

# De invloed van gereedschapscoatings op het wrijvingsgedrag ter plaatse van de matrijsradius bij het plaatvormen

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

Buzeman, D. G., Groot, de, M. T., & Net, van der, A. J. (1993). *De invloed van gereedschapscoatings op het wrijvingsgedrag ter plaatse van de matrijsradius bij het plaatvormen*. (TH Eindhoven. Afd. Werktuigbouwkunde, Vakgroep Produktietechnologie : WPB; Vol. WPA1408). 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.

BB 469125

**De invloed van gereedschapscoatings op  
het wrijvingsgedrag ter plaatse van de  
matrijsradius bij het plaatvormen.**

**D. Buzeman  
M.Th de Groot  
A.J. van der Net**

**onderzoeksrapport WPA, januari 1993**

**wpa 1408**

**IOPD 050**

## Literatuur

- Koolen, J.H.R.  
Hoogenboom, S.M.  
Sniekers, R.J.J.M.      Analyse van het buigproces ter plaatse van de matrijsradius bij het dieptrekken.  
WPA 1024 (1991).
- Net, A.J. van der  
ledema, E.  
Groot, M.Th. de      Experimentele bepaling van de wrijvingscoëfficiënt door middel van de striptrekproef.  
WPA 1112 (1991).
- Houwen, M.J.M.      Berekening van de wrijvingscoëfficiënt voor de verbeterde striptrek-unit zonder stripafmetingen.  
WPA 1127 (1991).
- Buzeman, D.  
Groot, M.Th. de  
Net, A.J. van der      Experimenten behorende bij berekening van de wrijvingscoëfficiënt voor de verbeterde striptrek-unit zonder stripafmetingen.  
WPA 1171 (1991).
- Buzeman, D.  
Groot, M.Th. de  
Net, A.J. van der      Het bepalen van de wrijvingscoëfficiënt met de striptrekproef.  
WPA 1194 (1991).
- Groot, M.Th. de  
Net, A.J. van der      Overzichtstabel (strip)trekproeven.  
WPA 1231 (1992).
- Sniekers, R.J.J.M.      Berekening wrijvingscoëfficiënt bij striptrekken.  
WPA 1441 (1992)

## Symbolenlijst

$s_0$	materiaaldikte	[mm]
$C$	karacteristieke spanning	[N/mm <sup>2</sup> ]
$n$	verstevingsexponent	[-]
$r (=r_{0.2})$	anisotropiefactor	[-]
$\epsilon_0$	voordeformatie	[-]
$R_a$	ruwheidswaarde	[ $\mu$ m]
$H_v$	hardheid Vickers	[GPa]

## Inleiding

Op een aantal (8) plaatmaterialen met verschillende eigenschappen is de stirptrektest uitgevoerd. Met deze test wordt de wrijving onderzocht zoals deze optreedt in dieptrekgereedschappen ter plaatse van de matrijsradius. Details van het verloop van de test zijn verderop in dit verslag besproken. De tests zijn uitgevoerd bij verschillende wrijvingscondities: vier smeermiddelen (inclusief geen smering) en vier gereedschapscoatings (inclusief geen coating). Voor het bepalen van de materiaalparameters is voor elk van deze materialen ook de trekproef in de drie walsrichtingen verricht.

## Materialen

De gebruikte materialen zijn voorzien van de TUE code. (Voor gegevens van materialen 1 <sup>1</sup>/<sub>m</sub> 14 zie WPA rapporten 1112, 1171, 1194 en 1231.)

- Materiaal 15: MCB, Staal onbekleed, Spd TUE,  $s_0 = 1.03$  mm.
- Materiaal 16: Hoogovens, Staal 14 bekleed, Electrolitisch verzinkt  $4\mu$ ,  $s_0 = 0.75$  mm., code 8818.
- Materiaal 17: Hoogovens, Staal 15 bekleed, Thermisch verzinkt  $19\mu$ ,  $s_0 = 0.81$  mm., code 8807.
- Materiaal 19: Eurotechniek/Prelaq staal, Staal bekleed, met ultrasouple lack, deepdraw 18 my, DIN 50049-22,  $s_0 = 0.83$  mm., code FPX Z100.
- Materiaal 20: Hunter Douglas, Aluminium onbekleed,  $s_0 = 0.51$  mm., code 3103 M24.
- Materiaal 21: Hunter Douglas, Aluminium bekleed, met lak,  $s_0 = 0.55$  mm., code 3103 M24.
- Materiaal 22: Hunter Douglas, Aluminium C4S onbekleed,  $s_0 = 0.6$  mm., code H18 \ 48.
- Materiaal 23: Hunter Douglas, ALuminium C4S bekleed, met lak,  $s_0 = 0.65$  mm., code H18 \ 48.

De materiaalparameters van bovengenoemde materialen, bepaald door middel van de standaard (automatische) trekproef, zijn als volgt:

Mat: 15	0°	90°	45°
C	480	490	525
n	0.23	0.24	0.24
r	1.76	2.20	1.19
ε0	0.001	0.004	0.002

Mat: 16	0°	90°	45°
C	543	477	519
n	0.284	0.199	0.229
r	1.14	1.55	1.16
ε0	0.005	0.000	0.000

Mat: 17	0°	90°	45°
C	518	521	534
n	0.241	0.244	0.256
r	1.42	1.97	1.51
ε0	0.002	0.002	0.005

Mat: 19	0°	90°	45°
C	489	479	489
n	0.282	0.272	0.249
r	2.07	2.37	1.60
ε0	0.000	0.000	0.000

Mat: 20	0°	90°	45°
C	149\152	172\175	200\184
n	0.034\035	0.04\042	0.078\059
r	1)	1)	1)
ε0	0.000	0.000	0.000

Mat: 21	0°	90°	45°
C	136\139	142\142	129\125
n	0.037\037	0.03\034	0.017\018
r	1)	1)	1)
$\epsilon_0$	0.000	0.000	0.000

Mat: 22	0°	90°	45°
C	237\227	231\252	223\228
n	0.039\041	0.05\031	0.03\037
r	1)	1)	1)
$\epsilon_0$	0.000	0.000	0.00

Mat: 23	0°	90°	45°
C	188\204	190\200	190\201
n	0.034\08	0.04\041	0.04\058
r	1)	1)	1)
$\epsilon_0$	0.000\010	0.000	0.00

### opmerking 1)

Voor het berekenen van de anisotropie worden bij de automatische verwerking drie mogelijkheden geboden:

- $r_{0.1}$  = anisotropie in het gebied  $0 < \epsilon < 0.1$
- $r_{0.2}$  = anisotropie in het gebied  $0 < \epsilon < 0.2$
- $r_{gem}$  = anisotropie in het gebied  $0 < \epsilon < \epsilon_{max}$

De anisotropie-waarden van het materiaal van Hunter Douglas (nummers 20, 21, 22 en 23; Al bekleed en onbekleed) zijn onbetrouwbaar in verband met de lage n waarden die bij deze materialen optreden. ( $n \approx 0$ ).

De waarden voor de anisotropie worden uit de meetgegevens berekend die om de 2 sec worden gemeten. De meting start bij een breedteafname van  $2\mu\text{m}$ . De rekken zijn bij deze materialen zó klein dat bij de automatische verwerking zeer kleine waarden op elkaar gedeeld worden. Samen met de rekenonnauwkeurigheid die bij de verwerking optreedt levert dit een onbetrouwbaarheid in de berekende anisotropie voor kleine rekken. Bij de automatische verwerking zullen  $r_{0.1}$  en  $r_{0.2}$  ook worden berekend als de rek kleiner is dan 10 of 20%, terwijl de  $r_{gem}$  onbetrouwbaar is. Er zijn voor deze materialen dan ook geen r-waarden vermeld. Bij de andere materialen is de  $r_{0.2}$  vermeld. De waarden voor de C, de n en de  $\epsilon_0$  zijn voor alle materialen in het gebied waarin de metingen zijn verricht een goede indicatie voor de werkelijke waarden.

