

DI 170296

Technische Universiteit  Eindhoven
faculteit Werktuigbouwkunde
Aandrijf- en Tribotechniek

Hydraulische seals



Hydraulische seals

**Eindrapport van het projekt 'Hydraulische Seals',
uitgevoerd in een samenwerkingsverband van**

- **Bouwdienst Rijkswaterstaat**
- **Technische Universiteit, Eindhoven**
- **Hydraudyne Cylinders, Boxtel**
- **Shamban Nederland, Rotterdam**

Prof.Dr.Ir. M.J.W. Schouten

**Instituut voor Aandrijf- en Tribotechniek
Technische Universiteit Eindhoven**

mei 1997

Aan de samenstelling van dit rapport werd gewerkt door:

Technische Universiteit Eindhoven

prof.dr.ir. M.J.W. Schouten
C.R. van der Laan
ir. A.J. Bron
P.A.H. Ewalts
ir. J.H.M.G. Schroen
ing. P.M.A.L. Hezemans

Hydraudyne Cylinders B.V.

ir. W. Voskuyl

	blz
Inhoud	
0 Inleiding	4
1 Projektbeschrijving en samenwerkingsverband	5
2 Onderzoek, resultaten en ontwerpaanbevelingen	6
3 Selektie van materialen	15
3.1 Wrijving- en slijtagemetingen met inbegrip van het meten van start-wrijving.	16
3.2 Het splitsen van slijtage en kruip bij de pen-schijf-proef voor kunststoffen.	55
3.3 - Bepaling van mechanische eigenschappen: spanning-rek-tijd-gedrag - Onderzoek van lijmverbindingen - Bepaling van extrusie-eigenschappen	103
3.4 Samenvatting van materiaaleigenschappen: een eerste aanzet tot een keuze-methode.	122
3.5 Eisen, gesteld aan het spanning-rek-verloop voor een goed afdichtingsmateriaal.	128
3.6 Een rektoepassing van de mechanische eigenschappen: computeranalyse van indrukking van een cilinder van PE-UHMW.	139
4 Eindige elementen berekeningen als gereedschap bij het ontwerpen van een seal.	159
5 Vervaardiging van seals ten behoeve van modeltests.	171
6 Testen van de bestaande en de nieuwe seals in modeltests	178
6.1 De te testen seals	180
6.2 De meetopstelling	181
6.3 De meetmethode	181
6.4 Schets van de meetopstelling	183
6.5 Grafieken met meetresultaten, dakvormmanchet	184
6.6 Matrix met numerieke waarden	193
6.7 Vergelijkende karakteristieken	197
6.8 De afdichtende eigenschappen van geteste seals	205
7 Vervaardiging van prototypes en prototypebeproeving op ware grootte	206
8 Vergelijking van wrijvingskrachten in modeltests en in afdichtingen op ware grootte.	245
Bijlage	
Projektbeschrijving	260

0 Inleiding

Hydraulische seals worden veelvuldig door Rijkswaterstaat toegepast in de hydraulische cilinders voor het bedienen van beweegbare waterkeringen en sluisdeuren.

In deze konstrukties vormen de seals kritische elementen die bij hoge drukken en lage translatiesnelheden lekvrij en bij voorkeur wrijvingsarm en zonder stick-slip moeten werken. De betrouwbaarheid moet hoog zijn gedurende de levensduur die in de orde van grootte van 20 jaar moet liggen.

In de afgelopen 5 à 10 jaar hebben veel ontwikkelingen plaatsgevonden op het gebied van de materialen voor afdichtingen. Ook verbeterde konstruktieusgereedschappen zoals testmethoden en eindige-elementen berekeningstechnieken voor het bepalen van spanningen en vervormingen in afdichtingen zijn beschikbaar gekomen terwijl op het gebied van de modelvorming van afdichtingsmechanismen grote vooruitgang werd geboekt. Dit laatste werd recent door Kanters beschreven in zijn proefschrift: "On the calculation of leakage and friction of reciprocating elastomeric seals" (1990).

Besloten werd om alle beschikbare informatie te bundelen, waar nodig verder uit te werken en toe te passen op hydraulische seals met als doel het ontwerpen van optimale seals voor het hier beschouwde toepassingsgebied.

Het uitgevoerde onderzoekprogramma vormt een combinatie van technisch wetenschappelijk onderzoek, konstruktieuskennis en ervaring van zowel de afdichtingsfabrikant, de cilinderfabrikant en de eindgebruiker. Op deze wijze bestaat een zo groot mogelijke zekerheid dat geen belangrijke aspecten onbelicht blijven.

1 Projektbeschrijving en samenwerkingsverband

In dit projekt wordt met name de stangafdichting voor hydraulische cilinders bestudeerd, met het doel, te komen tot een geoptimaliseerde konstruktie.

Het probleem van de materiaal- en geometriekeuze staat in dit onderzoek centraal. De snelheid is in deze toepassingen erg laag, omdat geen volledige filmvorming zal optreden. De seals lopen in het gemengde smeringsgebied waardoor de tribologische eigenschappen van de sealmaterialen extra van belang zijn.

In veel andere toepassingen van translerende seals wordt gestreefd naar een lek-vrij-situatie over een groot aantal slagen gemiddeld: het naar buiten pompen en het naar binnen pompen van olie is over meerdere slagen gemiddeld in evenwicht. Hier echter mag bij elke afzonderlijke slag geen lek optreden, immers de stang beweegt soms zeer langzaam naar buiten en blijft vervolgens gedurende lange tijd in die stand staan.

Voor de zuigerafdichting zijn de problemen veel minder groot omdat hier tijdens beweging een olielfilm doorgelaten mag worden. Hiervoor zijn goede oplossingen beschikbaar. Gekozen wordt hier voor een goede standaard oplossing.

Een speciaal te bestuderen aspekt in dit onderzoek is de mogelijkheid om sealmaterialen te lijmen. Een goede lijmtechniek geeft de mogelijkheid om met gedeelde seals te werken waardoor bij reparatie-akties de hoeveelheid demontage- en montagewerk sterk kan worden verminderd.

De projektbeschrijving zoals deze bij de start van het projekt als werkprogramma werd geformuleerd, is in de bijlage opgenomen, evenals een omschrijving van de omstandigheden die tot de projektformulering hebben geleid.

In de loop van de werkzaamheden werden een aantal bijstellingen aangebracht omdat de inhoud van sommige projektstappen werd bepaald door de uitkomst van vorige stappen, of omdat het projektteam om andere redenen tot bijstelling besloot. Details hieromtrent zijn gedurende de projektperiode in besprekingsverslagen vastgelegd.

Voor de uitvoering werd een samenwerkingsverband opgericht met de volgende deelnemers:

- Bouwdienst Rijkswaterstaat (opdrachtgever)
- Technische Universiteit Eindhoven (hoofdaannemer)
- Hydraudyne Cilinders B.V. te Boxtel
- Shamban Nederland B.V. te Rotterdam

2 Onderzoek, resultaten en ontwerpaanbevelingen

In dit project werd het probleem "Hydraulische seals" voor langzaam bewegende hydraulische cilinders bestudeerd met het oog op toepassingen in projecten van Rijkswaterstaat. Daartoe werd een samenwerkingsverband tussen de deelnemende geïnteresseerden opgericht.

Bij deze toepassingen zijn de snelheden zo laag dat geen volledige hydrodynamische smeerfilm tussen afdichting en stang wordt gevormd. De aandacht werd dan ook gericht op afdichtingsmateriaal en geometrie.

Ten aanzien van het materiaalgedrag werd onderzoek gedaan naar: wrijving, slijtage, mechanisch gedrag en extrusieweerstand. Bovendien werd een onderzoek naar de mogelijkheid van lijmbaarheid gedaan.

Per eigenschap blijken tussen de materialen onderling grote verschillen op te treden; er is per eigenschap gewoonlijk een duidelijke volgorde tussen de materialen aan te geven naar mate waarin zij aan deze eigenschap voldoen.

Voor de verschillende beoordeelde eigenschappen zijn deze volgorden echter niet dezelfde. Bovendien zijn niet alle eigenschappen van dezelfde belangrijkheid; dit hangt mede sterk af van de te kiezen bedrijfscondities.

Als gevolg hiervan kan niet één materiaal als het beste voor alle omstandigheden worden geselecteerd maar zal de keuze steeds een afweging zijn ten opzichte van de bedrijfscondities.

Een aanzet is gemaakt om te komen tot een keuze systeem waarbij per eigenschap een volgorde voor de verschillende materialen is opgesteld.

Aanbevolen wordt om de keuze techniek in de toekomst te evalueren om zo te komen tot een voor de praktijk hanteerbaar systeem.

Het bepalen van spanningen en vervormingen in seals en met name de kontaktdrukverdelingen kan alleen met behulp van de eindige elementenmethode plaatsvinden. Voor seals die uit één element bestaan of uit één element en een veer kunnen berekeningen goed worden uitgevoerd. Voor seals die uit meerdere elementen bestaan moet deze rekentechniek verder worden ontwikkeld zodat ook de effecten van de onderlinge beïnvloeding van de onderdelen kunnen worden verwerkt.

