

# Verificatie van het model van een F16-neuslandingsgestel dmv drop tests

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

Verburg, A. J. (1993). *Verificatie van het model van een F16-neuslandingsgestel dmv drop tests*. (DCT rapporten; Vol. 1993.112). Technische Universiteit Eindhoven.

**Document status and date:**

Gepubliceerd: 01/01/1993

**Document Version:**

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

**Please check the document version of this publication:**

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

[Link to publication](#)

**General rights**

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

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

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

[www.tue.nl/taverne](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.

Verificatie van het model van een  
F16-neuslandingsgestel dmv drop-  
tests

A.J.Verburg

WFW rapport 93.112

Stageverslag  
A.J.Verburg  
september 1993

Technische Universiteit Eindhoven  
Faculteit Werktuigbouwkunde  
Vakgroep Fundamentele Werktuigkunde

# Inhoudsopgave

<b>1</b>	<b>Het landingsgestel</b>	<b>1</b>
1.1	Algemeen . . . . .	1
1.2	De oleo . . . . .	1
<b>2</b>	<b>De droptest-opstelling</b>	<b>4</b>
2.1	De industriële droptest . . . . .	4
2.2	De gebruikte droptest-opstelling . . . . .	5
2.3	De gebruikte apparatuur . . . . .	6
2.4	De meetprocedure . . . . .	7
2.4.1	Reproduceerbaarheid . . . . .	7
2.4.2	Het verwerken van de data . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Mathematische-modellen</b>	<b>10</b>
3.1	Het mechanische oleo-model . . . . .	10
3.2	Het thermodynamische oleo-model . . . . .	10
3.3	Mathematisch model van de droptest-opstelling . . . . .	11
<b>4</b>	<b>Drop-test voorspellingen</b>	<b>13</b>
4.1	Het simuleren . . . . .	13
4.2	Vergelijken van metingen met simulaties . . . . .	13
<b>A</b>	<b>MATLAB programma's: simulatie TU droptest</b>	<b>16</b>
<b>B</b>	<b>MATLAB programma's: simulatie industriële droptest</b>	<b>19</b>

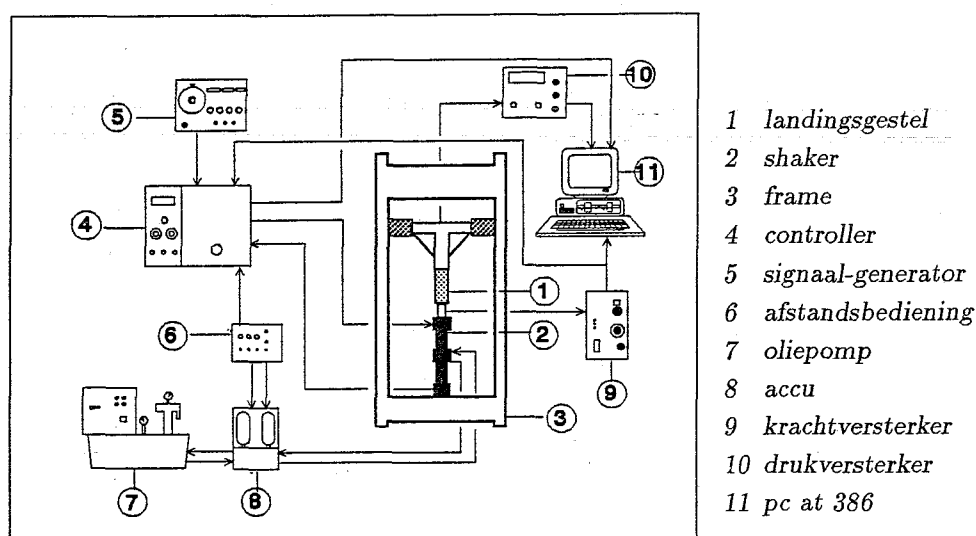
# samenvatting

Het doel van deze stage is te controleren of het wiskundige model dat Verbeek [3] heeft opgesteld voor een F16-neuslandingsgestel ook voldoet onder condities zoals die zich bij een landing voordoen (grote snelheid en grote slag). Daarom is besloten drop-tests uit te voeren. Bij zo'n test wordt het landingsgestel ingedrukt door een zwaar gewicht (eventueel met beginsnelheid). Met behulp van het wiskundige model kan dezelfde drop-test ook gesimuleerd worden. Als het model goed is, moeten metingen en simulaties overeen komen. In dit verslag zullen de volgende onderwerpen worden behandeld:

- Hoofdstuk 1 behandelt het F16 neuslandingsgestel en de oleo: het veer-demper-element waar het bij deze stage om draait.
- Hoofdstuk 2 behandelt de droptest-opstelling: de opstelling zelf, de gebruikte apparatuur en hoe het meten in zijn werk gaat. Tenslotte volgen een paar voorbeelden van uitgevoerde metingen.
- In hoofdstuk 3 worden twee mathematische modellen van de oleo gepresenteerd, en het model van de droptest-opstelling zelf
- Hoofdstuk 4 behandelt het simuleren, en de simulaties en metingen worden met elkaar vergeleken
- In hoofdstuk 5 wordt geconcludeerd dat de simulaties redelijke resultaten opleveren, maar dat het oleo-model nog wel verbeterd moet worden
- In bijlage A staan de MATLAB programma's die betrekking hebben op de gebruikte droptest-opstelling, zoals die gebouwd is op de TU.
- In bijlage B staan de MATLAB programma's die gebruikt kunnen worden voor simulaties van droptests in een industriële droptest-installatie.

# Inleiding

Het promotie-onderzoek van Verbeek [3] heeft een wiskundig model opgeleverd van een F16-neuslandingsgestel. Dit model is tot stand gekomen door metingen aan het landingsgestel in een shaker-opstelling, zie figuur 0.1 <sup>1</sup>.



Figuur 0.1: de shakertest-opstelling

De shaker zorgt voor een periodieke indrukking van het landingsgestel, en met behulp van een periodieke oplosser kunnen een aantal parameters die (een deel van) het gedrag van het landingsgestel beschrijven worden geschat. Deze parameters worden gebruikt om een mathematisch model op te stellen, dat de veer-, dempings- en wrijvingskracht beschrijft als functie van de indrukking en de snelheid waarmee het landingsgestel wordt ingedrukt. Bij testen in de shaker-opstelling, voldoet het model goed. Het vermogen van de shaker is echter beperkt, en daardoor zijn ook de snelheid waarmee het landingsgestel wordt ingedrukt en de slag beperkt.

Om te controleren of het model ook voldoet bij grotere snelheden en uitwijkingen, zoals die zich bij een landing voordoen, is besloten droptests uit te voeren. Door de resultaten

<sup>1</sup>De figuur is ontleend aan: de Jonge [2]

van die tests te vergelijken met simulaties die gebruik maken van het wiskundige model, kan worden nagegaan of het model ook dan voldoet.

Als dat zo is, zou men de shaker opstelling vaker kunnen gaan gebruiken in plaats van de nu veel gebruikte drop-test; bijvoorbeeld bij het ontwerpen en optimaliseren van landingsgestellen, of misschien ook als certificatie- of controle- methode nadat de kwaliteit van de methode in de praktijk gebleken is. Op dit moment wordt de droptest verplicht als certificatie-methode gebruikt.

