

# 'n Twee-Dimensionele Voertuig- en Bandmodel

L. Pretorius\* en J. Visser\*\*

Universiteit van Pretoria

*A two dimensional vehicle and tyre model has been developed, showing that static tyre data may be used to simulate rather severe dynamic vehicle situations.*

## Simbolely

- FB<sub>i</sub> – radiale veerkrag vir wielstel i teen die hindernis met straal R⊙
- FD<sub>i</sub> – dempingskrag vir demperstel i
- FH<sub>i</sub> – horisontale reaksiekragte by wielstel i
- FP<sub>i</sub> – radiale veerkrag vir wielstel i teen 'n plat vlak
- FS<sub>i</sub> – krag in buffervere by veerstel i
- FV<sub>i</sub> – veerkrag vir voertuigveerstel i
- g – swaartekragversnelling
- IG<sub>YY</sub> – duiktraagheid van voertuigromp
- M<sub>i</sub> – Massa van wielstelle i
- M<sub>v</sub> – massa van die voertuigromp
- (X<sub>r</sub>, Z<sub>r</sub>) – koördinate van die rompmassamiddelpunt
- (X<sub>mi</sub>, Z<sub>mi</sub>) – koördinate van wiesenter i
- (X<sub>vi</sub>, Z<sub>vi</sub>) – koördinate by die bopunt van veerstel i
- (X<sub>oi</sub>, Z<sub>oi</sub>) – koördinate by onderpunt van die voertuigbandstel
- θ – hoekrotasie van die voertuigromp

### Voetskrif

- i – by wielstelle i = 1 (voor), 2 (middel), 3 (agter)

## Inleiding

Die moontlikheid van die gebruik van statiese radiale veereienskappe van bande in 'n dinamiese voertuigmodel word ondersoek. Statische banddata is natuurlik makliker verkrygbaar as dinamiese data en dit sou dus waardevol wees om te kon bepaal tot watter mate statiese banddata in voertuigmodelle gebruik kan word.

In die artikel word die aandag toegespits op die modellering van 'n tipiese seswiel veldvoertuig, toegerus met 14.00-20 M tipe voertuigbande. In die modellering word van eksperimentele statiese eienskappe van die 14.00-20 M tipe voertuigband gebruik gemaak. Nie-lineêre benaderings word vir die bandkragkrommes gebruik om die ritvertoning van die voertuig oor 'n starre semi-silindriese hindernis te voorspel.

Die voertuig- en -bandmodel word geëvalueer deur die resultaat daarvan te toets teen inligting vir 'n spesifieke veldvoertuig soos verkry met behulp van hoëspoed fotografie, sowel as deur kragmeting.

Die twee-dimensionele voertuig- en -bandmodel is afgelei om die ritgedrag van die betrokke voertuig te simuleer. As sodanig is die model dus 'n variasie op die 'statische' drie-dimensionele voertuigmodel soos ontwikkel deur Haarhoff [1]. Die twee-dimensionele voertuig-en-bandmodel is ook 'n uitbreiding op Bernard et al [2] se een-dimensionele voertuigmodel. Die huidige werk vind ook goeie aansluiting by die voertuigsimuleringswerk van Theron et al [5].

## Die model

Die gemodelleerde voertuig- en -bandsituasie word in figuur 1 getoon. Alle simbole word in die simbolely verklaar.

\*Senior Lektor

\*\*Professor Emeritus, Departement Meganiese Ingenieurswese, Universiteit van Pretoria

## Aannames

Die volgende aannames word in die modelontwikkeling gemaak:

- Die voertuigromp self word as 'n starre liggaam beskou.
- Slegs twee-dimensionele beweging van die voertuig in translasie en duik oor 'n starre semi-silindriese hindernis word beskou.
- Vergelykings word afgelei vir relatief klein hoekrotasies van die voertuigromp vanaf 'n verwysingstand sodat wielstelle onafhanklik in die Z-rigting kan beweeg en wielstelle se X- rigting beweging gekoppel is aan die voertuigromp (vir 'n bespreking hiervan sien Haarhoff [1]).
- alle massas van die band, as, vere, dempers en ander ongeveerde massas op die spesifieke voertuigas, word as 'n gekonsentreerde puntmassa by die wiesenter beskou.
- Algemene nie-lineêre veer- en dempingeenskappe kan in die model gebruik word, maar geen demping word in die bandmodel gebruik nie.
- Daar word aanvaar dat voertuigvere en -dempers slegs kragte in die vertikale (Z) rigting uitoefen.
- Die voertuig word in die vryloopsituasie, dit wil sê uit rat uit, gemodelleer en geen roleienskappe van bande word in die model opgeneem nie.
- Daar word aangeneem dat geen tangensiale of aksiale kragte in die bandloopvlak optree nie. Verwys ook na Davis [3]. Hierdeur word geïmpliseer dat slegs radiale kragte op enige deel van die bandloopvlak voorkom.
- Soos blyk uit figuur 2, word die veereenskappe van 'n band deur twee onafhanklike-vere, een gerig na die horisontale vlak en die ander na die hindernis senter, gemodelleer. In die algemeen is hierdie twee veereenskappe verskillend soos eksperimenteel aangetoon is deur Pretorius [4].
- Die veereenskappe wat in die evaluering van die model gebruik word, is die gemete statiese veereenskappe vir die 14.00-20 M tipe band. Algemene nie-lineêre veereenskappe kan gebruik word.

## Ontwikkeling van die teoretiese model

Met verwysing na figuur 2 sien die bewegingsvergelings van wielstel 1 met massa M<sub>1</sub> soos volg daar uit, uit Newton se tweede wet:

Z- rigting:

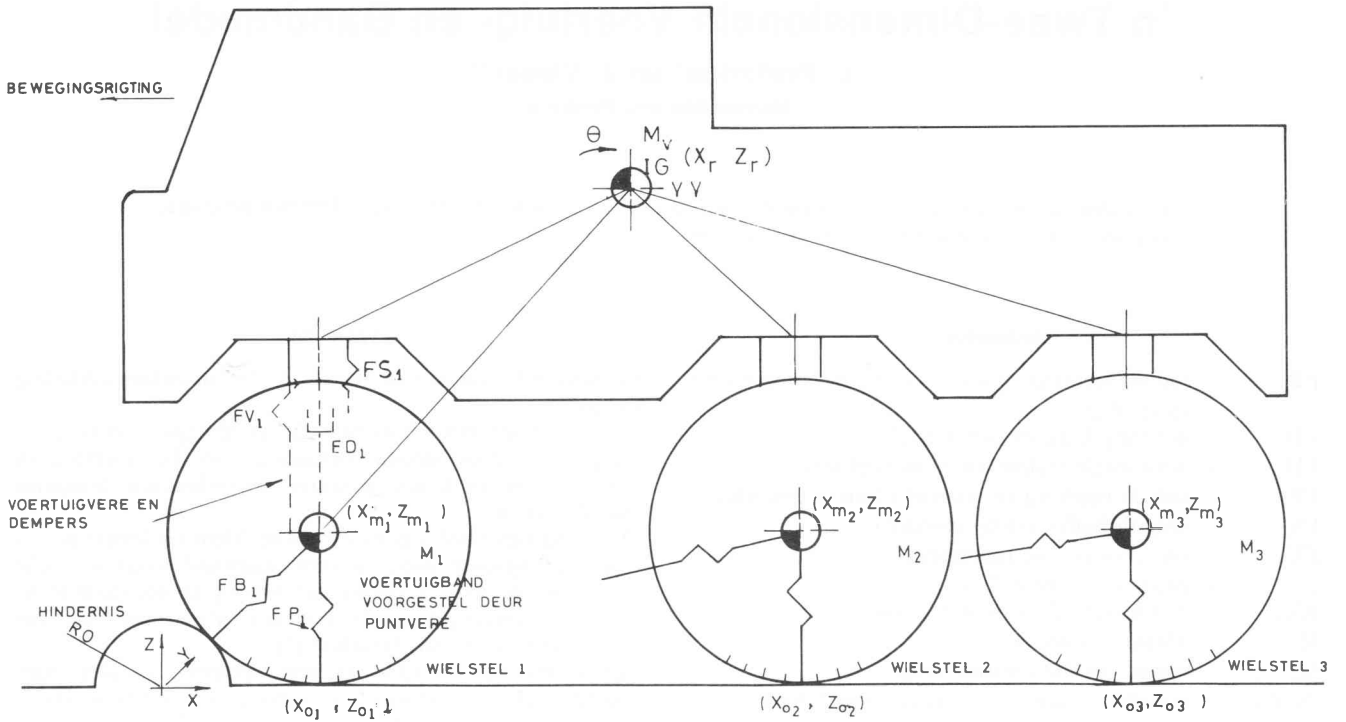
$$FB_1 \frac{Z_{m_1}}{\sqrt{X_{m_1}^2 + Z_{m_1}^2}} + FP_1 - FV_1 - FS_1 - FD_1 - M_1 g = M_1 \ddot{Z}_{m_1} \quad (1)$$