## Gereedschapsgegevens (coating)

De proeven zijn uitgevoerd met vier verschillende oppervlakken. Ten eerste met ongecoat gereedschapsstaal en vervolgens met drie verschillende coatings:

coating 1: - Titaannitride: TiN  
- Laagdikte: 2.6  $\mu\text{m}$   
- Hardheid (Hv, 7.5 gr.): 26 GPa.

coating 2: - Titaan aluminium nitride: TiAlN  
- Laagdikte: 2.3  $\mu\text{m}$   
- Hardheid (Hv, 7.5 gr.): 24 GPa.

coating 3: - Titaan carbonitride: TiCN  
- Laagdikte 2.2  $\mu\text{m}$   
- Hardheid (Hv, 7.5 gr.): 29 GPa.

## Smeermiddelen

Alle materialen zijn gecombineerd met de smeermiddelen FINAROL, PLATINOL en LANOLINE. Voor elk materiaal is ook een experiment zonder smering uitgevoerd.

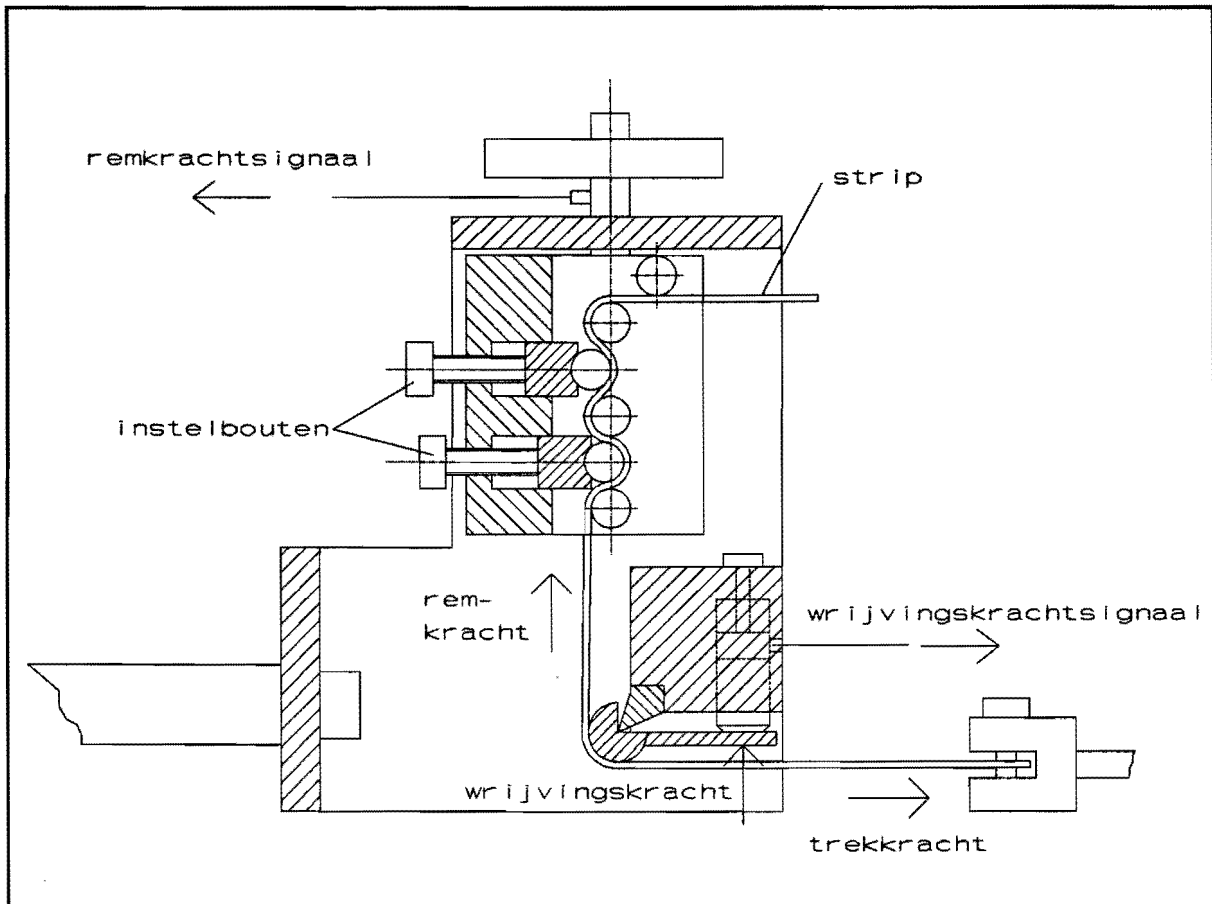
Bij gebruik van een ander smeermiddel is steeds het gereedschap goed zuiver gemaakt om beïnvloeding van de meting door smeermiddelresten te voorkomen.

## Striptrekproef

Bij de striptrekproef worden metalen strips om een buigcylinder getrokken (in dit geval met een radius van 6 millimeter). Voor dit experiment is een speciaal gereedschap ontwikkeld, gemonteerd op een standaard universele trekbank, de Universal Hounsfield tensometer (zie figuur 1).

Bij de proef wordt op de strip een bepaalde remkracht aangebracht. Deze remkracht, de horizontale trekkracht en de wrijvingskracht worden met behulp van piëzo-elementen gemeten, en kunnen op de display die op de ladingsversterker is aangesloten worden afgelezen. Met behulp van de gemeten waarden kan de wrijvingscoëfficiënt worden bepaald. Op de theoretische achtergrond en details van het gereedschap zal hier niet verder worden ingegaan, hiervoor wordt verwezen naar bijlage I en II en WPA rapport 1441.





Figuur 1: de striptrekunit

De striptrekproef is voor elke materiaal/smeermiddel/gereedschapscoating combinatie enige malen herhaald voor verschillende remkrachten (in theorie is er geen afhankelijkheid van de remkracht). De meetwaarden zijn met behulp van een computerprogramma verwerkt (voor de berekeningsmethode en programma zie bijlage I en II), waardoor voor elke gebruikte materiaal/smeermiddel/gereedschapscoating combinatie een gemiddelde wrijvingscoëfficiënt is te bepalen.

## Resultaten

In tabel 1 en 2 en figuren 2 en 3 zijn de bepaalde wrijvingscoëfficiënten weergegeven. In de tabellen en figuren geldt voor de smeringscondities dat f = finarol; p = platinol; l = lanoline; g = geen smering, en voor de materialen geldt dat het nummer in de grafiek overeen komt met de TUE-code.

tabel 1: wrijvingscoëfficiënten bij de striptrekproef (I)

