

## Semi actieve demping van personen auto's

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

Vercoulen, P. J. J. (1990). *Semi actieve demping van personen auto's*. (DCT rapporten; Vol. 1990.024). Technische Universiteit Eindhoven.

***Document status and date:***

Gepubliceerd: 01/01/1990

***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 DEMPING  
VAN PERSONEN AUTO'S.**

Vercoulen P.J.J.

**Stageverslag**

Uitgevoerd van 5-2-'90 t/m 27-4-'90

in Oud Beyerland, bij Koni.

Rapport Nr. WFW 90.024.

Technische Universiteit Eindhoven  
faculteit der werktuigbouwkunde  
vakgroep fundamentele werktuigbouwkunde.

## SAMENVATTING

De wegligging en het rijcomfort van een personen auto worden in hoge mate bepaald door de demper tussen wiel en carrosserie.

Het probleem is nu dat met het oog op bovenstaande zaken, de conventionele passieve dempers nauwelijks nog verbeterd kunnen worden.

Onderzocht is of een semi actief gedempt systeem wel voor verbeteringen t.a.v. wegligging en rijcomfort kan zorgen. Bij een dergelijk systeem kan de dempingsconstante ingesteld worden. Dit instellen dient te geschieden op basis van het een of andere regelconcept.

De ontworpen regeling is gebaseerd op optimale toestandsterugkoppeling. Het doel van de regeling is achtereenvolgens: het reduceren van de versnellingen van de carrosserie (comfort verbeteren), het constant houden van de wioldruk tussen wiel en wegdek (veiligheid garanderen) en het binnen het toelaatbare werkgebied houden van de slag van de demper.

Er is uitgegaan van een lineair quarter car model met als excitatie— ofwel wegdeksignaal een gefilterde witte ruis.

D.m.v. simulaties is de regeling getest en aan de hand daarvan zijn een aantal conclusies getrokken omtrent de bruikbaarheid van de ontworpen regeling en wordt een aanbeveling gedaan voor een eventueel vervolgonderzoek.

## SYMBOLENLIJST

## grootheid

$b$	Dempingscoefficient passieve demper	Ns/m
$b_t$	Semi-actieve dempingscoefficient	Ns/m
$F$	Actuator kracht	N
$F_c$	Contactkracht tussen wiel en wegdek	N
$J$	Integraal criterium	
$J_i$	Elementen van het integraal criterium	
$k_1$	Secundaire veerstijfheid	N/m
$k_2$	Bandstijfheid	n/m
$m_1$	Massa carrosserie	kg
$m_2$	Massa wiel	kg
$P^2$	Vermogen	J/s
$Q_{11}$	Weegfactor voor versnellingen	
$Q_{22}$	Weegfactor voor demperslag	
$Q_{33}$	Weegfactor voor variantie wielindrukking	
$R$	Weegfactor voor regelinspanning	
$s(w)$	Power spectral density (P.S.D.)	
$t$	tijd	s
$u$	Ingangssignaal, semi-actieve demper kracht	N
$V_{rel}$	Relatieve snelheid demperuiteinden	m/s
$v$	Snelheid van de auto	m/s
$w, \dot{w}$	Vertikale variantie van het wegdek en afgeleide daarvan	m, m/s
$x_1, x_2, \ddot{y}_1$	Vertikale verplaatsing, snelheid en versnelling van de carrosserie	m, m/s, m/s <sup>2</sup>
$x_3, x_4, \ddot{y}_2$	Vertikale verplaatsing, snelheid en versnelling van de wielas	m, m/s, m/s <sup>2</sup>

$\alpha$	Factor voor type wegdek	
$\psi$	Witte ruis met gegeven covariantie functie	
$\sigma$	Standaarddeviatie wegdek	m
$\varphi$	Hoek	rad
$\tau$	tijdconstante	s

### vektoren

$x, \dot{x}$	Toestandsvektor en afgeleide
$x_q, x_n, x_p$	Toestandsvektoren
$y, \dot{y}$	Uitgangsvektor en afgeleide
$y_q, y_n, y_p$	Uitgangsvektoren

### matrices

$A_i$	Systeem matrix
$A_w$	Element van systeem matrix
$B_i$	Ingangsmatrix
$C_i$	Uitgangs matrix
$D_i$	Doorkoppel matrix
$G_i$	Verstorings matrix
$G_w$	Element van verstorings matrix
qq	Weegmatrix voor de toestand in lqr-file (lqr-file is matlab file)
nn	Weegmatrix voor kruisterm van toestand en ingang in lqr-file
rr	Weegmatrix voor de ingang in lqr-file
$L_o$	Optimale regelwet

## 1 INLEIDING

Elke auto die over een random geprofileerd wegdek rijdt, ondervindt trillingen die hinderlijk zijn voor de passagiers en die de levensduur van de auto beïnvloeden. Er zijn twee manieren om deze trillingen te reduceren: ten eerste door goede wegen aan te leggen wat duur en tijdrovend is en ten tweede door een beter dempingssysteem te ontwikkelen.

De afgelopen jaren is de vraag naar comfort en veiligheid bij hoge snelheden sterk toegenomen met als gevolg dat de conventionele passieve demper niet altijd meer voldoet. Het probleem kan alleen opgelost worden d.m.v. een systeem dat zijn dempingskarakteristiek wijzigt al naar gelang de toestand van verschillende grootheden die door middel van sensoren worden gemeten.

Schokdemper fabrikant *Koni* heeft een semi actieve demper ontwikkeld die om de vijf milliseconden en binnen een bepaald gebied een gewenste dempingsconstante kan instellen, zie fig (1). Aan WFW is gevraagd om hiervoor een regelconcept te ontwikkelen.

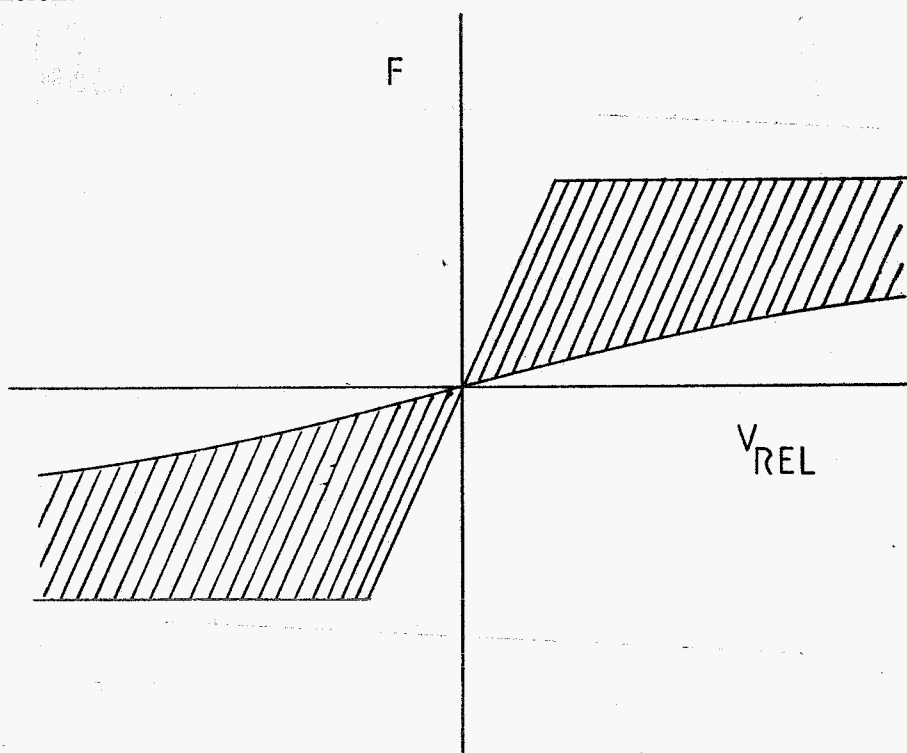


fig (1)

Semi actieve demping onderscheidt zich van de conventionele passieve demping

door het gebruik van een regelaar die als taak heeft een gewenst systeemgedrag te bewerkstelligen. Dit kan geschieden d.m.v. sturing van actuatoren onder toevoer van energie of via aanpassing van de parameters van energie-dissiperende elementen (b.v. dempers) waarbij de externe energiestroom verwaarloosbaar klein is (actieve respectievelijk semi actieve demping). In het laatste geval worden de semi active elementen uitgeschakeld op het moment dat ze energie aan de demper zouden moeten toevoeren.

In dit verslag wordt aan de hand van een lineair quarter car model met twee graden van vrijheid, een optimale regelwet berekend. Uit simulaties blijkt wat bereikt kan worden.

Aan de regeling zelf is als eis gesteld dat zij het systeem gedrag dusdanig beïnvloedt dat voldaan wordt aan de volgende wensen: een goede wegligging (liefst een constante wioldruk), rijcomfort (kleine de versnellingen van de carrosserie) en de slag van de demper binnen de beschikbare werkruimte.

De oplossing is d.m.v. de lineaire regeltheorie verkregen. Om deze theorie zonder problemen toe te kunnen passen kiezen we in het model i.p.v. een semi actief element (dat het systeem niet lineair maakt), een aktuator die elke gewenste eindige kracht kan genereren. In een later stadium wordt dit systeem omgebouwd van actief naar semi actief, door de ingang nul te kiezen, op die momenten dat er energie aan het systeem toegevoerd zou moeten worden.

Het wegdeksignaal wordt voorgesteld door een gefilterde witte ruis, die wordt bepaald uit een gegeven power spectral density function (P.S.D.), waarin meegenomen worden de snelheid van de auto, de variantie van de wegdekoneffenheden en een wegdek afhankelijke factor.

De opzet van het verslag is als volgt. Allereerst zal het model worden beschreven waarop de te ontwerpen regeling zal worden getest. Er zijn meerdere toestandsbeschrijvingen bekeken behorende bij dezelfde bewegingsvergelijkingen. Voor elke beschrijving is een simulatieprogramma in PC-MATLAB geschreven, In dit verslag wordt is aangegeven met welke toestandsbeschrijving de resultaten geproduceerd zijn. Voor elke simulatie worden de waarden van de optimale regelwet berekent waarmee het gedrag van het geregelde systeem bij een random

geprofileerd wegdek vast ligt. De resultaten van het ongeregelde, het actieve en het semi actieve systeem worden met elkaar met elkaar vergeleken. De bevindingen worden geformuleerd in een aantal conclusies en suggesties.



## 2 DE METHODE

### 2.1 modellering van het systeem

De kwaliteit van de regeling komt tot uiting in het gedrag van het geregelde systeem. De vraag is nu welk model voor de simulaties het meest geschikt is. Om inzicht te krijgen en om regelacties te kunnen verklaren is besloten om een sterk vereenvoudigd model van een personen auto te hanteren, en wel het z.g.n. "quarter car model" representatie, uit fig 2.

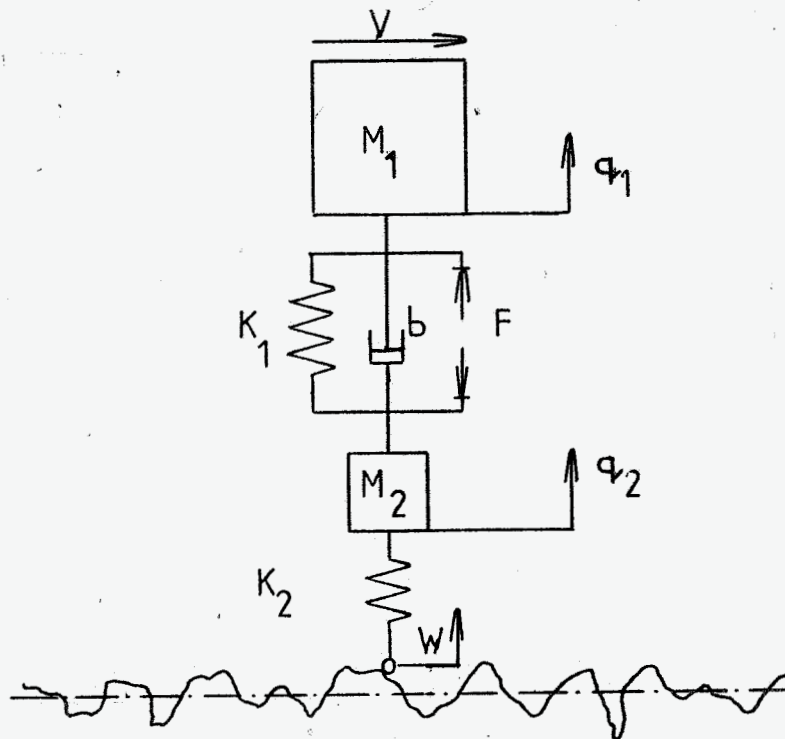


fig 2

Dit systeem heeft slechts twee graden van vrijheid  $q_1$  en  $q_2$  die de verticale verplaatsing van respectievelijk de carrosserie en de wielas voorstellen. De primaire veer met bandstijfheid  $k_2$ , de secundaire veer met stijfheid  $k_1$  en de passieve demper met dempingsconstante  $b$  worden lineair verondersteld. Het wegdek wordt

voorgesteld door  $w$  als functie van de coördinaat  $s$  (zie fig.2). De snelheid  $v$  van de auto wordt constant verondersteld. Met  $s=v*t$  kan het aan het systeem aangeboden wegdek dus worden opgevat als functie van  $t$ . Massa's  $m_1$  en  $m_2$  stellen respectievelijk de massa van de carrosserie en de massa van het wiel voor. De ingangsgrootte  $u$  is de kracht  $F$  van de actuator tussen deze massa's.

