

MATHEMATISCHE MODELLEN VOOR VEILIGER VERKEER

Artikel Technovisie (1984) (mei) : 13 t/m 17

R-84-37

Ir. T. Heijer

Leidschendam, 1984

Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV

MATHEMATISCHE MODELLEN: WELKOM HULPMIDDEL VOOR VEILIGER VERKEER

Een samenvatting van de stand van zaken rond de ontwikkeling van mathematische modellen, zoals ontwikkeld door de Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV, samen met het Instituut voor Wegtransportmiddelen van TNO en prof. V. Giavotto van de TH-Milaan.

Het alledaagse verkeer roept veel problemen op waarvoor maar moeilijk oplossingen zijn te vinden. Centraal staat hier de vraag, hoe het aantal ongevallen te verminderen en de gevolgen ervan te verkleinen.

- Hoe steil mag een niet-afgeschermd talud van een snelweg zijn?
- Hoe gedragen (nieuw ontworpen) geleiderailconstructies zich bij aanrijdingen door personen- of vrachtauto's?
- Wat is de invloed van een slecht wegdek, slechte schokdempers e.d. op het gedrag van voertuigen tijdens kritieke manoeuvres?
- Kunnen voetgangers en fietsers beter worden beschermd bij botsingen met snelverkeer?

Het gebruikelijke verkeersveiligheidsonderzoek, in de vorm van ongeval-
lenanalyses en praktijkproeven in en buiten de laboratoria, kan op dit soort vragen op z'n best gedeeltelijk antwoord geven.

Een relatief nieuwe techniek kan hier (gaan) helpen: het computermodel, een welkome aanvulling op ongevallenanalyses en praktijkproeven.

Waar schieten deze laatste technieken te kort? Dat laat zich als volgt samenvatten.

Bij ongevallenanalyses worden botsings- en overige omstandigheden in verband gebracht met letsels en schade. Uiteindelijk moet dergelijk onderzoek een representatief beeld geven van door verkeersongevallen ontstane letsels en schade en de factoren die daarop van invloed zijn. Statistisch gezien geven de (dure) analyses goede informatie, maar nauwkeurige detailinformatie is er niet uit te halen.

Dit laatste komt beter uit de verf bij praktijkproeven. Maar ook die hebben nadelen: ze zijn duur - f 25.000 voor een proef is heel normaal - en ze leveren relatief weinig informatie. Per proef wordt slechts één situatie nagebootst en - uiteraard - er kunnen geen proefpersonen worden ingezet.

Verzamelen van gegevens over ongevallen in uiteenlopende omstandigheden is op deze wijze daarom vaak onmogelijk. Daar komt bij dat het letselvoorspellend vermogen vaak beperkt is, vooral bij gecompliceerde ongevallen. Anders gezegd, de proeven geven een onvolledig beeld van het letsel dat een mens kan oplopen.

Modellen

Op basis van ongevallenanalyses en botsproeven en met behulp van wiskunde en mechanica kunnen computermodellen worden samengesteld die in staat zijn ontbrekende gegevens aan te vullen.

De SWOV gaf aan het eind van de zestiger jaren de aanzet tot het ontwikkelen van dergelijke modellen. Dat gebeurde in samenwerking met prof. V. Giavotto van de Technische Hogeschool van Milaan en met het Instituut voor Wegtransportmiddelen TNO.

Die samenwerking leverde aanvankelijk twee soorten modellen op:

- het samen met prof. Giavotto ontwikkelde MAMIAC-model (=Mathematical Model for Impact Against Crash barriers) waarmee de botsing van een (vracht)auto tegen een geleiderailconstructie wordt nagebootst;
- de (door IW-TNO ontwikkelde) twee- en driedimensionale MADYMO-modellen (=Mathematische DYNAMISCHE Modellen), waarmee mensachtige ketenstructuren en de botsing daarvan met omgevende vlakken kunnen worden bestudeerd. Hiermee kan het gedrag van voertuiginzittenden, voetgangers e.d. tijdens een botsing worden gesimuleerd (zie Bijlage 1: Hoe werkt MADYMO?).