De voordelen voor het gebruik van de shaker-opstelling zijn, dat een minder grote installatie nodig is en er meer informatie uit een experiment gehaald kan worden: de drop-test is meer geschikt om te bepalen of een ontworpen landingsgestel wel of niet voldoet.

**Opmerking:** Bij het begin van mijn stage was het de bedoeling om de drop-tests uit te voeren bij DAF-SP (special products), maar door financiële problemen bij DAF was het niet zeker of, en wanneer, dat door kon gaan. Daarom werden de drop-tests, enigszins vereenvoudigd, op de TU uitgevoerd. Van het voorbereidend werk dat ik heb gedaan voor mijn stage bij DAF, heb ik een deel opgenomen in dit verslag (zie bijlage B), voor het geval dat de drop-tests bij DAF in de toekomst nog worden uitgevoerd.

# Hoofdstuk 1

## Het landingsgestel

*In dit hoofdstuk wordt in het kort enige uitleg gegeven over het F16 landingsgestel en een belangrijk onderdeel daarvan: Het veer- en demper-element, oftewel de oleo.*

### 1.1 Algemeen

Het landingsgestel, zoals dat werd gebruikt bij de droptests en bij eerdere experimenten, ziet er schematisch uit als in figuur 1.1 en figuur 1.2. Met behulp van de „drag brace” (5) kan het landingsgestel worden in- en uitgetrokken, en worden afgesteund. Bij het in- en uittrekken roteert het landingsgestel rond de as (1). De klap van de landing wordt vooral opgevangen door de band (hier niet weergegeven) en de oleo, het veer- en demper element dat in de volgende paragraaf wordt behandeld. Een relatief klein gedeelte van de kinetische energie van het neerkomende vliegtuig gaat zitten in het buigen van de enkelzijdige vork waaraan de wielas is bevestigd.

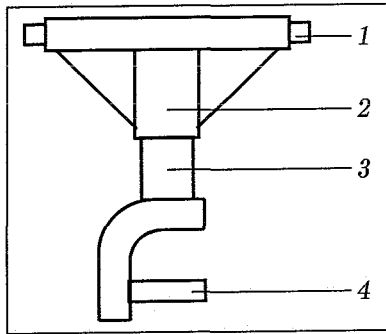
**Opmerking:** Het landingsgestel is al bij de vorige experimenten enigszins aangepast om te bereiken dat de modelvorming niet te moeilijk zou zijn. De eerste aanpassing is te zien in figuur 1.2: Het hulpstuk (no 7) zorgt ervoor dat de kracht op het landingsgestel aangrijpt op de hartlijn van de cylinder. Hierdoor liggen alle krachten in een lijn, en daardoor kon ook het wiskundig model dat opgesteld moest worden één dimensionaal blijven. De andere aanpassingen betreffen de oleo, en worden in de volgende paragraaf behandeld.

### 1.2 De oleo

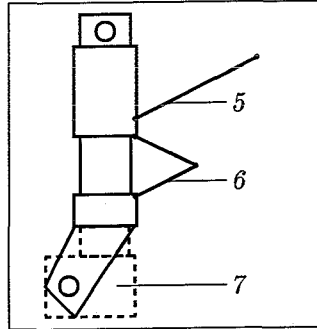
De oleo, zie figuur 1.3, is een belangrijk onderdeel van het landingsgestel: Het is tegelijk een veer- en dempingselement. Het aanwezige stikstofgas zorgt voor een gasveer-werking en de olie zorgt voor de demping, doordat die olie bij het in- en uittrekken gedwongen is door nauwe openingen te stromen, aangegeven door de pijltjes in figuur 1.3. De afdichtingen tenslotte (aangegeven met blokjes), zorgen voor een wrijvingskracht. Ook de oleo is aange-

past: De „metering pin” (zie figuur 1.3 no 5) zorgt normaal voor een demping die afhankelijk is van de slag, doordat de opening bij (6) afhankelijk is van de slag. De pin is echter zo gefreesd, dat de doorstroomopening constant is, en de demping onafhankelijk is van de slag. Ook de terugstroomklep bij opening (7) is verwijderd, zodat voor in- en uitgaande slag de opening tussen boven- en terugstroomkamer even groot is. Bovendien is de gasdruk verlaagd, zodat ondanks het beperkte vermogen van de shaker-opstelling meerdere experimenten uitgevoerd konden worden. Alle aanpassingen, die bij de shaker-experimenten gemaakt waren, zijn natuurlijk ook nu weer van kracht, om een goede vergelijking mogelijk te maken.



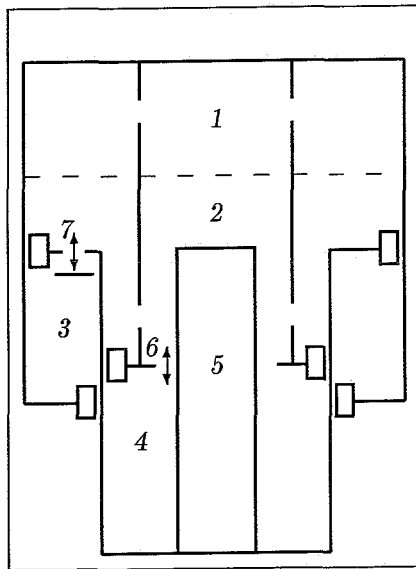


Figuur 1.1: Het F16 neuslandingsgestel vooraanzicht



Figuur 1.2: landingsgestel zijaanzicht

1. as: om deze as kan het landingsgestel scharnieren
2. oleo: veer en dempingselement
3. zuiger
4. wielas
5. drag brace: voor het in- en uittrekken en afsteunen van het landingsgestel
6. torque link: voor het doorgeven van moment, om bij het taxiën te kunnen sturen
7. hulpstuk



Figuur 1.3: schematische voorstelling van de oleo

1. bovenkamer, gevuld met stikstofgas
2. bovenkamer, gevuld met olie
3. terugstroomkamer, gevuld met olie
4. cilinderkamer, gevuld met olie
5. metering pin
6. doorstroomopening langs metering pin
7. doorstroomopening langs terugslagklep

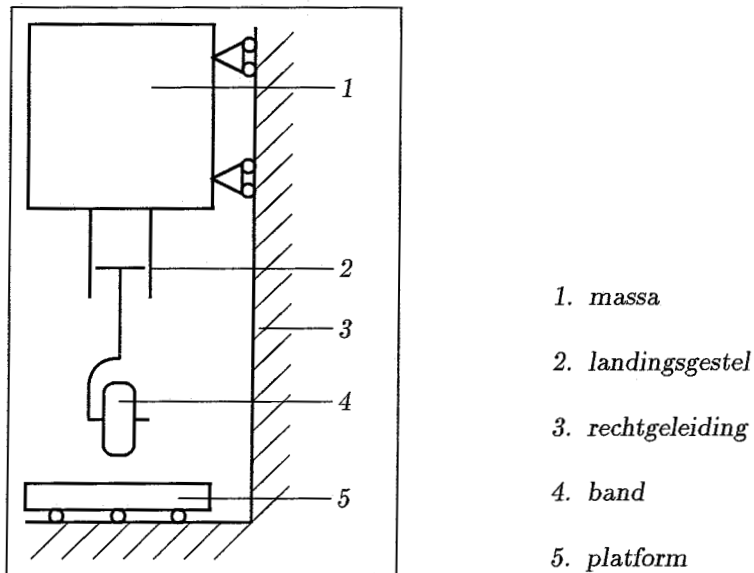
# Hoofdstuk 2

## De droptest-opstelling

*In dit hoofdstuk wordt eerst een industriële droptest-opstelling, daarna de gebruikte opstelling en apparatuur besproken.*

### 2.1 De industriële droptest

De droptest-opstelling ziet er schematisch uit als in figuur 2.1.