### 2.1.2 de bewegingsvergelijkingen

Voor dit zeer eenvoudige systeem worden de bewegingsvergelijkingen gegeven door;

$$m_1 \ddot{q}_1 + b(\dot{q}_1 - \dot{q}_2) + k_1(q_1 - q_2) - f = 0 \quad (1)$$

$$m_2 \ddot{q}_2 + b(\dot{q}_2 - \dot{q}_1) + k_1(q_2 - q_1) + k_2(q_2 - w) + f = 0 \quad (2)$$

## 2.2 beschrijving van het wegdek

Het wegdeksignaal vormt het excitatiesignaal van het systeem, deze signalen kunnen onderverdeeld worden in twee groepen:

- de deterministische wegdeksignalen b.v. harmonische, taludvormige en stap vormige signalen.
- de stochastische wegdeksignalen

De uiteindelijke resultaten van de simulaties zijn geproduceerd m.b.v. het onderstaande stochastische wegdeksignaal, dat op twee manieren gekarakteriseerd kan worden:

- d.m.v. P.S.D zie verg.3, [4]

$$s(w) = \frac{2 \sigma \alpha v}{(w^2 + \alpha^2 v^2)} \quad (3)$$

- d.m.v. een eerste orde filter met als ingang een witte ruis  $\psi(t)$  met gegeven covariantie functie, hierin is  $\alpha$  een factor voor het wegdek en is  $\sigma$  is een maat voor de standaarddeviatie van het wegdek.

$$\dot{w}(t) = -\alpha v w(t) + \psi(t) \quad (4)$$

$$E[\psi(t)\psi(\tau)] = 2\sigma^2\alpha v\delta(t-\tau) \quad (5)$$

In de literatuur worden allerlei waarden gegeven voor de wegdekfactor  $\alpha$  [1] [2]. Hier is uitgegaan van een representatieve meting, bij Koni uitgevoerd, aan een personenauto. De factor  $\alpha$  werd zo ingesteld dat –bij gelijke snelheid van auto en model (100 KM/h) en met variantie van het wegdek (0,02 M)– de standaarddeviatie van de carrosserie van de auto en het model gelijk waren. Hier is het wegdek dus a.h.w. gereconstrueerd, zie fig. (3). In bijlage A is de grafiek weergegeven van de versnellingen van de carrosserie van de auto (een lancia) waaruit de standaarddeviatie is bepaald.

Opmerking: Er is hier een eerste orde laagdoorlaat filter voor het wegdeksignaal  $w(t)$  genomen, in de literatuur worden ook nog andere voorstellen gedaan zie [1], [2] en [6].

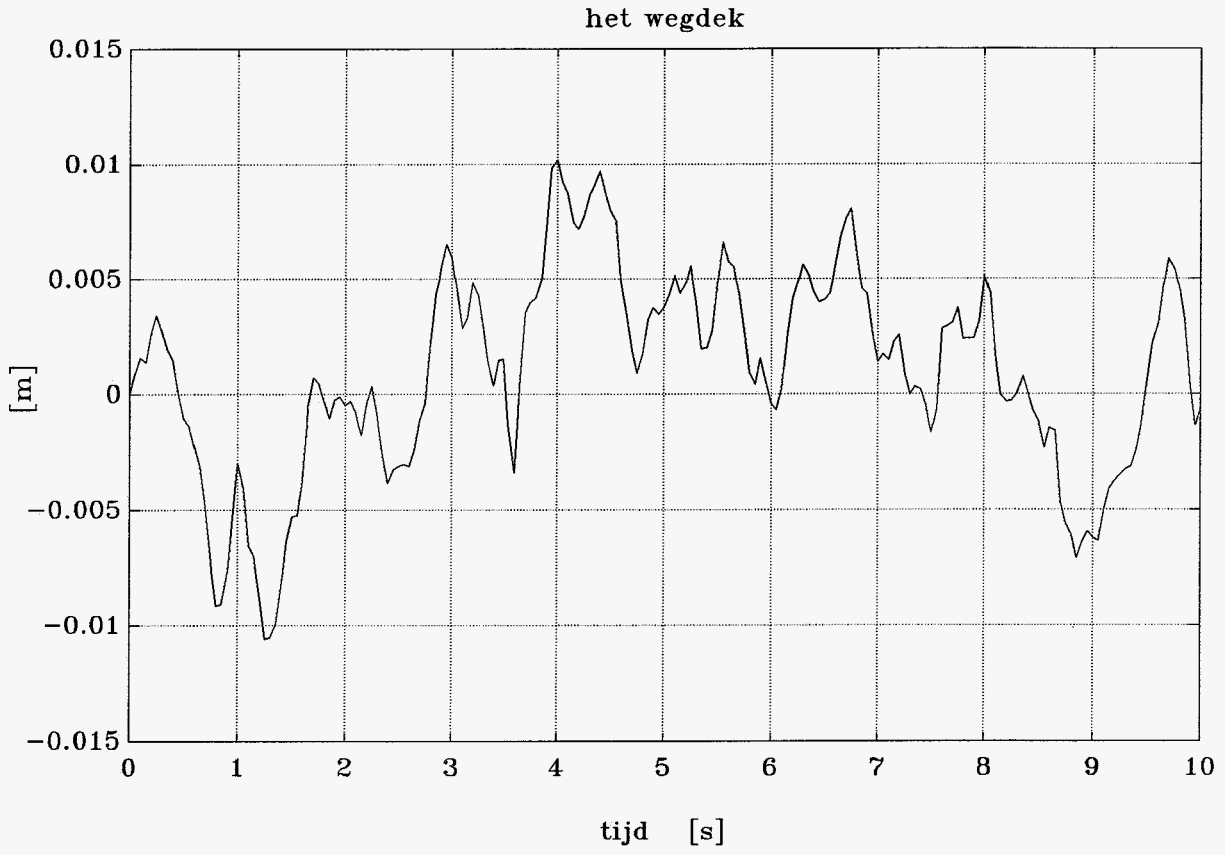


fig (3)

## 2.3. de toestandsbeschrijving

Er worden in dit hoofdstuk vier verschillende toestandsbeschrijvingen geponeerd behorende bij de bewegingsvergelijkingen (1) en (2). Bij deze beschrijvingen worden eventueel opmerkingen, suggesties of vragen gezet. Uiteindelijk wordt slechts een beschrijving voor het verkrijgen van resultaten gebruikt. In de uitgangsvergelijking worden die zaken opgenomen die uiteindelijk geregeld dienen te worden, omdat de uitgangsvergelijking gewogen wordt in een integraalcriterium zoals beschreven in paragraaf 2.4.

### 2.3.1 de eerste toestandsbeschrijving

De toestand van het beschouwde mechanische systeem (twee vrijheidsgraden) is vierdimensionaal. Als toestandsgrootheden kunnen wij kiezen,

$$x_1 = q_1, x_2 = \dot{q}_1, x_3 = q_2, x_4 = \dot{q}_2 \quad (6)$$

Door nog gebruik te maken van  $u=F$  kunnen (1) en (2) worden omgewerkt tot een stelsel lineaire eerste orde differentiaalvergelijkingen

Nu is een eerste orde stelsel lineaire differentiaal vergelijkingen verkregen.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -k_1 x_1 / m_1 - b x_2 / m_1 + k_1 x_3 / m_1 + b x_4 / m_1 + u / m_1 \\ \dot{x}_3 &= x_4 \\ \dot{x}_4 &= k_1 x_1 / m_2 + b x_2 / m_2 - (k_1 + k_2) x_3 - b x_4 / m_2 + k_2 w / m_2 - u / m_2 \end{aligned} \quad (7)$$

Deze relatie kan geschreven worden als,

$$\dot{x} = A_1 x + B_1 u + G_1 w \quad (8)$$

met toestandsvektor  $x$ , systeemmatrix  $A_1$ , ingangsmatrix  $B_1$ , verstoringsmatrix  $G_1$ , systeemruis  $w$  en ingang  $u$ :

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -k_1/m_1 & -b/m_1 & k_1/m_1 & b/m_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ k_1/m_1 & b/m_2 & -(k_1+k_2)/m_2 & -b/m_2 \end{bmatrix}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1/m_1 \\ 0 \\ -1/m_2 \end{bmatrix} \quad G_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ k_2/m_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Voor de uitgangen worden de grootheden genomen die uiteindelijk geregeld dienen te worden:

$y_1 :=$  de versnellingen van de carrosserie (maat voor het comfort), dus  $y_1 = \ddot{q}_1$

$y_2 :=$  de slag v/d demper, dus  $y_2 = \dot{q}_1 - \dot{q}_2$

$y_3 :=$  de wegligging (maat voor de handling c.q. veiligheid)

$$y_1 = -k_1 x_1 / m_1 - b x_2 / m_1 + k_1 x_3 / m_1 + b x_4 / m_1 + u / m_1$$

$$y_2 = x_1 - x_3$$

$$y_3 = x_3 \quad (10)$$

In matrixvorm leidt dit tot de z.g.n. uitgangsvergelijking,

$$y=C_1x+D_1u \quad (11)$$

met uitgangsvector  $y$ , uitgangsmatrix  $C_1$  en doorkoppel matrix  $D_1$ .

$$C_1 = \begin{bmatrix} -k_1/m_1 & -b/m_1 & k/m_1 & b/m_1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad D_1 = \begin{bmatrix} 1/m_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

In deze beschrijving wordt het wegdek als systeemruis opgevat, hierdoor is het mogelijk een excitatiesignaal naar keuze in te voeren. Aangezien dit systeem volledig regelbaar is, is het in theorie mogelijk, om de slag en/of de versnellingen een bepaald gedrag te laten volgen. De wegligging daarentegen is niet te verbeteren omdat de uitgang  $y_3$  alleen de verplaatsing van de wielas voorstelt. Er volgen nog drie toestandsbeschrijvingen, waarin getracht wordt, een betere maat voor de wegligging in de uitgangsvergelijking op te nemen.

Opmerking: Voor de programmalisting waarin met deze toestandsbeschrijving gerekend wordt, zie op floppy de programma's Paul.m, Paul1.m en TT.m.

### 2.3.2. de tweede toestandsbeschrijving

Door vergelijking (4) aan het stelsel eerste orde differentiaalvergelijkingen (7) toe te voegen, wordt het wegdek in de toestandsvektor opgenomen. Hierdoor kan de relatieve verplaatsing tussen wegdek en wielas als maat voor de wegligging genomen worden. Deze term moet klein gehouden worden om grote krachten op het systeem enerzijds en slip anderzijds te voorkomen.

Door vergelijking (4) te schrijven als,

$$\begin{aligned}\dot{w} &= A_w w + G_w \psi \\ A_w &= -\alpha v, \quad G_w = 1\end{aligned}\quad (13)$$

en deze relatie te combineren met (9) wordt toestandsvergelijking,

$$\dot{X}_q(t) = A_2 x_q(t) + B_2 u(t) + G_2 \psi(t) \quad (14)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} A_1 & G_1 \\ 0 & A_w \end{bmatrix} \quad B_2 = \begin{bmatrix} B_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad G_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ G_w \end{bmatrix} \quad (15)$$

Het wegdek wordt nu dus ook opgevat als een toestandsgrootte en de nieuwe toestand  $x_q$  wordt gegeven door:

$$x_q = \begin{bmatrix} x \\ w \end{bmatrix} \quad (16)$$

Voor de uitgangen worden weer die zaken genomen die geregeld moeten worden.

$y_1$  := de versnellingen v/d carrosserie (maat voor het comfort)  
 $y_2$  := de slag v/d demper  
 $y_3$  := de relatieve verplaatsing tussen wegdek en wielas

$$\begin{aligned}y_1 &= -k_1 x_1 / m_1 - b x_2 / m_1 + k_1 x_3 / m_1 + b x_4 / m_1 + u / m_1 \\ y_2 &= x_1 - x_3 \\ y_3 &= x_3 - w\end{aligned}\quad (17)$$

Vergelijkingen (17) geschreven in de vorm van uitgangsvergelijking (11) levert;



$$y_q = C_2 x + D_2 u \quad (18)$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} -k_1/m_1 & -b/m_1 & k/m_1 & b/m_1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad D_2 = \begin{bmatrix} 1/m_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

Opmerking: Ondanks het feit dat het systeem niet volledig regelbaar is, berekent pc matlab toch een optimale regelwet (het wegdek is namelijk niet te regelen)

Het voordeel van deze beschouwing is dat er een maat voor de wegligging meegenomen kan worden in de uitgangsvergelijking. Aangenomen is dat de hele toestandsvektor op de toestand van het wegdek na in de regelbare deelruimte ligt.

Opmerking: Voor de programmalisting waarin met deze toestandsbeschrijving gerekend wordt, zie bijlage B het programma Hac.m (op floppy te kiezen uit Hac.m en Hac1.m).