Een bijkomend algemeen probleem op dit moment en daarmee dus ook een punt van verder onderzoek is het verkrijgen van mechanische materiaaleigenschappen onder 3-D belasting. Het werken met uit 1-D tests verkregen materiaalgegevens bij 3-D belastingsgevallen is als principe onjuist. Onderzoek op dit terrein wordt op dit moment uitgevoerd.

Voor het bepalen van het wrijvingsgedrag van seals onder bedrijfscondities werden zowel modeltests uitgevoerd met seals van kleine diameter alsook tests op ware grootte.

Onderlinge vergelijking van het wrijvingsgedrag voor de verschillende seals zoals gemeten in de modeltests kan het beste worden gedaan aan de hand van de

vergelijkende grafieken die in paragraaf 6.7 zijn opgenomen voor de verschillende cilinderdrukken. De wrijvingskracht is hier als functie van de snelheid opgegeven. In deze Stribeck-achtige grafieken blijkt steeds een minimum in de wrijvingskracht op te treden bij een snelheid van 10 mm/sek. Dit punt zou overigens ook bij een hogere waarde in het snelheidsgebied tussen 10 en 50 mm/sek kunnen liggen; op dat traject zijn geen metingen uitgevoerd.

De rubber-canvas-dakvormseal vertoont bij de modeltest relatief lage wrijvingswaarden; met name bij hoge cilinderdrukken.

De UHMW PE stepseal geeft over het gehele gebied genomen de laagste wrijvingswaarden zonder stick-slip, met name bij hogere snelheden.

In tegenstelling tot de wrijvingsmetingen op ware grootte blijkt echter dat de UHMW PE-dakvormseals in de modeltests de hoogste wrijvingswaarden laten zien. Het blijkt echter dat de mate van voorspannen van de dakvormset een duidelijke invloed op het wrijvingsgedrag heeft. Opvallend is dat dit effect ook bij hoge waarden van de cilinderdruk aanwezig blijft. Hier lijkt een mogelijkheid voor verdere optimalisering van de voorspanning aanwezig te zijn.

Testen werden uitgevoerd bij de TUE en bij Hydraudyne.

Wrijvingsmetingen met seals op ware grootte werden uitgevoerd in het snelheidstrajekt dat overeenkomt met de laagste helft van het snelheidstrajekt dat voor de modeltests werd gebruikt. De metingen werden op chroomstangen en op ceramax-1000 stangen gedaan. (De modeltesten vonden op chroomstangen plaats). Als afdichtingen werden getest: dakvormsets vervaardigd van rubber-canvas en van UHMW PE-wit en stepseals van UHMW PE van het fabriek Busak & Shamban.

Bij de tests op ware grootte werd het minimum in het verloop van de wrijvingskracht als functie van de snelheid, zoals dat bij de modeltests optrad, niet gevonden.

De tests op ware grootte vertonen niet alleen in absolute zin een hogere wrijving dan de modeltests wat te verwachten is, maar ook in relatieve zin, na in rekening brengen van de verschillen in afmetingen, zijn de gemeten waarden hoger.

De wrijving op ceramax is hoger dan op chroom, hetgeen te verwachten was op grond van de resultaten van eerder uitgevoerde pen-schijf-metingen.

Algemeen is ook bij de tests op ware grootte de wrijving van UHMW PE stepseals duidelijk lager dan van dakvormseals. De verschillen bij de ware grootte-tests zijn veel duidelijker dan bij de modeltests.

Als konklusie voor het wrijvingsgedrag als geheel voor de beschouwing op ware grootte blijkt, dat de moderne konstruktie, te weten stepseals van UHMW PE op ceramax, duidelijk lagere wrijving vertoont dan de klassieke oplossing van canvas-rubber dakvormseals op een chroom-stang. Bovendien veroont deze vrijwel geen stick-slip. Verdere details zijn te ontleen aan hoofdstuk 8.

In staafdiagrammen werden daarin de wrijvingskrachten grafisch weergegeven en vergeleken voor de verschillende uitvoeringen van geteste afdichtingen bij de diverse bedrijfscondities.

Een vergelijkende grafiek werd opgesteld voor de gemeten wrijvingskrachten voor de diverse uitvoeringsvormen, bij een in de praktijk belangrijke combinatie van parameters te weten: stang \varnothing 180 mm, snelheid 2 mm/s en drukken van 100 en 200 bar.

Voor het uitgevoerde onderzoek als geheel kan worden gesteld dat een groot aantal inzichten werd verkregen in het gedrag van hoge druk stangafdichtingen bij lage translatiesnelheden en dat een grote hoeveelheid numerieke informatie over materialen en wrijvingen werd verzameld.

Verdere ontwikkelingen, met name ook in de eindige elemententechnieken, zijn nodig om te komen tot een complete set ontwerpgegevens voor het ontwerpen van optimale seals voor dit toepassingsgebied.

Aanvankelijk werden pakketten dakvormmanchetten van rubber-canvas gebruikt, min of meer gebaseerd op het oude idee van de stopbuspakking. Fig. 1 (de gebruikte figuren zijn ontleend aan publikaties van Müller en Parker Prädifa).

Via de enkelvoudige U- of V-ringen al of niet met een metalen veer uitgerust, (fig. 2) en vervolgens de kompaktringen, fig. 3, werd de enkelvoudige stepseal ontwikkeld (fig. 4). Dit laatste was aanvankelijk een PTFE-seal met een scherpe afdichtingsrand gekombineerd met een rubberen O-ring welke als veer fungeert en tevens de afdichtende werking tussen PTFE-seal en huis verzorgde. Later werd PTFE vervangen door UHMW PE.

Het voordeel van de dakvormmanchet is de eenvoudige constructie en enige extra veiligheid omdat meerdere ringen achter elkaar zijn geplaatst waardoor een groef in een van de afdichtlippen niet direkt tot lekkage leidt. Het is niet zo dat de levensduur extra lang is omdat de diverse ringen na elkaar gedurende de tijd slijten: de ringen aan de luchtzijde slijten vaak het eerst omdat ze droog lopen.

Belangrijke nadelen van de dakvormmanchet zijn de hoge wrijving bij rubber en de niet goed bekende axiale aandrukkraft. Daardoor is de wrijving soms nog hoger dan nodig is. Bij de dakvormset van UHMW PE geldt dit nadeel niet.

De kompaktring heeft gewoonlijk een hoge wrijving i.v.m. het daarvoor te kiezen materiaal PUR. Daar tegenover staat dat deze robuust is en niet snel bij de montage zal worden beschadigd.

De stepseal van UHMW PE heeft een lage wrijving. Daar staat echter tegenover dat de relatief zachte afdichtlip gevoelig is voor beschadiging tijdens montage en dus voorzichtig moet worden behandeld. Er is slechts één afdichtlip en er is dus geen extra veiligheid.

Een mogelijkheid om toch extra veiligheid in te bouwen is het plaatsen van 2 stepseals achter elkaar (fig. 5), de z.g. tandemopstelling.

Een betere constructie, die de voordelen van verschillende geometrieën combineert en die de nadelen zo weinig mogelijk meeneemt is de combinatie van een UHMW PE-stepseal aan de olie-zijde en een Polyurethaan-kompaktring aan de luchtzijde. De stepseal is hoog belast door de oliedruk terwijl toch de wrijving laag kan worden gehouden. De kompaktring aan de luchtzijde heeft een beduidend hogere wrijvingscoëfficiënt maar deze is niet belast door de oliedruk zodat de totale wrijving binnen de perken kan worden gehouden. De kompaktring geldt als een (robuuste) veiligheid: Bij lekkage van de stepseal zal de totale constructie niet lekken. De wrijving zal dan wel toenemen, hetgeen eventueel zelfs als signaal voor een reparatie-actie zou kunnen dienen.

Fig. 6 toont deze constructie. Voor de seal aan de luchtzijde kunnen in principe vele constructies en materialen worden gekozen.

Indien de inbouwlengte niet een beperkende faktor is, kan deze constructie ten aanzien van wrijvingsgedrag verder worden verbeterd door te kiezen voor een UHMW PE-stepseal aan de oliezijde en een UHMW PE-dakvormset aan de luchtzijde. De hiervoor genoemde signaalwerking die van de verhoogde wrijving uitgaat bij lekkage van de stepseal is dan echter veel minder aanwezig omdat ook de wrijving van de belaste UHMW PE-dakvormset laag is.

