

## Semi-actieve vering met preview

**Citation for published version (APA):**

Heikoop, R. (1991). *Semi-actieve vering met preview: toegepast op een trekker-oplegger combinatie*. (DCT rapporten; Vol. 1991.035). Technische Universiteit Eindhoven.

**Document status and date:**

Gepubliceerd: 01/01/1991

**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](http://www.tue.nl/taverne)

**Take down policy**

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

[openaccess@tue.nl](mailto:openaccess@tue.nl)

providing details and we will investigate your claim.

**SEMI-ACTIEVE VERING MET PREVIEW**

**Toegepast op een trekker-oplegger combinatie**

**Ruud Heikoop**

**Rapport nr.: WFW.91.035**

# **SEMI-ACTIEVE VERING MET PREVIEW**

TOEGEPAST OP EEN  
TREKKER-OPLEGGER COMBINATIE

AUTEUR: RUUD HEIKOOP

STAGE BEGELEIDER: RUDOLF HUISMAN

EINDHOVEN, MEI 1991

VAKGROEP FUNDAMENTELE WERKTUIGKUNDE  
FACULTEIT WERKTUIGBOUWKUNDE  
TECHNISCHE UNIVERSITEIT EINDHOVEN

## **Samenvatting**

In dit verslag wordt het resultaat van het onderzoek naar semi-actieve vering met preview, toegepast op een trekker-oplegger combinatie, bekeken. Preview wil zeggen dat het wegdek dat de combinatie in de toekomst zal bereiken al bekend is. Deze kennis wordt gebruikt bij het bepalen van de gewenste demperkracht. De hierbij gebruikte regelstrategie is gebaseerd op de optimale regeltheorie. Preview kan gemakkelijk in deze theorie geïmplementeerd worden.

Bij de simulatie is gebruik gemaakt van een quarter car model dat de achterzijde van de trekker zeer vereenvoudigd weergeeft. Alsingangssignalen voor dit model zijn een stapfunctie en een spoorwegovergang genomen. Alle resultaten zijn vervolgens vergeleken met de resultaten van een passief systeem, een actief systeem met preview en een semi-actief systeem zonder preview. Hierbij is vooral op de volgende grootheden gelet: de maximale en minimale bandvervorming, vervorming van de veer en versnelling van het chassis. Voor de gebruikte previewtijd is in alle gevallen  $1/8s$  genomen.

De resultaten van de semi-actieve vering met preview zijn niet zo geweldig. Met het stapsignaal alsingangssignaal is slechts een reductie van maximaal 7% (vergeleken met het passieve systeem) van de versnelling van het chassis mogelijk. Hierbij is er vanuit gegaan dat de andere grootheden, zoals hierboven genoemd, niet slechter mogen zijn dan bij het passieve systeem. De resultaten zoals die bereikt worden met een actief systeem met preview worden lang niet gehaald. Als de spoorwegovergang alsingangssignaal wordt genomen is er helemaal geen verbetering meer zichtbaar t.o.v het passieve systeem.

De resultaten van de simulaties met semi-actieve vering zonder preview verschillen weinig van de resultaten met preview. Het grote nadeel van semi-actieve vering met preview is het niet kunnen leveren van energie zoals bij actieve vering met preview.

## **Inhoudsopgave**

<b>Samenvatting</b>	1
<b>Inhoudsopgave</b>	2
<b>Symbolenlijst</b>	4
<b>1. Inleiding</b>	5
<b>2. Resultaten van het actieve en passieve systeem</b>	
2.1 Inleiding	8
2.2 De resultaten	8
<b>3. Semi-actieve vering</b>	
3.1 Inleiding	11
3.2 Het gekozen model	11
3.3 Verschillende soorten actieve demping	13
3.4 De regelstrategie	14
3.5 Bepaling van de demperkracht en de uitgang	16
<b>4. De resultaten</b>	
4.1 Inleiding	18
4.2 Ingangssignalen	18
4.3 Resultaten van de simulatie met de stap als ingang	19
4.4 Verklaring van de resultaten	22
4.5 Resultaten van de simulatie met de spoorwegovergang als ingang	23
4.6 Verklaring van de resultaten	24
<b>5. Conclusies</b>	25

**6. Aanbevelingen** 26

**Literatuuropgave** 27

**Appendices**

A. Het gebruikte model 29

B. Figuren behorend bij hoofdstuk 4 30

C. Programmatuur 48

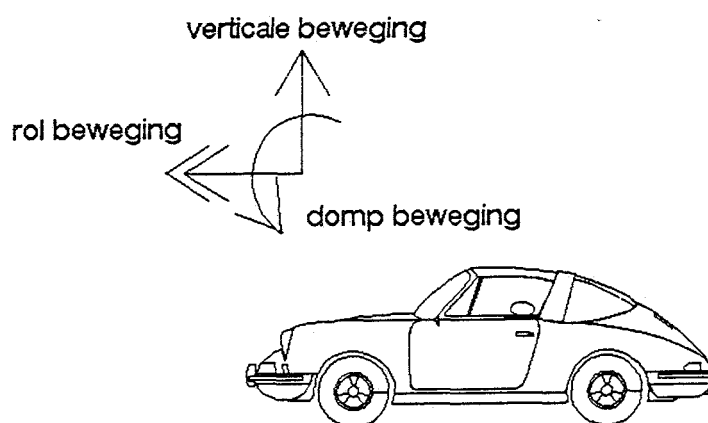
## Symbolenlijst

$m_1$	massa van de as	[kg]
$m_2$	massa van het chassis	[kg]
$k_1, k_2, k_d$	veerconstanten	[N/m]
$b_1, b_2, b$	dempingscoëfficiënten	[Ns/m]
$b_{\min}$	minimale dempingscoëfficiënt	[Ns/m]
$b_{\max}$	maximale dempingscoëfficiënt	[Ns/m]
$y_0, y_1, y_2$	verplaatsingen	[m]
$\dot{y}_0, \dot{y}_1, \dot{y}_2$	snelheden	[m/s]
$\ddot{y}_1, \ddot{y}_2$	versnellingen	[m/s <sup>2</sup> ]
$(y_1 - y_0)_{\min}$	maximale negatieve bandvervorming	[m]
$(y_1 - y_0)_{\max}$	maximale positieve bandvervorming	[m]
$(y_2 - y_1)_{\min}$	maximale negatieve veervervorming	[m]
$(y_2 - y_1)_{\max}$	maximale positieve veervervorming	[m]
$ \ddot{y}_2 _m$	maximale absolute versnelling	[m/s <sup>2</sup> ]
$x$	toestandskolom	
$y$	uitgangskolom	
$w$	verstoring wegdek	[m/s]
$u$	ingangssignaal	[N]
$A$	systematrix	
$B$	ingangsmatrix	
$C$	uitgangsmatrix	
$D$	doorkoppelmatrix	
$E$	verstoringmatrix	
$Q, R$	weegmatrices	
$q_1, q_2, q_3, r$	weegfactoren	
$P, F, V, G, H, A_g$	matrices	
$F_d, F_v, F_1$	krachten	[N]
$t$	tijd	[s]
$T_p$	previewtijd	[s]

## 1. Inleiding

In dit verslag wordt bekeken wat de invloed van semi-actieve vering op het comfort en het weggedrag van een trekker-oplegger combinatie is en wat de voordelen en nadelen ten opzichte van het passieve en actieve veersysteem zijn.

Voor het comfort zijn drie bewegingen belangrijk, nl de verticale beweging, de dompbeweging, de rolbeweging (zie figuur 1.1).



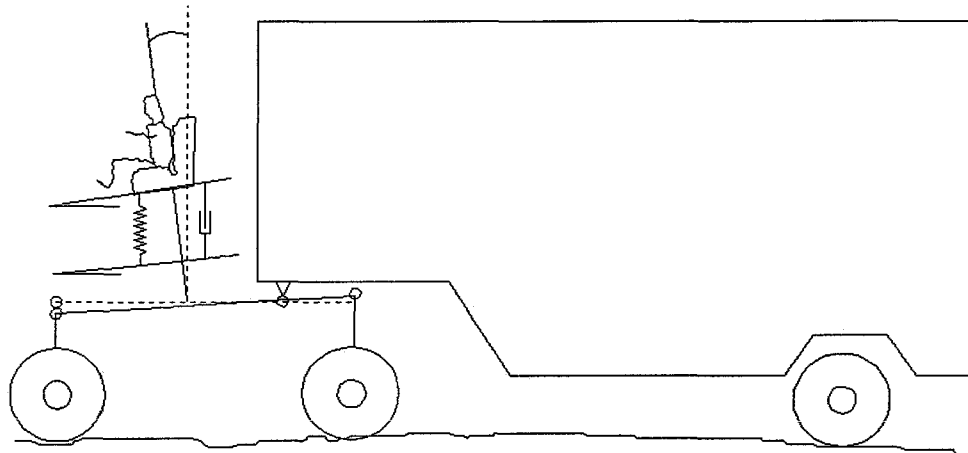
**figuur 1.1:** De verticale beweging, de dompbeweging en de rolbeweging.

Voor het frequentiegebied tussen de 0.25 en 15Hz is hierbij van groot belang. In dit gebied liggen de resonantie frequenties van de band (wheel-hop frequentie, voor een DAF truck ongeveer 13Hz) en van het chassis (voor een DAF truck 1.5Hz). Voor frequenties kleiner dan 0.25Hz is het niet nodig dat het veersysteem de verstoring van het wegdek elimineert. Voor de mens zijn bij verticale beweging frequenties tussen de 4 en 8Hz zeer vervelend en bij de dompbeweging frequenties tussen de 1 en 2Hz. In het geval van een trekker heeft juist de dompbeweging een slechte invloed op het comfort. Deze beweging wordt veroorzaakt door de aanstoting van de achteras van de trekker. Dit is in figuur 1.2 weergegeven.

Het is dus zaak om deze beweging te onderdrukken, dit kan met zowel een passief, een actief of een semi-actief veersysteem. Bij de laatste twee systemen kan gebruik gemaakt worden van preview. Dit houdt in dat het wegdek al van te voren bekend is, zodat aan



de hand hiervan de actuatoorkracht of de demperkracht (dempingscoëfficiënt) ingesteld kan worden.



**Figuur 1.2:** Aanstootmechanisme van de dompbeweging van de cabine.

Het grote probleem is dat weggedrag en comfort totaal verschillende eisen aan het veersysteem stellen. Een goed comfort wordt verkregen met een slappe vering en een lage demping, maar voor een goed weggedrag is een stijvere vering en hogere demping nodig. Duidelijk is dat bij een passief systeem een compromis bereikt moet worden tussen deze beide eisen, hetgeen leidt tot het passieve veersysteem dat nog steeds wordt toegepast.

Een actief veersysteem geeft de mogelijkheid om energie toe te voeren aan het systeem om zo een beter gedrag en comfort te verkrijgen. In hoofdstuk 2 zal kort op de resultaten van de simulatie met het passieve en actieve veersysteem worden teruggeko- men. Bij de simulatie wordt gebruik gemaakt van een eenvoudig model, het zogenaamde 'quarter car model'. Het is een model met twee graden van vrijheid en geeft in dit geval de massa's van de achteras en het chassis weer. Het nadeel van het actieve systeem is het grote piekvermogen dat gevraagd wordt. Daarom zal in dit onderzoek gebruik worden gemaakt van semi-actieve vering. De actuator van het actieve systeem wordt nu vervangen door een veer en een continu regelbare demper en er kan nu dus alleen nog maar energie gedissipeerd worden.

De te gebruiken regelstrategie voor het instellen van de demper is gebaseerd op die van het actieve veersysteem met preview (de previewtijd zal bij alle simulaties 1/8s zijn). Als

er echter energie geleverd moet worden, wordt de dempingscoëfficiënt gelijk gesteld aan nul. Deze regelstrategie zal worden behandeld in hoofdstuk 3. In hoofdstuk 4 zal bekeken worden wat de resultaten van simulatie met het semi-actieve systeem zijn en of ze overeenkomen met die van het actieve systeem. De simulaties zullen gedaan worden met twee ingangssignalen, de stapfunctie en de spoorwegovergang. Verder zal gekeken worden wat de invloed is van de preview. Als laatste zal kort beschreven worden wat de invloed van de weegfactoren in het regelcriterium dat volgt uit de regelstrategie is. In hoofdstuk 4 staan de algemene conclusies en in hoofdstuk 5 de aanbevelingen.

Als laatste dient nog opgemerkt te worden dat in alle gevallen met de stapfunctie als ingangssignaal slechts over 0.8s wordt gesimuleerd. Dit heeft alles te maken met het beperkte geheugen van de gebruikte computer.

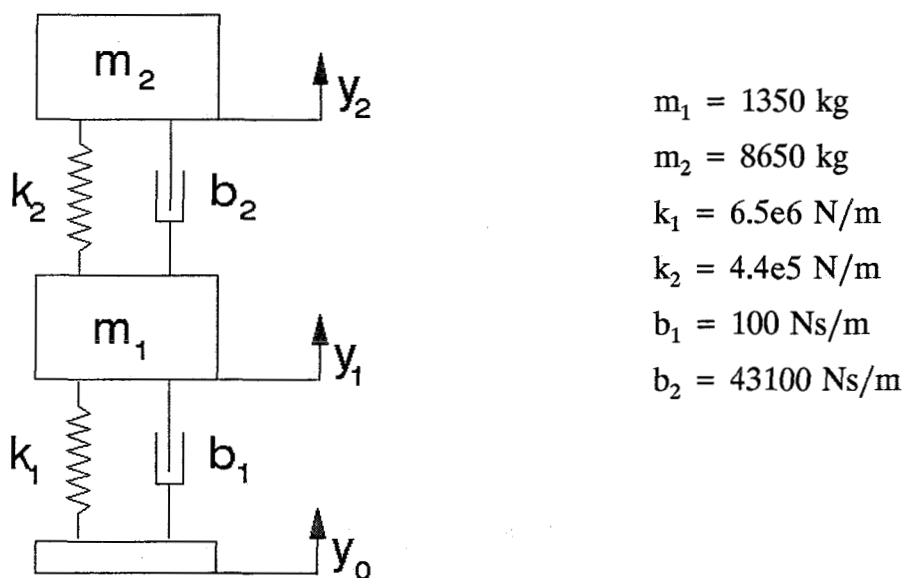
## 2. Resultaten van het actieve en passieve systeem.

### 2.1 Inleiding.

Het onderzoek naar het dynamisch gedrag van een trekker met een passief veersysteem en een actief veersysteem, eventueel met preview is gedaan door Huisman [2]. Bij de simulatie is er gebruik gemaakt van een 'quarter car model'. De resultaten van dit onderzoek zullen in de volgende paragraaf kort worden weergegeven om hiermee de resultaten van de semi-actieve vering te kunnen vergelijken.

### 2.2 De resultaten.

Zoals al gezegd is in beide gevallen uitgegaan van een quarter car model, hetgeen er als volgt uitziet voor het passieve veersysteem.



figuur 2.1: Het quarter car model voor het passieve model.

Bij het actieve model zijn  $k_2$  en  $b_2$  vervangen door een actuator en is  $b_1$  gelijk gesteld aan

nul. De regelstrategie om de optimale actuatoorkracht te bepalen was gebaseerd op de optimale regeltheorie [2]. Deze strategie is uitgebreid met een preview-gedeelte [2], dit wordt in het volgende hoofdstuk nog wat uitvoeriger behandeld. Er is gebruik gemaakt van de volgende toestandsbeschrijving om de bewegingsvergelijking en de uitgang van het systeem weer te geven.

$$\dot{x} = Ax + Bu + Ew; \quad x(t_0) = x_0 \quad (2.1)$$

$$y = Cx + Du \quad (2.2)$$

met

x toestandskolom, in dit geval  $x = [(y_1 - y_0), (y_2 - y_1), \dot{y}_1, \dot{y}_2]^T$

u ingangssignaal, in dit geval de actuatoorkracht

w verstoring door het wegdek, in dit geval  $w = [\dot{y}_0]$

y uitgangskolom, in dit geval  $y = [(y_1 - y_0), (y_2 - y_1), \ddot{y}_2]^T$

A systeemmatrix

B ingangsmatrix

C uitgangsmatrix

D doorkoppelmatrix

E verstoringsmatrix

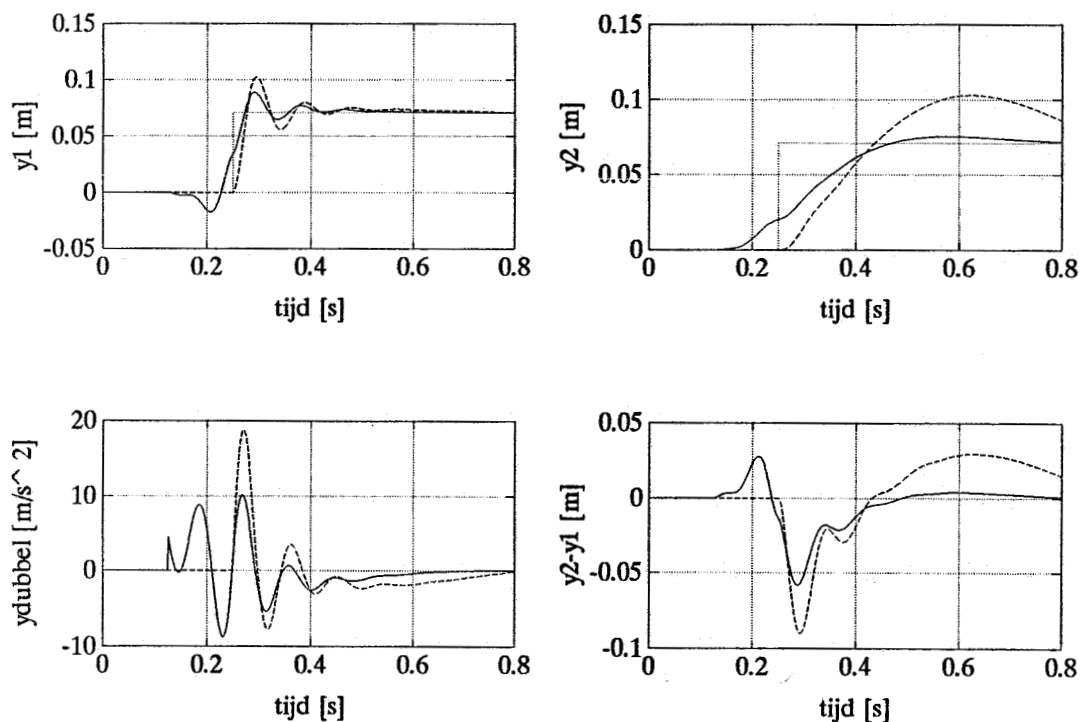
De optimale regeltheorie houdt in dat in dit geval het volgende kwadratische criterium geminimaliseerd moet worden.