## 2.4. het ontwerp van de regeling

Een lineair constant, multivariabel systeem van orde  $n$  kan beschreven worden door een stelsel van  $n$  eerste orde differentiaalvergelijkingen (de toestandsvergelijking) en een algebraïsche vergelijking (de uitgangsvergelijking). Van nu af aan zal er alleen nog met de tweede toestandsbeschrijving uit paragraaf 2.3.2. gewerkt worden, dus met de vergelijkingen (14), (15) en (19).

$$\dot{x}_q(t) = A_2 x_q(t) + B_2 u(t) + G_2 \psi(t); \quad x(t=0) = x_0;$$

$$E[\psi(t)\psi(\tau)] = 2\sigma^2 \alpha v \delta(t-\tau)$$

$$y(t) = C_2 x_q(t) + D_2 u(t)$$

waarin:	$A_2$ := systeemmatrix	$(n \times n)$
	$B_2$ := ingangsmatrix	$(n \times 1)$
	$C_2$ := uitgangsmatrix	$(m \times n)$
	$D_2$ := doorkoppelmatrix	$(m \times m)$
	$G_2$ := verstoringmatrix	$(n \times 1)$
	$x_q(t)$ := de toestand	$(n \times 1)$
	$x_0$ := de beginconditie	$(n \times 1)$
	$\psi(t)$ := witte ruis	$(1 \times 1)$

(met gegeven autocorrelatie functie)

$u(t)$ := ingang	$(1 \times 1)$
$y(t)$ := uitgang	$(m \times 1)$

Met de regeling wordt getracht de wegligging te verbeteren, het comfort te vergroten en de slag van de demper zoveel mogelijk te begrenzen. Het doel is ervoor te zorgen dat de uitgang  $y$  op het tijdsinterval zo klein mogelijk wordt gehouden met een daarbij behorend realistisch ingangssignaal. Een mogelijke wiskundige vertaling van deze wensen is; bepaal die ingang die het onderstaande kwadratische

integraalcriterium minimaliseert.

$$J = 1/2 \int_{t_0}^{t_f} \{Q_{11} J_1 + Q_{22} J_2 + Q_{33} J_3 + R J_4\} dt \quad (20)$$

$J_1 = (\ddot{y}_1)^2$  := het kwadraat van de versnellingen van de carrosserie.

$J_2 = (\dot{y}_2)^2$  := het kwadraat van de slag van de demper.

$J_3 = (y_2)^2$  := het kwadraat van de indrukking van het wiel.

$J_4 = (u)^2$  := het kwadraat van de dempingskracht.

Hierin zijn  $Q_{ii}$  ( $i=1,2,3$ ) en  $R$  weegfactoren waarmee iedere gewenste afweging tussen regelresultaat en regelinspanning kan worden gemaakt. Binnen PC-MATLAB gaat het bepalen van een optimale regelwet vaak fout doordat de uiteindelijke weegmatrix  $qq$  ( $qq = C^T Q C$ ) van de toestand, in de lqr-file van PC-MATLAB dan niet meer semi-positief definitief is. Door nu een diagonaal matrix met kleine getallen op te tellen bij  $qq$  wordt deze laatste positief definitief en kan er wel een optimale regelwet berekend worden.

Criterium (20) is in matrix notatie van de vorm

$$J = 1/2 \int_{t_0}^{t_f} \{y^T(t) Q y(t) + u^T R u\} dt \quad (21)$$

$$Q = \begin{bmatrix} Q_{11} & 0 & 0 \\ 0 & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{33} \end{bmatrix} \quad (22)$$

Door (18) in (21) te substitueren wordt (23) verkregen,

$$J = 1/2 \int_{t_0}^{t_f} \{x^T C_2^T Q C_2 x + x^T C_2^T Q D_2 u + u^T D_2^T Q C_2 x + u^T (D_2^T Q D_2 + R) u\} dt \quad (23)$$

herschreven levert dat (24),

$$J = 1/2 \int_{t_0}^{t_f} \{ [x^T u] \begin{bmatrix} C_2^T Q C_2 & C_2^T Q D_2 \\ D_2^T Q C_2 & D_2^T Q D_2 + R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ u \end{bmatrix} \} dt \quad (24)$$

In pc matlab wordt met vergelijking (24) de optimale regelwet bepaald met het verschil dat daar de benamingen van de matrices als volgt zijn,

$$\begin{aligned} qq &= C_2^T Q C_2 \\ nn &= C_2^T Q D_2 \\ rr &= D_2^T Q D_2 + R \end{aligned} \quad (25)$$

Het probleem is nu als volgt te formuleren: vind voor een systeem met toestandsvergelijking (14), de optimale ingang  $u(t)$  die het criterium (24) minimaliseert, [3] [4].

De ingang volgt uit,

$$u(t) = -L_0^T x(t) \quad (26)$$

met  $L_0$  als optimale regelwet volgens uit,

$$L_0 = r r^{-1} (n n^T + B_2^T S) \quad (27)$$

waarin  $S$  een symmetrische, positief definitieve oplossing is van de matrix Ricatti vergelijking (28), [3] [4].

$$-S(A_2 - B_2 r r^{-1} n n^T) - (A_2 - B_2 r r^{-1} n n^T)^T S + S B_2 r r^{-1} B_2^T S - (q q - n n r r^{-1} n n) = 0 \quad (28)$$

### 2.4.1. het systeem ombouwen van actief naar semi actief

De volgende stap is om het nu verkregen actief geregelde systeem om te bouwen naar een semi actief geregeld systeem door de ingang nul te kiezen op die momenten dat er energie aan het systeem toegevoerd zou moeten worden.

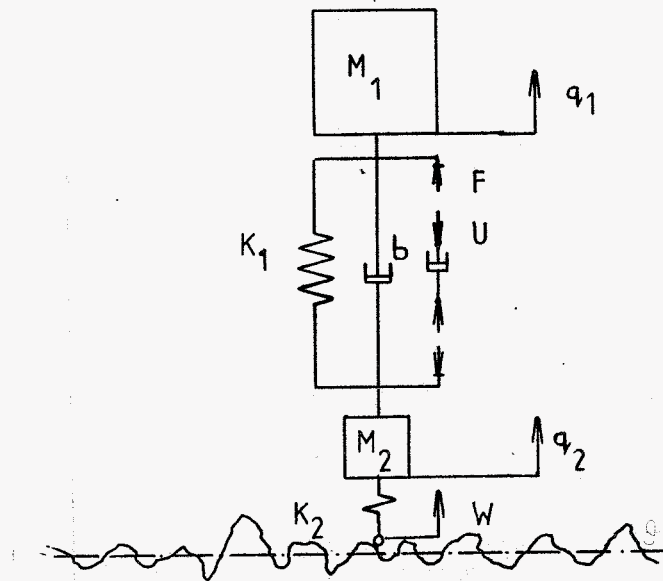


fig (4)

Strategie:

1) bepaal de actuatorskracht  $F$  uit  $F = L_0^T x$  (26)

2) bepaal het vermogen uit  $P = F v_{rel}$  met  $v_{rel} = \dot{q}_2 - \dot{q}_1$

Zoals reeds in de inleiding is opgemerkt, zal de regelaar parameters van de semi actieve demper moeten variëren om het uiteindelijk gewenste systeemgedrag te verkrijgen. Dit houdt in dat er continu een nieuwe dempingscoëfficiënt  $b_t$  bepaald moet worden. Deze is te bepalen door het gelijkstellen van de actuatorskracht  $u$  aan de semi actieve dempingskracht die verkregen wordt door  $F$  nul te stellen op die momenten dat er energie aan het systeem toegevoerd zou moeten worden. Met de tekenafspraken uit fig.4 kan de  $b_t$  bepaald worden:

3) bepaal  $b_t$ ;

$$b_t = 0 \quad \text{als } P \leq 0$$

$$b_t = \frac{u}{v_{\text{rel}}} \quad \text{als } P \geq 0 \quad (29)$$

De laatste stap houdt dus in dat de dempingsconstante nul gesteld wordt (en dus ook de dempingskracht) als er vermogen toegevoerd zou moeten worden. In fig.5 wordt dit bereikt door de ingangen uit het 2<sup>e</sup> en 4<sup>e</sup> kwadrant in de  $P-V_{\text{rel}}$  nul te stellen, dit levert voor de semie actieve ingangskracht in de tijd fig.6 op.

Opmerking: Aan de grenzen van het bereik van de dempingskracht van fig.1 is te zien dat er maximale en minimale dempingscoëfficiënten en maximale en minimale dempingskrachten zijn. Er is geen rekening gehouden met het feit dat er boven- en ondergrenzen voor de dempingskrachten (ofwel ingangen) en de dempingscoëfficiënten gelden. Dit zou moeten gebeuren door aan alle krachten en dempingscoëfficiënten groter dan de maximale grenswaarde, de maximale grenswaarde toe te kennen en voor krachten en dempingscoëfficiënten kleiner dan de minimale grenswaarde visa versa.

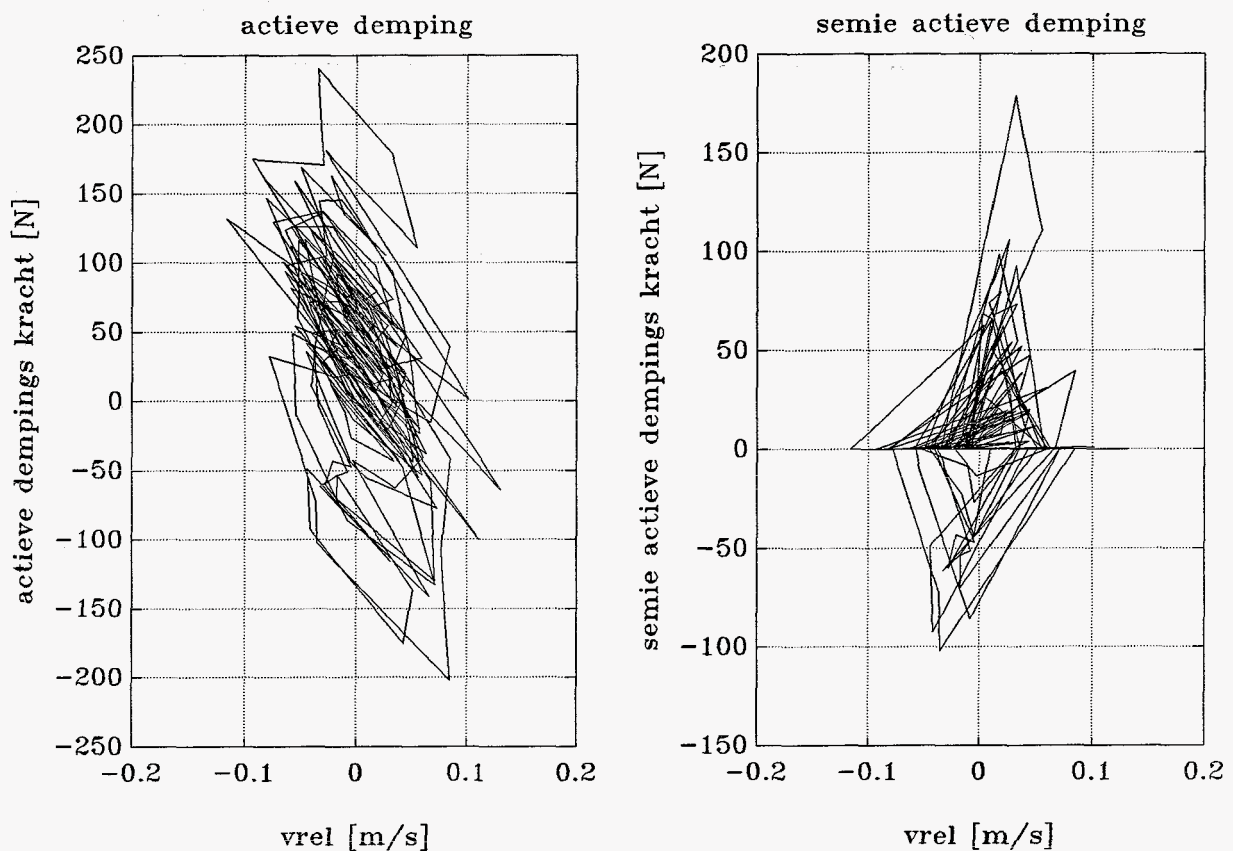


fig (5)