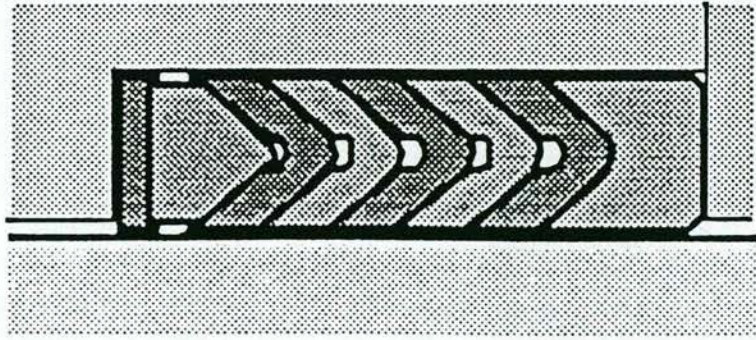


Fig. 1

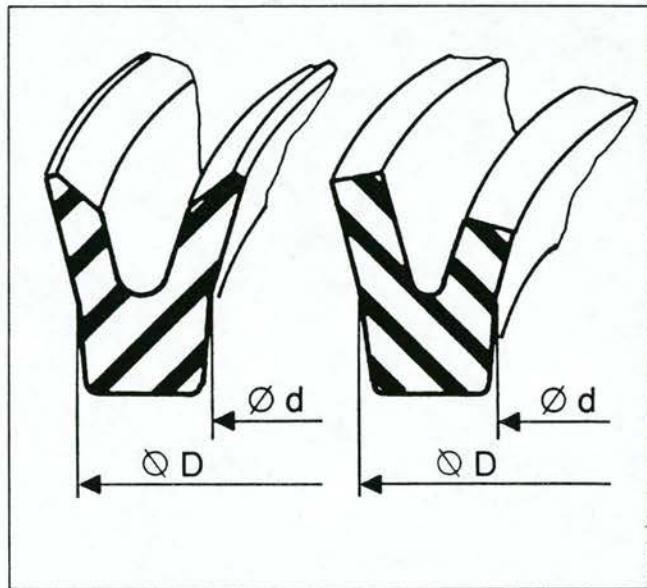


Fig. 2a

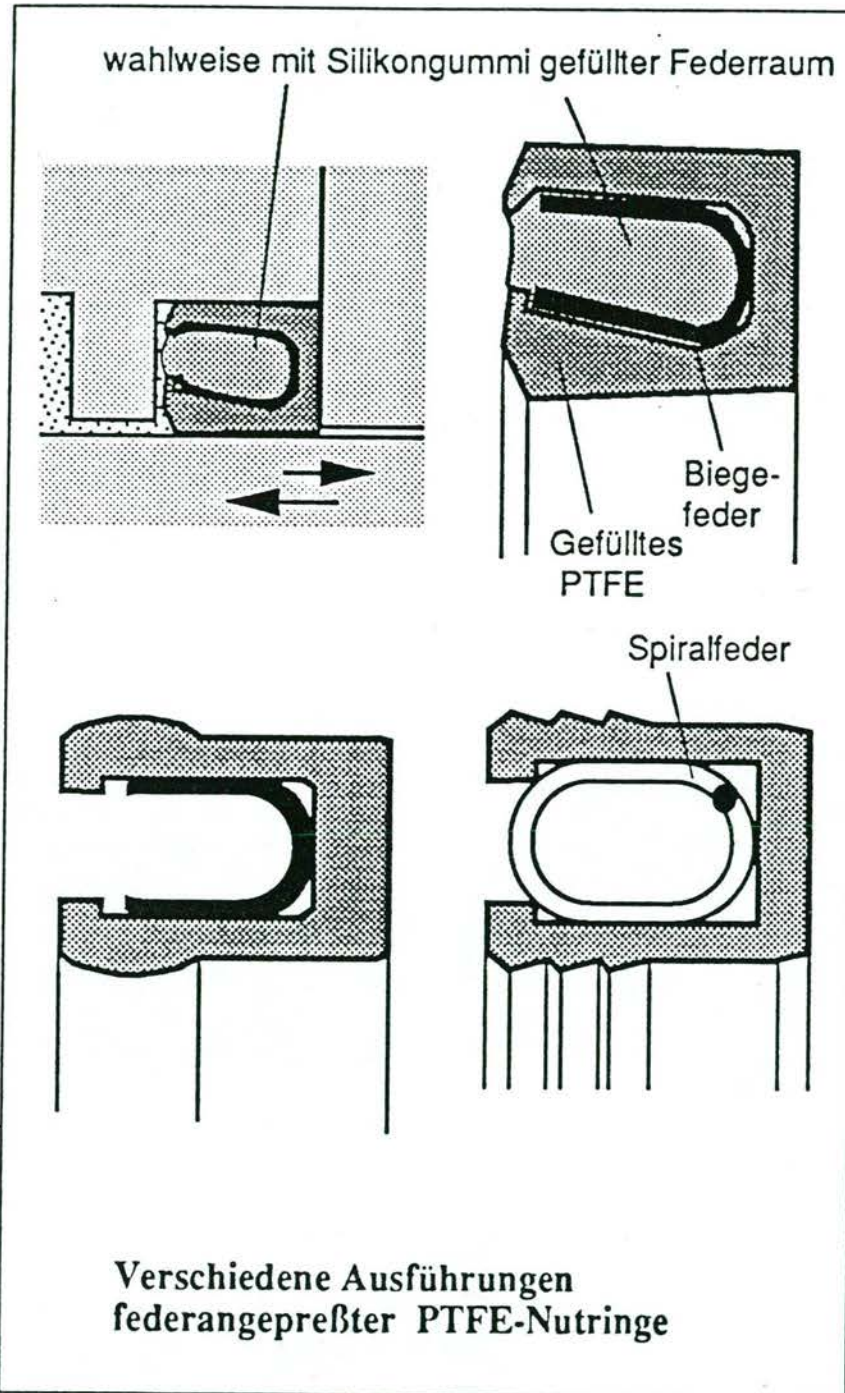


Fig. 2b

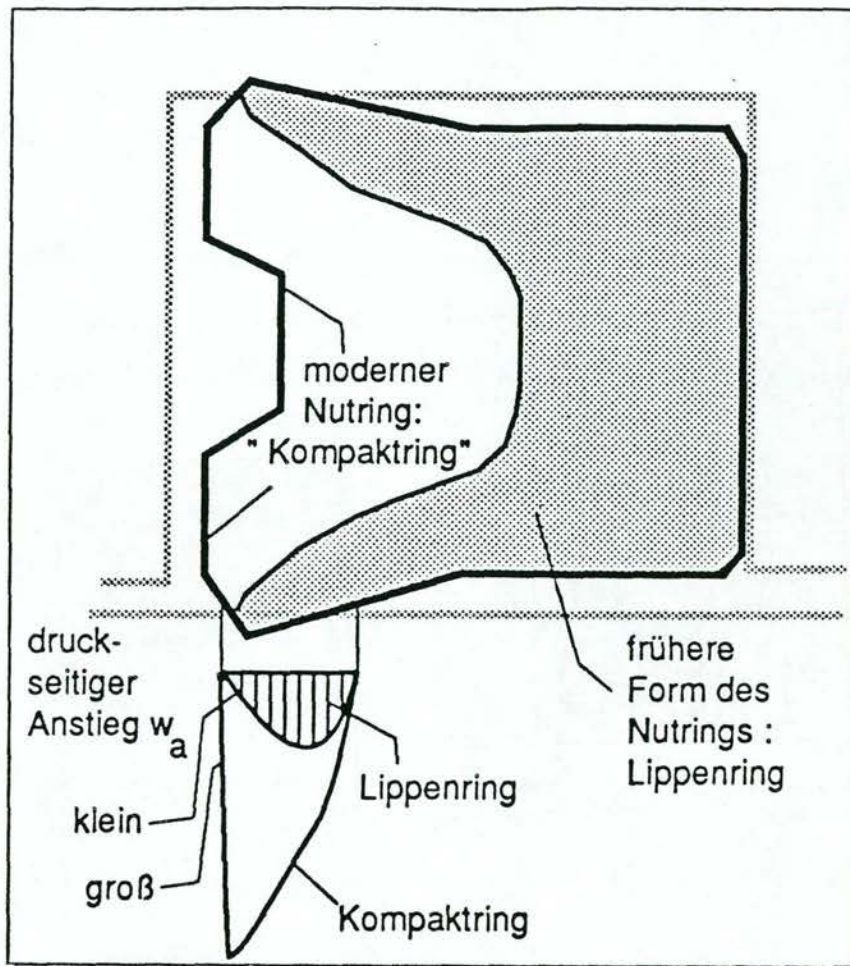


Fig. 3a

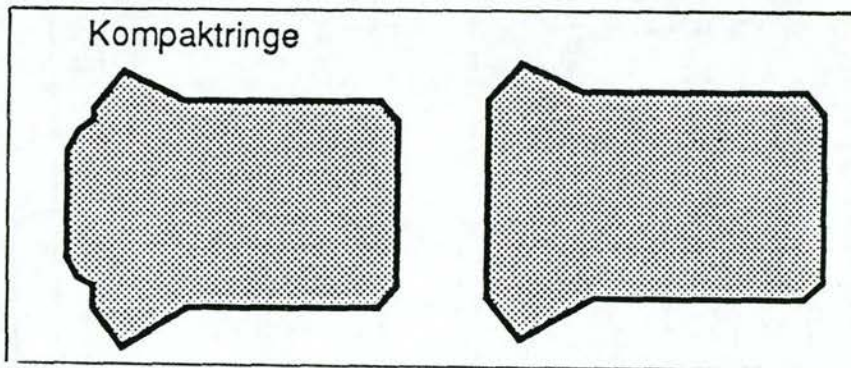


Fig. 3b

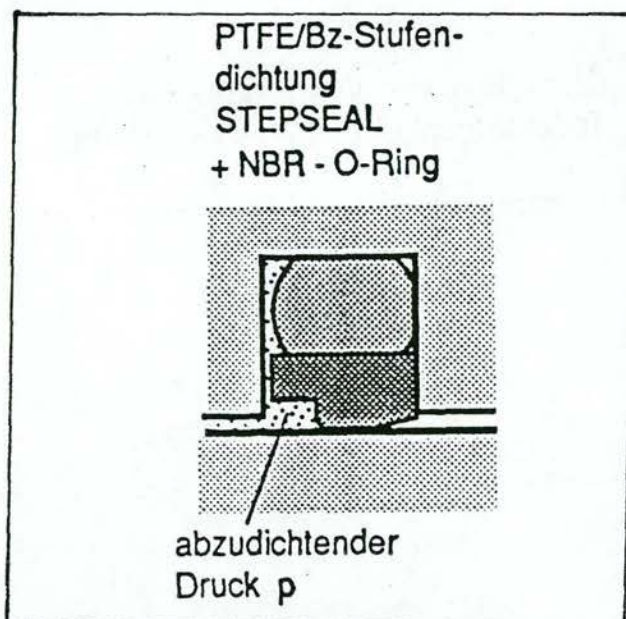
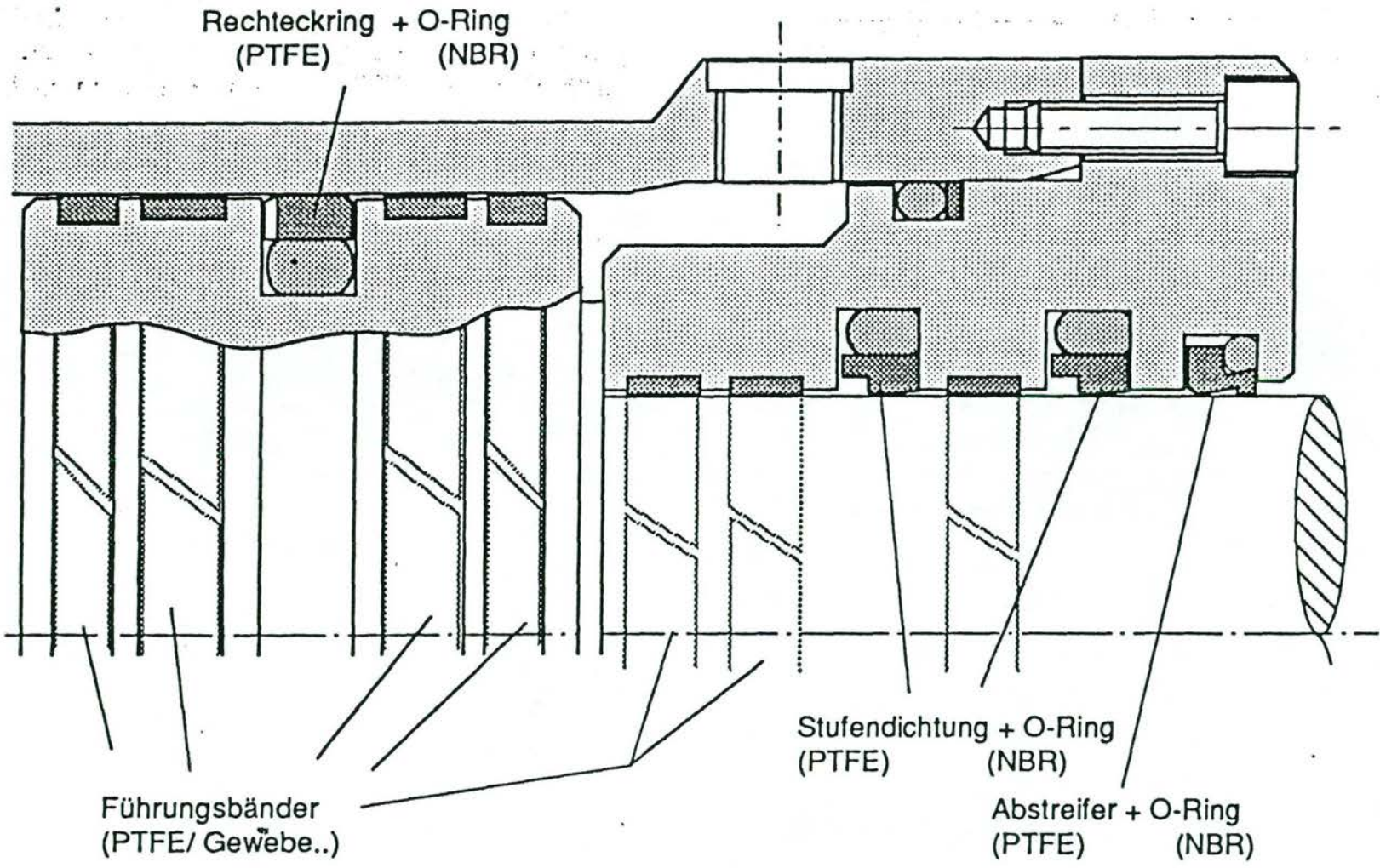


Fig. 4



13

Fig. 5

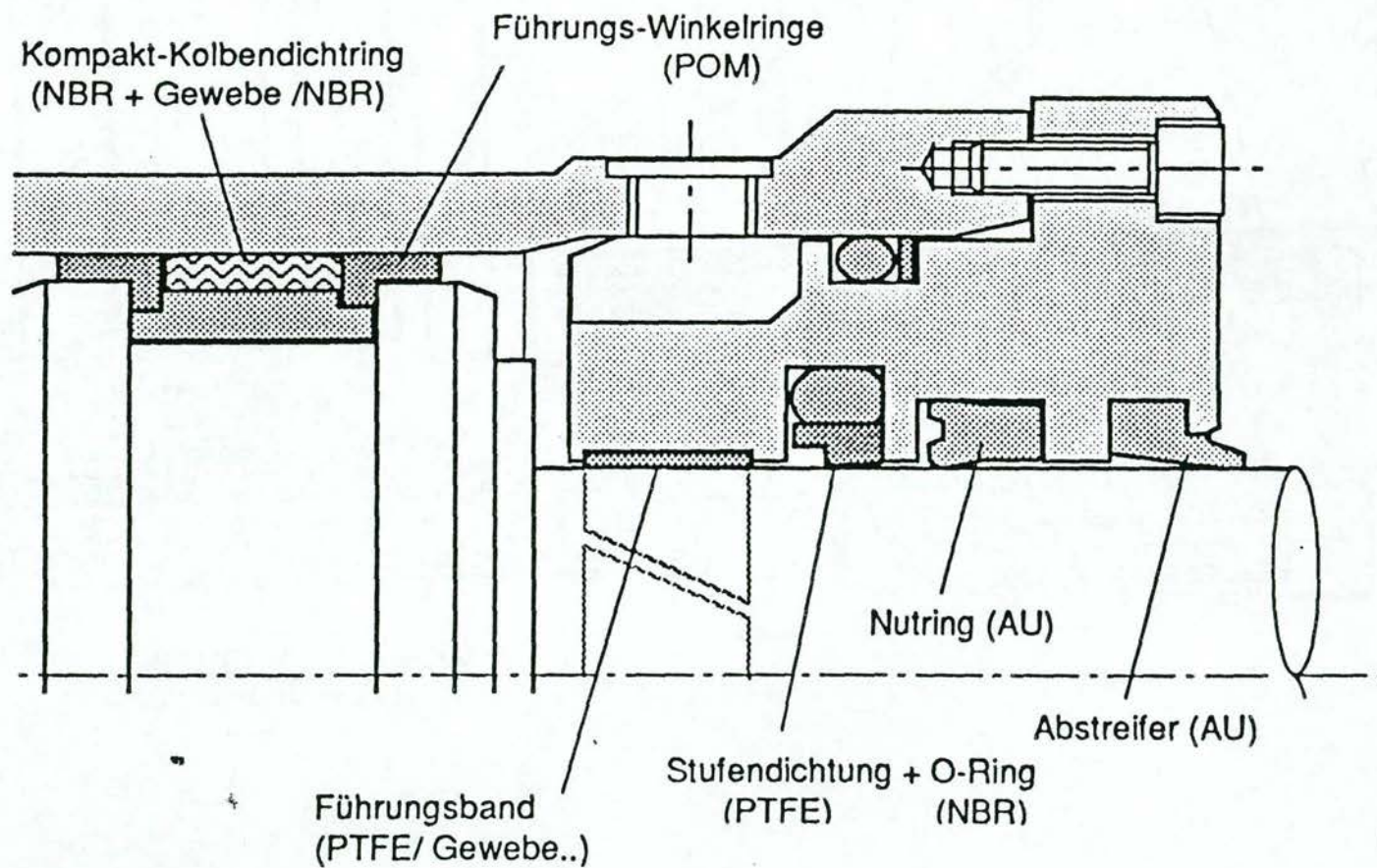


Fig. 6

3 Selektie van materialen

De materiaaleigenschappen van de afdichtingen zijn van bijzonder belang. De mechanische eigenschappen zijn belangrijk in verband met de belastbaarheid en het realiseren van de juiste kontaktdrukverdeling. De tribologische eigenschappen zijn vooral in deze toepassing van belang omdat geen volledige smeefilm opgebouwd wordt zodat contact tussen seal materiaal en stang zal plaatsvinden.