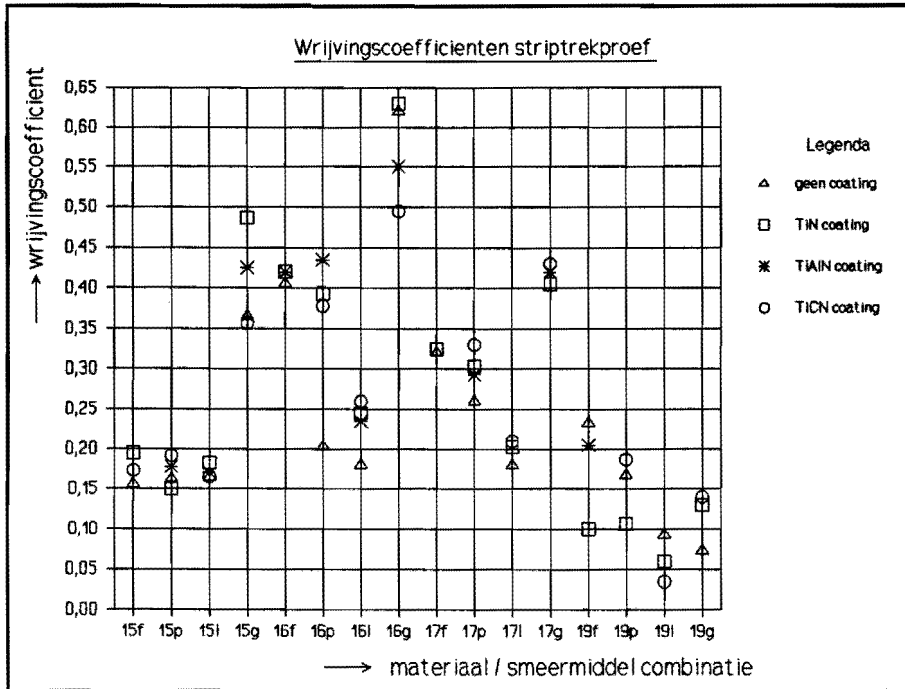
	geen coating				TiN coating			
mat	f	p	l	g	f	p	l	g
15	0.156	0.163	0.165	0.365	0.195	0.150	0.183	0.487
16	0.405	0.203	0.180	0.620	0.420	0.393	0.245	0.630
17	0.320	0.260	0.180		0.325	0.303	0.203	0.405
19	0.233	0.167	0.0933	0.0733	0.100	0.107	0.060	0.130
20	0.328	0.228	0.297	0.577	0.225	0.265	0.260	0.640
21	0.228	0.164	0.210	0.150	0.210	0.294	0.208	0.170
22	0.280	0.210	0.280	0.355	0.233	0.198	0.240	0.290
23	0.173	0.262	0.220	0.198	0.233	0.278	0.183	0.388

tabel 2: wrijvingscoëfficiënten bij de striptrekproef (II)

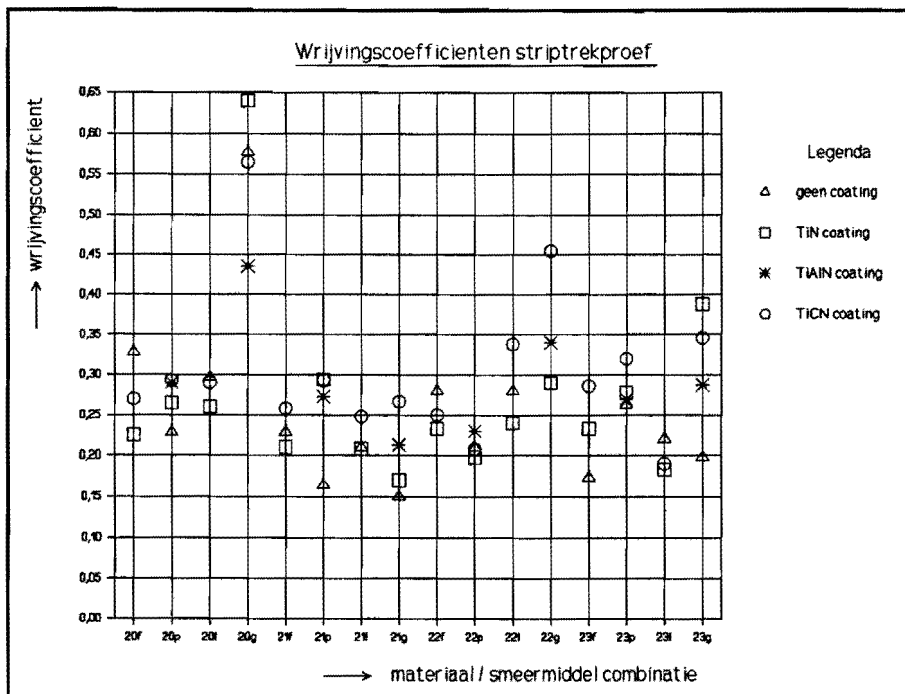
	TiAlN coating				TiCN coating			
mat	f	p	l	g	f	p	l	g
15	*	0.178	0.170	0.425	0.173	0.192	0.165	0.357
16	*	0.435	0.235	0.550	0.420	0.378	0.260	0.495
17	*	0.293	*	0.420		0.330	0.210	0.430
19	*	*	*	*	0.205	0.187	0.035	0.140
20	*	0.290	*	0.435	0.270	0.293	0.290	0.565
21	*	0.273	*	0.213	0.258	0.293	0.248	0.267
22	*	0.230	*	0.340	0.250	0.208	0.338	0.455
23	*	0.270	*	0.287	0.286	0.320	0.190	0.346

opmerking 2)

Van de met een \* gemerkte combinaties is geen wrijvingscoëfficiënt bekend. De reden hiervoor is het afslijten van de TiAlN coatinglaag na een aantal proeven.