Omdat de modellen al snel succesvolle hulpmiddelen bleken te zijn, werd besloten een meer universeel voertuigmodel te ontwikkelen, dat bovendien geschikt moest zijn voor toepassing op kleinere (mini)computers. Dit is het VEDYAC-model (=VEHICLE DYNAMICS AND CRASH DYNAMICS) geworden (zie Bijlage 2: Hoe werkt VEDYAC?). Het model is overigens nog niet helemaal gereed.

Naar een beter ontwerp

Het oudste model, MAMIAC, kende feitelijk maar één overkoepelende ontwerp-eis: het moest de SWOV in staat stellen bestaande geleiderailconstructies te verbeteren of zo nodig geheel opnieuw te ontwerpen.

Daartoe werd een eenvoudig voertuigmodel ontwikkeld dat bestaat uit een star lichaam, waarop op voorgeschreven plaatsen krachten van carrosserievervorming en wielophanging aangrijpen. De vervormingskrachten worden volgens voorgeschreven krommen berekend.

De wielophangingen zijn als massa-veer-demper-systemen gemodelleerd en de banden door een torus. De geleiderail is op een gecompliceerdere wijze gedefinieerd, namelijk met eindige elementen.

MAMIAC is geverifieerd met een aantal praktijkproeven met personenauto's, vrachtwagens en een bus. Het model heeft veel invoergegevens nodig die voor elke simulatie vanaf een extern medium (kaarten) moeten worden ingelezen. Het is daardoor relatief duur in gebruik en niet erg gebruikersvriendelijk. Toch is het model zeer succesvol gebruikt bij de verbetering van veel, heden ten dage gebruikte, beveiligingsconstructies. Zo werd het toegepast bij het ontwerp van een speciale beveiliging van de viaducten in de rondweg om Brussel, die in staat moest zijn zelfs zeer zware vrachtwagens met relatief hoge snelheden op te vangen en te geleiden.

De ervaringen met MAMIAC hebben tot een veel beter ontwerp van nieuwere modellen geleid. Ten eerste is de modelinvoer is nu zo gestructueerd dat snel herkenbare functionele groepen kunnen worden gevormd. De flexibiliteit is door te variëren aantallen en grootte van de bewegende systemen vergroot; de modellen genereren zelf bewegingsvergelijkingen. Verder is de structuur modulair gemaakt, zodat het model gemakkelijk in overlays in een kleinere computer kan worden toegepast; deze structuur heeft bovendien tot voordeel dat toevoegen van nieuwe modelfuncties veel eenvoudiger is.

Bij zeer grote modellen, zoals VEDYAC, wordt een aantal hoofdfuncties - zoals invoer en beheer van invoergegevens, berekening en verwerking van uitvoergegevens - in aparte programma's ondergebracht. Deze programma's (die op zich een groot aantal overlayniveaus hebben) communiceren via een gemeenschappelijk gegevensbestand en kunnen elkaar starten.

Hoeveel tijd kost een simulatie?

De rekensnelheid op de mini-computer van de SWOV (een Digital PDP 11/34) is sterk afhankelijk van de complexiteit van de simulatie; de rekentijd varieert van ongeveer 1 uur voor een botsing van een personenauto tegen

een betonnen geleiderail tot meer dan 48 uur voor een taludongeval van een truck met oplegger en losse lading.

De rekentijd voor systemen met eindige elementen kan nog veel verder oplopen, waardoor het aantrekkelijk wordt naar een grotere computer uit te wijken.

Wat kunnen de huidige modellen?

De huidige modellen geven een goed idee van krachten, momenten, versnelingen en (bij eindige elementen) vervormingen die optreden bij mens, voertuig en wegmeubilair.

Er kunnen zowel veel voorkomende als uitzonderlijke - in de praktijk moeilijk te beproeven - situaties mee worden nagebootst. En niet alleen met auto's, maar ook met tweewielers en in principe ook met spoorwegwagons of vliegtuigen. Ze kunnen verder een indruk geven van wat er met een mens in of tegen die botsende voertuigen gebeuren kan.