Op de volgende materiaalaspecten wordt hierna ingegaan:

- 3.1 Wrijving- en slijtagemetingen met inbegrip van het meten van start-wrijving.
- 3.2 Het splitsen van slijtage en kruip bij de pen-schijf-proef voor kunststoffen.
- 3.3
 - Bepaling van mechanische eigenschappen: spanning-rek-tijd-gedrag
 - Onderzoek van lijmverbindingen
 - Bepaling van extrusie-eigenschappen
- 3.4 Samenvatting van materiaaleigenschappen: een eerste aanzet tot een keuze-methode.
- 3.5 Eisen, gesteld aan het spanning-rek-verloop voor een goed afdichtingsmateriaal.
- 3.6 Een rektoepassing van de mechanische eigenschappen: computeranalyse van indrukking van een cilinder van PE-UHMW.

3.1 Wrijving- en slijtagemetingen met inbegrip van het meten van start-wrijving.

Wrijving- en slijtagemetingen werden als pen-schijf-metingen uitgevoerd waarbij de kunststof pen in een metalen houder was bevestigd om een voldoende stijve opsluiting te garanderen.

Gemeten werd bij droog en bij gesmeerd contact.

De meetomstandigheden zijn vermeld bij de hierna beschreven experimenten.

De volgorde van bedrijfsomstandigheden tijdens een meting is steeds:

0 tot 4 uur: Drukbelasting bij stilstand zodat alleen kruip wordt gemeten.

4 tot 24 uur: Drukbelasting met glijden zodat slijtage en kruip wordt gemeten.
Aan het begin van dit traject wordt de startwrijving bepaald.

24 tot 28 uur: Drukbelasting bij stilstand.

De volgende materialen werden bij dit onderzoek betrokken:

UHMW PE zwart: met 1 ... 1,5% roet

UHMW PE 80: samenstelling volgens Shamban

Shamban Turcite 109: PTFE + Turcon + K & G

Shamban 451: PUR, wit van Shamban

Shamban 42: PTFE + glas + smeermiddel volgens Shamban

MT 72: PTFE + 15% glasvezels + 5% MoS₂

Canvas / NBR: volgens Merkel

Wrijvings- en Slijtage meetresultaten

24 mei 1991
TU Eindhoven

Inhoudsopgave Wrijvings- en Slijtage metingen

	pag.
Droog, kamertemp., tegen C45	
UHMWPE, zwart	1/2
UHMWPE, wit	3/4
UHMWPE 80	5/6
Shamban 109	7/8
Shamban 451	9/10
Shamban 42	11/12
MT72	13/14
Canvas/rubber	15/16
Droog, kamertemp., tegen Inconel	
MT72, gelijmd, horizontaal	17/18
MT72, gelijmd, verticaal	19/20
MT72	21/22
Droog, kamertemp., tegen RVS	
MT72	23/24
Turcite 109	23 ^a /24 ^a
Gesmeerd, kamertemp., tegen C45	
UHMWPA, zwart	25/26
UHMWPE, wit	27/28
Gesmeerd, kamertemp., tegen RVS	
Turcite 109	29/30
Gesmeerd, kamertemp., tegen C45	
C45	31/32
Gesmeerd, kamertemp. tegen Inconel	
MT72, lijmbaar	33/34

Samenvatting met

Datum

Plaats

Tijd

Naam

Aanpak

Instructeur

Cijfer

Rijswaart - 90-81

12-11-190

Material: UHMW PE ZWART

D = 6 mm

Glijf: C45

Handtemp Droog

Belasting: 565 N

Glijmelheid: $V_{glij} = 3,5 \text{ mm/s}$

$V_{glij} = 0$ Na 4 uur 0,23 mm ingedrukt

$$h_{bel} = h_{norm} - 0,23$$

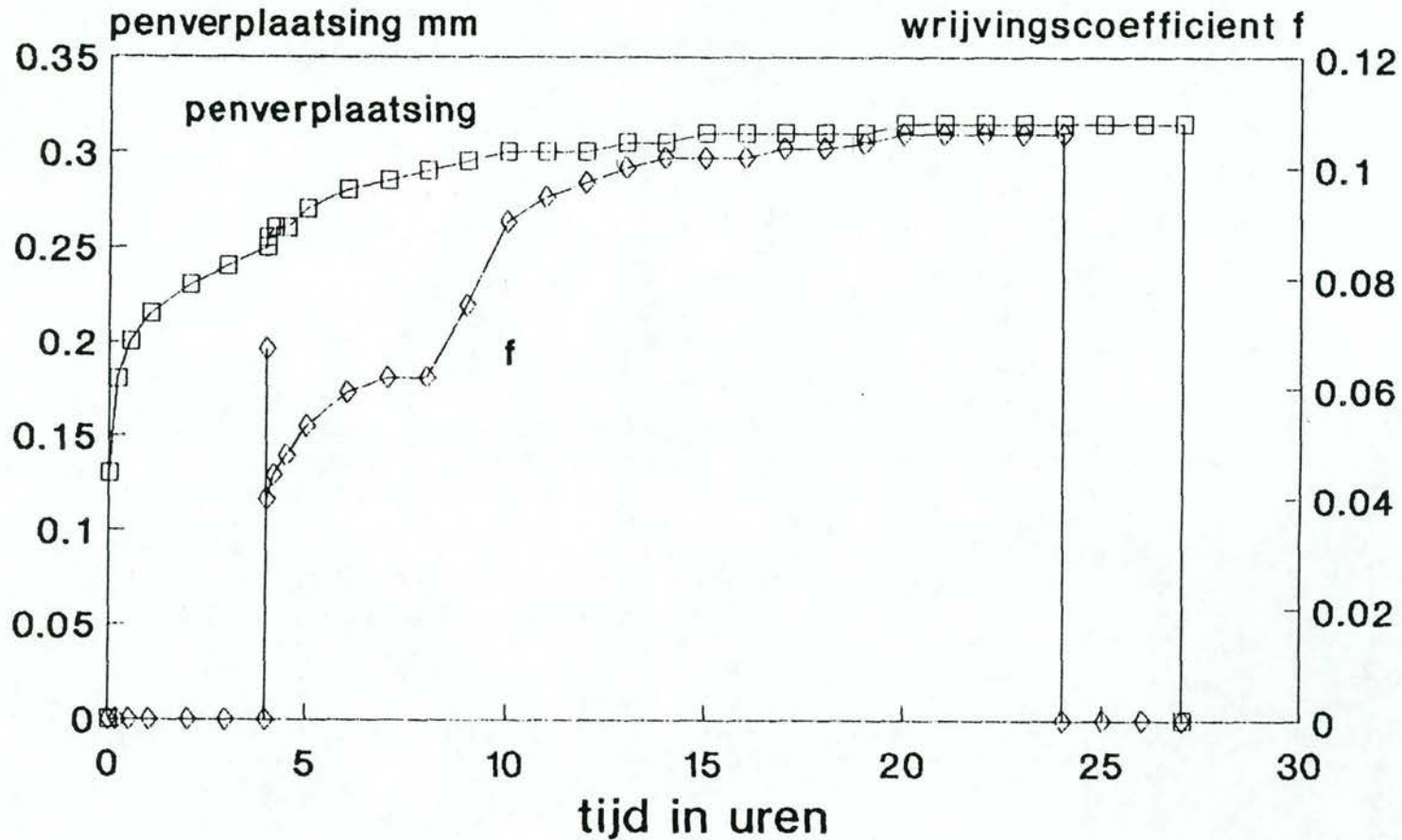
$$1,5 - 0,23 = 1,27 \text{ mm}$$

$$d_{bel} = 7,35 \sqrt{\frac{1}{h_{bel}}} = d_{bel} = 6,52 \text{ mm}$$

$$V_{glij} = 3,5 \text{ mm/s}$$

uur	f	ΔW	K $[\frac{\text{mm}^3}{\text{Nm}}]$
4-7	0,055	0,03	$9,7 \times 10^{-5}$
11-14	0,100	0,005	$7,8 \times 10^{-6}$
17-20	0,105	0,005	$7,8 \times 10^{-6}$

RIJKSWATERSTAAT - 90-81
Schijf: C45, Penmat: UHMW PE zwart
 $F_n = 565 \text{ N}$, $v_{glij} = 3,5 \text{ mm/s}$



07 - 90

Rijfwaartstraat - 90-80.

8-11-199.

Benaming: UHMW PENIT

D = 6 mm

Slijf: C45

Werktemp. Droog.