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} [y^T Q y + u^T R u] dt \quad (2.3)$$

Met Q en R semi-positief definitie weegmatrices.

$$Q = \begin{bmatrix} q_1 & 0 & 0 \\ 0 & q_2 & 0 \\ 0 & 0 & q_3 \end{bmatrix} \quad ; \quad R = [r] \quad (3.4)$$

Minimalisatie van deze integraal geeft dus de optimale actuatorkracht. Een aantal belangrijke resultaten is in de volgende figuren (figuur 1.1) weergegeven.



**Figuur 1.1.** Belangrijkste resultaten van het passieve veersysteem en het actieve veersysteem met preview. Het ingangssignaal was een stap met een hoogte van 7.1 cm.

----- actieve veersysteem

- - - - passieve veersysteem

In figuur 1.1 is duidelijk te zien dat de maximale absolute versnelling van het chassis ( $|y_{\text{dubbel}}|$ ) bij het actieve systeem kleiner is dan bij het passieve systeem. Dit mag als een belangrijke verbetering worden gezien. Ook de maximale negatieve veervervorming ( $y_2 - y_1$ ) is bij het actieve systeem kleiner dan bij het passieve systeem, hetgeen eveneens een mooie verbetering is.

### **3. Semi-actieve vering.**

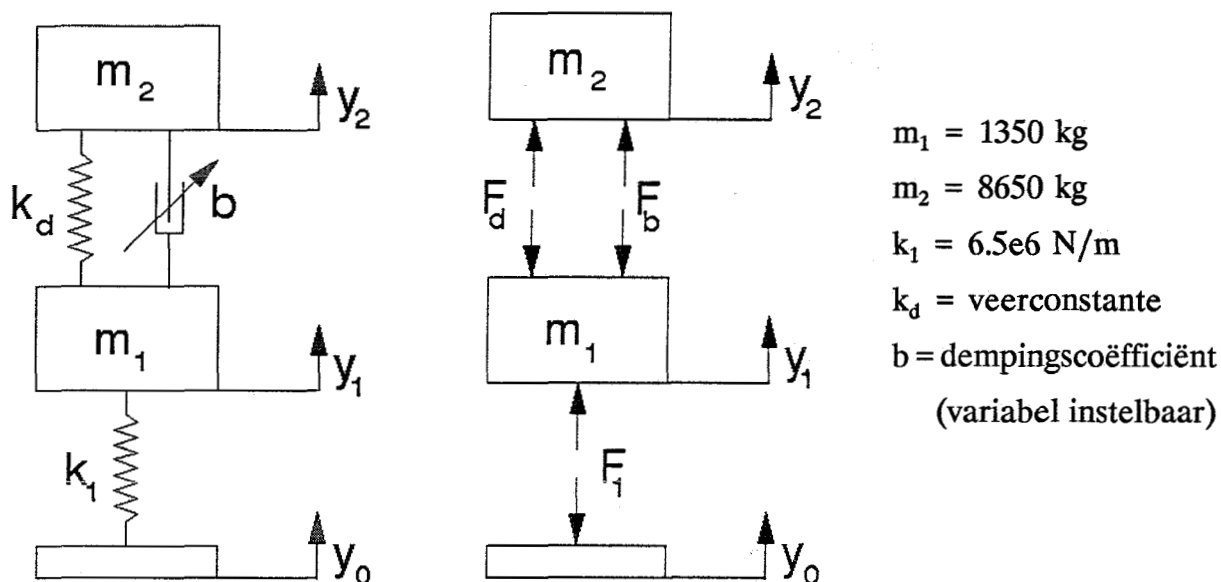
#### **3.1 Inleiding.**

Uit de literatuur is heel wat bekend over semi-actieve vering. Volgens deze literatuur [1, 3, 4, 5, 6, 7] is deze vering beter dan de passieve vering en benadert zelfs de actieve vering. Beter wil zeggen dat de versnellingen van massa's en de vervorming van de veer kleiner zijn. Het grote verschil tussen de semi-actieve vering en de actieve vering is dat bij semi-actieve vering geen energie geleverd kan worden, maar alleen gedissipeerd. Alle uit de literatuur bekende resultaten zijn verkregen met behulp van veersystemen zonder preview. Het gedrag van de actieve vering met preview is inmiddels bekend [2], maar hoe het gedrag van semi-actieve vering met preview zal zijn is nog niet bekend. De grote vraag is of het semi-actieve veersysteem het actieve veersysteem nog steeds kan benaderen.

In dit hoofdstuk zal eerst naar het gekozen model worden gekeken, vervolgens wordt ingegaan op de verschillende vormen van actieve demping. Ook zal aandacht worden besteed aan de gekozen regelstrategie en als laatste zal kort worden weergegeven hoe actieve demping geïmplementeerd kan worden in een programma dat het dynamisch gedrag van het model berekent.

#### **3.2 Het gekozen model.**

In de algemene inleiding is reeds vermeld dat gebruik wordt gemaakt van een quarter car model om het dynamisch gedrag van een trekker te beschrijven. Hier is ook aangegeven dat juist de dompbeweging van de cabine een negatieve invloed heeft op het comfort. Dit is de reden dat het dynamisch gedrag van de achterzijde van de trekker wordt bekeken, zoals ook het geval was bij het passieve en actieve veersysteem (hfdst. 2). Het is duidelijk dat kleine verticale verplaatsingen en versnellingen van het chassis gewenst zijn om deze dompbeweging zoveel mogelijk te onderdrukken. Het gekozen model ziet er als volgt uit.



**Figuur 3.1:** Het quarter car model bij semi-actieve vering.

De bewegingsvergelijkingen van dit model zijn:

$$m_2 \ddot{y}_2 = F_d + F_v = F_d + k_d(y_2 - y_1) \quad (3.1)$$

$$m_1 \ddot{y}_1 = F_1 - F_d - F_v = -k_1(y_1 - y_0) - F_d + k_d(y_2 - y_1) \quad (3.2)$$

Hierbij is de zwaartekracht weggelaten omdat deze geen invloed heeft op het dynamisch gedrag van het model.

Beide bewegingsvergelijkingen kunnen beschreven worden met de volgende toestandsvergelijking.

$$\dot{x} = Ax + Bu + Ew, \quad x(t_0) = x_0 \quad (3.3)$$

met toestandskolom  $x^T = [(y_1 - y_0), (y_2 - y_1), \dot{y}_1, \dot{y}_2]$ , met ingangskolom  $u = [F_d]$  en met de verstoringkolom  $w = [\dot{y}_0]$ . In appendix A staat beschreven hoe beide bewegingsvergelijkingen in de toestandsbeschrijving omgezet kunnen worden.

### 3.3 Verschillende soorten actieve demping

#### a. Semi-active Skyhook damping [4].

In dit geval is de demperkracht ( $F_d$ ) gelijk aan de snelheid van  $m_2$  vermenigvuldigd met een dempingscoëfficiënt. De demperkracht wordt gelijk aan nul zo gauw er energie geleverd moet worden. Dit is het geval als  $(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) * \dot{y}_2$  kleiner dan nul is en kan op de volgende manier geprogrammeerd worden.

```
IF  $(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) * \dot{y}_2 > 0$   
  THEN  $F_d = b * \dot{y}_2$   
  ELSE  $F_d = 0$   
END
```

#### b. Continu variabel instelbare demper.

De demperkracht is in dit geval gelijk aan het snelheidsverschil tussen  $m_2$  en  $m_1$  vermenigvuldigd met een dempingscoëfficiënt. Deze dempingscoëfficiënt kan continu variabel worden ingesteld. De demperkracht wordt ook nu gelijk aan nul zo gauw er energie geleverd moet worden, dus als  $(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) * \dot{y}_2$  kleiner dan nul is.

```
IF  $(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) * \dot{y}_2 > 0$   
  THEN  $F_d = b * (\dot{y}_2 - \dot{y}_1)$   
  ELSE  $F_d = 0$   
END
```

#### c. Semi-active On-Off [4].

Er wordt gebruik gemaakt van een schakelbare demper. De demperkracht is nu direct gerelateerd aan het snelheidsverschil  $(\dot{y}_2 - \dot{y}_1)$ .

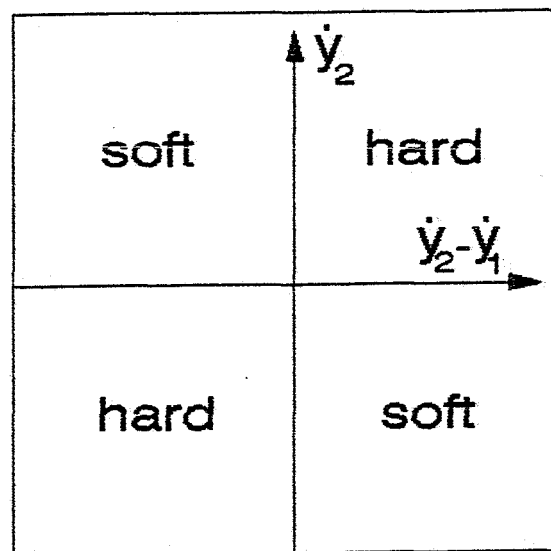


```

IF  $(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) * \dot{y}_2 > 0$ 
  THEN  $F_d = \text{Hard}$ 
  ELSE  $F_d = \text{Soft}$ 
END

```

De dempingscoëfficiënt is dus maximaal of minimaal, afhankelijk van het teken van  $\dot{y}_2$  en  $(\dot{y}_2 - \dot{y}_1)$ , zie figuur 3.2.



**Figuur 3.2:** Switch diagram voor een On-Off demper.

### 3.4 De regelstrategie

De regelstrategie is dezelfde als die gebruikt is bij de actieve vering [2]. Dit houdt in dat gebruik gemaakt zal worden van de optimale regeltheorie in combinatie met preview. De regeltheorie is gebaseerd op de minimalisatie van een kwadratische prestatie index  $J$ , die er als volgt uitziet:

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} [y^T Q y + u^T R u] dt \quad (3.4)$$

met  $[t_0, t_f]$  het tijdsinterval waarover  $J$  geminimaliseerd moet worden en  $y^T = [(y_1 - y_0), (y_2 - y_1), \ddot{y}_2]$  die volgt uit de uitgangsvergelijking

$$y = Cx + Du \quad (3.5)$$

$Q$  en  $R$  zijn symmetrische semi-positief definitieve weegmatrices, zodanig dat  $D^T Q D + R$  positief definitief is. Preview kan gemakkelijk geïmplementeerd worden in deze regeltheorie. Dit is uitgewerkt door Huisman [2] en resulteert in de volgende optimale actuatoringang:

$$u_{opt} = -V^{-1}(B^T P + D^T Q C)x + V^{-1}B^T r \quad (3.6)$$

met

$$F^T P + P F + G - P H P = 0 \quad (3.7)$$

$$\dot{r} = -A_g^T r + P h \quad ; \quad r(t_f) = P x(t_f) = 0 \quad (3.8)$$

met

$$V = D^T Q D + R, \quad V = V^T, \quad V > 0 \quad (3.9)$$

$$F = A - B V^{-1} D^T Q C \quad (3.10)$$

$$G = C^T (Q - Q D V^{-1} D^T Q) C \quad (3.11)$$

$$H = B V^{-1} B^T, \quad H = H^T \quad (3.12)$$

$$h = E w \quad (3.13)$$

$$A_g = F - H P \quad (3.14)$$

Vgl. (3.7) is een algebraïsche Riccati vergelijking en vgl.(3.8) is een eerste orde eindwaarde probleem. De Riccati vergelijking kan alleen worden opgelost onder bepaalde condities [2]. Opgemerkt dient te worden dat de kracht die uit deze regelstrategie volgt bij semi-actieve vering gelijk is aan de gewenste demperkracht. Dit zal in de volgende paragraaf worden toegelicht.

De regelstrategie en de daarbij behorende weegfactoren moeten zo gekozen worden dat een aantal grootheden gereduceerd wordt. Deze grootheden zijn [2]:

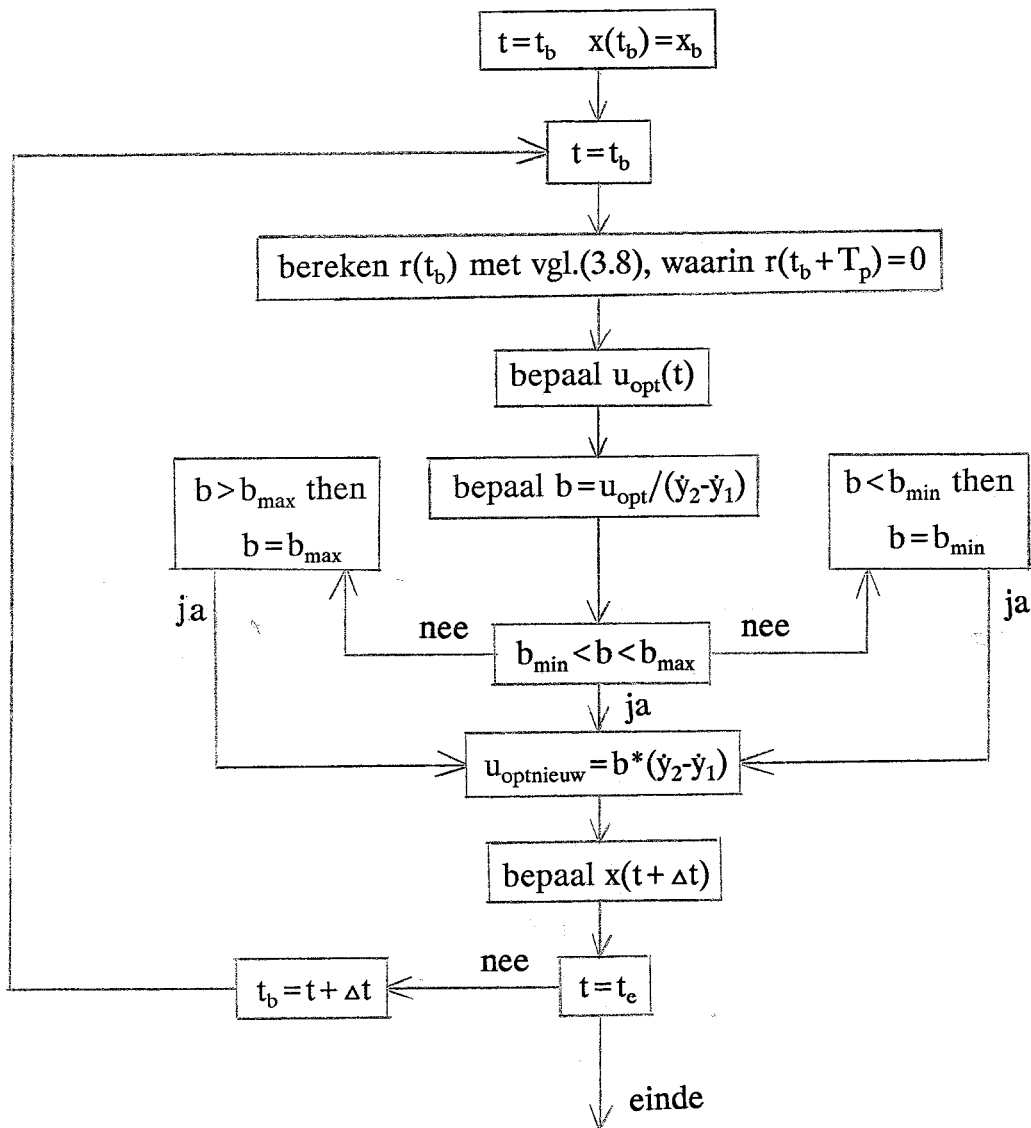
- a) De maximale absolute versnelling  $|\ddot{y}_2|_m$ , deze wordt gewogen met  $q_3$ ;
- b) De maximale uitrekking van de veer tussen de as en het chassis, resp.  $m_1$  en  $m_2$ ,  $(y_2-y_1)_{mp}$  (maximaal toegestane waarde voor een DAF truck is 14 cm);
- c) De maximale indrukking van de veer tussen de as en het chassis, resp.  $m_1$  en  $m_2$ ,  $(y_2-y_1)_{mn}$  (minimaal toegestane waarde voor een DAF truck is 9 cm);
- d) De maximale positieve bandvervorming,  $(y_1-y_0)_{mp}$ ;
- e) De maximale negatieve bandvervorming,  $(y_1-y_0)_{mn}$ .

### 3.5 Bepaling van de demperkracht en de uitgang.

In dit onderzoek is gebruik gemaakt van een demper met een dempingscoëfficiënt die continu variabel ingesteld kan worden (zie par. 3.3b). Om de demperkracht en de uitgang te bepalen is gebruik gemaakt van een computerprogramma, geschreven in PC-Matlab (appendix C). Hieronder wordt kort toegelicht hoe de demperkracht en de uitgang bepaald kunnen worden (zie ook fig. 3.3):

Met behulp van de optimale regeltheorie (zie par. 3.4) wordt de gewenste demperkracht bepaald. Vervolgens wordt met het snelheidsverschil  $(\dot{y}_2-\dot{y}_1)$  (bekend uit de oude toestand) de gewenste dempingscoëfficiënt bepaald. Als deze dempingscoëfficiënt boven de maximale waarde ligt wordt hij gelijk gesteld aan dit maximum. Als de dempingscoëfficiënt kleiner is dan een minimale waarde wordt een minimale waarde ingesteld. Deze minimale waarde is natuurlijk groter dan of gelijk aan nul. Immers een waarde kleiner dan nul zal inhouden dat de demper energie moet leveren en dat is onmogelijk. Daarna wordt met de nieuwe dempingscoëfficiënt de werkelijke demperkracht bepaald en toegevoerd aan het systeem gedurende het komende tijdsinterval.

Met behulp van vergelijking (3.3) wordt nu de nieuwe toestand bepaald. Daarna kan met vergelijking (3.5) de nieuwe uitgang bepaald worden.



**Figuur 3.3:** Schema voor het berekenen van de demperkracht en uitgang.

## 4. Resultaten

### 4.1 Inleiding.

In dit hoofdstuk zal het gedrag van het model met de semi-actieve vering worden bekeken. Hierbij wordt gebruik gemaakt van twee verschillende soorten ingangssignalen, de stapfunctie en de spoorwegovergang. De resultaten zullen onderling en met die van het actieve en passieve veersysteem worden vergeleken. De previewtijd is in alle gevallen gelijk aan  $1/8s$ .