X- rigting:

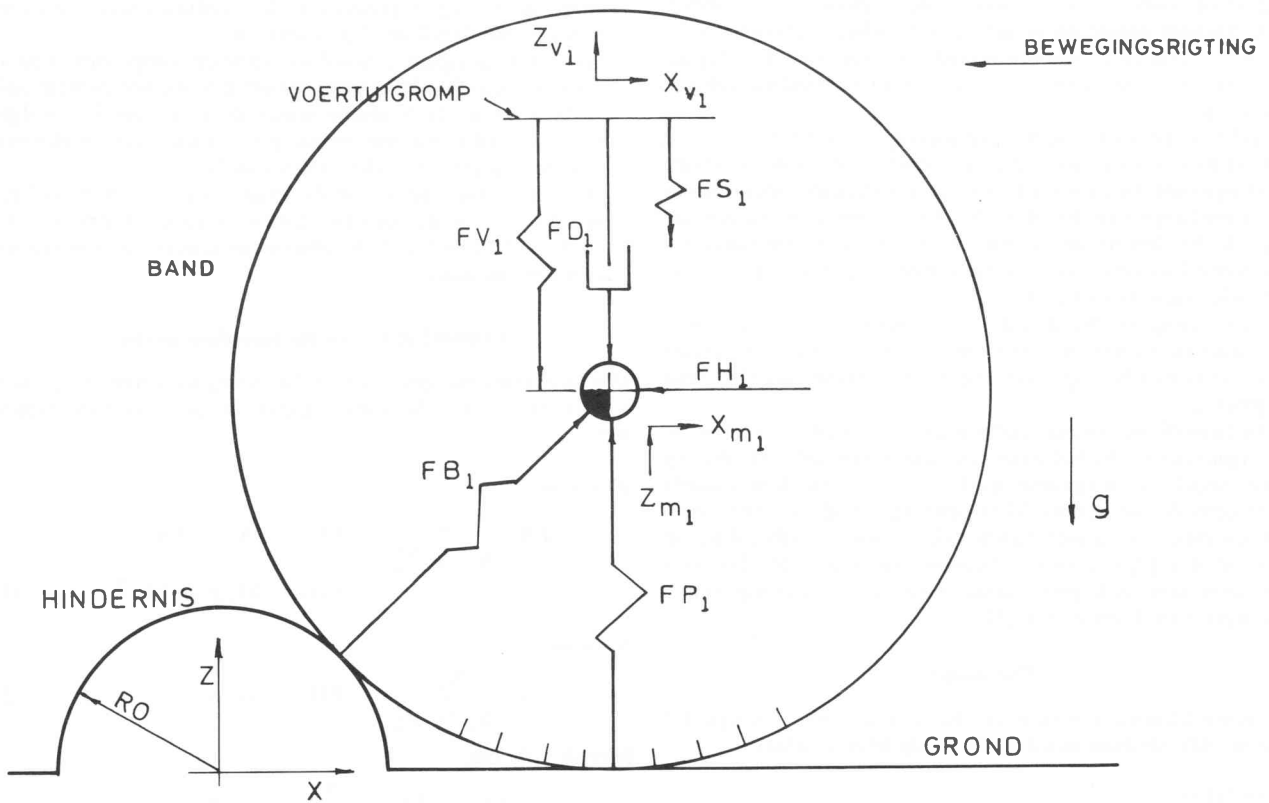
$$FB_1 \frac{X_{m_1}}{\sqrt{X_{m_1}^2 + Z_{m_1}^2}} - FH_1 = M_1 \ddot{X}_{m_1} \quad (2)$$