*Figuur 2.1: schematische voorstelling van de industriële droptest-opstelling*

Met deze opstelling kunnen een aantal fenomenen die bij het landen optreden worden gesimuleerd:

Allereerst natuurlijk het opvangen van de verticale landingssnelheid oftewel de impact-snelheid. Dit wordt gesimuleerd door een gewicht met daaronder het landingsgestel gemonteerd, vanaf een in te stellen hoogte te laten vallen. De band en de oleo vangen de klap op, en de oleo zorgt voor het uitdempen van de beweging.

Vaak kan ook zijwind worden gesimuleerd. Het effect van zijwind tijdens het landen is dat de wielen van het vliegtuig dan niet in de landings-richting staan. Daardoor treden er grote zijdelingsgerichte krachten op. Deze krachten kunnen tijdens het simuleren worden verkregen door het platform waarop het wiel „landt” opzij weg te trekken.

Een ander fenomeen dat tijdens het landen optreedt, is het zogenaamde spin up effect: Wanneer de banden de grond raken worden ze in zeer korte tijd gedwongen te gaan ronddraaien. De krachten die hierdoor ontstaan, kunnen in een test-opstelling ook worden verkregen door het wiel „achteruit” te laten draaien. Als het wiel dan het platform raakt, zullen dezelfde krachten optreden.

Tenslotte kan soms ook de liftkracht worden gesimuleerd, die een vliegtuig ondervindt als het laag over de grond vliegt. Daarvoor kunnen bijvoorbeeld luchtcilinders worden gebruikt, die op een bepaalde hoogte een verticale kracht op de massa gaan uitoefenen.

## 2.2 De gebruikte droptest-opstelling

De gebruikte droptest-opstelling zag er schematisch uit als in figuur 2.2 en figuur 2.3.

Met behulp van een hijskraan kan het platform met eventueel gewichten daarop, worden opgehesen totdat het landingsgestel maximaal is uitgetrokken. Met de „parachute release” kan het platform plotseling worden losgelaten, het landingsgestel vangt de klap op.

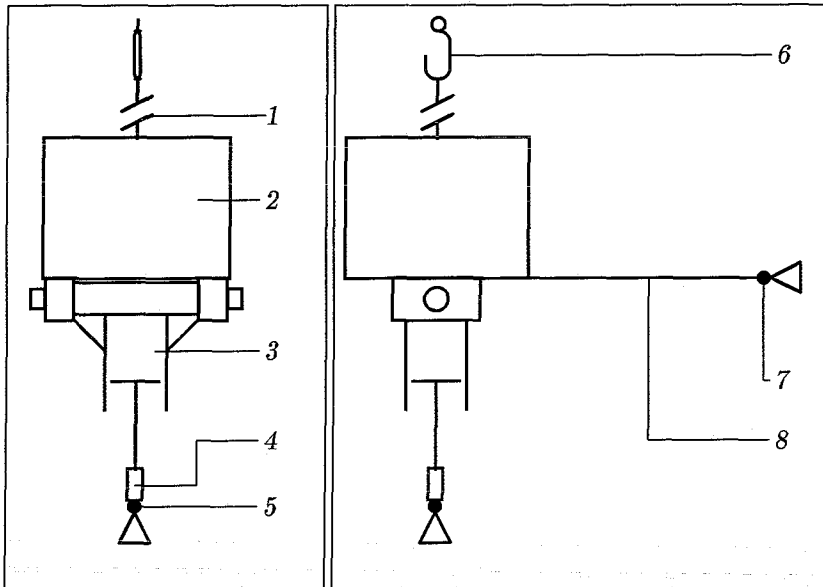
Bij de experimenten werden steeds drie signalen geregistreerd, namelijk de uitwijking, de gasdruk boven in de oleo, en de reactiekracht op de vloer. De gemeten signalen kunnen worden opgeslagen om later te kunnen bewerken en te vergelijken met simulatie-resultaten.

Door meer of minder gewichten op het platform te zetten, wordt de maximale uitwijking respectievelijk groter of kleiner.

**Opmerking:** Oorspronkelijk zouden de droptests bij DAF-SP worden uitgevoerd, met een industriële test-opstelling. Helaas kon dat door problemen bij DAF niet doorgaan.

Het belangrijkste verschil tussen een droptest met een industriële opstelling en met de opstelling op de TU is dat er bij de TU opstelling geen impact-snelheid is. Dit heeft tot gevolg dat er ook geen wiel nodig is om de klap te verzachten. Het nadeel is dat daardoor het verschil tussen een werkelijke landing en een drop-test groter wordt. Het voordeel is echter dat het simuleren van een droptest zonder band makkelijker is dan met, en fouten in het band-model geen aanleiding kunnen geven tot verschillen tussen simulaties en metingen. Een bijkomend voordeel is dat gebruik gemaakt kan worden van dezelfde apparatuur als eerder was gebruikt bij tests voor het parameter-schatten.

De andere verschillen tussen de industriële- en TU-opstelling zijn niet van belang voor het verifiëren van het oleo-model.



1. parachute release
2. gewicht
3. oleo
4. krachtopnemer
5. kogelscharnier
6. hyschaak
7. lijnscharnier
8. arm

*Figuur 2.2: schematische voorstelling van de gebruikte droptest-opstelling: vooraanzicht*

*Figuur 2.3: Gebruikte opstelling: zijaanzicht*

## 2.3 De gebruikte apparatuur

Er werden tijdens de experimenten steeds drie grootheden gemeten, namelijk:

**kracht:** de kracht tussen het landingsgestel en de vloer

**verplaatsing:** de slag die het landingsgestel maakte

**druk:** de gasdruk boven in de oleo

Hier volgt een opsomming van de gebruikte apparatuur:

krachtopnemer:	Kistler 9341A (30 kN)
ladingsversterker:	Kistler 5007
verplaatsingsopnemer:	Santest GYST 3 1057
ladingsversterker:	Santest GYSTC 03
drukopnemer:	Höttinger P3M/100
ladingsversterker:	Höttinger KWS 30723

De meetdata werd ingenomen met behulp van Difa d\_tac100 om te kunnen worden bekeken en verwerkt op een pc at 386. Voor praktische informatie over de opstelling, bijvoorbeeld hoe de oleo met olie of gas gevuld moet worden, verwijs ik naar: de Jonge [1].

## 2.4 De meetprocedure

Het meten verloopt als volgt:

- hijs het platform omhoog, totdat de voet waarop het landingsgestel rust omhoog komt.
- reset de ladingsversterker van de krachtcel.
- laat het platform enige millimeters zakken, zodat alle speling uit het systeem is (om een harde knal te voorkomen).
- start de meting.
- laat het platform vallen met behulp van de parachute release.