Belasting: 565 N.

Glij snelheid: $V_{glij} = 3,5 \text{ mm/s}$

$V_{glij} = 0$ Na 4 uur 0,39 mm is ingedrukt.

$$h_{bel} = h_{nom} - 0,39$$

$$1,5 - 0,39 = 1,11 \text{ mm}$$

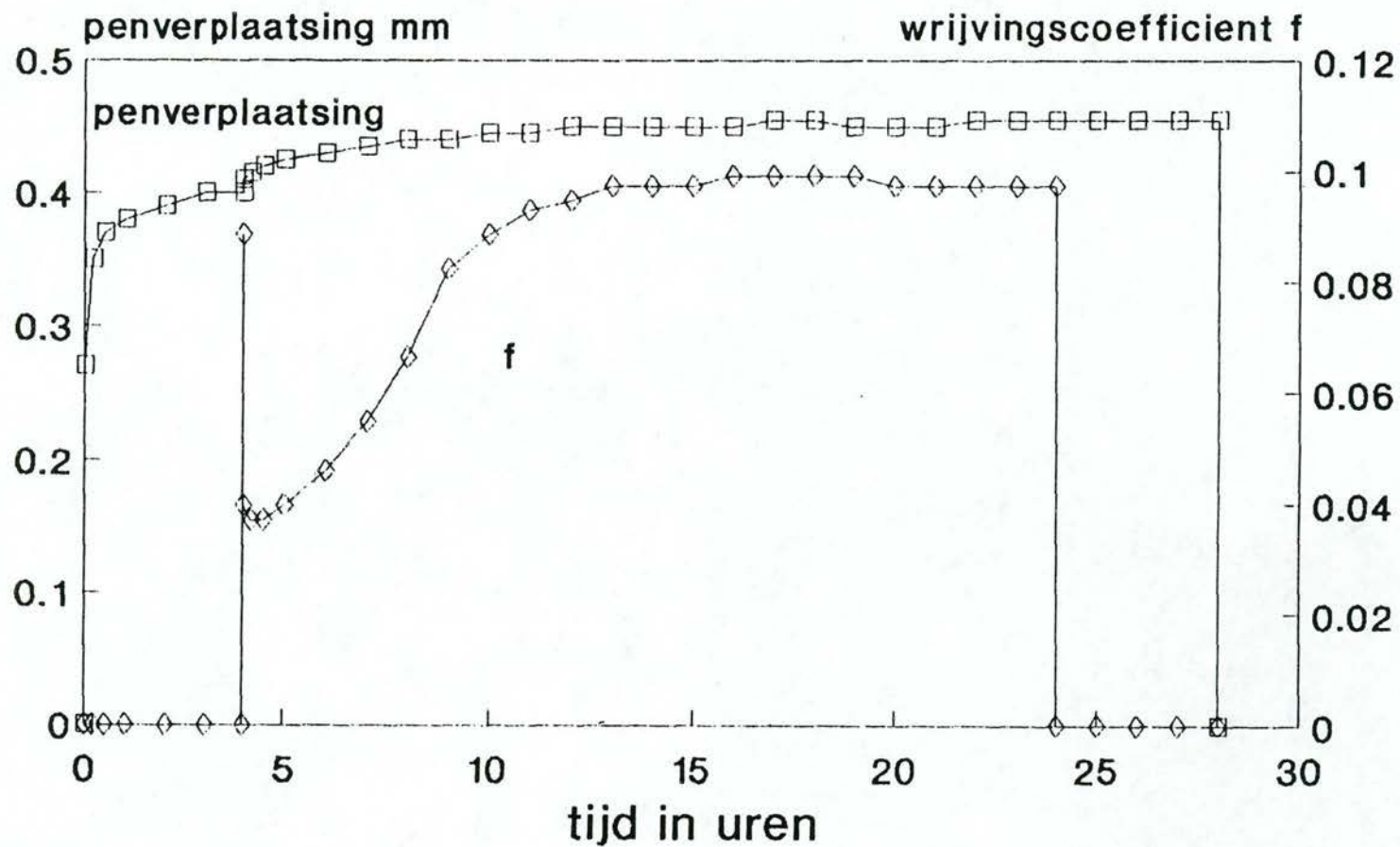
$$d_{bel} = 7,35 \sqrt{\frac{1}{h_{bel}}} = d_{bel} = 6,98 \text{ mm}$$

$$V_{glij} = 3,5 \text{ mm/s}$$

uur	ΔW	$K \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{Nm}} \right]$
4-7	0,025	$4,5 \times 10^{-5}$
11-14	0,005	$8,9 \times 10^{-6}$
17-20	-0,005	NMB

RIJKSWATERSTAAT - 90-80

Schijf: C45, Penmat: UHMW PE wit
 $F_n = 565 \text{ N}$, $v_{glij} = 3,5 \text{ mm/s}$



9-22

Blad no. :
 Pagina's :
 Samen gewerkt met :
 Datum :
 Proef no :
 Titel :

Blad no. :
 Aantal bladen :
 Instructeur :
 Cijfer :

Rijksuniversiteit - 91-88

26-3-191

Benaming: UHMW PE 80

$D = 6 \text{ mm}$

Chif: C45

Temperatuur Droog.

Belasting: 565 N

Glijnelheid: $v_{\text{glij}} = 3,5 \text{ mm/s}$

$v_{\text{glij}} = 0$ na 2 uur $0,41 \text{ mm}$ ingedrukt

$$h_{\text{bel}} = h_{\text{nom}} - 0,41$$

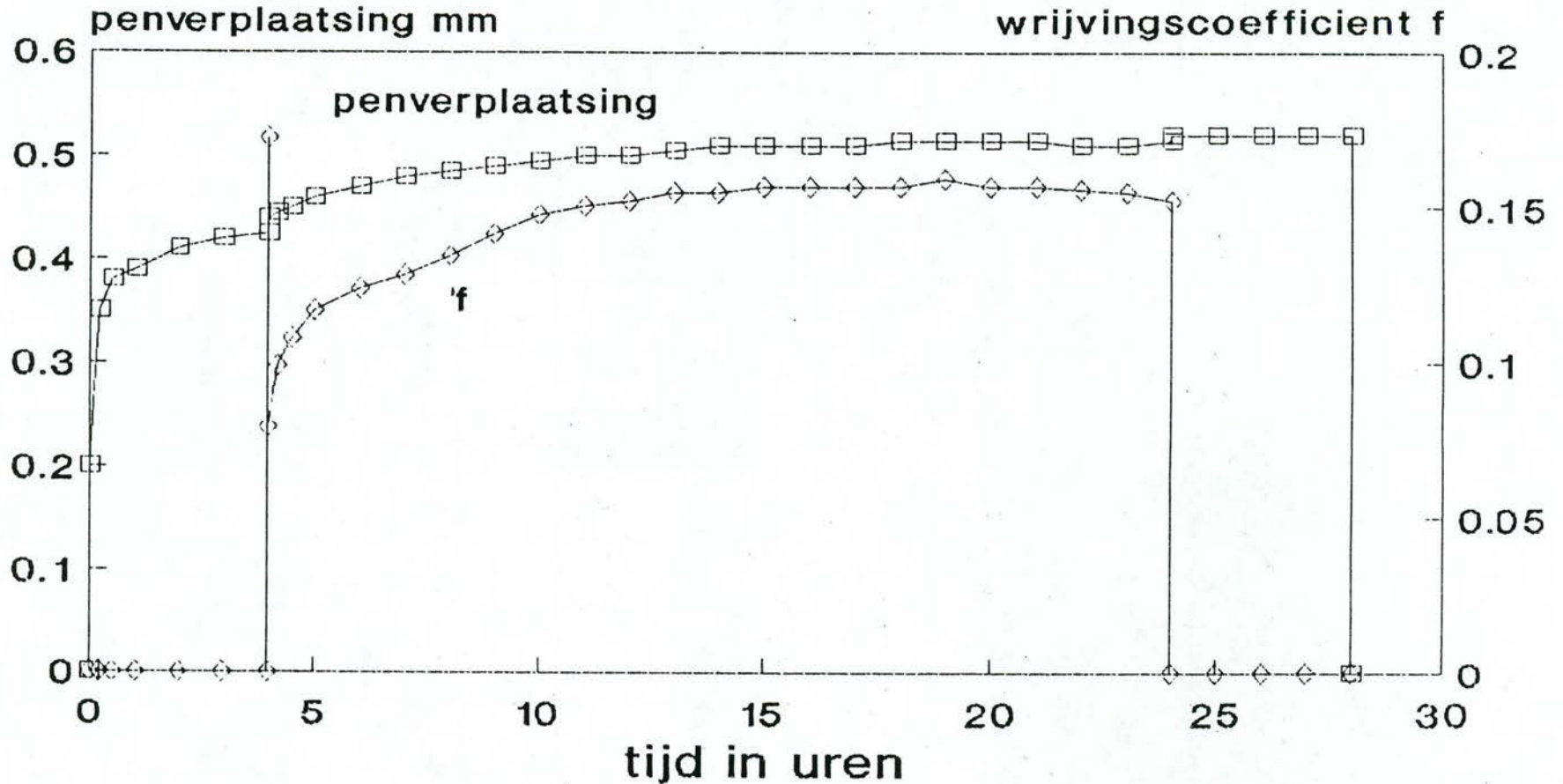
$$1,5 - 0,41 = 1,09 \text{ mm}$$

$$d_{\text{bel}} = 7,35 \frac{\sqrt{1}}{h_{\text{bel}}} = d_{\text{bel}} = 7,04$$

$$v_{\text{glij}} = 3,5 \text{ mm/s}$$

uur	f	ΔW [mm]	K [$\frac{\text{mm}^3}{\text{N.m}}$]
4-7	0,12	0,04	$72,9 * 10^{-6}$
11-14	0,16	0,01	$10,2 * 10^{-6}$
17-20	0,16	0,005	$9,1 * 10^{-6}$