### 4.2 Ingangssignalen.

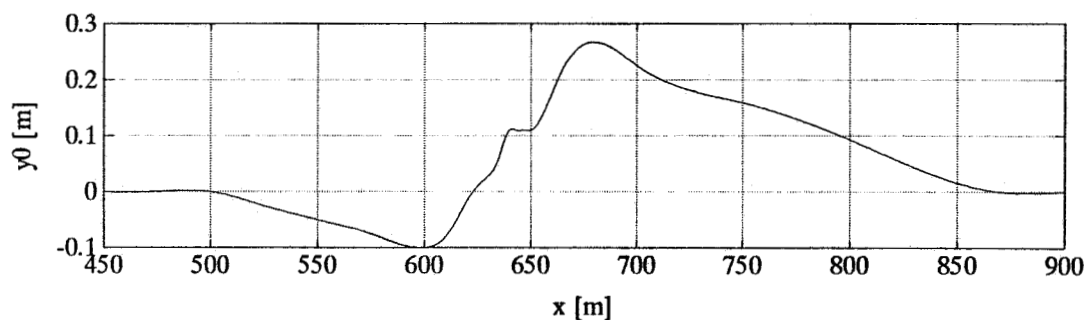
Het ingangssignaal is de afgeleide naar de tijd van het wegdek. Zoals hierboven al genoemd, is er gebruik gemaakt van de volgende twee signalen:

- Een stap.
- De spoorwegovergang in de Tongelresestraat in Eindhoven.

**Het stapsignaal:** Het stapsignaal is als ingangssignaal genomen, omdat dit signaal vaak gebruikt wordt, zodat het resultaat eenvoudig te vergelijken is met andere onderzoeken. Ook de resultaten van het actieve en het passieve systeem met de stapfunctie als ingangssignaal zijn bekend [2]. De hoogte van de stap is zo gekozen dat bij het passieve systeem  $(y_2 - y_1)_{mn}$  gelijk is aan  $-9$  cm.

**De spoorwegovergang:** DAF heeft dit wegdek gemeten en aan de hand van deze metingen is een ingangssignaal bepaald. De spoorwegovergang heeft in de praktijk een slechte invloed op het comfort.

Verder dient nog opgemerkt te worden dat de gebruikte signalen niet echt realistisch zijn voor het quarter car model, maar er alleen voor dienen om het gedrag van de gekozen regelstrategie te onderzoeken.



**Figuur 4.1:** Spoorwegovergang in de Tongelresestraat te Eindhoven.

#### 4.3 Resultaten van de simulatie met de stap als ingang.

In paragraaf 3.5 is opgemerkt dat de dempingscoëfficiënt binnen bepaalde grenzen moet liggen. De reden hiervoor is dat niet alle dempingscoëfficiënten zijn te realiseren. Een dempingscoëfficiënt kleiner dan nul zou betekenen dat de demper energie moet leveren, hetgeen onmogelijk is. Een oneindig grote dempingscoëfficiënt is natuurlijk ook niet realistisch. De maximale dempingscoëfficiënt ( $b_{\max}$ ) is daarom gelijk aan  $100000$  [Ns/m]. De minimale dempingscoëfficiënt ( $b_{\min}$ ) is  $15000$  [Ns/m]. Deze minimale dempingscoëfficiënt is niet gelijk aan nul omdat in werkelijkheid de demping nooit nul kan worden. In tegenstelling tot het actieve systeem moet nu ook de versnelling van de tweede massa worden gewogen. Dit is nodig omdat bij een semi-actief systeem de demperkracht niet evenredig is met de versnelling van het chassis ( $\ddot{y}_2$ ). Dus de weegfactor  $q_3$  moet nu ongelijk aan nul gekozen worden (zie vgl. (2.4)). Om de versnelling even zwaar mee te wegen als de andere grootheden van het criterium moet  $q_3$  in de orde van  $1e8$ ,  $1e9$  worden gekozen. In tabel 1 is voor beide weegfactoren een aantal resultaten van de simulatie weergegeven.

**tabel 1:** Resultaten van de stapresponsie van het actieve en het semi-actieve systeem beide met preview ( $T_p = 1/8s$ ). Bij het semi-actieve systeem zijn verschillende waarden voor  $q_3$  genomen. Bij het actieve systeem is  $q_3 = 0$ . De staphoogte is 7.1 cm.

$q_1$	$q_2$	$q_3$	$r$	$(y_1 - y_0)_{mp}$ [cm]	$(y_1 - y_0)_{mn}$ [cm]	$(y_2 - y_1)_{mp}$ [cm]	$(y_2 - y_1)_{mn}$ [cm]	$ \ddot{y}_2 _m$ [m/s <sup>2</sup> ]
1e13	1e12	1e8	1	3.9	-7.1	1.0	-10.0	15
1e13	1e12	1e9	1	5.4	-7.1	0.8	-12.0	8
1e13	1e12	0	1	1.7	-3.6	2.8	- 5.8	10

Uit tabel 1 blijkt dat  $(y_2 - y_1)_{mn}$  in het geval van de semi-actieve vering te klein is. Door aanpassing van weegfactor  $q_2$  kan dit worden veranderd. In tabel 2 staan de resultaten van de verschillende simulaties.

**tabel 2:** Resultaten van de stapresponsie van het semi-actieve systeem met preview ( $T_p = 1/8s$ ) voor verschillende waarden van  $q_2$ . De staphoogte is 7.1 cm.

$q_1$	$q_2$	$q_3$	$r$	$(y_1 - y_0)_{mp}$ [cm]	$(y_1 - y_0)_{mn}$ [cm]	$(y_2 - y_1)_{mp}$ [cm]	$(y_2 - y_1)_{mn}$ [cm]	$ \ddot{y}_2 _m$ [m/s <sup>2</sup> ]
1e13	1e12	1e9	1	5.3	-7.1	1.5	-12.0	8
1e13	1e13	1e9	1	4.4	-7.1	1.2	-10.5	11
1e13	1e14	1e9	1	2.2	-7.1	2.3	- 7.5	22

In de volgende tabel staan de resultaten die voortkomen uit de verandering van de weegfactor  $r$ . Als deze  $r$  groter gekozen wordt, wordt de demperkracht zwaarder gewogen hetgeen een verlaging van de versnelling  $\ddot{y}_2$  betekent, maar een toename van  $(y_2 - y_1)_{mn}$ . Natuurlijk kan ook  $q_3$  in plaats van  $r$  worden veranderd. Dit geeft echter hetzelfde resultaat.

**tabel 3:** Resultaten van de stapresponsie van het semi-actieve systeem met preview ( $T_p = 1/8s$ ) voor verschillende waarden van  $r$ . De staphoogte is 7.1 cm.

$q_1$	$q_2$	$q_3$	$r$	$(y_1-y_0)_{mp}$ [cm]	$(y_1-y_0)_{mn}$ [cm]	$(y_2-y_1)_{mp}$ [cm]	$(y_2-y_1)_{mn}$ [cm]	$ \ddot{y}_2 _m$ [m/s <sup>2</sup> ]
1e13	1e13	1e8	1	2.5	-7.1	1.6	-8.1	20.5
1e13	1e13	1e8	2	2.9	-7.1	1.6	-8.6	18.5
1e13	1e13	1e8	3	3.2	-7.1	1.6	-9.0	17.5

In de bovenstaande gevallen is de veerconstante van de veer die naast de demper geplaatst is gelijk aan  $1.1e5$  [N/m]. Wat de invloed van deze veer op het dynamisch gedrag van het model is staat in tabel 4 weergegeven.

**tabel 4:** Resultaten van de stapresponsie van het semi-actieve systeem met preview ( $T_p = 1/8s$ ) voor verschillende veerconstanten  $k_d$ . De weegfactoren zijn  $q_1 = 1e13$ ,  $q_2 = 1e13$ ,  $q_3 = 1e8$  en  $r=3$ . De staphoogte is 7.1 cm.

$k_d$ [N/m]	$(y_1-y_0)_{mp}$ [cm]	$(y_1-y_0)_{mn}$ [cm]	$(y_2-y_1)_{mp}$ [cm]	$(y_2-y_1)_{mn}$ [cm]	$ \ddot{y}_2 _m$ [m/s <sup>2</sup> ]
4.4e5	3.2	-7.1	1.8	-9.0	17.5
2.2e5	3.2	-7.1	1.7	-9.0	17.5
1.1e5	3.2	-7.1	1.7	-9.0	17.5
0.55e5	3.2	-7.1	1.6	-9.0	17.5

In de figuren 1 t/m 4 (appendix B) zijn de resultaten van de simulaties weergegeven. Aan de hand van deze figuren en de bovenstaande tabellen kunnen de 'optimale' weegfactoren en veerconstante worden bepaald. Optimaal wil in dit geval zeggen dat  $|\ddot{y}_2|_m$  zo klein mogelijk moet zijn, maar dat  $(y_2-y_1)_{mn}$  niet kleiner mag zijn dan -9.0 [cm]. De simulatieresultaten met deze weegfactoren en veerconstante zijn weergegeven in tabel 5 en fig 5. Ook staan hierin de resultaten van de simulaties met het actieve en passieve veersysteem. In figuur 5e is nog de optimale (gewenste) demperkracht en werkelijke demperkracht uitgezet tegen de tijd. In figuur 5f staat het verloop van de dempingscoëfficiënt tegen de tijd.



**tabel 5:** Resultaten van de stapresponsie van het passieve systeem, het actieve systeem met preview en semi-actieve systeem met preview ( $T_p = 1/8s$ ). Bij het actieve systeem is  $q_1 = 1e13$ ,  $q_2 = 1e12$ ,  $q_3 = 0$  en  $r = 1$ .  $k_d$  is  $1.1e5$  [N/m] en de staphoogte is 7.1 cm.

$q_1$	$q_2$	$q_3$	$r$	$(y_1 - y_0)_{mp}$ [cm]	$(y_1 - y_0)_{mn}$ [cm]	$(y_2 - y_1)_{mp}$ [cm]	$(y_2 - y_1)_{mn}$ [cm]	$ \ddot{y}_2 _m$ [m/s <sup>2</sup> ]
	passief			3.1	-7.1	3.0	-9.0	18.8
	actief			1.7	-3.6	2.8	-5.8	10.0
1e13	1e13	1e8	3	3.2	-7.1	1.6	-9.0	17.5

In figuur 6 (appendix B) is de stapresponsie van semi-actieve vering met preview vergeleken met de responsie zonder preview. De staphoogte is 7.1 cm.

#### 4.4 Verklaring van de resultaten.

Uit tabel 1 t/m 5 en figuur 1 t/m 6 kan het volgende worden geconcludeerd:

- a) Het gedrag van de semi-actieve vering met preview is een stuk slechter dan het gedrag van de actieve vering met preview. Dit komt doordat preview bij semi-actieve vering bijna geen nut heeft zolang de stap nog niet is bereikt. De regeltheorie geeft wel een optimale demperkracht, maar deze is niet te realiseren zolang het snelheidsverschil tussen de as en het chassis nul is. Pas als de stap is bereikt kan de gewenste demperkracht worden gerealiseerd en dit is eigenlijk te laat. Het sterke punt van de actieve vering is dat voordat de stap bereikt wordt de gewenste kracht al geleverd kan worden, zodat de klap van de stap minder hard aankomt. Zoals al gezegd kan semi-actieve vering dit niet, omdat een demper géén energie kan leveren.

Uit het voorgaande mag voorzichtig geconcludeerd worden dat preview bij semi-actieve vering bij deze gebruikte regelstrategie weinig tot geen nut heeft. In fig. 6 a t/m f is dan ook het resultaat met en zonder preview uitgezet. Hieruit blijkt dat de invloed van preview inderdaad zeer klein is.

- b) Het gedrag van de semi-actieve vering is bijna gelijk aan dat van de passieve vering. Het enige dat met de semi-actieve vering kan worden bereikt is een kleine reductie van de maximale versnelling van de tweede massa ( $\ddot{y}_2$ ). De afname van de maximale versnelling is ongeveer 7%. Ook de andere pieken van de versnelling zijn minder hoog, hetgeen als een geringe verbetering voor het comfort mag worden beschouwd. Verder geeft de semi-actieve vering weinig verbetering t.o.v. de passieve vering. Wel kan nog opgemerkt worden dat  $y_{2\max}$  bij de semi-actieve vering kleiner is dan bij de passieve vering, maar wat hiervan de invloed op het comfort is, is niet bekend.
- c) Uit fig 1. blijkt dat de versnelling  $\ddot{y}_2$  wel verder kan worden teruggebracht, maar dat dit altijd ten koste gaat van  $(y_2 - y_1)$ . Aangezien  $(y_2 - y_1)_{\min} = -9$  cm (voorgeschreven door DAF-Trucks) kan  $q_3$  (weging van de versnelling) niet groter gekozen worden.
- d) Uit fig 4. blijkt dat de grootte van de veerconstante van de veer naast de demper heel weinig invloed heeft op het dynamisch gedrag. Het enige dat opvalt is dat bij een grotere veerconstante  $y_2$  en  $(y_2 - y_1)$  sneller naar de eindwaarde gaan. De veerconstante kan niet te groot gemaakt worden, want dan wordt de versnelling van de tweede massa ( $\ddot{y}_2$ ) te groot.
- e) Fig 5e. laat zien dat de invloed van de minimale en maximale dempingscoëfficiënt niet zo groot is. Als de stap bereikt is volgt de demperkracht de met de optimale regeltheorie bepaalde demperkracht goed. Pas op  $t=0.4$ s treden er grotere verschillen op als gevolg van te grote gewenste dempingscoëfficiënten. Dit is terug te vinden in fig 5f. Ook is in fig 5e. duidelijk te zien dat als de stap nog niet is bereikt de werkelijke demperkracht nul is.

#### 4.5 Resultaten van de simulatie met de spoorwegovergang als ingang.

Als eerste moet worden opgemerkt dat de helft van het spoorwegovergangssignaal (dus tot  $t=7.5$ s) als ingangssignaal is genomen vanwege het beperkte geheugen van de

gebruikte computer. Dit deel van het signaal is voldoende om het gedrag van de semi-actieve vering met preview te beoordelen en te vergelijken met het gedrag van de actieve en passieve vering. De maximale en minimale waarde van de dempingscoëfficiënt worden ook nu gelijk gekozen aan resp. 100000 [Ns/m] en 15000 [Ns/m]. Voor de weegfactoren worden de meest gunstige genomen zoals die volgen uit de stapresponsies. Dit houdt voor het semi-actieve veersysteem in dat  $q_1 = q_2 = 1e13$ ,  $q_3 = 1e8$  en  $r = 1$ .  $k_d = 1.1e5$  [N/m]. In de figuren 7a t/m c (appendix B) staan de resultaten van de simulaties met het passieve, semi-actieve en actieve veersysteem weergegeven. De laatste twee systemen gebruiken preview. In figuur 8 is de responsie van het spoorwegsignaal voor de semi-actieve vering met preview vergeleken met de responsie verkregen zonder preview.

#### 4.6 Verklaring van de resultaten.

- a) Ook nu is het resultaat van de semi-actieve vering minder goed dan dat van de actieve vering, zie fig. 7. Waarschijnlijk is ook nu de gewenste demperkracht de oorzaak van het mindere gedrag. Uit fig. 7d volgt dat de gewenste demperkracht vaak veel groter is dan de demperkracht die geleverd kan worden. Dit heeft alles te maken met de maximale dempingscoëfficiënt, zie fig. 7e. Duidelijk is te zien dat de grootte van de dempingscoëfficiënt inderdaad de oorzaak is van het niet kunnen volgen van de gewenste demperkracht.
- b) Het semi-actieve systeem is niet veel beter dan het passieve systeem. Een verbetering van  $(y_2 - y_1)_{mn}$  is nog wel haalbaar, maar de versnelling van het chassis is daarentegen zelfs iets slechter.
- c) Het verschil tussen het wel en niet gebruiken van preview is groter dan bij de stapfunctie.  $(y_2 - y_1)_{mn}$  is met preview beter dan  $(y_2 - y_1)_{mn}$  zonder preview,  $(y_1 - y_0)$  daarentegen is zonder preview iets beter. De versnelling van de  $m_2$  ( $\ddot{y}_2$ ) is bij de semi-actieve vering met preview iets beter. Toch volgt uit deze figuren dat de invloed van preview zeer gering is en dit heeft te maken met het niet kunnen volgen van de gewenste demperkracht.

## 5. Conclusies

Uit dit onderzoek kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- a) De semi-actieve vering met preview geeft slechts een geringe verbetering ten opzichte van de passieve vering in het geval van het stap signaal als ingang. Een reductie van ongeveer 7% in  $|\ddot{y}_2|_{\max}$  is mogelijk. Hierbij is de maximale veerindrukking gelijk aan 9 cm, dus  $(y_2 - y_1)_{\min} = -9$  cm (dit is gelijk aan de waarde gevonden bij het passieve systeem).  
Bij de spoorwegovergang is helemaal niets te merken van een verbetering.  $(y_2 - y_1)_{\min}$  is nog beter dan bij het passieve systeem, maar de versnelling  $\ddot{y}_2$  is daarentegen zelfs iets slechter.
- b) Zowel bij de stap als bij de spoorwegovergang heeft preview bij semi-actieve vering bijna geen invloed op het dynamisch gedrag van het model.
- c) Uit het verloop van de dempingscoëfficiënt bij de stap en spoorwegovergang volgt dat de dempingscoëfficiënt vaak de maximale of minimale waarde heeft. Een On-Off demper zal in dit geval bijna net zo goed voldoen als de gebruikte continue variabele demper. Het voordeel van een On-Off demper is dat de dempingscoëfficiënt veel minder hoeft te worden aangepast en daardoor minder energie verbruikt. Een ander voordeel is dat een On-Off demper goedkoper is.
- d) Het grote nadeel van semi-actieve vering ten opzichte van actieve vering is het niet kunnen leveren van energie. Hierdoor kan de gewenste kracht vaak niet gerealiseerd worden. Dit heeft weer tot gevolg dat preview weinig invloed heeft.
- e) De keuze van de weegfactoren van het regelcriterium is van grote invloed op het dynamisch gedrag van het model. Een verkeerde keuze geeft slechte resultaten.
- f) De grootte van de veer die naast de demper is geplaatst heeft weinig invloed op het dynamisch gedrag.
- g) De gebruikte regelstrategie geeft niet het gewenste resultaat in het geval van semi-actieve vering. Het is goed mogelijk dat een andere regelstrategie een beter resultaat geeft.

## 6. Aanbevelingen

- a) Simulaties uitvoeren met een andere regelstrategie in de hoop dat de resultaten beter worden.
- b) Een aantal simulaties uitvoeren met een On-Off demper en nagaan of de resultaten overeenkomen met die van een continu variabele demper.
- c) Een ander model opstellen voor een truck. Hierbij wordt gedacht aan een model met meer graden van vrijheid. Met dit model nagaan of semi-actieve vering een verbetering kan geven.
- d) In het geval van preview wordt  $r(t+T_p)$  steeds gelijk gesteld aan nul. De vraag is of dit van grote invloed is op het resultaat. Simulaties met semi-actieve vering met preview zonder  $r(t+T_p)$  nul te stellen zijn misschien zinvol.

## Literatuuropgave

[1] **Huisman, R.**

A literature research into active and semi-active vehicle suspensions with and without preview (second version).

Raport WFW 90.039 Technische Universiteit Eindhoven, 1990.

[2] **Huisman, R.**

An investigation into the theoretical feasibility of active suspensions with preview.

Raport WFW 90.042 Technische Universiteit Eindhoven, 1990.