Deze procedure levert metingen op waarvan hieronder enige voorbeelden te zien zijn. Over de figuren 2.4 t/m 2.6 is het volgende op te merken:

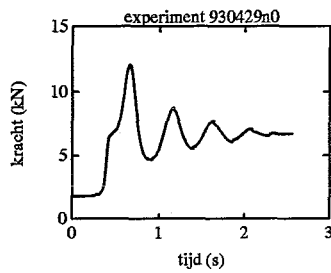
Figuur 2.4: Te zien is de reactiekracht als functie van de tijd. Deze kracht, die de som is van de veer- dempings- en wrijvingskracht, vertoont halverwege de eerste opgaande flank een oneffenheid. Dit wordt veroorzaakt door de dempingskracht, die daar zijn maximale waarde bereikt, en daarna sterk in amplitude afneemt. Ook de wrijvingskracht is in figuur 2.4 terug te vinden; de wrijvingsssprongen zijn het duidelijkst zichtbaar als de beweging bijna is uitgedempt.

Figuur 2.5: De verplaatsing als functie van de tijd heeft een glad verloop. Duidelijk is te zien hoe de beweging uitdempt. De overshoot (maximale- minus eindwaarde) is vrij klein, wat wordt veroorzaakt door de veerkracht, die zeer sterk toeneemt als de uitwijking zijn maximale waarde benadert.

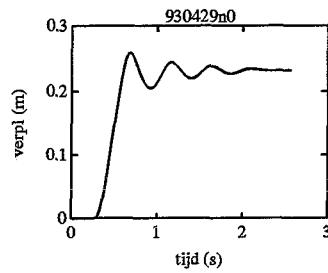
Figuur 2.6: Ook het druksignaal heeft een glad verloop. De overshoot is veel groter dan in de voorgaande figuur.

### 2.4.1 Reproduceerbaarheid

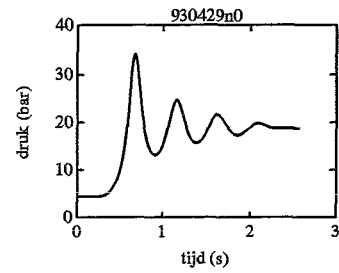
Om te controleren of de reproduceerbaarheid goed is, is één experiment drie maal herhaald. In figuur 2.7 zijn de drie metingen weergegeven, met respectievelijk een getrokken lijn, een streepjeslijn en een stippellijn. De drie lijnen vallen vrijwel over elkaar; de reproduceerbaarheid is goed. Dit betekent dat het niet nodig is om iedere meting meerdere malen uit te voeren en vervolgens te middelen om betrouwbare resultaten te krijgen. Eén meting volstaat in principe; wel is het nuttig om af en toe een controle meting uit te voeren, om zeker te weten dat de metingen goed worden uitgevoerd.



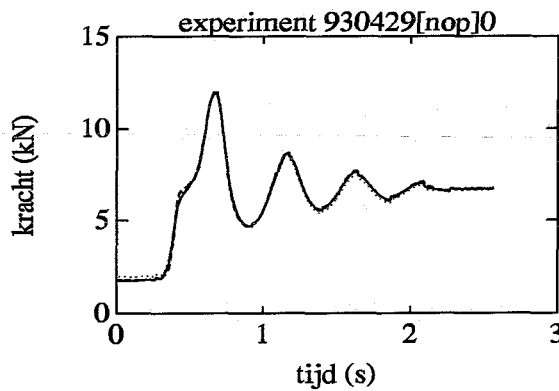
Figuur 2.4: Voorbeeld van een meting:reactiekracht



Figuur 2.5: Voorbeeld van een meting:verplaatsing



Figuur 2.6: Voorbeeld van een meting:druk



Figuur 2.7: controle reproduceerbaarheid

## 2.4.2 Het verwerken van de data

De met behulp van Difa ingenomen data kan met het programma difapcm1.exe worden omgezet in door MATLAB leesbare informatie. Zodoende kunnen de metingen binnen MATLAB later worden vergeleken met de simulaties die met behulp van MATLAB zijn uitgevoerd. Toen het meten goed verliep is er een serie metingen gedaan, met een steeds toenemend aantal gewichten op het platform, totdat de maximale indrukking werd bereikt. Zie tabel 2.1 t/m 2.3; met extra massa wordt bedoeld de massa's die op het platform worden gelegd, dat zelf ongeveer 250 kg. weegt. Deze metingen kunnen later worden gebruikt om te vergelijken met simulaties. Voor de metingen werd de volgende naamgeving gehanteerd: yymmddL0, waarbij yymmdd staat voor de datum waarop de meting werd gedaan, voor L kan een letter worden ingevuld, om de verschillende experimenten op één dag uit elkaar te houden. Met de 0 wordt de naam aangevuld tot de vereiste lengte van acht tekens.

experiment	extra massa	experiment	extra massa	experiment	extra massa
930426a0	50	930426i0	290	930503a0	440
930426b0	50	930426j0	290	930503b0	490
930426c0	100	930426k0	310	930503c0	510
930426d0	100	930426l0	330	930503d0	530
930429a0	150	930429m0	350	930507a0	600
930429b0	200	930429n0	370	930507b0	600
930429c0	200	930429o0	370	930529a0	400
930429d0	200	930429p0	370	930529b0	450
930429e0	200	930429q0	370	930529c0	500
930429f0	200	930429r0	390	930529d0	550
930429g0	250	930429s0	390	930529e0	600

Tabel 2.1: experimentnummer  
en extra massa

Tabel 2.2: experimentnummer  
en extra massa

Tabel 2.3: experimentnummer  
en extra massa

**Opmerking:** Toen bij het vergelijken van simulaties en metingen een vrij groot verschil tussen gemeten en gesimuleerde verplaatsing bleek op te treden, kwam aan het licht dat er bij de kalibratie van de Difa-kaart iets misliep: Na kalibreren was de offset veel groter dan in de specificatie stond, en een niet goed in te stellen gain zorgde voor een fout van  $\pm 10$  %. De oorzaak bleek te liggen in de software die bij de kaart hoorde, en is verholpen. Het verschil tussen gemeten en gesimuleerde verplaatsing bleef overigens bestaan, en wordt dus waarschijnlijk veroorzaakt door het gehanteerde mathematische model.