Hieruit volg dat

$$FH_1 = FB_1 \frac{X_{m_1}}{\sqrt{X_{m_1}^2 + Z_{m_1}^2}} - M_1 \ddot{X}_{m_1} \quad (3)$$



Figuur 1 - Voertuigkoördinate en model



Figuur 2 - Kragtesituasie op wielstel 1

FH<sub>1</sub> is die horisontale reaksiekrag wat by wielstel 1 inwerk. Analoë vergelykings is vir wielstelle 2 en 3 opgestel.

Die bewegingsvergelykings vir die voertuigromp kan ook verkry word as:

X-rioting:

$$FB_1 \frac{X_{m_1}}{\sqrt{X_{m_1}^2 + Z_{m_1}^2}} + FB_2 \frac{X_{m_2}}{\sqrt{X_{m_2}^2 + Z_{m_2}^2}} + FB_3 \frac{X_{m_3}}{\sqrt{X_{m_3}^2 + Z_{m_3}^2}} = M_1 \ddot{X}_{m_1} + M_2 \ddot{X}_{m_2} + M_3 \ddot{X}_{m_3} + M_v \ddot{X}_r \quad (4)$$

Z-rioting:

$$FV_1 + FS_1 + FD_1 + FV_2 + FS_2 + FD_2 + FV_3 + FS_3 + FD_3 - M_v g = M_v \ddot{Z}_r \quad (5)$$

θ-rioting:

$$\begin{aligned} & \{FV_1 + FS_1 + FD_1\}(X_r - X_{v_1}) \\ & + \{FV_2 + FS_2 + FD_2\}(X_r - X_{v_2}) \\ & + \{FV_3 + FS_3 + FD_3\}(X_r - X_{v_3}) \\ & - FH_1(Z_r - Z_{m_1}) \\ & - FH_2(Z_r - Z_{m_2}) \\ & - FH_3(Z_r - Z_{m_3}) \\ & = IG_{yy} \ddot{\theta} \end{aligned} \quad (6)$$

Wanneer 'n bepaalde wiel nie in kontak met die huppel is nie, word die ooreenkomstige kragterm outomaties nul. Dieselfde geld wanneer 'n wiel nie in kontak met die plat vlak is nie.

**Rekenaarsimulasie**

Bogemelde vergelykings bevat afhanklike koördinate (bv. X<sub>m</sub>, X<sub>m</sub>, ens.) en onafhanklike koördinate (bv. Z<sub>r</sub>, θ ens.). Verwantskappe tussen die afhanklike en onafhanklike koördinate kan verkry word soos beskryf deur Pretorius [4]. Bogenoemde bewegingsvergelykings vir die voertuig kan dan opgelos word vir die onafhanklike koördinate.

'n Rekenaarprogram VOERTUIG 1 is ontwikkel om bogemelde vergelykings vir die seswielvoertuig wat oor 'n semi-silindriese hindernis beweeg, op te los.

'n Vloeiagram van die rekenaarprogram word in figuur 3 getoon.