[3] **Alanoly, J. and Sankar, S.**

A new concept in semi-active vibration Isolation.

Trans. ASME, Journal of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design, Vol. 109, June 1987, pp 242-247.

[4] **Charalambous, C., Brunning, A. and Crawford, I.L.**

The design and advanced development of a semi-active suspension.

IMechE 1989, C382/058, pp 539-546.

[5] **Hrovat, D., Margolis, D.L. and Hubbard, M.**

An approach toward the optimal semi-active suspension.

Trans. ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 110, Sept. 1988, pp 288-296.

[6] **Sharp, R.S. and Hassan, S.A.**

The relative performance capabilities of passive, active and semi-active car suspension systems.

Proc. Inst. Mech. Engrs. (1986), Vol 200, No D3, pp 219-228.

- [7] **Crolla, D.A., Pitcher, R.H. and Lines, J.A.**  
Active suspension control for an off-road vehicle.  
Proc. Inst. Engrs. Vol 201 No D1, pp 1-10.

## Appendix A. Het gebruikte model

De bewegingsvergelijkingen van het quarter car model (zie fig. 3.1) zijn:

$$m_2 \ddot{y}_2 = F_d + F_v = F_d + k_d(y_2 - y_1) \quad (\text{A.1})$$

$$m_1 \ddot{y}_1 = F_1 - F_d - F_v = -k_1(y_1 - y_0) - F_d + k_d(y_2 - y_1) \quad (\text{A.2})$$

Deze vergelijkingen kunnen in de toestandsbeschrijving gezet worden gebruikmakend van de toestandskolom  $x^T = [(y_1 - y_0), (y_2 - y_1), \dot{y}_1, \dot{y}_2]$ , de ingangskolom  $u = [F_d]$  en een verstoringskolom  $w = [\dot{y}_0]$ . De uitgangskolom ziet er als volgt uit,  $y^T = [(y_1 - y_0), (y_2 - y_1), \ddot{y}_2]$ . De toestandsvergelijking en de uitgangsvergelijking zien er resp. als volgt uit:

$$\dot{x} = Ax + Bu + Ew, \quad x(t_0) = x_0 \quad (\text{A.3})$$

$$y = Cx + Du \quad (\text{A.4})$$

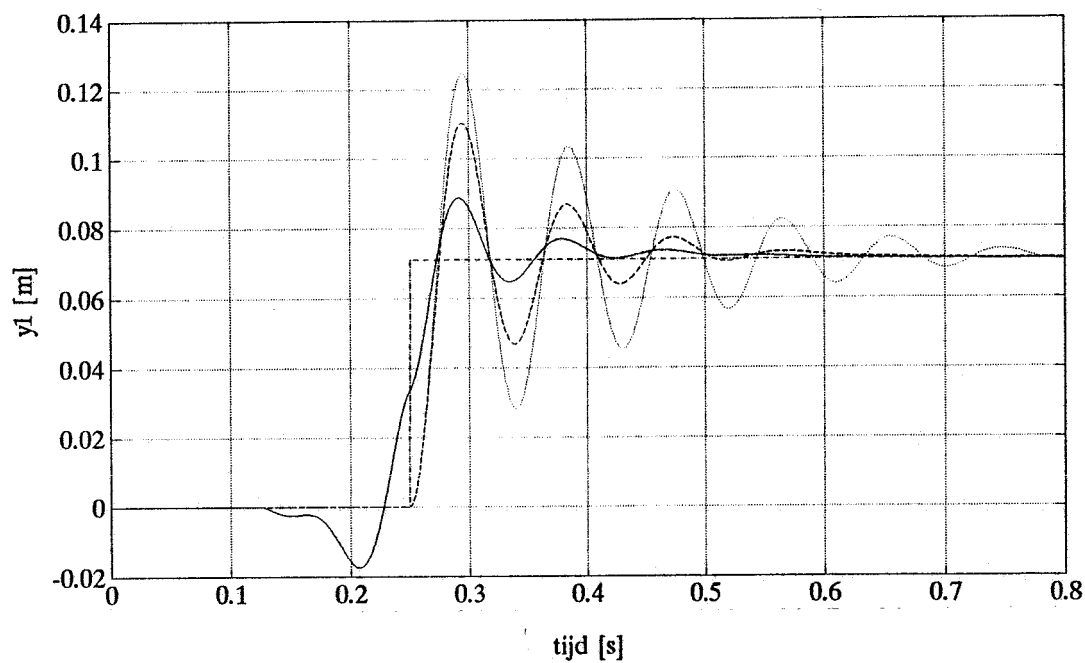
met

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \\ \frac{-k_1}{m_1} & \frac{k_d}{m_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-k_d}{m_2} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{-1}{m_1} \\ \frac{1}{m_2} \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

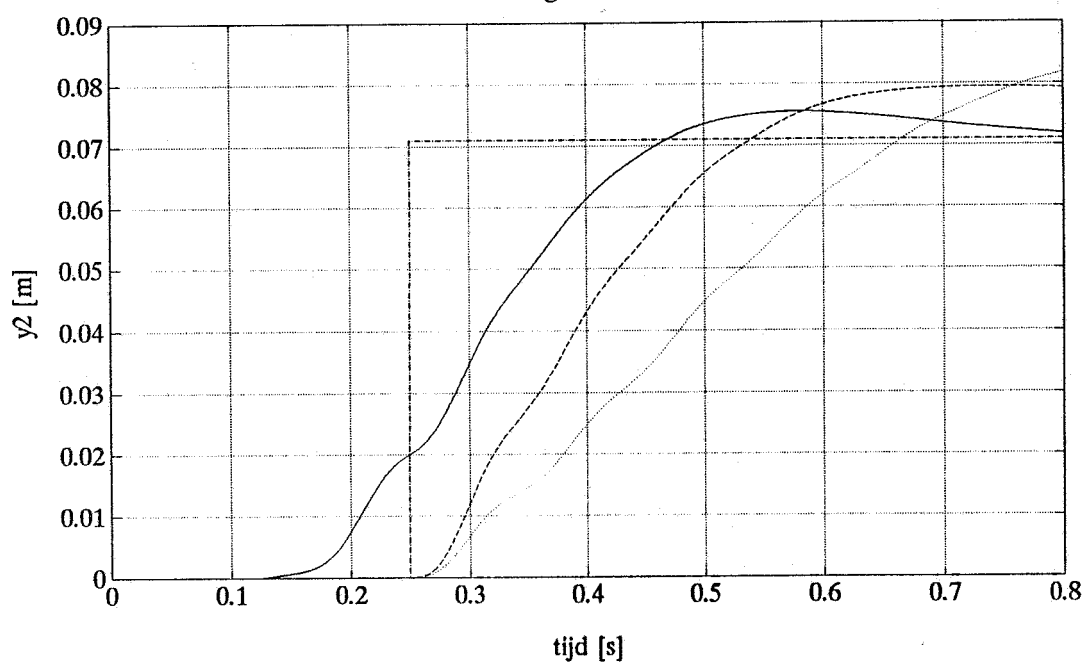
$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-k_d}{m_2} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{m_2} \end{bmatrix}$$



## Appendix B. Figuren behorend bij hoofdstuk 4



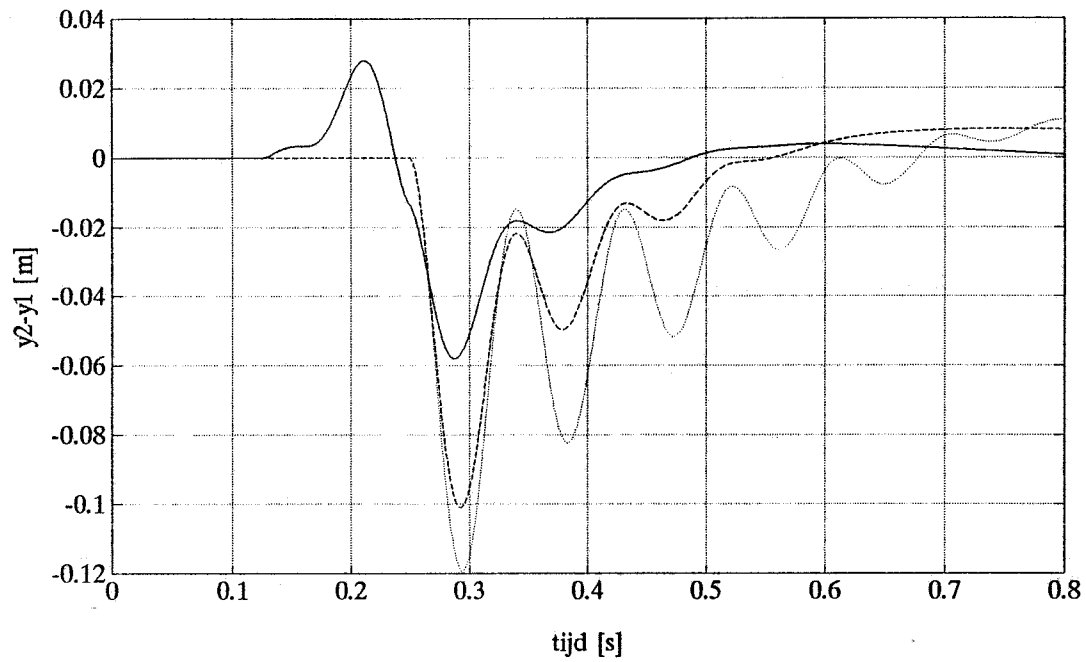
figuur 1a.



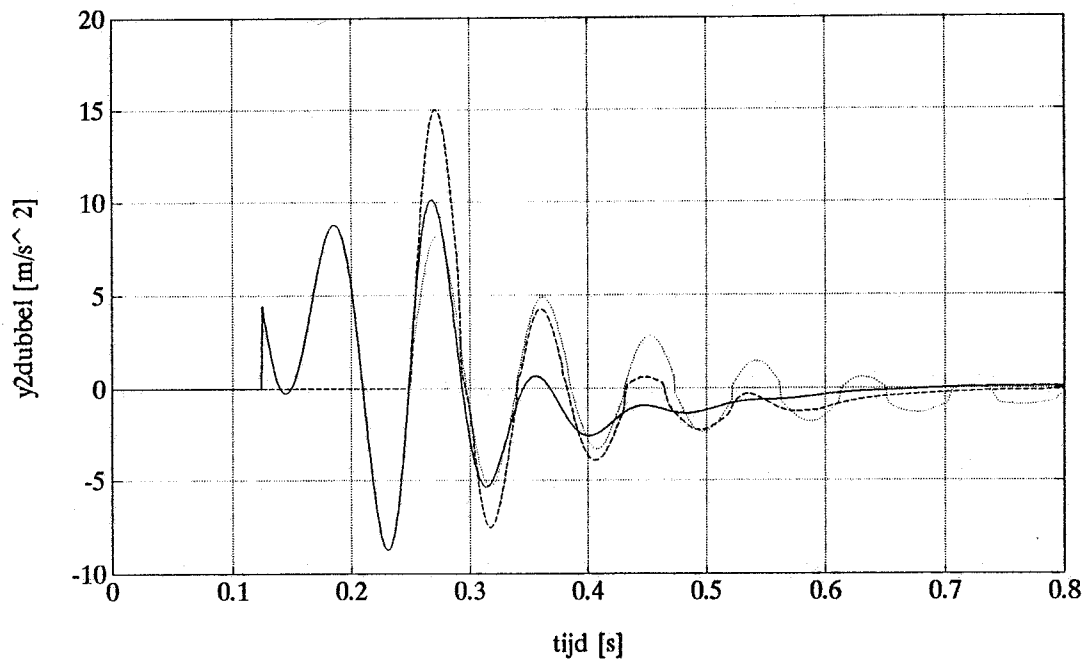
figuur 1b.

Figuur 1a en 1b. De responsies  $y_2$  en  $y_1$  van het actieve veersysteem met preview en van het semi-actieve systeem met preview met verschillende waarden voor  $q_3$ . Het ingangssignaal is een stap met een hoogte van 7.1 cm.

- actief,  $q_1=1e13$ ,  $q_2=1e12$ ,  $q_3=0$ ,  $r=1$
- - - - semi-actief,  $q_1=1e13$ ,  $q_2=1e12$ ,  $q_3=1e8$ ,  $r=1$
- ..... semi-actief,  $q_1=1e13$ ,  $q_2=1e12$ ,  $q_3=1e9$ ,  $r=1$



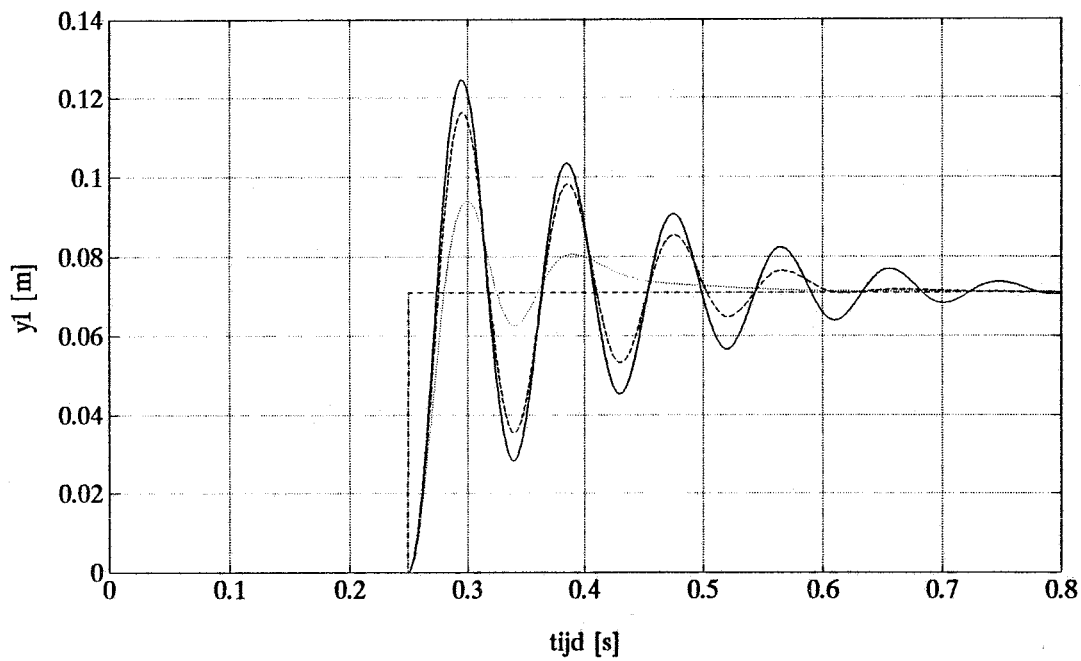
figuur 1c.



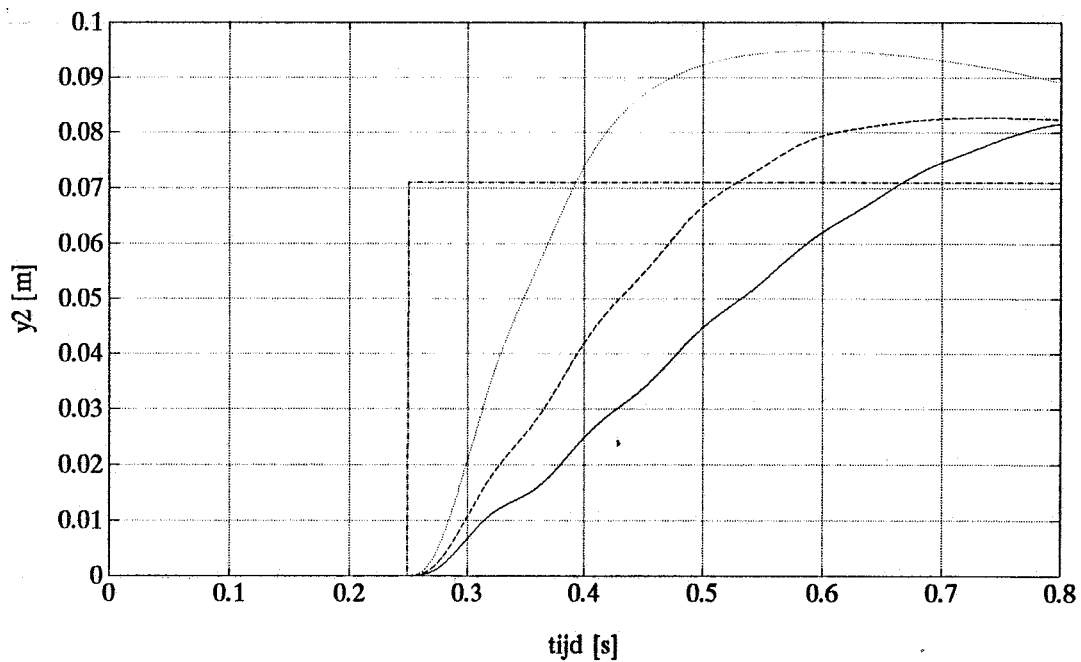
figuur 1d.

**Figuur 1c en 1d.** De  $(y_2 - y_1)$  en  $\ddot{y}_2$  responsie van het actieve veersysteem met preview en van het semi-actieve systeem met preview met verschillende waarden voor  $q_3$ . Het ingangssignaal is een stap met een hoogte van 7.1 cm.