# Hoofdstuk 3

## Mathematische-modellen

*In dit hoofdstuk worden twee mathematische modellen van de oleo behandeld: een mechanisch en een thermodynamisch model. Tenslotte wordt het model van de droptest-opstelling besproken.*

### 3.1 Het mechanische oleo-model

Het gedrag van de oleo (zie figuur 1.3) wordt bepaald door allerlei fysische processen, en de daarbij behorende parameters. Zo wordt bijvoorbeeld de veerkracht van de oleo veroorzaakt door het samendrukken van stikstofgas bovenin de oleo, en de parameter die de gasdruk aan de veerkracht koppelt is natuurlijk de oppervlakte van de zuiger. Met behulp van enkele fysische parameters en de polytropische gaswet:  $pV^n = \text{constant}$  kunnen nu vergelijkingen worden opgesteld voor veer- dempings- en wrijvingskracht als functie van de absolute gasdruk  $p$  en de indrukking van de zuiger  $q$ . De  $\theta_i$ 's zijn model-parameters waarin de fysische parameters zijn verwerkt.

$$F_{spring} = \theta_4 p \quad (3.1)$$

$$F_{damp} = \theta_3 \dot{q} |\dot{q}| \quad (3.2)$$

$$F_{fric} = (\theta_8 + \theta_9 p) \arctan(\theta_{10} \dot{q}) \quad (3.3)$$

met

$$p = \theta_5 \left( \frac{1}{1 + \theta_6 q} \right)^{\theta_7} \quad (3.4)$$

### 3.2 Het thermodynamische oleo-model

In Verbeek [3] is de verwachting gewekt, dat toevoegen van enige thermodynamica en het meenemen van de oplosbaarheid van stikstofgas in olie kunnen leiden tot een beter oleo-



model. De vergelijkingen voor de optredende krachten blijven in het thermodynamische model hetzelfde, maar er komt een vergelijking bij voor de energiebalans:

$$\theta_{15}\dot{T} + \theta_{16}(1 + \theta_{6q})(T + \theta_{17}) - (\theta_4 p + \theta_{11})\dot{q} = 0 \quad (3.5)$$

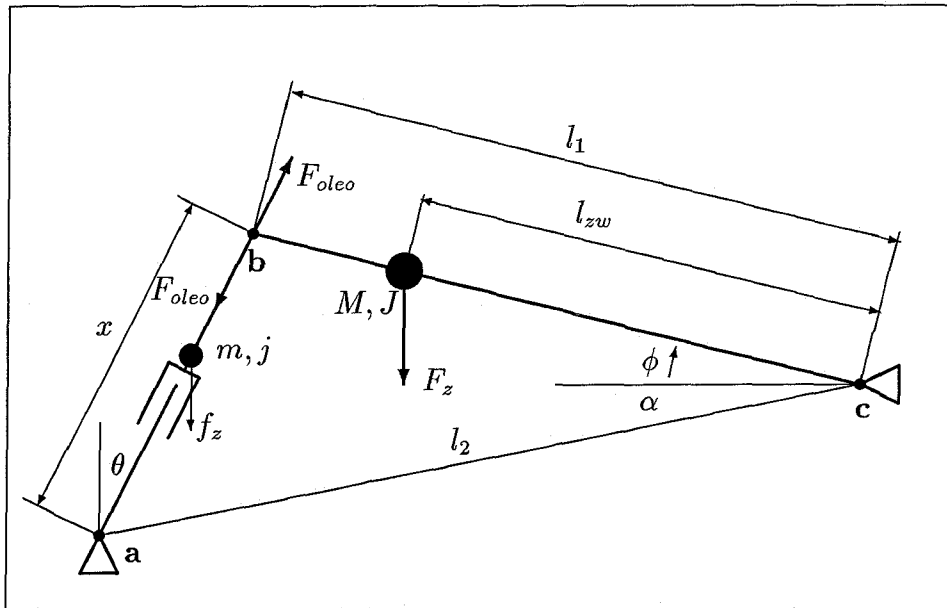
met

$$p = \frac{\theta_5 T}{1 + \theta_6 q + \theta_7 T} \quad (3.6)$$

De eerste term van vergelijking 3.5 heeft betrekking op de warmtecapaciteit, de tweede beschrijft de warmtegeleiding en de laatste term is een bronterm. Voor meer informatie hierover zie Verbeek [3], hoofdstuk 6.

### 3.3 Mathematisch model van de droptest-opstelling

Behalve een model van de oleo is er natuurlijk ook een model nodig van de droptest-opstelling zelf om simulaties te kunnen uitvoeren. Schematisch ziet de opstelling er als volgt uit, zie figuur 3.1:  $M$  en  $J$  staan voor de massa, respectievelijk het traagheidsmoment van het platform met daarop de extra gewichten;  $m$  en  $j$  hebben betrekking op het landingsgestel.



Figuur 3.1: Schematische weergave van de droptest-opstelling, met daarin de relevante grootheden.

Als de opstelling zo wordt gemaakt, dat de gemiddelde waarden van  $\theta$  en  $\phi$  beide ongeveer nul zijn, zal de invloed van massa  $m$ , die toch al veel kleiner is dan  $M$ , gering zijn:

De halve slag, dus de inkorting van  $x$ , is 0.13 cm, en  $l_1$  is 2m. Daaruit volgt, dat  $\phi_{max}$  gelijk is aan  $3.7^\circ$ . Verder geldt:

$$\theta_{max} = \frac{2[1 - \cos(\phi_{max})]}{x} \quad (3.7)$$

Hieruit volgt:  $\theta_{max} = 0.24^\circ$

Omdat geldt dat  $\phi_{max} = 15 \times \theta_{max}$  zal ook gelden dat  $\dot{\phi} \approx 15 \times \dot{\theta}$

Vergelijken van de kinetische energieën van  $M$  en  $m$  (tengevolge van rotatie rond **c** resp. **a**) levert:

$$\frac{U_{kM}}{U_{km}} = \frac{M l_{zw} 15^2}{m x 1} \quad (3.8)$$

met  $M \approx 300kg$ ,  $m \approx 40kg$ ,  $l_{zw} = 2m$  en  $x \approx 1m$  volgt dan:

$$U_{kM} \approx 7000 \times U_{km}$$

Vandaar dat de rotatie van  $m$  rond **a** niet in rekening hoeft te worden gebracht:  $m$  kan bij  $M$  worden opgeteld, en met de nieuwe  $M$  kan een nieuwe  $J$  worden bepaald. In het vervolg zal ik die aangepaste  $M$  en  $J$  bedoelen als ik het over  $M$  en  $J$  heb.

Voor evenwicht rond punt **c** moet gelden dat de som van de momenten om punt **c** nul is. Daaruit volgt:

$$F_z l_{zw} \cos(\phi) - F_r l_1 \cos(\theta) = -J \ddot{\phi} \quad (3.9)$$

oftewel:

$$\ddot{\phi} = (F_r l_1 \cos(\theta) - F_z l_{zw} \cos(\phi)) / J \quad (3.10)$$

Nu moeten  $F_r$  en  $\cos(\theta)$  nog als functie van  $\phi$  geschreven worden:  $F_r$  kan worden berekend als  $x$  bekend is, want de indrukking van de oleo is  $x_0 - x$ . Ook  $\dot{x}$  is nodig (om bijvoorbeeld de dempingskracht uit te rekenen).

Toepassen van de cosinus-regel levert:

$$x = \sqrt{l_1^2 + l_2^2 - 2l_1 l_2 \cos(\alpha + \phi)} \quad (3.11)$$

Differentiëren van vergelijking 3.11 naar de tijd levert:

$$\dot{x} = \frac{\dot{\phi} l_1 l_2 \sin(\alpha + \phi)}{\sqrt{l_1^2 + l_2^2 - 2l_1 l_2 \cos(\alpha + \phi)}} \quad (3.12)$$

of:

$$\dot{x} = \dot{\phi} l_1 l_2 \sin(\alpha + \phi) / x \quad (3.13)$$

$\cos(\theta)$  is als volgt te berekenen:  $x \cos(\theta) = l_2 \sin(\alpha) + l_1 \sin(\phi)$ , dus

$$\cos(\theta) = [l_2 \sin(\alpha) + l_1 \sin(\phi)] / x \quad (3.14)$$

Nu kan de toestandsvergelijking worden opgesteld.