Die voordeel van die program is dat dit in modules gerangskik is wat relatief maklik verander kan word om ander tipes voertuigsituasies te modelleer.

**Praktiese voertuigparameters**

Voertuigdata van tipiese seswiel en agtwiel veldvoertuie soos in gebruik in Suid-Afrika is hoofsaaklik in die rekenaarsimulasies gebruik. Die voertuigveereienskappe is voorgestel deur die volgende nie-lineêre verwantskap

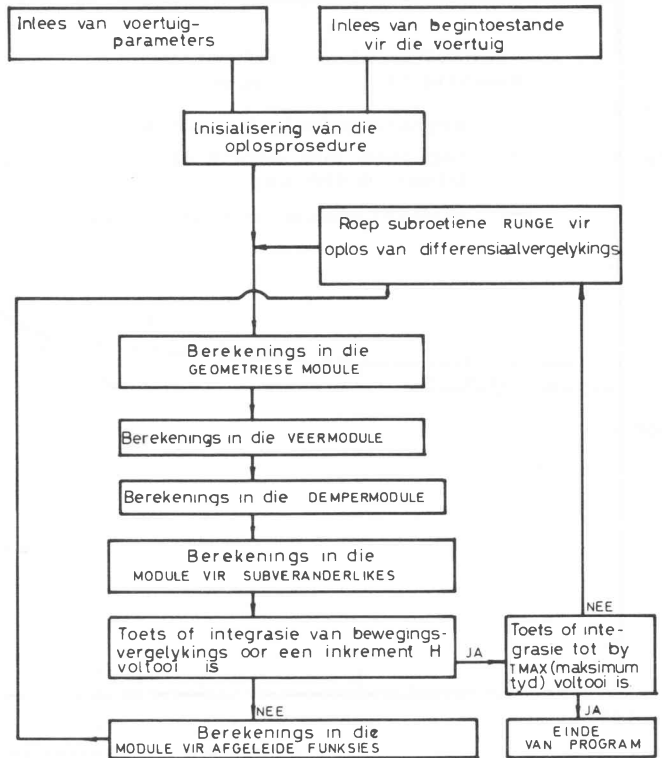
$$FV = 2437,2(e^{11,344Z'} - 1) + 151711,8 \cdot (Z')^{1,282259} \quad (7)$$

met (Z') die netto samedrukking van die veer in meter en FV die veerkrag. Die voertuie was toegerus met 14,00-20 M tipe voertuigbande.

Met behulp van eksperimentele data is die volgende verwantskappe vir die radiale statiese veereienskappe van die 14,00-20 M tipe voertuigband by 500 kPa verkry:

(i) Teen 'n semi-silindriese hindernis, radius 200 mm:  
 $FB = 1,705(Z)^{1,3581} \times 10^6 \quad (8)$

(ii) Teen 'n plat plaat:  
 $FP = 3,072(Z)^{1,440} \times 10^6 \quad (9)$   
 Met Z in beide gevalle die maksimum radiale bandsamedrukking in meter, en FB en FP die bandkragte per band.



**Figuur 3 – Vloeiagram vir voertuig 1**

**Evaluering**

Die voertuigmodel soos hier ontwikkel, is ge-evalueer deur die resultate daarvan te vergelyk met enersyds hoëspoed-filmdata van 'n seswiel veldvoertuig wat oor 'n semi-silindriese hindernis beweeg en andersyds bandvlakkragdata vir 'n agtwiel veldvoertuig wat oor 'n 160 mm hoë sinusvormige hindernis beweeg.

In die geval die seswiel voertuig is 'n hoëspoedfilm geneem van die voorwiel terwyl die voertuig oor 'n 200 mm hoë semi-silindriese hindernis beweeg. Die lokus van die wielsenter is raampie vir raampie van die film bepaal met behulp van 'n meetmikroskoop.

In die agtwiel geval is die kragte op die hindernis direk bepaal terwyl die voertuig daaroor beweeg.