----- actief,  $q_1 = 1e13, q_2 = 1e12, q_3 = 0, r = 1$   
 - - - - semi-actief,  $q_1 = 1e13, q_2 = 1e12, q_3 = 1e8, r = 1$   
 ..... semi-actief,  $q_1 = 1e13, q_2 = 1e12, q_3 = 1e9, r = 1$



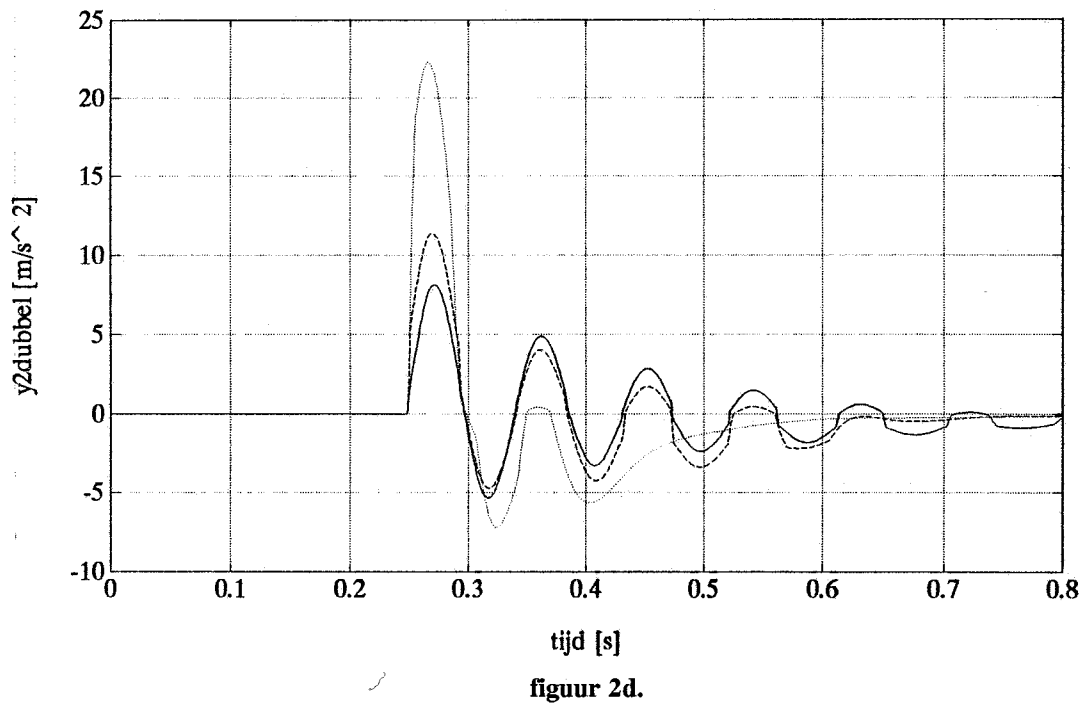
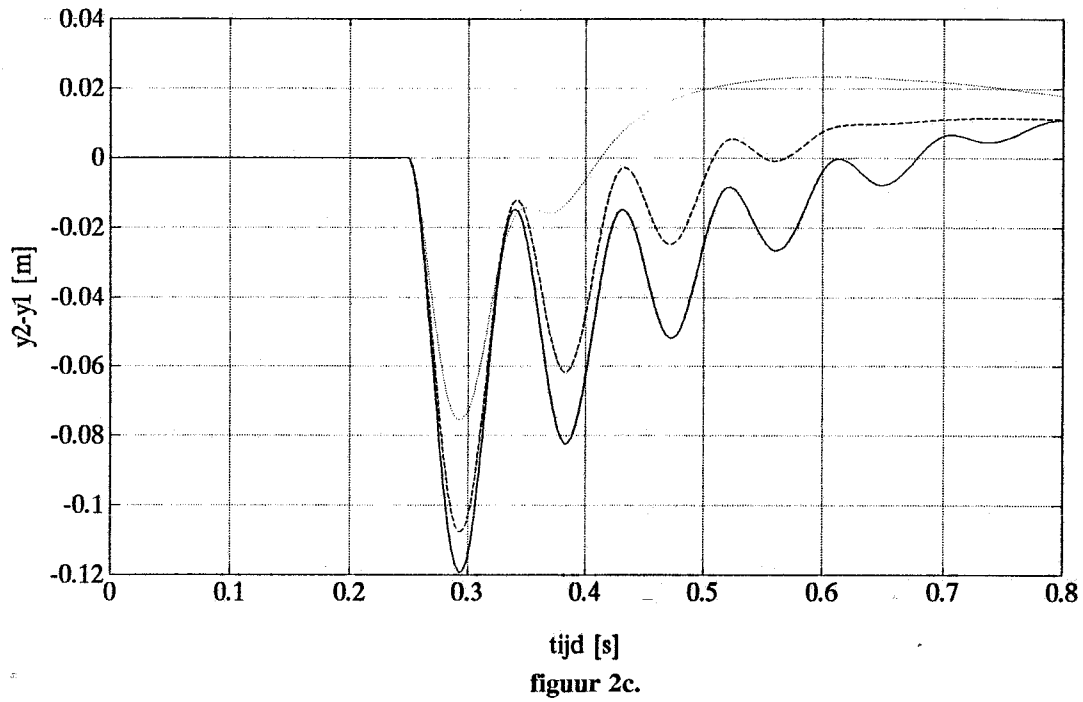
figuur 2a.



figuur 2b.

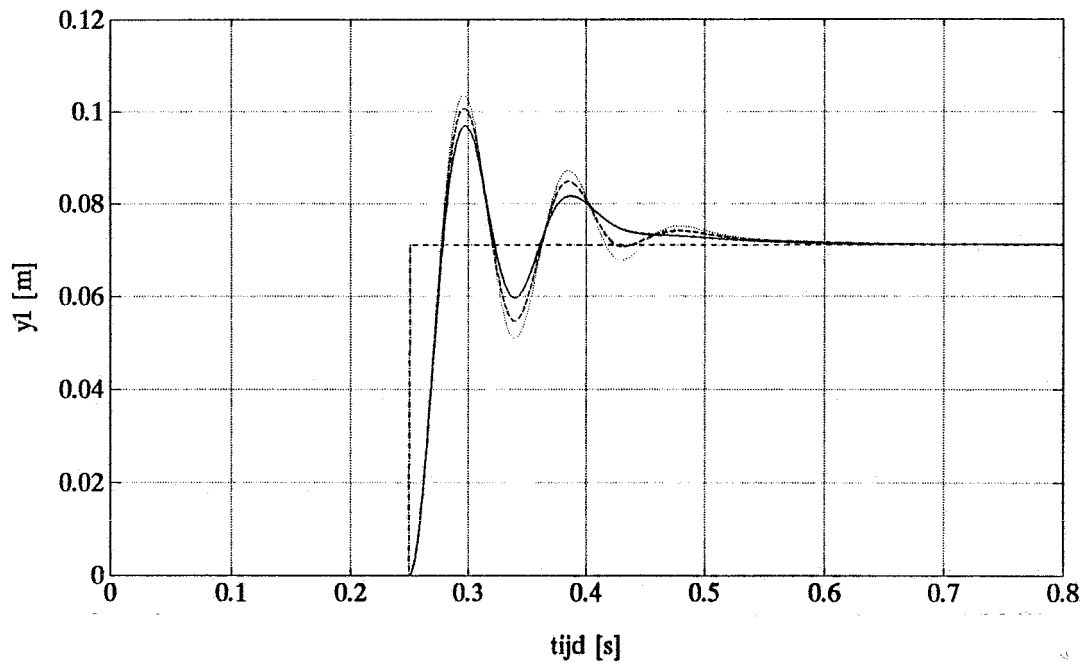
**Figuur 2a en 2b.** De responsies  $y_1$  en  $y_2$  van het semi-actieve systeem met preview met verschillende waarden voor  $q_2$ . Het ingangssignaal is een stap met een hoogte van 7.1 cm.

- $q_1=1e13, q_2=1e12, q_3=1e9, r=1$
- - - -  $q_1=1e13, q_2=1e13, q_3=1e9, r=1$
- .....  $q_1=1e13, q_2=1e14, q_3=1e9, r=1$

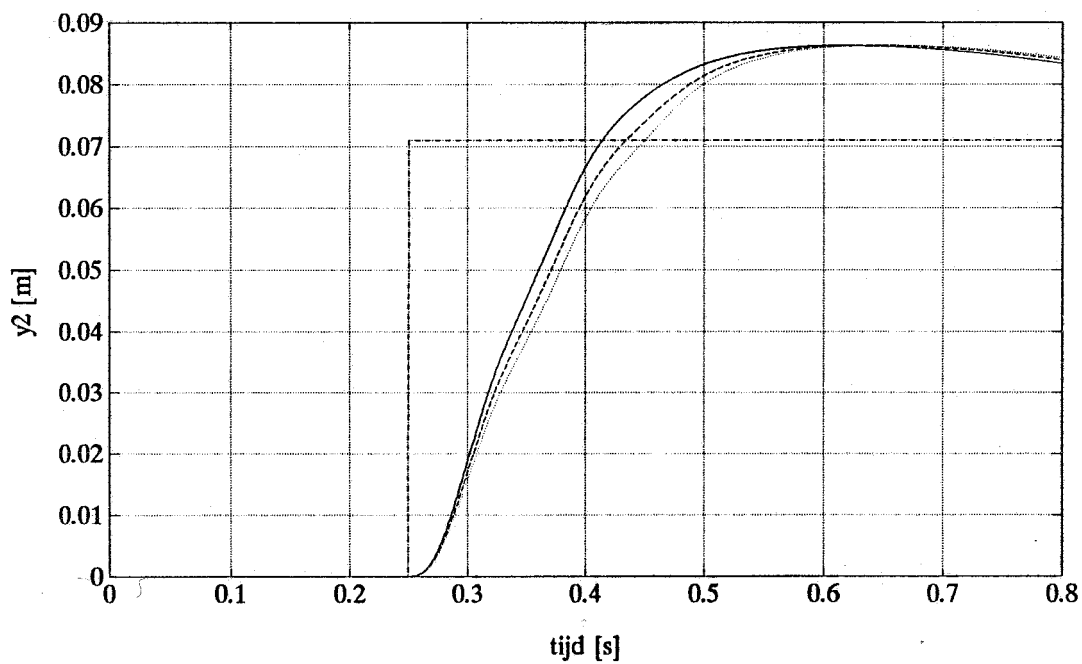


**Figuur 2c en 2d.** De  $(y_2 - y_1)$  en  $\ddot{y}_2$  responsie van het semi-actieve systeem met preview met verschillende waarden voor  $q_2$ . Het ingangssignaal is een stap met een hoogte van 7.1 cm.

- $q_1 = 1e13, q_2 = 1e12, q_3 = 1e9, r = 1$
- - - -  $q_1 = 1e13, q_2 = 1e13, q_3 = 1e9, r = 1$
- .....  $q_1 = 1e13, q_2 = 1e14, q_3 = 1e9, r = 1$



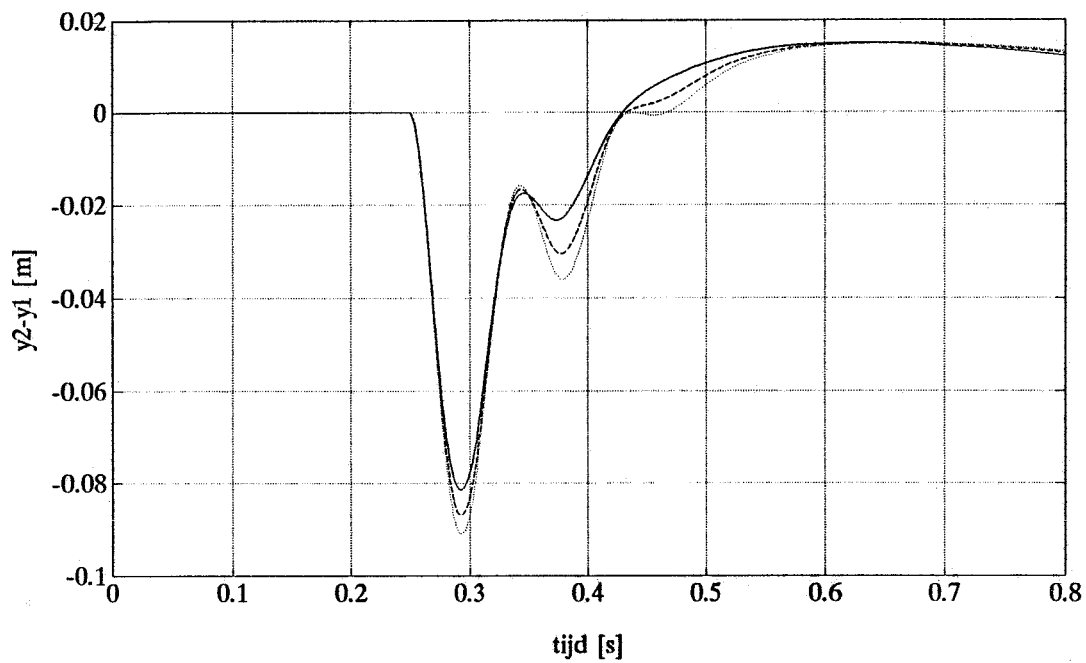
figuur 3a.



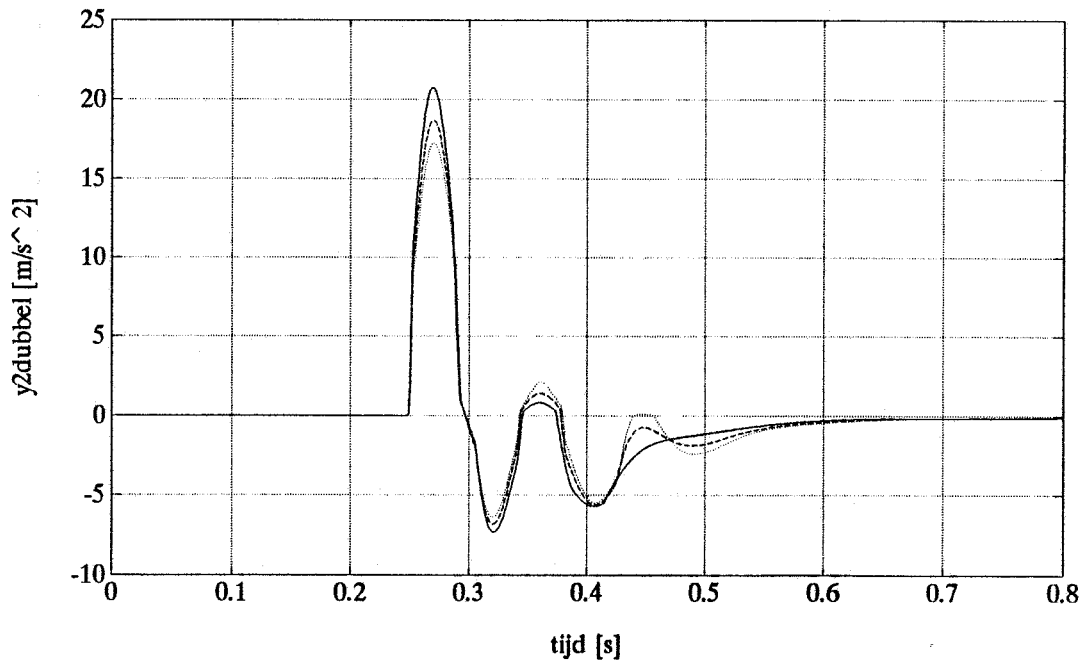
figuur 3b.

**Figuur 3a en 3b.** De responsies  $y_1$  en  $y_2$  van het semi-actieve systeem met preview met verschillende waarden voor  $r$ . Hetingangssignaal is een stap met een hoogte van 7.1 cm.

- $q_1 = 1e13, q_2 = 1e13, q_3 = 1e8, r = 1$
- - - -  $q_1 = 1e13, q_2 = 1e13, q_3 = 1e8, r = 2$
- .....  $q_1 = 1e13, q_2 = 1e13, q_3 = 1e8, r = 3$



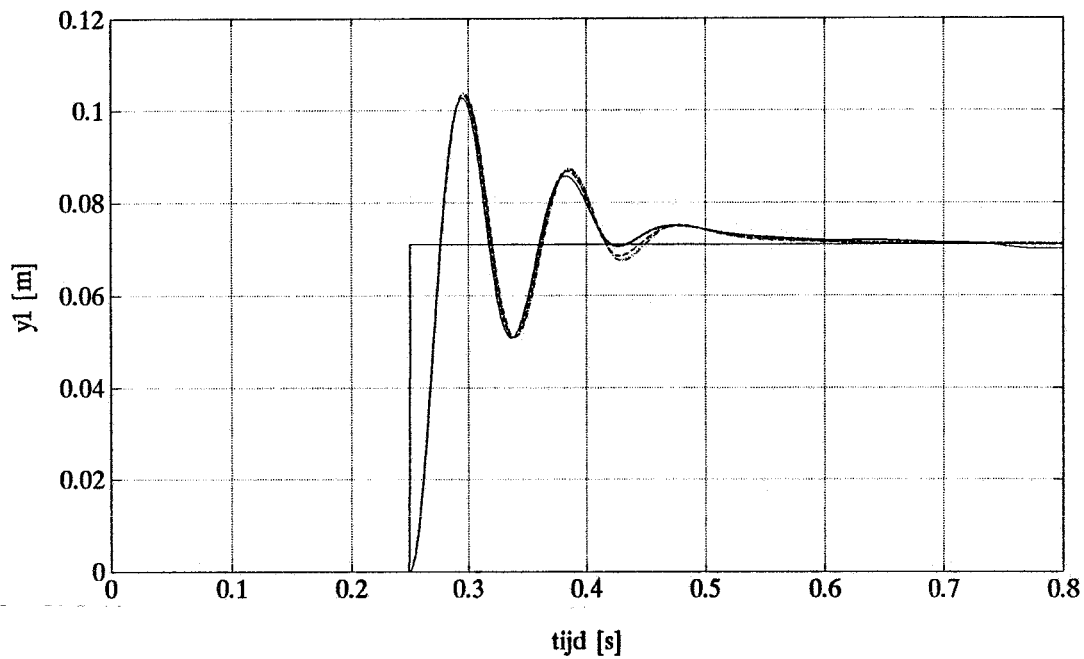
figuur 3c.



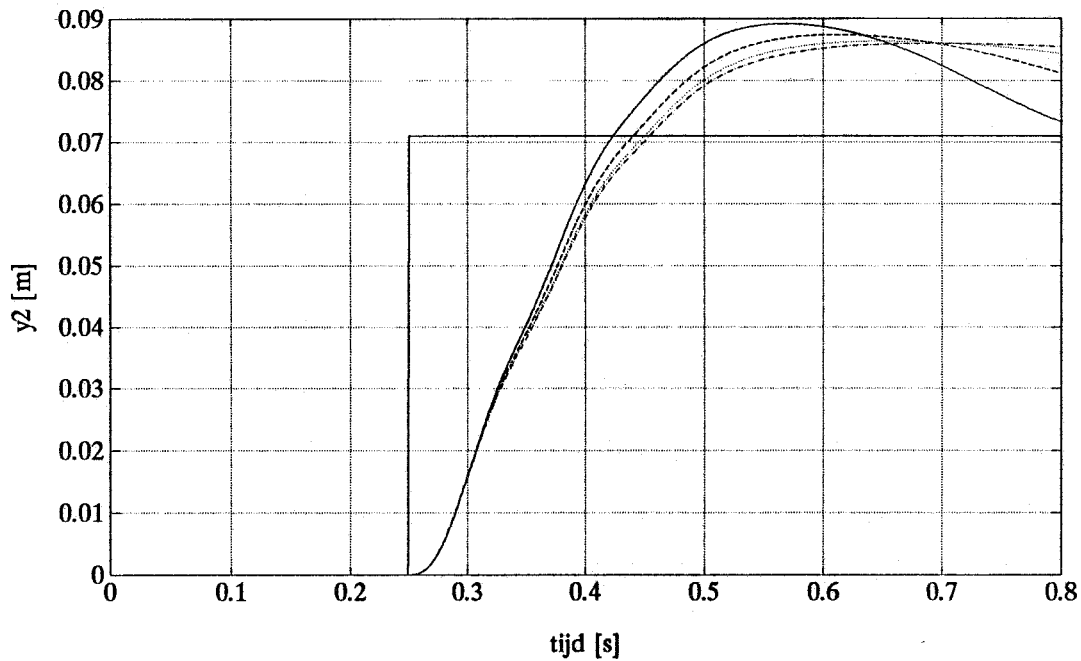
figuur 3d.

