

Implementatie-aspecten van een semi-actief veersysteem met preview

Citation for published version (APA):

van Eeghem, J. S. (1993). *Implementatie-aspecten van een semi-actief veersysteem met preview*. (DCT rapporten; Vol. 1993.014). Technische Universiteit Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1993

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

**Implementatie-aspecten
van een semi-actief veersysteem met preview**

Jean van Eeghem
WFW Rapport 93.014

**Implementatie-aspecten
van een semi-actief veersysteem met preview**

**Jean van Eeghem
Eindhoven, januari 1993**

Samenvatting

In deze stage is geprobeerd een programma te ontwikkelen dat simulaties kan uitvoeren van de regeling van semi-actief veersysteem met preview waarbij voor de toegepaste tweestanden demper een realistische overgang van de ene stand naar de andere wordt meegenomen. Het doel van de regeling is het verminderen van de chassis versnellingen. Deze regeling is overgenomen van Sander Kerssemakers [4].

Aan de basis van de opdracht staat een programma in matlab syntax, geschreven door Kerssemakers. Als belangrijkste verschil tussen de uitgangssituatie en de situatie na het in rekening brengen van optredende vertragingen, kan opgemerkt worden dat er nu in de systeembeschrijving tijdsafhankelijke termen voorkomen. Voor het nieuwe programma is ook gebruik gemaakt van het pakket Matlab. Hierin is een standaardroutine opgenomen voor het oplossen van tijdsafhankelijke stelsels vergelijkingen. Deze routine (ode45.m) lost het stelsel op met vierde en vijfde orde Runga-Kutta formules.

In het programma van Kerssemakers word gesimuleerd met een karakteristiek waarin de overgang tussen de twee standen oneindig snel plaatsvindt (stapfunctie). In de praktijk verloopt deze karakteristiek echter volgens een eerste orde vertraging, verder is gebleken uit eerder onderzoek dat in werkelijkheid het overschakelen van een stand naar de andere, pas plaatsvindt na een zekere vertragingstijd. Deze vertragingstijd is het gevolg van beperkingen van het overbrengen van informatie tussen het systeem dat het schakelcommando verzorgt en de en het systeem dat de schakeling ondergaat (demper).

Uit simulaties met het bulsignaal als ingang blijkt dat ondanks het meenemen van de eerste orde vertraging en de vertragingstijd, de prestaties van het semi-actieve veersysteem t.o.v. het passieve systeem nog steeds erg goed zijn. Ten opzichte van het door Kerssemakers gehanteerde systeem verslechteren de prestaties minimaal. Bij t_d 's kleiner dan $0.5 \cdot 10^{-1}$ sec gaan de prestaties afnemen ten opzichte van het systeem van Kerssemakers.

De vertragingstijd heeft weinig tot geen invloed op de prestatie van de regeling. De waarde van de vertragingstijd is bekend en kan dus in de berekeningen meegenomen worden. Mits het moment waarop het schakeltijdstip berekend wordt en het schakeltijdstip zelf verder dan de vertragingstijd van elkaar verwijderd zijn, kan het schakeltijdstip vervroegd worden met de waarde van de vertragingstijd. Uit de simulaties blijkt dat dit vrijwel altijd mogelijk is.

Inhoudsopgave

Samenvatting	i
Symbolenlijst	iii
Hoofdstuk 1. Inleiding	1
Hoofdstuk 2. Probleemomschrijving	3
2.1 Inleiding	3
2.2 Het gebruikte model	3
2.3 Het snelheidskriterium	4
2.4 Praktische implementatie	4
2.5 Eisen gesteld aan het geregelde model	5
Hoofdstuk 3. De uitwerking	7
3.1 Inleiding	7
3.2 Eerste orde vertraging	7
3.3 Vertragingstijd	7
3.4 Regelstrategie voor aansturing van de demper.	8
3.5 Performance	9
Hoofdstuk 4. Resultaten	11
4.1 Inleiding	11
4.2 Bespreken van de resultaten	11
4.3 Gevolgen van praktische implementatie	16
Hoofdstuk 5. Conclusies	17
Hoofdstuk 6. Aanbevelingen	18
Literatuur	19
Bijlage A	A.1
Bijlage B	B.1
Bijlage C	C.1

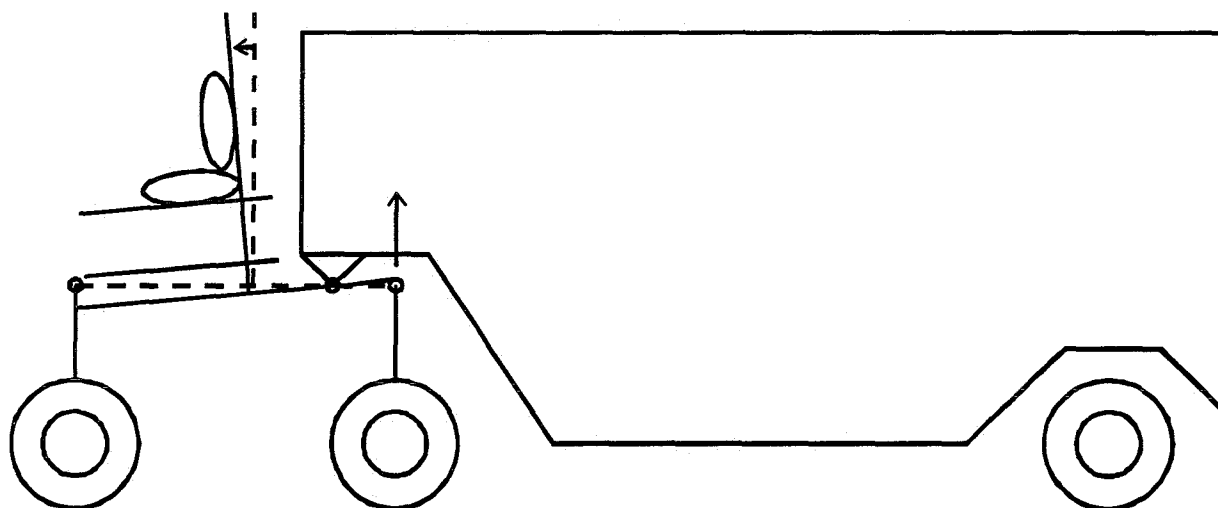
Symbolenlijst

m_1	massa van de as (onafgeveerde massa)	[kg]
m_2	massa van het chassis (onafgeveerde massa)	[kg]
k_1	veerconstante van de vering	[N/m]
k_2	veerconstante van de band	[N/m]
b_2	variabele dempingscoëfficiënt van het veersysteem	[Ns/m]
$b_{2\text{hoog}}$	hoge demperstand van tweestanden demper	[Ns/m]
$b_{2\text{laag}}$	lage demperstand van tweestanden demper	[Ns/m]
y_0	vertikale verplaatsing van het wegdek	[m]
x	toestandskolom	
y	uitgangskolom	
u	ingangskolom	[m]
A	systeemmatrix	
B	ingangsmatrix	
C	uitgangsmatrix	
D	doorkoppelmatrix	
Tau	tijdsconstante van eerste orde vertraging	[s]
T_{vert}	vertragingstijd van het schakelsignaal	
q_{max}	parameter van het bulsignaal (i.e. maximale amplitude)	[m]
t_d	parameter van het bulsignaal (i.e. trillingstijd)	[s]
$y_1, \dot{y}_1, \ddot{y}_1$	vertikale verplaatsing, snelheid en versnelling van de as	[m], [m/s], [m/s ²]
$y_2, \dot{y}_2, \ddot{y}_2$	vertikale verplaatsing, snelheid en versnelling van het chassis	[m], [m/s], [m/s ²]

Hoofdstuk 1. Inleiding

In het kader van een groot project, dat als doel heeft het verbeteren van het dynamisch gedrag van veersystemen van voertuigen, beschrijft dit stageverslag een onderzoek naar de implementatie-aspecten van semi-actieve vering met Preview. Het dynamische gedrag van veersystemen bepaalt het comfort dat een passagier in het voertuig ondervindt, en het weggedrag dat het voertuig vertoont.

Het comfort wordt overwegend gemeten aan versnellingen die inzittenden van het voertuig ondergaan. Verbetering van het comfort betekent dat de absolute waarden van de versnellingen van het chassis zijn afgenomen. In het geval van een trekker oplegger combinatie blijkt dat de versnellingen die de achteras van de trekker ondervindt, een dompversnelling van de cabine veroorzaken (zie figuur 1.1). De resulterende dompbeweging van de cabine wordt als zeer hinderlijk ervaren door de inzittenden van de cabine. DAF als vrachtwagenfabrikant is onder andere geïnteresseerd in het verminderen van de achterasversnellingen en daarmee de dompbewegingen van de cabine. Een ander voordeel van een verbeterde vering is de vermindering van de maximale veerindrukkingen waardoor de laadvloer van de oplegger lager geconstrueerd kan worden (meer laadvermogen).



Figuur 1.1 De achteras versnellingen van de trekker veroorzaken een dompversnelling van de cabine.

Het weggedrag van een voertuig uit zich in de manier waarop het voertuig in staat is om veranderingen in het wegdek te volgen. Hierbij is voortdurend wegcontact van groot belang. Een goed weggedrag vraagt om snelle uitdemping van oneffenheden van het wegdek, dit heeft in principe hoge versnellingen tot gevolg. Een goed comfort vraagt om kleine versnellingen en in het algemeen dus langzame uitdemping. Daar de eisen van weggedrag en comfort conflicterend zijn wordt hiertussen voor passieve veersystemen een compromis gesloten.

Om bij een zelfde weggedrag toch een hoger comfort te kunnen bereiken wordt onderzoek gedaan naar het toepassen van actieve en semi-actieve veersystemen. Actieve veersystemen

bieden de mogelijkheid om energie aan het systeem toe- of af te voeren middels een actuator. Hiermee worden bij een van te voren bekend wegdek (preview) goede resultaten bereikt. Een groot bezwaar blijft echter het moeten toevoegen van grote piekvermogens. Ook zijn de actuatoren beschikbaar voor actieve vering slechts inzetbaar tot frekwenties van maximaal 5 Hz. Bij semi-actieve vering kan de dempingsconstante aangepast worden aan de wensen van het moment. Er wordt echter geen energie toe- of afgevoerd.

De semi-actieve vering waar in dit verslag naar gekeken wordt maakt gebruik van een tweestanden demper. Ook hierbij zijn met predictive control goede resultaten te behalen zoals uit eerder onderzoek blijkt. De Schakelmomenten kunnen echter niet willekeurig gekozen worden omdat ze geen negatieve invloed op het comfort mogen hebben. Door Sander Kerssemakers [4] is een programma geschreven dat deze schakelmomenten kan bepalen. Dit programma gaat uit van een oneindig snelle overgang van één stand naar de andere. In de praktijk verloopt een schakeling echter volgens bepaalde vertragingen.

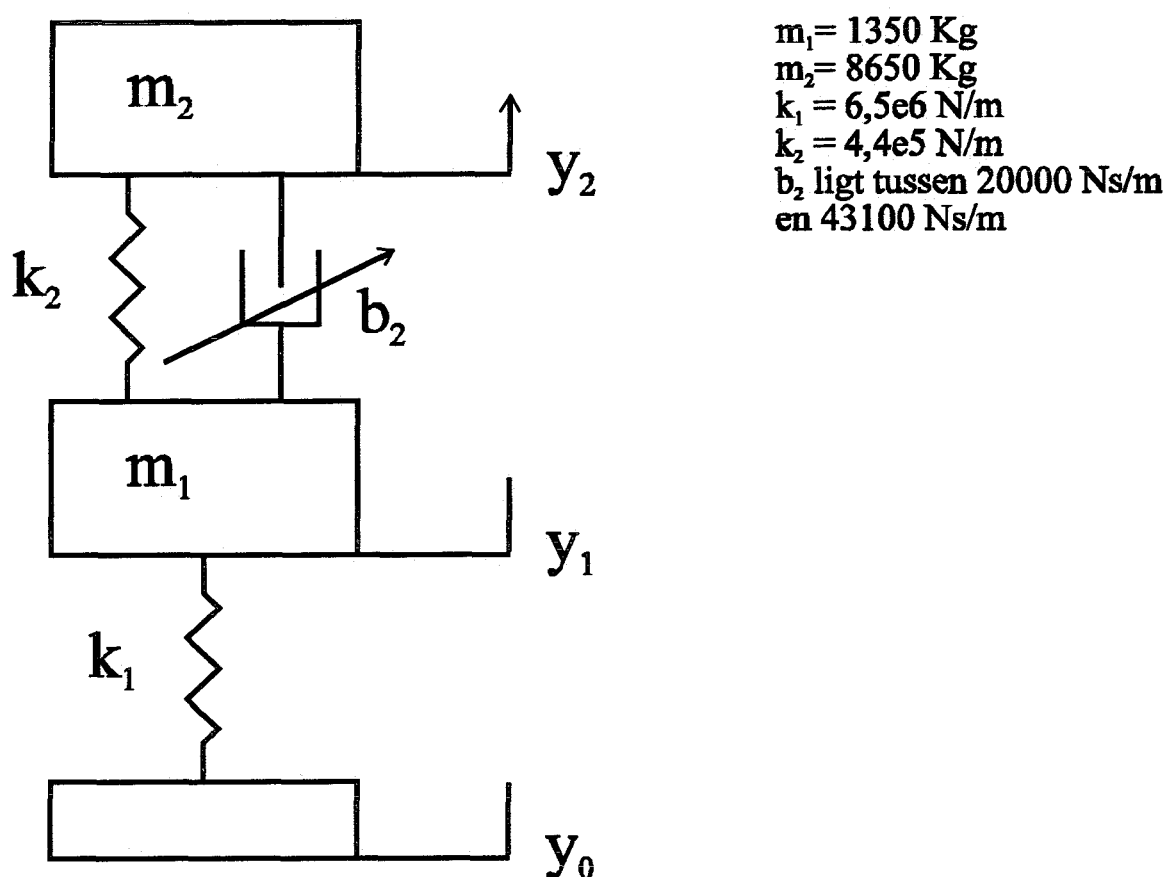
Het doel van deze stage is om een het bestaande programma dusdanig aan te passen dat het deze vertragingen meeneemt in haar berekeningen (dit wordt verder ook praktische implementatie genoemd). Ook moeten de resultaten van het nieuwe programma vergeleken worden met de prestaties van het passieve veersysteem. Voor het bepalen van de performance van de verschillende systemen worden "bultjes van Antoon" als ingangssignaal gebruikt

Hoofdstuk 2. Probleemomschrijving

2.1 Inleiding

Het verslag van Kerssemakers heeft als uitgangspunt voor deze stage gediend. In zijn verslag introduceert hij een regeling voor een semi-actief systeem met preview waarin gebruik gemaakt wordt van een tweestanden demper. Het doel van de regeling is het minimaliseren van de chassis versnellingen. Verder zouden er geen sprongen in de versnelling van het chassis mogen ontstaan, als er op speciale tijdstippen geschakeld wordt. Deze speciale tijdstippen zijn dusdanig gekozen dat een discontinuïteit in de dempingswaarde geen invloed heeft op de bewegingsvergelijking van de massa m_2 . Deze tijdstippen worden gevonden middels het snelheidskriterium.

