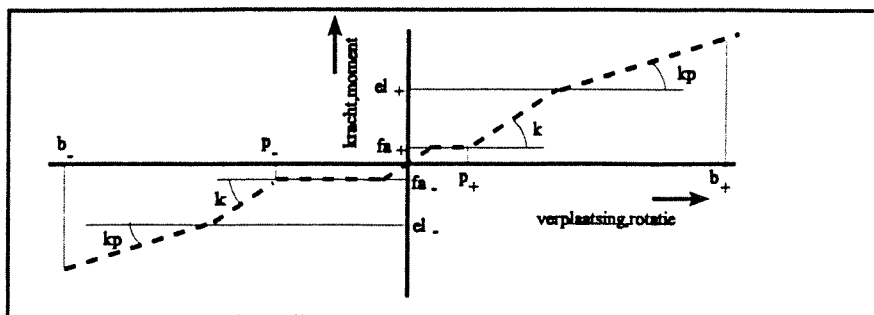
- *verbindingen (DEFORMABLE ELEMENTS)*

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

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

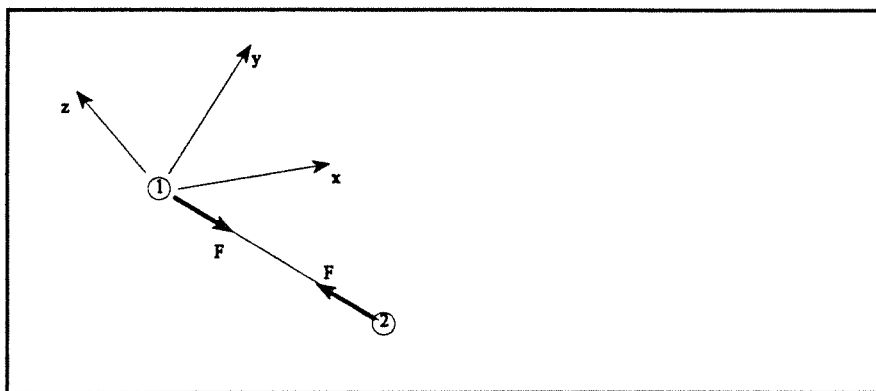
Iedere verbinding legt beperking op aan een aantal componenten van de relatieve beweging van de verbonden NODES. De ROD beperkt de verandering van de onderlinge afstand van de puntmassa's. De POINT verbinding beperkt alle zes de componenten, waarbij de te verbinden NODES op dezelfde plaats mogen liggen.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

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

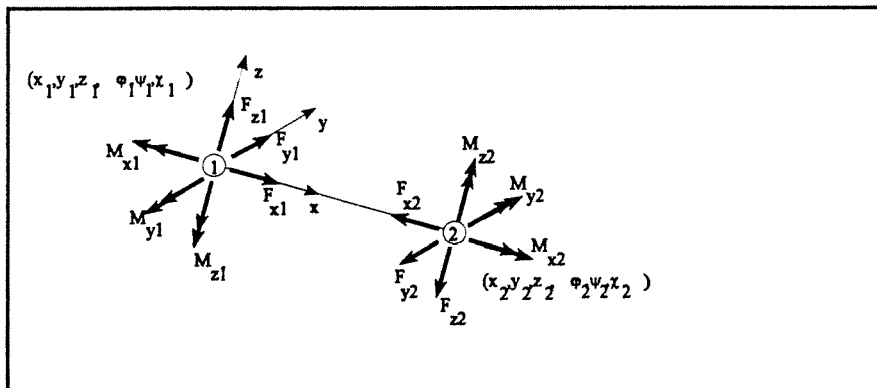


Afbeelding B1. Het kracht-verplaatsingsdiagram.