**Figuur 3c en 3d.** De  $(y_2 - y_1)$  en  $\ddot{y}_2$  responsie van het semi-actieve systeem met preview met verschillende waarden voor  $r$ . Hetingangssignaal is een stap met een hoogte van 7.1 cm.

- .....  $q_1 = 1e13, q_2 = 1e13, q_3 = 1e8, r = 1$
- - - -  $q_1 = 1e13, q_2 = 1e13, q_3 = 1e8, r = 2$
- .....  $q_1 = 1e13, q_2 = 1e13, q_3 = 1e8, r = 3$



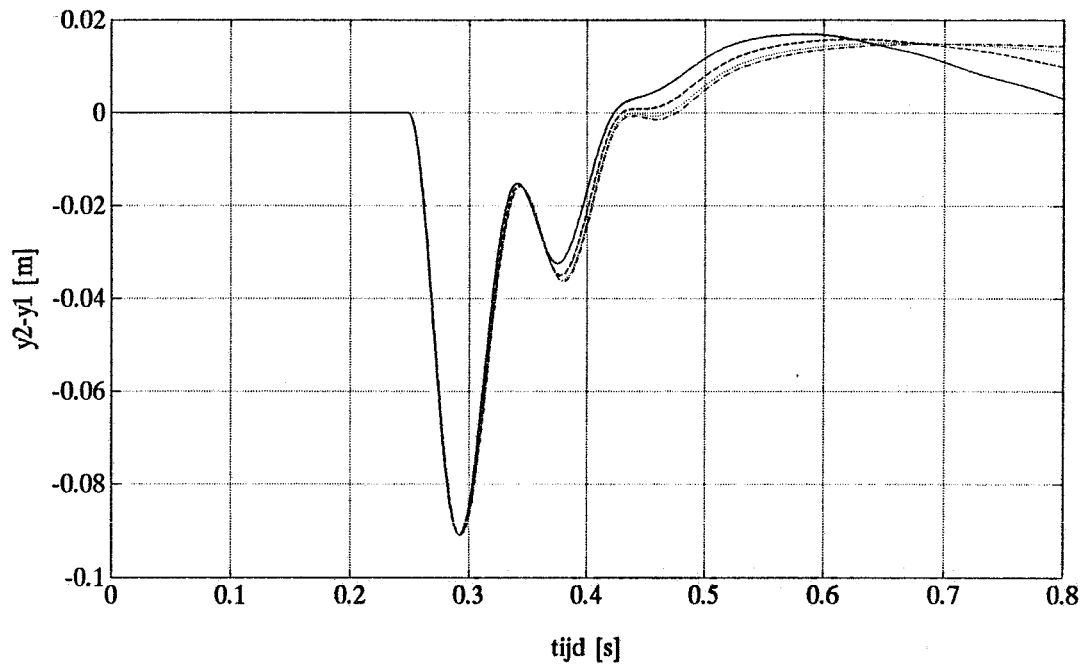
figuur 4a.



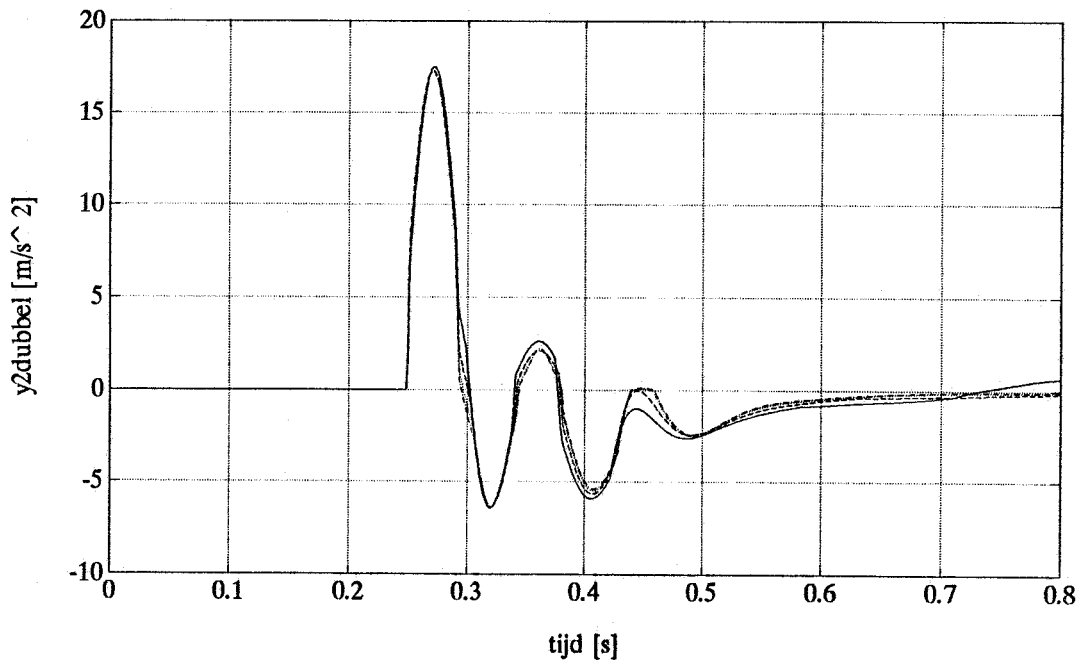
figuur 4b.

Figuur 4a en 4b. De responsies  $y_1$  en  $y_2$  van het semi-actieve systeem met preview voor verschillende veerconstanten  $k_d$ . De weegfactoren zijn  $q_1=1e13$ ,  $q_2=1e13$ ,  $q_3=1e8$  en  $r=3$ . Het ingangssignaal is een stap met een hoogte van 7.1 cm.

-----  $k_d=4.4e5$  N/m      .....  $k_d=2.2e5$  N/m  
 - - - -  $k_d=1.1e5$  N/m      -.-.-  $k_d=0.55e5$  N/m



figuur 4c.

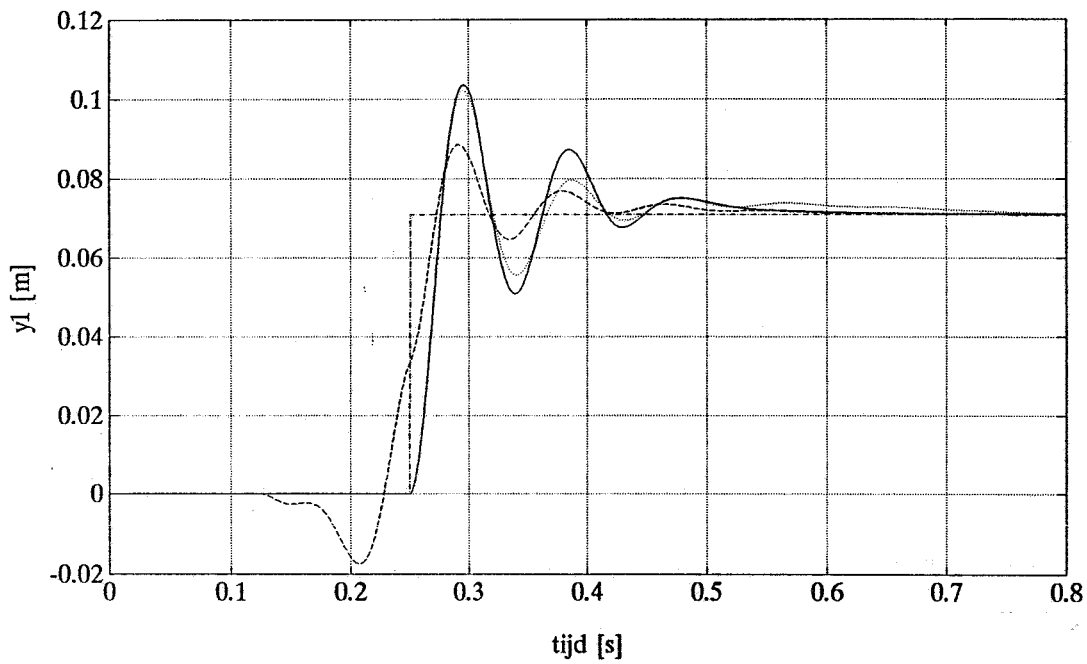


figuur 4d.

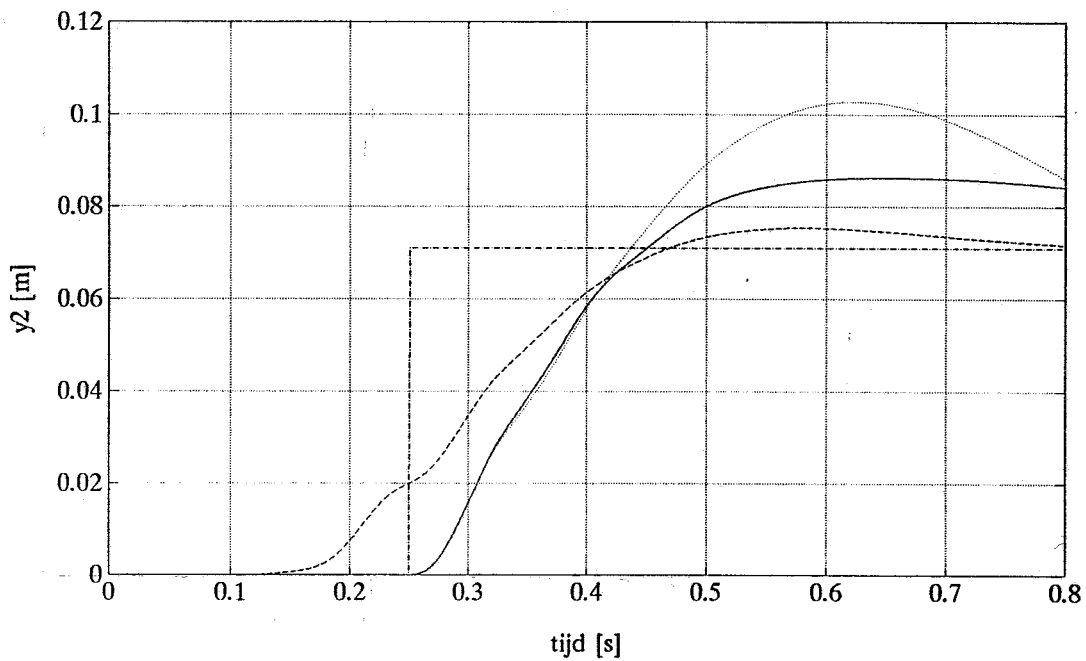
**Figuur 4c en 4d.** De  $(y_2 - y_1)$  en  $\ddot{y}_2$  responsie van het semi-actieve systeem met preview voor verschillende veerconstanten  $k_d$ . De weegfactoren zijn  $q_1 = 1e13$ ,  $q_2 = 1e13$ ,  $q_3 = 1e8$  en  $r = 3$ . Het ingangssignaal is een stap met een hoogte van 7.1 cm.

-----  $k_d = 4.4e5$  N/m      .....  $k_d = 2.2e5$  N/m  
 - - - -  $k_d = 1.1e5$  N/m      - . - . -  $k_d = 0.55e5$  N/m





figuur 5a.



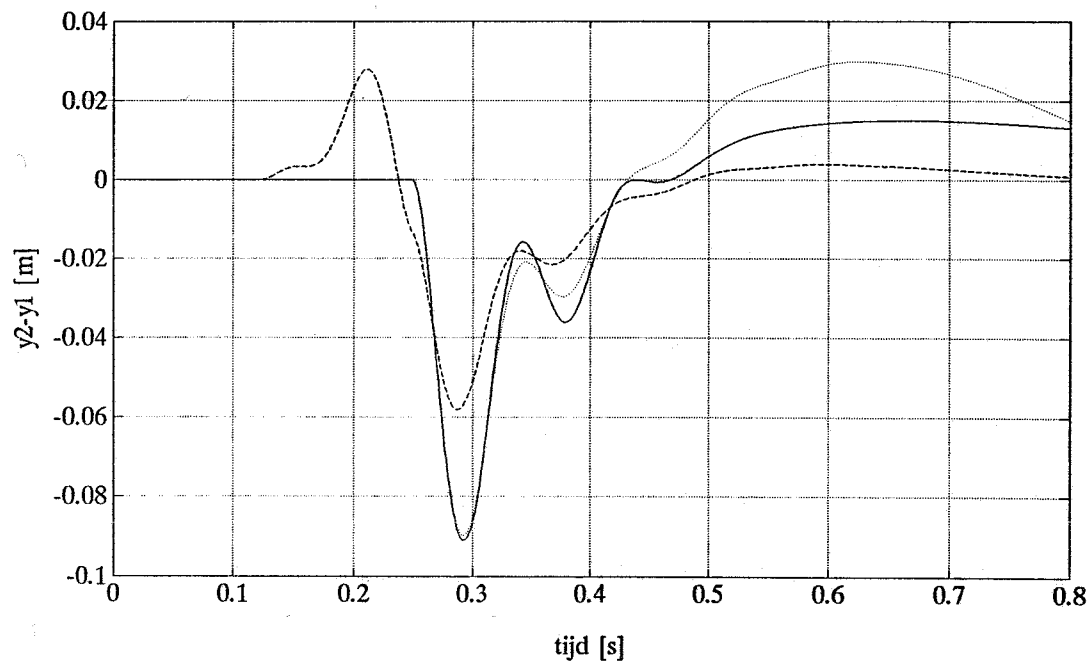
figuur 5b.

**Figuur 5a en 5b.** De responsies  $y_1$  en  $y_2$  van het passieve systeem, het actieve systeem met preview en het semi-actieve systeem met preview. Het ingangssignaal is een stap met een hoogte van 7.1 cm.

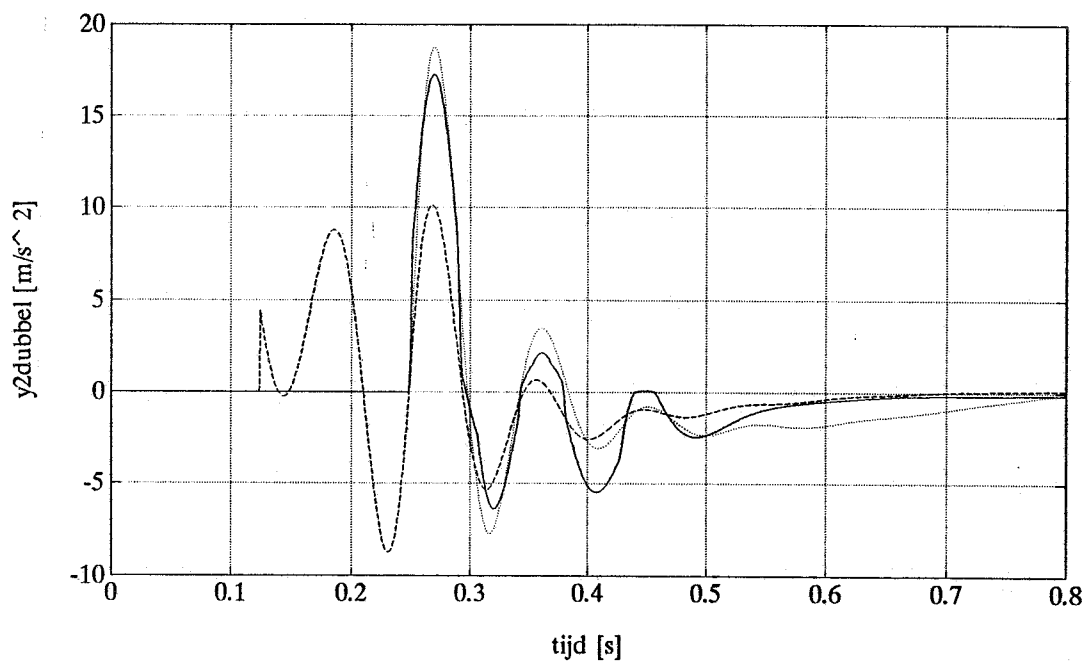
----- semi-actief,  $q_1 = q_2 = 1e13$ ,  $q_3 = 1e8$ ,  $r = 3$ ,  $k_d = 1.1e5$  N/m

..... passief

- - - - - actief,  $q_1 = 1e13$ ,  $q_2 = 1e12$ ,  $q_3 = 0$ ,  $r = 1$



figuur 5c.



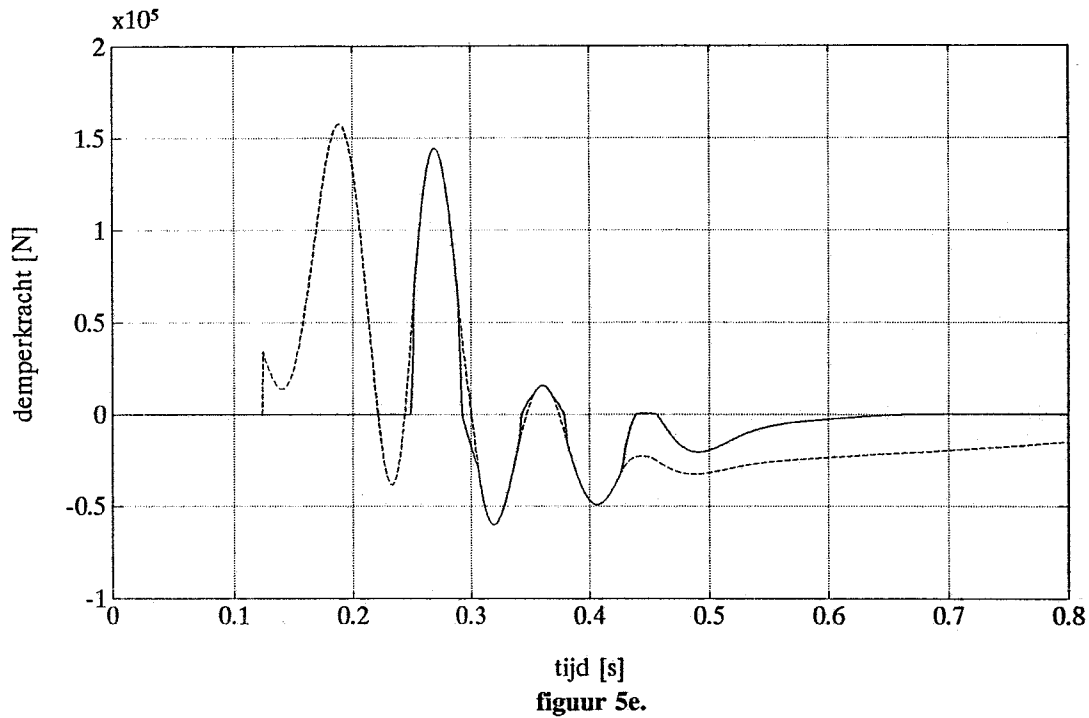
figuur 5d.