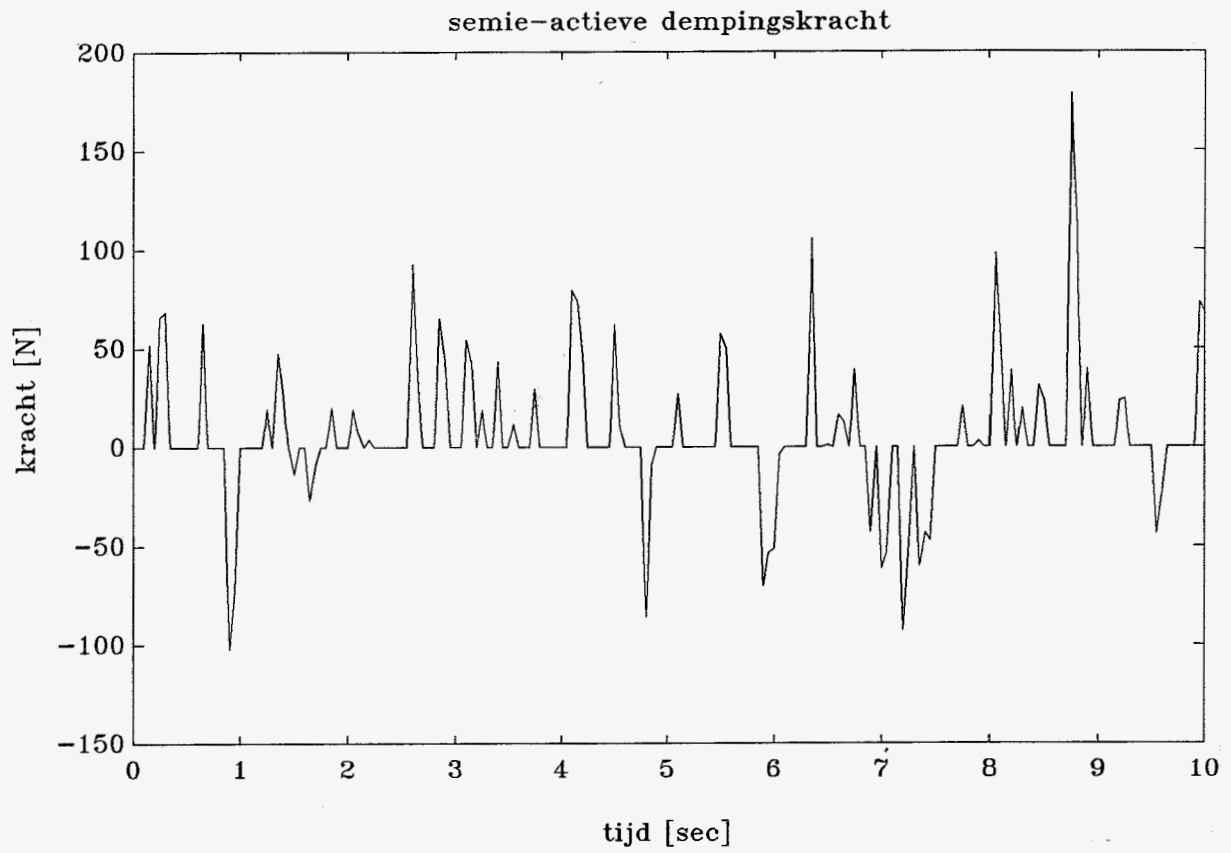


fig (6)

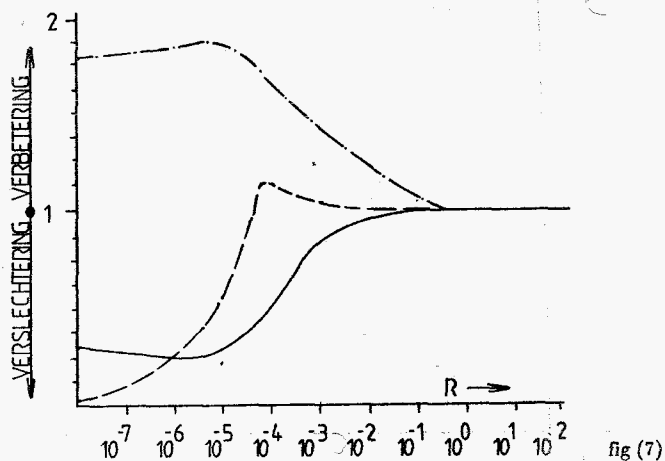


### 3 DE RESULTATEN

Alle resultaten uit de simulaties zijn verkregen met de volgende numerieke waarden;  $m_1=200$  kg,  $m_2=40$  kg,  $k_1=20 \cdot 10^3$  N/m,  $k_2=1,6 \cdot 10^5$  N/m,  $b=1050$  Nsm. Voor de coëfficiënten van het wegdek zijn de volgende waarden genomen;  $\alpha=0,06$   $m^{-1}$ ,  $\sigma=0,02$  M, voor de snelheid van de auto is 100 km/h gekozen. Door het kiezen van de weegfactoren is het mogelijk een gewenste afweging tussen regelinspanning en regelresultaat te maken. De resultaten van de simulaties – te vinden in bijlage C – zullen in dit hoofdstuk besproken worden. Allereerst wordt bekeken wat het variëren van de weegfactor van de regelinspanning voor invloed heeft op zowel het actieve als semi actieve systeem in vergelijking met het ongeregelde geval. Vervolgens wordt gekeken of het mogelijk is om respectievelijk de versnellingen van de carrosserie, de slag van de demper en de wielindrukking in het semi actieve geval –elk afzonderlijk– te reduceren. Tevens is onderzocht of het mogelijk is om zowel de wegligging als het comfort te verbeteren. Om de simulaties met elkaar te vergelijken zijn de standaarddeviaties bepaald van respectievelijk de versnellingen van de carrosserie, de slag van de demper en de wielindrukking

- In fig 7 is de weegfactor R gevarieerd en zijn de andere weegfactoren constant gehouden,  $Q_{11}=10$ ,  $Q_{22}=10$ ,  $Q_{33}=10^8$ . Deze set van weegfactoren zal dus de veiligheid proberen te vergroten ofwel de wielindrukking constant proberen houden. Uitgezet als functie van R zijn;

$$\frac{\text{std } y_1}{\text{std } y_{1sa}} := \frac{\text{ongeregelde versnellingen v/d carrosserie}}{\text{semi actief geregelde versnellingen v/d carrosserie}} \quad \text{graf 1}$$



$$\frac{\text{std } y_3 \text{ onregelde wielindrukking}}{\text{std } y_{3a} \text{ actief geregelde wielindrukking}} := \text{graf 2}$$

$$\frac{\text{std } y_3 \text{ onregelde wielindrukking}}{\text{std } y_{3sa} \text{ semie actief geregelde wielindrukking}} := \text{graf 3}$$

In fig (7) valt op dat als  $R > 0$  en er dus geen extra regelinspanning geleverd wordt dat dan het onregelde, het actief geregelde en het semi actief geregelde geval samenvallen.

Verder is aan grafiek 1 en 2 te zien dat het semi actief geregelde geval verslechtert beneden een bepaalde weefactor voor de regelinspanning, dit in tegenstelling tot het actief geregelde geval. Dus door het verkleinen van de weefactor voor de regelinspanning ofwel het vergroten van de regelinspanning wordt het semi actief geregelde geval op alle fronten slechter dan het onregelde geval (onafhankelijk van de waarden van de andere weefactoren). Deze totale verslechtering wordt ook aardig geïllustreerd door simulatie 1 bijlage C, waar semi actief de wielindrukking toeneemt beneden een bepaalde waarde voor de regelinspanning, maar waar actief de wielindrukking reduceert door het kiezen van kleine weefactoren voor de regelinspanning. Het actief geregelde geval geeft –naarmate de regelinspanning toeneemt– tot een bepaald waarde een verbetering t.o.v. het onregelde geval waarna deze verbetering nog een beetje afneemt maar vervolgens constant blijft.

Uit het optimum van grafiek 2 in fig 7 is af te leiden dat bij de semi actieve regeling een optimale regelinspanning bestaat. Dat dit optimum niet terug te vinden is in grafiek 1, komt doordat er met genoemde set van weefactoren geen waarde gehecht wordt aan het reduceren van de versnellingen van de carrosserie terwijl er in grafiek 2 wel geprobeerd is om de wielindrukking te reduceren.

Het comfort verhogen betekent het verlagen van de versnellingen van de carrosserie. Uit het voorgaande is te concluderen dat er in het semi actieve geval een bepaalde optimale waarde voor de weegfactor van de regelinspanning bestaat. Uit fig (7) blijkt dat die waarde voor het reduceren van de wielindrukking  $10^{-4}$  bedraagt en uit de simulaties 2 en 3 van bijlage C blijkt dat die waarde voor het reduceren van de versnellingen van de carrosserie  $10^{-3}$  bedraagt. In simulatie 2 van bijlage C treedt een reductie van de semi actief geregelde versnellingen t.o.v. de ongeregelde versnellingen op met een factor 3 als  $R=10^{-3}$ . Actief zijn de versnellingen van de carrosserie met een factor die vele malen groter is dan 3 te reduceren, zie simulatie 4 bijlage C.

- In fig 8 is het quotient van de standaarddeviatie van de ongeregelde versnellingen en de standaard deviatie van de semi actief geregelde versnellingen uitgezet tegen de weegfactor voor de versnellingen, en ook voor het quotient van de standaard deviatie van de ongeregelde wielindrukking en de semi actief geregelde wielindrukking, met  $Q_{22}=1$ ,  $Q_{33}=10^4$  en  $R=0,01$ .

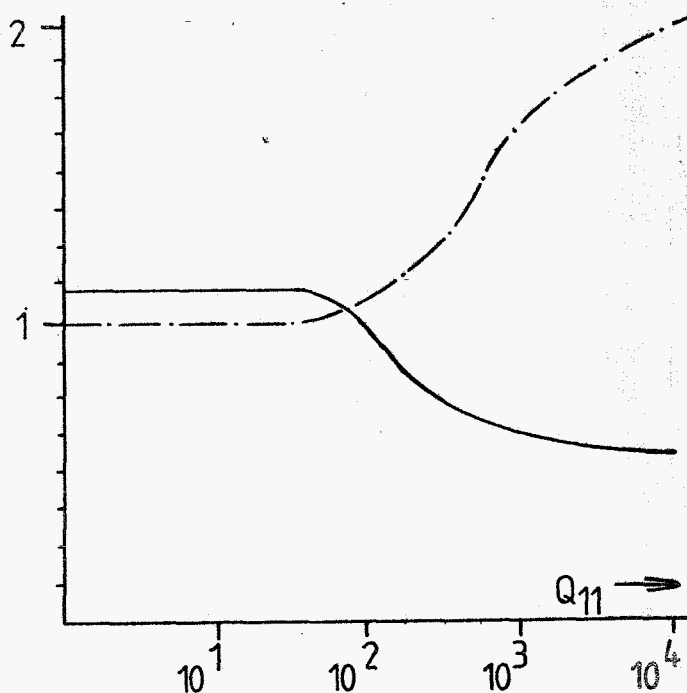


fig (8)

$$\frac{\text{std } y_1}{\text{std } y_{1sa}} := \frac{\text{ongeregelde versnellingen v/d carrosserie}}{\text{semie actief geregelde versnellingen v/d carrosserie}} \quad \text{graf 1}$$

$$\frac{\text{std } y_3}{\text{std } y_{3sa}} := \frac{\text{ongeregelde wielindrukking}}{\text{semie actief geregelde wielindrukking}} \quad \text{graf 2}$$

Uit fig (8) is af te leiden dat de versnellingen van de carrosserie vanaf een bepaalde waarde van  $Q_{11}$  gereduceerd worden en dat tijdens deze verbetering de wielindrukking verslechtert. Intuïtief is aan te voelen dat als het doel is de versnellingen van de carrosserie te reduceren lage dempingskrachten nodig zijn, terwijl als het doel is om een lage variantie van de wielindrukking te krijgen juist hoge dempingskrachten nodig zijn. Met andere woorden de doelstellingen comfort vergroten en wegligging verbeteren zijn tegenstrijdig. Dit wordt bevestigd door fig.(8). In bijlage C is van simulatie 5 t/m 16 geprobeerd om wegligging en comfort tegelijkertijd te verbeteren en ook hieruit blijkt dat dit niet mogelijk is.

- Versnellingen konden –zoals eerder al opgemerkt– semi actief met een factor 3 worden gereduceerd. De variantie van de wielindrukking is daarentegen semi actief niet zo fors te verbeteren, zie fig (7) waar voor de weegfactor van de wielindrukking  $Q_{33}=10^8$  genomen is terwijl de semi actief geregelde wegligging maximaal slechts met een factor 0,2 verbeterd. In fig. (9) is het quotient van de standaard deviatie van de semi actief geregelde wielindrukking en ongeregelde wielindrukking uitgezet als als functie van de weegfactor voor de wielindrukking met  $Q_{11}=10^4$ ,  $Q_{22}=10^2$  en  $R=0,01$ .

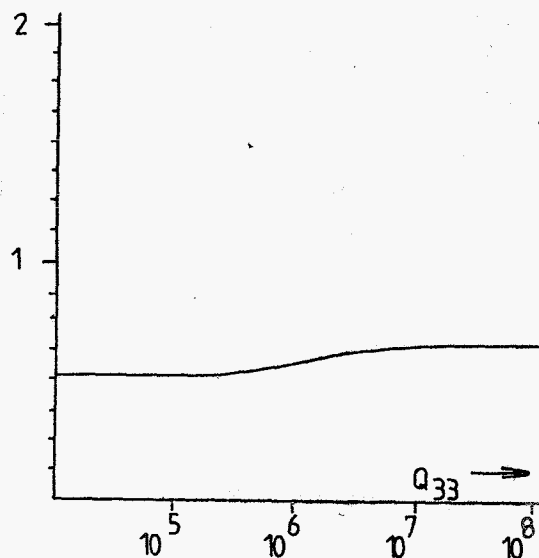


fig (9)

$$\frac{\text{std } y_3 \text{ on geregelde wielindrukking}}{\text{std } y_{3sa} \text{ semie actief geregelde wielindrukking}} :=$$

Ook uit fig (7) blijkt dat de variantie van de wielindrukking niet zo gek veel gereduceerd kan worden. Dit heeft automatisch tot gevolg, dat als de weegfactor voor de versnellingen  $Q_{11}$  wordt opgevoerd om de versnellingen te reduceren, de wegligging verslechterd maar dat die verslechtering slechts gering is.