2.2 Het gebruikte model



Figuur 2.1 Het quarter car model voor het semi-actieve veersysteem.

In figuur 2.1 is de modellering van de vering van een DAF vrachtwagen weergegeven. Er wordt gebruik gemaakt van een quarter car model (trekker-achteras). De massa m_2 stelt het chassis voor, De massa m_1 is gerelateerd aan de wielas. De veer k_2 en de demper b_2 symboliseren de wielophanging. De band wordt gemodelleerd door de veer k_1 . De Demper b_2 is een tweestanden demper. Verplaatsingen y_0 , y_1 en y_2 representeren resp. de wegdek

oneffenheid, de wielasverplaatsing en de chassis verplaatsing. De chassisverplaatsing wordt ondervonden door de chauffeur. De bewegings- en toestandsvergelijkingen van het geregelde systeem zijn opgenomen in Bijlage A. De tweestanden demper die in het model is opgenomen heeft een hoge demperstand van $b_{2\text{hoog}} = 43100$ [Ns/m] (dit is gelijk aan de waarde van de demping bij de huidige vrachtwagen) en een lage demperstand van $b_{2\text{laag}} = 20000$ (dit is een arbitraire waarde). Voor wat betreft het kiezen van $b_{2\text{laag}}$ is men bij de Monroe tweestanden-dempers gebonden aan een maximale verhouding tussen $b_{2\text{laag}}$ en $b_{2\text{hoog}}$ van 5 ($1 \leq b_{2\text{hoog}} / b_{2\text{laag}} \leq 5$).

2.3 Het snelheidskriterium

De bewegingsvergelijking van massa m_2 (Bijlage A relatie 2) laat zien dat een sprong in de dempingswaarde (door te schakelen) ook een sprong in de versnelling van massa m_2 tot gevolg heeft. Wanneer echter de relatieve snelheid tussen massa m_2 en massa m_1 (dit zijn de twee bevestigingspunten van de demper) gelijk is aan nul heeft dit geen invloed. Daar de demperkracht op deze momenten gelijk is aan nul zal deze geen invloed hebben op de versnelling, ook niet als op dit moment de demperstand veranderd wordt. We gaan dit als criterium voor een schakeltijdstip beschouwen. De eisen waaraan een gehanteerd criterium moet voldoen luiden als volgt:

- er mogen geen sprongen in de chassis versnellingen ontstaan als op het nulpunt van het criterium geschakeld wordt.
- het criterium moet zoveel mogelijk nulpunten opleveren om zo vaak mogelijk te kijken of de demping (omlaag) geschakeld kan worden.

Het voor het programma gebruikte criterium is het relatieve snelheidsverschil $(\dot{y}_2 - \dot{y}_1)$, dat verder als snelheidskriterium genoemd zal worden. Voor een beschouwing van mogelijke alternatieven verwijs ik naar het verslag van Sander Kerssemakers [4].

2.4 Praktische implementatie

In gevallen waarbij de demper van stand wisselt is tot nu toe gebruik gemaakt van een stapkarakteristiek. De demper zou oneindig snel van de ene stand naar de andere stand gaan. Gregory R.Firth [3] heeft onderzoek verricht met behulp van een Monroe tweestanden demper waarin een elektro-magnetisch ventiel de overgang tussen de twee standen realiseert. Hieruit blijkt dat in de praktijk tweestanden dempers volgens een eerste orde vertraging van één stand naar de andere gaan. Ook vertonen de tweestanden dempers een -vertragingstijd tussen het moment van de schakelimpuls en het moment wanneer het eerst een verschil in demping is waar te nemen. Het verschil tussen de stapvormige (theoretisch) en de realistische (praktisch geïmplementeerd) karakteristiek is in figuur B.1 aangegeven. De relatie voor de eerste orde vertraging ziet er als volgt uit:

$$T\dot{c}_a + c_a = C \quad (1)$$

Hierin is T de tijdconstante en staat voor de tijd waarna de demping 63% van zijn gewenste waarde heeft aangenomen. C is de gewenste demping, en c_a de actuele demping.

De tijdconstante heeft als typische waarde 10 msec.

De vertragingstijd treedt op als gevolg van praktische beperkingen aan informatieoverdracht tussen het systeem dat het schakelcommando afgeeft en de demper. Zij laat geen verandering van de dempingswaarde van de demper toe zolang de vertragingstijd niet verstreken is. Deze vertraging verschilt dus van de normale vertragingstijd in informatie-transport waarbij alleen een tijdachterstand opgelopen wordt. De typische vertragingstijd die genomen is bedraagt 10 msec.

Het gevolg van het eerste orde verloop van de schakelkarakteristiek en van de vertragingstijd is dat de bandbreedte van de regelstrategie beperkt wordt. Bij een vertragingstijd van 10 msec worden schakelfrekwenties groter dan 100 Hz niet meer gevolgd. De tijdskonstante van de eerste orde vertraging is gelijk aan de tijd waarin 63% van het verschil tussen de twee standen is overbrugd en zal bij schakelfrekwenties boven de 100 Hz zorgen voor een minimale invloed van een schakeling tussen twee standen. Deze twee effecten gecombineerd zullen er toe leiden dat de overgang van een stand naar de andere (het moment dat 63% van het verschil tussen de twee standen is overbrugd) minimaal 20 msec aan tijd zal kosten. Dit betekent dat schakelfrekwenties groter dan 50 Hz niet meer met enig positief resultaat in verband met comfortverbetering zullen leiden.

2.5 Eisen gesteld aan het geregelde model

Met behulp van semi-actieve vering proberen we te komen tot een verbetering van de performance (t.o.v. het passieve systeem). Dit wil zeggen dat het regeling een optimale demperstand instelt waarbij het weggedrag aan minimale eisen voldoet en het comfort zo groot mogelijk is. De eisen waaraan het geregelde model moet voldoen luiden als volgt:

- de versnelling \ddot{y}_2 van het chassis moet zo laag mogelijk zijn om het comfort te verbeteren. De regeling moet door het instellen van de lage i.p.v. de hoge demperstand de versnellingen reduceren, mits alle andere eisen van het geregelde model dit toelaten en mits deze versnellingen een grotere absolute waarde dan 2 m/s^2 hebben. Versnellingen met een kleinere absolute waarde dan \ddot{y}_2 zullen door het kiezen van de hoge demperstand sneller uitgedempt worden.
- de maximale positieve en de maximale negatieve veerlengte $(y_2 - y_1)$ zijn begrenst door constructieve belemmeringen. Voor de beschouwde DAF truck gelden de volgende maximale waarden :
 $- 0.09 \text{ m} \leq (y_2 - y_1) \leq 0.14 \text{ m}$
- de maximale banduitvering $(y_1 - y_0)$ mag niet overschreden worden, omdat dan het weggedrag onacceptabel slecht kan worden of zelfs het wegcontact verloren kan gaan. Voor de beschouwde DAF truck geldt als maximale waarde voor de banduitvering:
 $(y_1 - y_0) \leq 0.015 \text{ m}$

- De overgang van één demperstand in de andere moet verlopen volgens de relatie: $T\dot{c}_a + c_a = C$ (1) T heeft de waarde 0.010 sec, c_a is de actuele demping en C is de gewenste demping.
- Als op een bepaald moment wordt berekend dat op een toekomstig tijdstip geschakeld zal worden, zal indien mogelijk dit schakeltijdstip vervroegd worden met een vertragingstijd van 0.010 sec. Indien dit niet mogelijk is mag de schakelkarakteristiek geen discontinuïteit vertonen totdat de vertragingstijd is verstreken. Schakelfrekwenties hoger dan 100 Hz worden door de demper niet meer gevolgd.
- De regeling mag door te schakelen geen vermindering van de performance vertonen. Hiernaar wordt gekeken alvorens te schakelen.

De informatie over het te verwachten wegdek (ingangssignaal) wordt verkregen uit sensoren aan de vooras van de truck. De previewtijd wordt bepaald uit de kruissnelheid van de truck en de afstand tussen de voor- en achteras, en bedraagt 0.125 sec.

Hoofdstuk 3. De uitwerking

3.1 Inleiding

Het uitwerken van de probleemstelling is uitgevoerd met het software pakket Matlab. Het ontwikkelde programma berekent de responsie van het vrachtwagenmodel met de preview-informatie als ingang, dit zal in de praktijk off-line (d.w.z. dat de tijdsas van het systeem nagenoeg stilstaat) gebeuren. Aan de hand van deze berekening wordt de demperstand voor het interval tussen twee nuldoorgangen van het snelheidskriterium bepaald. On-line ondergaat het systeem de responsie van de werkelijke ingang met de berekende demperstand. De voor de achteras te verwachten ingang wordt geregistreerd bij de vooras. Aangekomen op het einde van het interval berekent het programma wederom de te verwachten responsie bij hoge en/of lage demping voor het komende previewinterval.

3.2 Eerste orde vertraging

Door het meenemen van de eerste orde vertraging voor veranderingen in b_2 zijn de bewegingsvergelijkingen tijdsafhankelijk geworden. Het is daarom niet meer mogelijk om de responsie te genereren met de subroutine `lsim.m` die constante vergelijkingen veronderstelt. Matlab bevat de subroutine `ode45.m` die stelsels differentiaal vergelijkingen oplost m.b.v. integratie. `Ode45.m` roept tijdens het rekenproces voortdurend een subroutine aan waarin de differentiaalvergelijkingen en de juiste waarde van b_2 volgens relatie (1) aanwezig zijn. De tolerantie waarmee door `ode45.m` de responsie bepaald wordt, is ingesteld op $1.0 \cdot 10^{-7}$.

3.3 Vertragingstijd

In verband met de vertragingstijd is het bij een schakeltijdstip noodzakelijk te weten in welke stand de demper zich in het vorige interval bevond. Wanneer in een simulatie de demperstand "hoog" was geldt voor de simulaties over het volgende interval:

- Simulatie hoge demperstand - Geen vertragingstijd verrekenen want de demperstand wisselt niet.
- Simulatie lage demperstand - De demperstand wordt gewijzigd en dus zal er een vertragingstijd verstrijken tussen het schakelcommando en de daadwerkelijke schakeling.

In het nieuwe programma ben ik er van uit gegaan dat op een bepaald schakeltijdstip de simulatie voor het volgende previewinterval wordt uitgevoerd. Op dit tijdstip wordt dus een eventueel volgend schakeltijdstip bepaald en daarom kan er rekening gehouden worden met de vertragingstijd. Het berekende schakeltijdstip wordt dus vervroegd met de waarde van de vertragingstijd. Op deze manier wordt nog steeds voldaan aan het door Kerssemakers gestelde snelheidskriterium voor schakeltijdstippen, en valt de sprong in de

dempingskarakteristiek samen met een nuldoorgang. Figuur B.2 laat zien hoe de responsie verloopt met een "bultje van Antoon" als ingangssignaal. De schakelstand loopt voor (deze is vervroegd met de waarde van de tijdconstante) op de werkelijke verandering in demping.

Echter wanneer een volgend schakeltijdstip niet verder dan de vertragingstijd verwijderd is, is het onmogelijk om het volgende schakeltijdstip met de gehele vertragingstijd te vervroegen. Er zal wel geschakeld worden maar het is nu niet meer mogelijk om het schakeltijdstip aan het snelheidskriterium te laten voldoen. Ook wanneer een schakeltijdstip berekend wordt in het interval $0 \leq t < \text{vertragingstijd}$, is het onmogelijk om dit tijdstip met de vertragingstijd te vervroegen. Om deze situatie te voorkomen wordt het eerste ingangssignaal dat ongelijk is aan nul verschoven naar een tijdstip dat minimaal één vertragingstijd van $t = 0$ verwijderd ligt. Bijvoorbeeld in Figuur B.2 is het ingangssignaal 0.05 sec ten opzichte van $t = 0$ verschoven. Als standaard verschuiving ten opzichte van $t = 0$ is anderhalf maal de vertragingstijd genomen. Deze verschuivingen hebben uiteraard geen invloed op het verloop van de responsie.

3.4 Regelstrategie voor aansturing van de demper.

De regelstrategie in het programma werkt volgens het onderstaande beknopte algoritme. Hierin is "Teind" standaard 0.5 sec en met "versnel." worden alleen de versnellingen van het chassis bedoeld.

Tbegin = Het Eerste Simulatietijdstip

WHILE (Tbegin \leq t \leq Teind)

 Previewinterval = Tbegin + Previewtijd

 Ingangssignaal Over Previewinterval is Bekend

 Demperstand Hoog (fictief)

 Simulatie Uitgangssignaal Over Previewinterval

 Bepalen Nulpunten SnelheidsKriterium

 IF ((Aantal Nulpunten \geq 2) AND (Versnel. \geq Min. Versnel.))

 Demperstand Laag (fictief)

 Nieuwe Simulatie Uitgangssignaal Over Previewinterval

 Bepalen Nieuwe Nulpunten SnelheidsKriterium

 IF ((Aantal Nieuwe Nulpunten \geq 2) AND (Banduitvering Niet Overschreden) AND (Veerwegen Niet Overschreden) AND (Comfort Verbeterd))

 Demping OmLaag (tussen nultijdstippen)

 ELSE

 Demping OmHoog

 END

 END

 Tbegin = Laatste Nultijdstip

END

Voor het hoofdprogramma en de belangrijkste subroutines verwijs ik naar bijlage C.