Die toetstoestande vir die seswiel voertuig word in tabel 1 getoon.

Soortgelyke toestande as vir die seswiel voertuig het tydens die toetse met die agtwiel voertuig geheers.

Toetssnelhede vir die agtwiel voertuig word in tabel 2 getoon.

**Resultate**

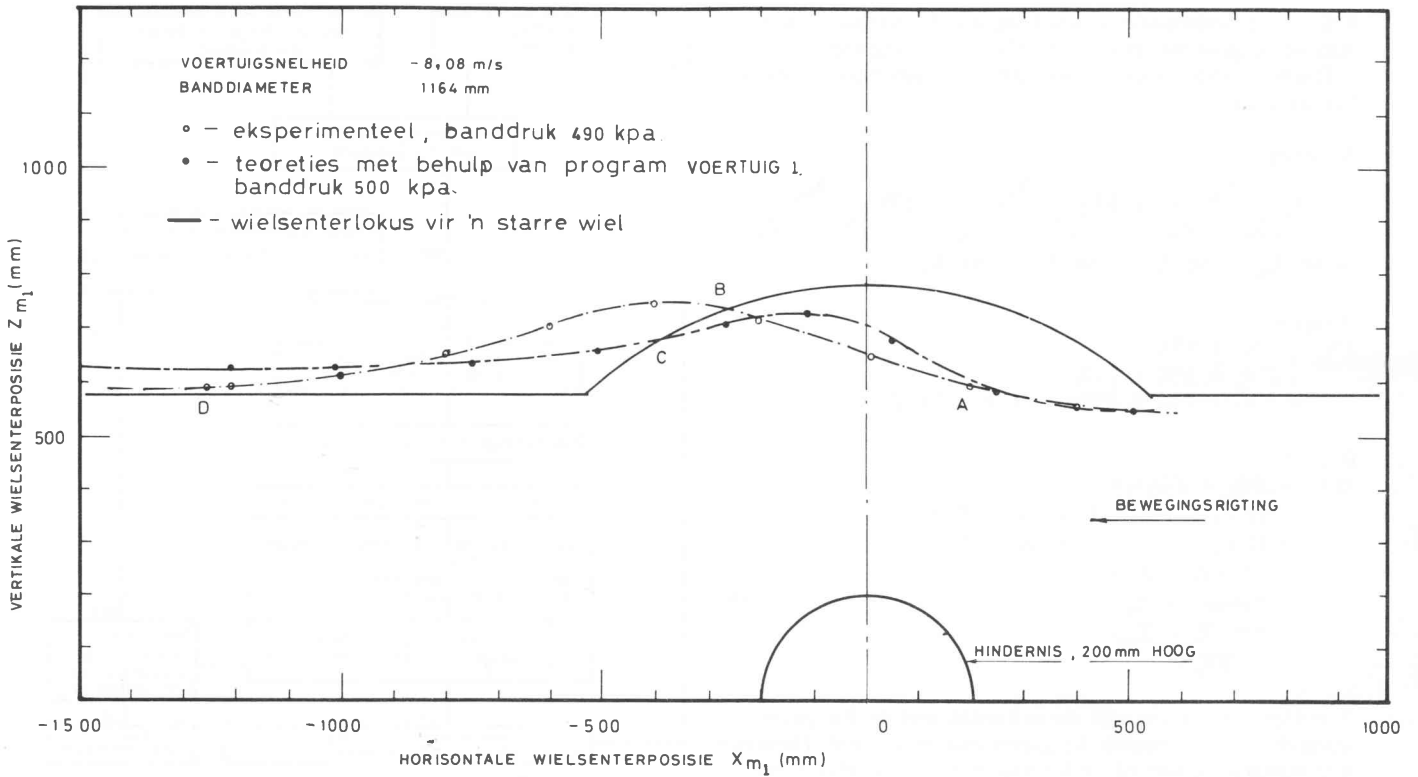
Die eksperimentele voorwielsenterlokus vir die seswiel voertuig wat teen 'n nominale snelheid van 29,1 km/h van regs na links oor die 200 mm hoë starre, semi-silindriese hindernis beweeg, word in figuur 4 getoon. Die lokus is verkry vanaf hoëspoedfilmdata.