Deze modellen zijn voor een deel al operationeel. Ze kunnen worden gebruikt voor Computer Aided Design van voertuigen en hun beveiligingsmiddelen, wegdekken, wegbermen en wegmeubilair.

De operationele modellen zijn ook geschikt voor (beperkte) reconstructie van ongevallen (analysehulpmiddel) en het beperken van het aantal benodigde praktijkproeven (kostenbesparing). Ook kunnen de effecten van slijtage van weg en voertuig op het voertuiggedrag (spoorvorming, slechte schokbrekers, klapband etc.) ermee worden nagegaan. Hierdoor kunnen we meer inzicht krijgen in die factoren in het verkeer die menselijk falen in de hand werken of versterken.

De op mechanica gebaseerde modellen leveren geen directe voorspelling van mogelijke letselpatronen, maar verschaffen wel inzicht in het mechanisch geweld dat letsels kan veroorzaken. Er wordt op dit moment gewerkt aan een model dat in staat moet zijn dat geweld te vertalen in letsel.

Doordat de menselijke letselgevoeligheid grote variaties vertoont kan dit model niet, zoals de hiervoor behandelde, een deterministisch model zijn. Daarom zal gebruik moeten worden gemaakt van statistische technieken om de invloed van die variatie in het model te kunnen verwerken.

Al met al zijn computermodellen in het verkeersveiligheidsonderzoek zeer bruikbare instrumenten. Het blijven echter modellen; afbeeldingen van de realiteit, samengesteld op grond van waarnemingen, extrapolaties en soms speculaties. Geregelde verificatie blijft noodzakelijk en dan nog moeten we ons terdege bewust blijven van de beperkingen en grenzen van de betrouwbaarheid.

Bijlage 1: Hoe werkt MADYMO?

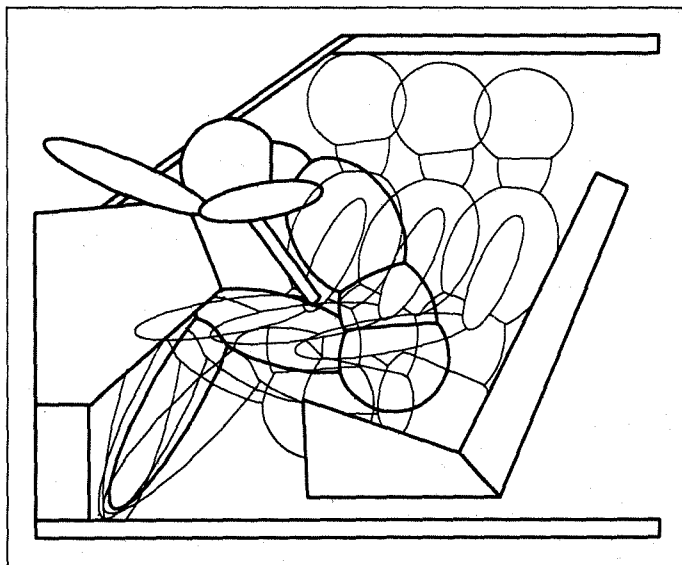
De door het Instituut voor Wegtransportmiddelen TNO (IW/TNO) ontwikkelde MADYMO-modellen berekenen het gedrag van open, vertakte ketenstructuren. Die ketens bestaan uit scharnierend verbonden starre staven met geconcentreerd gedachte massa. De gebruiker kan ketens van een willekeurig aantal elementen samenstellen en bovendien meerdere ketens definiëren; het model stelt zelf de bewegingsvergelijkingen op.

De oplossingsmethode voor deze vergelijkingen is gebaseerd op de vergelijkingen van Lagrange, die de relatie beschrijven tussen de verandering van kinetische energie van de stelsels en de arbeid die wordt verricht door inwendige en uitwendige krachten -en momenten en pseudokrachten (bijv. Coriolis). Inwendige scharnierkrachten leveren geen arbeid en worden dus niet berekend.