3.5 Performance

Het programma is getest met de vier verschillende ingangssignalen (bultje, stap, "rounded" stap en drempel) waarbij ook de maximale waarde van het ingangssignaal is gevarieerd. De performance van het geregelde model is echter bekeken aan de hand van de systeemresponsie op de "bultjes van Antoon". Deze bultjes worden gekarakteriseerd door de waarden van t_d en q_{max} ; t_d is de tijd waarop het oppervlak onder het ingangssignaal 96% van zijn totale waarde bereikt en q_{max} is de maximale amplitude van het ingangssignaal. In figuur B.3 zijn "bultjes van Antoon" opgenomen met een gevarieerde t_d . De bultjes hebben voor iedere vorm (t_d) een amplitude (q_{max}) waarbij het passieve systeem in zijn responsie net niet de maximale banduitvering overschrijdt of net niet de maximale veerwegen overschrijdt. In Tabel 1 wordt een overzicht gegeven van de gebruikte waarden voor t_d en bijbehorende q_{max} (uit het rapport van Rudolf Huisman [1]).

t_d	q_{max}	t_d	q_{max}
[s]	[m]	[s]	[m]
$1.00 \cdot 10^{-2}$	$5.20 \cdot 10^{-2}$	$3.06 \cdot 10^{-1}$	$1.02 \cdot 10^{-1}$
$2.20 \cdot 10^{-2}$	$2.64 \cdot 10^{-2}$	$3.44 \cdot 10^{-1}$	$1.09 \cdot 10^{-1}$
$4.84 \cdot 10^{-2}$	$1.87 \cdot 10^{-2}$	$3.87 \cdot 10^{-1}$	$1.17 \cdot 10^{-1}$
$7.14 \cdot 10^{-2}$	$1.93 \cdot 10^{-2}$	$4.36 \cdot 10^{-1}$	$1.26 \cdot 10^{-1}$
$1.06 \cdot 10^{-1}$	$2.36 \cdot 10^{-2}$	$5.10 \cdot 10^{-1}$	$1.40 \cdot 10^{-1}$
$1.29 \cdot 10^{-1}$	$2.82 \cdot 10^{-2}$	$7.56 \cdot 10^{-1}$	$1.76 \cdot 10^{-1}$
$1.57 \cdot 10^{-1}$	$3.56 \cdot 10^{-2}$	$1.12 \cdot 10^0$	$2.29 \cdot 10^{-1}$
$1.91 \cdot 10^{-1}$	$4.82 \cdot 10^{-2}$	$2.46 \cdot 10^0$	$4.85 \cdot 10^{-1}$
$2.32 \cdot 10^{-1}$	$7.08 \cdot 10^{-2}$	$5.40 \cdot 10^0$	$1.34 \cdot 10^0$
$2.72 \cdot 10^{-1}$	$9.60 \cdot 10^{-2}$	$1.18 \cdot 10^1$	$4.65 \cdot 10^0$

Tabel 1. t_d met bijbehorende q_{max}

Gekeken wordt naar de maximale en minimale waarden van dynamische wiellast (banduitvering), veerwegen en chassisversnellingen. De standaard simulatieduur is 0.5 sec en bij de t_d 's groter dan 0.5 sec moet de simulatieduur dan ook vergroot worden naar een waarde waarbij het grootste deel van het ingangssignaal is gepasseerd.

Daar we bij een dergelijke ingang voor het systeem nauwelijks kunnen verwachten dat door te schakelen de diverse performancegrootheden zullen verbeteren, zijn er ook berekeningen van de performance gedaan waarbij q_{max} vermenigvuldigd is met een bepaalde factor (factor ≤ 1). De gebruikte factoren zijn in Tabel 2 opgenomen.

De uiteindelijke performance wordt vergeleken met die van het passieve systeem en met de resultaten van het programma van Kerssemakers [4].

factor
1.000
0.875
0.750
0.625
0.500
0.250

Tabel 2. *Factoren voor q_{max}*

Hoofdstuk 4. Resultaten

4.1 Inleiding

Als ingangssignaal is het bultje van Antoon genomen. De resultaten van de simulaties met de in tabel 1 vermelde waarden van t_d en q_{max} voldoen aan de in paragraaf 2.5 gestelde eisen:

- Zodra banduitvering en of veerindrukking dit toelaten worden de versnellingspieken van het chassis gereduceerd door het instellen van de lage demperstand in plaats van de hoge.
- De maximale veerwegen worden niet overschreden, en ook de maximale dynamische wiellast (banduitvering) wordt niet overschreden. De ingangssignalen die gebruikt zijn laten dit niet toe.
- De schakelfrequentie van het systeem is nooit hoger dan 100 Hz.
- In alle simulaties met een vertragingstijd van 10 msec kan het berekende schakeltijdstip vervroegd worden met de vertragingstijd. Door de beperkte mate van discontinuïteit kunnen alle simulaties met een tolerantie van 10^{-7} (voor ode45.m) uitgevoerd worden. Pas bij een langere vertragingstijd (langer dan 30 msec) zal dit tot problemen kunnen leiden. Omdat de dempingskarakteristiek dan waarschijnlijk grote discontinuïteiten zal vertonen zal de tolerantie voor ode45.m groter worden.

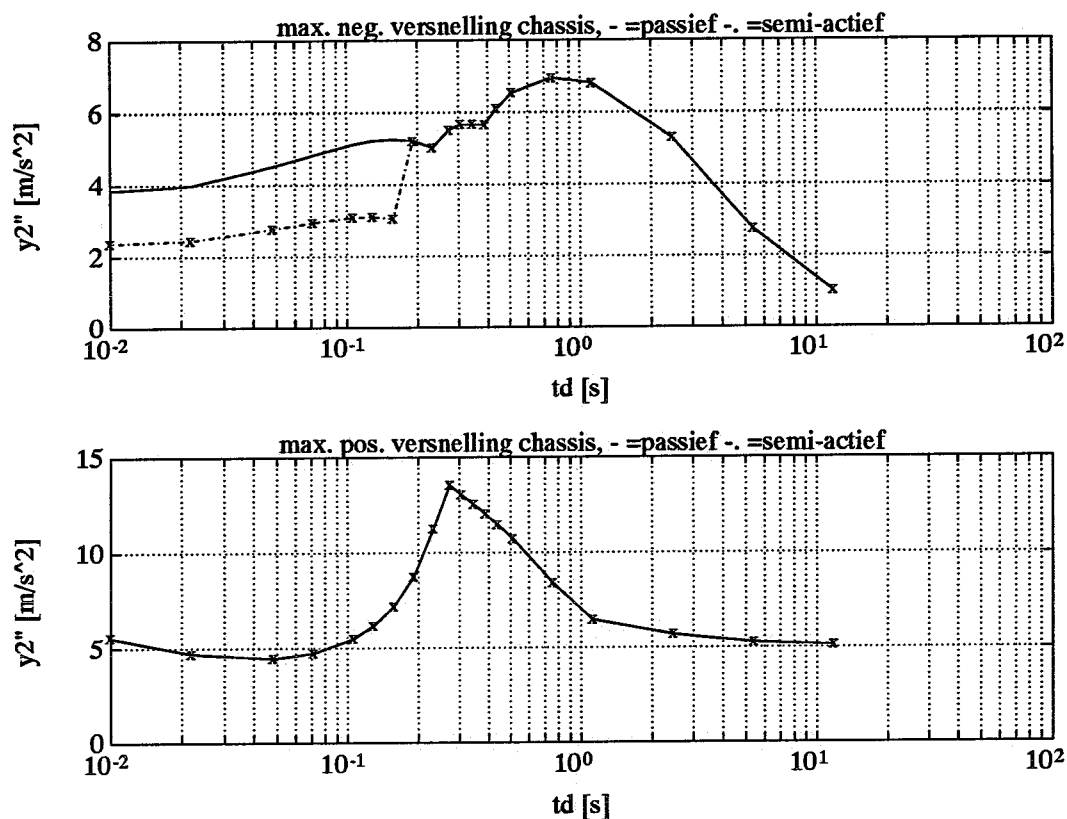
4.2 Bespreken van de resultaten

In figuur 4.1 tot en met figuur 4.6 worden de maximale en minimale versnellingen van het passieve en het semi-actieve veersysteem uitgezet tegen de waarde van t_d (logaritmisch). De factoren voor q_{max} staan vermeld in tabel 2.

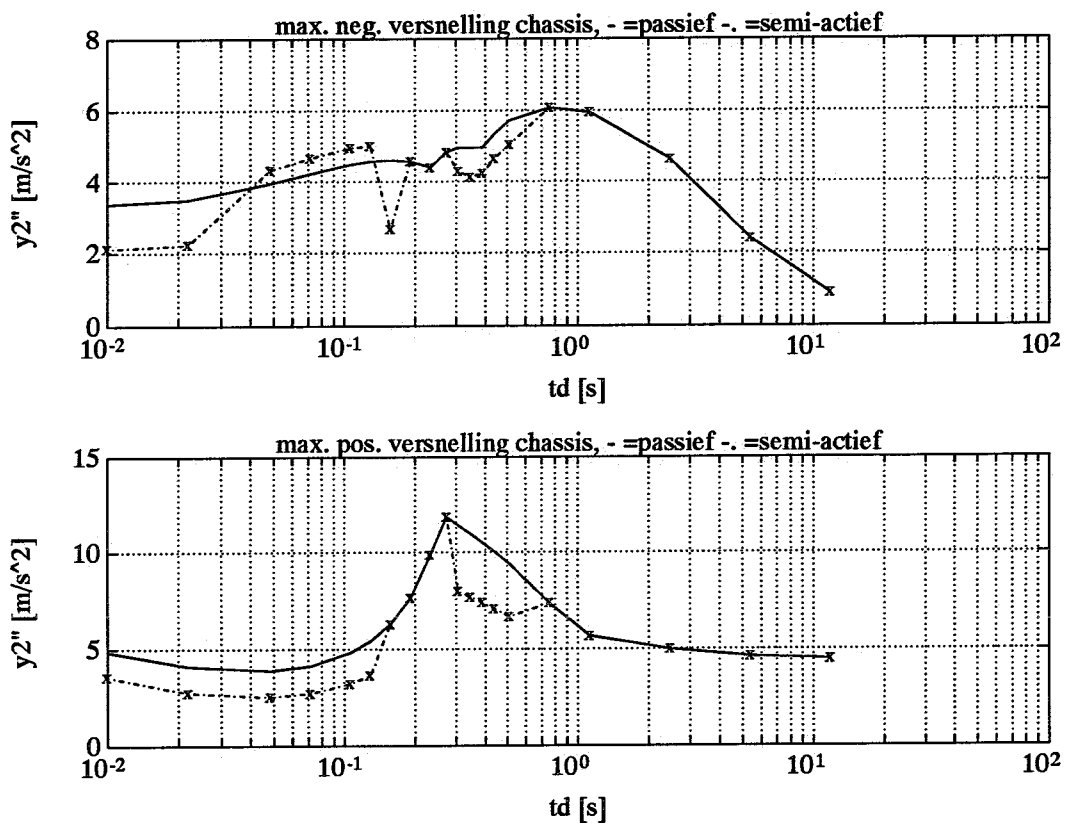
- Figuur 4.1: Als q_{max} vermenigvuldigd is met de factor "1" worden de negatieve versnellingspieken van het chassis toch nog gereduceerd met ca. 40 procent van waarden van het passieve systeem. Dit gebeurt bij t_d 's in de band van $1.0 \cdot 10^{-2}$ sec tot $1.6 \cdot 10^{-1}$ sec.
- Figuur 4.2: Met factor "0.875" treedt voor wat betreft de negatieve versnellingen een verslechtering van het comfort op van ca. 10 procent van de passieve waarde in de band van $4.8 \cdot 10^{-2}$ sec tot $1.3 \cdot 10^{-1}$ sec. In Figuur B.4 is een typische responsie te zien uit deze band. Te zien is dat meteen nadat het ingangssignaal ongelijk aan nul wordt, er omlaag geschakeld wordt. Hierdoor verminderen de positieve versnellingen. Daar er echter minder gedempt

wordt, zijn de versnellingen bij de eerste uitvering nog zo groot dat er niet geschakeld kan worden vanwege het niet mogen overschrijden van de maximale banduitvering. Bij de tweede invering kan nu wel weer omlaag geschakeld worden. "0.875" is de factor waarbij voor bepaalde combinaties van q_{\max} -factor en t_d het eerst de versnellingen bij het inveren het toelaten om omlaag te schakelen, dit gaat dan ten koste van het schakelen bij het uitveren waarbij een extra restrictie geldt voor maximale banduitvering. De positieve versnellingen worden in de band t_d is $1.0 \cdot 10^{-2}$ sec tot $1.29 \cdot 10^{-1}$ sec verminderd met ca. 30 procent zodat er over het geheel toch nog een lichte comfortverbetering wordt geboekt.