RIJKSWATERSTAAT - 91-88
Schijf: C45, Penmateriaal: UHMW PE 80
 $F_n = 565 \text{ N}$, $v_{glij} = 3,5 \text{ mm/s}$



h₂ - 24

Rijswaterkruist - 91-89

6-5-191

Penmateriaal: Phamban 109

$D = 6 \text{ mm}$

Chijf: C45

Remerkmp. Droog

Belasting: 565 N

Glijnelheid: $v_{\text{glij}} = 3,5 \text{ mm/s}$

$v_{\text{glij}} = 0$ Na 2 uur 0,18 mm ingedrukt

$$h_{\text{bel}} = h_{\text{nom}} - 0,18$$

$$1,5 - 0,18 = 1,32 \text{ mm}$$

$$d_{\text{bel}} = 2,35 \frac{\sqrt{1}}{h_{\text{bel}}} = d_{\text{bel}} = 6,40$$

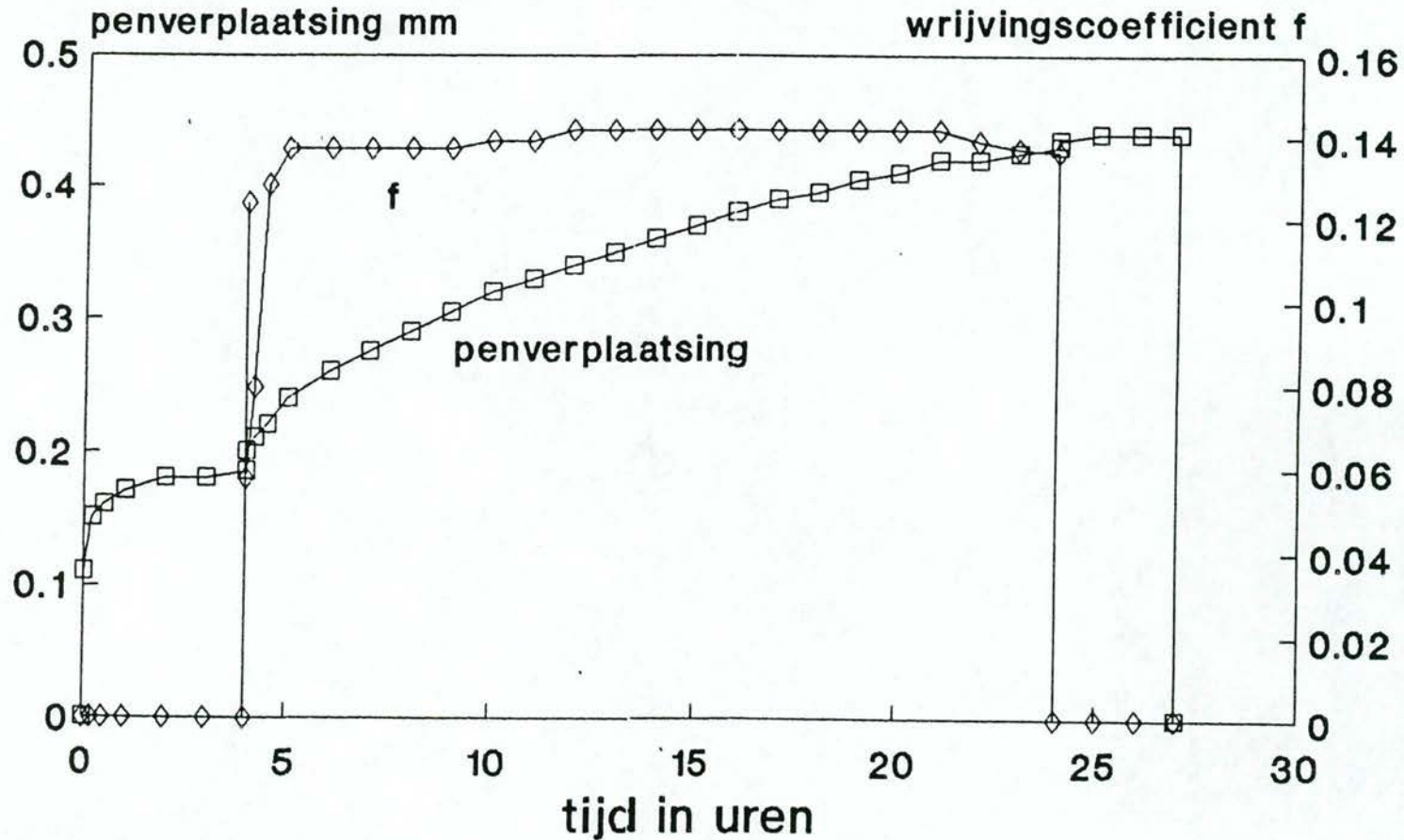
$$v_{\text{glij}} = 3,5 \text{ mm/s}$$

uur	f	ΔW [mm]	H [$\frac{\text{mm}^3}{\text{Nm}}$]
4-7	0,135	0,075	$1,13 * 10^{-4}$
11-14	0,143	0,03	$4,5 * 10^{-5}$
17-20.	0,143	0,02	$3 * 10^{-5}$

RIJKSWATERSTAAT - 91-89

Schijf: C45, Penmateriaal: SHAMBAN 109

$F_n = 565 \text{ N}$, $v_{\text{glij}} = 3,5 \text{ mm/s}$



Vakgroep Werktuigkundige Materialenkunde

Praktikum :
 Praktikant :
 Samengewerkt met :
 Datum :
 Proef no. :
 Titel :

Blad no. :
 Aantal bladen :
 Instrukteur :
 Cijfer :

Rijkswaterkaart - 91-92

21-5-191

Benamingsaal: Hamlan 451

$D = 6 \text{ mm}$

Glijf: C 45

Hamertemp. Droog

Belasting: 565 N

Glijmelheid: $v_{\text{glij}} = 3,5 \text{ mm/s}$

$v_{\text{glij}} = 0$ elke 2 uur 0,10 mm ingedrukt

$$h_{\text{bel}} = h_{\text{norm}} = 0,10$$

$$1,5 - 0,10 = 1,32 \text{ mm}$$

$$d_{\text{bel}} = 7,35 \sqrt{\frac{1}{h_{\text{bel}}}} = d_{\text{bel}} = 6,40$$