Opmerking: dat fig (9) onder de 1 ligt komt doordat de versnellingen fors meegewogen zijn ( $Q_{11}=10^4$ ), maar het gaat zich hier immers om het aangeven van de kleine verbetering, die optreedt bij het opvoeren van de weegfactor voor de wielindrukking  $Q_{33}$ .

- Over de slag van de demper zou nu net zo'n verhaal opgehangen kunnen worden als over de wegligging, maar omdat de slag van de demper in alle simulaties –dus onafhankelijk van de weegfactoren– ruimschoots binnen het werkgebied ligt, zullen er in het nu volgende alleen algemene tendenzen van de slag besproken worden. Uit de simulaties 17, 18 en 19 van bijlage C blijkt dat de variantie van de slag net als de variantie van de wielindrukking nauwelijks is te reduceren. Uit de simulaties 20 t/m 23 van bijlage C blijkt de slag van de demper –indien er geen weegfactor aan de slag van de demper is toegekend– toe te nemen bij het toenemen van de regelinspanning. Maar zelfs bij zeer grote regelinspanning blijkt de slag van demper nog altijd veel kleiner te zijn dan z'n toelaatbare slag van 100 mm.

- Nu volgen er 4 plaatjes, fig (10) en (11) zijn bepaald met de weegfactoren  $R=10^{-3}$ ,  $Q_{11}=10^4$ ,  $Q_{22}=10^2$ ,  $Q_{33}=10^2$ , fig (12) en (13) zijn bepaald met de weegfactoren  $R=10^{-4}$ ,  $Q_{11}=10$ ,  $Q_{22}=10$ ,  $Q_{33}=10^8$ . Met de eerste set van weegfactoren worden de versnellingen het zwaarst meegewogen met de optimale weegfactor voor de regelinspanning, er treedt dan ook een reductie van de semi actief geregelde versnellingen t.o.v. de ongeregelde versnellingen op met een factor 3. Met de tweede set van weegfactoren wordt de variantie van de wielindrukking het zwaarst meegewogen met de optimale waarde voor de regelinspanning en zal dus de beste reductie van de wielindrukking te zien zijn. In fig (10) zijn met de

eerste set van weegfactoren, de actief en semi actief geregelde versnellingen t.o.v. de ongeregelde versnellingen van de carrosserie weergeven. In fig (11) is met de eerste set van weegfactoren, de actief en semi actief geregelde wielindrukking t.o.v. de ongeregelde wielindrukking weergeven. In fig (12) is met de tweede set van weegfactoren, de actief en semi actief geregelde wielindrukking t.o.v. de ongeregelde wielindrukking weergeven. In fig (13) zijn met de tweede set van weegfactoren, de actief en semi actief geregelde versnellingen t.o.v. de ongeregelde versnellingen van de carrosserie weergeven.

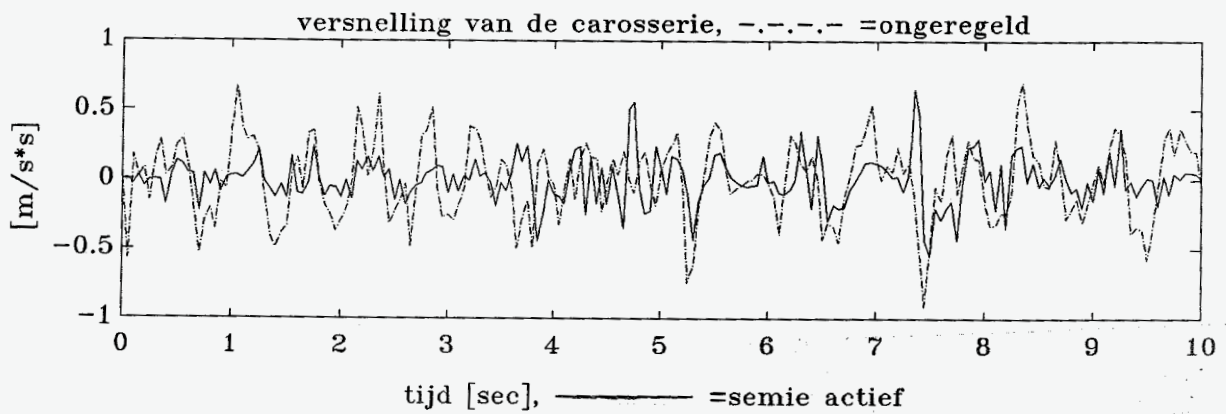
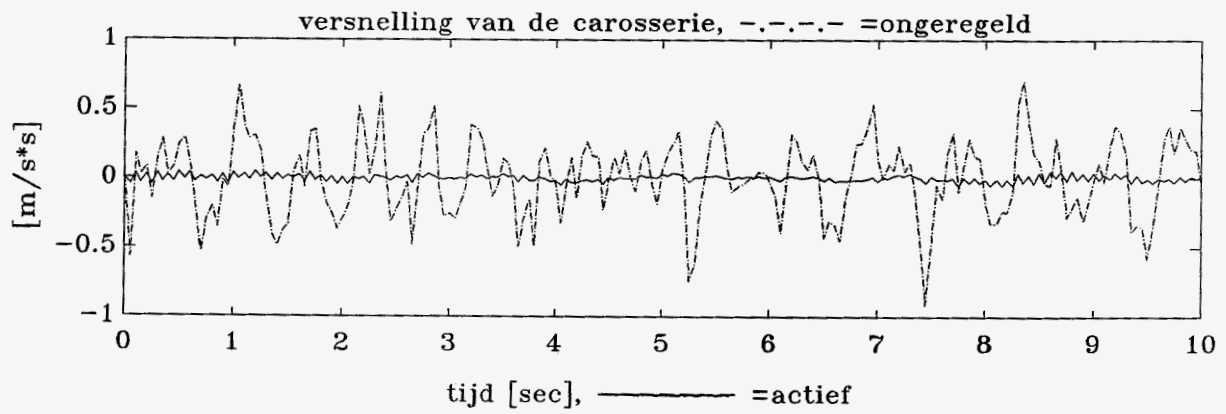


fig (10)

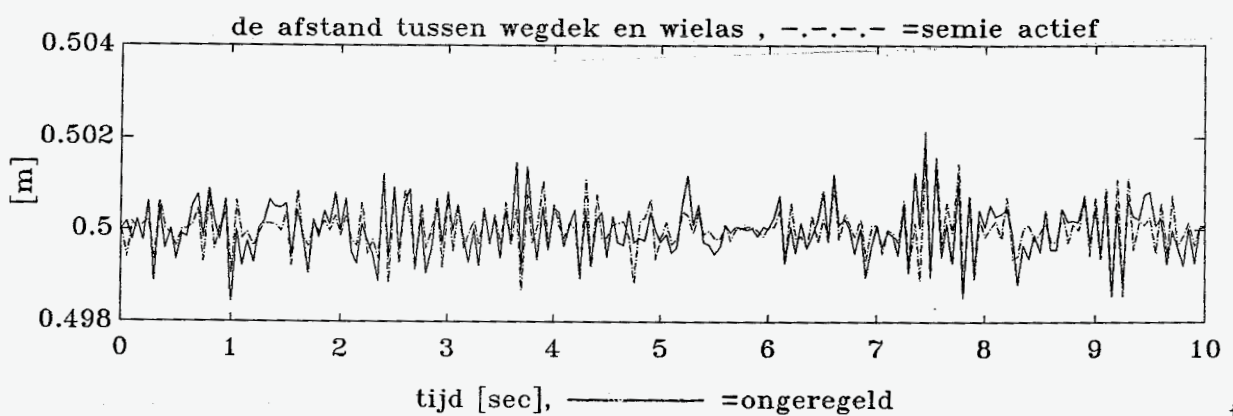
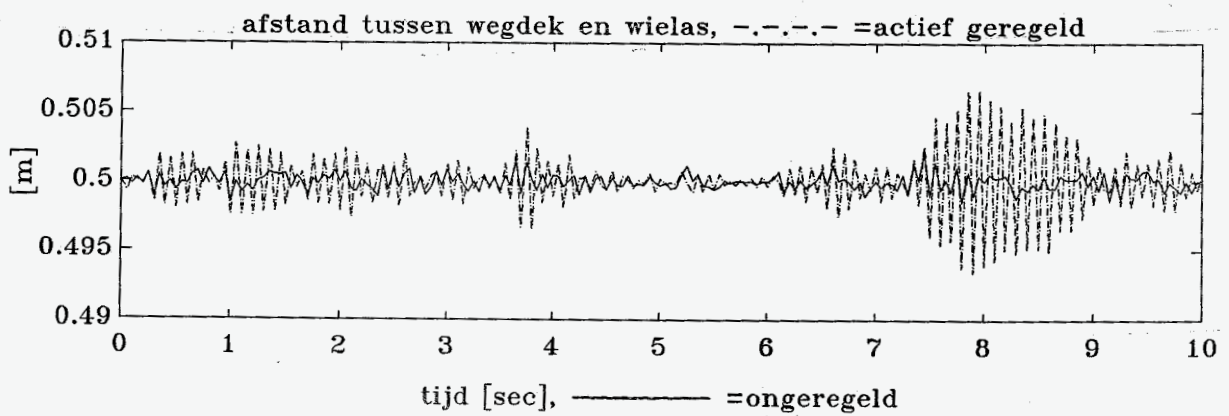


fig (11)

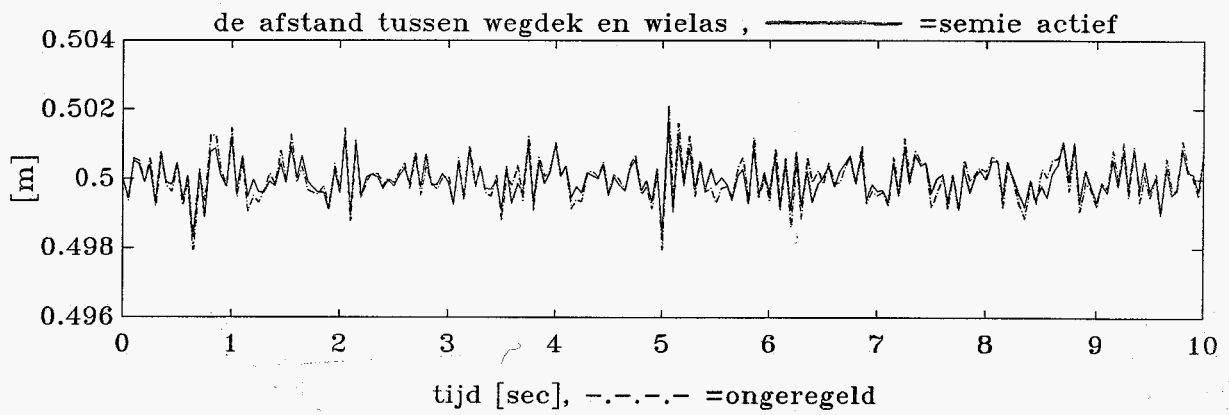
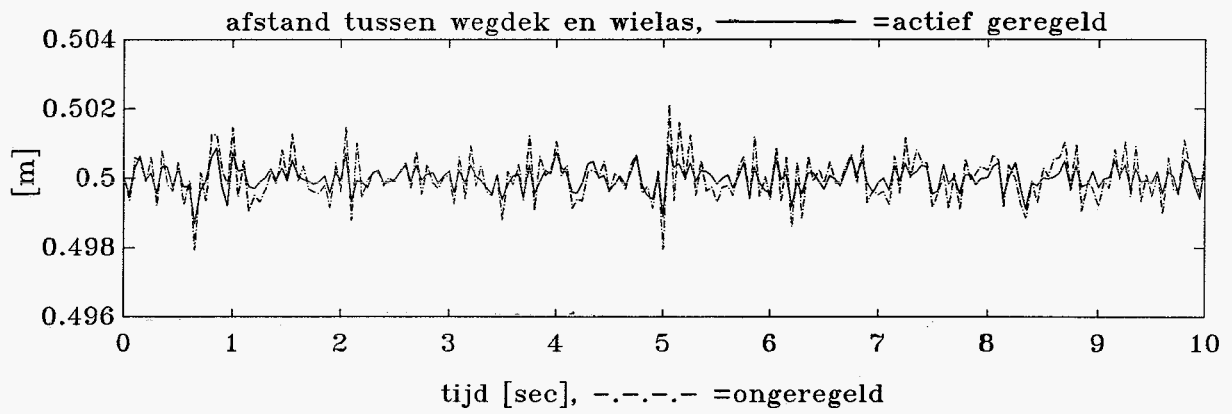


fig (12)