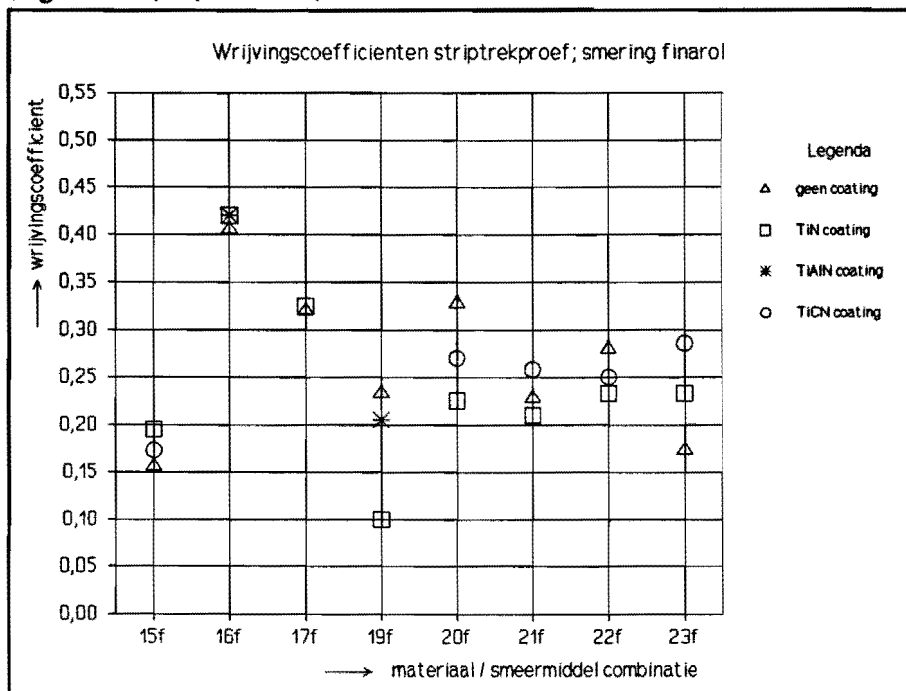


Figuur 2: wrijvingscoëfficiënten bij staal

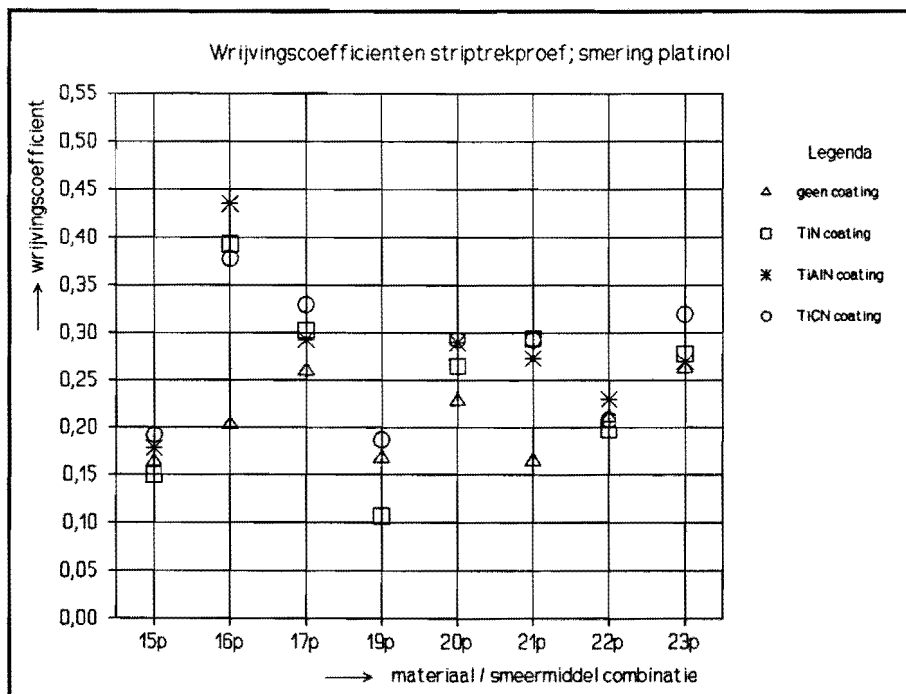


Figuur 3: Wrijvingscoëfficiënten bij aluminium

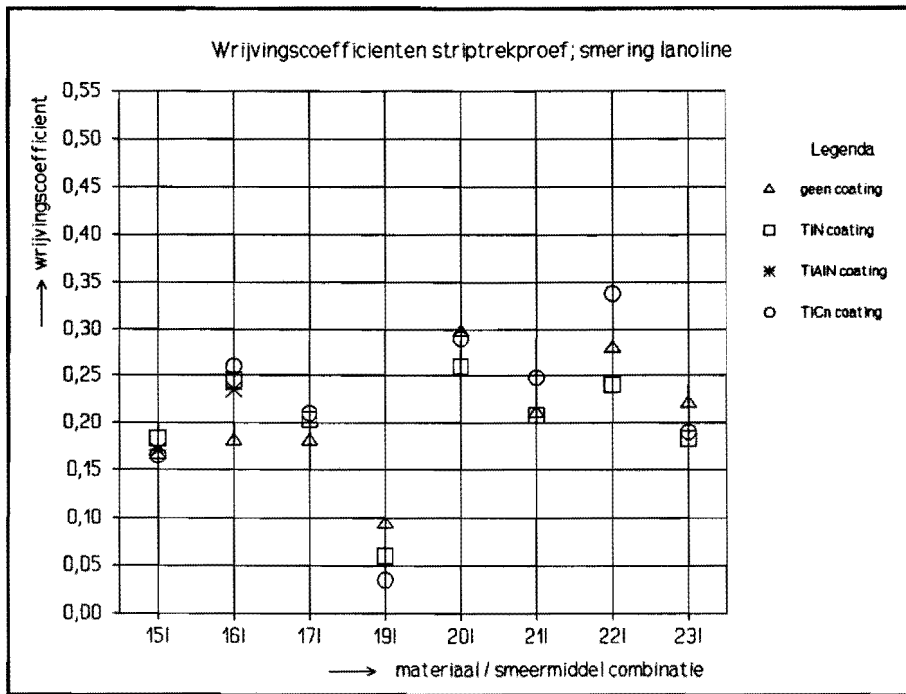
Deze wrijvingscoëfficiënten kunnen gerangschikt worden in groepen wrijvingscoëfficiënten per smeermiddel. De volgende grafieken geven deze onderverdeling weer (figuren 4, 5, 6 en 7).



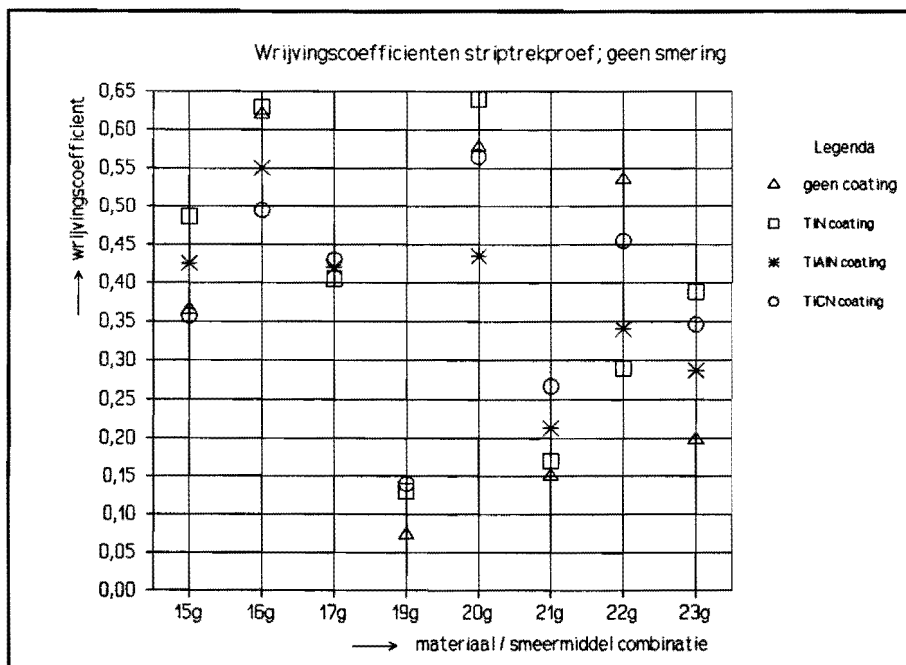
Figuur 4: smering finarol



Figuur 5: smering platinol



Figuur 6: smering lanoline



Figuur 7: geen smering

Bij bovenstaande figuren valt het volgende op:

- Bij vergelijken blijken de wrijvingscoëfficiënten voor de gecoate gereedschapsmaterialen en de niet gecoate gereedschapsmaterialen niet te verschillen.
- De wrijving blijkt bij gelakte materiaal 19 in alle gevallen zeer laag te zijn, de smering heeft hierop weinig invloed.
- Gelakte materialen geven in het algemeen een lagere wrijvingscoëfficiënt dan blanke materialen.
- Verzinkte materialen hebben een hogere wrijvingscoëfficiënt, alleen bij smering met lanoline is deze invloed niet merkbaar.

## Ruwheidsmetingen

Bij elke materiaal/smeermiddel/coating combinatie is ook de ruwheid gemeten. Voor het interpreteren van deze gegevens is het noodzakelijk de volgorde van de proeven te weten. De chronologische volgorde van de verrichte proeven is: platinol-geen smering-lanoline-finarol.

Bij elk smeermiddel is de chronologische volgorde betreffende de materialen weergegeven door de volgorde van de tabellen met gegevens.