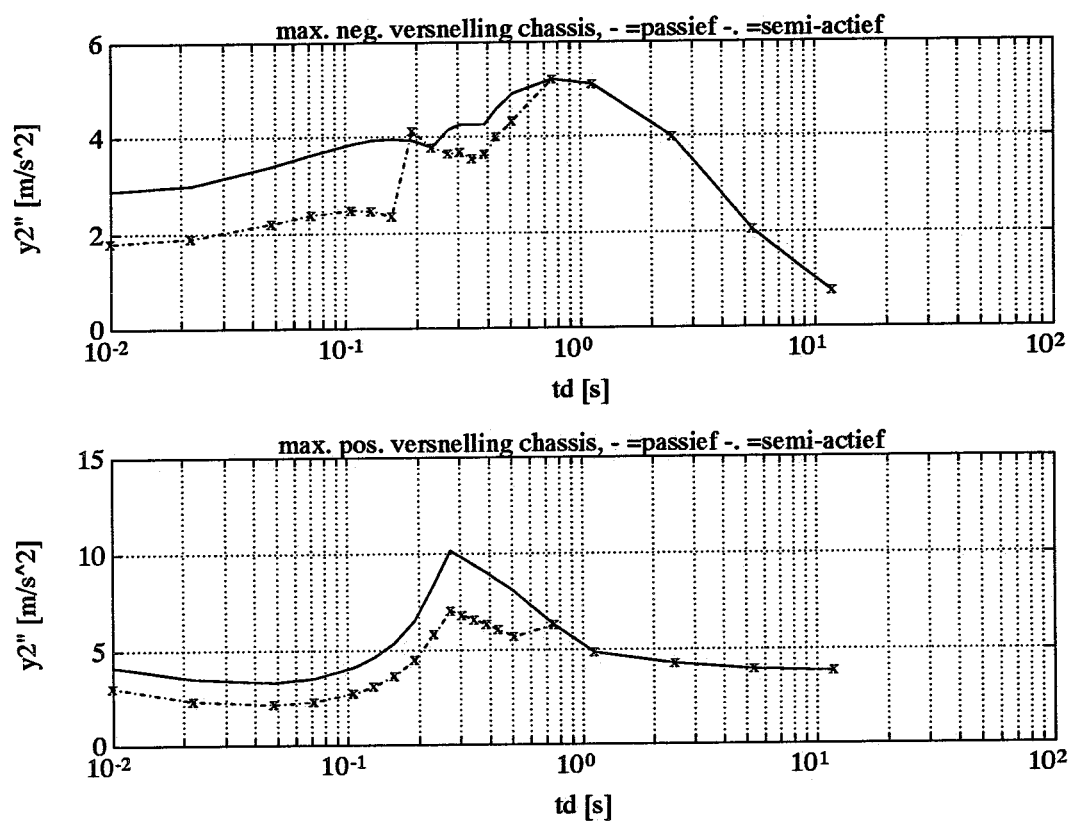
- Figuur 4.3 t/m 4.5: Bij factoren kleiner dan "0.875" worden zowel positieve als negatieve versnellingen gereduceerd. Deze reductie is voor positieve versnellingen gemiddeld 35 procent van de passieve waarde en ligt in de bandbreedte van $1.0 \cdot 10^{-2}$ sec tot $1.6 \cdot 10^{-1}$ sec. Negatieve versnellingen worden met ca. 25 procent gereduceerd in een bandbreedte van $1.0 \cdot 10^{-2}$ sec tot $5.1 \cdot 10^{-1}$ sec.
- Figuur 4.6: Q_{\max} vermenigvuldigd met factor "0.250" laat zien dat slechts in het gebied tussen t_d van $2.0 \cdot 10^{-1}$ sec tot $5.0 \cdot 10^{-1}$ sec de versnellingen van het passieve systeem groter zijn dan 2 m/s^2 . Alleen in dit gebied is dan ook verbetering van het comfort te behalen. De reductie van negatieve versnellingen (deze zijn in alle gevallen reeds kleiner dan 2 m/s^2) is ca. 10 procent van de passieve waarden, de positieve versnellingen worden met ca. 30 procent verminderd.



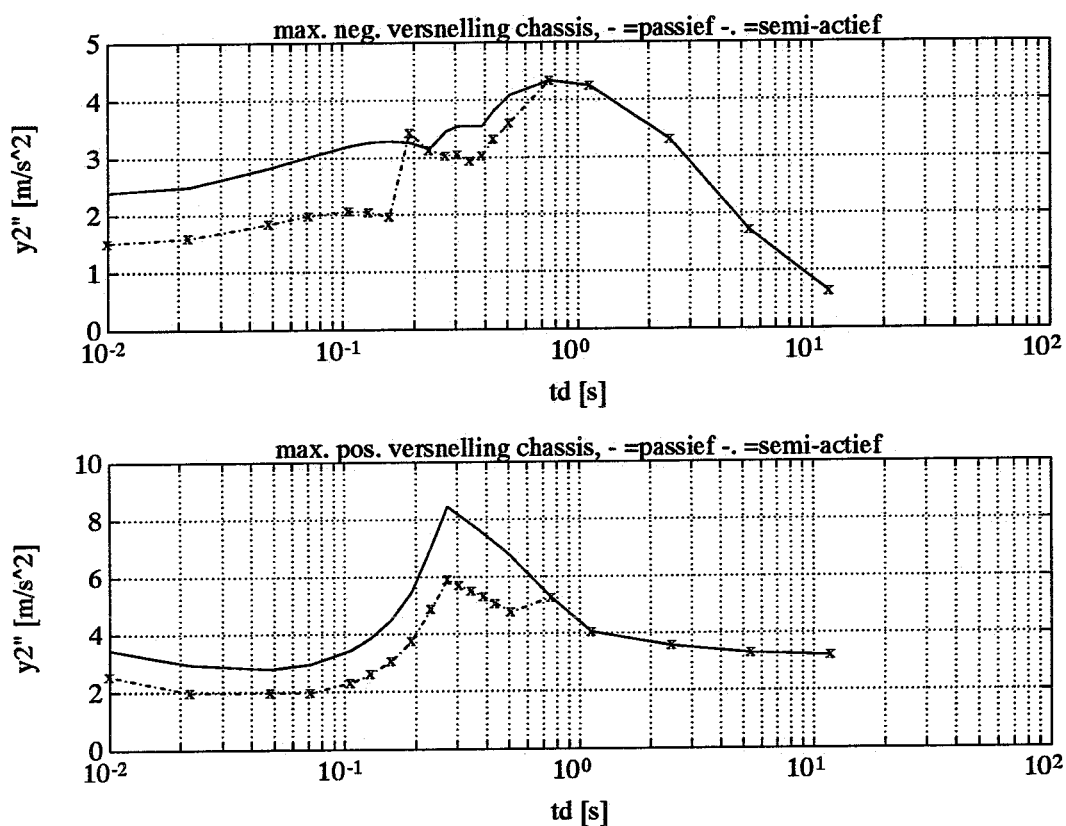
Figuur 4.1 Performance van semi-actief veersysteem. Factor voor q_{max} is 1.000.



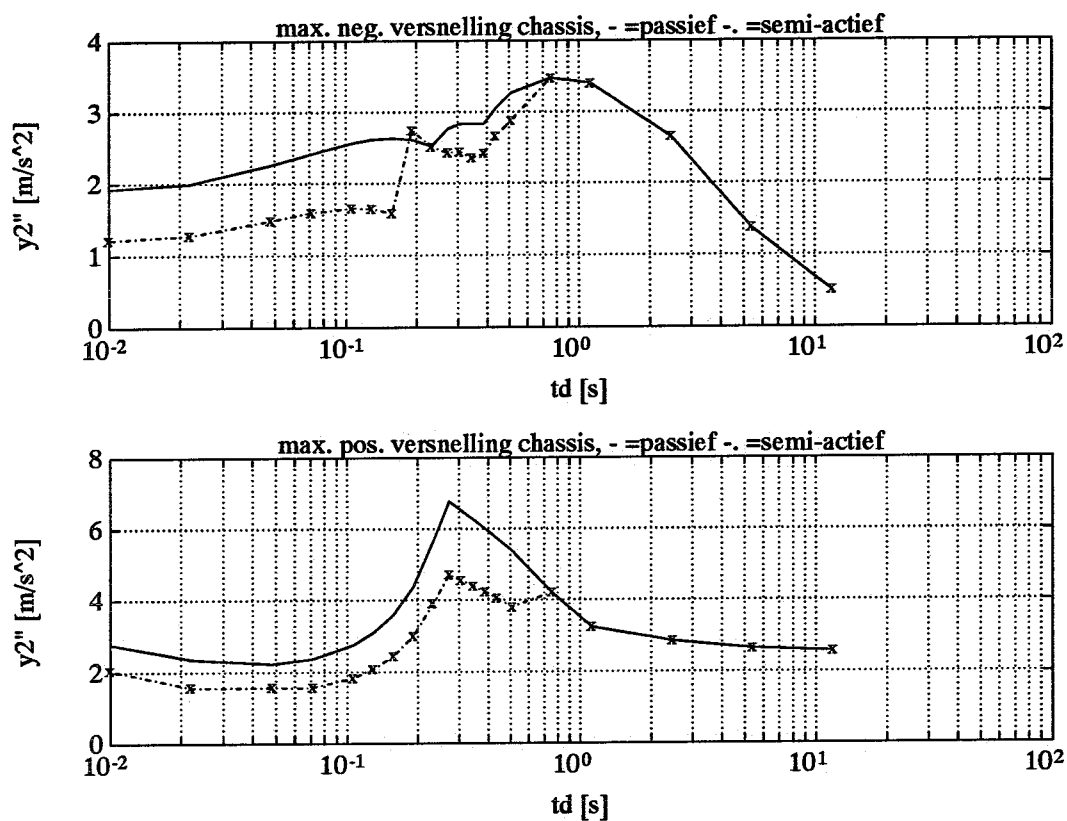
Figuur 4.2 Performance van semi-actief veersysteem. Factor voor q_{max} is 0.875.



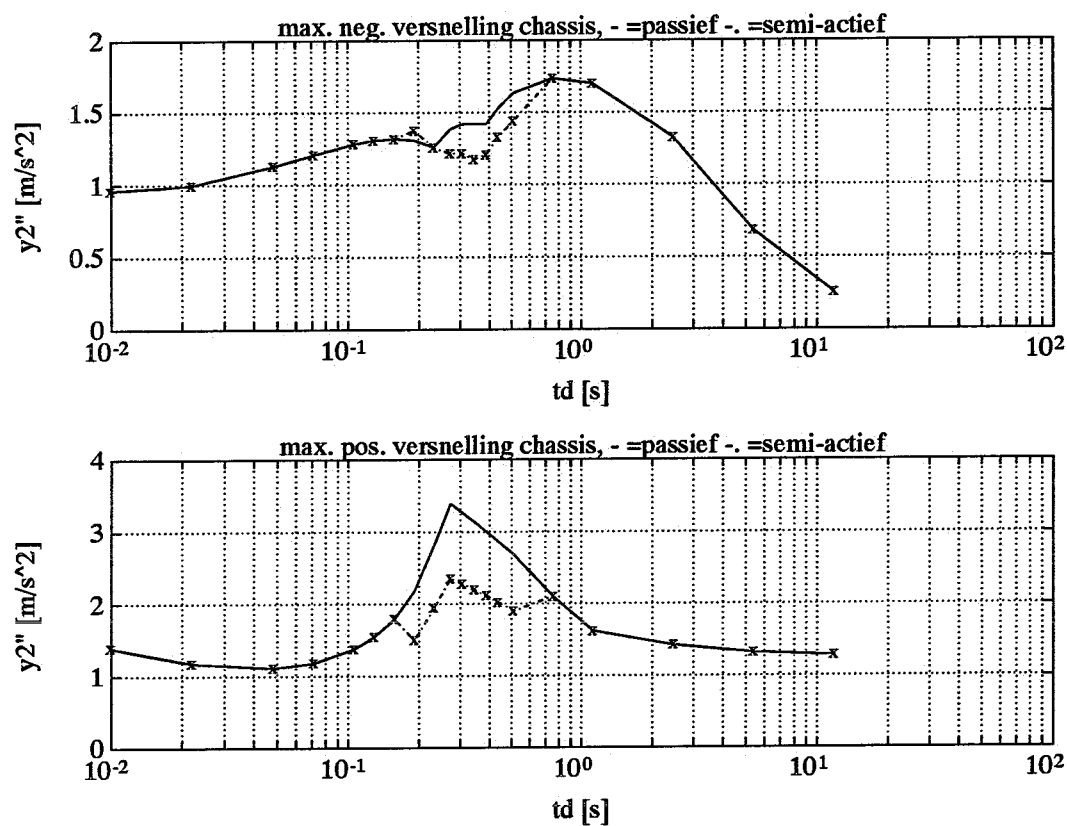
Figuur 4.3 Performance van semi-actief veersysteem. Factor voor q_{max} is 0.750.



Figuur 4.4 Performance van semi-actief veersysteem. Factor voor q_{max} is 0.625.



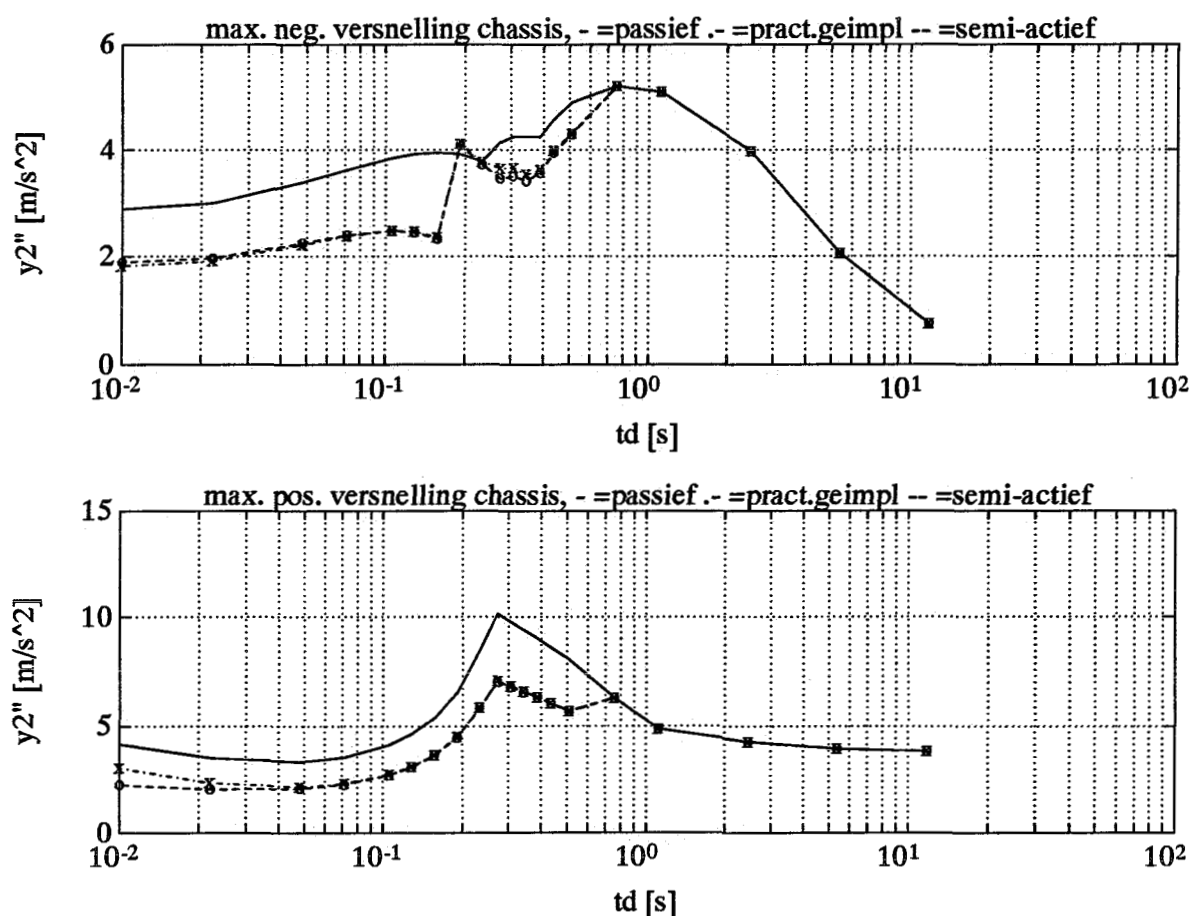
Figuur 4.5 Performance van semi-actief veersysteem. Factor voor q_{max} is 0.500.