**Figuur 5c en 5d.** De  $(y_2 - y_1)$  en  $\ddot{y}_2$  responsie van het passieve systeem, het actieve systeem met preview en het semi-actieve systeem met preview. Het ingangssignaal is een stap met een hoogte van 7.1 cm.

----- semi-actief,  $q_1 = q_2 = 1e13$ ,  $q_3 = 1e8$ ,  $r = 3$ ,  $k_d = 1.1e5$  N/m

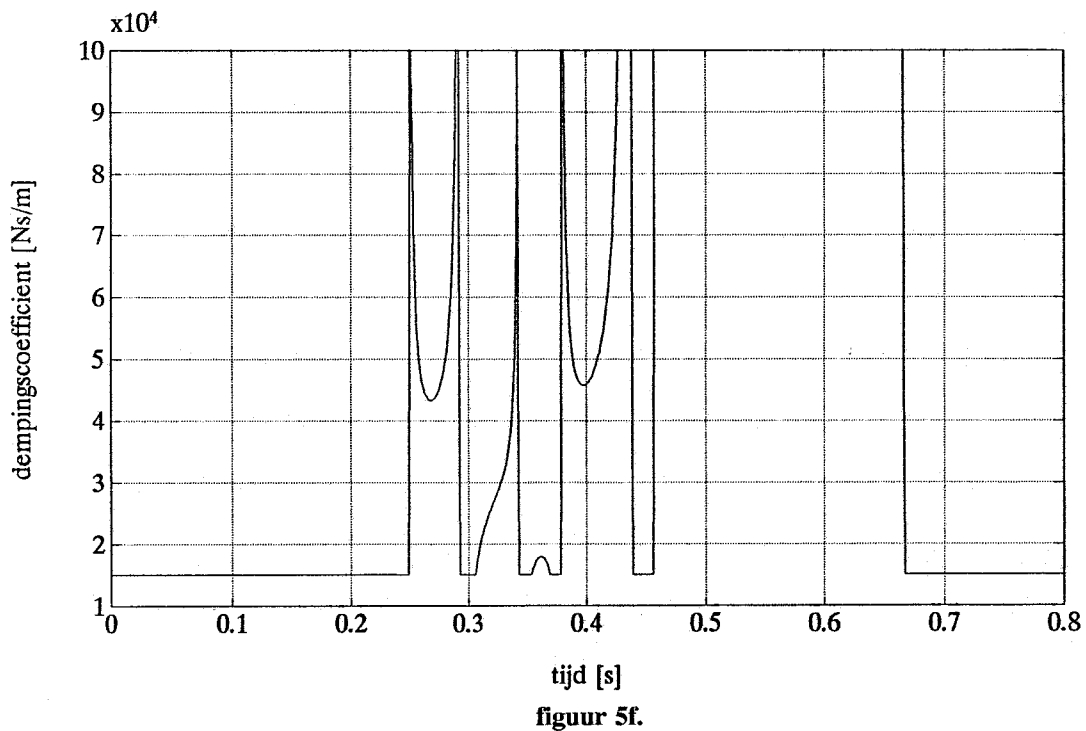
..... passief

- - - - - actief,  $q_1 = 1e13$ ,  $q_2 = 1e12$ ,  $q_3 = 0$ ,  $r = 1$

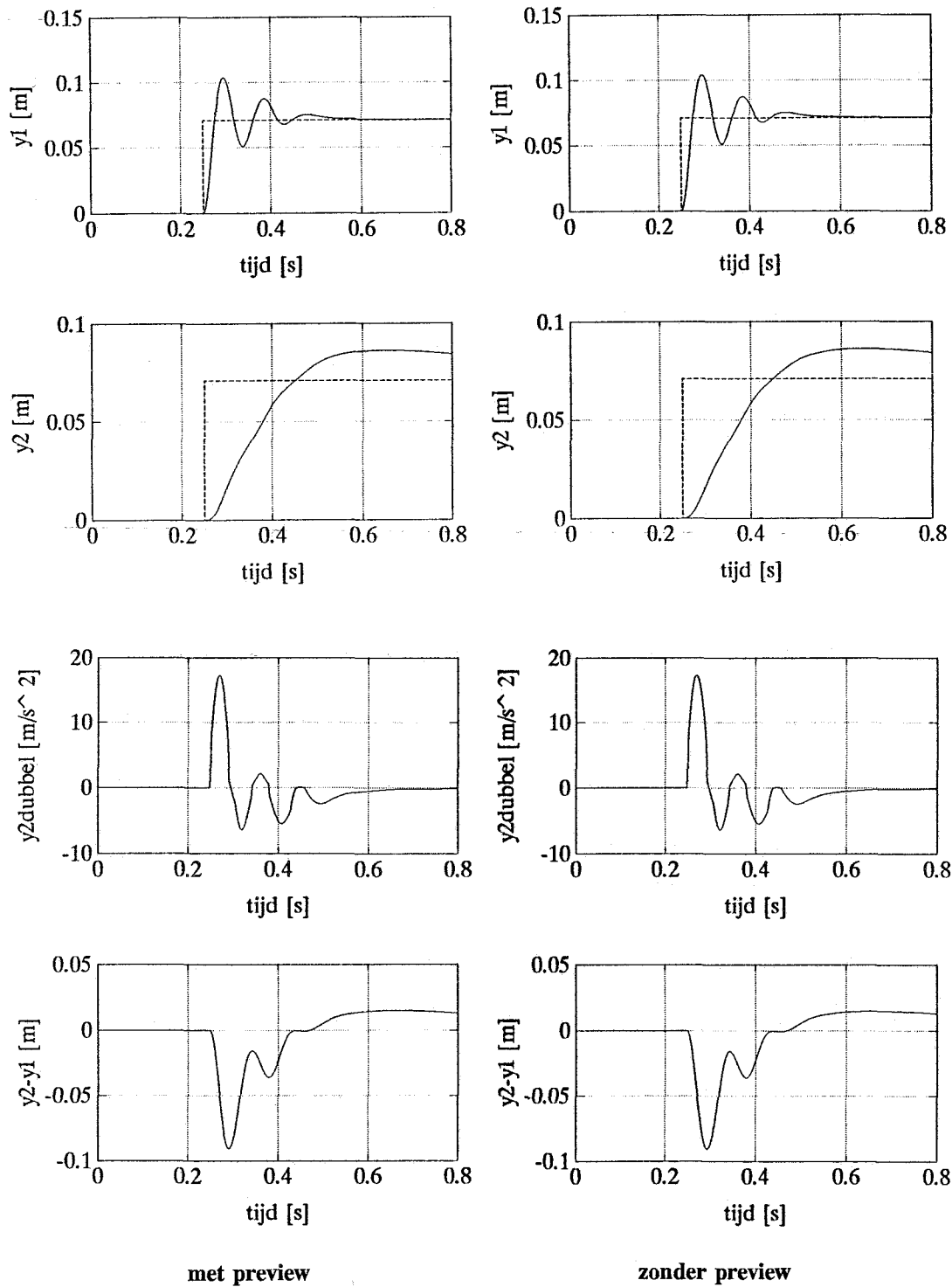


**Figuur 5e.** De gewenste en werkelijke demperkracht van het semi-actieve systeem met preview,  $q_1 = q_2 = 1e13$ ,  $q_3 = 1e8$ ,  $r = 3$ ,  $k_d = 1.1e5$  N/m. Het ingangssignaal is een stap met een hoogte van 7.1 cm.

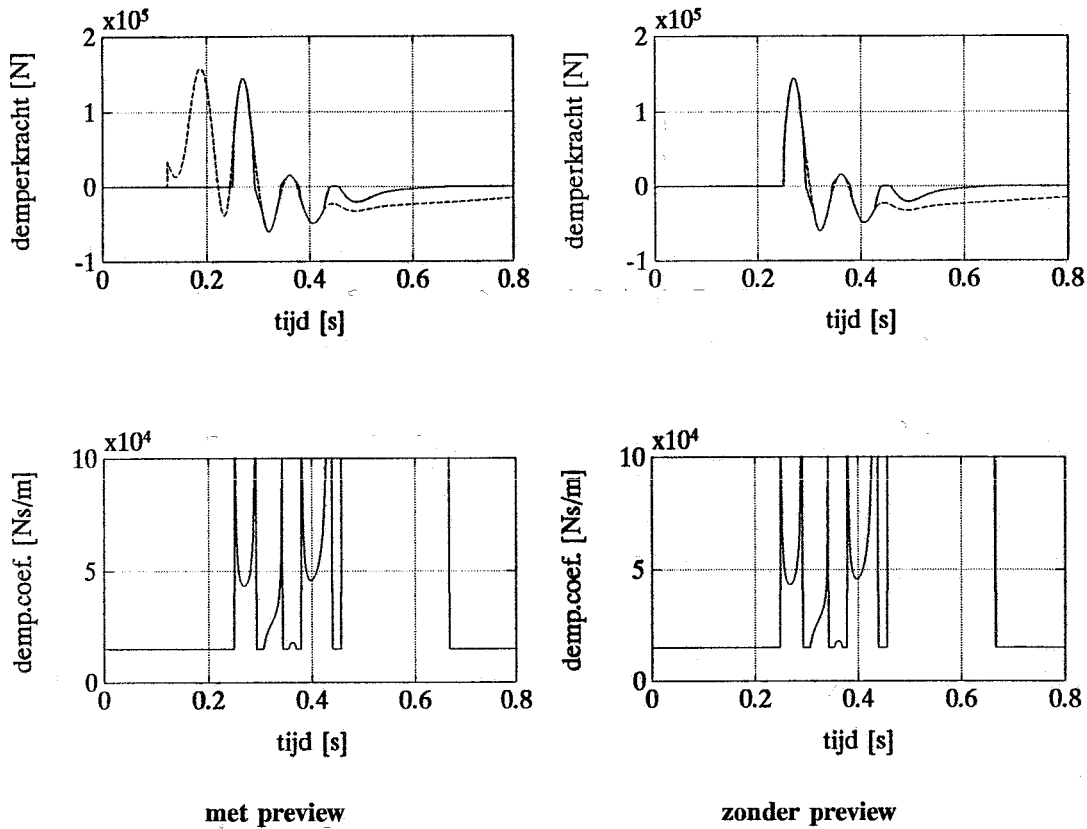
----- werkelijk      - - - - gewenst



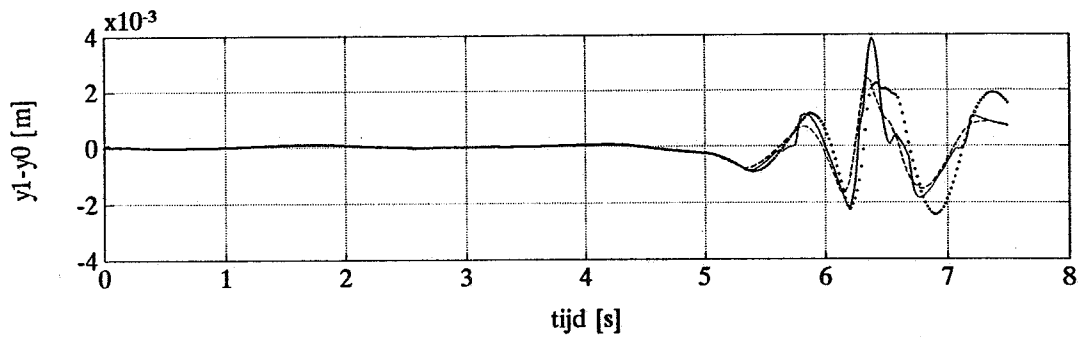
**Figuur 5f.** De dempingscoëfficiënt van het semi-actieve systeem met preview,  $q_1 = q_2 = 1e13$ ,  $q_3 = 1e8$ ,  $r = 3$ ,  $k_d = 1.1e5$  [N/m]. Het ingangssignaal is een stap met een hoogte van 7.1 cm.



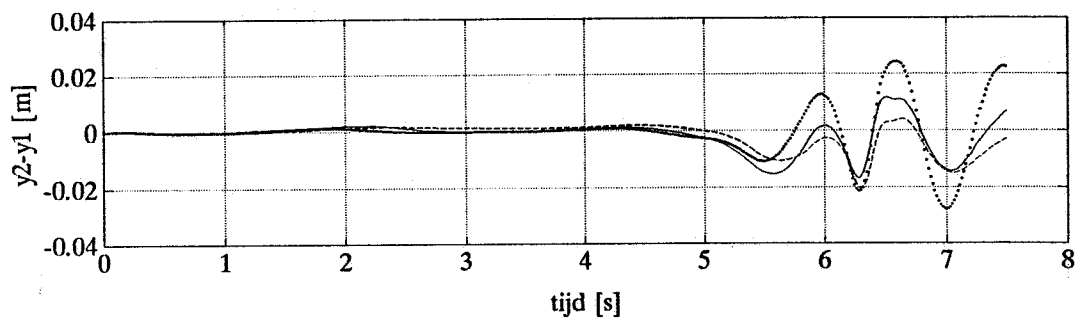
**Figuur 6.** De  $y_1$ ,  $y_2$ ,  $\ddot{y}_2$  en  $(y_2 - y_1)$  responsie van het semi-actieve systeem met en zonder preview,  $q_1 = q_2 = 1e13$ ,  $q_3 = 1e8$ ,  $r = 3$ ,  $k_d = 1.1e5$  N/m. Hetingangssignaal is een stap met een hoogte van 7.1 cm.



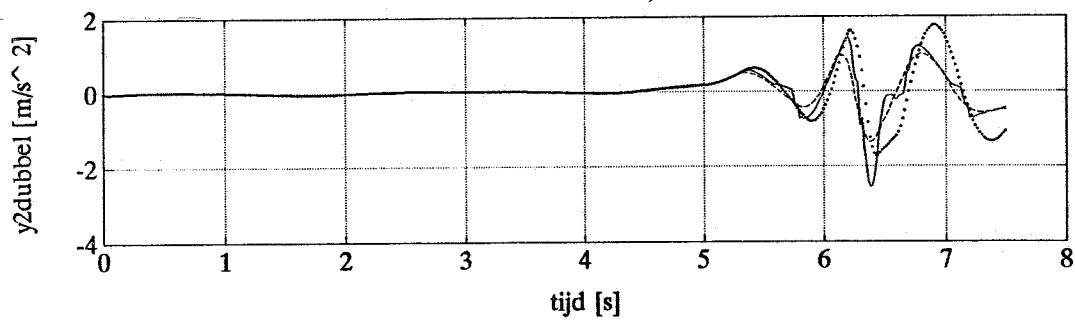
**Figuur 6.** De gewenste en werkelijke demper kracht en de dempingscoëfficiënt van het semi-actieve systeem met en zonder preview,  $q_1 = q_2 = 1e13$ ,  $q_3 = 1e8$ ,  $r = 3$ ,  $k_d = 1.1e5$  N/m. Hetingangssignaal is een stap met een hoogte van 7.1 cm.



figuur 7a.



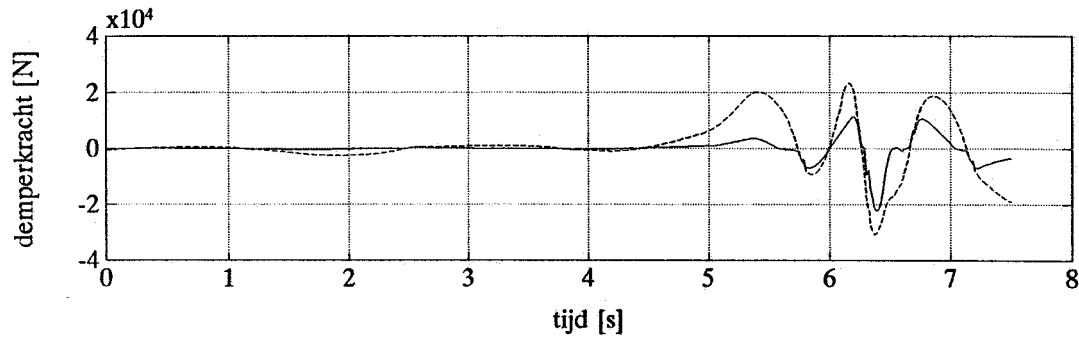
figuur 7b.



figuur 7c.

**figuur 7a, 7b en 7c.** De responsies  $(y_1-y_0)$ ,  $(y_2-y_1)$  en  $\ddot{y}_2$  van het passieve systeem, het semi-actieve systeem met preview en het actieve systeem met preview. Hetingangssignaal is de spoorwegovergang.

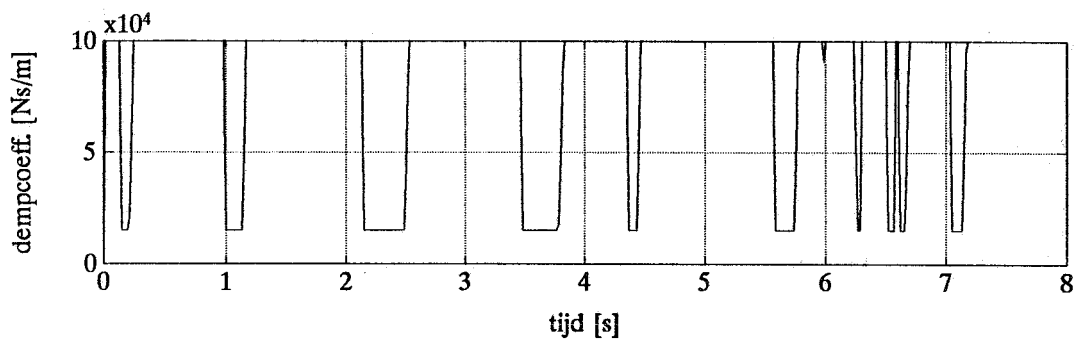
- semi-actief,  $q_1=1e13$ ,  $q_2=1e13$ ,  $q_3=1e8$ ,  $r=3$ ,  $k_d=1.1e5$  [N/m]
- - - - actief,  $q_1=1e13$ ,  $q_2=1e12$ ,  $q_3=0$ ,  $r=1$
- ..... passief



figuur 7d.