Krachten en momenten op de keten kunnen worden veroorzaakt door:

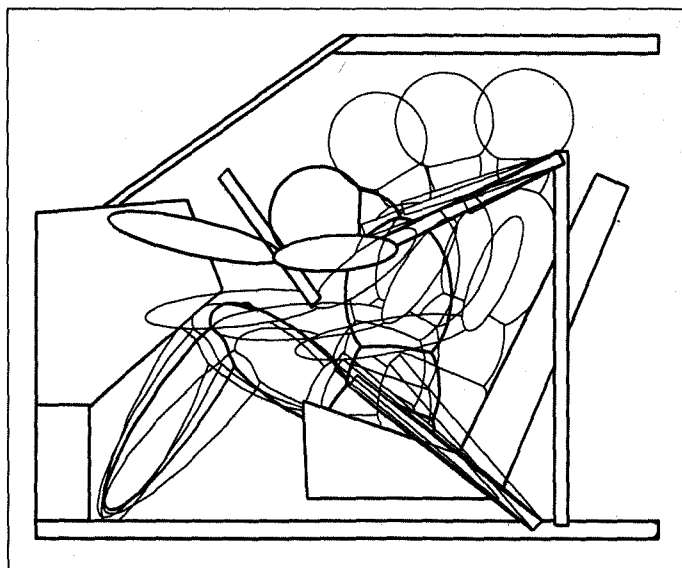
- versnellingsvelden (zwaartekracht);
- contactkrachten; aan elk element van een keten kunnen één of meer ellipsen of ellipsoiden worden verbonden die vlakken, die aan de omgeving zijn verbonden, kunnen doorsnijden; aan de mate van doorsnijding wordt, via voorgeschreven relaties, een kracht toegekend;
- scharniermomenten die, ook volgens voorgeschreven krommen, worden afgeleid van de relatieve hoeken van twee opeenvolgende ketenelementen;
- dempings- en wrijvingskrachten, per ellipsoïde en per scharnier voor te schrijven.