Die teoretiese voorwielsenterlokus soos verkry uit 'n rekenaarsimulering van die seswiel voertuig word ook in figuur 4 getoon. Die aanvanklike horisontale voertuigsnelheid tydens die simulering was -8,08 m/s (-29,1 km/h), die hindernishoogte was 200 mm en die banddruk 500 kPa.

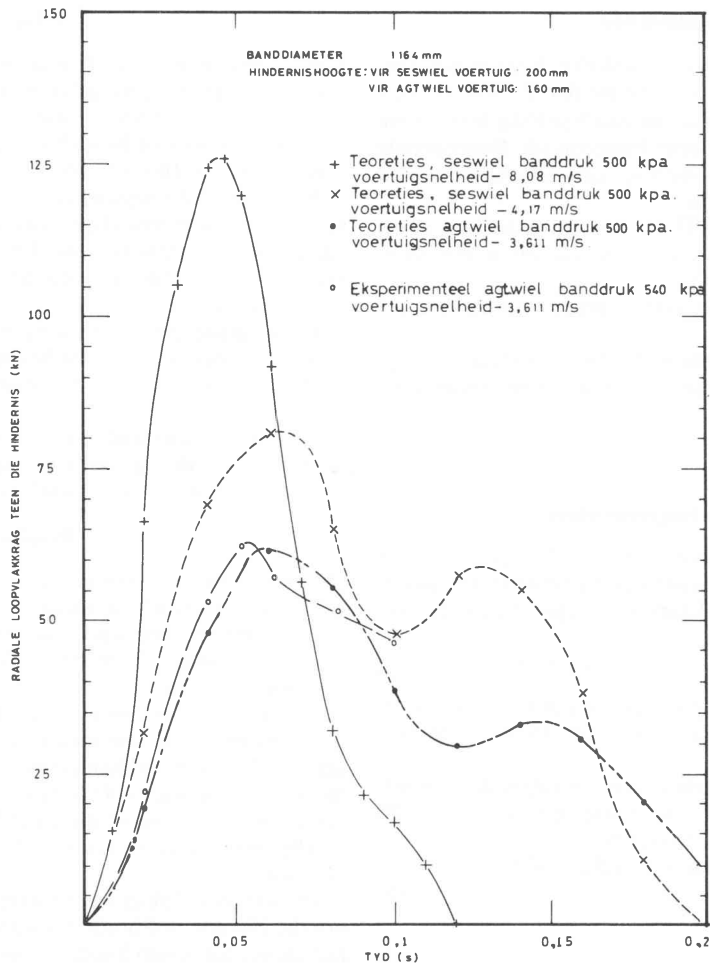
Alle resultate is verkry met 14,00-20 M tipe bande op die voertuie.

Die wielsenterlokus vir 'n starre wiel met diameter 1 164 mm oor die 200 mm hoë hindernis word ook in figuur 4 getoon. Die radiale verskil tussen hierdie lokus en die werklike een lewer die banddefleksie terwyl die band in kontak is met die hindernis.

Uit figuur 4 blyk dat die eksperimentele en teoretiese voor-



**Figuur 4 - Teoretiese en gemete voorwielsenenterlokusse**



**Figuur 5 - Teoretiese en eksperimentele kragtydkrommes op 'n voorwiel**

spelde voorwielcenterlokos goed korreleer in die gebied waar die band in kontak is met die hindernis, sowel as nadat die band die hindernis verlaat het.

Verwerkte eksperimentele loopvlakkragkrommes vir die agtwiel voertuig wat teen verskillende snelhede oor 'n 160 mm hoë hindernis beweeg, word in figuur 5 getoon.