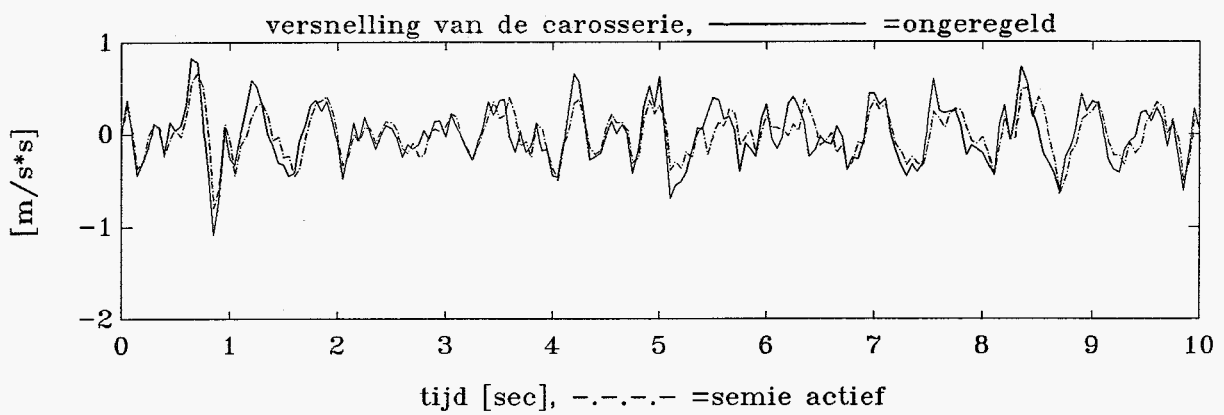
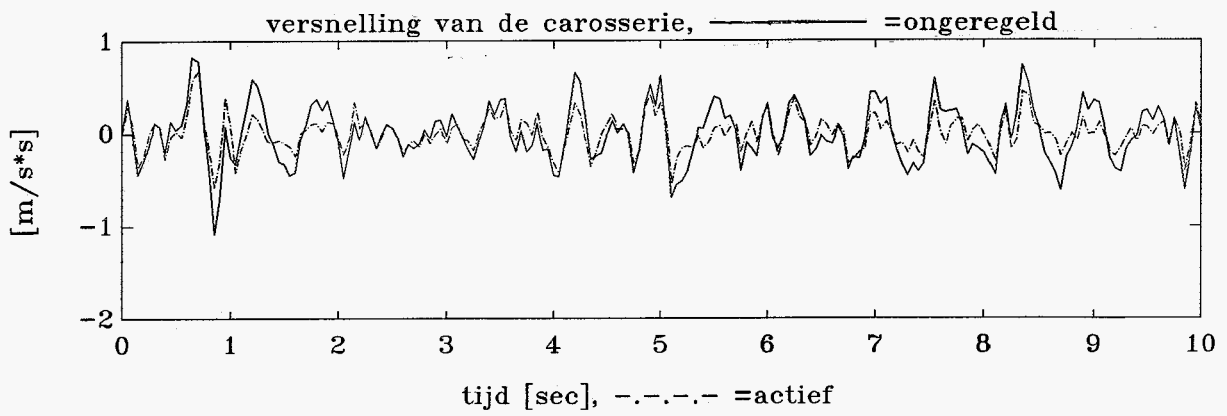


fig (13)



## 4 DE CONCLUSIES

De in dit verslag gebruikte lineaire regeltheorie vormt in combinatie met PC-MATLAB een goed gereedschap om het gedrag van het geregelde systeem te bestuderen. De dynamica van de (semi) actieve demper is in dit werk verwaarloosd. Om dit in rekening te brengen moet er een extra variabele aan de toestandsvektor worden toegevoegd. Uit de resultaten van hoofdstuk 4 kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

**1<sup>e</sup> conclusie:** Met zowel semi als actieve demping is een verbetering van het comfort *of* de wegligging te bewerkstelligen. Concreet: als de versnellingen van de carrosserie worden gereduceerd neemt de variantie van de wielindrukking toe en omgekeerd, m.a.w. of de versnellingen van de carrosserie of de variantie van de wielindrukking is te reduceren, maar beide tegelijk kan niet.

**2<sup>e</sup> conclusie:** De versnellingen van de carrosserie kunnen actief met een factor 10 gereduceerd worden, terwijl ze semi actief met een factor 3 gereduceerd kunnen worden. De variantie van de wielindrukking daarentegen kan niet zo fors gereduceerd worden. Het is dus lastiger om de wegligging te verbeteren dan het comfort.

**3<sup>e</sup> conclusie:** Het heeft in het actief geregelde geval geen zin, wanneer comfort of wegligging verbeterd dient te worden, om de regelinspanning na een bepaalde waarde nog toe te laten nemen.

**4<sup>e</sup> conclusie:** In het semi actief geregelde geval bestaat er een optimale regelinspanning, waarbij de variantie van de wielindrukking of de versnelling van de carrosserie, een maximale reductie t.o.v. het ongeregelde geval ondervindt. Wordt de regelinspanning na het bereiken van de optimale waarde toch nog verder opgevoerd dan treedt er tot een bepaalde waarde een algemene verslechtering van respectievelijk de versnellingen van de carrosserie, de slag van de demper en de variantie van de wielindrukking op. Wordt de regelinspanning nog verder opgevoerd dan de laatst genoemde waarde dan zal er geen verslechtering en geen

verbetering meer optreden.

**5<sup>e</sup> conclusie:** Als er geen regelinspanning geleverd wordt gedragen het actief, het semi actief en het ongeregelde geval zich hetzelfde.

#### 4.2. suggesties voor verder onderzoek

Het is mogelijk dat het weglaten van de passieve demper in het quartercar model tot een beter te regelen systeem leidt.

In een vervolg onderzoek zou de mogelijkheid van een aparte regeling voor handling en comfort bekeken kunnen worden. Een regeling die pas op comfort regelt als de veiligheid is gegarandeerd (safety first). Een maat voor de veiligheid zou afgeleid kunnen worden uit onderstaande zaken, [5]:

- 1) De stand van het gaspedaal en de verandering hiervan.
- 2) De stand van het rempedaal en de verandering hiervan.
- 3) De stuurhoek en de verandering hiervan.
- 3) De versnellingen van de carrosserie.
- 5) De toestandsvektor.
- 6) Gegevens uit een eventueel aanwezig abs remsysteem.
- 7) De snelheid van de auto.
- 8) De belading van de auto.

Samengevat: Het ontwerpen van een regelstrategie waarbij wegdekreconstructie wordt toegepast en waarbij handling en comfort apart geregeld worden afhankelijk van een aantal te meten grootheden aan de auto, waarbij er pas op comfort geregeld wordt als de veiligheid dit toelaat. Een volgende stap zou natuurlijk zijn om het quarter car model uit te breiden naar half car model en dit vervolgens weer uit te breiden naar full car model.

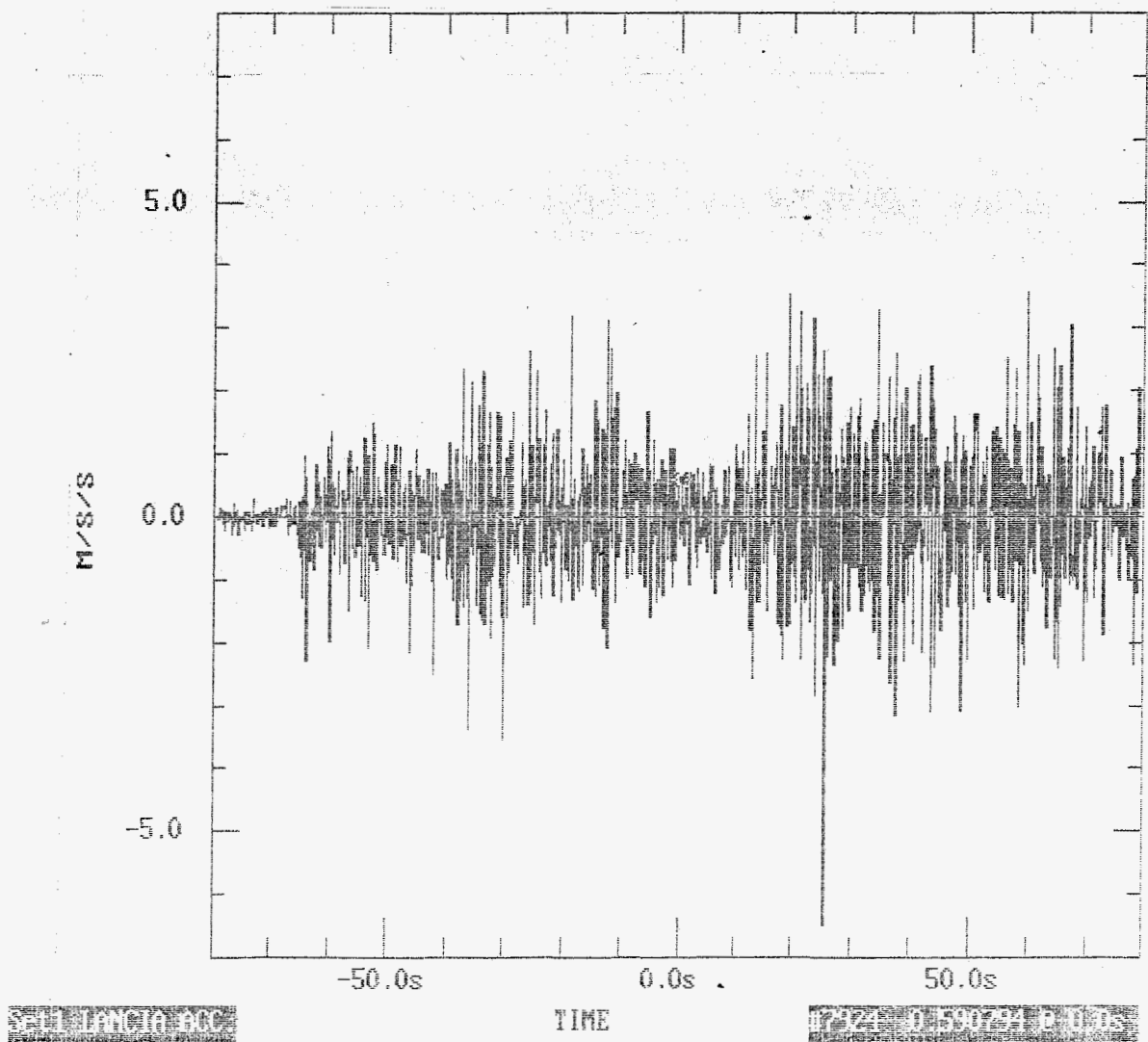
## 5 LITERATUURLIJST

- [1] **MITSCHE, PROF.DR.ING. M.:** *Fahrdynamic und Federcomfort.*  
ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 87(1985)11.
  
- [2] **HAC, A.:** *Adaptive Control of Vehicle Suspension.*  
Vehicle System dynamics, 198 , p.57–74.
  
- [3] **KOK, J.J.:** *collegedictaat Werktuigkundige regeltechniek 2.*  
vakgroep fundamentele werktuigbouwkunde, versie 1985/86.
  
- [4] **HAC, A.:** *Suspension optimization of a 2–dof vehicle model using  
a stochastic optimal control technique.*  
Vehicle System Dynamics, 1985, p. 343–357.
  
- [5] **KOBAYASHI, Y., ITO, S.:** *Recent Suspension Techniques of Japanese  
Passenger Vehicles.* JSAE Review, April 85.
  
- [6] **Fruhauf, dipl.–ing. F.:** *Entwurf einer aktiven fahrzeugfederung  
fur zeitverschobene anregungsprozesse.* Fortschritte berichte VDI,  
1985.

BIJLAGE A

In onderstaande figuur is de versnelling van de carrosserie van een lancia uitgezet tegen de tijd, berekend hieruit is de standaarddeviatie. Deze meting is op 20-dec-89 (16:49:46) bij Koni uitgevoerd.