Figuur 4.6 Performance van semi-actief veersysteem. Factor voor q_{max} is 0.250.

4.3 Gevolgen van praktische implementatie

Ten opzichte van het semi-actieve veersysteem beschreven door Kerssemakers [4] verminderen de resultaten van de simulaties minimaal bij t_d 's kleiner dan $0.5 \cdot 10^{-1}$ (zie figuur 4.7). Dit wil zeggen dat de verbeteringen van het comfort t.o.v. het passieve systeem een fractie kleiner zijn als die van het systeem beschreven door Kerssemakers. Dit is te verklaren aan de hand van de schakelkarakteristiek (figuur B.1) waarin te zien is dat wanneer de demper oneindig snel van demperstand wisselt, de gemiddelde demping over het schakelinterval lager is dan wanneer de demper "langzaam" van stand wisselt. Bij een schakelinterval dat 0.04 sec duurt is de gemiddelde demping 11% lager dan bij een "langzaam wisselende demper. Het verschil tussen beide systemen is waarschijnlijk nog kleiner omdat op het moment dat het verschil in demping groot is (net na de nuldoorgang van het snelheidskriterium), is de relatieve snelheid tussen de demperuiteinden klein. In de figuur B.5 is een totaal overzicht opgenomen van de performance van het passieve veersysteem, het semi-actieve veersysteem en het semi-actieve veersysteem na praktische implementatie. De factor voor q_{max} is 1.000. De prestatie m.b.t. maximale positieve versnellingen neemt duidelijk af wanneer t_d kleiner dan $0.5 \cdot 10^{-1}$ (groter dan 20 Hz) wordt. Bij een t_d van $1.0 \cdot 10^{-2}$ zijn deze versnellingen ca. 20 procent groter dan deze versnellingen zonder praktische implementatie. In figuur B.5 is een totaaloverzicht van de performance van de drie systemen voor de factor 1.000 opgenomen en in figuur B.6 een overzicht voor de factor 0.500.



Figuur 4.7 Het verschil in performance na praktische implementatie is minimaal. De gebruikte factor voor q_{max} is 0.750. Bij t_d 's kleiner dan $0.5 \cdot 10^{-1}$ neemt de prestatie af.

Hoofdstuk 5. Conclusies

Een opsomming van de belangrijkste conclusies ten aanzien van de praktisch geïmplementeerde semi-actieve vering.

- Het nieuwe programma kan de vertragingen die in de praktijk optreden bij het wisselen van de demperstand meenemen in zijn berekeningen. De regelstrategie werkt voor de vier in het programma beschikbare ingangssignalen.
- De semi-actieve vering verbetert het comfort als aan alle voorwaarden voor schakelen is voldaan. Voor bultjes van Antoon (zie figuur B.3) met een t_d tussen $1.0 \cdot 10^{-2}$ sec en $1.5 \cdot 10^{-1}$ sec worden grote reducties van de chassis versnellingen berekend. De maximale negatieve versnellingen worden in sommige gevallen met 40 procent verminderd (zie paragraaf 4.2)
- Ondanks dat het programma test of de versnellingen niet groter worden door te schakelen kan het voorkomen dat de maximale negatieve versnellingen in het volgende interval groter worden dan bij het passieve systeem.
- Bij het schakelen ontstaan geen sprongen in de versnelling omdat de berekende schakeltijdstippen altijd vervroegd kunnen worden met de waarde van de vertragingstijd zodat wederom aan het snelheidskriterium (zie paragraaf 2.3) wordt voldaan.
- Ten opzichte van het semi-actieve veersysteem volgens Kerssemakers zijn de prestaties minimaal afgenomen. Bij t_d 's kleiner dan $0.5 \cdot 10^{-1}$ sec neemt de prestatie zichtbaar af.
- Door het instellen van de hoge demperstand bij versnellingen kleiner als \ddot{y}_{2min} dempt het semi-actieve systeem nagenoeg even snel uit als het passieve systeem.

Hoofdstuk 6. Aanbevelingen

Als aanbevelingen voor verder onderzoek wordt vermeld:

- De performance van het semi-actieve veersysteem testen met een lagere waarde voor $b_{2\text{laag}}$ (bijvoorbeeld $b_{2\text{laag}} = 10000 \text{ Ns/m}$).
- Het programma geschikt maken voor het simuleren met een stochastisch signaal als ingang. Hierbij zou de preview-informatie eventueel gewogen moeten worden om een hoge piek aan het einde van het interval niet te veel van invloed te laten zijn aan het begin van het interval.
- Verstoringen in de vertragingstijd, de dempingswaarde en het wegdeksignaal toevoegen aan het model. Deze zullen in de praktijk ook aanwezig zijn.
- Door het ingeven van de dynamica (i.e. volgens welke relatie gaat de demper van één stand naar de andere) van een continu variabele demper en het vervangen van het snelheidskriterium door een criterium dat de maximale veerweg en of bandindrukking benut voor het verminderen van de versnellingen kan het programma ook de resultaten van continu variabele semi-actieve veersystemen genereren.
- Voordat de beslissing om naar "laag" te schakelen genomen wordt zou eerst het interval na het schakelinterval gesimuleerd kunnen worden voor zover de preview-informatie dat toelaat. Hiermee kan voorkomen worden dat versnellingen in het interval nadat de demperstand "laag" was groter worden dan de versnellingen van het passieve systeem.

Literatuur

- [1] Rudolf Huisman, "A Literature Research into Active and Semi-active Vehicle Suspensions with and without Preview". Technische Universiteit Eindhoven, 1990, WFW-Rapport 90.039.
- [2] Harm van Essen, "Semi-actieve Vering met Preview - toepassing van een tweestan- den demper -". Technische Universiteit Eindhoven, 1991, WFW-Rapport 91.078
- [3] Gregory R.Firth, "The Performance of Vehicle Suspensions Fitted with Controlable Dampers". Department of Mechanical Engineering, The University Leeds, June 1991
- [4] Sander Kerssemakers, "Semi-actieve Vering met Preview - schakelen op gunstige tijdstippen -", 1992, WFW-Rapport 92.014

Bijlage A

Systeem beschrijving

De bewegings vergelijkingen van het systeem zien er als volgt uit:

$$m_2 \ddot{y}_2 = -k_2(y_2 - y_1) - b_2(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) \quad (2)$$

$$m_1 \ddot{y}_1 = k_2(y_2 - y_1) + b_2(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) - k_1(y_1 - y_0) \quad (3)$$

In toestandsbeschrijving ziet dit er als volgt uit:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \quad (4)$$

Hierin beschrijft x de toestand en is u de ingangsvector:

$$u = [y_0], \quad x = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 - y_1 \\ \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

De uitgangsvector bestaat uit de chassis versnelling, de veerlengte, de relatieve snelheid tussen beide massa's en de banduitvering:

$$y = \begin{bmatrix} \ddot{y}_2 \\ y_2 - y_1 \\ \dot{y}_2 - \dot{y}_1 \\ y_1 - y_0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

De eerste vergelijking van (3) ziet er met uitgeschreven matrices als volgt uit :

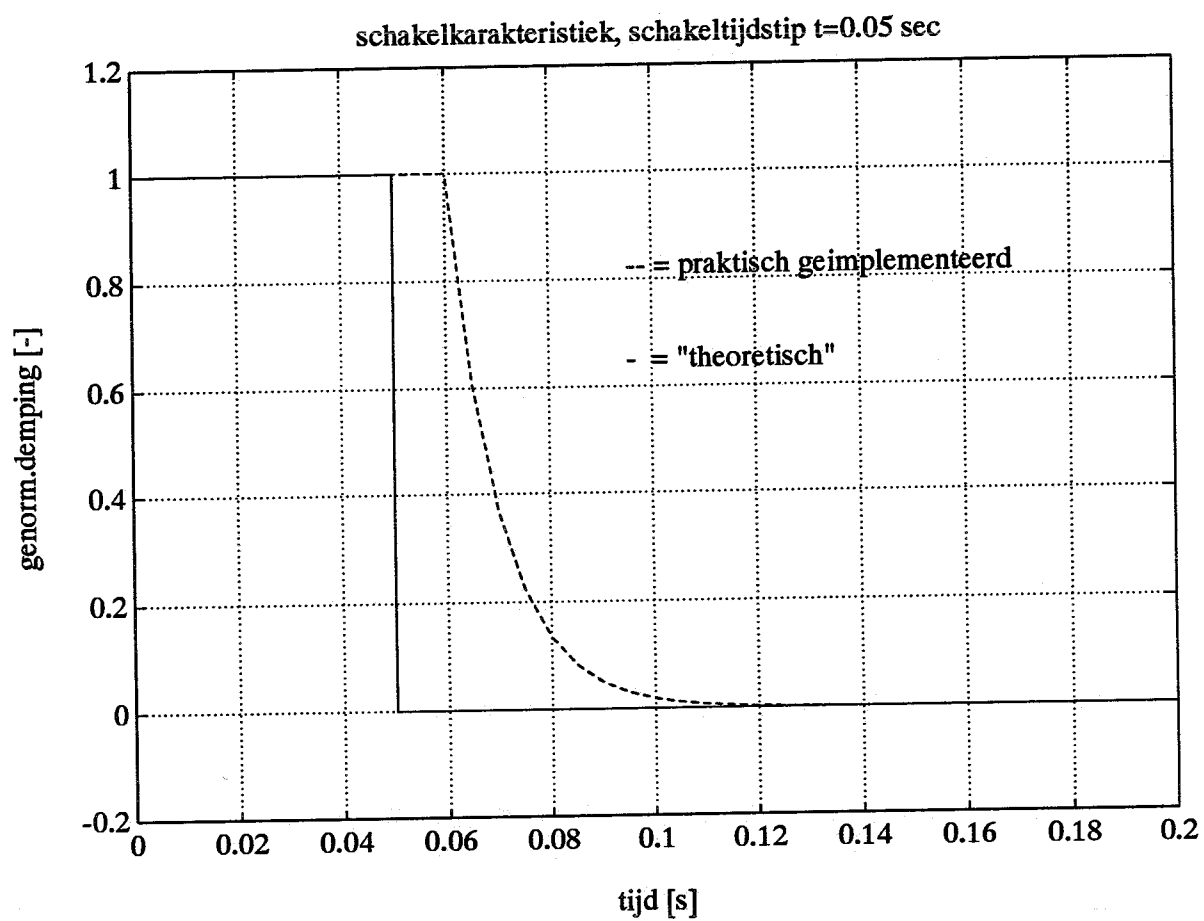
$$\begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 - \dot{y}_1 \\ \ddot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \\ \frac{k_1}{m_1} & \frac{k_2}{m_1} & -\frac{b_2}{m_1} & \frac{b_2}{m_1} \\ 0 & -\frac{k_2}{m_2} & \frac{b_2}{m_2} & -\frac{b_2}{m_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 - y_1 \\ \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ k_1/m_1 \\ 0 \end{bmatrix} [y_0] \quad (7)$$

De tweede vergelijking van (3) ziet er met uitgeschreven matrices als volgt uit:

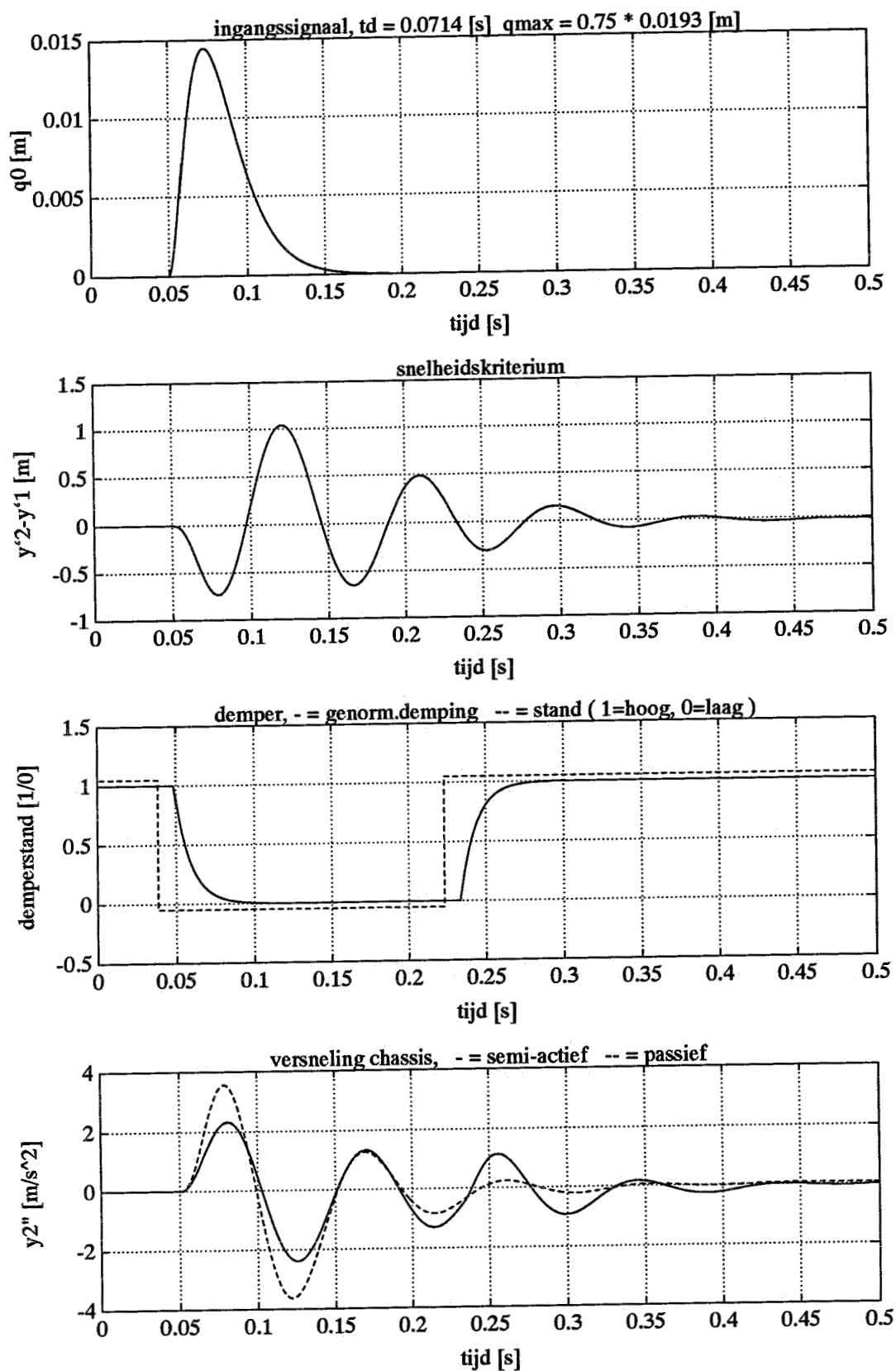
$$\begin{bmatrix} \ddot{y}_2 \\ y_2 - y_1 \\ \dot{y}_2 - \dot{y}_1 \\ y_1 - u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{k_2}{m_2} & \frac{b_2}{m_2} & -\frac{b_2}{m_2} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 - y_1 \\ \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} [y_0] \quad (8)$$