De bewegingsvergelijkingen worden opgelost met een 4de orde Runge-Kutta-methode met vaste, door de gebruiker in te stellen, tijdstap. De modellen, ook de drie dimensionale versie, zijn betrekkelijk klein van omvang en leveren op een klein computersysteem geen exorbitante rekentijden op.



```

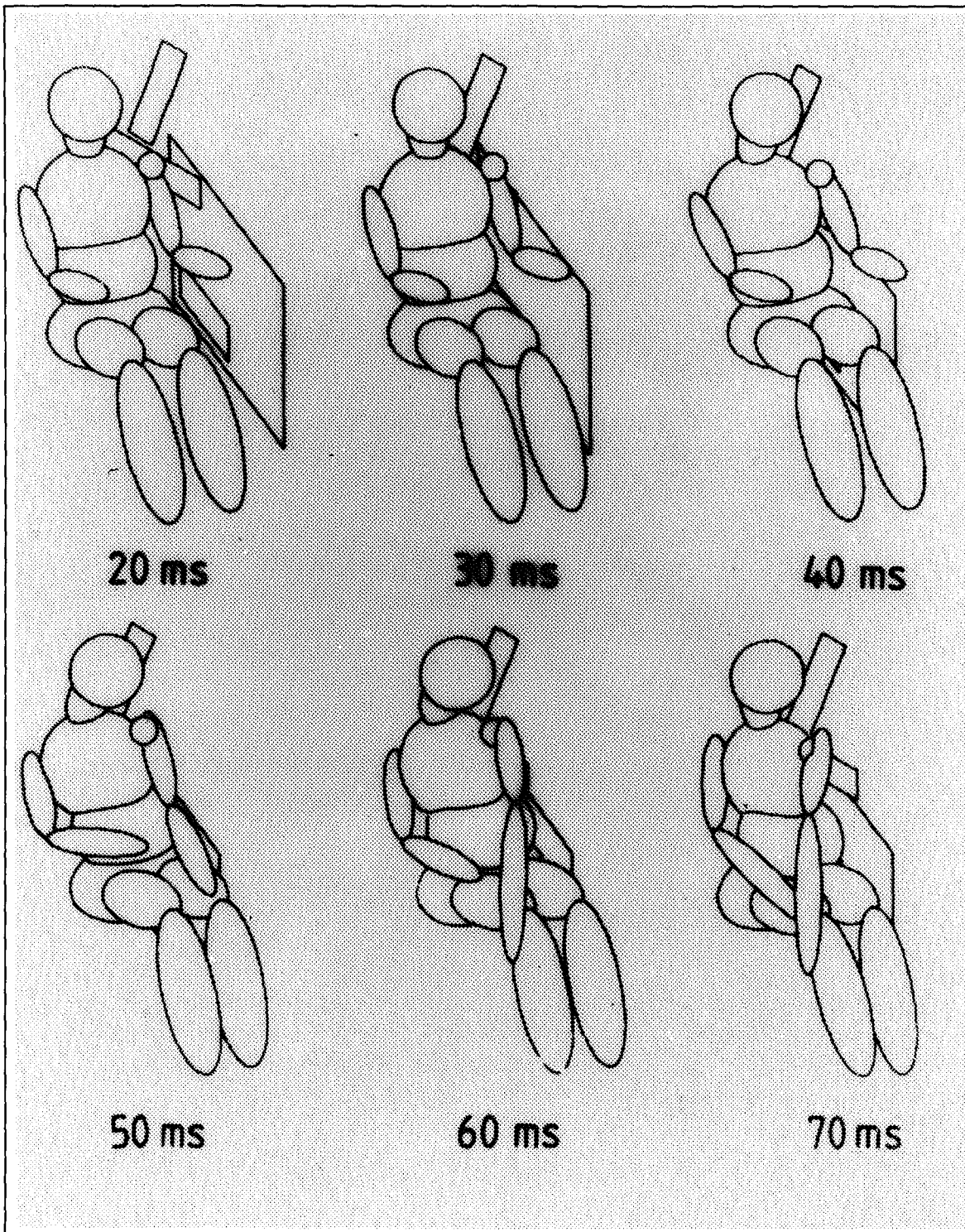
R U N 716
MAX HEAD EXCURSION HOR      = 0.663 M
MAX HEAD EXCURSION VERT    = 0.693 M
MAX FORCE SHOULDERBELT UPPER = 0 N
MAX FORCE SHOULDERBELT LOWER = 0 N
MAX FORCE IN LAPBELT        = 0 N
MAX RES HEAD ACCELERATION   = 608 M/S**2
MAX RES CHEST ACCELERATION  = 533 M/S**2
MAX FEMUR LOAD              = 18932 N
SEVERITY INDEX              = 422
HEAD INJURY CRITERION      = 236
  
```



```

R U N 718
MAX HEAD EXCURSION HOR      = 0.464 M
MAX HEAD EXCURSION VERT    = 0.281 M
MAX FORCE SHOULDERBELT UPPER = 6364 N
MAX FORCE SHOULDERBELT LOWER = 4262 N
MAX FORCE IN LAPBELT        = 4262 N
MAX RES HEAD ACCELERATION   = 326 M/S**2
MAX RES CHEST ACCELERATION  = 326 M/S**2
MAX FEMUR LOAD              = 3177 N
SEVERITY INDEX              = 250
HEAD INJURY CRITERION      = 227
  
```

Een MADYMO-simulatie van een frontale botsing en de rol van autogordelgebruik daarbij. Zonder gordel slaat de voorinzittende met het hoofd tegen de voorruit (boven). Wanneer de gordel wel gebruikt wordt, zijn de gevolgen, uitgedrukt in de "severity index", veel minder ernstig (onder).



Een MADYMO-simulatie waarbij een Peugeot 504 met een snelheid van ongeveer 70 km/uur wordt aangereden. De simulatie laat de effecten zien van de vervorming van de deur en de deurstijlen op de bestuurder.

Bijlage 2: Hoe werkt VEDYAC?

