

De TRI-angel, geleiderail op H4-niveau

Ir. J. van der Sluis

R-2000-11

De TRI-angel, geleiderail op H4-niveau

Ontwikkeling van een nieuwe geleiderail op H4-niveau met behulp van het simulatieprogramma VEDYAC

Documentbeschrijving

Rapportnummer:	R-2000-11
Titel:	De TRI-angel, geleiderail op H4-niveau
Ondertitel:	Ontwikkeling van een nieuwe geleiderail op H4-niveau met behulp van het simulatieprogramma VEDYAC
Auteur(s):	Ir. J. van der Sluis
Onderzoeksmanager:	Ir. L.T.B. van Kampen
Projectnummer SWOV:	55.418
Contractnummer opdrachtgever:	BDD/3493
Opdrachtgever:	Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, Bouwdienst Rijkswaterstaat
Trefwoord(en):	Safety fence, program (computer), simulation, design (overall design), construction.
Projectinhoud:	In opdracht van de Bouwdienst Rijkswaterstaat heeft de SWOV simulaties uitgevoerd ter ondersteuning van het ontwerpproces van de nieuw te ontwikkelen voertuigkering 'TRI-angel'. Er zijn drie ontwerpen van de TRI-angel onderzocht. De simulaties zijn uitgevoerd met behulp van het computersimulatiemodel VEDYAC. Dit rapport doet verslag van deze simulaties. Op grond van de simulatieresultaten is geconcludeerd dat één van de drie ontwerpen, de TRI-angel met scharnier, voldoet aan de vooraf gestelde criteria.
Aantal pagina's:	30 + 48 blz.
Prijs:	f 59,-
Uitgave:	SWOV, Leidschendam, 2000

Samenvatting

In opdracht van de Bouwdienst Rijkswaterstaat heeft de SWOV simulaties uitgevoerd ter ondersteuning van het ontwerpproces van de nieuw te ontwikkelen voertuigkering TRI-angel. Het doel van de ontwikkeling van de TRI-angel is een voertuigkering tot stand te brengen die voldoet aan het H4b-niveau, zoals beschreven in de norm NEN 1317-2 (CEN, 1998b). Aanvullend is er een eis aan de voertuigkering gesteld wat de vertraging van het inrijdende voertuig betreft, vertaald in de zogenaamde ASI-waarde. Deze eis is dat de ASI-waarde bij proef TB11 (botsing met een personenauto) niet groter dan 1,0 mag zijn. Verder mag de uitbuiging bij proef TB81 (botsing met een trekker met oplegger) niet groter dan 1 à 1,5 meter bedragen.

Er zijn drie ontwerpen van de TRI-angel onderzocht, door met ieder ontwerp de proeven TB11 en TB81 (CEN, 1998b) te simuleren. De simulaties zijn uitgevoerd met behulp van het computersimulatieprogramma VEDYAC. Het derde ontwerp is ontwikkeld op grond van de ervaringen die zijn opgedaan tijdens de simulaties van de eerste twee ontwerpen. Op grond van de simulatieresultaten is geconcludeerd dat het derde ontwerp, de TRI-angel met scharnier, voldoet aan de voorafgestelde criteria. Aanbevolen wordt eerst een relatief kort stuk (10 meter) van de TRI-angel met scharnier te maken en te beproeven. Na een positief resultaat van deze beproeving kan het ontwerp aan testen op ware schaal worden onderworpen.

Summary

The TRIANGLE safety barrier at the H4-level Development of a new safety barrier at the H4-level using the VEDYAC simulation program.

The Construction Service of the Ministry of Transport in the Netherlands commissioned SWOV to carry out simulations supporting the designing process of a newly-developed vehicle deflecting TRIANGLE. The purpose of developing the TRIANGLE is to achieve a vehicle deflection that complies with the H4b-level, as described in the NEN standard 1317-2 (CEN, 1998b). In addition, there is a deceleration requirement as far as the colliding vehicle is concerned. This is expressed in terms of the so-called ASI-score. The requirement is that the ASI-score of test TB11 (collision with a car) may not exceed 1.0. Furthermore, the outward bending of test TB81 (collision with an articulated lorry) may not exceed 1-1.5 meters.

All three designs of the TRIANGLE have been studied. By simulating tests TB11 and TB81 (CEN, 1998b). The simulations were carried out using the VEDYAC computer simulation program. The third design was developed from the experiences of testing the first two designs. Based on the results of the simulation, it was concluded that the third design (the TRIANGLE with a hinge) complies with the criteria established beforehand. It is recommended that, first of all, a short (10 metre) length of the TRIANGLE with hinge be manufactured and tested. If the result of this test is positive, the design should be tested at full-scale.

Inhoud

1.	Inleiding	6
2.	Beschrijving van de VEDYAC-voertuigmodellen	8
3.	TRI-angel1	9
3.1.	Model	9
3.2.	Simulaties	12
3.3.	Conclusies	14
4.	TRI-angel2	15
4.1.	Model	15
4.2.	Simulaties	17
4.3.	Conclusies	18
5.	TRI-angel met scharnier	19
5.1.	Model	19
5.1.1.	Traagheden en verbindingen	19
5.1.2.	Contactgeometrie	24
5.2.	Simulaties	24
5.3.	Conclusies	26
6.	Conclusies en aanbevelingen	28
	Literatuur	30
	Bijlage 1 t/m 5	31

1. Inleiding

In opdracht van de Bouwdienst van Rijkswaterstaat te Apeldoorn heeft de SWOV onderzoek gedaan naar het gedrag van drie voertuigkeringen bij botsingen die vereist zijn om aan H4-niveau te voldoen. Het onderzoek is in nauw overleg uitgevoerd met de werkgroep 'Voertuigkeringen op H4-niveau', een groep specialisten van de Bouwdienst. De eisen waaraan een voertuigkering moet voldoen voor een bepaald niveau staan omschreven in de normbladen NEN 1317-1 en NEN 1317-2. Voor het H4b-niveau geldt dat de voertuigkering met goed gevolg de proeven TB11 en TB81 (*Tabel 1*) moet doorstaan. De TB11 is een test met een lichte personenauto met een massa van 900 kg, een snelheid van 100 km/uur en een inrijhoek van 20 graden. De TB81 is een test met een trekker met oplegger met een massa van 38.000 kg, een snelheid van 65 km/uur en een inrijhoek van 20 graden.

Proef	Voertuigmassa [10^3 kg]	Snelheid [km/h]	Inrijhoek [°]	$E_{kin,n}$ [kJ]
TB11	0,9	100	20	40,6
TB81	38	65	20	724,6

Tabel 1. *Proeven vereist voor beproeving voor H4b-niveau.*

De onderzochte voertuigkeringen zijn:

1. de verbrede verankerde STEP-barrier met leuning;
2. de verbrede onverankerde betonnen STEP-barrier met Haitsma-koppeling en leuning;
3. de TRI-angel.

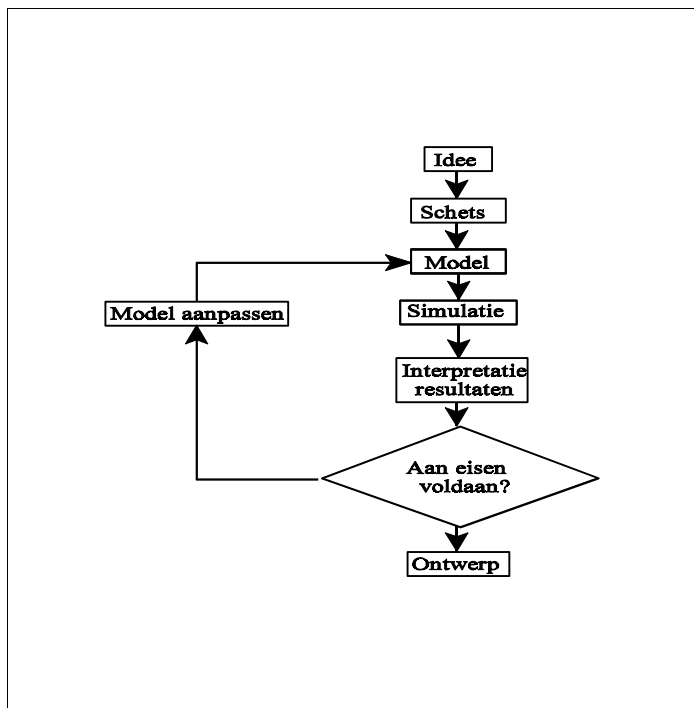
Over de eerste twee onderzoeken is gerapporteerd in de SWOV-rapporten van Van de Pol (1999a; 1999b). Het onderhavige rapport betreft de rapportage van de het onderzoek naar de TRI-angel voertuigkering. Het doel van het onderzoek naar de TRI-angel is een voertuigkering te ontwerpen die in staat is een trekker met oplegger om te leiden (TB81), waarbij de uitbuiging beperkt blijft tot 1 à 1,5 meter, terwijl bij een aanrijding met een kleine personenauto (TB11) er een eis geldt voor de voertuigvertraging. De ASI-waarde, een maat voor deze vertraging, mag niet hoger dan 1,0 zijn (TB11 A). De A geeft het niveau aan van de ASI-waarde dat wordt geaccepteerd, in dit geval dus lager dan 1,0. Wanneer het niveau $ASI < 1.4$ wordt geaccepteerd, dan wordt het niveau in de norm NEN 1317-2 met de letter B aangeduid.

Reden voor het ontwikkelen van een constructie die aan de omschreven eisen voldoet is dat er momenteel geen dergelijke constructie op de markt te verkrijgen is. De TRI-angel moet zowel een trekker-oplegger-combinatie kunnen keren, zonder roll-over, als de kleine personenauto omleiden waarbij geen hogere ASI-waarden optreden dan 1,0.

Er zijn drie ontwerpen van de TRI-angel onderzocht. De gegevens van het eerste ontwerp, in dit rapport genaamd TRI-angel1, zijn ontleend aan de ontwerpberekeningen uitgevoerd door Van Oorschot (1998). Voor het onderzoek van het tweede ontwerp, TRI-angel2, zijn de gegevens ontleend aan de constructietekening van J. Thomas (1998), gedateerd 28-11-'98. Op

grond van de ervaringen met de eerste twee ontwerpen is een derde ontwerp gemaakt en gesimuleerd, onder de naam 'TRI-angel met scharnier'.

De methodiek die is toegepast bij de ontwikkeling van de TRI-angel-constructie bestaat uit een iteratieproces, zoals weergegeven in *Afbeelding 1*.



Afbeelding 1. Toegepaste methodiek bij het ontwikkelen van de TRI-angel-constructie.

Na het formuleren van het eerste idee zijn twee schetsontwerpen gemaakt van de TRI-angel1 en TRI-angel2, die vervolgens het afgebeelde traject in *Afbeelding 1* een aantal malen hebben doorlopen. Uiteindelijk hebben deze exercities geleid tot de formulering van het idee voor de TRI-angel met scharnier. Ook hiervan is een schetsontwerp gemaakt dat vervolgens op de aangegeven iteratieve manier is geoptimaliseerd. De stappen 'Aan de eisen voldaan?' en 'Model aanpassen' zijn steeds uitgevoerd in nauw overleg met de werkgroep 'Voertuigkeringen op H4-niveau' van de Bouwdienst.

Deze rapportage is als volgt opgebouwd. In *Hoofdstuk 2* worden de gebruikte VEDYAC-modellen van de voertuigen beschreven. In de daaropvolgende drie hoofdstukken wordt voor ieder onderzocht ontwerp van de TRI-angel, het ontwikkelde model, de uitgevoerde simulaties en de conclusies die daar uit zijn getrokken, besproken. In het laatste hoofdstuk, *Hoofdstuk 6*, worden de conclusies van de afzonderlijke ontwerpen samengevat en enkele aanbevelingen voor het vervolgonderzoek gegeven.

2. Beschrijving van de VEDYAC-voertuigmodellen

Voor de simulatie van de TB11-proef is een bestaand voertuigmodel van een kleine personenauto met massa 900 kg gebruikt uit de voertuigbibliotheek van de SWOV. De traagheidseigenschappen van dit voertuig zijn opgenomen in *Tabel 2*.

MASS Name	Gewicht [kg]	I_x [kg/m ²]	I_y [kg/m ²]	I_z [kg/m ²]
Voertuig	760	280	1111	1150
Linker wielophanging	30	2	2	3
Rechter wielophanging	30	2	2	3
Achteras	80	26	0,8	26

Tabel 2. *Traagheidsgrontheden van de kleine personenauto (900 kg).*

De geometrie van dit voertuig is opgenomen in *Afbeelding 1.1* in *Bijlage 1*. Met rood zijn de contactcilinders afgebeeld die nodig zijn voor de berekening van de contactkrachten tussen het voertuig en de te onderzoeken constructie. Bovendien kunnen de rechterwielen en velgen contact maken met de constructie.

Voor proef TB81 wordt een trekker/oplegger-combinatie met een gezamenlijke massa van 38 ton voorgeschreven. Voor de simulaties van TB81 is ook gebruikt gemaakt van een bestaand voertuigmodel uit de SWOV-voertuigbibliotheek. De traagheidseigenschappen van dit voertuigmodel staan in *Tabel 3*; een afbeelding van het voertuigmodel is opgenomen in *Bijlage 1. Afbeelding 1.2*.

MASS Name	Gewicht [kg]	I_x [kg/m ²]	I_y [kg/m ²]	I_z [kg/m ²]
Trekker voertuig	4010	3600	9500	9500
Vooras	500	135	5	135
Linker wielophanging	120	1	1	1
Rechter wielophanging	120	1	1	1
Achteras	1250	300	15	300
Oplegger voertuig	29500	72200	334800	334800
Eerste as	1250	300	15	300
Tweede as	1250	300	15	300

Tabel 3. *Traagheidsgrontheden van de trekker met oplegger (38 ton).*

3. TRI-angel1

3.1. Model

Bij de beschrijving van de VEDYAC-modellen worden modelementen benoemd met hun VEDYAC-naam. Voor een nadere beschrijving van deze modelementen wordt verwezen naar *Bijlage 5: 'VEDYAC in het kort beschreven'*. Het model van de TRI-angel1 is ontwikkeld op basis van gegevens uit de ontwerpberekening uitgevoerd door Van Oorschot. In *Afbeelding 2.1. in Bijlage 2.* staat de geometrie van de TRI-angel uit de rapportage van Van Oorschot (1998) afgebeeld. De stijlfstand bedraagt 1,333 m. Het idee achter de TRI-angel1 is dat bij lichte aanrijdingen, zoals in proef TB11, de constructie energie opneemt door te draaien om de stijlvoet. Bij een zwaardere aanrijding zoals voorgeschreven bij de proef TB81 treedt eerst, net als bij de lichte aanrijding, rotatie van de constructie op rond de stijlvoet. Rond het tijdstip dat de achterkant van de constructie de bodem raakt, bezwijkt de stijlvoetverbinding en neemt de constructie verder energie op door al glijdend over de grond verder uit te buigen.

In *Tabel 4* staan de technische gegevens van de TRI-angel, zoals Van Oorschot deze heeft gebruikt en die van belang zijn voor de modellering van de TRI-angel1.

TRI-angel1	
Massa per meter [kg/m]	100
y_{zwp} [m]	0
z_{zwp} [m]	0,515
A [mm ²]	7492
S_x [mm ⁴]	4,48 10 ⁶
S_y [mm ⁴]	1,11 10 ⁹
S_z [mm ⁴]	7,67 10 ⁸
I_z [kgm] (niet gecontroleerd)	14

Tabel 4. *Technische gegevens van het eerste ontwerp van de TRI-angel (van Oorschot, 1998).*

In *Afbeelding 2.2 in Bijlage 2.* zijn twee elementen van het VEDYAC-model van de TRI-angel1 weergegeven. Met één element wordt vier meter lengte van de TRI-angel1 constructie beschreven. Het model verschilt geometrisch van het ontwerp, zoals blijkt uit vergelijking van de dwarsdoorsnede in *Afbeelding 2.2* met *Afbeelding 2.1*. In *Afbeelding 2.1* maakt de onderste plank een hoek van 32° met de verticaal, terwijl de onderste plank in het model een hoek van 16° maakt met de verticaal (z-as). Uit de eerste simulaties van proef TB11, met de kleine personenauto, bleek dat het voertuig zichzelf klem reed wanneer de onderste plank was gemodelleerd zoals in *Afbeelding 2.1* is aangegeven. Het voertuig zakte tot aan de veerstops door de veren, waardoor de bovenste plank aangreep op

raamhoogte van het voertuig. De wijziging van de hoek van de tweede plank van 32° naar 16° verminderde de beschreven effecten, helemaal weg waren ze niet.

In *Tabel 5* staan de traagheidseigenschappen van een vier meter lang modelement van de TRI-angel1. Het zwaartepunt van het element ligt op 0,515 meter boven het maaiveld.

MASS Name	gewicht [kg]	I_x [kg/m ²]	I_y [kg/m ²]	I_z [kg/m ²]
TRI-angel	400	400	500	500

Tabel 5. *Traagheidsgrootheden van een vier meter lang modelement van de TRI-angel1.*

Ieder modelement van vier meter bevat drie palen, die elk apart zijn gemodelleerd door middel van een POINT-verbinding. In de gegevens van Van Oorschot wordt niet ingegaan op de karakteristieken van de stijlvoet-verbinding.

In *Afbeelding 2.2* zijn de POINT-verbindingen waarmee de stijlvoeten zijn gemodelleerd, weergegeven met een rood driehoekje met de nummers 300 t/m 305; de POINT-verbindingen 300 t/m 302 voor het eerste element en de POINT-verbindingen 303 t/m 305 voor het tweede element. In *Tabel 6a en 6b* staan de parameterwaarden van de zes componenten van deze POINT-verbindingen waarmee de stijfheid en sterkte van de verbinding tussen de stijlvoet en de bodem wordt beschreven. Deze parameterwaarden zijn niet gebaseerd op gegevens van Van Oorschot, maar zijn een eerste schatting om het gewenste gedrag van de constructie te genereren.