De ruwheden zijn gemeten met de Mitutoyo surftest-501 ruwheidsmeter in axiale richting op de nippel. De volgende waarden zijn gemeten:

1. De ruwheid van de gereedschappen vóór aanvang van de proeven.
2. Metingen bij smering met platinol; de ruwheid is zowel gemeten vóór het trekken van strips van een materiaal als erna. De meting die de ruwheid vóór de proef weergeeft is een meting gedaan op het deel van het gereedschap dat buiten het contactvlak met de strip ligt. Deze geeft dus de ruwheid van het gepolijste gereedschap weer. De gereedschappen zijn gepolijst na een serie met hetzelfde smeermiddel.
3. Metingen bij proeven zonder smering; de ruwheid is zowel gemeten vóór het trekken van strips van een materiaal als erna. De meting die de ruwheid vóór de proef weergeeft is een meting gedaan op het deel van het gereedschap dat buiten het contactvlak met de strip ligt.
4. Metingen bij smering met lanoline; de ruwheid is zowel gemeten vóór het trekken van strips van een materiaal als erna. De meting die de ruwheid vóór de proef weergeeft is een meting gedaan op het deel van het gereedschap dat buiten het contactvlak met de strip ligt.
5. Metingen bij smering met finarol; de ruwheid is zowel gemeten vóór het trekken van strips van een materiaal als erna. De meting die de ruwheid vóór de proef weergeeft is een meting gedaan op het deel van het gereedschap dat buiten het contactvlak met de strip ligt.
6. De ruwheid van de materialen waaruit de strips zijn gemaakt (dus vóór de proeven).

### 1. metingen van de ruwheid vóór aanvang van de proeven

coating nummer	coating	ruwheid $R_a$ in $\mu\text{m}$
0	geen	0.36
1	TiN	0.31
2	TiAlN	0.30
3	TiCN	0.46

## 2. metingen bij smering met platinol

coating	beginruwheid	ruwheid na m.17
0	0.33	0.27
1	0.33	0.43
2	0.36	0.34
3	0.33	0.30

coating	beginruwheid	ruwheid na m.15
0	0.19	0.31
1	0.29	0.36
2	0.36	0.15
3	0.31	0.27

coating	beginruwheid	ruwheid na m.16
0	0.27	0.26
1	0.35	0.30
2	0.29	0.28
3	0.31	0.31

coating	beginruwheid	ruwheid na m.21
0	0.26	0.25
1	0.32	0.35
2	0.35	0.32
3	0.33	0.31

N.B. De ruwheid is de  $R_a$  ruwheid, gemeten in  $\mu\text{m}$ .



coating	beginruwheid	ruwheid na m.22
0	0.19	0.12
1	0.26	0.29
2	0.34	0.49
3	0.30	0.28

coating	beginruwheid	ruwheid na m.20
0	0.28	0.14
1	0.34	0.37
2	0.34	0.38
3	0.32	0.32

coating	beginruwheid	ruwheid na m.23
0	0.19	0.21
1	0.31	0.36
2	0.32	0.33
3	0.27	0.30

### 3. metingen bij proeven zonder smering

coating	beginruwheid	ruwheid na m.23
0	0.13	0.16
1	0.16	0.26
2	0.29	0.40
3	0.36	0.29

N.B. De ruwheid is de  $R_a$  ruwheid, gemeten in  $\mu\text{m}$ .

coating	beginruwheid	ruwheid na m.21
0	0.12	0.12
1	0.20	0.27
2	0.29	0.34
3	0.25	0.30

coating	beginruwheid	ruwheid na m.20
0	0.28	1.00
1	0.39	1.01
2	0.30	0.93
3	0.34	0.75

coating	beginruwheid	ruwheid na m.22
0	0.14	1.90
1	0.11	0.55
2	0.18	1.64
3	0.23	1.62

coating	beginruwheid	ruwheid na m.16
0	0.15	0.90
1	0.29	0.89
2	0.24	0.63
3	0.27	0.56

N.B. De ruwheid is de  $R_a$  ruwheid, gemeten in  $\mu\text{m}$ .

coating	beginruwheid	ruwheid na m.15
0	0.14	0.17
1	0.28	0.30
2	0.29	0.38
3	0.26	0.27

coating	beginruwheid	ruwheid na m.17
0	0.08	-
1	0.08	2.64
2	0.21	2.41
3	0.26	1.03

#### 4. metingen bij smering met lanoline

coating	beginruwheid	ruwheid na m.15
0	0.26	0.23
1	0.25	0.24
2	0.27	0.33
3	0.23	0.33

coating	beginruwheid	ruwheid na m.16
0	0.28	0.36
1	-	0.31
2	-	-
3	-	0.27

N.B. De ruwheid is de  $R_a$  ruwheid, gemeten in  $\mu\text{m}$ .

coating	beginruwheid	ruwheid na m.17
0	0.17	0.17
1	0.31	0.18
2	-	-
3	0.29	0.32

coating	beginruwheid	ruwheid na m.20
0	0.10	0.06
1	0.16	0.23
2	-	-
3	0.35	0.31

coating	beginruwheid	ruwheid na m.21
0	0.12	0.07
1	0.19	0.26
2	-	-
3	0.33	0.26

coating	beginruwheid	ruwheid na m.22
0	0.26	0.26
1	0.31	0.26
2	-	-
3	0.24	0.25

N.B. De ruwheid is de  $R_a$  ruwheid, gemeten in  $\mu\text{m}$ .

coating	beginruwheid	ruwheid na m.23
0	0.26	0.34
1	0.25	0.25
2	-	-
3	0.26	0.34

### 5. metingen bij smering met finarol

coating	beginruwheid	ruwheid na m.15
0	0.10	0.23
1	0.13	0.26
2	-	-
3	0.14	0.21

coating	beginruwheid	ruwheid na m.16
0	0.08	0.20
1	0.14	0.26
2	-	-
3	0.15	0.27

coating	beginruwheid	ruwheid na m.17
0	0.23	1.18
1	0.23	0.23
2	-	-
3	0.27	0.34

N.B. De ruwheid is de  $R_a$  ruwheid, gemeten in  $\mu\text{m}$ .

coating	beginruwheid	ruwheid na m.20
0	0.32	0.34
1	0.30	0.32
2	-	-
3	0.22	0.23

coating	beginruwheid	ruwheid na m.21
0	0.22	0.30
1	0.32	0.32
2	-	-
3	0.23	0.23

coating	beginruwheid	ruwheid na m.22
0	0.12	0.17
1	0.13	0.15
2	-	-
3	0.09	0.08

coating	beginruwheid	ruwheid na m.23
0	0.23	0.21
1	0.31	0.21
2	-	-
3	0.22	0.22

N.B. De ruwheid is de  $R_a$  ruwheid, gemeten in  $\mu\text{m}$ .

**6. ruwheid materiaal 19**

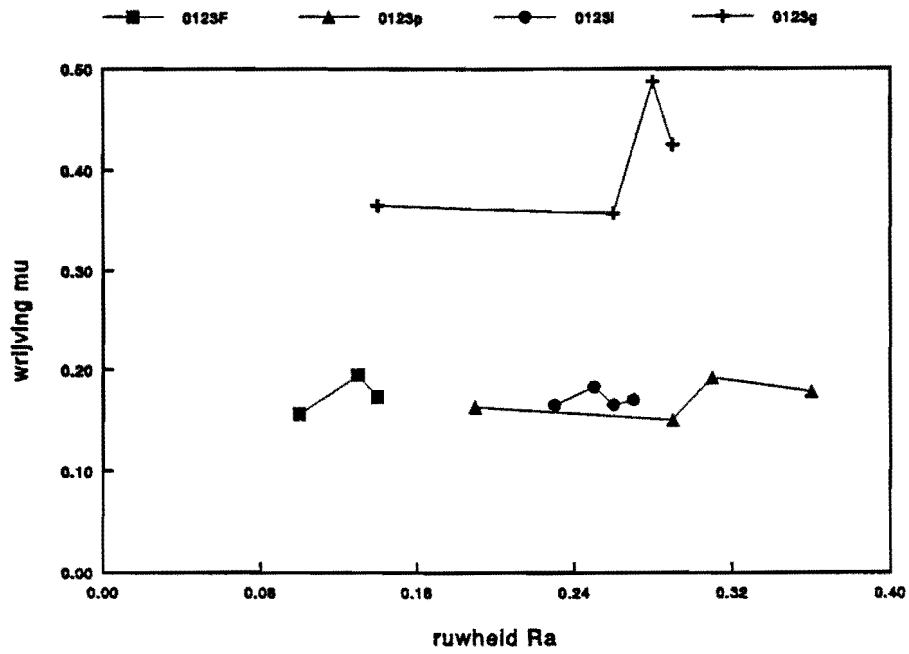
coating	voor	na
0	0.25	0.10
1	0.20	0.10
3	0.10	0.10