# Hoofdstuk 4

## Drop-test voorspellingen

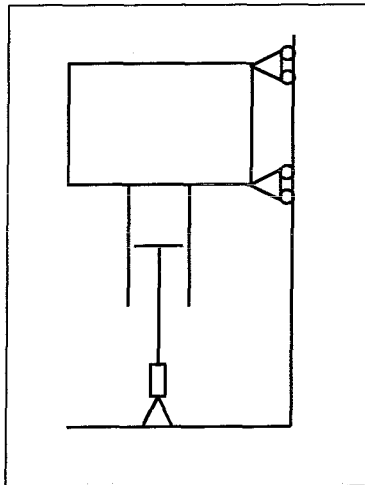
*In dit hoofdstuk wordt het simuleren besproken, en worden simulaties met metingen vergeleken.*

### 4.1 Het simuleren

Met behulp van de modellen uit het vorige hoofdstuk, kunnen simulaties worden uitgevoerd. Hiervoor heb ik enkele MATLAB programma's geschreven (zie appendix A), die de differentiaal vergelijkingen van het oleo-model en de bewegingsvergelijkingen oplossen. Hierbij heb ik gebruik gemaakt van de standaard MATLAB integratie-routine: ODE23.m. (Het simuleren van een test in een industriële opstelling, is iets lastiger, en wordt behandeld in bijlage B.) Om er zeker van te zijn dat de geometrie van de opstelling (zie figuur 3.1) goed gemodelleerd is, heb ik ook een eenvoudigere opstelling gemodelleerd: zie figuur 4.1. Vergelijken van de simulatieresultaten verkregen met het eenvoudige en met het uitgebreide model, toont aan dat de opstelling goed is gemodelleerd. Zie figuur 4.2: De getrokken lijn geeft een simulatie met het uitgebreide model weer, de kruisjes horen bij het vereenvoudigde model.

### 4.2 Vergelijken van metingen met simulaties

Nu aannemelijk is gemaakt, dat het model van de opstelling correct is, is het tijd geworden om te onderzoeken hoe het staat met de voorspellingskracht van het oleo-model. Daartoe worden hieronder enige plaatjes getoond waarin metingen en de bijbehorende simulaties in één figuur zijn gezet. Zie figuur 4.3, figuur 4.4 en figuur 4.5. De getrokken lijn geeft het gemeten signaal weer. De parameters die zijn gebruikt in het oleo-model, zijn de parameters die bij de shaker-experimenten het beste voldeden. In Verbeek [3] is hierover meer te lezen. Het experiment 930529c0 is gekozen, omdat hierbij alle eerder genoemde fenomenen, zoals de bobbel in de eerste opgaande flank van de reactiekracht en de wrijvings-sprongen duidelijk zijn waar te nemen.

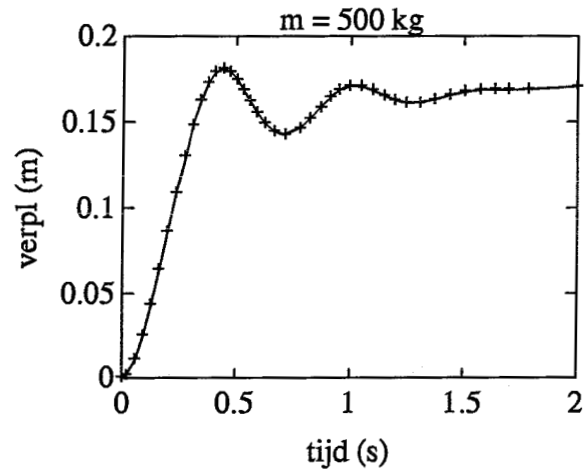


*Figuur 4.1: eenvoudig model  
TU- opstelling*

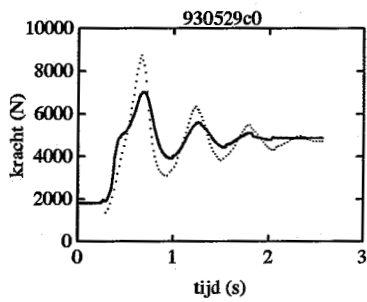
Duidelijk is te zien, dat de demping te laag is. Nu is het echter zo, dat die demping bij de shaker-experimenten niet goed geschat kon worden, doordat de snelheid waarmee het landingsgestel werd ingedrukt niet hoog genoeg kon zijn, en de dempingskrachten daardoor klein bleven. Met een tweemaal zo grote dempingsfactor komen de simulaties veel beter overeen met de metingen, zie figuur 4.6 t/m figuur 4.8.

Het aanpassen van de demping, dat gebeurt door de parameter die de viscositeit van de olie weergeeft aan te passen, is min of meer geoorloofd, omdat die parameter bij de eerdere experimenten niet goed geschat konden worden. Bij die experimenten bleef de dempingskracht zeer klein. Helaas is het echter zo, dat die demping bij ieder experiment opnieuw aangepast zou moeten worden om dezelfde resultaten te krijgen als in de figuren 4.6 t/m 4.8, en dat is natuurlijk niet geoorloofd. Over de simulaties is verder nog op te merken, dat het voorspellen van kracht en druk veel beter gaat dan het voorspellen van de verplaatsing. In de voorspelde verplaatsing zit een fout van maximaal 25%. Dit feit, samen met het feit dat de demping per experiment moet worden aangepast, maakt duidelijk dat het oleo-model nog verbeterd moet worden.

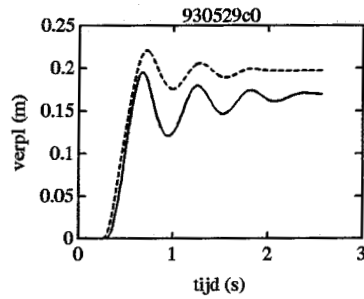
Niet vergeten mag echter worden, dat niet alleen de demping, maar ook alle andere parameters geschat zijn bij experimenten waarbij de snelheid beperkt was. Wat het effect is van het gebruiken van deze parameters bij hogere snelheden, is niet duidelijk, en het lijkt dus zinvol om de shaker- opstelling op grotere schaal na te bouwen en nieuwe proeven te doen.