De elementen worden onderling verbonden met een POINT-verbinding en een BEAM-verbinding. Met de POINT-verbinding wordt de stijfheid en sterkte gemodelleerd van de pijp die onder in de TRI-angel1 is aangebracht. De POINT-verbinding, in *Afbeelding 2.2* aangegeven met nummer 100, valt samen met de stijlverbinding POINT 303. De parameters van de krachtcomponenten zijn opgenomen in *Tabel 7a*, de parameters van de momentcomponenten in *Tabel 7b*.

		x	y	z
Type		TELP	TELP	TELP
c	[N/m]	1*10 ⁶	1*10 ⁶	1*10 ⁶
d	[N.s/m]	1*10 ³	1*10 ³	1*10 ³
F _{lim+}	[N]	1*10 ⁴	1*10 ⁴	1*10 ⁶
c _{plas}	[N/m]	0	0	0
b ₊	[m]	1,9	1,9	1,9
F _{lim-}	[N]	-1*10 ⁴	-1*10 ⁴	-1*10 ⁶
b ₋	[m]	-1,9	-1,9	-1,9
H _{lim}	[N]	1*10 ¹⁰	1*10 ¹⁰	1*10 ¹⁰

Tabel 6a. *Parameters van de drie krachtcomponenten van de POINT 3** ter modellering van de stijlvoet.*

		x	y	z
Type		TELP	TELP	TELP
c	[Nm/rad]	$1 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$
d	[Nm.s/rad]	10	10	10
M_{lim+}	[Nm]	$6 \cdot 10^3$	$6 \cdot 10^3$	$6 \cdot 10^3$
C_{plas}	[Nm/rad]	0	100	100
b_+	[rad]	3	3	3
M_{lim-}	[Nm]	$-6 \cdot 10^3$	$-6 \cdot 10^3$	$-6 \cdot 10^3$
b_-	[rad]	-3	-3	-3
H_{lim}	[Nm]	10	10	10

Tabel 6b. Parameters van de drie momentcomponenten van de POINT 3** ter modellering van de stijlvoet.

		x	y	z
Type		TNULL	TELP	TELP
c	[N/m]	-	$1 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^7$
d	[N.s/m]	-	$1 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^3$
F_{lim+}	[N]	-	$3,7 \cdot 10^6$	$3,7 \cdot 10^6$
C_{plas}	[N/m]	-	0	0
b_+	[m]	-	5	5
F_{lim-}	[N]	-	$-3,7 \cdot 10^6$	$-3,7 \cdot 10^6$
b_-	[m]	-	-5	-5
H_{lim}	[N]	-	$1 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^7$

Tabel 7a. Parameters van de drie krachtcomponenten van de POINT 100 ter modellering van de pijp.

		x	y	z
Type		TELP	TNULL	TNULL
c	[Nm/rad]	$9 \cdot 10^4$	-	-
d	[Nm.s/rad]	$1 \cdot 10^2$	-	-
M_{lim+}	[Nm]	$1,4 \cdot 10^3$	-	-
C_{plas}	[Nm/rad]	0	-	-
b_+	[rad]	2	-	-
M_{lim-}	[Nm]	$-1,4 \cdot 10^3$	-	-
b_-	[rad]	-2	-	-
H_{lim}	[Nm]	$1 \cdot 10^2$	-	-

Tabel 7b. Parameters van de drie momentcomponenten van de POINT 100 ter modellering van de pijp.

Met de BEAM-verbinding wordt de stijfheid en sterkte van de vier geleide-railplanken gemodelleerd. Er is geen rekening gehouden met eventuele diagonalen. De BEAM-verbinding is in *Afbeelding 2.2* in *Bijlage 1* aangegeven met nummer 200. De parameters van BEAM 200 staan in *Tabel 8a* (kracht) en *Tabel 8b* (momenten).

		x
Type		TPLAY
c	[N/m]	$4 \cdot 10^8$
d	[N.s/m]	$1 \cdot 10^5$
F_{lim+}	[N]	$1,7 \cdot 10^6$
C_{plas}	[N/m]	0
b_+	[m]	0,243
F_{lim-}	[N]	$-1,7 \cdot 10^6$
b_-	[m]	-0,243
F_{play+}	[N]	$7,5 \cdot 10^4$
p_+	[m]	0,003
F_{play-}	[N]	$-7,5 \cdot 10^4$
p_-	[m]	0,003
H_{lim}	[N]	$1 \cdot 10^7$

Tabel 8a. *Parameters van de krachtcomponent van de BEAM 200 ter modellering van de stijfheid en sterkte van de TRI-angel1*

		y1	z1	y2	z2	x
Type		TELP	TELP	TELP	TELP	TNULL
c	[Nm/rad]	$8,5 \cdot 10^7$	$8,5 \cdot 10^7$	$8,5 \cdot 10^7$	$8,5 \cdot 10^7$	-
d	[Nm.s/rad]	$1 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^4$	-
M_{lim+}	[Nm]	$2 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$	-
C_{plas}	[Nm/rad]	0	0	0	0	-
b_+	[rad]	2	2	2	2	-
M_{lim-}	[Nm]	$-2 \cdot 10^5$	$-2 \cdot 10^5$	$-2 \cdot 10^5$	$-2 \cdot 10^5$	-
b_-	[rad]	-2	-2	-2	-2	-
H_{lim}	[Nm]	$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^5$	-

Tabel 8b. *Parameters van de vijf momentcomponenten van de BEAM 200 ter modellering van de stijfheid en sterkte van de TRI-angel1*

3.2. Simulaties

In *Bijlage 2* zijn de resultaten opgenomen van de laatste simulatie van proef TB11 met de TRI-angel1 en de resultaten van de laatste simulatie van proef TB81. De gepresenteerde resultaten van de botsingen met de TRI-angel1 zijn verkregen met een aantal parameterwijzigingen ten opzichte van het model van de TRI-angel1 zoals beschreven in de vorige paragraaf. De gewijzigde parameterwaarden zijn de volgende:

- De sterkte van de buigcomponenten (zie M_{lim} in *Tabel 8b* van de BEAM die de modelementen met elkaar verbindt is verhoogd van $2 \cdot 10^5$ Nm tot $4 \cdot 10^5$ Nm. Deze verandering was nodig om de booglengte van de uitbuiging van de TRI-angel1 te vergroten tijdens de aanrijding met de trekker met oplegger.
- De breekrotatie om de x-as van de POINT-verbindingen (zie b-waarden van x-component in *Tabel 6b*) waarmee de stijlvoet is gemodelleerd is verlaagd van 0,5 rad naar 0,354 rad (=20,3°). Deze verandering was nodig om een lagere ASI-waarde van de kleine personenauto te verkrijgen tijdens de proef TB11.

In *Afbeelding 2.3a en 2.3b* van *Bijlage 2* is een overzicht afgedrukt van het verloop van de botsing tussen de kleine personenauto en de TRI-angel1. Na de botsing gedraagt het voertuig zich vrij onrustig. Dit gedrag wordt veroorzaakt door het diepe inveren van het voertuig tijdens de botsing als gevolg van de overhangende constructie. Van de drie modelementen die de grootste optredende hoekverdraaiing ondergaan is in *Afbeelding 2.4* van *Bijlage 2* een grafiek opgenomen met de plaats als functie van de tijd en de rotatie als functie van de tijd. Uit de grafieken van *Afbeelding 2.4* blijkt dat de rotatie van de modelementen klein zijn. De maximaal optredende rotatie is 3°. Tien modelementen ondergaan een rotatie groter dan 1°. De grootste ASI-waarde, bepaald in het zwaartepunt van het voertuig, treedt op na 0,2 s en heeft de waarde 1,15 (*Afbeelding 2.6* in *Bijlage 2*). Deze waarde is groter dan de beoogde ASI-waarde van 1. De ASI-waarde is echter vrij laag in verhouding tot de kleine uitbuiging/rotatie van de TRI-angel1. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door het relatief hoge contactpunt tussen het voertuig en de constructie, waar het voertuigmodel minder 'hard' is dan ter hoogte van de wielen. Het voertuig neemt dus meer botsenergie op dan wanneer het contactpunt lager had gelegen.

In *Bijlage 2* is tevens een selectie van gegevens gepresenteerd van de resultaten van de botsing tussen de trekker met oplegger en de TRI-angel1. Het verloop van de beweging van het voertuig is rustig, zoals uit de *Afbeeldingen 2.7a en 2.7b* van *Bijlage 2* blijkt. De maximale uitbuiging treedt op ter hoogte van STRUCTURE 33 (zie *Afbeelding 2.8*) en bedraagt 1,3 m. Hierbij is de maximale rotatie 31°. Van zes modelementen bezwijken de stijlvoeten. Van drie stijlvoeten die zijn afgebroken is in *Afbeelding 2.9* van *Bijlage 2* een grafiek met de optredende krachten als functie van de tijd gegeven en een grafiek met de optredende momenten als functie van de tijd. Het breken van de POINT-verbindingen waarmee de stijlvoeten zijn gemodelleerd is het gevolg van het te groot worden van hoek in de x-component. Uit *Afbeelding 2.10* van *Bijlage 2* blijkt dat de pijp tordeert voorbij de plasticiteitsgrens. De grafieken met krachten en momenten als functie van de tijd van drie BEAM-elementen waarmee de stijfheid en sterkte van de planken zijn gemodelleerd staan afgebeeld in *Afbeelding 2.11* van *Bijlage 2*. Het betreft hier de drie BEAM's waarin de grootste krachten in de x-component optreden in de TRI-angel1. De maximaal optredende kracht in x-richting, dus in langsricting van de constructie, bedraagt $8,2 \cdot 10^5$ N. In de buigcomponenten van de afgebeelde BEAM's treden momenten op tot in het plastische traject.

3.3. Conclusies

De resultaten van de simulaties van de TRI-angel1 voldoen nog niet geheel aan de gestelde eisen, maar al wel voor een groot deel. De constructie voldoet naar verwachting aan de tests TB11 en TB81 zoals omschreven in NEN 1317-2 (CEN, 1998b). De uitbuiging bij test TB81 blijft met 1.3 m onder de gestelde eis van 1,5 m. Alleen de ASI-waarde van de kleine personenauto bij proef TB11 is met 1,15 iets hoger dan de vereiste waarde van 1,0.

Het probleem van het eerste ontwerp is, dat voor de botsing met de trekker met oplegger een vrij hoge buigstijfheid en sterkte om de y- en z-as van de constructie nodig is. Deze hoge buigstijfheid en sterkte maakt het bij de botsing met de kleine personenauto moeilijk de constructie lokaal om de x-as te laten roteren.

De conclusie uit de resultaten van de simulaties van de het eerste ontwerp is dat het ontwerp zeker mogelijkheden biedt om aan de gestelde eisen te voldoen.

De volgende twee aanbevelingen worden hierbij gedaan:

- Er moet beter gekeken worden naar de oorzaak van de lage ASI-waarde in de kleine personenauto ondanks de relatief kleine verplaatsing van de constructie tijdens de botsing.
- De hoek van de geleiderailplanken met de verticaal is te groot, waardoor het contactpunt tussen de kleine personenauto en de TRI-angel1 relatief hoog komt te liggen. Dit ongewenste effect is nog erger bij kleinere inrijhoeken en voertuigen met een korte neus. Een mogelijke verbetering is, dat de geleiderails met een scharnier verticaal aan de hoekpunten van de stijlen worden opgehangen. Om weerstand te kunnen opbouwen tijdens een aanrijding zou tussen de planken en de stijl een vervormbaar element moeten worden geplaatst. De stijfheid van het vervormbaar element moet zodanig worden gekozen, dat tijdens het roteren van de constructie om de x-as, ter hoogte van de stijlvoet, de geleiderail planken verticaal blijven.

4. TRI-angel2

4.1. Model

Voor het model van het tweede ontwerp van de TRI-angel, de TRI-angel2, zijn de gegevens ontleend aan de constructietekening van J. Thomas (1998), gedateerd 28-11-98.

In *Afbeelding 3.1* in *Bijlage 3* is een bovenaanzicht en een zijaanzicht van twee modelementen van ieder vier meter lengte gegeven. Bovendien is in *Afbeelding 3.1* een dwarsdoorsnede van het modelement gegeven.

De traagheidseigenschappen in het TRI-angel2 model zijn gelijk genomen aan de traagheidseigenschappen van het eerste ontwerp van de TRI-angel (zie *Tabel 5*).

Net als bij het eerste ontwerp van de TRI-angel is de stijlfstand 1,333 m, zodat er per modelement van vier meter drie palen aanwezig zijn. De stijlvoetverbindingen zijn ieder gemodelleerd met een POINT-verbinding. Voor het eerste element zijn de verbindingen aangegeven met een rood driehoekje genummerd van 300 t/m 301. In de *Tabellen 9a en 9b* staan de gegevens van de zes componenten van genoemde POINT-verbindingen, waarmee de stijfheid en de sterkte van de verbinding tussen de stijlvoet en de bodem wordt beschreven. Voor het initieel bepalen van de parameters in *Tabel 9a en 9b* is als uitgangspunt genomen dat de stijlvoet (10 mm dik) met behulp van vier M24-bouten kwaliteit 8.8 op een betonnen fundatie wordt geplaatst. Verder is aangenomen dat de boutverbinding de zwakste schakel in de keten van het bezwijken van de stijl is. De z-component van de kracht is minder stijf genomen om redenen van numerieke stabiliteit van het programma.

		x	y	z
Type		TELP	TELP	TELP
c	[N/m]	$6,4 \cdot 10^7$	$6,4 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^6$
d	[N.s/m]	$1 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^3$
F_{lim+}	[N]	$3,2 \cdot 10^5$	$3,2 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^6$
C_{plas}	[N/m]	0	0	0
b_+	[m]	0,01	0,01	1,9
F_{lim-}	[N]	$-3,2 \cdot 10^5$	$-3,2 \cdot 10^5$	$-1 \cdot 10^6$
b_-	[m]	-0,01	-0,01	-1,9
H_{lim}	[N]	$1 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^1$

Tabel 9a. *Parameters van de drie krachtcomponenten van de POINT 3** ter modellering van de stijlvoet.*

		x	y	z
Type		TELP	TELP	TELP
c	[Nm/rad]	$5,2 \cdot 10^6$	$6,8 \cdot 10^6$	$7,2 \cdot 10^5$
d	[Nm.s/rad]	10	10	10
M_{lim+}	[Nm]	$5,5 \cdot 10^4$	$6,3 \cdot 10^4$	$3,4 \cdot 10^4$
C_{plas}	[Nm/rad]	0	0	0
b_+	[rad]	0,02	0,02	0,09
M_{lim-}	[Nm]	$-5,5 \cdot 10^4$	$-3,2 \cdot 10^4$	$-3,4 \cdot 10^4$
b_-	[rad]	-0,02	-0,02	-0,09
H_{lim}	[Nm]	$1 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^3$

Tabel 9b. Parameters van de drie momentcomponenten van de POINT 3** ter modellering van de stijlvoet.

Met de verbindings-BEAM's als 500 en 600 wordt de buigstijfheid en buigsterkte, de langs-stijfheid en -sterkte en de torsie-stijfheid en -sterkte van een vier meter lang stuk van de TRI-angel2 beschreven. In *Afbeelding 3.1* zijn beide BEAM's in het boven- en zijaanzicht aangegeven met een rode lijn met driehoekjes op de einden, in de dwarsdoorsnede zijn alleen de rode driehoekjes zichtbaar. Bij de modellering is aangenomen dat de geleiderails de enige verbinding vormen tussen de stijlen. Iedere BEAM wordt gebruikt om de eigenschappen van drie planken te modelleren. In *Tabel 10a* staan de parameters van de krachtcomponent in x-richting en in *Tabel 10b* de parameters van de vijf momentcomponenten van de verbindende BEAM's tussen de elementen.

Ter hoogte van de stijlvoeten zijn in het model kleine contactcilinders aangebracht. In *Afbeelding 3.1* in *Bijlage 3* zijn deze contactcilinders in blauw aangegeven. Deze contactcilinders zorgen ervoor dat het element op de grond kan staan nadat de stijlvoetverbindingen verbroken zijn.

		x
Type		TPLAY
c	[N/m]	$1,9 \cdot 10^8$
d	[N.s/m]	$1 \cdot 10^5$
F_{lim+}	[N]	$1,2 \cdot 10^6$
C_{plas}	[N/m]	0
b_+	[m]	0,009
F_{lim-}	[N]	$-1,2 \cdot 10^6$
b_-	[m]	-0,009
F_{play+}	[N]	$1 \cdot 10^4$
p_+	[m]	0,003
F_{play-}	[N]	$-1 \cdot 10^4$
p_-	[m]	0,003
H_{lim}	[N]	$1 \cdot 10^5$

Tabel 10a. Parameters van de krachtcomponent van de BEAM's 5**/6** waarmee de modelementen met elkaar worden verbonden.

		y1	z1	y2	z2	x
Type		TELP	TELP	TELP	TELP	TELP
c	[Nm/rad]	$3,2 \cdot 10^7$	$1,7 \cdot 10^6$	$3,2 \cdot 10^7$	$1,7 \cdot 10^7$	$3,2 \cdot 10^2$
d	[Nm.s/rad]	$1 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^4$
M_{lim+}	[Nm]	$1,6 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^4$	$1,6 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^4$	$1,7 \cdot 10^2$
C_{plas}	[Nm/rad]	0	0	0	0	0
b_+	[rad]	10	10	10	10	10
M_{lim-}	[Nm]	$-1,6 \cdot 10^5$	$-1,2 \cdot 10^4$	$-1,6 \cdot 10^5$	$-1,2 \cdot 10^4$	$-1,7 \cdot 10^2$
b_-	[rad]	-10	-10	-10	-10	-10
H_{lim}	[Nm]	$1 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^3$	10

Tabel 10b. Parameters van de vijf momentcomponenten van de BEAM's 5**/6** waarmee de elementen met elkaar worden verbonden.

4.2. Simulaties

In de *Bijlage 3* is een selectie van gegevens gepresenteerd van resultaten van de laatste simulatie met de TRI-angel2 van respectievelijk proef TB11 en TB81. Een aantal parameterwaarden zijn gewijzigd ten opzichte van de parameters gegeven in het vorige hoofdstuk om tot de gepresenteerde uitkomsten te komen. Een aantal parameters van alle componenten, behalve de kracht in z-richting, van de POINT waarmee de stijlvoet is gemodelleerd (zie *Tabel 9a en 9b*), hebben andere waarden gekregen. Om een grotere doorbuiging mogelijk te maken bij de aanrijding met de trekker met oplegger is de plasticiteitsgrens F_{lim} van de kracht component in y-richting verlaagd van $3,2 \cdot 10^5$ N naar $0,2 \cdot 10^5$ N. Zoals in het vorige hoofdstuk besproken, zijn de parameter waarden van de POINT waarmee de stijlvoet is gemodelleerd op een boutverbinding met 4 M24-bouten. Hierin is dus geen rekening gehouden met de flexibiliteit die hoger in de constructie zit. Bovendien is de constructie gemodelleerd door middel van starre, vier meter lange elementen met drie stijlvoeten. In het model zijn daardoor schrankbewegingen onmogelijk, iets dat in de praktijk zeker zal optreden. Voornoemde overwegingen en een aantal simulaties hebben uiteindelijk geresulteerd in de volgende parameterwaarden:

- In de krachtcomponent in x-richting is een speling mogelijk gemaakt van $2 \times 0,097$ m, waarbij een kracht van $\pm 1 \cdot 10^4$ optreedt.
- Voor de momentcomponent om de x-as is de stijfheidparameter (c) verlaagd van $5,2 \cdot 10^6$ Nm/rad naar $5,3 \cdot 10^5$, de plasticiteitsgrens M_{lim} is verlaagd van $5,5 \cdot 10^4$ naar $2,8 \cdot 10^4$ en de breekrotatie b is verhoogd naar 0,17 rad.
- Voor de momentcomponent om de y-as is de stijfheidparameter (c) verlaagd van $6,8 \cdot 10^6$ Nm/rad naar $6,0 \cdot 10^5$, de plasticiteitsgrens M_{lim} is verlaagd van $6,3 \cdot 10^4$ naar $3,2 \cdot 10^4$ en de breekrotatie b is verhoogd naar 0,17 rad.
- Voor de momentcomponent om de z-as is de stijfheidparameter (c) verlaagd van $7,2 \cdot 10^5$ Nm/rad naar $3,3 \cdot 10^5$, de plasticiteitsgrens M_{lim} is verlaagd van $3,4 \cdot 10^4$ naar $1,7 \cdot 10^4$ en de breekrotatie b is verhoogd naar 0,17 rad.