Die teoretiese loopvlakkragkrommes soos verkry uit rekenaarsimulerings van die agtwiel voertuig as 'n ekwivalente seswiel voertuig word ook in figuur 5 getoon.

Die goeie korrelasie tussen teoretiese en eksperimentele bandkragte is vir die agtwiel geval opvallend; 'n verskil van ongeveer 3% tussen teoretiese en eksperimentele bandkragte kan bepaal word.

**Gevolgtrekking**

Die dinamiese gedrag van 'n voertuig kan selfs onder uiterste omstandighede goed met behulp van statiese bandkrommes voorspel word. Hierdie feit vergemaklik die werk baie, want relatief eenvoudig bepaalbare banddata kan dus in voertuig-simulerings gebruik word, in plaas daarvan dat dinamiese data met groot moeite en koste verkry hoef te word.

Die teoretiese voertuig- en -bandmodel soos in hierdie artikel beskryf, kan ook met vrug gebruik word om radiale bandkragte, selfs in uiterste voertuigsituasies, te bereken. Sodanige radiale bandkragte word onder andere benodig om die suspensies van veldvoertuie te ontwerp.

**Tabel 1: Toestande vir die seswiel veldvoertuig**

Voertuigtype:	Seswiel veldvoertuig
Voertuigbande:	Uniroyal Fleetmaster, 14.00-20 M tipe
Banddruk:	490 kPa, behalwe regs voor ~ 460 kPa en regs middelas - 480 kPa
Voertuigtoestand:	leeg, brandstof tenk $\frac{3}{4}$ vol
Voertuigposisie:	gemiddeld horisontaal
Voertuigsnelheid:	29,1 km/h
Voertuig-aansig:	kant
Hindernisgrootte:	semi-silindries, radius 200 mm
Aantal hindernisse:	twee, gerig na voorwiele
Kamera:	hoëspoed, wyelens tipe rolprentkamera
Filmkruishaarposisie:	vertikaal - op huppelsenter horisontaal - op ringlaervlak
Filmspoed:	750 raampies/sekonde.

**Tabel 2: Toetse met die agtwiel veldvoertuig**

Toets nr.	Banddruk (kPa)	Snelhede (km/h)				
		Subtoetsnommer				
		A	B	C	D	E
1	300	10,9	16,3	17,4	24,5	35,1
2	400	11,7	15,8	16,9	25,4	-
3	540	10,1	13,0	15,2	21,7	-
Mikpunt snelhede		10	15	20	25	35

**Verwysings**

1. Haarhoff, P. C., - "Dinamiese gedrag van 'n voertuig onderworpe aan 'n eksterne krag", Tydskrif vir Natuurwetenskappe, Jaargang 20, No. 1, pp. 1-15, Maart 1980.
2. Bernard, J. et al, - "Tire models for the determination of vehicle structural loads", Vehicle System Dynamics, Vol. 10, No. 2-3, pp. 168-173, September 1981.
3. Davis, D. C., - "A radial spring terrain enveloping tire model", Vehicle system Dynamics, Vol. 4, pp. 55-69, Maart 1975.
4. Pretorius, L., - "'n Kritiese ontleding van voertuigbande onder lastoestande", DIng-proefskrif, Januarie 1983, Departement Meganiese Ingenieurswese, Universiteit van Pretoria.
5. Theron, N. J., du Preez, R. J., van Wyk, J., - "The simulation of a rigid body

multi axle road vehicle with the aid of a matrix method", Proc. FEMSA 1984, CSIR, South Africa.

**Bedankings**

Die skrywers wil graag dank betuig aan prof. P. C. Haarhoff van die Departement Meganiese Ingenieurswese aan die Universiteit van Pretoria vir nuttige samesprekings, finale jaar meganiese ingenieurstudente van UP (hulle sal weet wie hulle is) vir hulp met eksperimentele werk, en mev. Y. Lang, streekstelsel ingenieur van Perseus, vir rekenaarsisteemhulp.