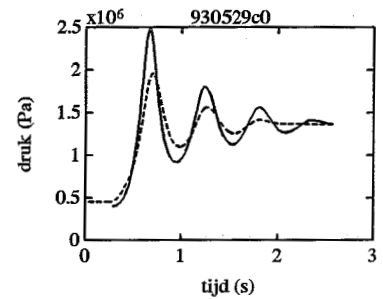
Figuur 4.2: vergelijken modellen volgens fig 3.1 en fig 4.1



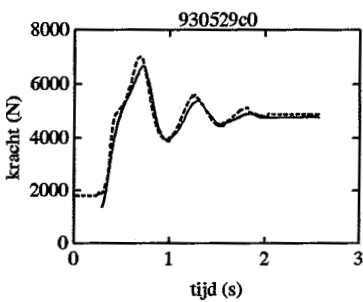
Figuur 4.3: vergelijken van de reactiekracht



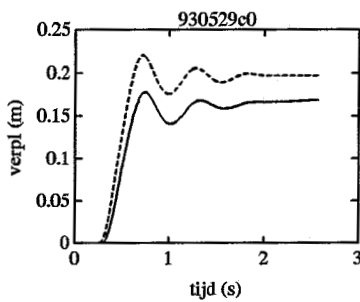
Figuur 4.4: vergelijken van de verplaatsing



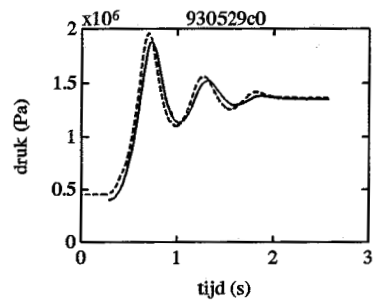
Figuur 4.5: vergelijken van de druk



Figuur 4.6: vergelijken reactiekracht bij aangepaste demping



Figuur 4.7: vergelijken verplaatsing bij aangepaste demping



Figuur 4.8: vergelijken druk bij aangepaste demping

# Bijlage A

## Matlab programma's: simulatie TU droptest

toelichting: Alle subroutines waarin de differentiaal-vergelijkingen zijn opgenomen bevatten het thermodynamische oleo-model. De file theta.m wordt telkens gebruikt: hierin staan alle parameters met hun waarden. Alleen bij het simuleren van de industriële droptest worden de parameters  $\theta_{e15}$  t/m  $\theta_{e17}$  gebruikt. Het volgende programma heeft betrekking op het vereenvoudigde model van de gebruikte opstelling, (zie figuur 4.1)

```
%sims voert de simulatie uit van een droptest in de laboratorium-
%opstelling.
%het vereenvoudigde model van die opstelling wordt gebruikt
theta          %inlezen parameters
the(15)=input('massa          ? ');
u0=[0;0;293];
t0=0;
tf=input('eindtijdstip ?');
%
%rekenen
%
[t,u]=ode23('toest1s',t0,tf,u0);
```

De bijbehorende file waarin de differentiaalvergelijkingen staan:

```
function up=toest1s(t,u);
%de functie toest1s geeft de dv die hoort bij het 1 massa veer-systeem
%van oleo en gewicht
%toest1s hoort bij het eenvoudige model van de laboratorium droptest
%
fdamp=the(3)*u(1)*abs(u(1));
fspring=the(4)*u(3)/(1+the(5)*u(2)+the(6)*u(3))+the(7);
ffric=(the(9)+the(11)*u(2)^2)*atan(the(10)*u(1));
up(1)=the(2)-(fdamp+fspring+ffric)/the(15);
up(2)=u(1);
up(3)=- (the(12)*(u(3)+the(13))+the(14)*u(3)*u(1)/(1+the(5)*u(2)));
```

Een droptest in een niet vereenvoudigde opstelling (volgens figuur 2.2 en 2.3) kan met het volgende programma worden uitgevoerd:

```
%simw voert de simulatie van de laboratorium-droptest uit
clear fdamp fspring ffric
theta;
global l1 l2 alfa x0 lzw J; %inlezen parameters
%gegevens opstelling, zie fig 3.1
l1= input('l1 ? ');
theta0= input('theta0 ? ');
phi0= input('phi0 ? ');
the(15)= input('massa ? ');
lzw=l1;
x0=1;J=lzw^2*the(15);
l2=sqrt(l1^2+x0^2-2*l1*x0*cos(theta0+pi/2-phi0));
alfa=asin((x0*cos(theta0)-l1*sin(phi0))/l2);
u0=[0;phi0;293];
t0=0;
tf=input('eindtimestep ? ');
%
%rekenen: oplossen D.V
%
[t,u,x]=ode23('toest1w',t0,tf,u0);
%
%rekenen: uitrekenen van enkele grootheden als functie van de tijd
%
ind=1-x;
for i=[1:max(size(t))];
    xp(i)=l1*l2*sin(alfa+u(i,2))*u(i,1)/x(i);
    fdamp(i)=-the(3)*xp(i)*abs(xp(i));
    fspring(i)=the(4)*u(i,3)/(1+the(5)*(x0-x(i))+the(6)*u(i,3))+the(7);
    ffric(i)=-the(9)+the(11)*(x0-x(i))^2*atan(the(10)*xp(i));
end
```

De bijbehorende file met de differentiaalvergelijkingen:

```
function up=toest1w(t,u);
%de functie toest1w geeft de dv die hoort bij het 1 massa veer-systeem
%van oleo en gewicht
%toest1w hoort bij het beste model van de laboratorium droptest
%hij maakt gebruik van de waarden the(1) t/m the(14), die in de file
%theta.m staan beschreven.
x=sqrt(l1^2+l2^2-2*l1*l2*cos(alfa+u(2)));
xp=l1*l2*sin(alfa+u(2))*u(1)/x;
kostheta=(l2*sin(alfa)+l1*sin(u(2)))/x;
fdamp=-the(3)*xp*abs(xp);
fspring=the(4)*u(3)/(1+the(5)*(x0-x)+the(6)*u(3))+the(7);
ffric=-the(9)+the(11)*(x0-x)^2*atan(the(10)*xp);
up(1)=(-the(15)*the(2)*lzw*cos(u(2))+(fdamp+fspring+ffric)*l1*kostheta)/J;
up(2)=u(1);
up(3)=-the(12)*(u(3)+the(13))-the(14)*u(3)*xp/(1+the(5)*(x0-x));
```

De bijbehorende file met parameters. De thp's zijn fysische parameters, de the's rekenkundige. The(15) t/m the(17) worden alleen gebruikt voor de industriële droptest.

```

thp(1)=3.484d-03;    %Apiston
thp(2)=9.20d-04;    %2 Vgas
thp(3)=0.900d-03;   %3 Ahyd1
thp(4)=0.068d-03;   %4 Aori1
thp(5)=1.886d-03;   %5 Ahyd2
thp(6)=0.036d-03;   %6 Aori2
thp(7)=0.033d00;    %7 Rout
thp(8)=0.025d00;    %8 Rin
thp(9)=0;           %9 empty
thp(10)=3200;       %10 mass skid
thp(11)=0.25D02;    %11 mass piston
thp(12)=9.81d0;     %12 gravity
thp(13)=0.88d03;    %13 rho
thp(14)=0.90d0;     %14 Cd
thp(15)=1.0d05;     %15 Patm
thp(16)=16d05;      %16 Pfill
thp(17)=0;          %17 n
thp(18)=3.5d1;      %18 Foffset
thp(19)=-1.405d-1;  %19 uoffset
thp(20)=0;          %20 Poffset
thp(21)=8.1d01;     %21 Fw
thp(22)=1.367d03;   %22 d2Fwdu2 or dFwdp
thp(23)=1.7d02;     %23 Carctan
thp(24)=0;          %24 Csin
thp(25)=0;          %25 empty
thp(26)=0;          %26 empty
thp(27)=0;          %27 empty
thp(28)=0;          %28 empty
thp(29)=0;          %29 empty
thp(30)=0;          %30 empty
thp(31)=2.93d02;    %31 T0
thp(32)=4.3d-01;    %32 lambda
thp(33)=2.968d02;   %33 Rs
thp(34)=7.43d02;    %34 Cv
thp(35)=1.40d0;     %35 k
thp(36)=1.2d-7;     %36 dnRdp
% omrekenen
global the
the(1)=thp(11);     %mass piston
the(2)=thp(12);     %grav
the(3)=0.5d0*thp(13)/thp(14)^2*(thp(3)^3/thp(4)^2+thp(5)^3/thp(6)^2);
the(4)=(thp(15)+thp(16))*thp(1)*(1d0/thp(31)+thp(36)/thp(2));
the(5)=-thp(1)/thp(2);
the(6)=thp(36)/thp(2);
the(7)=thp(18)-thp(15)*thp(1);
the(8)=thp(19);
the(9)=2.0d0*thp(21)/pi;
the(10)=thp(23);
the(11)=2.0d0*thp(22)/pi;
the(12)=2.0d0*pi*thp(32)*thp(31)*thp(33)/((thp(15)+thp(16))
    /thp(1)/thp(34)/log(thp(7)/thp(8)));
the(13)=-thp(31);
the(14)=thp(1)*(1.0d0-thp(35))/thp(2);
the(15)=thp(10);    %mass skid
the(16)=20000;      %fcylinder
the(17)=0.1;        %aanslag luchtcilinder
clear thp