STANDAARDDEVIATIE = 0.205882



## BIJLAGE B

```
clc
disp('      In dit programma heb ik het artikel ')
disp('')
disp('      van Hac gesimuleert, oftewel in de toestands–')
disp('')
disp('      beschrijving is ook nog het wegdek opgenomen.')
disp('')
disp('      In tegenstelling tot paul.m en PP.m berekent LQR nu')
disp('')
disp('      wel een optimale regelwet ondanks het feit')
disp('')
disp('      dat het systeem niet volledig regelbaar is')
disp('')
disp('      Op 6–4–90 heb ik de indruk gekregen dat')
disp('')
disp('      ik met Hac niet zulke grote vershillen in de')
disp('')
disp('      verhouding van de weegfactoren hoeft te kiezen')
```

```
disp('')
disp('      in vergelijking met paul.m en pp.m ,waar met 4 toestands-')
disp('')
disp('      grootheden wordt gewerkt.')
```

disp('')  
disp(' Stike any key to continue')

pause

```
clc,clg,
%%echo on,
% quartercar Hac.m
% optimale regeling van een quartercar model volgens de theorie
% van regelen 2 en literatuur van A. hac;"vehicle active suspen-
% sion optimization
%
% berekening van een optimale statische toestandsterugkoppeling
% model: primary suspension;een veer, een passieve demper en een
%      semi actieve demper.
%      secondary suspension; een veer(model voor de band).
```

```
% de volgende realistische waarden heb zijn aangenomen; m1=200 [kg],
% m2=40 [kg],b=1050 [Ns/m], k1=2e4 [N/m],k2=1.6e5 [N/m],
%
echo off;
disp('          strike any key to continue');
%%pause;
clc;
% m1=input('0.25*(massa van carrosserie) [kg] m= ')
% m2=input('massa van de onafgeveerde massa [kg] m= ')
% k1=input('veerstijfheid van de veer [N/m] k1= ')
% k2=input('veerstijfheid van de band [N/m] k2= ')
% b=input('dempingscoeff. passieve demper [Ns/m] b= ')

m1=200;
m2=40;
k1=20e3;
k2=1.6e5;
b=1050;

%%echo on

% toestands en uitgangsvergelijking
%
%  $[dx/dt]=A*x(t)+B*u(t)+F*r(t)$ 
```

```
%  $y(t) = C \cdot x(t) + D \cdot u(t) + v(t)$ 
%
% [x]=(5*1) toestandsvector
% [u]=(1*1) ingangssignaal
% [r]=(1*1) systeemruis (storingssignaal dat de weg genereert)
% [y]=(3*1) uitgangssignaal
% [v]=(1*1) observatieruis (deze wordt in dit programma nog niet meegenomen)
% concreet
% [x]=[y1,dy1/dt,y2,dy2/dt,w]
%
%
%  $(dw(t))/dt + a \cdot v \cdot w(t) = r(t)$ 
% [y]=[dy1^2/dt^2,(y1-y2),(y2-y0)]
echo off;
%%disp('          strike any key to continue')
%%pause;
clc;

%disp('');disp('');
%a=input(' factor voor het wegdek a= ');
a=.06;
%disp('');disp('');
%s= input(' variantie van het wegdek s= ');
s=.02;
```



```
%disp('');disp('');
%v=input(' snelheid van de auto in [km/h] v= ');
v=100;
v=v*1000/3600;
clc,clg,
%h=input(' geef de afstand van weg tot wielas in rust h= ')
h=.5;

A=[0,1,0,0,0;-k1/m1,-b/m1,k1/m1,b/m1,0;0,0,0,1,0;k1/m2,b/m2,-(k1+k2)/m2,-
b/m2,k2/m2;0,0,0,0,-a*v];
B=[0;1/m1;0;-1/m2;0];
C=[-k1/m1,-b/m1,k1/m1,b/m1,0;1,0,-1,0,0;0,0,1,0,-1];
G=[0;0;0;0;1];
D=[1/m1;0;0];
echo off;
%%disp('      bepaal of het systeem regelbaar en reconstrueerbaar is');

%%disp('      strike any key to continue');
%%pause;

controllability=ctrb(A,B);controllabilityrang=rank(controllability);
%% if controllabilityrang==size(A),
%% disp('');disp('');disp('');disp('');
```

```
%% disp('      het systeem is regelbaar');
%% disp('');disp('');disp('');disp('');
%% else disp('');disp('');disp('');disp('');
%%     disp('      systeem is niet regelbaar');
%%     disp('');disp('');disp('');disp('');
%% end
%%observability=obsv(A,C);observabilityrang=rank(observability);
%% if observabilityrang==size(A),
%%     disp(''); disp(''); disp(''); disp('');
%%     disp('      het systeem is reconstrueerbaar');
%%     disp(''); disp('');disp('');disp('');
%% else disp('');disp('');disp('');disp('');
%%     disp('      systeem is niet reconstrueerbaar');
%%     disp('');disp('');disp('');disp('');
%% end
%%disp('      strike any key to continue');
%%pause;
clc

%-----

%disp('het opstellen van een tijdarray t=[0,tinc,teind]');
%disp('');disp('');disp('');
%teind=input('eindtijd van de simulatie teind= ');
teind=10;
```

```
%disp('');disp('');disp('');
%tinc=input('tijdsincrement tinc= ');
tinc=.01;
%disp('');disp('');disp('');disp('');
t=[0:tinc:teind];
%disp(' strike any key to continue');
%pause;
clc;
%%disp('de systeemruis is in deze beschrijving niet het wegdekprofiel !!!!!')
%%disp('het wegdekprofiel is namenlijk expliciet in de toestandsbeschrij-'
ving opgenomen.De systeemruis is nu een witte ruis die als onder-'
%%disp('deel van de vergelijking van het wegdekprofiel in de toestandsbe-'
schrijving zijn opgenomen');
%%rand('normal');
rr=rand(t);
r=(2*s*s*a*v)^.5*rr;
r=r';
%nu is r een kolom want in lsim moet r als kolom
```

%

---

```
%%disp('de ligging van de eigenwaarde in het ongeregelde geval');
%%eig(A)
%%disp(' nu volgen karakteristieken van toestand en uitgang van ongeregelde
geval')
%%disp(' strike any key to continue')
%%pause
x=lsim(A,[0;0;0;0;1],eye(5,5),[0;0;0;0;0],r,t);
y=lsim(A,[0;0;0;0;1],C,[0;0;0],r,t);
eig(A)
disp('strike any key to continue')
pause
%%subplot(211);
%%plot(t,x(:,1),t,x(:,3));
%%ylabel('m');
%%xlabel('tijd [sec] ongeregelde geval');
%%title('rood=verpl.car.,groen=verplaatsing wiel');
%%subplot(212);
%%plot(t,x(:,2),t,x(:,4));
%%ylabel('m/s');
%%xlabel('tijd [sec] ongeregelde geval');
%%title('rood=snelheid carosserie,groen=snelheid wiel');
%%pause;
%%clc,clg
%%subplot(111);
%%plot(t,x(:,5));
%%ylabel('m');
```

```
%%xlabel('tijd [sec] ');
%%title('het wegdekprofiel');
%%pause
%%subplot(211);
%%plot(t,y(:,1));
%%xlabel('tijd [sec] onregelde geval');
%%ylabel('m/s*s');
%%title('de versnelling carrosserie');
%%subplot(212)
%%plot(t,y(:,2));
%%xlabel('tijd [sec] onregelde geval');
%%ylabel('m');
%%title('de slag ');
%%pause;
n=teind/tinc+1
clc,clg,
%%subplot(111);
H=y(:,3)+.5*ones(n,1);
%%plot(t,H);
%%xlabel('tijd [sec] onregelde geval');
%%ylabel('m');
%%title('de werkelijke afstand tussen wegdek en wielas');
%%pause;
clc,clg,
```

```
%  
  
%%disp('nù volgen gegevens en karakteristieken van toestand en uitgang bij ');  
%%disp('optimale toestandsterugkoppeling');  
%%disp(' ');  
Q(1,1)=input('weegfactor voor de versnelling van de carrosserie Q(1,1)= ');  
Q(2,2)=input('weegfactor voor de slag van de demper Q(2,2)= ');  
Q(3,3)=input('weegfactor voor de contactkracht Q(3,3)= ');  
R=input('weegfactor voor de regelinspanning R= ');  
%%disp('strike any key to continue');  
%%pause;  
Lo=lqry(A,B,C,D,Q,R);  
regelpolen=eig(A-B*Lo);  
%%disp('de ligging van de eigenwaarden in het het geregelde geval');  
%%disp('met optimale toestandsterugkoppeling');  
eig(A-B*Lo)  
xo=lsim((A-B*Lo),G,eye(5,5),[0;0;0;0],r,t);  
uo=-Lo*xo';  
yo=lsim((A-B*Lo),G,(C-D*Lo),[0;0;0],r,t);  
disp('strike any key to continue');  
pause;
```

%in het criterium wordt de uitgang en de ingang meegenomen

```
clc,clg
%%subplot(211);
%%plot(t,xo(:,1),t,xo(:,3));
%%ylabel('[m]');
%%xlabel('tijd [sec] geregelde geval');
%%title('verplaatsing carrosserie=rood, verplaatsing wiel=groen ');
%%subplot(212);
%%plot(t,xo(:,2),t,xo(:,4));
%%ylabel('[m/s]');
%%xlabel('tijd [sec] geregelde geval');
%%title('snelheid carrosserie=rood,snelheid wiel=groen ');
%%pause;
clc,clg
%%disp(' geregede en ongeregelde wegdek moet hetzelfde zijn zie vldend plaatje')
%%pause
clc,clg
%%plot(t,x(:,5),t,xo(:,5));
%%xlabel('tijd [sec]');
%%title('rood wegdek en groen =wegdek ');
%%pause;
clc,clg,
subplot(111);
```

```
%%plot(t,yo(:,1));
%%xlabel('tijd [sec] geregelde geval');
%%ylabel('versnelling carosserie [m/s*s]');
%%title('de uitgang yo(:,1) (=de versnelling van de carosserie)');
%%pause;
clc,clg,
%%plot(t,yo(:,2));
%%xlabel('tijd [sec] geregelde geval');
%%ylabel('slag [m]');
%%title('de uitgang yo(:,2) de slag van de demper');
%%pause;
clc,clg,
Ho=.5*ones(n,1)+yo(:,3);
%%plot(t,Ho);
%%xlabel('tijd [sec] geregelde geval');
%%title('geregelde werkelijke afstand tusse wegdek en wiel');
%%ylabel('[m]');
%%pause;
clc,clg,
plot(t,y(:,1),t,yo(:,1));
xlabel('tijd [sec] groen=geregeld ');
ylabel('versnelling carosserie [m/s*s]');
title('de versnelling van de carosserie rood=ongeregeld');
pause;
clc,clg,
plot(t,y(:,2),t,yo(:,2));
```



```
xlabel('tijd [sec] groen=geregeld');
ylabel('slag [m]');
title('de slag van de demper rood=ongeregeld');
pause;
clc,clg,
plot(t,H,t,Ho);
xlabel('tijd [sec] groen=geregeld');
ylabel(' [m]');
title('afstand tussen wegdek en wiel, rood=ongeregeld');
pause;
clc,clg,
```

```
%
```

---

```
%%disp('achtereenvolgens worden de volgende karakteristieken vergeleken');
%%disp('1) geregelde–ongeregelde verplaatsing v/d carrosserie(toestand x1)');
%%disp('2) geregelde–ongeregelde snelheid v/d carrosserie(toestand x2)');
%deze heb ik al een keer eerder afgedrukt;
%%disp('3) geregelde–ongeregelde versnelling v/d carrosserie ');
%%disp('strike any key to continue');
%%pause;
```

```
clc,clg'  
%%subplot(111);  
%%plot(t,x(:,1),t,xo(:,1));  
%%xlabel('tijd [sec] ongeregeld=rood geregeld=groen');  
%%ylabel('toestand x1,xo1 [m]');  
%%title('geregelde–ongeregelde verplaatsing vd carosserie x1=rood xo1=groen');  
%%pause;  
clg,clc,  
%%plot(t,x(:,2),t,xo(:,2));  
%%xlabel('tijd [sec] ongeregeld=rood geregeld=groen');  
%%ylabel('toestand x2,xo2 [m]');  
%%title('geregelde–ongeregelde snelheid vd carosserie x2=rood xo2=groen');  
%%pause;  
%%subplot(111);  
clg,clc,  
%%plot(t,y(:,1),t,yo(:,1));  
%%xlabel('tijd [sec] ongeregeld=rood geregeld=groen');  
%%ylabel('uitgang y,yo [m/s*s]');  
%%title('"geregelde–ongeregelde"versnelling vd carosserie y=rood yo=groen');  
%%pause;  
clc,clg,
```

```
disp('');disp('');disp('');disp('');
disp('      het systeem wordt nu omgebouwd van actieve demping ');
disp('      ');
disp('      naar semie-actieve demping');
disp('');
disp('strike any key to continue');
pause;
vrel=xo(:,4)-xo(:,2);
n=teind/tinc+1;
P=uo.*vrel';
usao=uo;
for i=1:n,
    if P(1,i)>0,
        usao(i)=0;
    end
end
end
%%subplot(121);
%%plot(vrel,uo);
%%title('actieve demping');
%%xlabel('vrel [m/s]');
%%ylabel('actieve dempings kracht [N]');
%%subplot(122);
%%plot(vrel,usao);
%%title('semie actieve demping');
%%xlabel('vrel [m/s]');
%%ylabel('semie actieve dempings kracht [N]');
```

```
%%pause,clc,clg,  
%%subplot(111);  
%%plot(vrel,uo,vrel,usao);  
%%title('rood=actieve ingang, groen=semie actieve demping');  
%%xlabel('vrel [m/s]');  
%%ylabel('dempings kracht [N]');  
%%pause,clc,clg,
```