Bijlage B

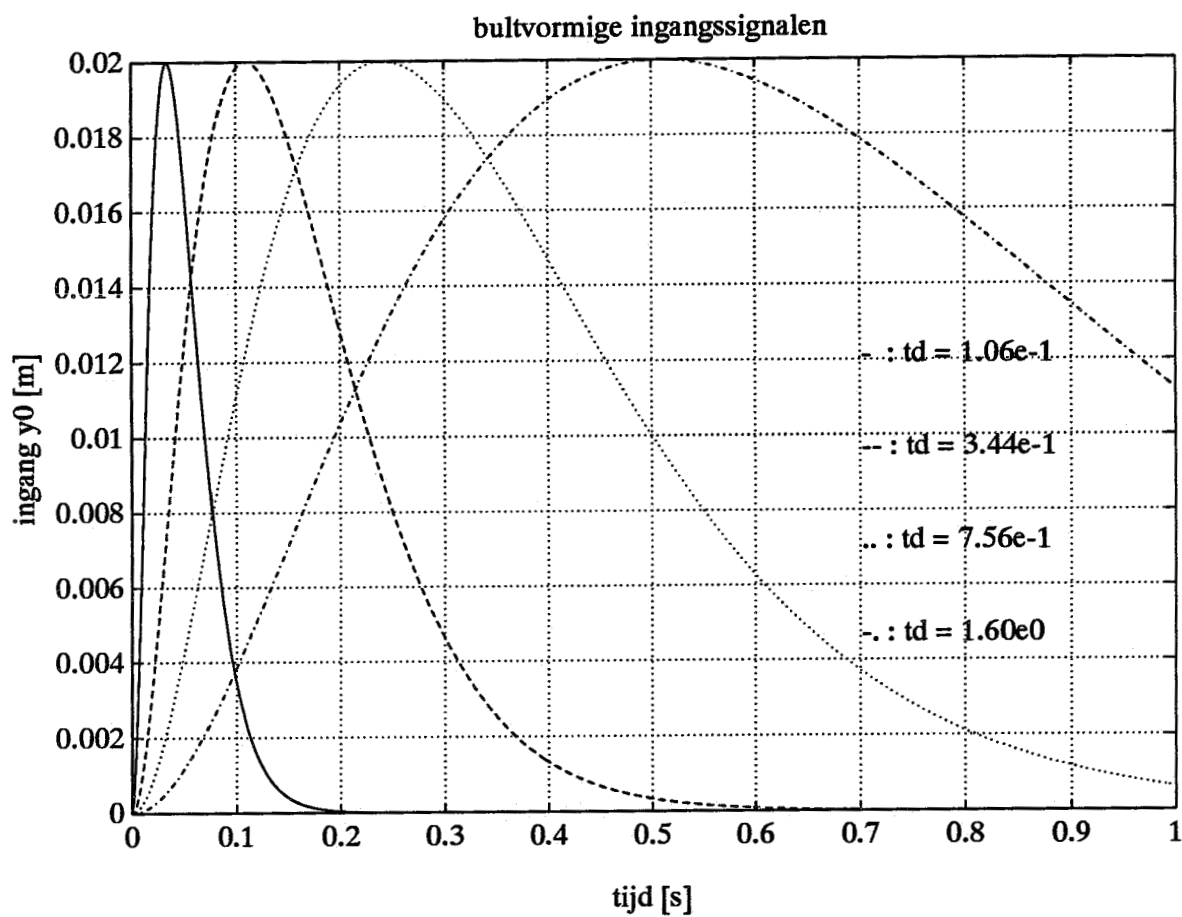
Figuren



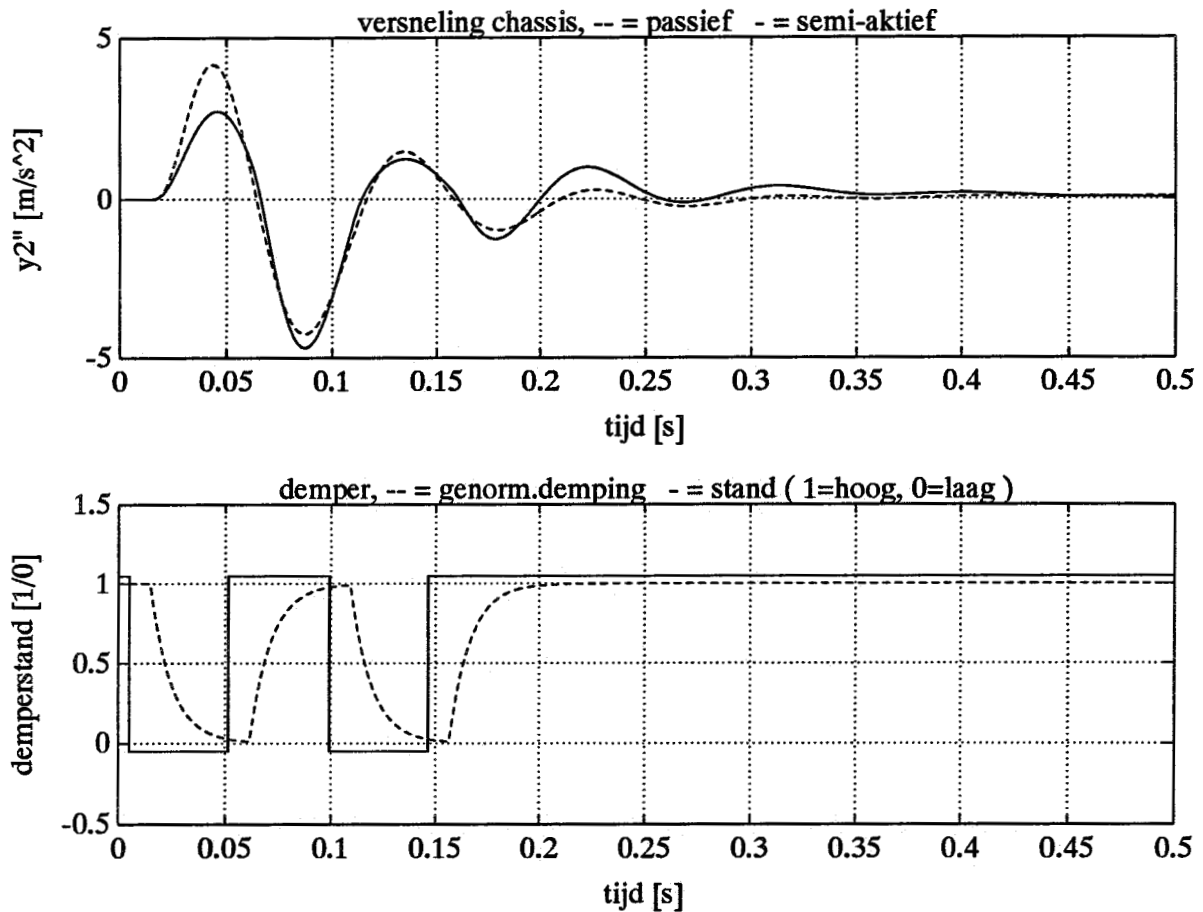
Figuur B.1 Schakelkarakteristiek.



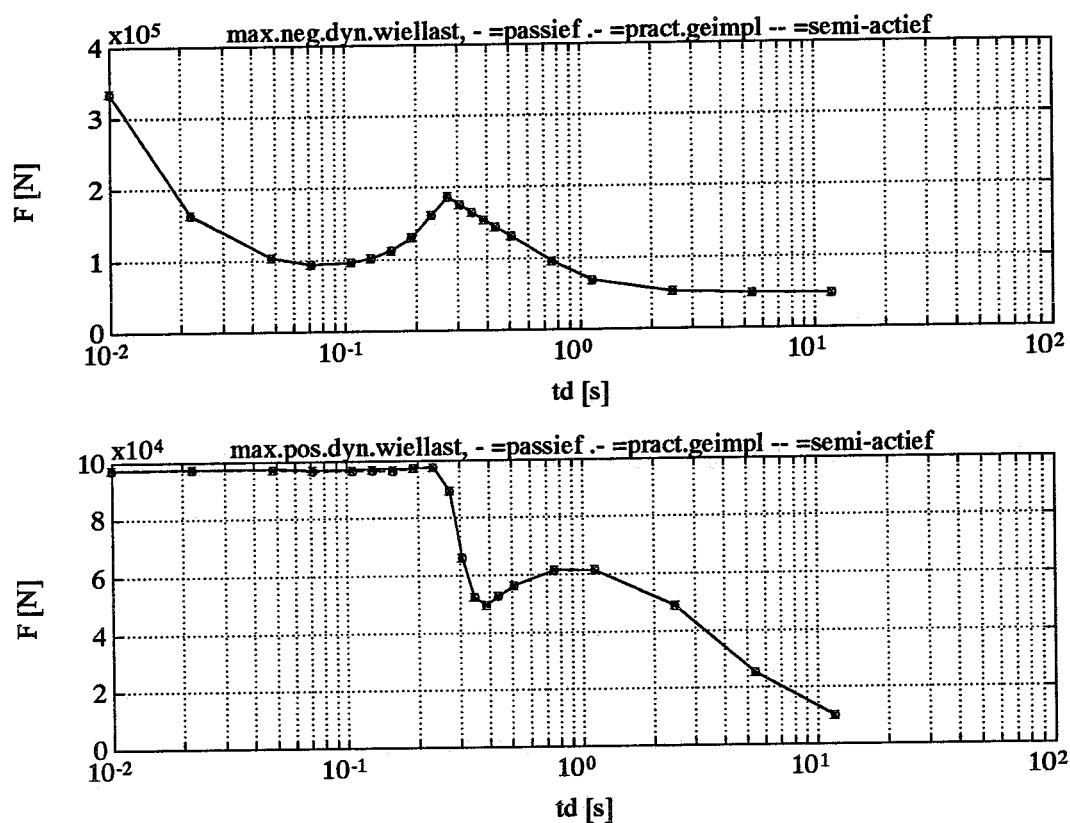
Figuur B.2 Responsie van het semi-actieve veersysteem. Voor het schakelcom-mando zijn de volgens het snelheidskriterium vastgestelde tijdstippen vervroegd met de vertragingstijd (0.010 sec).



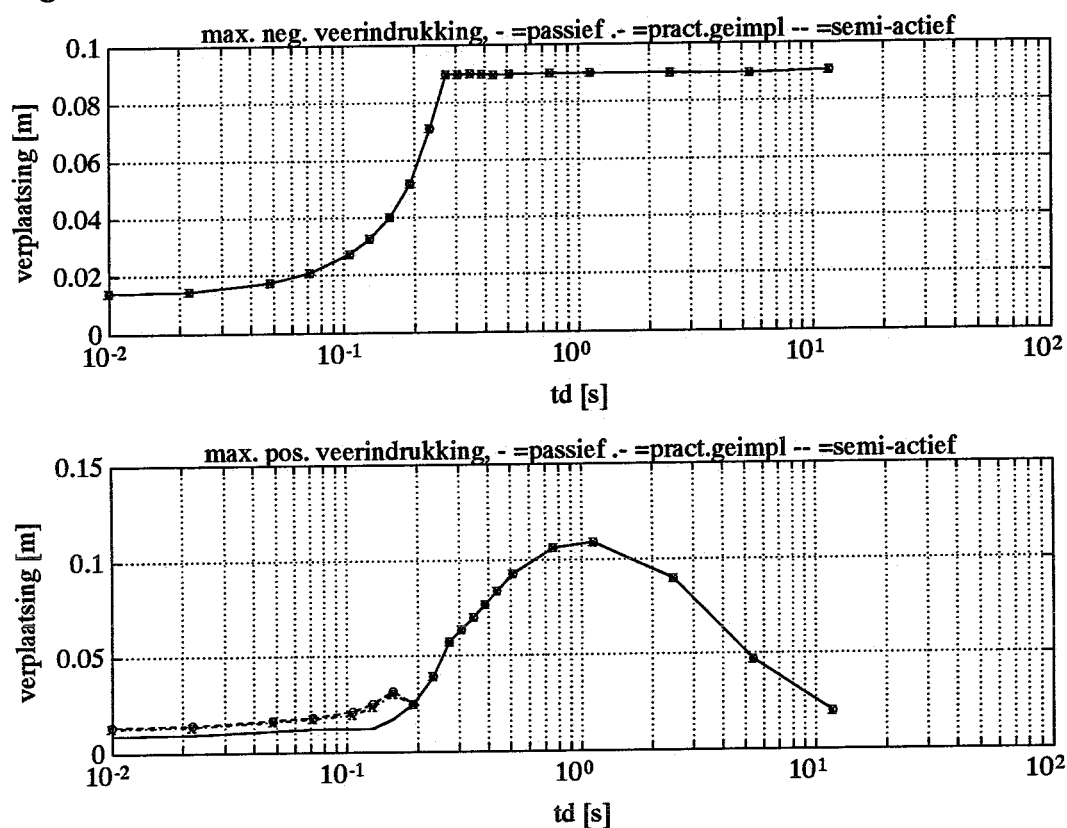
Figuur B.3 Bultjes met gevarieerde t_d , q_{max} is 0.02 m. Voor t_d 's groter dan 0.5 sec moet de standaard simulatieduur (0.5 sec) verlengd worden.