**7. ruwheid van de stripmaterialen**

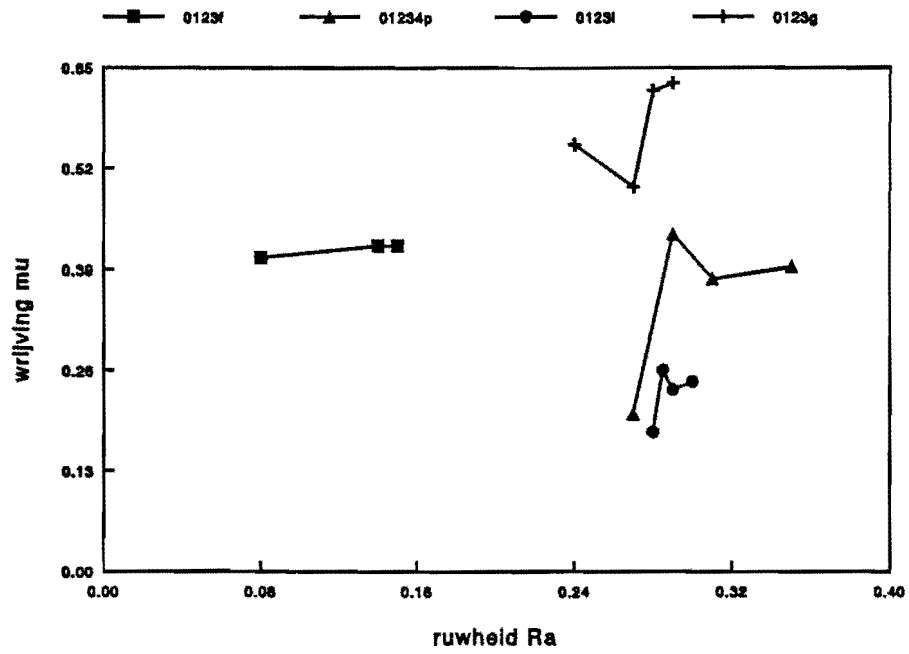
materiaal	ruwheid $R_a$ in $\mu\text{m}$
15	1.39
16	1.11
17	1.13
20	0.50
21	0.54
22	0.39
23	0.38

De wrijvingscoëfficiënten kunnen worden uitgezet tegen de ruwheid om een mogelijk verband duidelijk te maken (figuren 8 t/m 16).