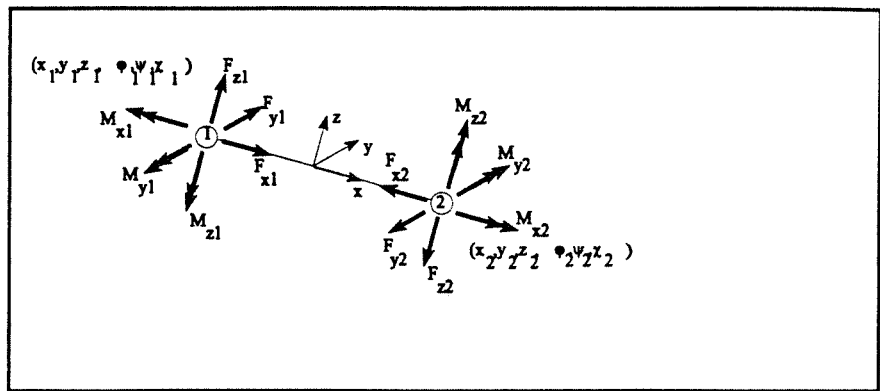
De vorm van een kracht-verplaatsing dan wel moment-rotatie diagram is gegeven in *Afbeelding B1*. De karakteristiek in *Afbeelding B1* wordt beschreven door de stijfheid (k), de speling (p_+, p_-), de spelingsweerstand (f_{a+}, f_{a-}), de plasticiteitsgrens (e_{l+}, e_{l-}), de plastische stijfheid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



Afbeelding B2. De ROD-verbinding.



Afbeelding B3. De POINT-verbinding.



Afbeelding B4. De BEAM-verbinding.

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

- *contactlichamen* (CONTACT ELEMENTS)

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

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

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

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

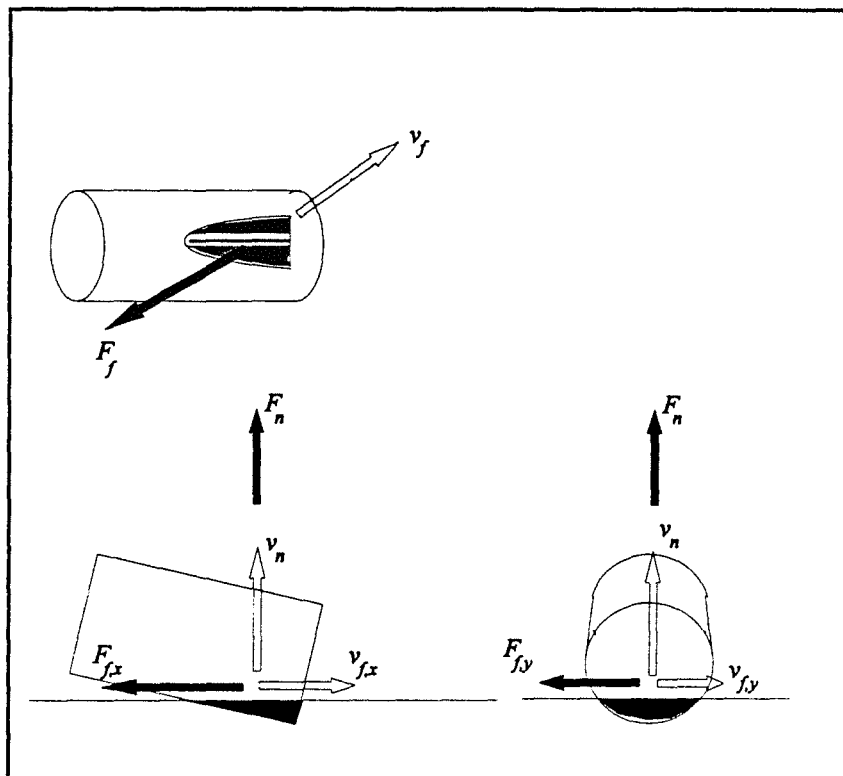
Afbeelding B5. Matrix van mogelijke contacten tussen de verschillende contactlichamen.

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

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

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

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



Afbeelding B6. Contact tussen een PLANE en een CYLINDER.

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

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

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

- *wielen* (WHEELS)

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

C. Het rekenen

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

Op grond van deze nieuwe toestand worden de 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.