In *Afbeelding 3.2* van *Bijlage 3* wordt een overzicht gegeven van het verloop van de botsing tussen de kleine personenwagen tegen de TRI-angel2-

constructie. De grootste verplaatsingen treden op ter hoogte van de eerste drie model-elementen van STRUCTURE 32. De grafieken met de plaats als functie van de tijd en de rotatie als functie van de tijd van deze drie model-elementen zijn afgedrukt in *Afbeelding 3.3* van *Bijlage 3*. De grootste verplaatsing bedraagt 0,3 meter. Er vindt uitbuiging plaats over een lengte van 20 meter. Van vijf model-elementen breken de stijlvoeten af, zoals blijkt uit de *Afbeeldingen 3.4a en 3.4b*. De maximaal optredende ASI-waarde in het zwaartepunt van het voertuig is 1,15 (zie *Afbeelding 3.6* van *Bijlage 3*)

In de *Afbeeldingen 3.7a en 3.7b* van *Bijlage 3* staat het verloop van de botsing tussen de trekker met oplegger en de TRI-angel2 afgebeeld. De trekker met oplegger wordt rustig omgeleid. De maximaal optredende verplaatsing in y-richting van de constructie bedraagt 3,1 meter. Dit is aan de hoge kant. Hierbij treden hoekverdraaiingen om de x-as op van 8° . In *Afbeelding 3.9* van *Bijlage 3* staan de krachten en momenten als functie van de tijd afgebeeld van de BEAM's tussen de model-elementen waarin de grootste trekkrachten optreden tijdens de simulatie. De krachten in x-richting blijven in het elastische deel van de kracht-verplaatsing-curve. De maximaal optredende kracht bedraagt $1,2 \cdot 10^6$ N. In een eerdere simulatie was de plasticiteitsgrens F_{lim} van de kracht component in y-richting vier maal zo groot genomen als in de besproken simulatie, dus $0,8 \cdot 10^5$ N. Uit deze simulatie bedroeg de uitbuiging van de constructie bij de botsing met de trekker met oplegger 1,7 m. De grootst optredende ASI-waarde in het zwaartepunt van de kleine personenauto bedroeg daarbij 1,47, hetgeen iets hoger is dan de 1,4 die is toegestaan volgens eisen van de CEN.

4.3. Conclusies

Uit de simulaties van de proeven TB11 en TB81 met TRI-angel2 blijkt dat verwacht kan worden dat de constructie in de praktijk aan de eisen voldoet die worden gesteld in NEN 1317-2 (CEN, 1998b). Ervaring leert dat de met simulatie gevonden ASI-waarden in de praktijk iets lager uitvallen, zodat de gesimuleerde waarde van 1,47 bij proef TB11 in de praktijk de in de norm gestelde eis van 1,4 niet zal overschrijden. Een ASI-waarde van 1,47 is echter wel ruim boven de aan de constructie gestelde eis dat de ASI-waarde van de kleine personenauto niet groter mag zijn dan 1,0. Uit de simulatie van proef TB81 blijkt dat de gestelde eis van een uitbuiging van maximaal 1,5 m niet wordt gehaald.

In het tweede ontwerp staan de bovenste twee geleiderails bijna verticaal. Hierdoor treden tijdens de aanrijding slechts kleine hoekverdraaiingen in de stijlvoet op om de x-as. Het laten bezwijken van de stijlvoet in de moment-component om de x-as in de stijlvoet, zoals bij het eerste ontwerp is hierdoor niet mogelijk. Het bezwijken wordt gestuurd in de krachtcomponent in y-richting van de stijlvoet. Met dit bezwijkmechanisme van de stijlvoet is het niet gelukt het TRI-angel2 model zodanig in te richten dat een beperkte uitbuiging bij de aanrijding met de trekker met oplegger gecombineerd wordt met een ASI-waarde in het voertuig, niet groter dan 1,0.

De conclusie uit de uitgevoerde simulaties luidt dan ook dat het beoogde bezwijkmechanisme in de TRI-angel2 niet aan de gestelde eisen kan voldoen en dat verdere ontwikkeling van deze constructie weinig zinvol is.

5. TRI-angel met scharnier

Bij de ontwikkeling van de TRI-angel met scharnier is een andere werkwijze gekozen dan bij de twee voorgaande versies van de TRI-angel het geval was. Bij de TRI-angel1 en TRI-angel2 werd een VEDYAC-model gemaakt op basis van een eerder gemaakt ontwerp, waarna er gesimuleerd kon worden. Bij de TRI-angel met scharnier is op grond van de opgedane ervaring bij het onderzoek van de twee eerdere versies, direct een VEDYAC-model ontwikkeld. Dit VEDYAC is al simulerend geoptimaliseerd. Daarna is het ontwikkelde model door de Bouwdienst omgezet naar een ontwerptekening.

De ontwikkeling van het model van de TRI-angel met scharnier is een nadere uitwerking van de tweede aanbeveling gedaan naar aanleiding van de simulaties van de TRI-angel1 (§3.3). Samengevat bevat de tweede aanbeveling twee punten:

- De geleideplanken moeten scharnierend worden opgehangen, zodat deze zoveel mogelijk verticaal staan bij de aanrijding met de kleine personenauto.
- Om de verticale stand van de planken te kunnen sturen is een energie-absorberend element tussen de planken aan voor- en achterzijde van de constructie nodig.

Aanvullend heeft de werkgroep gesteld dat de verbinding tussen constructie en fundatie niet mag breken als gevolg van een aanrijding. De achterliggende gedachte was, dat wanneer de verbinding breekt, het gedrag van de constructie slecht voorspelbaar wordt en daarmee onaanvaardbaar. Daar het roteren van de TRI-angel één van de grondgedachten was bij de lancering van het idee, is ervoor gekozen de constructie met een scharnier op de fundatie te plaatsen. Vandaar ook de naamgeving TRI-angel met scharnier.

5.1. Model

De opzet van het model is anders dan de opzet gebruikt bij de twee voorgaande ontwerpen. De modellen van de TRI-angel1 en TRI-angel2 bestonden over de gehele lengte uit model-elementen met een lengte van 4 meter. Bij het model van de TRI-angel met scharnier is in de zone waar de botsing met het voertuig een grote invloed heeft op de beweging van de constructie de lengte van model-element 1.333 meter. Dit komt overeen met de afstand tussen de staanders. In de zone van de constructie waar de invloed slechts gering is, is de lengte van een model-element 4 meter. In de volgende beschrijving van het model wordt alleen het deel in de botszone beschreven. De parameters die gebruikt zijn bij de 4 meter lange model-elementen zijn direct van de parameters in de botszone afgeleid.

5.1.1. Traagheden en verbindingen

In *Afbeelding 4.1* in *Bijlage 4* is een bovenaanzicht en een zijaanzicht van twee model-elementen van ieder 1.333 meter lengte gegeven. Bovendien is in *Afbeelding 4.1* een dwarsdoorsnede van het modelement afgedrukt. Ieder model-element in de botszone bevat een paal/staander.

In *Afbeelding 4.1* zijn de onderdelen van constructie te onderscheiden. In het blauw zijn de staander en de planken afgedrukt. De staander, de twee planken aan de voorzijde en de twee planken aan de achterzijde zijn ieder afzonderlijk gemodelleerd met een MASS. De parameters van de MASS elementen zijn opgenomen in *Tabel 11*.

MASS Name	gewicht [kg]	I_x [kg/m ²]	I_y [kg/m ²]	I_z [kg/m ²]
vakwerk	54	12,8	5	8
plank (voor)	30	0,9	5,2	4,4
plank (achter)	30	0,9	5,2	4,4
koppelschijf	5	0,5	0,5	0,5

Tabel 11. *Traagheidsgrootheden van de vier MASS elementen ter modellering van de TRI-angel met scharnier.*

Het scharnier tussen staander en fundatie en het scharnier tussen de staander en de planken zijn gemodelleerd met POINT-verbindingen. Deze zijn in *Afbeelding 4.1* aangegeven met rode driehoekjes. De parameters van deze verbindingen zijn afgedrukt in *Tabel 12a en b* voor het scharnier tussen staander en fundatie en in *Tabel 13a en b* voor het scharnier tussen staander en planken.

In *Afbeelding 4.1* is met groen de zogenaamde koppelschijf getekend. De koppelschijf is een onderdeel van het mechanisme dat de beweging koppelt van de planken aan de voorzijde en de planken aan de achterzijde van de constructie. Het koppelstuk is een MASS (zie *Tabel 11*) die met behulp van een POINT-verbinding (zie *Tabel 14a en b*) aan de staander is vastgemaakt. Verder zijn er tussen de planken aan voor- en achterzijde en de koppelschijf ROD-verbindingen aangebracht. De ROD-verbindingen zijn in *Afbeelding 4.1* met rode lijnen met op de uiteinden rode driehoekjes aangegeven. De parameters van deze ROD-verbinding zijn in *Tabel 15* opgenomen.

		x	y	z
Type		TELP	TELP	TELP
c	[N/m]	$1 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^7$
d	[N.s/m]	$1 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^3$
F_{lim+}	[N]	$1 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^6$
c_{plas}	[N/m]	0	0	0
b_+	[m]	0,1	0,1	0,1
F_{lim-}	[N]	$-1 \cdot 10^6$	$-1 \cdot 10^6$	$-1 \cdot 10^6$
b_-	[m]	-0,1	-0,1	-0,1
H_{lim}	[N]	10	10	10

Tabel 12a. *Parameters van de drie krachtcomponenten van de POINT 3** ter modellering van het scharnier tussen staander en fundatie.*

		x	y	z
Type		TELP	TELP	TELP
c	[Nm/rad]	$1 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^5$
d	[Nm.s/rad]	$5 \cdot 10^2$	$1 \cdot 10^2$	$1 \cdot 10^2$
M_{lim+}	[Nm]	$3 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^5$
C_{plas}	[Nm/rad]	0	0	0
b_+	[rad]	2	1	1
M_{lim-}	[Nm]	$-3 \cdot 10^3$	$-1 \cdot 10^5$	$-1 \cdot 10^5$
b_-	[rad]	-2	-1	-1
H_{lim}	[Nm]	100	$1 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^4$

Tabel 12b. Parameters van de drie momentcomponenten van de POINT 3** ter modellering van het scharnier tussen staander en fundatie.

		x	y	z
Type		TELP	TELP	TELP
c	[N/m]	$1 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^7$
d	[N.s/m]	$1 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^3$
F_{lim+}	[N]	$1 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^6$
C_{plas}	[N/m]	0	0	0
b_+	[m]	0,1	0,1	0,1
F_{lim-}	[N]	$-1 \cdot 10^6$	$-1 \cdot 10^6$	$-1 \cdot 10^6$
b_-	[m]	-0,1	-0,1	-0,1
H_{lim}	[N]	$1 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^4$

Tabel 13a. Parameters van de drie krachtcomponenten van de POINT 4** ter modellering van het scharnier tussen staander en planken.

		x	y	z
Type		TNULL	TELP	TELP
c	[Nm/rad]		$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^5$
d	[Nm.s/rad]		$1 \cdot 10^2$	$1 \cdot 10^2$
M_{lim+}	[Nm]		$1 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^4$
C_{plas}	[Nm/rad]		0	0
b_+	[rad]		0,3	0,3
M_{lim-}	[Nm]		$-1 \cdot 10^4$	$-1 \cdot 10^4$
b_-	[rad]		-0,3	-0,3
H_{lim}	[Nm]		$1 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^3$

Tabel 13b. Parameters van de drie momentcomponenten van de POINT 4** ter modellering van het scharnier tussen staander en planken.

		x	y	z
Type		TELP	TELP	TELP
c	[N/m]	$5 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^6$
d	[N.s/m]	$1 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^3$
F_{lim+}	[N]	$1 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^6$
C_{plas}	[N/m]	0	0	0
b_+	[m]	0,1	0,1	0,1
F_{lim-}	[N]	$-1 \cdot 10^6$	$-1 \cdot 10^6$	$-1 \cdot 10^6$
b_-	[m]	-0,1	-0,1	-0,1
H_{lim}	[N]	$1 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^4$

Tabel 14a. Parameters van de drie krachtcomponenten van de POINT 6** ter modellering van het scharnier tussen staander en koppelschijf.

		x	y	z
Type		TELP	TELP	TELP
c	[Nm/rad]	$5 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^4$
d	[Nm.s/rad]	$1 \cdot 10^2$	$1 \cdot 10^2$	$1 \cdot 10^2$
M_{lim+}	[Nm]	$5 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^3$
C_{plas}	[Nm/rad]	0	0	0
b_+	[rad]	2	2	2
M_{lim-}	[Nm]	$-5 \cdot 10^5$	$-5 \cdot 10^5$	$-5 \cdot 10^3$
b_-	[rad]	-2	-2	-2
H_{lim}	[Nm]	$1 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^3$

Tabel 14b. Parameters van de drie momentcomponenten van de POINT 6** ter modellering van het scharnier tussen staander en koppelschijf.

		x
Type		TELP
c	[N/m]	$5 \cdot 10^7$
d	[N.s/m]	$1 \cdot 10^3$
F_{lim+}	[N]	$1 \cdot 10^5$
C_{plas}	[N/m]	0
b_+	[m]	0,2
F_{lim-}	[N]	$-1 \cdot 10^5$
b_-	[m]	-0,2
H_{lim}	[N]	$1 \cdot 10^5$

Tabel 15. Parameters van de krachtcomponent van de ROD's 7** waarmee de koppelschijf wordt verbonden met de planken voor en achter.

Tenslotte zijn er ter modellering van de stijfheid en sterkte van de planken (1.333 m) aan voor- en achterzijde van de constructie twee BEAM-verbindingen aangebracht (Zie *Tabel 16a en b*). Deze zijn op dezelfde wijze als de ROD-verbindingen in *Afbeelding 4.1* weergegeven.

		x
Type		TPLAY
c	[N/m]	$2 \cdot 10^8$
d	[N.s/m]	$1 \cdot 10^4$
F _{lim+}	[N]	$1 \cdot 10^7$
C _{plas}	[N/m]	0
b ₊	[m]	1
F _{lim-}	[N]	$-1 \cdot 10^7$
b ₋	[m]	-1
F _{play+}	[N]	$1 \cdot 10^4$
p ₊	[m]	0,002
F _{play-}	[N]	$-1 \cdot 10^4$
p ₋	[m]	0,002
H _{lim}	[N]	$5 \cdot 10^5$

Tabel 16a. *Parameters van de krachtcomponent van de BEAM's 2**/3** ter modellering van de stijfheid en sterkte van de planken.*

		y1	z1	y2	z2	x
Type		TELP	TELP	TELP	TELP	TELP
c	[Nm/rad]	$4,1 \cdot 10^6$	$1,7 \cdot 10^6$	$4,1 \cdot 10^6$	$1,7 \cdot 10^6$	$6,0 \cdot 10^4$
d	[Nm.s/rad]	$1 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^2$
M _{lim+}	[Nm]	$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^3$
C _{plas}	[Nm/rad]	0	0	0	0	0
b ₊	[rad]	1	1	1	1	1
M _{lim-}	[Nm]	$-1 \cdot 10^5$	$-1 \cdot 10^5$	$-1 \cdot 10^5$	$-1 \cdot 10^5$	$-1 \cdot 10^3$
b ₋	[rad]	-1	-1	-1	-1	-1
H _{lim}	[Nm]	$1 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^4$	500

Tabel 16b. *Parameters van de vijf momentcomponenten van de BEAM's 2**/3** ter modellering van de stijfheid en sterkte van de planken.*

De werking van de TRI-angel met scharnier is als volgt (zie ook *Afbeelding 4.2* in *Bijlage 4*). Wanneer de constructie wordt aangereden zullen de planken aan de voorzijde gaan roteren om het scharnierpunt tussen plank en staander. Deze rotatie is om de lokale x-as die initieel parallel loopt aan de globale x-as aangegeven in *Afbeelding 4.1*. Bovendien zal de staander roteren om het scharnier tussen staander en fundatie. De rotatie van de planken aan de voorzijde wordt via de ROD-verbinding overgebracht op de koppelschijf. De koppelschijf zal gaan roteren om de lokale z-as van het assenkruis dat verbonden is aan de staander. Deze rotatie wordt tegengewerkt door de z-rotatiecomponent (zie *Tabel 13b*) van

de POINT-verbinding waarmee de koppelschijf aan de staander is opgehangen. Door de rotatie van de koppelschijf worden de planken aan de achterzijde van de constructie door middel van de ROD-verbinding naar binnen getrokken. Deze beweging van de planken aan de achterzijde maakt het mogelijk dat de staander om de globale x-as kan roteren zonder dat de onderste plank aan de achterzijde zich kan vastgraven in de bodem. De eindsituatie is in de rechter figuur in *Afbeelding 4.2* getekend. De plank aan de achterzijde ligt op de bodem terwijl de planken aan de voorzijde tegen de staander zijn gedrukt. Door het kantelen van de staander gaan de planken aan de voorzijde omhoog, zodat bij aanrijdingen met voertuigen met hoog zwaartepunt kantelen van het voertuig wordt voorkomen.

Plastische vervorming in drie onderdelen van de constructie zorgen voor de energieabsorptie:

- de plastische vervorming van de geleiderailplanken;
- de plastische vervorming in de z-rotatiecomponent in het scharnier tussen koppelschijf en staander;
- de plastische vervorming in x-rotatiecomponent in het scharnier tussen staander en fundatie.

5.1.2. Contactgeometrie

In *Afbeelding 4.3* van *Bijlage 4* is nogmaals een boven-, voor- en zijaanzicht van het model weergegeven. In *Afbeelding 4.3* is alleen de contactgeometrie van het model van de TRI-angel met scharnier afgedrukt. Daarbij zijn de volgende afkortingen gebruikt: POL voor POLYHEDRON, CYL voor CYLINDER.

POLYHEDRON 3** zorgt voor de contacten tussen planken aan de voorzijde met het voertuig. De contactlichamen POLYHEDRON 7** en CYLINDER 102 zorgen ervoor dat er krachten gegenereerd worden op het moment dat de planken aan de voorzijde de staander raakt. Aan de achterzijde worden deze contactkrachten gegenereerd door POLYHEDRON 8** en CYLINDER 101. De CYLINDER's 4** en 5** zorgen voor de contactkrachten tussen de bodem en de planken aan de achterzijde.