VEDYAC is in principe een voertuigmodel, waarbij de mogelijkheden om het voertuig te definiëren zo ruim zijn, dat het geschikt is voor de simulatie van een veelheid van bewegende (en interagerende) lichamen. Binnen een simulatie kunnen twee of meer zogenaamde systemen worden gedefinieerd, die in het algemeen kunnen bewegen, maar ook 'vast' kunnen zijn, zoals een wegooppervlak of een obstakel. Die systemen bestaan uit onvervormbare lichamen waaraan, willekeurig, subsystemen van de volgende aard kunnen worden bevestigd:

- vlakstructuren, die ofwel een onbegrensd vlak beschrijven, dan wel door een aantal rechte lijnen is begrensd. Elk vlak kent een afzonderlijke hardheid en wrijving. De vlakken worden gebruikt voor de beschrijving van weinig of niet vervormbare delen van een systeem;
- cilindrs, die, in interactie met vlakken, kunnen vervormen en op een "pneumatische" manier, via druk- en oppervlakteverandering, tot interactiekrachten leiden. De cilindrs zijn eenvoudig en goed toepasbaar in gevallen waarin krachten en vervormingen geen al te grote waarden zullen krijgen;
- vervormbare structuren, op eindige elementen gebaseerd, die voor grotere vervormingen gebruikt kunnen worden. De elementen zijn vrij eenvoudige, vierhoekige, elementen die bestaan uit staven - die uitsluitend op trek en druk worden belast en elastisch en plastisch vervormen -, liggers - die daarnaast ook elastische en plastische buiging kunnen ondergaan (alleen in de scharnieren aan de uiteinden) - en "afschuifpanelen", die, omdat de elementen altijd vierhoekig zijn, steeds als twee diagonale staven worden gemodelleerd. De elementen kunnen onderling interageren maar kunnen ook met de cilindrs botsen, waardoor het mogelijk is eenvoudige en meer ingewikkelde systemen te mengen;
- wielophangingen, in feite de enige subsystemen met een specifieke voertuigfunctie. Op dit moment kan gekozen worden uit onafhankelijke wielophanging en starre (tandem)assen, waarbij het aantal wielen per as te variëren is. De veer- en dempingseigenschappen kunnen per as worden bepaald, alsmede een aantal bandeigenschappen (druk, wrijving). Het model voorziet ook in de mogelijkheid van anti-rol stabilisatoren. De wielophanging kan bestuurbaar of vast zijn, stuurbewegingen kunnen als tijd-functie in het model worden opgelegd. Ook rem- en acceleratiemomenten op