```



# Bijlage B

## Matlab programma's: simulatie industriële droptest

Toelichting: Bij het simuleren van een echte drop-test komt iets meer kijken dan bij de vereenvoudigde drop-test:

- het bandgedrag moet gemodelleerd worden
- de liftkracht moet gesimuleerd worden
- de beweging moet worden gesplitst in de beweging van skid (kar met grote massa die langs een rechtgeleiding beweegt, hieronder is het landingsgestel gemonteerd) en oleo als star lichaam en de beweging als 2-massa, 2-veer-systeem.

Bandgedrag en liftkracht zijn eenvoudig te simuleren, maar wat als laatste genoemd is, is lastiger. Het probleem is niet te omzeilen door de aanslag van de oleo (bij maximaal uittrekken) te modelleren met een sterke veer: dit levert numerieke problemen op bij het integreren van de D.V.'s. Wat ik heb gedaan, is het opstellen van twee bewegingsvergelijkingen, één voor als de oleo niet is ingedrukt, en één voor als dat wel het geval is.

De eerste toestand is het eenvoudigst: de oleo is niet ingedrukt, en het systeem is op te vatten als een één massa-veersysteem, waarbij de band (en eventueel de luchtcilinders) als veer fungeert. Het oplossen van de bijbehorende differentiaal vergelijking kan met ODE23, maar omdat de integratie moet stoppen zodra de oleo wordt ingedrukt (overgang naar de tweede toestand) moet wel een extra afbreek-criterium worden ingebouwd binnen de hoofdloop (`while t < tf`). Omdat niet precies bekend is wanneer de indrukking van de oleo begint, heb ik aangenomen dat dit gebeurt bij een kracht die gelijk is aan de veerkracht in volledig uitgetrokken toestand, plus de wrijvingskracht. Omdat binnen ODE23 niet wordt gerekend met krachten maar met verplaatsingen, moet deze kracht via de bandstijfheid nog worden vertaald naar een verplaatsing.

In de tweede toestand zijn er twee afzonderlijk bewegende massa's te onderscheiden, namelijk enerzijds de skid en anderzijds het geheel van band, as vork en zuiger. Om de hierbij behorende D.V.'s op te lossen kan ook een aangepaste versie van ODE23 worden

gebruikt. Het extra afbreek-criterium is in dit geval het bereiken van de aanslag wanneer het landingsgestel maximaal wordt uitgetrokken. Aangezien ODE23 rekent met de verplaatsingen van zowel de skid als het wiel, kan het afbreek-criterium direct m.b.v. deze verplaatsingen worden geformuleerd. Met deze twee toestanden zijn alle mogelijkheden te beschrijven. Het gebruikte programma:

```
% sim2 voert een simulatie uit van een drop-test in een industriële
% installatie.
%
%initialisatie
%
theta
u0=[];u=[];t=[];t0=0;T0=293;t12=[];
tf=input('eindtijdstip      ? ');
x0=input('beginhoogte      ? ');
v0=input('beginsnelheid    ? ');
the(16)=input('kracht luchtcilinders ? '); %voor simulatie liftkracht
u0=[v0 x0 T0];
clear x0 v0 T0
%
% hoofdlus
%
while t0<tf
[t2,u2]=app2('toest2',t0,tf,u0); %app2=ode23, maar integratie stopt als
%                               de oleo wordt ingedrukt
t=[t;t2];u=[u;[u2(:,1) u2(:,1) u2(:,2) u2(:,2) u2(:,3)]];
u0=u(max(size(u)),:);t0=t(max(size(t)));t12=[t12 t0];
[t1,u1]=app1('toest1',t0,tf,u0); %integratie stopt bij max. slag van oleo
t=[t;t1];t0=t(max(size(t)));u=[u;u1];u0=u(max(size(u)),[1 3 5]);
end;
```

De bijbehorende subroutines:

```
function up=toest1(t,u);
%de functie toest1 geeft de dv die hoort bij het 2 massa, 3 veer systeem
%van oleo, cylinder en band.
%hij maakt gebruik van de waarden the(1) t/m the(17), die in de file
%theta.m staan beschreven.
fdamp=the(3)*(u(2)-u(1))*abs(u(2)-u(1));
fspring=the(4)*u(5)/(1+the(5)*(u(4)-u(3))+the(6)*u(5));
ffric=(the(9)+the(11)*(u(4)-u(3))^2)*atan(the(10)*(u(2)-u(1)));
if u(4)>=0          ftire=0;
else                ftire=-1.5e6*u(4);
end;
if u(3)>=the(17)    fcyl =0;
else                fcyl=the(16);
end;
up(1)=-the(2)+(fdamp+fspring+ffric+fcyl)/the(15);
up(2)=-the(2)-(fdamp+fspring+ffric-ftire)/the(1);
up(3)=u(1);
up(4)=u(2);
up(5)=-the(12)*(u(5)+the(13))+the(14)*u(5)*(u(2)-u(1))
/(1+the(5)*(u(4)-u(3)));
%verplaatsing skid
%verplaatsing wiel-as
```

```

%de functie toest2 geeft de d.v. die hoort bij het 1-massa-2-veer systeem
%van het gewicht en de band plus de cilinders.
function up=toest2(t,u);
M=the(1)+the(15);
fband=[];fcil=[];
if u(2)>the(17) fcil =0;
else          fcil =the(16);
end;
if u(2)>0      fband=0;
else          fband=-1.5e6*u(2);
end;
up(1)=(fband+fcil)/M-9.81;
up(2)=u(1);
up(3)=0;

```

Tenslotte volgen hier nog twee telefoonnummers die ik heb gebruikt bij het regelen van de F16-band en -wiel:

Overste Oling, Luchtmachtbasis Gilze-rijen 040-506701 (waarschijnlijk  
inmiddels veranderd

Hr Peperkamp, DMKLU

070-3492572