5.2. Simulaties

In de *Bijlage 4* is een selectie van gegevens gepresenteerd van resultaten van de laatste simulatie met de TRI-angel met scharnier van respectievelijk proef TB11 en TB81. Bij proef TB11 is niet de belasting op de constructie bepalend maar uitsluitend het gedrag van de kleine personenauto. In *Afbeelding 4.4* van *Bijlage 4* is het verloop van de botsing tussen de kleine personenauto en de TRI-angel met scharnier van $t=0$ s tot $t=0,5$ s gegeven. Het voertuig wordt rustig omgeleid, hetgeen ook blijkt uit de ASI-waarde (zie *Afbeelding 4.5* van *Bijlage 4*) gemeten in het zwaartepunt van de kleine personenauto. De maximaal optredende ASI-waarde is net iets groter dan 1. De ervaring leert echter dat de ASI-waarde gevonden met VEDYAC groter is dan de waarde die gevonden wordt met testen op ware schaal. De grootste verplaatsing van de constructie vindt plaats ter hoogte van 10° model-element in de botszone. De positie en hoekverdraaiing als functie van de tijd van de MASS van de staander in dit model-element is gegeven in respectievelijk de linker en rechter grafiek in *Afbeelding 4.6* van *Bijlage 4*. In de grafieken wordt gesproken van vakwerk in plaats van staander. In

Afbeelding 4.7 van *Bijlage 4* is de positie en de hoekverdraaiing van de planken aan de voorzijde van het 10^e model-element afgebeeld. De negatieve hoek van de plank blijft beperkt tot 15°, waardoor er geen gevaar is dat het voertuig onder de planken door rijdt.

In de *Afbeeldingen 4.8 t/m 4.17* van *Bijlage 4* is een selectie van de uitvoer gegevens van de gesimuleerde proef TB81 afgedrukt. In *Afbeelding 4.8* is een overzicht gegeven van het verloop van de botsing tussen de trekker-oplegger en de TRI-angel met scharnier. De trekker-oplegger wordt omgeleid en rolt niet over de constructie heen. Het mechanisme van het omhoogkomen van de planken aan de voorzijde van de constructie is volgens de uitkomst van deze simulatie in staat dit te voorkomen. Voor de volledigheid is in *Afbeelding 4.9* de ASI-waarde gemeten in het zwaartepunt van de trekker afgebeeld. De ASI-waarde blijft gedurende de aanrijding ruim onder de kritische waarde van 1.

De grafieken in de *Afbeeldingen 4.10 t/m 4.17* hebben betrekking op het model-element dat gedurende simulatie het zwaarst is belast. Op deze gegevens zijn de uitgevoerde ontwerpberekeningen gebaseerd.

In *Afbeelding 4.10* zijn de belastingen als functie van de tijd gegeven die optreden in de BEAM-elementen die het zwaarste belaste model-element verbinden met het daaraan voorafgaande model-element. De belastingen in de BEAM-elementen tussen het zwaarst belaste model-elementen en het daarop volgende model-element zijn opgenomen in *Afbeelding 4.11*. In de *Afbeeldingen 4.10 en 4.11* hebben de bovenste twee grafieken betrekking op het BEAM-element aan de achterzijde van de constructie en de onderste twee grafieken betrekking op het BEAM-element aan de voorzijde van de constructie. Uit beide *Afbeeldingen* blijkt dat de grootste trekkracht $1.75 \cdot 10^5$ N optreedt in het BEAM-element waarmee de stijfheid en sterkte van de planken aan de voorkant zijn gemodelleerd. Er treedt ook het grootste moment op van $1.0 \cdot 10^5$ Nm.

Bij de krachten in het koppelmechanisme doet zich iets vreemds voor (zie *Afbeeldingen 4.12 en 4.13* van *Bijlage 4*). Op het moment dat de planken aan de voorzijde en aan de achterzijde contact maken met de staander zou men verwachten dat er geen belasting meer op het koppelmechanisme optreedt. Dit moment is op $t=0.37$, zoals blijkt uit *Afbeelding 4.13*. Uit *Afbeelding 4.12* blijkt echter dat de belasting in de ROD-elementen van het koppelmechanisme groter wordt in plaats van kleiner. Voor de ontwerpberekeningen worden de belastingen in de eerste 0,2 seconden relevant geacht. Waarschijnlijk is de dimensionering van het koppelmechanisme in het model de oorzaak dat de uitkomst van het model anders is dan verwacht. In *Afbeelding 4.14* is de belasting weergegeven die optreedt in het POINT-element waarmee de koppelschijf is vastgemaakt aan de staander. Ook hier treden hogere belastingen op dan verwacht en geldt dat de belastingen die tijdens de eerste 2 seconden van de simulatie optreden maatgevend zijn voor de ontwerpberekeningen. In het model is een plastisch scharnier opgenomen dat ervoor zorgt dat de planken aan de voorzijde niet naar binnen klappen voordat de staander gaat roteren. Hierdoor blijven de planken aan de voorzijde zoveel mogelijk verticaal staan, hetgeen nodig is voor een goede geleiding van de kleine personen-auto. Het resultaat van het plastische scharnier dat is gemodelleerd met de component om de z-as van POINT 610 is goed zichtbaar in de rechter

grafiek in *Afbeelding 4.14*. De momenten worden beperkt tot 5000 Nm (zie *Tabel 14b*). In de rechter grafiek van *Afbeelding 4.14* is te zien dat het z-moment iets groter wordt dan 5000 Nm, hetgeen wordt veroorzaakt door de gedefinieerde demping.

De belasting die optreedt in het scharnier tussen de planken aan de achterzijde en de staander (POINT 410) en in het scharnier tussen de planken aan de voorzijde en de staander (POINT 510) is respectievelijk opgenomen in *Afbeelding 4.15* en *Afbeelding 4.16*. De maximale kracht die optreedt in het scharnier bedraagt 320 kN .

Een belangrijke ontwerpparameter is ook de belasting die optreedt in het scharnier tussen staander en fundatie. Deze belasting is weergegeven in de grafieken in *Afbeelding 4.16* als functie van de tijd. In het scharnier, gemodelleerd met POINT 375, treedt zowel een hoge belasting op in dwarsrichting (y-component in linker grafiek van *Afbeelding 4.16*) als in verticale richting (z-component in linker grafiek van *Afbeelding 4.16*). De laatste belastingscomponent trekt de fundatie uit de grond. De grootste krachten in y- en z-richting treden op hetzelfde moment op en bedragen respectievelijk 370 kN en 320 kN. De moment-componenten van de belasting in het scharnier tussen staander en fundatie zijn weergegeven in de rechter grafiek in *Afbeelding 4.16* van *Bijlage 4*. In de x-component is, net als bij de z-component van het scharnier tussen staander en koppelschijf, een plastisch traject gedefinieerd. Het plastisch niveau ligt praktisch gesproken aan de lage kant, 3000 Nm, (zie *Tabel 12b*) gezien de mogelijk optredende windbelasting.

De tot nu besproken belastingen worden veroorzaakt door de aanrijding van de trekker-oplegger tegen de TRI-angel met scharnier. Om een beeld te schetsen van de krachten die hierbij optreden tussen het voertuig en de TRI-angel met scharnier, zijn in *Afbeelding 4.17* in drie grafieken de belasting van de drie POLYHEDRON-elementen, verbonden aan de zwaarst belaste staander, weergegeven als functie van de tijd. De belasting weergegeven in de grafiek linksboven en rechtsonder in *Afbeelding 4.17* worden ongeveer voor de helft doorgevoerd naar de staander van het zwaarst belaste model-element. De belasting weergegeven in de grafiek rechtsboven wordt in zijn geheel doorgevoerd naar de betreffende staander.

5.3. Conclusies

Op grond van de simulatieresultaten is de conclusie dat het mogelijk is een vangrailconstructie te ontwerpen die voldoet aan de gestelde eisen, namelijk:

- a. De constructie moet een trekker met oplegger om kunnen leiden, conform CEN-proef TB81, waarbij de uitbuiging beperkt blijft tot 1 à 1,5 meter.
- b. Bij een aanrijding van de constructie met een kleine personenauto, conform CEN-proef TB11, mag de ASI-waarde niet hoger dan 1 zijn.

De TRI-angel met scharnier heeft ten opzichte van twee andere gesimuleerde ontwerpen twee grote voordelen. Ten eerste is het gedrag van het voertuig beter te controleren, dit dankzij het feit dat de scharnieren heel blijven. Ten tweede blijven de planken aan de voorzijde zo goed als verticaal waardoor kleine personenauto's beter wordt omgeleid.

De TRI-angel met scharnier voldoet aan het uitgangspunt dat de constructie bij een aanrijding met een kleine personenauto voldoende verplaatsingsruimte biedt om acceptabele ASI-waarden te verkrijgen. Dit terwijl bij een aanrijding met de trekker-oplegger de constructie zich nagenoeg als een starre constructie gedraagt met voldoende hoogte om een roll-over te voorkomen.

6. Conclusies en aanbevelingen

De gevolgde methodiek in dit onderzoek heeft geleid tot een ontwerp dat voldoet aan de gestelde eisen. Deze methodiek was het aanpassen van een model volgens een iteratief proces met simulatie als hulpmiddel. De modelaanpassingen zijn in overleg met de werkgroep doorgevoerd, waardoor optimaal gebruik is gemaakt van de in Nederland aanwezige expertise.

De conclusies die bij iedere variant van de TRI-angel zijn getrokken, kunnen als volgt worden samengevat.

De TRI-angel1-constructie voldoet naar verwachting aan de tests TB11 en TB81 zoals omschreven in NEN 1317-2 (CEN, 1998b). De uitbuiging bij test TB81 blijft met 1,3 meter onder de gestelde eis van 1,5 meter. Alleen de ASI-waarde van de kleine personenauto bij proef TB11 is met 1,15 iets hoger dan de vereiste waarde van 1,0. Verder bleek het contactpunt tussen constructie en de kleine personenauto aan de hoge kant, waardoor vervormingen van het voertuig verwacht kunnen worden die gevaarlijk zijn voor de inzittenden. De resultaten van de simulaties van de TRI-angel1 voldeden hiermee nog niet helemaal aan de gestelde eisen, maar boden genoeg aanknopingspunten om het ontwikkeltraject voort te zetten.

Uit de simulaties van de proeven TB11 en TB81 met TRI-angel2 blijkt dat verwacht kan worden dat de constructie in de praktijk aan de eisen voldoet die worden gesteld in NEN 1317-2 (CEN, 1998b). De gevonden ASI-waarde van 1,47 bij de simulatie met de kleine personenauto van is echter wel ruim boven de aan de constructie gestelde eis dat de ASI-waarde van de kleine personenauto niet groter mag zijn dan 1,0. Uit de simulatie van proef TB81 blijkt dat de gestelde eis van een uitbuiging van maximaal 1,5 meter niet wordt gehaald. De conclusie uit de uitgevoerde simulaties luidt dat het beoogde bezwijkmechanisme in de TRI-angel2 niet aan de gestelde eisen kan voldoen en dat verdere ontwikkeling van deze constructie weinig zinvol is.

Op grond van de simulatieresultaten van de TRI-angel met scharnier luidt de conclusie dat het mogelijk is een vangrailconstructie te ontwerpen die voldoet aan de gestelde eisen, namelijk:

- a. De constructie moet een trekker met oplegger om kunnen leiden, conform CEN-proef TB81, waarbij de uitbuiging beperkt blijft tot 1 à 1,5 meter.
- b. Bij een aanrijding van de constructie met een kleine personenauto, conform CEN-proef TB11, mag de ASI-waarde niet hoger dan 1 zijn.

De TRI-angel met scharnier heeft ten opzichte van twee andere gesimuleerde ontwerpen twee grote voordelen. Ten eerste is het gedrag van het voertuig beter te controleren, dit dankzij het feit dat de scharnieren heel blijven. Ten tweede blijven de planken aan de voorzijde zo goed als verticaal waardoor kleine personenauto's beter wordt omgeleid.

Of de onderzoeksmethodiek heeft geleid tot een constructie die ook in de praktijk precies zo zal werken als is voorspeld door de simulatie, zal moeten blijken uit proeven op ware schaal. Het is daarbij aan te bevelen eerst de werking van het koppelmechanisme in relatie tot het roteren van de

staander te testen. Dit is mogelijk door een relatief kort stuk, bijvoorbeeld 10 meter, van de constructie te vervaardigen en te beproeven met behulp van relatief eenvoudige tests. Deze werkwijze vergroot de zekerheid van het welslagen van de proeven op ware schaal aanzienlijk.

Literatuur

Comité Européen de Normalisation (CEN) (1998a). *Road restraint systems Part 1: Terminology and general criteria for test methods*. NEN 1317-1.

Comité Européen de Normalisation (CEN) (1998b). *Road restraint systems Part 2: Safety barriers. Performance classes, impact test acceptance criteria and test methods*. NEN 1317-2.

Oorschot, L.L.M. van (1998). *Ontwerpberekening Tri-angel geleiderail*. Rwn 618.1. Projectwerkgroep TRI-angel, Bouwdienst Rijkswaterstaat.

Pol, W.H.M. van de (1999a). *Verbrede STEP-barriers, simulatieonderzoek op H4-niveau; Onderzoek naar een verbrede verankerde stalen STEP- en een verbrede betonnen STEP-constructie*. A-99-13. Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV, Leidschendam. [Niet openbaar].

Pol, W.H.M. van de (1999b). *Simulatie H2-barrier met STEP-profiel Zeelandbrug, HAITSMA-koppeling; Een simulatietest met een bus, TB51, op een prefab-barrier met STEP-profiel ten behoeve van renovatiewerkzaamheden aan de Zeelandbrug*. A-99-15. Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV, Leidschendam. [Niet openbaar].

Thomas, J. (1998) *Triangel-Geleiderail*. Ontwerptekeningen 28-11-98. Laura Metaal Eyselshoven BV, Kerkrade.

Bijlage 1 t/m 5

Bijlage 1 Afbeeldingen bij Hoofdstuk 2

Bijlage 2 Afbeeldingen bij Hoofdstuk 3

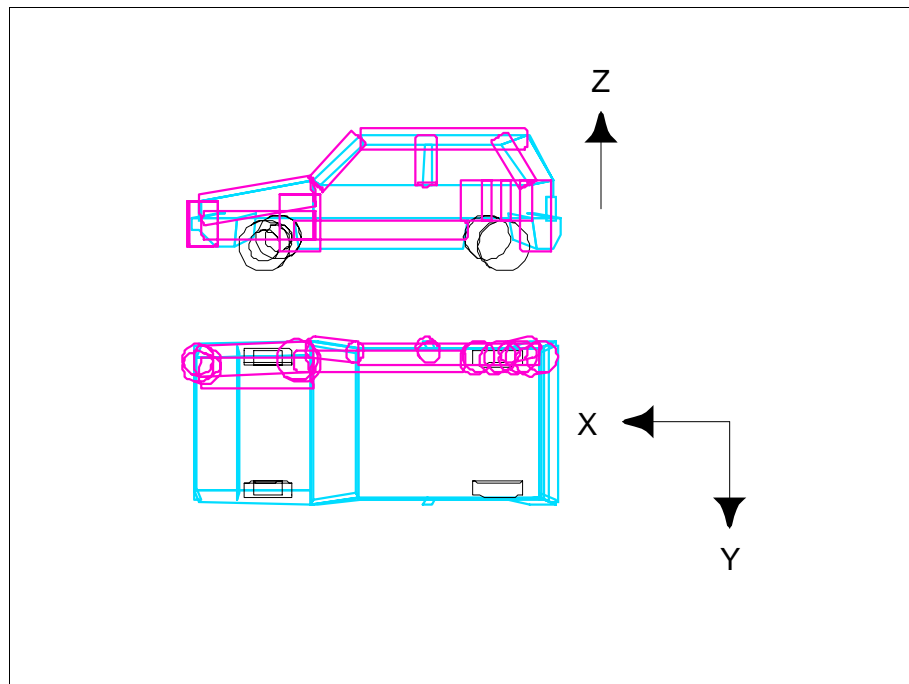
Bijlage 3 Afbeeldingen bij Hoofdstuk 4

Bijlage 4 Afbeeldingen bij Hoofdstuk 5

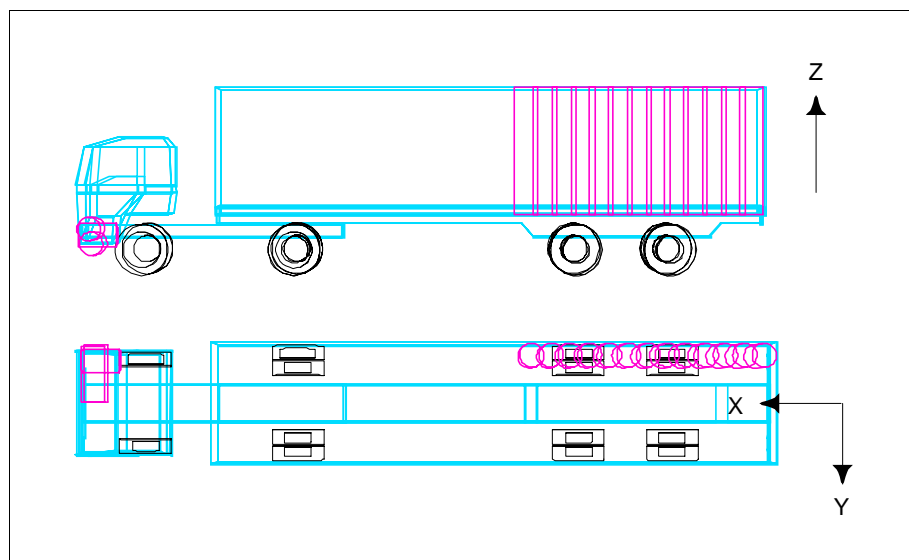
*Bijlage 5 Korte beschrijving van de werking van het computerprogramma
VEDYAC*

Bijlage 1

Afbeeldingen bij Hoofdstuk 2



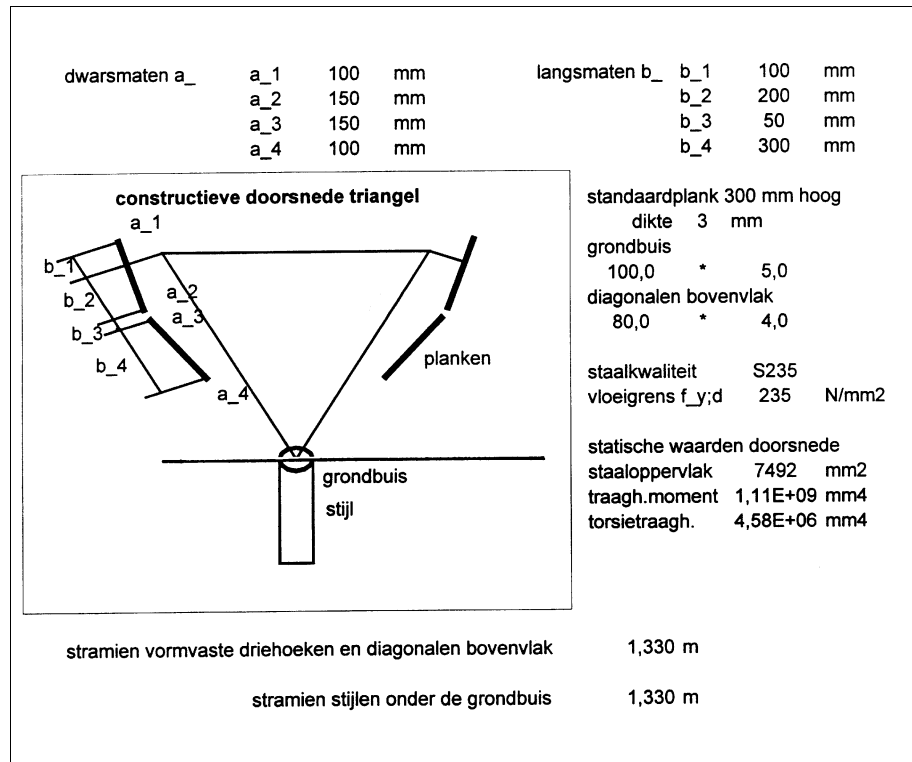
Afbeelding 1.1. Contact geometrie van de kleine personenauto (900kg)