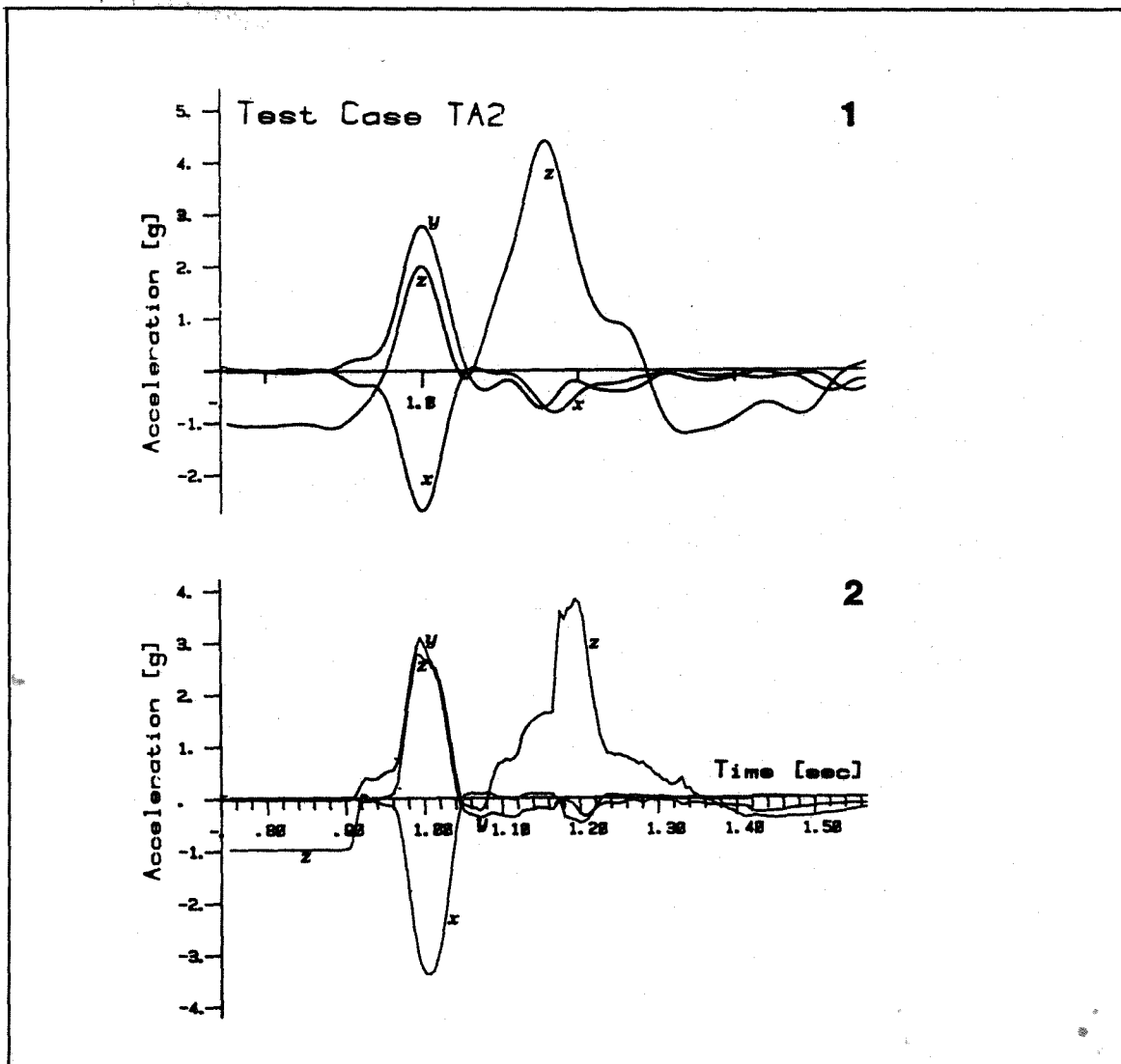
de wielen kunnen als tijdsfunctie worden ingevoerd. Het aantal en de plaats van de wielophangingen aan een systeem kan door de gebruiker worden bepaald.

Behalve door interactiekrachten op vlakken e.d., kunnen systemen op één of meerdere punten met elkaar worden verbonden. Aan die punten kunnen elastische, plastische en bezwijkingseigenschappen worden toegekend, zowel voor translaties als rotaties.

Het is mogelijk een aantal systemen te organiseren in een zogenaamd supersysteem, waarin hun onderlinge posities, verbindingpunten en verbindingseigenschappen in een beginpositie eenmalig worden vastgelegd. Vervolgens kan men het supersysteem behandelen als een enkel systeem waarbij alleen de begincondities van het eerste systeem binnen het supersysteem worden gegeven.

De integratie van de bewegingsvergelijkingen van deze complexe modellen vindt stapsgewijs, op twee manieren, plaats:

- bewegingen binnen een systeem, inclusief de beweging van de wielophangingen, worden geïntegreerd met een impliciete methode;
- interacties tussen systemen wordt expliciet geïntegreerd. Het gaat hier om een Newmark-methode met variabele tijdstap; de tijdstap wordt afhankelijk van maximale versnellingsverschillen (door de gebruiker te bepalen) vergroot of verkleind.



Een VEDYAC-simulatie, een praktijkproef en de bijbehorende grafieken van de versnelling van het zwaartepunt (1. gemeten waarden, 2. waarden volgens model) van een Opel Kadet die met een snelheid van ongeveer 75 km/uur onder een aanrijhoek van 20° een talud met een helling van 1 : 2 afrijdt.