materiaal 15

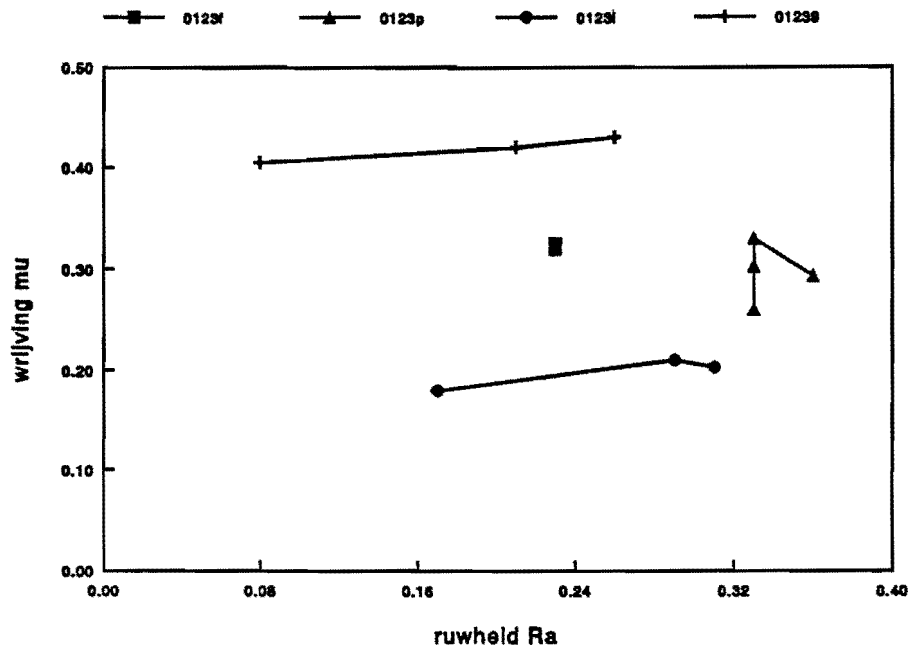


materiaal 16

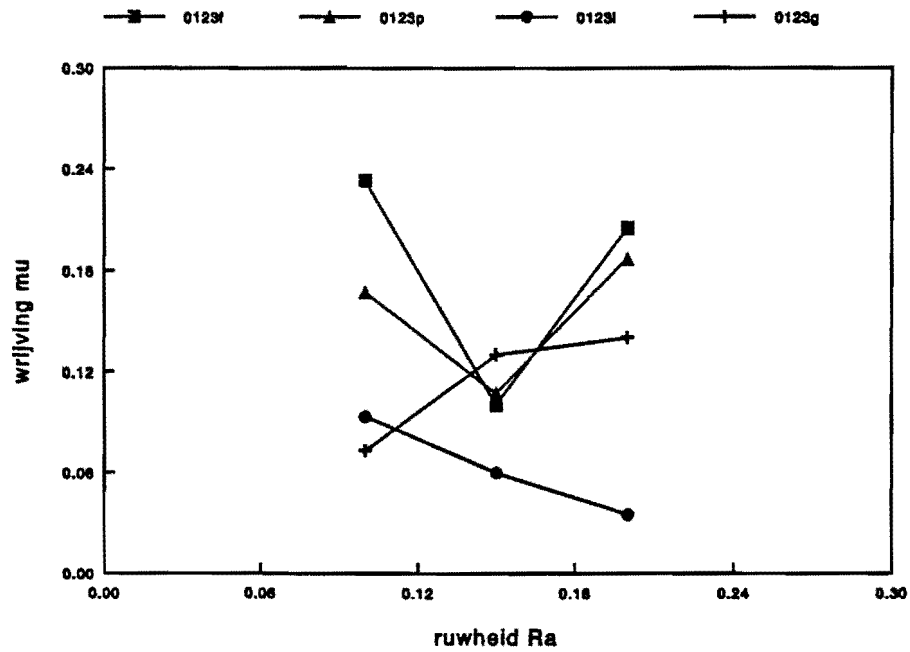




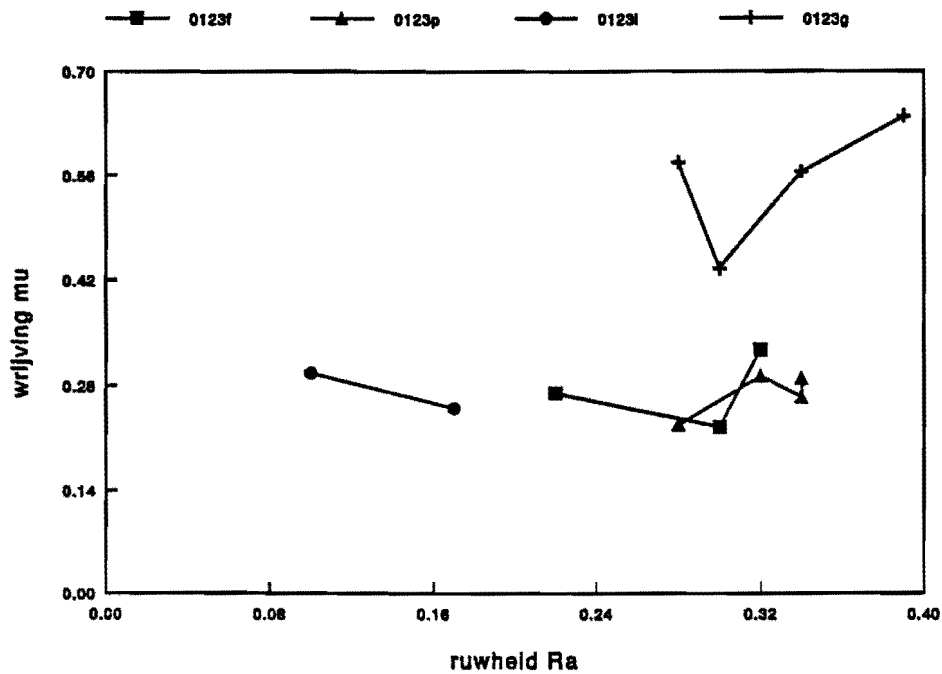
materiaal 17



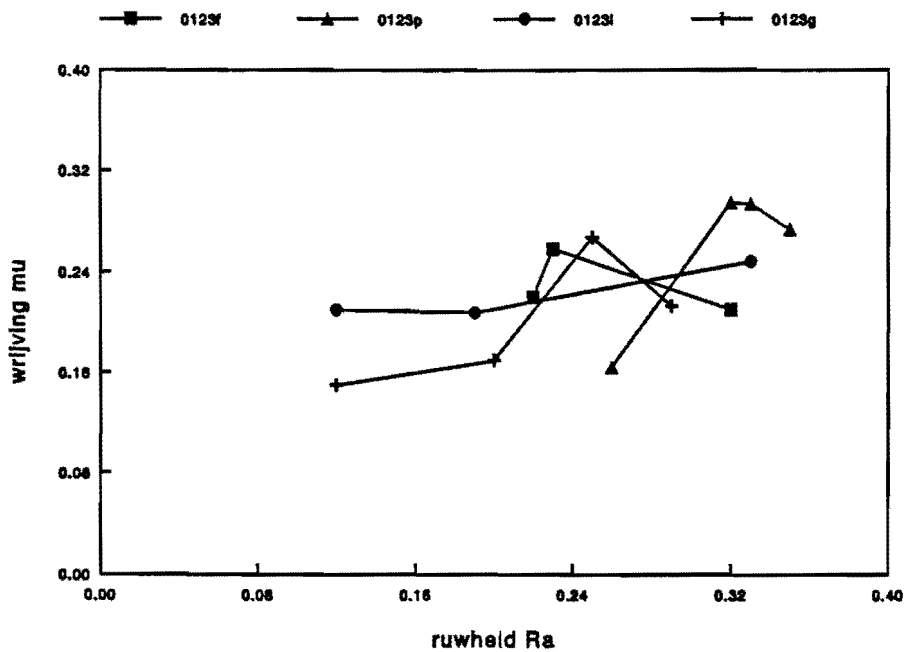
materiaal 19



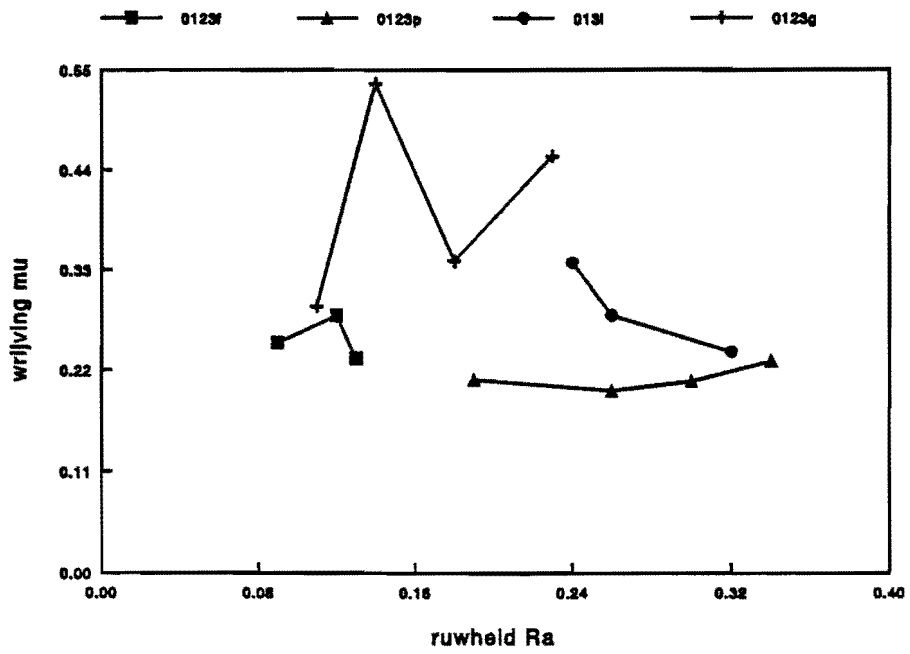
materiaal 20



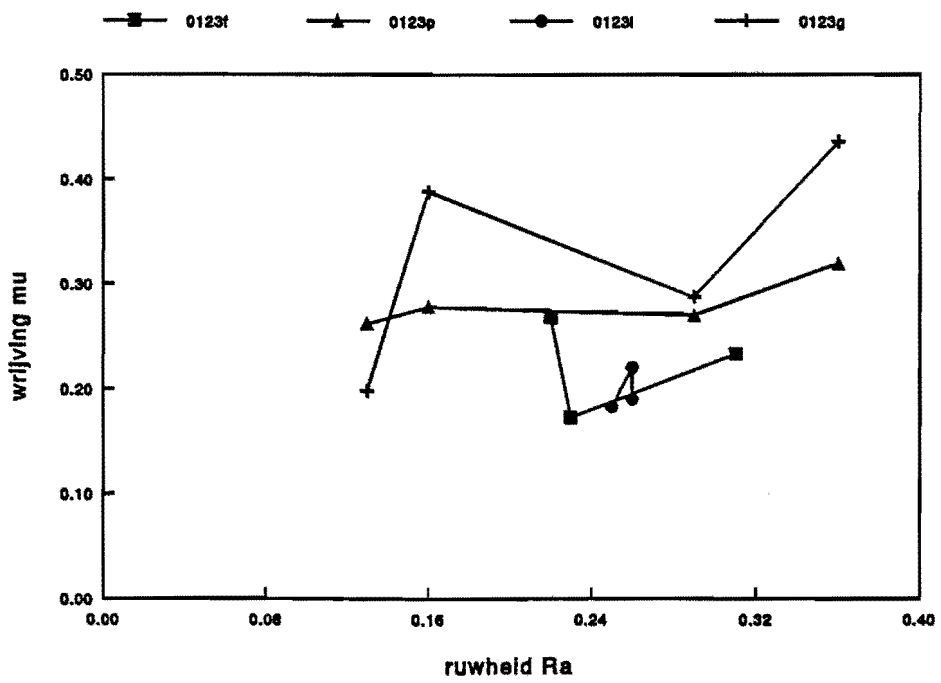
materiaal21



materiaal22



materiaal 23



## Conclusies

Uit de experimenten valt het volgende te concluderen:

- Er is geen merkbare invloed van gereedschapscoating op het wrijvingsgedrag.
- Bij normale smeringscondities is te verwachten dat de wrijvingscoëfficiënt zal liggen tussen 0.15 en 0.35.
- Voor het verkrijgen van een lage wrijvingscoëfficiënt kan in ongesmeerde toestand het beste gebruik worden gemaakt van gelakte materialen.
- Het gebruiken van verzinkte materialen moet worden vermeden bij slechte smering. Het beste resultaat geeft in dit geval het smeren met lanoline.
- Bij goede smeringscondities geeft blank staal een lage wrijving.
- Er is geen verband gebleken tussen de ruwheid  $R_a$  en de wrijvingscoëfficiënt. Uit de theorie volgt dat de ruwheid  $R_a$  fysisch gezien niet de meest geschikte parameter is. Andere parameters die meer de vorm van het oppervlak of het gedeelte dragend oppervlak weergeven zullen wellicht wel een verband laten zien. Aangezien het hoofddoel van dit onderzoek niet bestond in het vinden van een relatie tussen ruwheid en wrijving is het duidelijk dat een mogelijke relatie moeilijk is aan te tonen, mede gezien de invloed van de ander parameters.

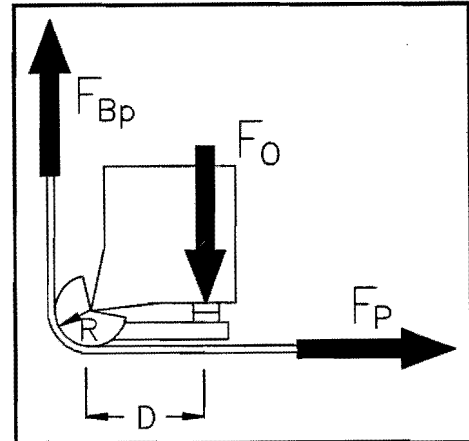
## Bijlage I: Berekeningsmethode voor verwerking van de resultaten

De methode voor het berekenen van de wrijvingscoëfficiënt is uitgewerkt in WPA rapport 1441 (Sniekers, 1992) en gaat als volgt:

Met behulp van de gemeten krachten is het nu mogelijk de wrijvingscoëfficiënt te bepalen

volgens de Coulomb of Amonton wet :  $\tau = \mu p$

De kracht  $F_0$  vermenigvuldigt met de arm  $D$  bepaalt het wrijvingsmoment dat de relatieve beweging van de strip langs de radius levert. Dit wrijvingsmoment is de sommatie van de bijdragen van de schuifspanningen  $\tau$  op een radius  $R$ , over de breedte  $b$  van de strip, zie figuur I.2.



Figuur I.1 : Het meten van de krachten

Als dit wordt uitgewerkt in een evenwichts-beschouwing, wordt het volgende verkregen :

$$F_0 D = b R^2 \int_0^{\pi/2} \tau(\varphi) d\varphi$$

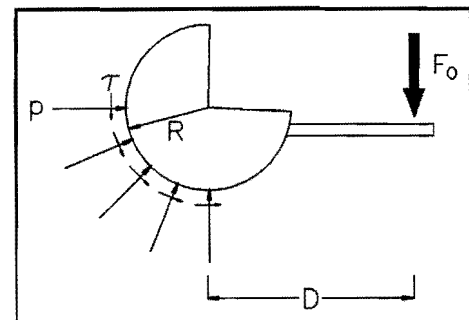
Maar omdat de verdeling van de schuifspanningen onbekend is, moet hiervoor een aanname gemaakt worden. Als een uniforme verdeling

van  $\tau$  wordt genomen, wordt de formule :

$$F_0 D = b R^2 \tau \pi / 2 , \text{ of herschreven : } \tau = \frac{F_0 D}{b R^2 \pi / 2}$$

met de definitie :  $F_w = \tau b R \pi / 2$

$$\text{volgt : } F_w = \frac{F_0 D}{R}$$

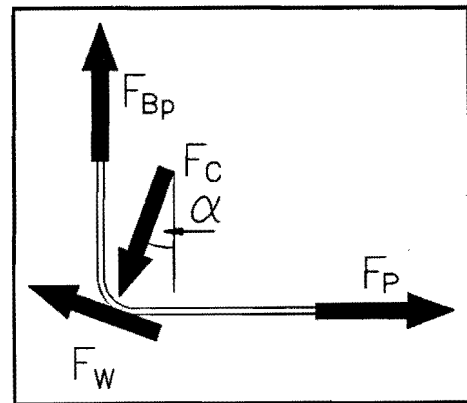


Figuur I.2 : Momentenevenwicht

Naast de bepaling van de wrijvingskracht moet ook de contactkracht tussen de radius en de strip bepaald worden. Hiervoor moeten de horizontale en verticale krachterevenwichten op de strip opgesteld worden. Deze zijn :

$$\sum H = 0 \quad F_P = F_C \sin \alpha + F_W \cos \alpha$$

$$\sum V = 0 \quad F_{BP} = F_C \cos \alpha - F_W \sin \alpha$$



Figuur 1.3 : Krachten werkend op de strip

of herschreven :  $F_C = \frac{F_P - \frac{F_0 D}{R} \cos \alpha}{\sin \alpha}$  waar-

in  $\alpha$  numeriek bepaald moet worden uit :  $F_P \cos \alpha - F_{BP} \sin \alpha - \frac{F_0 D}{R} = 0$

Ten slotte kan dan de gemiddelde  $\mu$  -waarde berekend worden met :  $\mu = \frac{F_W}{F_C}$

De theoretische waarde  $F_p$  is bij de metingen uit dit verslag de (horizontale) trekkracht genoemd, de waarde  $F_{BP}$  (verticale) remkracht en de waarde  $F_0$  wrijvingskracht. Deze krachten betreffen dan de door de drie opnemers geregistreerde krachten.

## Bijlage II: Programma

```

PROGRAM mu_bepaling;

USES
  funcanal;

VAR
  F_o, F_bp, F_p, R, D, b, mu, tau, pres, F_w, F_c : REAL;

FUNCTION equilibrium( alfa : REAL ) : REAL;

BEGIN
  equilibrium := F_p * cos( alfa ) - F_bp * sin ( alfa ) - F_o*D/R;
END;

VAR
  fail      : INTEGER;
  alfa      : REAL;

BEGIN
  b := 30;
  D := 40;

  readln(F_p, F_bp, F_o, R );

  F_w := F_o * D / R;

  alfa := pi/4;
  zeroiab( equilibrium, alfa, 0, pi/2, 0.0001, 0.0001, fail );
  IF fail = 1 THEN writeln(' Cannot find a zero point')
  ELSE BEGIN
    F_c := ( F_P - F_W*cos(alfa) )/(sin(alfa));
    mu := F_W / F_c;
    tau := F_W / ( b * R * Pi/2 );
    pres:= F_c / ( b * R * Pi/2 );

    writeln('F_p = ',F_p:5:1);
    writeln('F_bp = ', F_bp:5:1);
    writeln('F_o = ', F_o:5:1);
    writeln('R = ', R:5:1);

    writeln('F_c = ',F_c:5:1);
    writeln('F_w = ',F_w:5:1);
    writeln('alfa ',alfa:6:4);
    writeln('mu = ',mu:6:4);
    writeln('p = ',pres:6:4);
    writeln('tau = ',tau:6:4);
  END;
END.

```

Dit programma, werkend onder turbopascal 6.0, maakt gebruik van de UNIT funcanal. In deze unit is de functie ZEROINAB opgenomen, welke gebruikt wordt ter bepaling van het nulpunt. Deze unit is onderdeel van de RSNUMLIB.