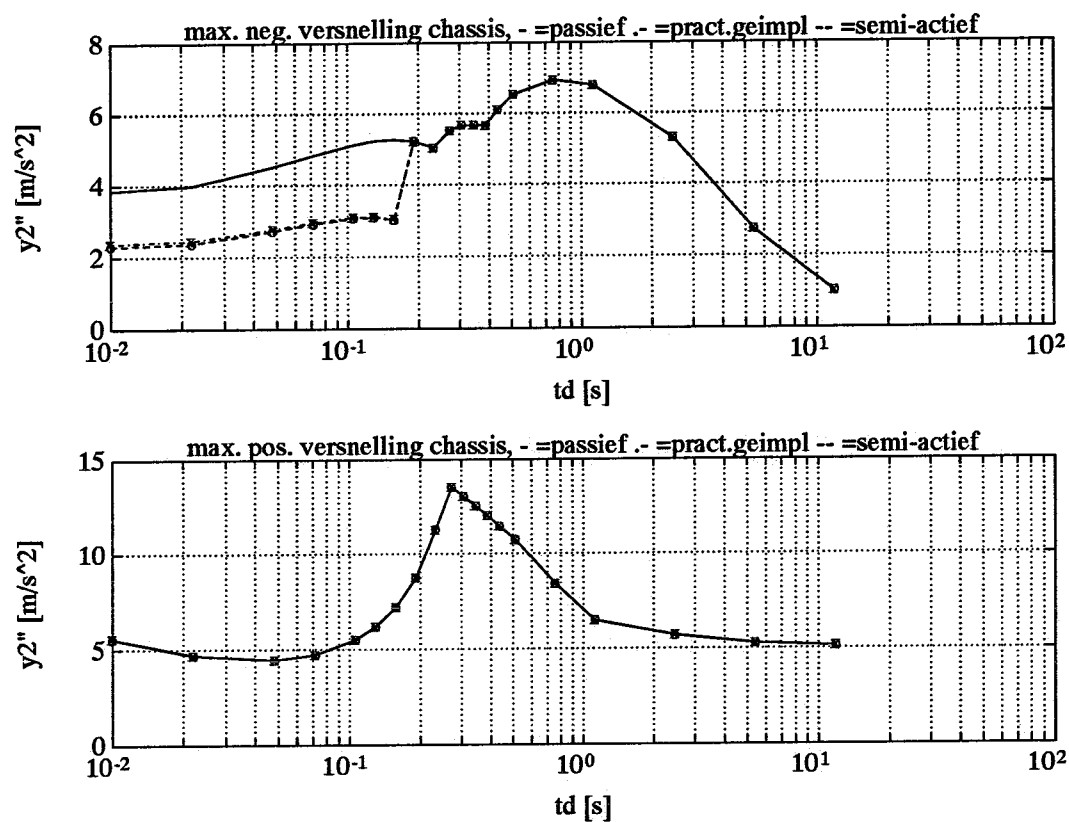
Figuur B.4 Typische schakelkarakteristiek van de band van t_d tussen $4.82 \cdot 10^{-2}$ en $1.29 \cdot 10^{-1}$ bij het gebruik van de factor 0.875 voor q_{max} . Nadat de demper één interval "laag" heeft gestaan, treden in het volgende interval hogere versnellingen op dan bij het passieve systeem.



Figuur B.5a De maximale negatieve en positieve dynamische wiellast.

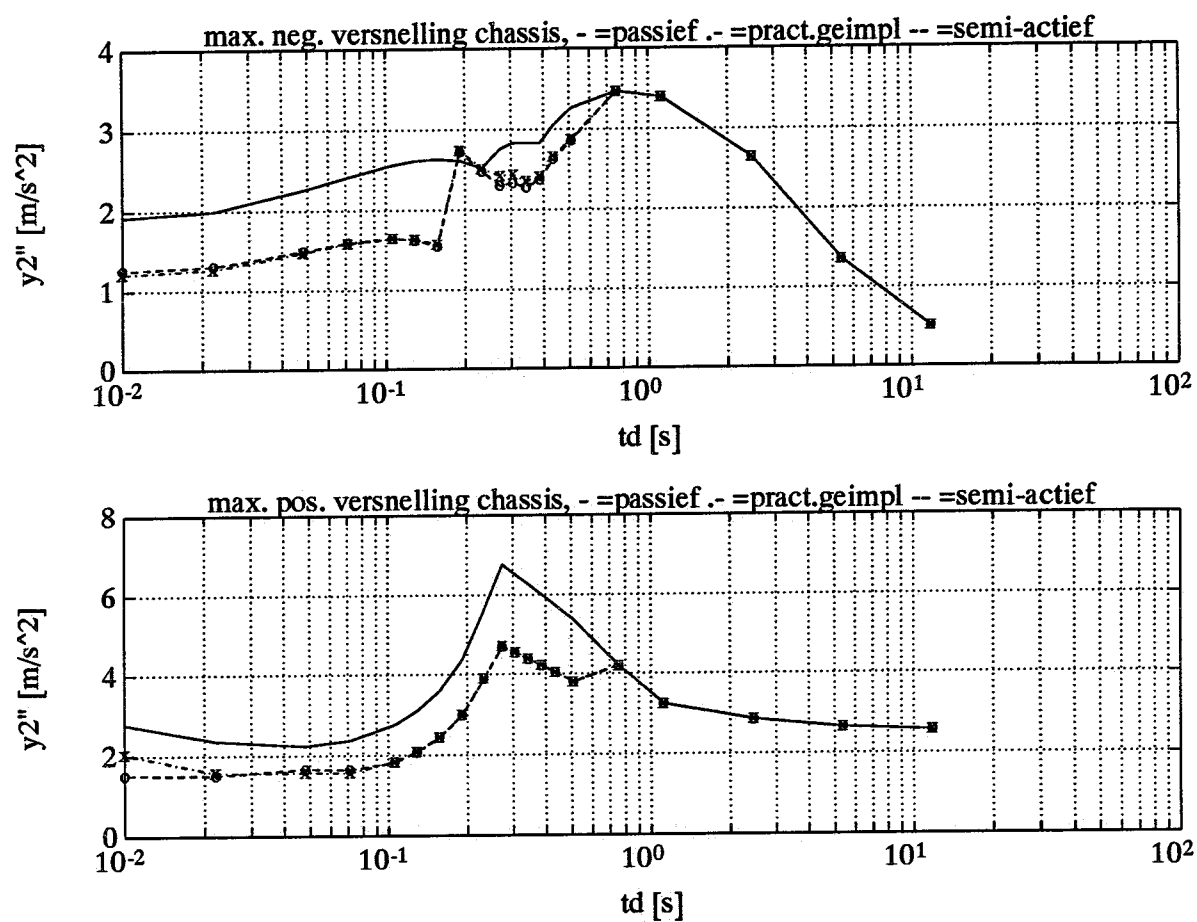


Figuur B.5b De maximale negatieve en positieve veerindrukkingen.



Figuur B.5c De maximale negatieve en positieve chassisversnellingen.

Figuur B.5 Totaal overzicht van de performance van de verschillende systemen. De factor voor q_{max} is 1.000.



Figuur B.6 Overzicht van de performance van de drie systemen voor een factor bij q_{max} van 0.500.

Bijlage C

Programmatuur

Van het programma zijn opgenomen het hoofdprogramma en de belangrijkste subroutines te weten:

- SIMBHOOG.M, simuleert de responsie over een interval voor de hoge demperstand. De subroutine voor simulatie van de lage demperstand is soortgelijk.
- NULPUNT.M, bepaald van een simulatie de nuldoorgangen van het snelheidskriterium.
- DIFFVGL.M, hierin zijn de differentiaalvergelijkingen opgenomen en de relatie voor de eerste orde vertraging. Deze subroutine wordt voortdurend aangeroepen door ode45.m
- TWEE.M, In deze subroutine wordt gekeken of het interval tussen de nulpunten van het snelheidskriterium geschikt is om naar de lage demperstand te schakelen.

Hoofdprogramma:

```
%      ONLINE.M
%

% --- clearing -----
clear
clg, clc

% --- definiëren globals -----
global wegdektype tprev fa height aantalbul qmax
global m1 m2 k1 k2 b2l b2h Tdelay Tau t0_ode eindtijd
global b2indicat schakelind tvorig b2vorig b2real

% --- invoer uit MODEL1.M en INPUTPRO.M -----
model1
inputpro

% --- initialisatie -----
x0      = zeros(1, 4);
eindtijd = (ceil(eindtijd/dt))*dt;
t       = [begintijd : dt : eindtijd]';
tprev   = (ceil(tprev/dt))*dt;
tbp     = begintijd;
tep     = tprev;
th      = [tbp tep];
```

```

T1      = tbp;          % eerste nulpunt
VS      = [];          % versnelling chassis
V       = [];          % veerweg
Y1      = [];          % bandindrukking
YR      = [];          % relatief snelheidsverschil demper
B       = [];          % demperstand (tussen 20000 en 43100)
Schakel = [];          % matrix met schakeltijdstippen
Markeer = [1.05];      % nodig voor plotten markeerlijnen
Ts      = [];          % tijdas
schakelind = 1;        % registreerd schakelstand
tvorig  = 0;          % laatste schakeltijdstip
b2vorig = 43100;      % demperstand laatste schakeltijdstip
b2real  = 43100;      % demperstand einde interval

% --- input keuze wegdeksignaal -----
k = [];
k = menu('kies het ingangsignaal 1 - 4', 'bultje antoon', 'stap', ...
        'rounded step', 'verkeersdrempel');
while k > 4 | k == []
    k = menu('kies het ingangsignaal 1 - 4', 'bultje antoon', ...
            'stap', 'rounded step', 'verkeersdrempel');
end

% --- definiëren global wegdektype -----
wegdektype=k;
if wegdektype == 1
    aantalbul = input('aantal bultjes: ');
else
    aantalbul = 1;
end

% --- bepalen wegdek -----
dataqroad = [wegdektype, tprev, fa, qmax, height, aantalbul];
u          = q_road(t, dataqroad);
clg, plot(t, u), title('ingangsignaal'), grid
text(0.4, 0.5, 'PRESS ANY KEY TO CONTINUE', 'sc') , pause

% --- simulatie responsie semi-actief systeem -----
tbp
while tep < eindtijd
    disp('*** online ***')

    % --- eerst berekenen voor hoge demping -----
    [y1, x1, t_odehoog, b_odehoog, rememb_ihoog] = simbhoog(th, x0);
    tin = t_odehoog;

    cri1 = y1(:,3);
    subplot(211), plot(tin,y1(:,1)), title('y2" '), grid

```

```

subplot(212), plot(tin,cri1), title('cri1'), grid, pause
clg

% --- bepalen nulpunten -----
nulpunt

% --- bepalen aantal nulpunten -----
if aantalnulp == 0
    geen
elseif aantalnulp == 1
    een
else
    twee
end
end

% --- simulatie passief systeem -----
[y, x] = lsim(Ah, Bh, Ch, Dh, u, t, [0 0 0 0]);

% --- uitvoergrootheden bepalen -----
ypas = [y(:,4), y(:,2), y(:,1)];
ysemi = [Y1, V, VS, YR];
q0 = u;
tp = tprev;

% --- normeren van de matrix B -----
B = B-b2l;
B = B/(b2h-b2l);

% --- matrix met markeerlijnen bewerken voor plot -----
for i=1:(length(Schakel)/2)
    if ((-1)^i>0)
        add= [-0.05 1.05];
    else
        add= [1.05 -0.05];
    end
    Markeer =[Markeer add];
end
Schakel = [begintijd Schakel eindtijd];
if length(Markeer) > 1
    Markeer = [Markeer 1.05];
else
    Markeer = [-0.05 Markeer Markeer -0.05];
    Schakel = [begintijd Schakel eindtijd];
end

% --- zorgen dat eerste schakeltijdstip niet voor t = 0 ligt -----
s=1;

```

```

while abs(Schakel(s)) <= Tdelay
    Schakel(s)=(round(Schakel(s)*1000))/1000;
    s=s+1;
end
clear s

% --- plotten resultaat -----
plt2

% --- clearing -----
clear Ah B Bh Bhulp Ch Dh Markeer Schakel
clear T1 TR V VS Y1

clear aantalnulp add begintIjd b_genorm b_ode b_odehoog b_odelaag
clear b2_ode caccmax caccmin cri1 cband cmax cmin dataqroad dt
clear eindtijd fband i ihulp k keuzecri maxacc minacc miny2 nmmband
clear q0 rememb_ihoog rememb_ilaag rtbs rtbsl rtel rtell rtell2 rtell2
clear rtes rtesl tbp tbs tes tesl tep tkn tin th tl ts
clear t_ode t_odehoog t_odelaag tp tschakel tvar u uin ul
clear u_ode versnel x xcon xl x0 x1 x_ode x0_ode y yl y1 y_ode

% --- saving resultaten -----

save temp

Subroutine voor het bepalen van de nulpunten volgens het snelheidskriterium

%                               NULPUNT.M
%
disp('*** nulpunt ***')

%--- criterium functie omzetten in -, 0 of + -----
tkn = sign(cri1);

%--- initialisatie -----
i = 1;

%--- minimale afstand tussen eerste twee nulpunten definiëren -----
fband = 50;
% nmmband = round(1/(fband*dt));
nmmband = 5;

%--- zoeken naar nulpunten aan begin interval -----
if (tkn(i)==0 & tkn(i+nmmband)~=0) | (tkn(i)~=0 & tkn(i+nmmband)==0)

    %--- teken gaat van 0 naar niet-0, v.v. -----
    if length(T1) ~= 0