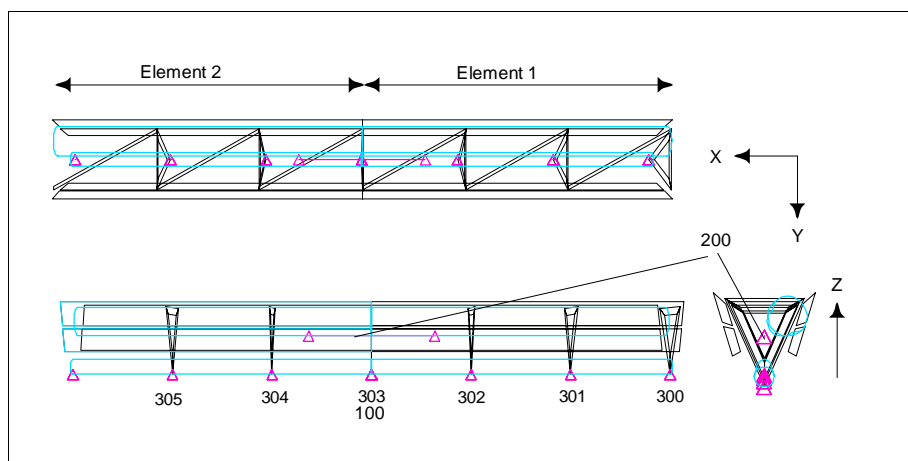
Afbeelding 1.2. Contact geometrie van de trekker/oplegger (38 ton)

Bijlage 2

Afbeeldingen bij Hoofdstuk 3



Afbeelding 2.1. Schets van het eerste ontwerp van de TRI-angel (Van Oorschot)

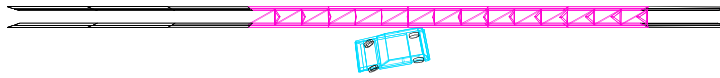


Afbeelding 2.2. Overzichtstekening van twee elementen van het VEDYAC-model van de TRI-angel1

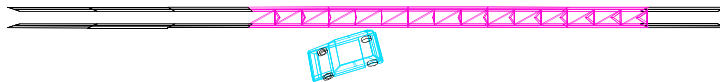


Afbeelding 2.3a. *Het verloop van de botsing tussen de kleine personen auto en de TRI-angel1 (0-0,5s)*

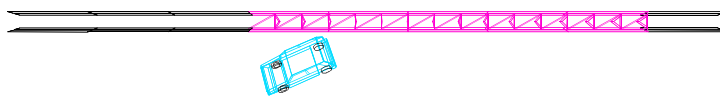
TRI-angel1 25-FEB-99 11:54:32
TIME 0.6000



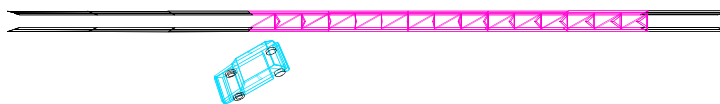
TRI-angel1 25-FEB-99 11:54:32
TIME 0.7000



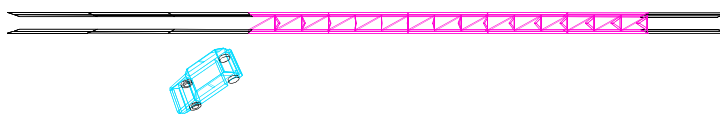
TRI-angel1 25-FEB-99 11:54:32
TIME 0.8000



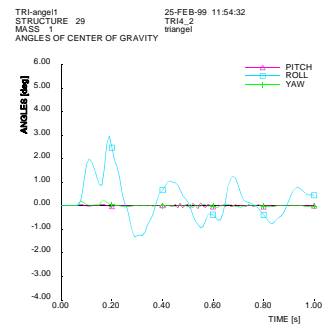
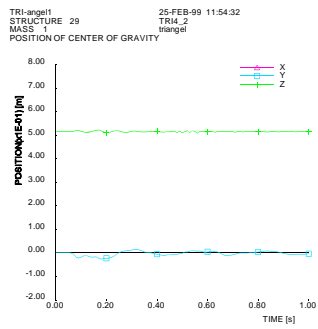
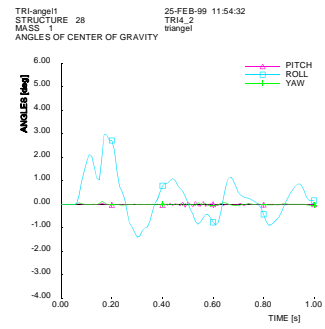
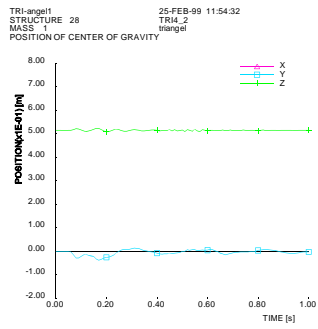
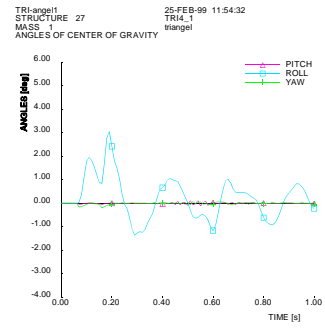
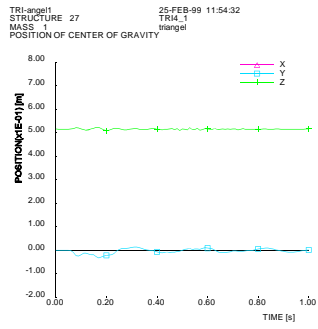
TRI-angel1 25-FEB-99 11:54:32
TIME 0.9000



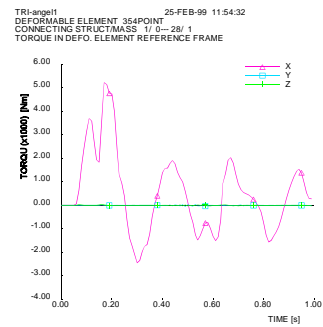
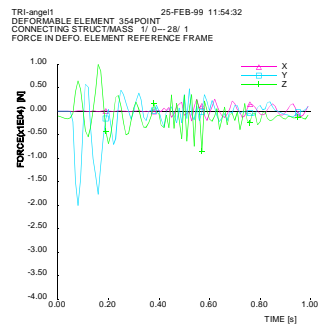
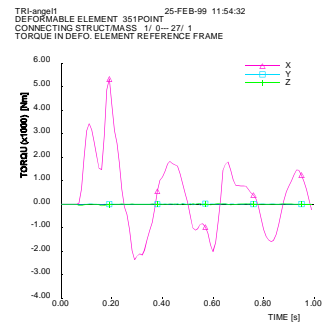
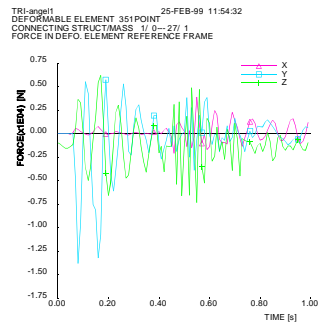
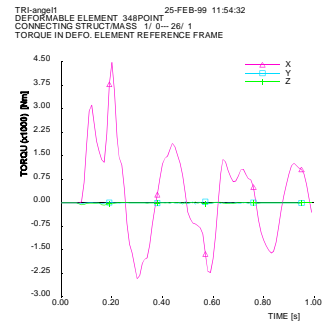
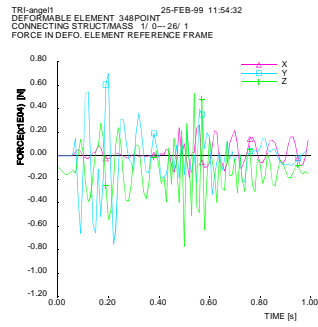
TRI-angel1 25-FEB-99 11:54:32
TIME 1.0000



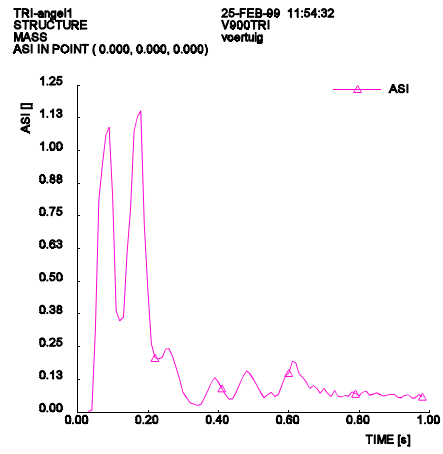
Afbeelding 2.3b. *Het verloop van de botsing tussen de kleine personen auto en de TRI-angel1 (0,6-1s)*



Afbeelding 2.4 Plaats en rotatie als functie van de tijd van de drie model elementen van STRUCTURE 27-29

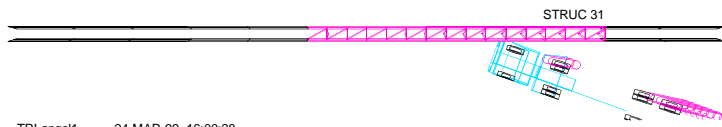


Afbeelding 2.5. *Krachten en momenten als functie van de tijd in het eerste POINT verbinding waarmee de paalvoet is gemodelleerd van de STRUCTURES 26-28*

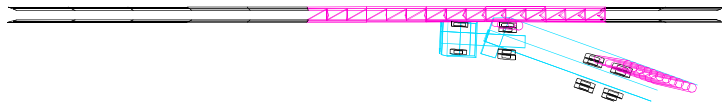


Afbeelding 2.6. ASI waarde van het voertuig als functie van de tijd

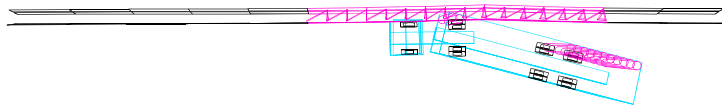
TRI-angel1 24-MAR-99 16:00:28
TIME 0.0000



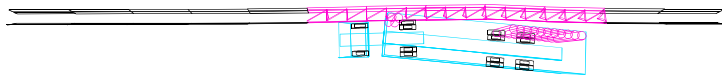
TRI-angel1 24-MAR-99 16:00:28
TIME 0.2000



TRI-angel1 24-MAR-99 16:00:28
TIME 0.4000



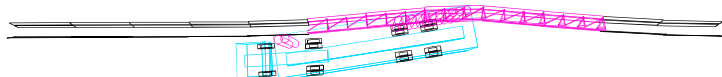
TRI-angel1 24-MAR-99 16:00:28
TIME 0.6000



TRI-angel1 24-MAR-99 16:00:28
TIME 0.8000

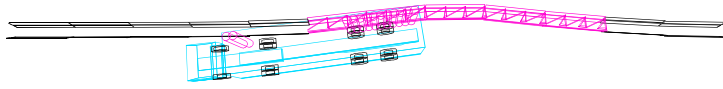


TRI-angel1 24-MAR-99 16:00:28
TIME 1.0000

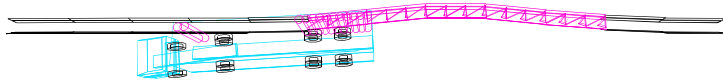


Afbeelding 2.7a. *Het verloop van de botsing tussen de trekker met oplegger en de TRI-angel1 (0-1s)*

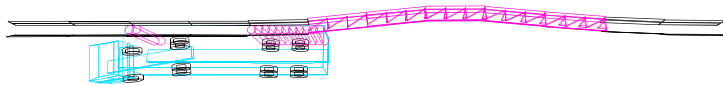
TRI-angel1 24-MAR-99 16:00:28
TIME 1.2000



TRI-angel1 24-MAR-99 16:00:28
TIME 1.4000



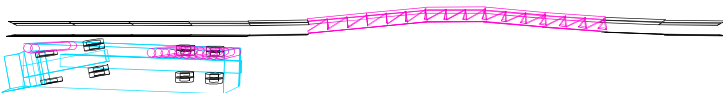
TRI-angel1 24-MAR-99 16:00:28
TIME 1.6000



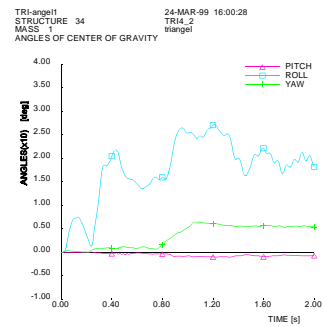
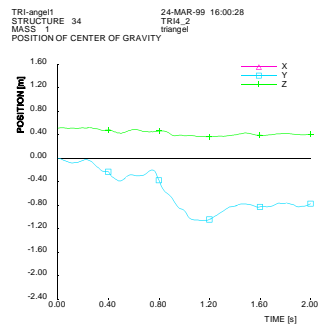
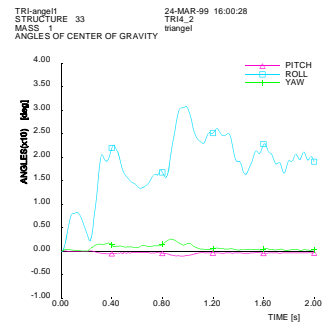
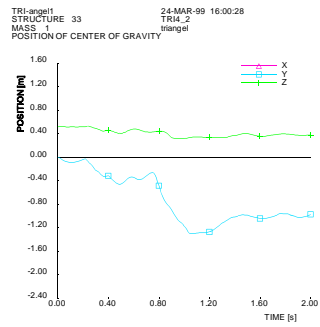
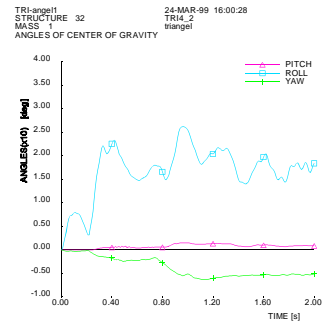
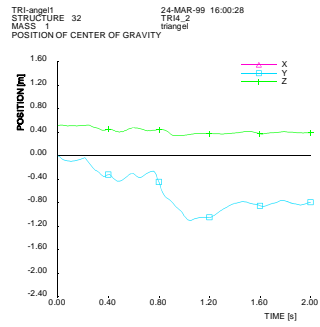
TRI-angel1 24-MAR-99 16:00:28
TIME 1.8000



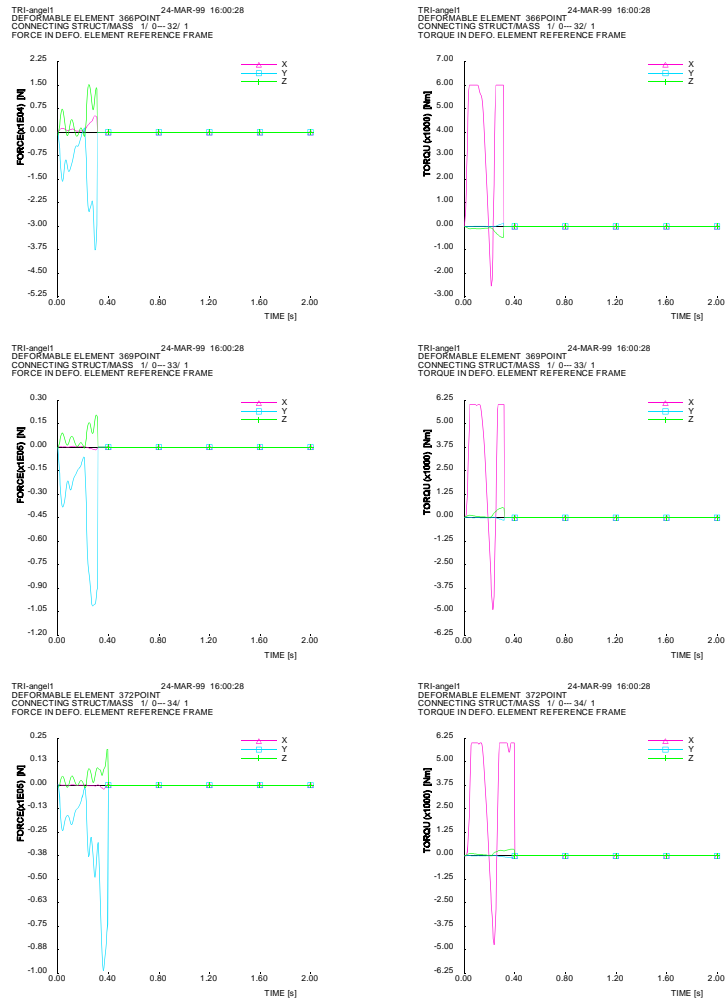
TRI-angel1 24-MAR-99 16:00:28
TIME 2.0000



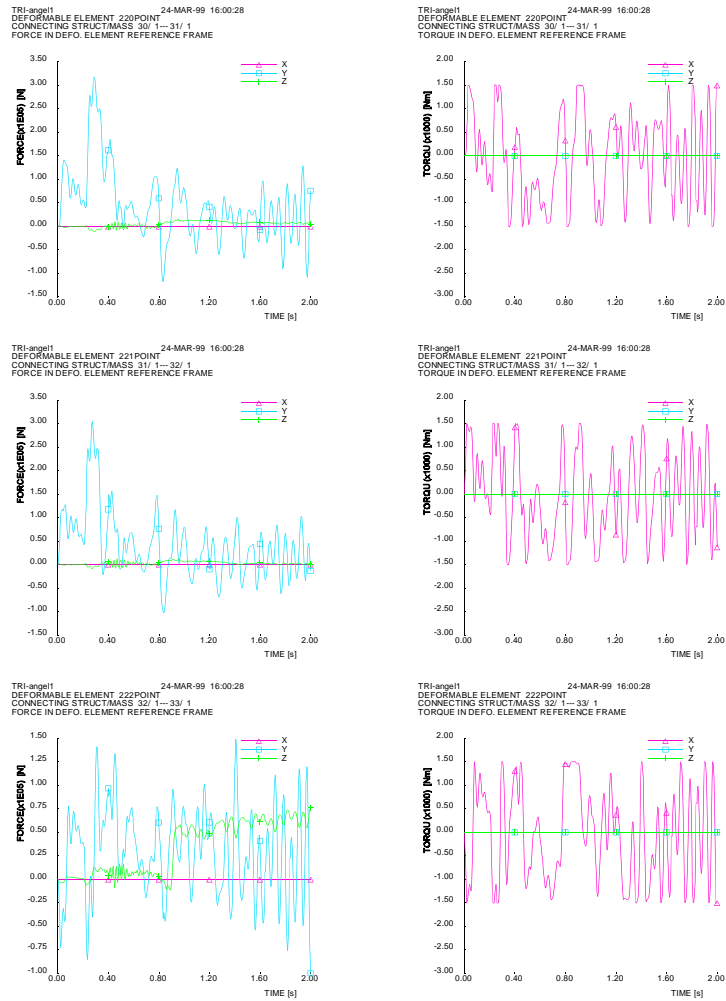
Afbeelding 2.7b. *Het verloop van de botsing tussen de trekker met oplegger en de TRI-angel1 (1,2-2s)*