---

```
%
```

```
disp('');disp('');  
disp('nu volgen de uitgangen wanneer je met semie-actieve dempers werkt')  
disp('');disp('');  
disp('strike any key to continue');  
BB=[0,0;1/m1,0;0,0;-1/m2,0;0,1];  
ysao=lsim(A,BB,C,[1/m1,0;0,0;0,0],[usao',r],t);  
%%subplot(111);  
%%plot(t,ysao(:,1));  
%%xlabel('tijd [sec] geregelde geval');  
%%ylabel('versnelling carrosserie [m/s*s]');  
%%title('de uitgang yo(:,1) (=de versnelling van de carrosserie)');  
%%pause;  
clc,clg,  
%%plot(t,ysao(:,2));
```

```
%%xlabel('tijd [sec] geregelde geval');
%%ylabel('slag [m]');
%%title('de uitgang yo(:,2) de slag van de demper');
%%pause;
clc,clg,
%%plot(t,ysao(:,3));
%%xlabel('tijd [sec] geregelde geval');
%%ylabel('contactkracht [N]');
%%title('de uitgang yo(:,3) de contactkracht maar niet de echte!!!!');
%%pause;
clc,clg,
%%disp('');disp('');
disp('nu volgen de karakteristieken waarin de uitgangen van het actief ')
disp('gedempt systeem vergeleken worden met die van het semie actief ')
disp('gedempt systeem ')
disp('');disp('');
disp('strike any key to continue');
pause;
plot(t,ysao(:,1),t,yo(:,1));
xlabel('tijd [sec] ');
ylabel('versnelling carosserie [m/s*s]');
title('versnelling van de carosserie,rood=semie actief,groen=actief');
pause;
```

```
clc,clg,
plot(t,ysao(:,2),t,yo(:,2));
xlabel('tijd [sec] ');
ylabel('slag [m]');
title('de slag van de demper,rood=semie actief,groen=actief');
pause;
clc,clg,
plot(t,Hsao,t,Ho);
xlabel('tijd [sec] ');
ylabel('[m]');
title('de afstand tusse wiel-weg,rood=semie actief,groen=actief');
pause;
clc,clg,
disp('');disp('');
disp('nu volgen de karakteristieken waarin de uitgangen van het actief ')
disp('gedempt systeem vergeleken worden met die van het semie actief ')
disp('gedempt systeem en het ongeregelde systeem')
disp('');disp('');
disp('strike any key to continue');
pause;
plot(t,ysao(:,1),t,yo(:,1),t,y(:,1));
xlabel('tijd [sec] ');
ylabel('versnelling carrosserie [m/s*s]');
```

```
title('rood=semie actief, groen=actief, blauw ongeregeld');
pause;
clc, clg,
plot(t, ysao(:,2), t, yo(:,2), t, y(:,2));
xlabel('tijd [sec] ');
ylabel('slag [m]');
title('rood=semie actief, groen=actief, blauw ongeregeld');
pause;
clc, clg,
Hsao = .5 * ones(n,1) + ysao(:,3);
plot(t, Hsao, t, Ho, t, H);
xlabel('tijd [sec] ');
ylabel('[m]');
title('de afstand tusse wiel-weg, rood=semie actief, groen=actief');
pause;
clc, clg,
disp('std y1 yo1 ysao1')
std(y(:,1))
std(yo(:,1))
std(ysao(:,1))
pause
clc
disp('mean y1 yo1 ysao1')
mean(y(:,1))
mean(yo(:,1))
mean(ysao(:,1))
pause
```

```
clc
disp('std y2 yo2 ysao2')
std(y(:,2))
std(yo(:,2))
std(ysao(:,2))
pause
clc
disp('mean y2 yo2 ysao2')
mean(y(:,2))
mean(yo(:,2))
mean(ysao(:,2))
pause
clc
disp('std y3 yo3 ysao3')
std(y(:,3))
std(yo(:,3))
std(ysao(:,3))
pause
clc
disp('mean y3 yo3 ysao3')
mean(y(:,3))
mean(yo(:,3))
mean(ysao(:,3))
pause
```



BIJLAGE C

simulatie 1:  $R=10E-5$ ,  $Q_{11}=10$ ,  $Q_{22}=10$ ,  $Q_{33}=10E8$

	ongeregeld	actief geregeld	semie- actief geregeld
std.y <sub>1</sub>	0.22	1.07	1.01
std.y <sub>2</sub>	0.013	0.068	0.046
std.y <sub>3</sub>	4.6E-4	2.5E-4	8.1E-4

simulatie 2:  $R=10E-3$ ,  $Q_{11}=10E4$ ,  $Q_{22}=10E2$ ,  $Q_{33}=10E2$

	ongeregeld	actief geregeld	semie- actief geregeld
std.y <sub>1</sub>	0.196	0.04	0.065
std.y <sub>2</sub>	0.0011	0.0023	0.0013
std.y <sub>3</sub>	5E-4	0.0019	0.0018

simulatie 3:  $R=10E-3$ ,  $Q_{11}=10E4$ ,  $Q_{22}=1$ ,  $Q_{33}=10E4$

	ongeregeld	actief geregeld	semie- actief geregeld
std.y <sub>1</sub>	0.20	0.04	0.08
std.y <sub>2</sub>	0.0012	0.0026	0.0025
std.y <sub>3</sub>	4.6E-4	0.0019	0.0018

simulatie 4:  $R=10E-5$ ,  $Q_{11}=10E6$ ,  $Q_{22}=10E2$ ,  $Q_{33}=10E2$

	ongeregeld	actief geregeld	semie- actief geregeld
std.y <sub>1</sub>	0.19	0.0015	0.17
std.y <sub>2</sub>	0.0012	0.0071	0.0068
std.y <sub>3</sub>	4.7E-4	0.0069	0.0067

simulatie 5:  $R=10E-2$ ,  $Q_{11}=10E8$ ,  $Q_{22}=10$ ,  $Q_{33}=10$

	ongeregeld	actief geregeld	semie- actief geregeld
std.y <sub>1</sub>	0.18	0.0027	0.083
std.y <sub>2</sub>	0.001	0.004	0.0039
std.y <sub>3</sub>	4.6E-4	0.0039	0.0037

simulatie 6:  $R=10E-2$ ,  $Q_{11}=10E2$ ,  $Q_{22}=10$ ,  $Q_{33}=10E5$

	ongeregeld	actief geregeld	semie- actief geregeld
std.y <sub>1</sub>	0.18	0.16	0.16
std.y <sub>2</sub>	9E-4	8E-4	8E-4
std.y <sub>3</sub>	4.7E-4	4.9E-4	4.9E-3

simulatie 7:  $R=10E-2$ ,  $Q_{11}=10E4$ ,  $Q_{22}=10E2$ ,  $Q_{33}=10E5$

	ongeregeld	actief geregeld	semie- actief geregeld
std.y <sub>1</sub>	0.21	0.07	0.08
std.y <sub>2</sub>	0.0013	0.0016	0.0015
std.y <sub>3</sub>	4.8E-4	9.6E-4	9.4E-4

simulatie 8:  $R=10E-2$ ,  $Q_{11}=10E4$ ,  $Q_{22}=10E2$ ,  $Q_{33}=10E8$

	ongeregeld	actief geregeld	semie- actief geregeld
std.y <sub>1</sub>	0.20	0.10	0.11
std.y <sub>2</sub>	0.0012	0.0015	0.0014
std.y <sub>3</sub>	4.8E-4	8E-4	7E-4

simulatie 9:  $R=10E-2$ ,  $Q_{11}=10E4$ ,  $Q_{22}=10$ ,  $Q_{33}=10E8$

	ongeregeld	actief geregeld	semie- actief geregeld
std.y <sub>1</sub>	0.20	0.09	0.10
std.y <sub>2</sub>	0.0012	0.0013	0.0012
std.y <sub>3</sub>	4.8E-4	8E-4	8E-4

simulatie 10:  $R=10E-2$ ,  $Q_{11}=10E2$ ,  $Q_{22}=1$ ,  $Q_{33}=10E6$

	ongeregeld	actief geregeld	semie- actief geregeld
std.y <sub>1</sub>	0.20	0.18	0.19
std.y <sub>2</sub>	0.0012	0.0011	0.0012
std.y <sub>3</sub>	4.9E-4	9.1E-4	5.1E-4

simulatie 11:  $R=10E-2$ ,  $Q_{11}=10E2$ ,  $Q_{22}=1$ ,  $Q_{33}=10E8$

	ongeregeld	actief geregeld	semie- actief geregeld
std.y <sub>1</sub>	0.20	0.21	0.20
std.y <sub>2</sub>	0.0012	0.0011	0.0012
std.y <sub>3</sub>	4.6E-4	4.1E-4	4.5E-4

simulatie 12:  $R=10E-2$ ,  $Q_{11}=10E4$ ,  $Q_{22}=1$ ,  $Q_{33}=10E8$

	ongeregeld	actief geregeld	semie- actief geregeld
std.y <sub>1</sub>	0.21	0.09	0.10
std.y <sub>2</sub>	0.0014	0.0014	0.0013
std.y <sub>3</sub>	4.6E-4	7.5E-4	7.4E-5

simulatie 13:  $R=10E-2$ ,  $Q_{11}=2.5E2$ ,  $Q_{22}=1$ ,  $Q_{33}=10E8$

	ongeregeld	actief geregeld	semie- actief geregeld
std.y <sub>1</sub>	0.21	0.13	0.14
std.y <sub>2</sub>	0.0014	0.0013	0.0012
std.y <sub>3</sub>	4.8E-4	5.8E-4	5.8E-4

simulatie 14:  $R=10E-2$ ,  $Q_{11}=1.5E-2$ ,  $Q_{22}=1$ ,  $Q_{33}=10E8$

	ongeregeld	actief geregeld	semie- actief geregeld
std.y <sub>1</sub>	0.19	0.14	0.14
std.y <sub>2</sub>	0.0011	0.0010	0.0009
std.y <sub>3</sub>	4.6E-4	5E-4	5E-4

simulatie 15:  $R=10E-2$ ,  $Q_{11}=1.5E2$ ,  $Q_{22}=1$ ,  $Q_{33}=10E10$

	ongeregeld	actief geregeld	semie- actief geregeld
std.y <sub>1</sub>	0.19	0.21	0.19
std.y <sub>2</sub>	0.0011	0.0011	0.0011
std.y <sub>3</sub>	4.7E-4	4E-4	4.6E-4

simulatie 16:  $R=10E-3$ ,  $Q_{11}=10E2$ ,  $Q_{22}=1$ ,  $Q_{33}=10E7$

	ongeregeld	actief geregeld	semie- actief geregeld
std.y <sub>1</sub>	0.18	0.15	0.15
std.y <sub>2</sub>	0.0011	9.7E-4	10E-4
std.y <sub>3</sub>	4.5E-4	4.7E-4	4E-4



simulatie 17:  $R=10E-1$ ,  $Q_{11}=10$ ,  $Q_{22}=10E4$ ,  $Q_{33}=10$

	ongeregeld	actief geregeld	semie- actief geregeld
std.y <sub>1</sub>	0.20	0.20	0.20
std.y <sub>2</sub>	0.0014	0.0014	0.0014
std.y <sub>3</sub>	4.6E-4	4.6E-4	4.6E-4

simulatie 18:  $R=10E-1$ ,  $Q_{11}=10$ ,  $Q_{22}=10E8$ ,  $Q_{33}=10$

	ongeregeld	actief geregeld	semie- actief geregeld
std.y <sub>1</sub>	0.19	0.20	0.18
std.y <sub>2</sub>	0.0011	8.2E-4	0.0010
std.y <sub>3</sub>	4.5E-4	4.3E-4	4.5E-4

simulatie 19:  $R=10E-2$ ,  $Q_{11}=10$ ,  $Q_{22}=10E8$ ,  $Q_{33}=10$

	ongeregeld	actief geregeld	semie- actief geregeld
std.y <sub>1</sub>	0.19	0.27	0.19
std.y <sub>2</sub>	0.0012	5.8E-4	0.0011
std.y <sub>3</sub>	4.5E-4	4.5E-4	4.5E-4

simulatie 20:  $R=10E-1$ ,  $Q_{11}=10$ ,  $Q_{22}=10$ ,  $Q_{33}=10E8$

	ongeregeld	actief geregeld	semie- actief geregeld
std.y <sub>1</sub>	0.19	0.20	0.19
std.y <sub>2</sub>	0.0012	0.0013	0.0012
std.y <sub>3</sub>	4.8E-4	4.7E-4	4.8E-4

simulatie 21:  $R=10E-3$ ,  $Q_{11}=10$ ,  $Q_{22}=10$ ,  $Q_{33}=10E8$

	ongeregeld	actief geregeld	semie- actief geregeld
std.y <sub>1</sub>	0.19	0.15	0.16
std.y <sub>2</sub>	0.0011	0.0010	0.0012
std.y <sub>3</sub>	4.5E-4	3.2E-4	4.2E-4

simulatie 22:  $R=10E-5$ ,  $Q_{11}=10$ ,  $Q_{22}=10$ ,  $Q_{33}=10E8$

	ongeregeld	actief geregeld	semie- actief geregeld
std.y <sub>1</sub>	0.22	1.07	1.01
std.y <sub>2</sub>	0.013	0.068	0.046
std.y <sub>3</sub>	4.6E-4	2.5E-4	8.1E-4

simulatie 23:  $R=10E-7$ ,  $Q_{11}=10$ ,  $Q_{22}=10$ ,  $Q_{33}=10E8$

	ongeregeld	actief geregeld	semie- actief geregeld
std.y <sub>1</sub>	0.21	0.38	0.27
std.y <sub>2</sub>	0.0013	0.0131	0.080
std.y <sub>3</sub>	4.7E-4	2.6E-4	9.7E-4