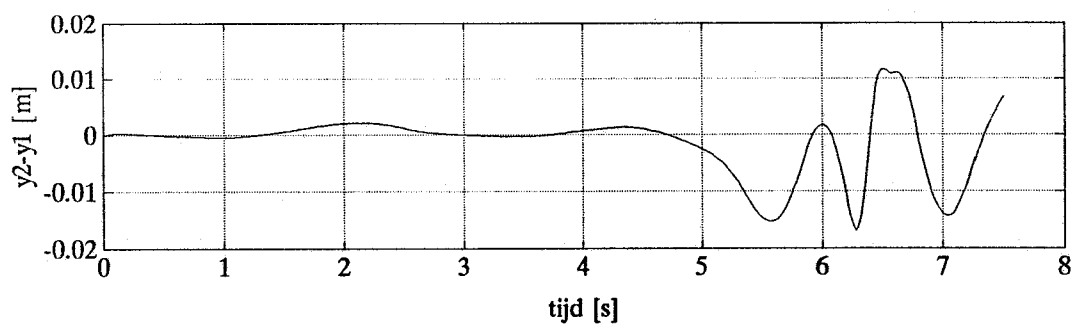
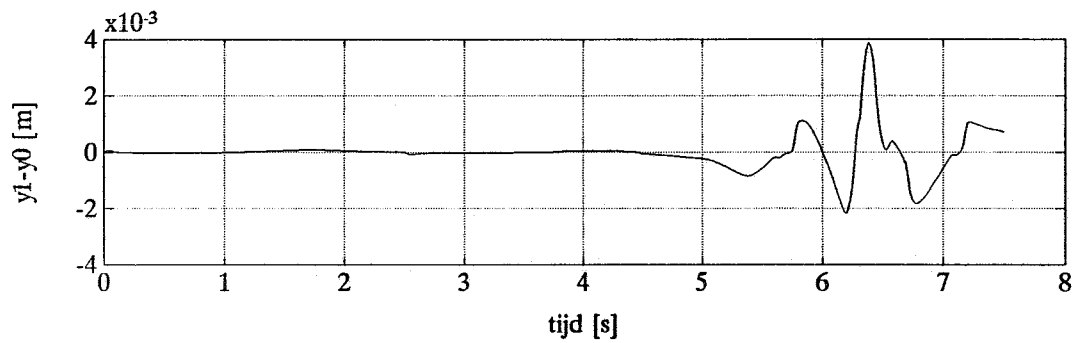
figuur 7d. De gewenste en werkelijke demperkracht van het semi-actieve systeem met preview,  $q_1 = 1e13$ ,  $q_2 = 1e13$ ,  $q_3 = 1e8$ ,  $r = 3$  en  $k_d = 1.1e5$  [N/m]. Hetingangssignaal is de spoorwegovergang.

----- werkelijke      - - - - gewenste

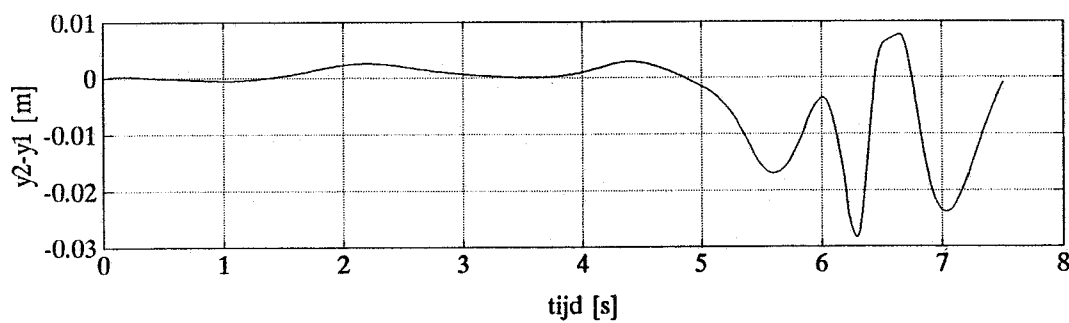
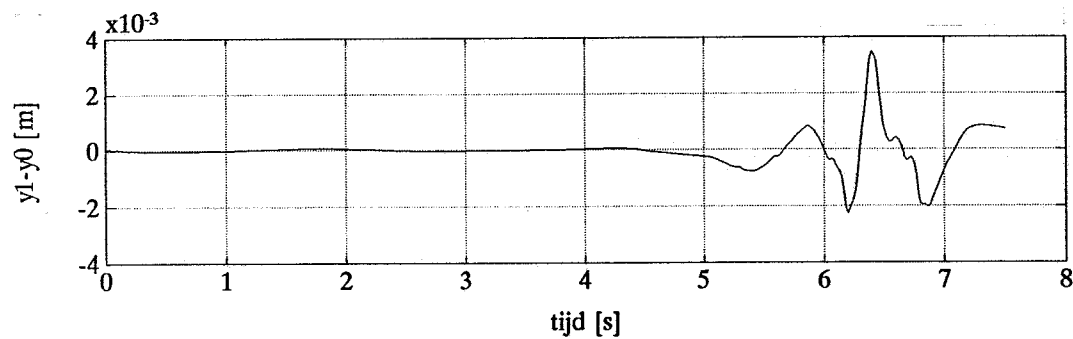


figuur 7e.

Figuur 7e. Dempingscoëfficiënt van het semi-actieve systeem met preview,  $q_1 = 1e13$ ,  $q_2 = 1e13$ ,  $q_3 = 1e8$ ,  $r = 1$  en  $k_d = 1.1e5$  [N/m]. Hetingangssignaal is de spoorwegovergang.



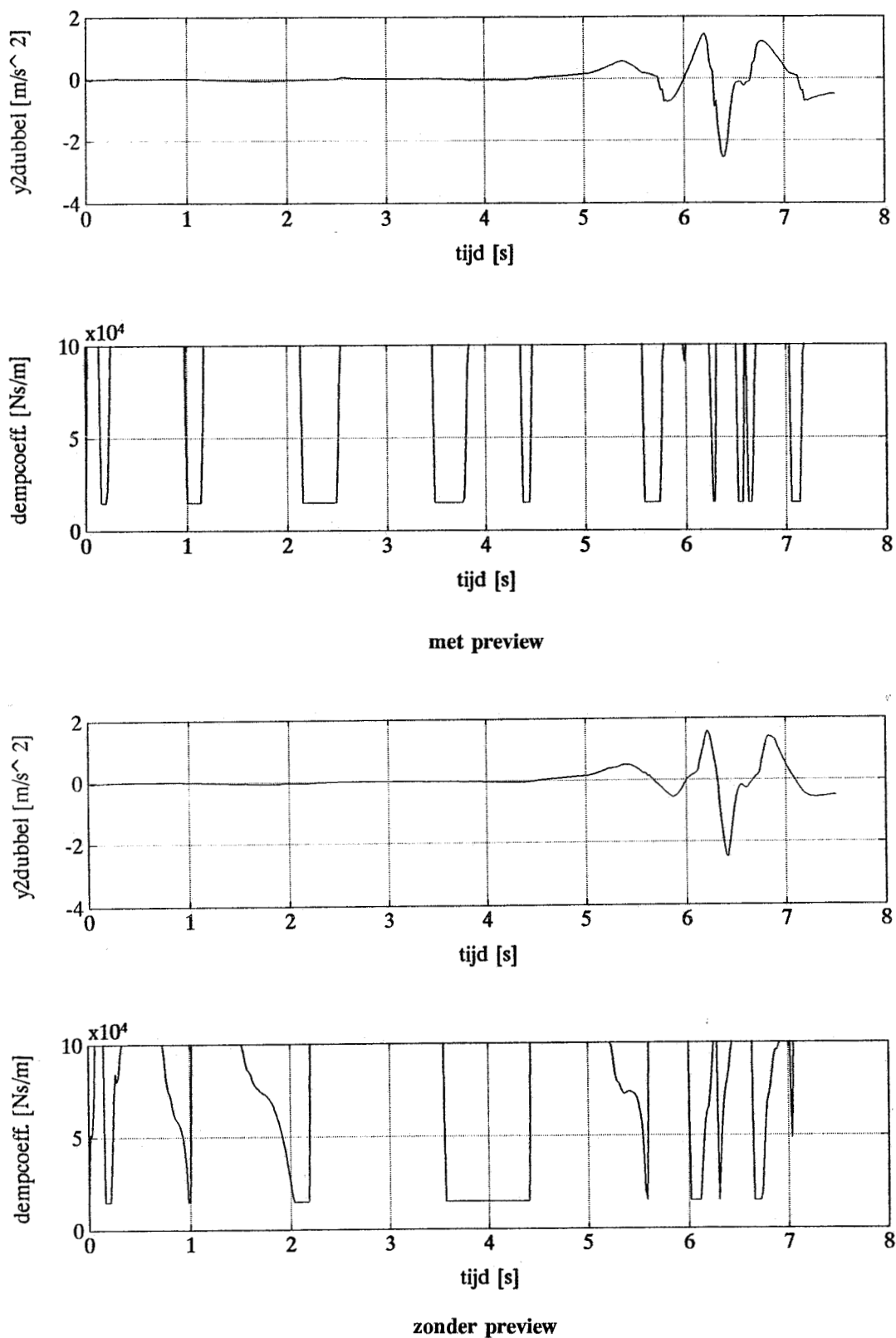
met preview



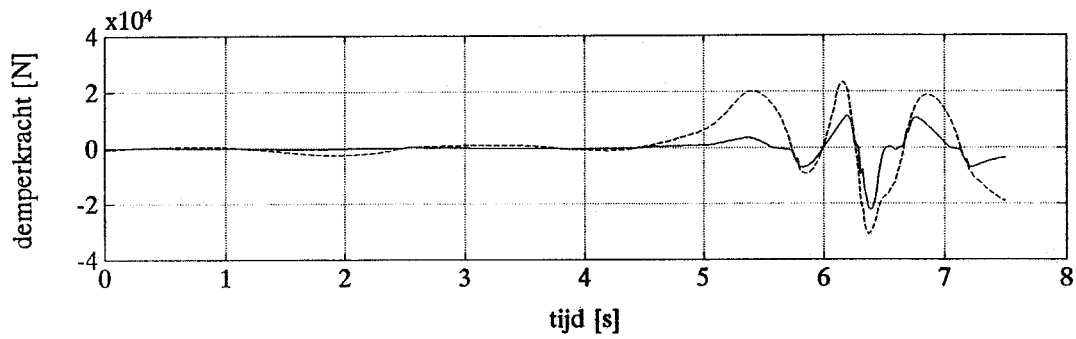
zonder preview

**Figuur 8.** De  $(y_1 - y_0)$  en  $(y_2 - y_1)$  responsie van het semi-actieve systeem met preview en zonder preview,  $q_1 = 1e13$ ,  $q_2 = 1e13$ ,  $q_3 = 1e8$ ,  $r = 3$  en  $k_d = 1.1e5$  [N/m]. Het ingangssignaal is de spoorwegovergang.

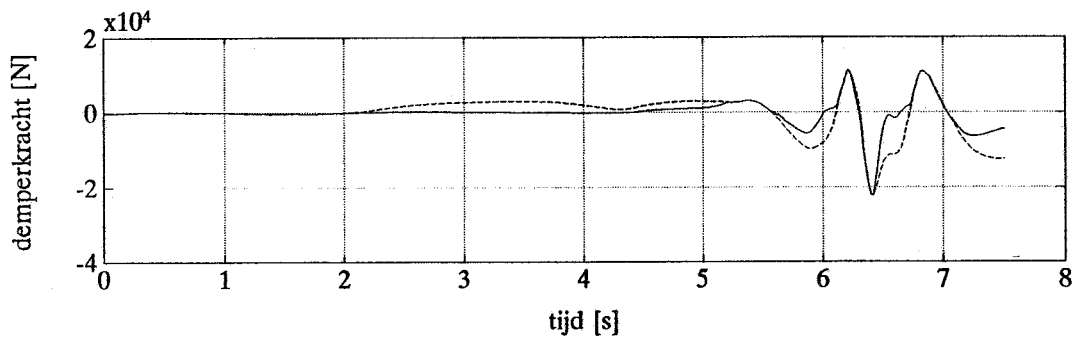




**Figuur 8.** De  $\ddot{y}_2$  responsie en de dempingscoëfficiënt van het semi-actieve systeem met preview en zonder preview,  $q_1=1e13$ ,  $q_2=1e13$ ,  $q_3=1e8$ ,  $r=3$  en  $k_d=1.1e5$  [N/m]. Het ingangssignaal is de spoorwegovergang.



met preview



zonder preview

**Figuur 8.** De gewenste en werkelijke demperkracht van het semi-actieve systeem met preview en zonder preview,  $q_1=1e13$ ,  $q_2=1e13$ ,  $q_3=1e8$ ,  $r=3$  en  $k_d=1.1e5$  [N/m]. Hetingangssignaal is de spoorwegovergang.

## Appendix C. Programmatuur

%%%%%%%% semi-actieve vering met preview %%%%%%%%%

```

clear
echo on
% ws=0.071*stepfun(t,0.25)           % ingangssignaal, stapfunctie
% aantal beginwaarden:
% tb=begintijdstip
% te=eindtijdstip
% deltat = tijdsinterval
%
tb=0;
te=0.8;
deltat=.001;
ts=tb:deltat:te;
ws=0.071*stepfun(ts,.25);

```

%%%%%%%% Het gekozen model %%%%%%%%%

```

% modelparameters
% m1=1350(kg) m2=8650(kg) k1=6.5*1e6(N/m) kd=1.1*1e5(N/m)
m1=1350;
m2=8650;
k1=6.5*1e6;
kd=1.1e5;
% matrices van de toestandsvergelijking en uitgangsvergelijking

```

```

A=[0 0 1 0
   0 0 -1 1
   -k1/m1 kd/m1 0 0
   0 -kd/m2 0 0];

```

```

B=[0 0 -1/m1 1/m2]';

```

```

E=[-1 0 0 0]';

```

```

C=[1 0 0 0
   0 1 0 0
   0 -kd/m2 0 0];

```

```

D=[0 0 1/m2]';

```

% voor het bepalen van de gewenste demperkracht moet een bepaald criterium

% geminimaliseerd worden. Hierin worden de in gang en de uitgang gewogen

% weegmatrices Q(uitgang) en R(ingang)

```
q1=1e13;
q2=1e13;
q3=1e8;
Q=[q1 0 0
    0 q2 0
    0 0 q3];
rr=3;
R=[rr];
```

% matrices die volgen uit de gebruikte regelstrategie

```
V=D'*Q*D+R;
invV=inv(V);
F=A-B*invV*D'*Q*C;
G=C*(Q-Q*D*invV*D'*Q)*C;
H=B*invV*B';
```

% algebraïsche Ricattivergelijking:  $F'P + P'F + G - P'H'P = 0$

% de oplossing van deze vergelijking is P.

```
[K,P]=lqr(F,B,G,V);
```

```
Ag=F-H*P;
```

% het oplossen van  $dr/dt = -Ag'r + P'h$ ,  $r(t+T_p) = P*x(t+T_p) = 0$

% Het oplossen van deze vergelijking is niet mogelijk met matlab, de volgende

% vergelijking wordt nu opgelost.  $r(t') = s(t+T_p-t')$  dit geeft de volgende vergelijking:

%  $ds(t')/dt = Ag's(t') - P'E*w(t+T_p-t')$ ,  $s(0) = r(t+T_p)$

%  $w(t+T_p-t')$  is de afgeleide naar de tijd van het stapsignaal. Omdat de afgeleide van

% dit signaal een impuls is moet een over worden gegaan op een nieuwe toestand om

% gebruik binnen matlab mogelijk te maken. Deze nieuwe toestand is gelijk aan

%  $S_{ster}$ .

%  $S_{ster} = s - P'E*w(t+T_p-t')$ .

% In onderstaande deel wordt het previewgedeelte bepaald.

```
z=0;
```

```
for t=tb:deltat:te
```

```
z=z+1;
```

```
Tp=0.125;
```

```
% preview tijd
```

```
tst=t:deltat:t+Tp;
```

```
w=0.071*stepfun(tst,0.25);
```

```
ww=fliplr(w);
```

```
% array w wordt omgedraaid
```

```

tster=0:deltat:0.125; % het tijdsinterval waarover Sster
                        % geïntegreerd moet worden
                        % beginvoorwaarde voor Sster
Sster0=-P*E*ww(:,1);
Bl=Ag'*P*E;
Cl=eye(4);
Dl=[0 0 0 0]';
Sster=lsim(Ag',Bl,Cl,Dl,ww,tster,Sster0); % lsim lost Sster op
%
s=Sster+(P*E*ww)'; % s(t+Tp)=r(t)
r(z,:)=s(length(ww),:); % r wordt opgeslagen
clear Sster
clear s
end
clear z Tp ttt w ww tster Sster0 Bl Cl Dl t

%%%% Het bepalen van de werkelijke demperkracht en de toestand %%%

% initiele waarden
a=0;
x0=[0 0 0 0]';
X(1,:)=x0';
xx0=x0-E*ws(1);
demp=[]; % kolom waarin de gewenste
          % dempingscoefficient geplaatst
          % wordt
dempw=[]; % kolom waarin de werkelijke
           % dempingscoefficient geplaatst
           % wordt

for t=tb+deltat:deltat:te
    a=a+1;

    % bepaling van de optimale uopt (gewenste demperkracht)

    uopt=-invV*(B'*P+D'*Q*C)*x0+invV*B'*r(a,:);
    uoptk(a,:)=uopt; % gewenste demperkracht wordt
                    % opgeslagen

    % het bepalen van de dempingscoefficient

    y1p=x0(3,1); % snelheid van m1
    y2p=x0(4,1); % snelheid van m2
    deltayp=y2p-y1p; % snelheidsverschil
    % het bepalen van de gewenste dempingscoefficient

    if deltayp==0
        b=15000;
    else

```

```

    b=-uopt/deltayp;
end
demp=[demp,b];           % opslag van de gewenste dempings
                        % coefficient
% het bepalen van de werkelijke dempingscoefficient

if b <= 15000
    b=15000;
end

if b > 1e5
    b=1e5;
end
dempw=[dempw b];       % opslag van de werkelijke
                        % dempingscoefficient

% nu wordt de werkelijke ingang berekend

uoptn=-b*deltayp;

uoptnk(a,:)=uoptn;     % opslag van de werkelijke
                        % demperkracht

% het bepalen van de nieuwe toestand
% ook nu wordt een nieuwe toestand gedefinieerd:
%  $xx = x - E * ws$ 

xx0=x0-E*ws(a);       % beginvoorwaarde
tx=[t-deltat,t];     % tijdsinterval waarover
                        % geïntegreerd moet worden

Ax=A;
Bx=eye(4);
Cx=eye(4);
Dx=zeros(4,4);
ux=A*E*ws(a:a+1)+B*[uoptn,uoptn];
xx=lsim(Ax,Bx,Cx,Dx,ux,tx,xx0);
x=xx+(E*ws(a:a+1))'; % het bepalen van de werkelijke
                        % toestand
X(a+1,:)=x(2,:);    % het opslaan van de werkelijke
                        % toestand

x0=x(2,:);
end
clear xx0 tx Ax Bx Cx Dx ux xx x x0
uoptnk(a+1,:)=uoptn; % uitbreiding van de volgende
uoptk(a+1,:)=uopt;  % kolommen met een getal is

```

```
demp=[demp b]; % nodig om uitzetting tegen
dempw=[dempw b]; % de tijd mogelijk te maken

% het wegschrijven van ts demp dempw uoptk uoptnk en X
save plot173 ts demp dempw uoptk uoptnk X
clear demp dempw uoptk

% het bepalen van de uitgang y

y=C*X'+D*uoptnk';
y1=y(1,)+ws; % verplaatsing van m1
y2=y(2,)+y1; % verplaatsing van m2
ydouble=y(3,); % versnelling van m2
clear X uoptnk
```