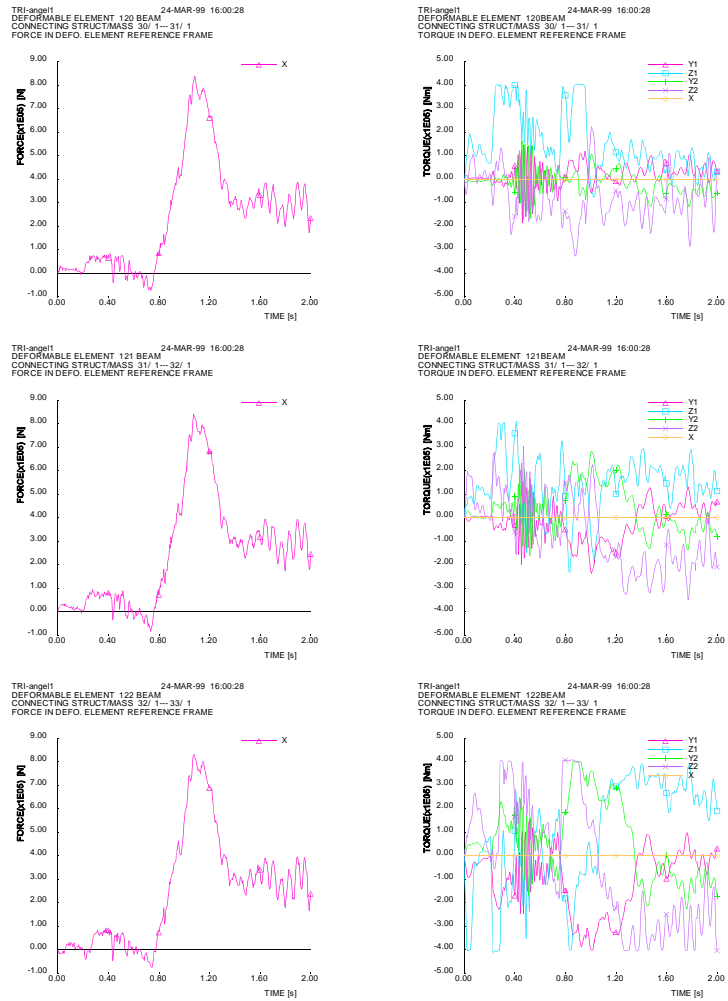
Afbeelding 2.8. Positie en rotatie als functie van de tijd van de drie modelementen van STRUCTURES 32-34



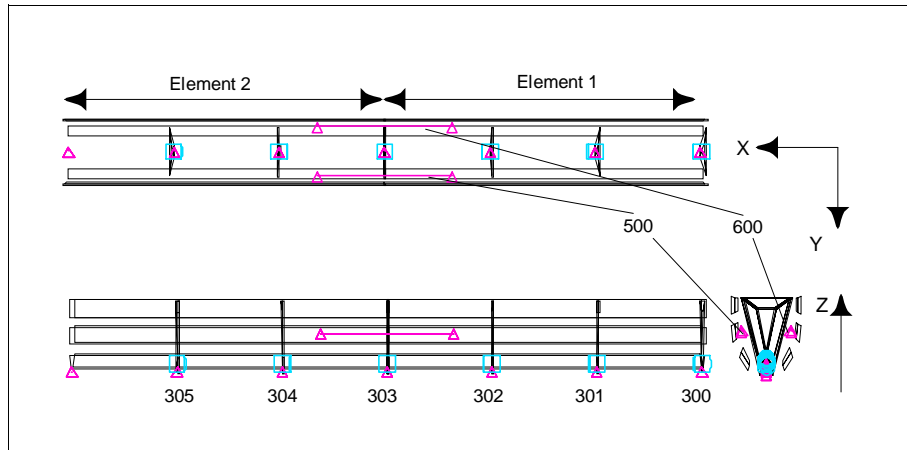
Afbeelding 2.9. Krachten en momenten als functie van de tijd in de eerste POINT-verbinding waarmee de paalvoet is gemodelleerd, van de STRUCTURES 32-34



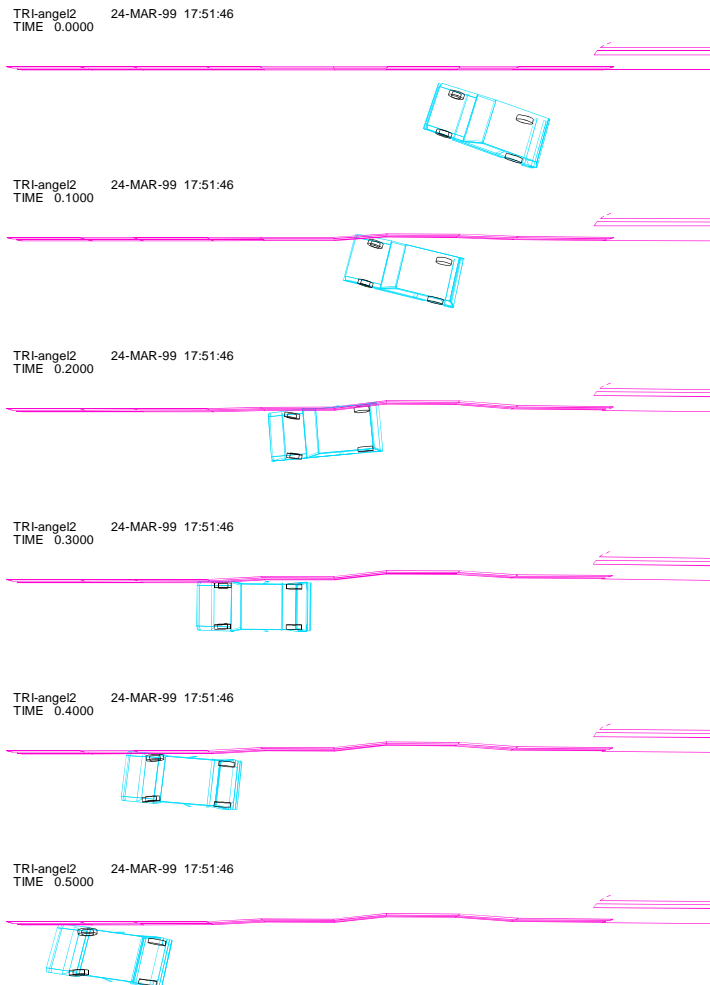
Afbeelding 2.10. Krachten en momenten als functie van de tijd in de POINT-verbinding tussen STRUCTURES 30-31, 31-32 en 32-33, waarmee de pijp is gemodelleerd



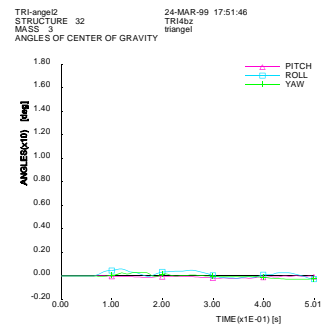
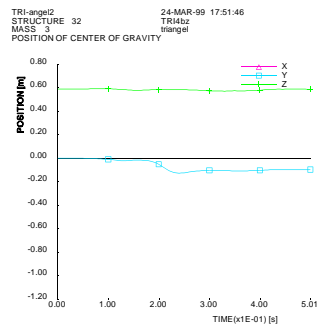
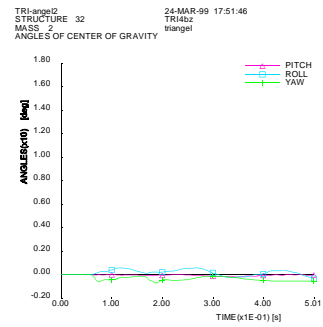
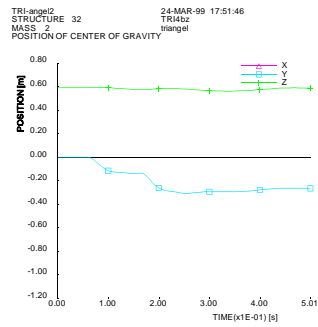
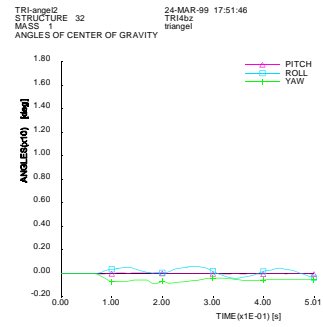
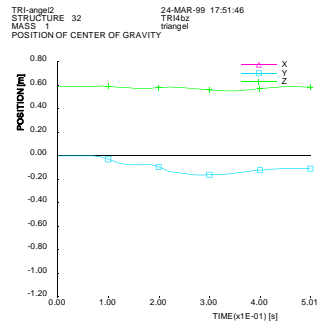
Afbeelding 2.11. Krachten en momenten als functie van de tijd in de BEAM-verbinding tussen STRUCTURES 30-31, 31-32 en 32-33, waarmee de stijfheid en sterkte is gemodelleerd van de vier geleideplanken



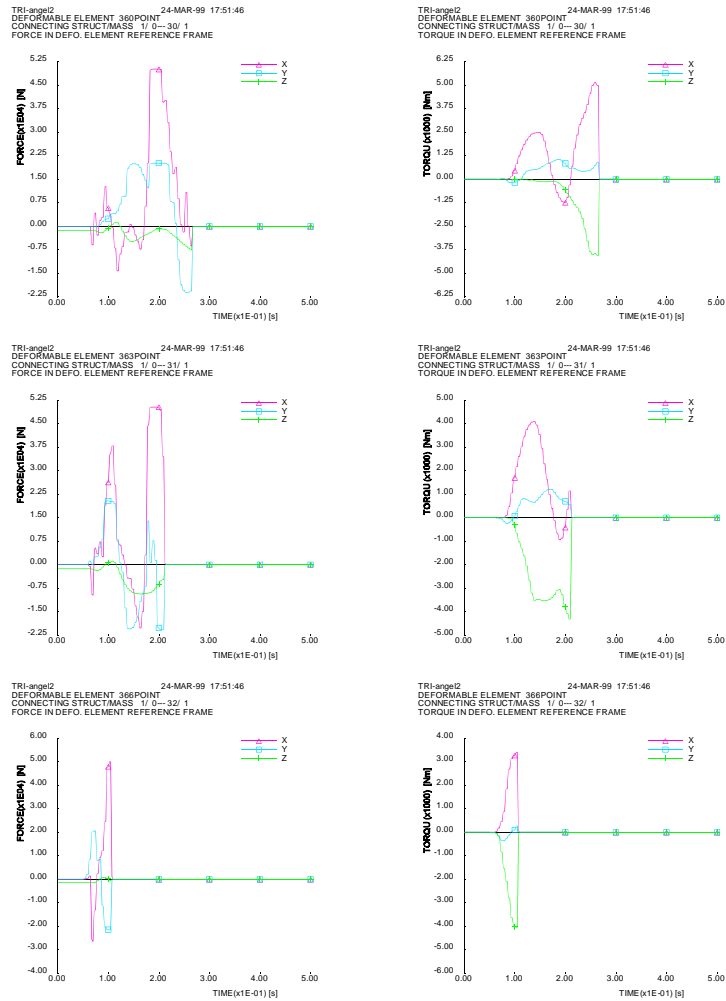
Afbeelding 3.1. Overzichtstekening van twee elementen van het VEDYAC-model van de TRI-angel2



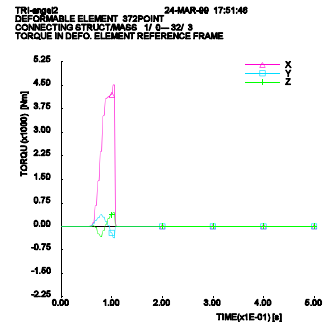
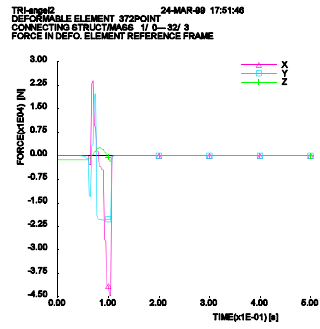
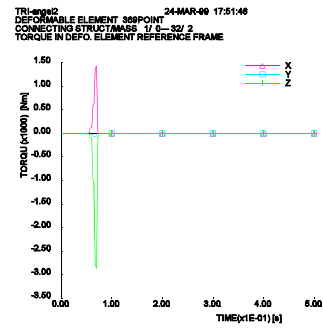
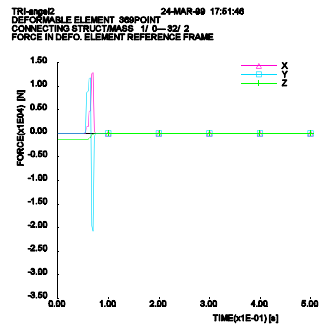
Afbeelding 3.2. *Het verloop van de botsing tussen de kleine personenauto en de TRI-angel2 (0-0,5 s)*



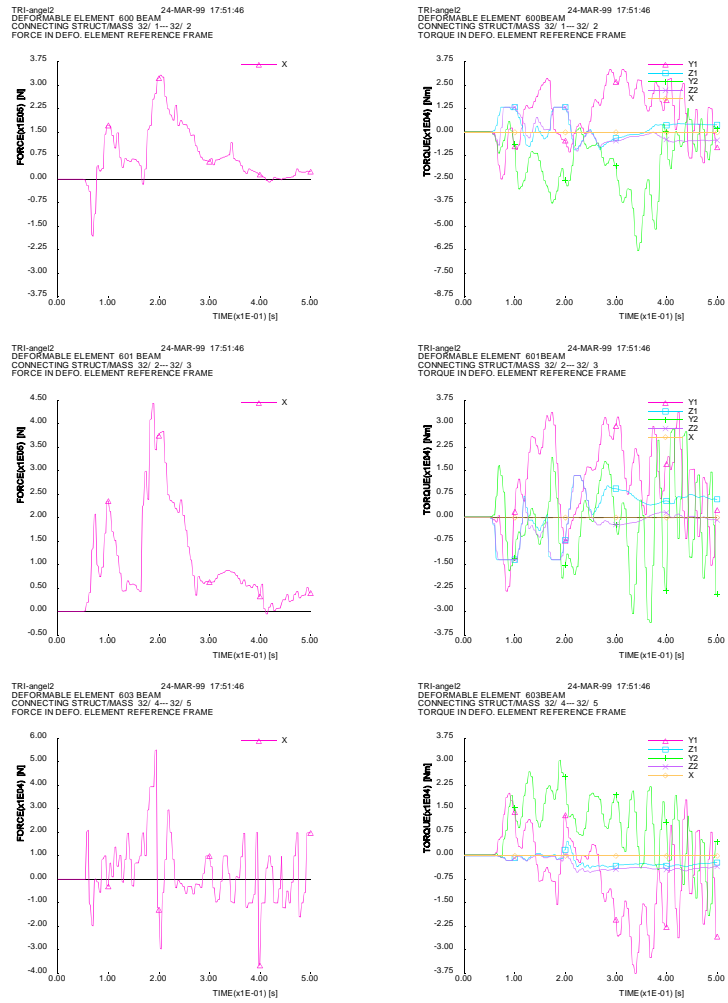
Afbeelding 3.3. Plaats en rotatie als functie van de tijd van de eerste drie modelementen van STUCTURE 32



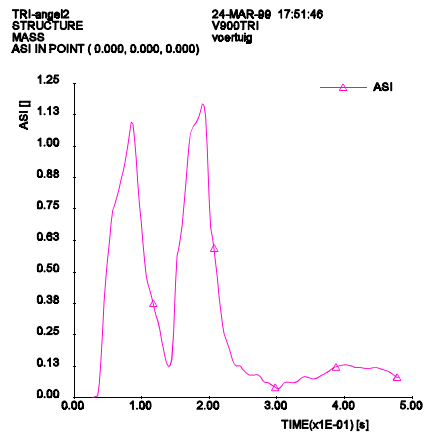
Abbeelding 3.4a. Krachtenmomenten als functie van de tijd in de eerste POINT-verbinding waarmee de paalvoet is gemodelleerd van de modelementen van STRUCTURE 30 en 31 en van het eerste element van STRUCTURE 32



Afbeelding 3.4b. *Krachtenmomenten als functie van de tijd in de eerste POINT-verbinding waarmee de paalvoet is gemodelleerd van het tweede en derde modelement van STRUCTURE 32*



Afbeelding 3.5. Krachten en momenten als functie van de tijd van de drie zwaarst belaste BEAM- verbindingen aan de achterzijde van de TRI-angel2



Afbeelding 3.6. ASI-waarde van het voertuig als functie van de tijd

TR1-angel2 24-MAR-99 17:52:57
TIME 0.0000



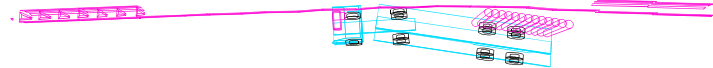
TR1-angel2 24-MAR-99 17:52:57
TIME 0.2500



TR1-angel2 24-MAR-99 17:52:57
TIME 0.5000



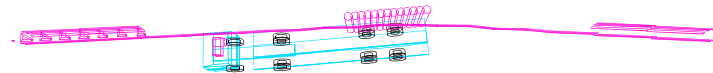
TR1-angel2 24-MAR-99 17:52:57
TIME 0.7500



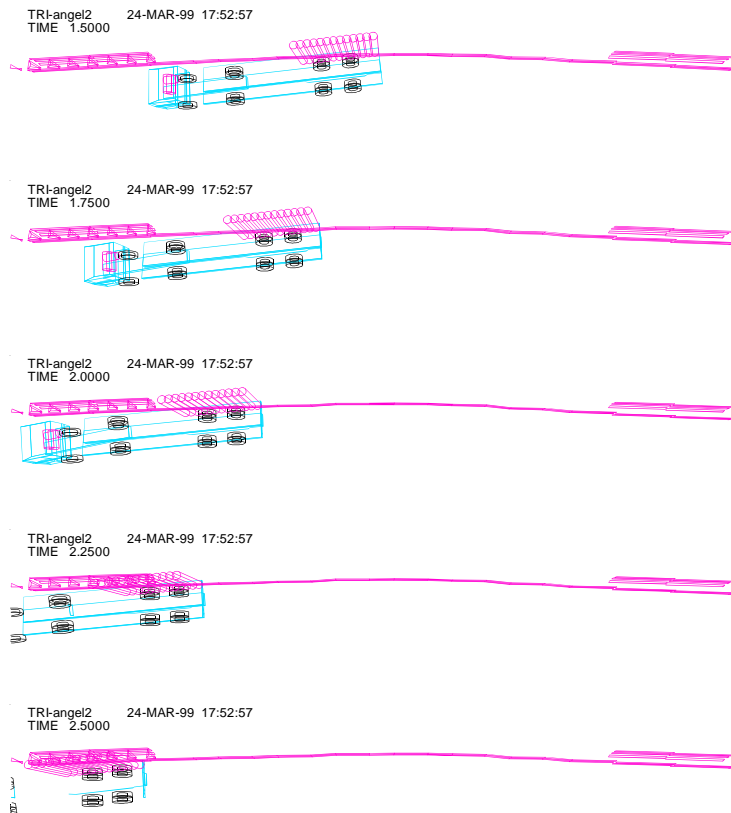
TR1-angel2 24-MAR-99 17:52:57
TIME 1.0000