```

```

        if T1(1) ~= tin(i)
            T1 = [T1; tin(i)];
        end

    else
        T1 = tin(i);
    end

end

elseif (tkn(i)==-1 & tkn(i+nmbband)==1) | (tkn(i)==1 & tkn(i+nmbband)==-1)

    %--- teken gaat van + naar -, v.v. -----
    if length(T1) ~= 0
        if T1(1) ~= tin(i)
            T1 = [T1; tin(i)];
        end

    else
        T1 = tin(i);
    end

end

%--- overige nulpunten zoeken (maximaal twee!)-----
i = i+nmbband;
while (i < length(tkn) & size(T1) < 2)

    if (tkn(i)==0 & tkn(i+1)~=0) | (tkn(i)~=0 & tkn(i+1)==0)

        %--- teken gaat van 0 naar niet-0, v.v. -----
        if length(T1) ~= 0
            if T1(1) ~= tin(i)
                T1 = [T1; tin(i)];
            end

        else
            T1 = tin(i);
        end

    end

elseif (tkn(i)==-1 & tkn(i+1)==1) | (tkn(i)==1 & tkn(i+1)==-1)

    %--- teken gaat van + naar -, v.v. -----
    if length(T1) ~= 0
        if T1(1) ~= tin(i)
            T1 = [T1; tin(i)];
        end

    end

```

```
        else
            T1 = tin(i);
        end

    end

end

%--- teller verhogen -----
i = i+1;

end

[aantalnulp, dummy] = size(T1);
clear dummy
```


Subroutine voor het simuleren over het previewinterval van de hoge demperstand. De subroutine voor de lage demperstand is soortgelijk.

```

%                SIMBHOOG.M
%

function [yh, xh, t_ode, b_odehoog,rememb_ihoog] = simbhoog(tin, x0)

disp('*** simbhoog ***')

% --- berekening van toestanden xp=Ax+Cu met behulp van ODE45.M -----
t0_ode      = tin(1);
tf_ode      = tin(2);
x0_ode      = x0;

% --- aangeven toleranties voor ode45 voor verschillende wegdektypen -
if  wegdektype == 1
    tol = 1e-7;
elseif wegdektype == 2
    tol = 1e-5;
elseif wegdektype == 3
    tol = 1e-8;
else
    tol = 1e-7;
end
trace      = 0;
b2indicat  = 1;
b2simreal  = b2real;
[t_ode, x_ode] = ode45('diffvgl',t0_ode,tf_ode,x0_ode,tol,trace);
b2real     = b2simreal;
xh         = x_ode;

% --- berekening van b(t_ode) -----
b_ode = zeros(t_ode);
if schakelind == 0
    rememb_ihoog = 1;
    for i=1:(length(t_ode));
        if (t_ode(i)-t_vorig)<Tdelay
            tvar = t_ode(i)-t_vorig;
            b2sim = b2vorig;
            emacht = exp(-tvar/Tau);
            b_ode(i) = (((b2sim-b2l)/(b2h-b2l))*emacht)*(b2h-b2l)+b2l;
            b2simreal = b_ode(i);
            rememb_ihoog = i;
        else
            tvar = t_ode(i)-t_ode(rememb_ihoog);
            b2sim = b2simreal;
        end
    end
end

```

```

                emacht      = exp(-tvar/Tau);
                b_ode(i)    = (1-(1-((b2sim-b2l)/(b2h-b2l))))*emacht*(b2h-b2l)+b2l;
            end
        end
        clear i
    else
        for i=1:(length(t_ode));
            tvar      = t_ode(i)-torig;
            b2sim     = b2vorig;
            emacht    = exp(-tvar/Tau);
            b_ode(i)  = (1-(1-((b2sim-b2l)/(b2h-b2l))))*emacht*(b2h-b2l)+b2l;
        end
        clear i
    end
    b_odehoog      = b_ode;

    % --- berekening van u(t_ode) -----
    dataroad      = [wegdektype, tprev, fa, qmax, height, aantalbul];
    u_ode         = q_road(t_ode,dataroad);

    % --- berekening y_ode uit y=Cx+Du -----
    n             = length(t_ode);
    y_ode         = zeros(n,4);
    i             = 1;
    for i = 1 : n
        y_ode(i,1)= -(k2/m2)*x_ode(i,2)+(b_ode(i)/m2)*
                    x_ode(i,3)-(b_ode(i)/m2)*x_ode(i,4);
        y_ode(i,2)= x_ode(i,2);
        y_ode(i,3)= -x_ode(i,3)+x_ode(i,4);
        y_ode(i,4)= x_ode(i,1)-u_ode(i);
    end
    clear i
    yh           = y_ode;

    % --- berekening xp_ode uit xp=AxBu -----
    % n           = length(t_ode);
    % xp_ode      = zeros(n,4);
    % for i = 1 : n
    % xp_ode(i,1)= x_ode(i,3);
    % xp_ode(i,2)= -x_ode(i,3)+x_ode(i,4);
    % xp_ode(i,3)= -(k1/m1)*x_ode(i,1)+(k2/m1)*x_ode(i,2)-(b_ode(i)/m1)*
    %              x_ode(i,3)+(b_ode(i)/m1)*x_ode(i,4)+(k1/m1)*u_ode(i);
    % xp_ode(i,4)= -(k2/m2)*x_ode(i,2)+(b_ode(i)/m2)*x_ode(i,3)-(b_ode(i)/m2)*x_ode(i,4)
    % end

```

Subroutine waarin de differentiaalvergelijkingen zijn opgenomen, en waarin altijd de juiste waarde voor b_2 aanwezig is volgend relatie (1).

```

%                DIFFVGL.M
%

function xpunt=diffvgl(t_ode, x)
dataroad= [wegdektype, tprev, fa, qmax, height, aantalbul];
u_ode = q_road(t_ode, dataroad);
if b2indicat == 1
    if schakelind == 1
        tvarode      = t_ode-tvorig;
        b2_ode       = b2vorig;
        emacht       = exp(-tvarode/Tau);
        b_ode = (1-(1-((b2_ode-b2l)/(b2h-b2l)))*emacht)*(b2h-b2l)+b2l;
    else
        if (t_ode-tvorig)<Tdelay
            tvarode      = t_ode-tvorig;
            b2_ode       = b2vorig;
            emacht       = exp(-tvarode/Tau);
            b_ode = (((b2_ode-b2l)/(b2h-b2l))*emacht)*(b2h-b2l)+b2l;
            b2real = b_ode;
        else
            tvarode      = t_ode-t0_ode;
            b2_ode       = b2real;
            emacht= exp(-tvarode/Tau);
            b_ode = (1-(1-((b2_ode-b2l)/(b2h-b2l)))*emacht)*(b2h-b2l)+b2l;
        end
    end
end

else
    if schakelind == 0
        tvarode      = t_ode-tvorig;
        b2_ode       = b2vorig;
        emacht       = exp(-tvarode/Tau);
        b_ode = (((b2_ode-b2l)/(b2h-b2l))*emacht)*(b2h-b2l)+b2l;
    else
        if (t_ode-tvorig)<Tdelay
            tvarode      = t_ode-tvorig;
            b2_ode       = b2vorig;
            emacht       = exp(-tvarode/Tau);
            b_ode = (1-(1-((b2_ode-b2l)/(b2h-b2l)))*emacht)*(b2h-b2l)+b2l;
            b2real = b_ode;
        else
            tvarode      = t_ode-t0_ode;
            b2_ode       = b2real;
            emacht       = exp(-tvarode/Tau);
        end
    end
end

```

```

                b_ode = (((b2_ode-b2l)/(b2h-b2l))*emacht)*(b2h-b2l)+b2l;
            end
        end
    end
end
xpunt = [x(3)
-x(3)+x(4)
-x(1)*(k1/m1)+x(2)*(k2/m1)-(x(3)/m1)*b_ode+(x(4)/m1)*b_ode+(k1/m1)*u_ode
-x(2)*(k2/m2)+(x(3)/m2)*b_ode-(x(4)/m2)*b_ode];

```

Subroutine waarin gekeken wordt of er geschakeld kan worden tussen de twee berekende nulpunten.

```

%           TWEE.M
%
disp('*** twee ***')

% --- doorlopen tot eerste nulpunt indien nodig -----
if tbp ~= T1(1)
    disp('doorlopen tot eerste nulpunt')
    tbs    = tbp;
    tes    = T1(1);
    rtbs   = 1;
    ihulp = 1;
    while t_odehoog(ihulp) ~= tes
        ihulp = ihulp+1;
    end
    rtes   = round(ihulp)-1;
    ts     = t_odehoog(rtbs : rtes);
    Ts     = [Ts; ts];
    B      = [B ; b_odehoog(rtbs : rtes)];
    VS     = [VS; y1(rtbs : rtes, 1)];
    V      = [V ; y1(rtbs : rtes, 2)];
    Y1     = [Y1; y1(rtbs : rtes, 4)];
    YR     = [YR; y1(rtbs : rtes, 3)];
    rtel   = rtes+1;
    x0     = x1(rtel, :);

else
    rtel = 1;

end

% --- begin tijdsinterval voor schakelen demper -----
tbs    = T1(1);
tes    = T1(2);

```

```

ihulp= 1;
while t_odehoog(ihulp) ~= tes
    ihulp = ihulp+1;
end
rtel2= round(ihulp);

% --- bepalen minimale en maximale versnellingen in [tbs, tes] -----
versnel      = y1(rtel : rtel2, 1);
keuzecri     = max(abs(versnel));
maxacc       = max(versnel);
minacc       = min(versnel);

% --- testen of versnellingen niet te laag zijn -----
if (keuzecri > miny2)

    % --- versnellingen niet te laag -----
    disp('Versnellingen zijn NIET te laag')
    t1      = [tbs tep];

    % --- berekenen responsie lage demping -----
    [yl, xl, t_odelaag, b_odelaag, rememb_ilaag] = simblaag(t1,x0);
    tin      = t_odelaag;

    % --- berekenen nieuwe nulpunten -----
    T1      = T1(1);
    cri1    = yl(:,3);
    nulpunt
    if length(T1) ~= 2
        disp('*** Met lage demping geen twee nulpunten ***')
        T1(2) = tes;          % laat programma verder lopen
        yl(:,2) = ones(t_odelaag); % voorkomen lage demping
    end
    tes1    = T1(2);
    rtell= 1;
    ihulp= 1;
    while t_odelaag(ihulp) ~= tes1
        ihulp= ihulp+1;
    end
    rtell2  = round(ihulp);

    % --- berekenen maxima veerweg/banduitvering/versnelling ----
    cmax    = max(yl(rtell : rtell2, 2)); % max. veerweg
    cmin    = min(yl(rtell : rtell2, 2)); % min. veerweg
    cband   = max(yl(rtell : rtell2, 4)); % max. banduitvering
    caccmax = max(yl(rtell : rtell2, 1)); % max. versnelling
    caccmin = min(yl(rtell : rtell2, 1)); % min. versnelling

    % --- testen op overschrijding maxima -----

```

```

if (cmax>0.14) | (cmin<-.09) | (cband>0.015) ...
    | (caccmax>maxacc) | (caccmin<minacc)

% --- wel overschrijding -----
disp('Demping kan NIET omlaag')
if (cmax>0.14), disp('Te grote uitvering')
elseif (cmin<-.09), disp('Te grote invering')
elseif (cband>0.015), disp('Te grote banduitvering')
elseif (caccmax>maxacc), disp('Te hoge versnelling')
elseif (caccmin<minacc), disp('Te lage versnelling')
end
rtbs = 1;
rtes = rtel2-1;
ts    = t_odehoog(rtbs : rtes);
Ts    = [Ts; ts];
B     = [B ; b_odehoog(rtbs : rtes)];
VS    = [VS; y1(rtbs : rtes, 1)];
V     = [V ; y1(rtbs : rtes, 2)];
Y1    = [Y1; y1(rtbs : rtes, 4)];
YR    = [YR; y1(rtbs : rtes, 3)];
if schakelind == 0
    b2vorig    = b2real;
    tvorig    = t_odehoog(rememb_ihoog);
    tschakel= tvorig-Tdelay;
    Schakel    = [Schakel tschakel tschakel];
end

% --- grootheden nieuwe tijdsinterval bepalen -----
rtel = rtes+1;
x0   = x1(rtel, :);
b2real = b_odehoog(rtel2);
schakelind= 1;

else

% --- geen overschrijding -----
disp('Demping gaat omlaag')
rtbsl= 1;
rtesl= rtel2-1;
ts    = t_odelaag(rtbsl : rtesl);
Ts    = [Ts; ts];
B     = [B ; b_odelaag(rtbsl : rtesl)];
VS    = [VS; yl(rtbsl : rtesl, 1)];
V     = [V ; yl(rtbsl : rtesl, 2)];
Y1    = [Y1; yl(rtbsl : rtesl, 4)];
YR    = [YR; yl(rtbsl : rtesl, 3)];
if schakelind == 1
    b2vorig    = b2real;

```

```

        torig = t_odelaag(rememb_ilaag);
        tschakel= torig-Tdelay;
        Schakel      = [Schakel tschakel tschakel];
    end

    % --- grootheden nieuwe tijdsinterval bepalen -----
    x0      = x1(rtell2, :);
    tes     = tesl;
    b2real  = b_odelaag(rtell2);
    schakelind= 0;

end

else

    % --- versnellingen wel te laag -----
    disp('Versnellingen zijn WEL te laag')
    rtbs = 1;
    ihulp= 1;
    while t_odehoog(ihulp) ~= tes
        ihulp= ihulp+1;
    end
    rtes = ihulp-1;
    ts   = t_odehoog(rtbs : rtes);
    Ts   = [Ts; ts];
    B    = [B ; b_odehoog(rtbs : rtes)];
    VS   = [VS; y1(rtbs : rtes, 1)];
    V    = [V ; y1(rtbs : rtes, 2)];
    Y1   = [Y1; y1(rtbs : rtes, 4)];
    YR   = [YR; y1(rtbs : rtes, 3)];
    if schakelind == 0
        b2vorig      = b2real;
        torig = t_odehoog(rememb_ihoog);
        tschakel= torig-Tdelay;
        Schakel      = [Schakel tschakel tschakel];
    end

    % --- grootheden nieuwe tijdsinterval bepalen -----
    rtel = rtes+1;
    x0   = x1(rtel, :);
    b2real  = b_odehoog(rtel2);
    schakelind= 1;

end

% --- nieuwe tijdsinterval bepalen -----
tbp = tes
tep = tbp+tprev;

```

```
% --- testen of einde simulatie is bereikt -----  
if tep >= eindtijd  
  
    % --- afsluiten simulatie -----  
    einde  
else  
  
    % --- grootheden nieuwe interval bepalen -----  
    th    = [tbp tep]';  
    T1    = tbp;  
end
```