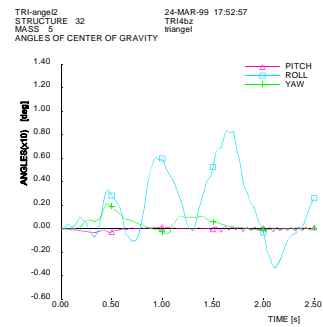
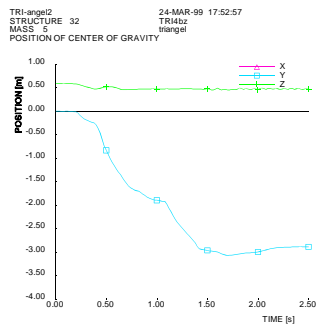
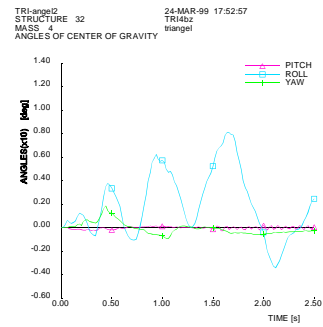
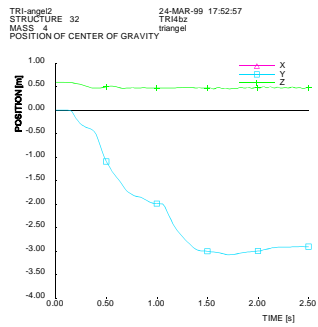
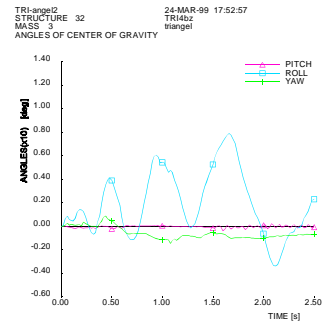
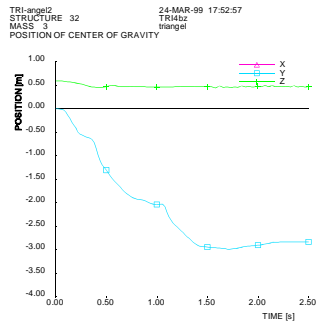
TR1-angel2 24-MAR-99 17:52:57
TIME 1.2500



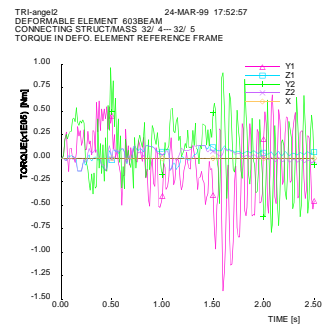
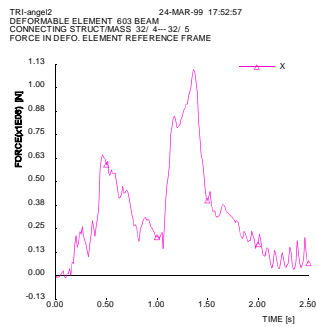
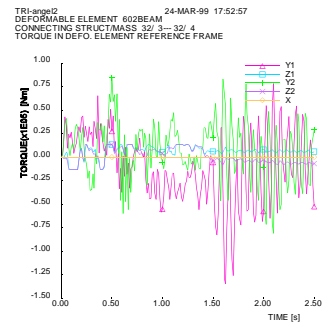
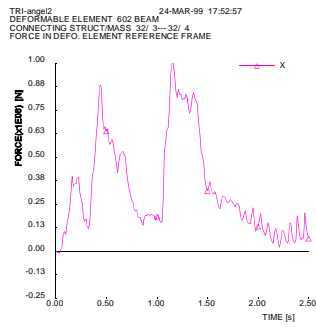
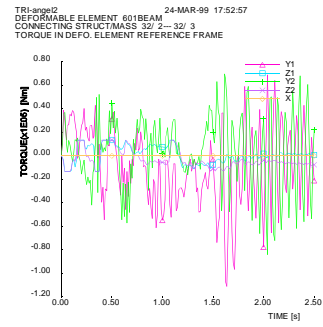
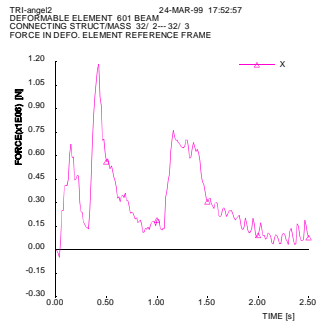
Afbeelding 3.7a. Verloop van de botsing tussen de trekker met oplegger en de TR1-angel2 (0-1,25 s)



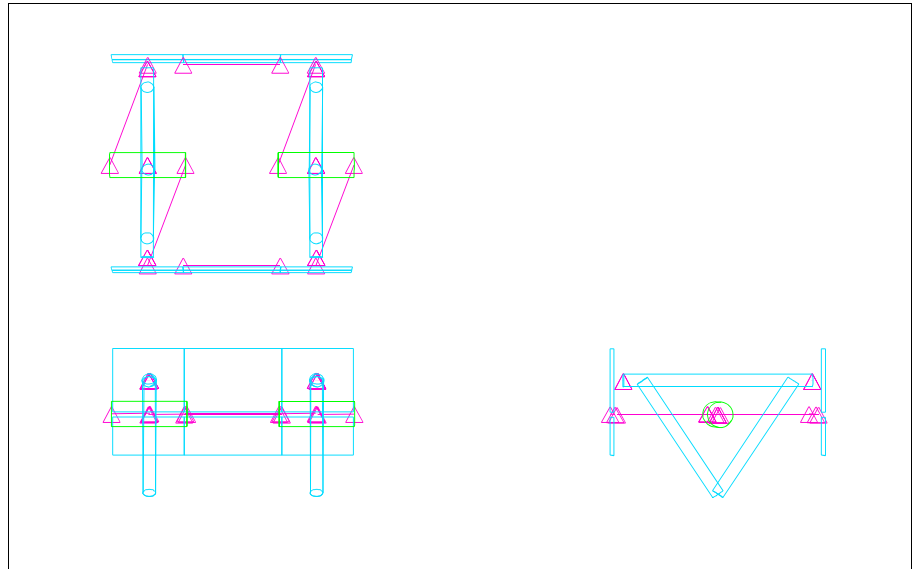
Afbeelding 3.7b. Verloop van de botsing tussen de trekker met oplegger en de TRI-angel2 (1,5-2,5 s)



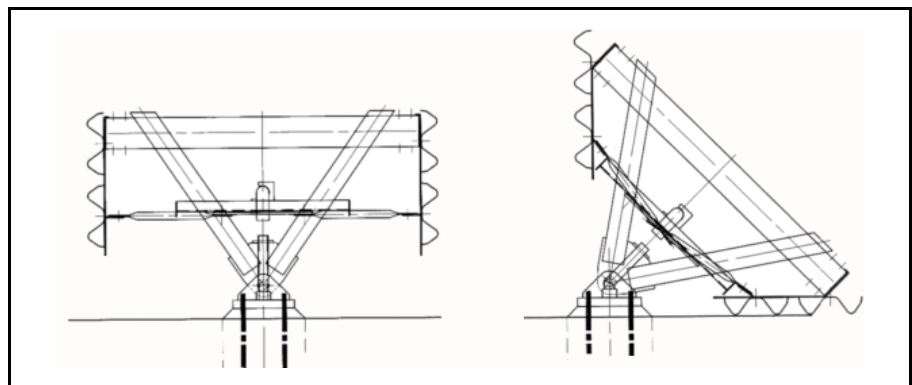
Afbeelding 3.8. Plaats en rotatie als functie van de tijd van het derde, vierde en vijfde modelement van STRUCTURE 32



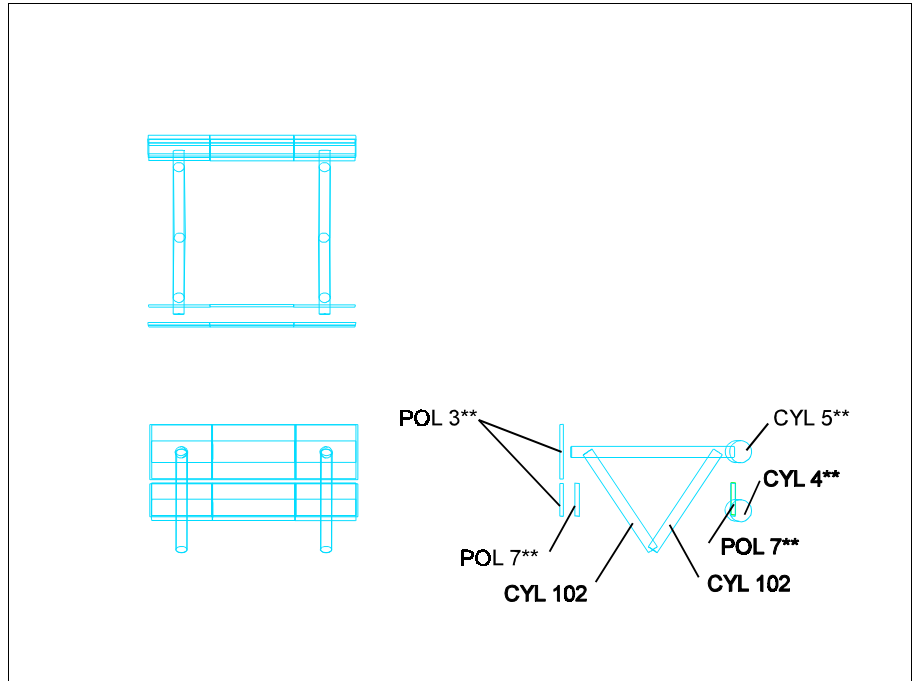
Abbeelding 3.9. Krachten en momenten als functie van de tijd in de BEAM-verbinding tussen de modelementen 2-3, 3-4 en 4-5 van het STRUCTURE 32



Afbeelding 4.1. *Overzichtstekening van de geometrie inclusief de verbindingselementen van twee elementen van het VEDYAC-model van de TRI-angel met scharnier*

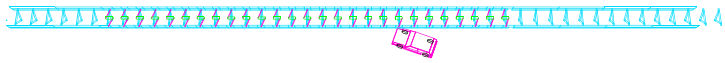


Afbeelding 4.2. *Overzichtstekening van de TRI-angel met scharnier*

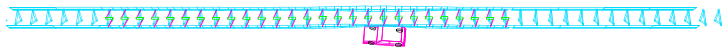


Afbeelding 4.3. *Overzichtstekening van de contactgeometrie van twee elementen van het VEDYAC-model van de TRI-angel met scharnier*

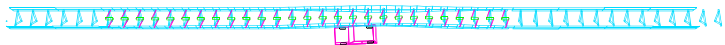
TRl-angel3 13-DEC-99 22:05:26
TIME 0.0000



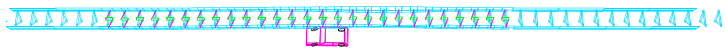
TRl-angel3 13-DEC-99 22:05:26
TIME 0.1000



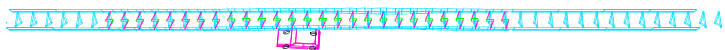
TRl-angel3 13-DEC-99 22:05:26
TIME 0.2000



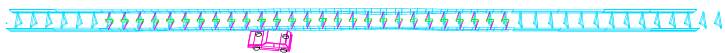
TRl-angel3 13-DEC-99 22:05:26
TIME 0.3000



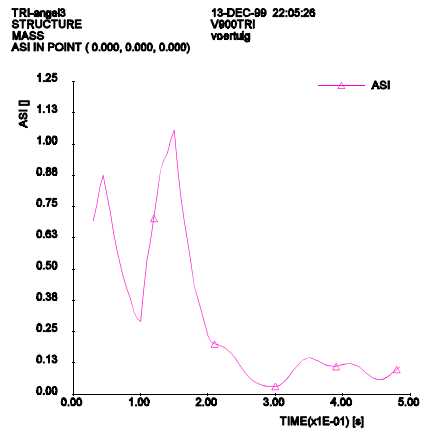
TRl-angel3 13-DEC-99 22:05:26
TIME 0.4000



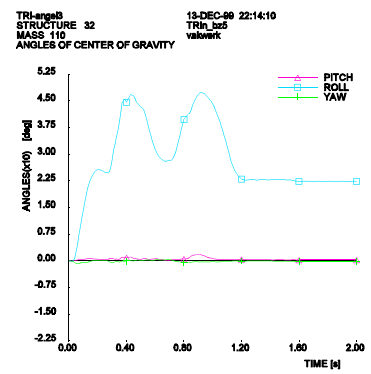
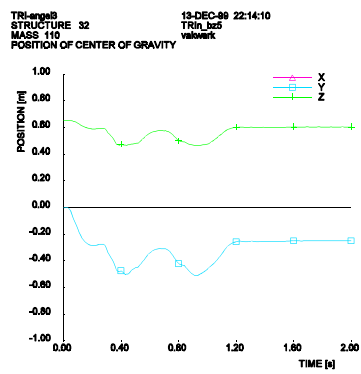
TRl-angel3 13-DEC-99 22:05:26
TIME 0.5000



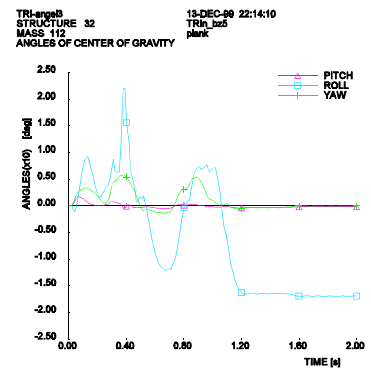
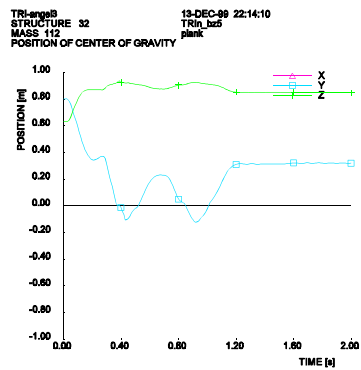
Afbeelding 4.4. *Het verloop van de botsing tussen de kleine personenauto en de TRI-angel met scharnier (0-0,5 s)*



Afbeelding 4.5. ASI-waarde in het zwaartepunt van het voertuig als functie van de tijd

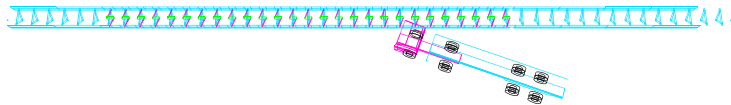


Afbeelding 4.6. Positie en hoekverdraaiing van de staander van het 10e model-element in de botszone

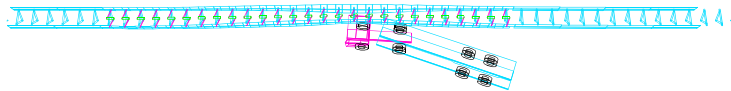


Afbeelding 4.7. Positie en hoekverdraaiing van de plank aan de voorzijde van het 10e model-element in de botszone

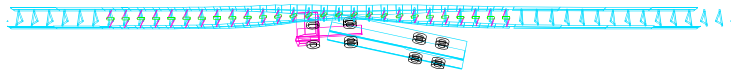
TR1-angel3 13-DEC-99 22:14:10
TIME 0.0000



TR1-angel3 13-DEC-99 22:14:10
TIME 0.2500



TR1-angel3 13-DEC-99 22:14:10
TIME 0.5000



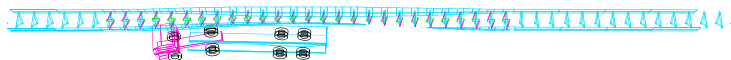
TR1-angel3 13-DEC-99 22:14:10
TIME 0.7500



TR1-angel3 13-DEC-99 22:14:10
TIME 1.0000

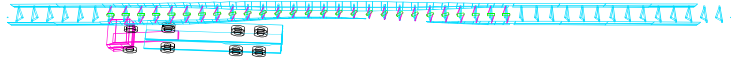


TR1-angel3 13-DEC-99 22:14:10
TIME 1.2500

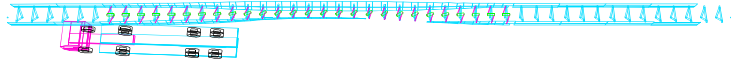


Afbeelding 4.8a. Verloop van de botsing tussen de trekker met oplegger en de TRI-angel met scharnier (0-1,25 s)

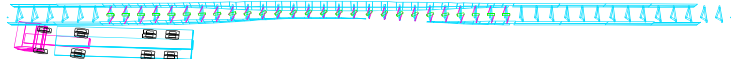
TRI-angel3 13-DEC-00 22:14:10
TIME 1.5000



TRI-angel3 13-DEC-00 22:14:10
TIME 1.7500



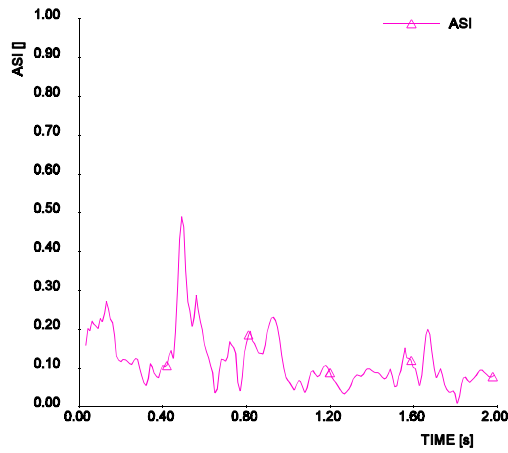
TRI-angel3 13-DEC-00 22:14:10
TIME 2.0000



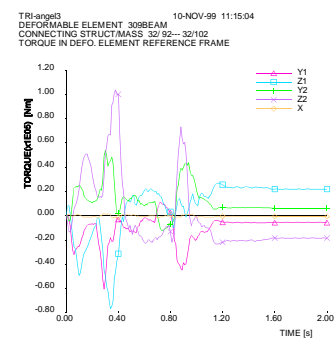
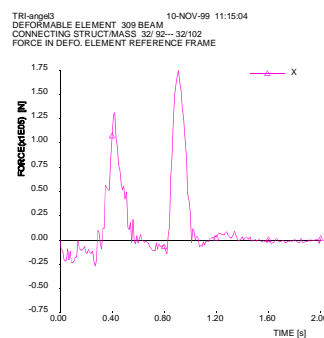
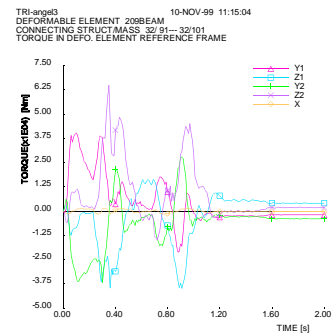
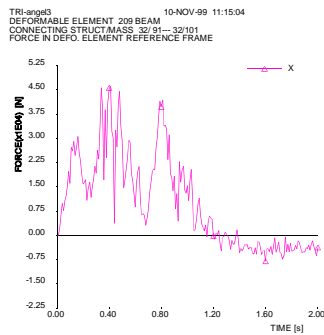
Afbeelding 4.8b. Verloop van de botsing tussen de trekker met oplegger en de TRI-angel met scharnier (1,25 - 2.00 s)

TRI-angel3
 STRUCTURE
 MASS
 ASI IN POINT (0.000, 0.000, 0.000)

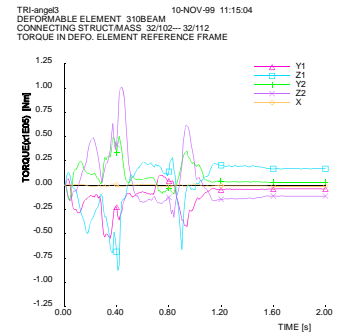
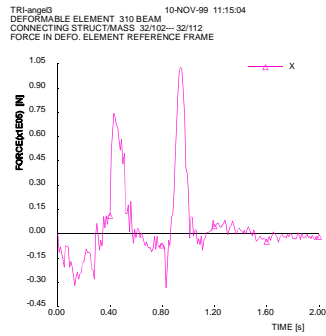
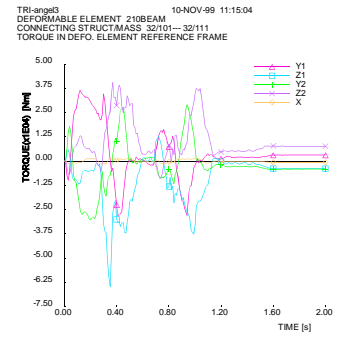
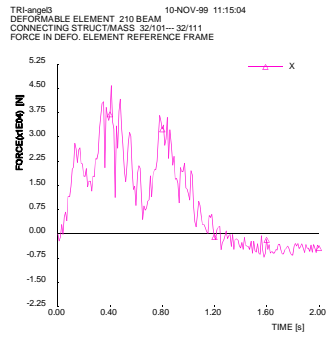
13-DEC-99 22:14:10
 V38TRI
 trekker voertuig



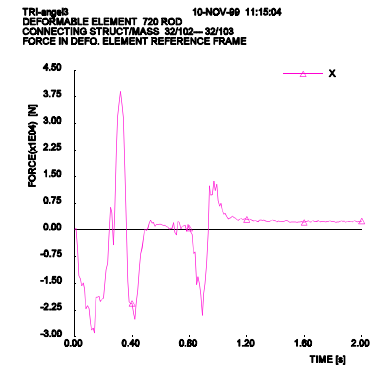
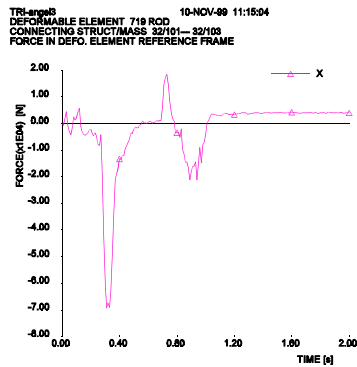
Afbeelding 4.9. ASI-waarde in het zwaartepunt van de trekker als functie van de tijd



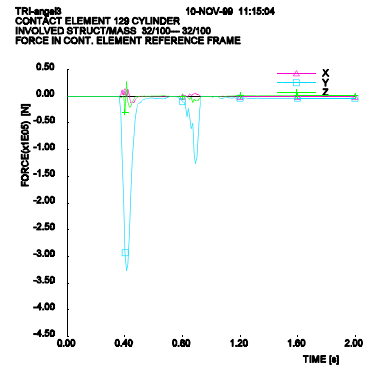
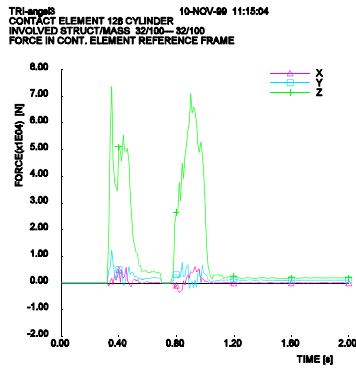
Afbeelding 4.10. Belasting in de BEAM-elementen ter modellering van de stijfheid en sterkte van de planken tussen de zwaarst belaste staander en de staander daaraan voorafgaand.



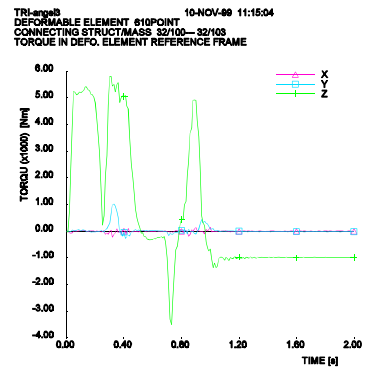
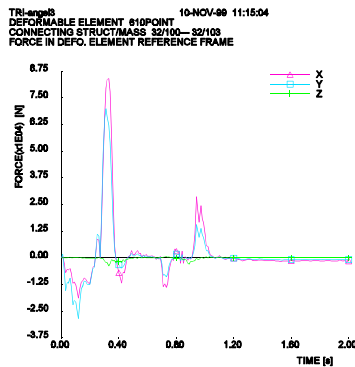
Afbeelding 4.11. *Belasting in de BEAM-elementen ter modellering van de stijfheid en sterkte van de planken tussen de zwaarst belaste staander en de staander daarop volgend.*



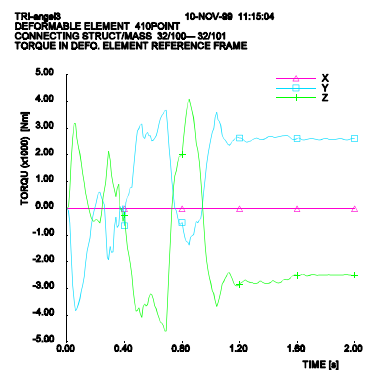
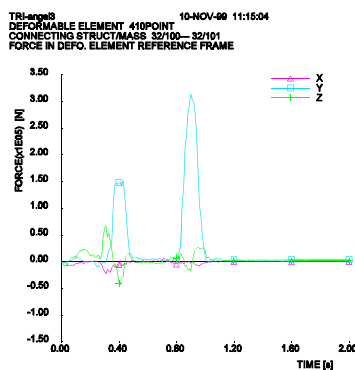
Afbeelding 4.12. *Belasting in de ROD-elementen van het koppelmechanisme*



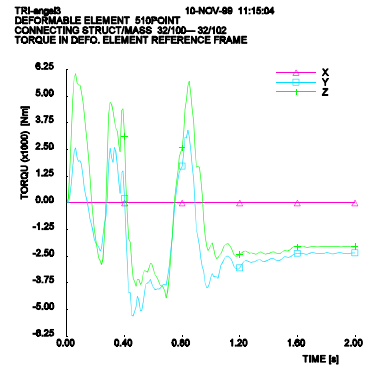
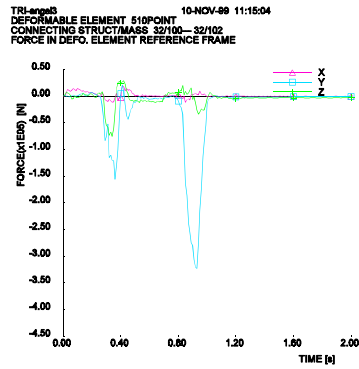
Afbeelding 4.13. *Belasting in de CYLINDER-elementen van de staander die contact maken met de planken aan voor- (rechts) en achterzijde (links)*



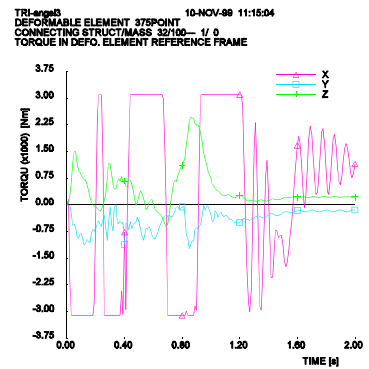
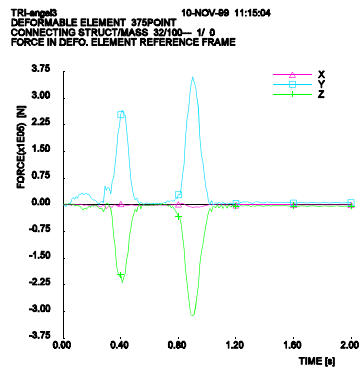
Afbeelding 4.13. *Belasting in het POINT-element ter modellering van het scharnier tussen staander en koppelschijf*



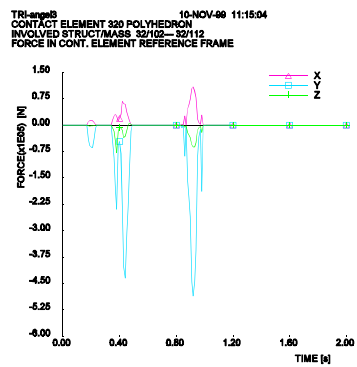
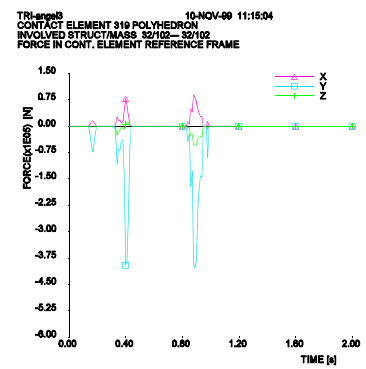
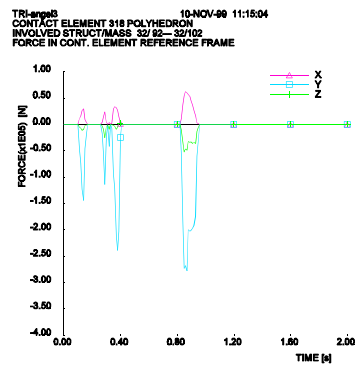
Afbeelding 4.14. *Belasting in het POINT-element ter modellering van het scharnier tussen staander en de planken aan de achterzijde*



Afbeelding 4.15. Belasting in het POINT-element ter modellering van het scharnier tussen staander en de planken aan de voorzijde



Afbeelding 4.16. Belasting in het POINT-element ter modellering van het scharnier tussen staander en fundatie



Afbeelding 4.17. Belasting op de drie POLYHEDRON-elementen, verbonden aan de zwaarst belaste staander, als gevolg van de botsing tussen de trekker oplegger en de TRI-angel met scharnier

Bijlage 5

Korte beschrijving van de werking van het computerprogramma VEDYAC

Ir. J. van der Sluis
Leidschendam, 1991
Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV

1. 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 modeleren 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.

2. De Gereedschappen

De basisgereedschappen 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 traagheidsproducten 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 (referentienodes).

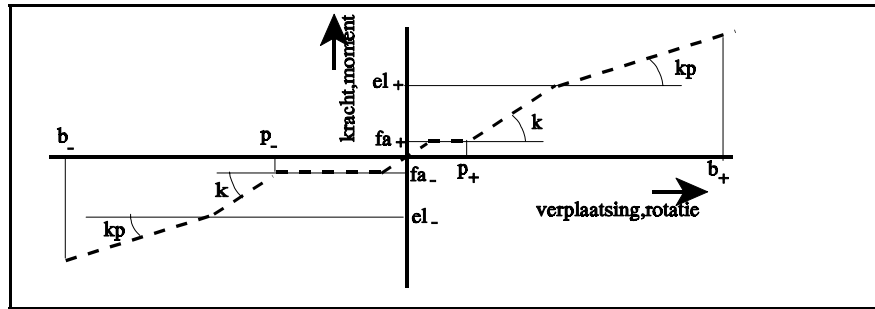
- *verbindingen (DEFORMABLE ELEMENTS)*

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

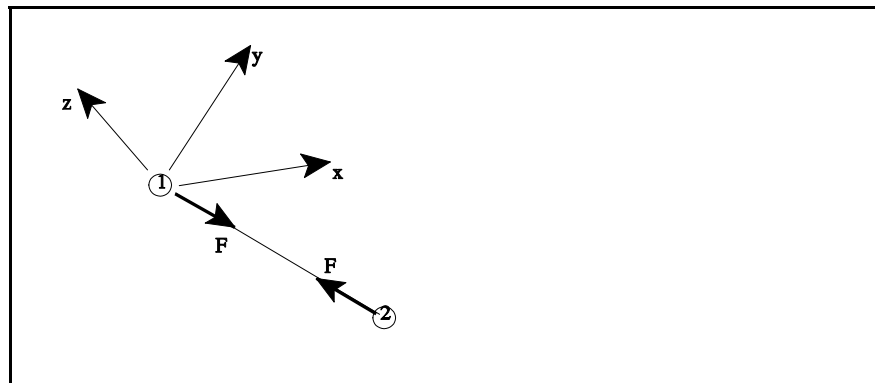
Iedere verbinding legt beperking op aan een aantal componenten van de relatieve beweging van de verbonden NODES. De ROD beperkt de verandering van de onderlinge afstand van de puntmassa's. De POINT verbinding beperkt alle zes de componenten, waarbij de te verbinden NODES op dezelfde plaats mogen liggen.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

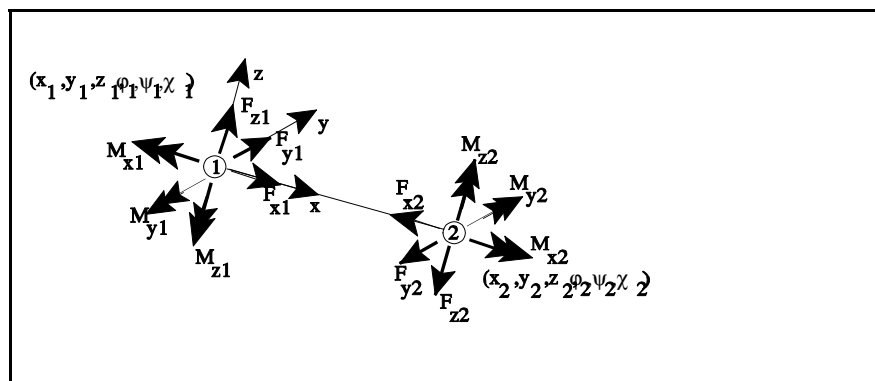


Afbeelding B1. Het kracht-verplaatsingsdiagram.

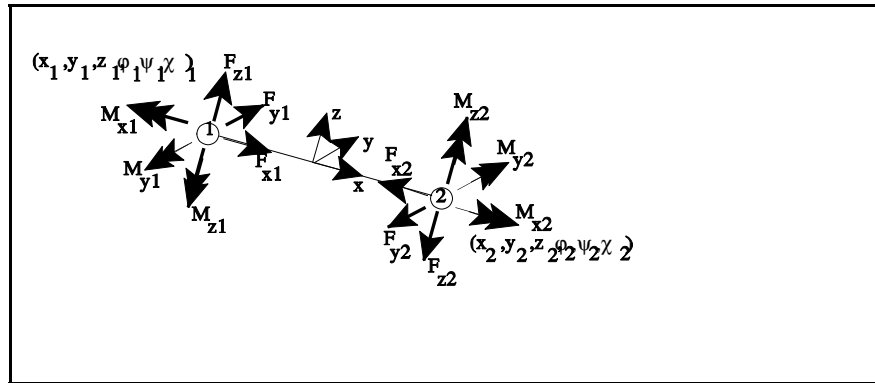
De vorm van een kracht-verplaatsing dan wel moment-rotatie diagram is gegeven in *Afbeelding B1*. De karakteristiek in *Afbeelding B1* wordt beschreven door de stijfheid (k), de speling (p_+, p_-), de spelingsweerstand (f_{a+}, f_{a-}), de plasticiteitsgrens (e_{l+}, e_{l-}), de plastische stijfheid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

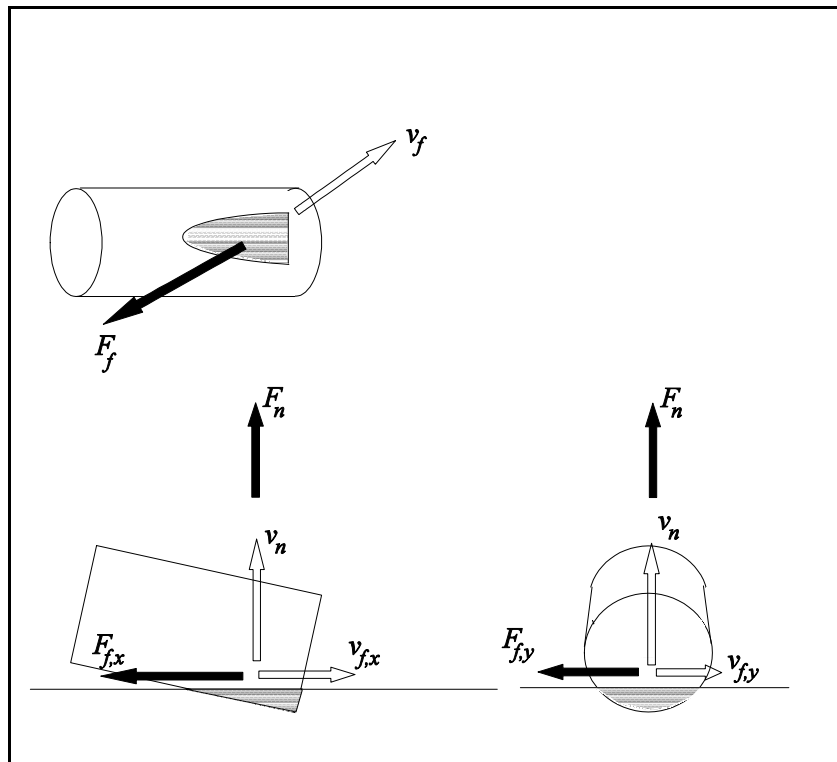
In *Afbeelding B5* betekent een 1 dat het programma contact tussen beide contactlichamen kent, een 0 betekent dat het programma geen contacten tussen beide contactlichamen kent. Er worden contactkrachten berekend

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 simula-tieconstante 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 wrij-vingskracht (F_f) berekend. De grootte van de krachten worden berekend vol-gens 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 contacteigenschappen worden toegekend maar ook traagheidseigenschappen. Bovendien worden er dwarskrachten berekend.

3. 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.

4. 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 simulatieresultaten 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.

5. 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.

6. 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.

- *rekeningtijd*

De rekeningtijd 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.