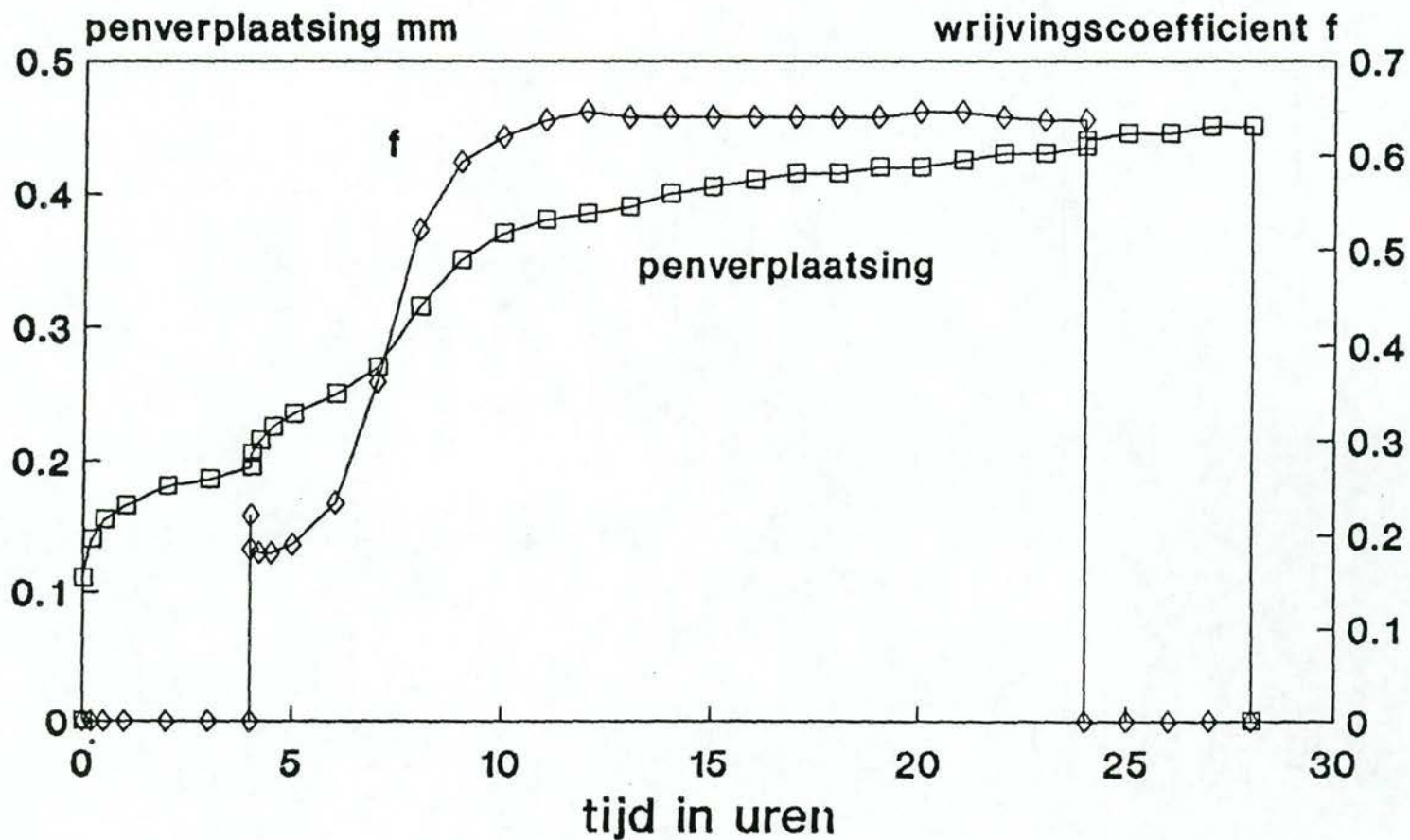
$$v_{\text{glij}} = 3,5 \text{ mm/s}$$

uur	f	ΔW [mm]	K [$\frac{\text{mm}^3}{\text{Nm}}$]
4-7	0,17	0,065	$9,8 \cdot 10^{-5}$
11-14	0,65 ?	0,02	$3,0 \cdot 10^{-5}$
17-20	0,65	0,005	$7,5 \cdot 10^{-6}$

RIJKSWATERSTAAT - 91-92

Schijf: C45, Penmateriaal: SHAMBAN 451

$F_n = 565 \text{ N}$, $v_{glij} = 3,5 \text{ mm/s}$



28
- 10 -

Rijkswaterstaat - 91-91.

13-5-'91

Omateriaal: Hamben 42.

$D = 6 \text{ mm}$

Stijf: C45

Kansdep. Draag.

Belasting: 565 N.

Glijmtheid: $V_{\text{glij}} = 3,5 \text{ mm/s}$.

$V_{\text{glij}} = 0$ Na 2 uur 0,20 mm ingedrukt.

$$h_{\text{bel}} = h_{\text{nom}} - 0,20$$

$$1,5 - 0,20 = 1,30 \text{ mm}$$

$$d_{\text{bel}} = 7,35 \frac{\sqrt{1}}{h_{\text{bel}}} = d_{\text{bel}} = 6,45$$

$$V_{\text{glij}} = 3,5 \text{ mm/s.}$$

uur	f	$\Delta W [\text{mm}]$	$K \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{Nm}} \right]$
4-7	0,09	0,035	$5,4 * 10^{-5}$
11-14	0,16	0,01	$1,5 * 10^{-5}$
17-20	0,19	0,015	$2,3 * 10^{-5}$

Datum: _____
 Pagina: _____
 T: _____

G. J. _____
 A. J. _____
 Instructeur: _____
 Cijfer: _____

Rijswerkstuk - 90-86

22-11-90

Material: MT 72

$D = 6 \text{ mm}$

Grif: C45

Hamertemp Droog

Belasting: 565 N

Glijmelheid: $V_{glij} = 3,5 \text{ mm/s}$

$V_{glij} = 0$ Na 4 uur 0,20 mm ingedrukt.

$$h_{bel} = h_{nom} - 0,20$$

$$1,5 - 0,20 = 1,3 \text{ mm}$$

$$d_{bel} = 7,35 \frac{\sqrt{1}}{h_{bel}} = d_{bel} = 6,45$$

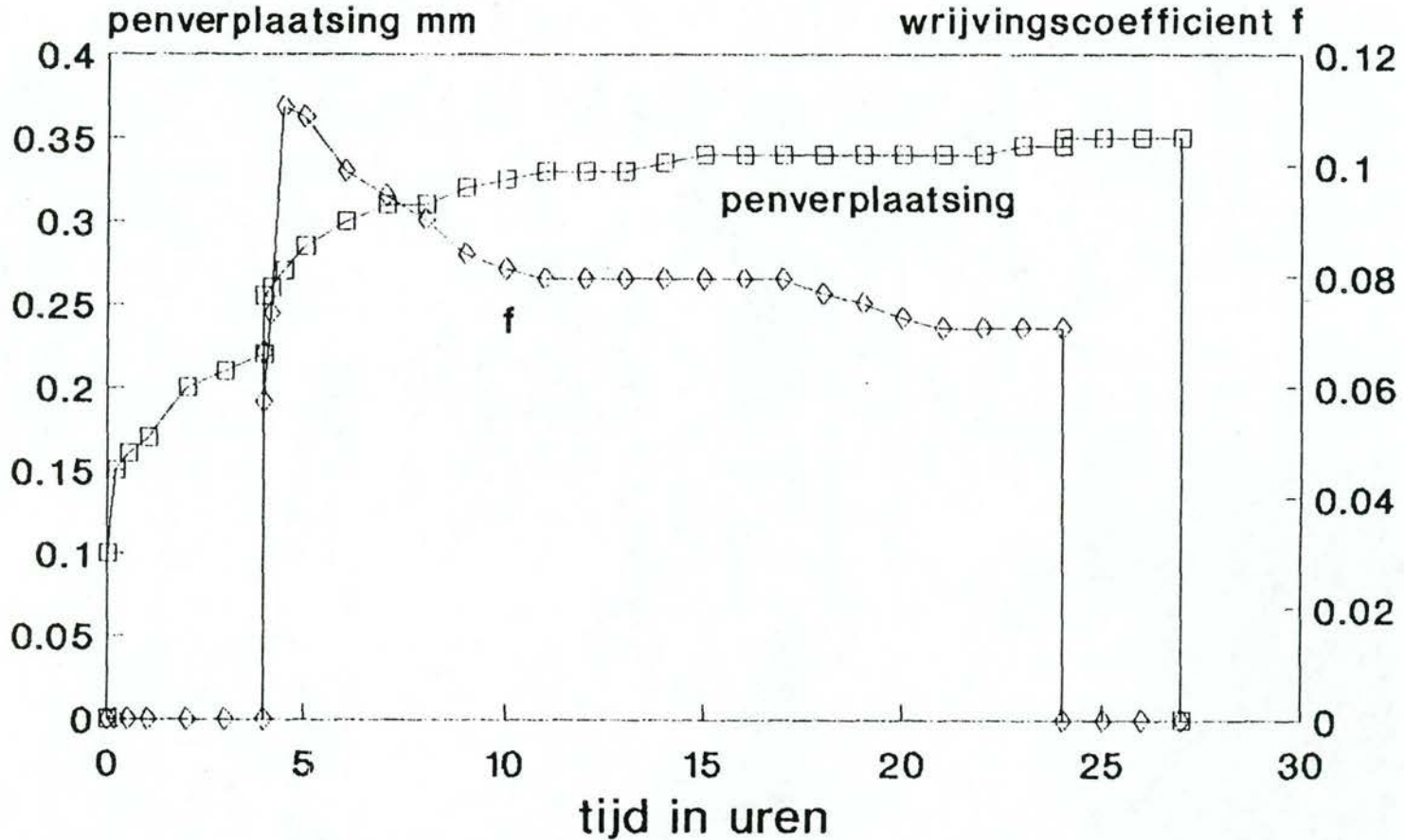
$$V_{glij} = 3,5 \text{ mm/s}$$

uur	f	ΔW	$K \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{Nmm}} \right]$
4-7	0,100	0,055	$8,4 \times 10^{-5}$
11-14	0,080	0,005	$7,6 \times 10^{-6}$
17-20	0,075	0	N.H.B.

RIJKSWATERSTAAT - 90-86

Schijf: C45, Penmateriaal: MT72

$F_n = 565 \text{ N}$, $v_{glij} = 3,5 \text{ mm/s}$



32

Rijkswaterstaat - 90-82.

14-11-'90.

Benodigd materiaal: Canvasvezels

$D = 6 \text{ mm}$

Griff: C45.

Temperatuur: Droog.

Belasting: 565 N

Glijmelheid: $V_{\text{glij}} = 3,5 \text{ mm/s}$

$V_{\text{glij}} = 0$ Na 4 uur 0,44 mm ingedrukt

$$h_{\text{bel}} = h_{\text{nom}} - 0,44$$

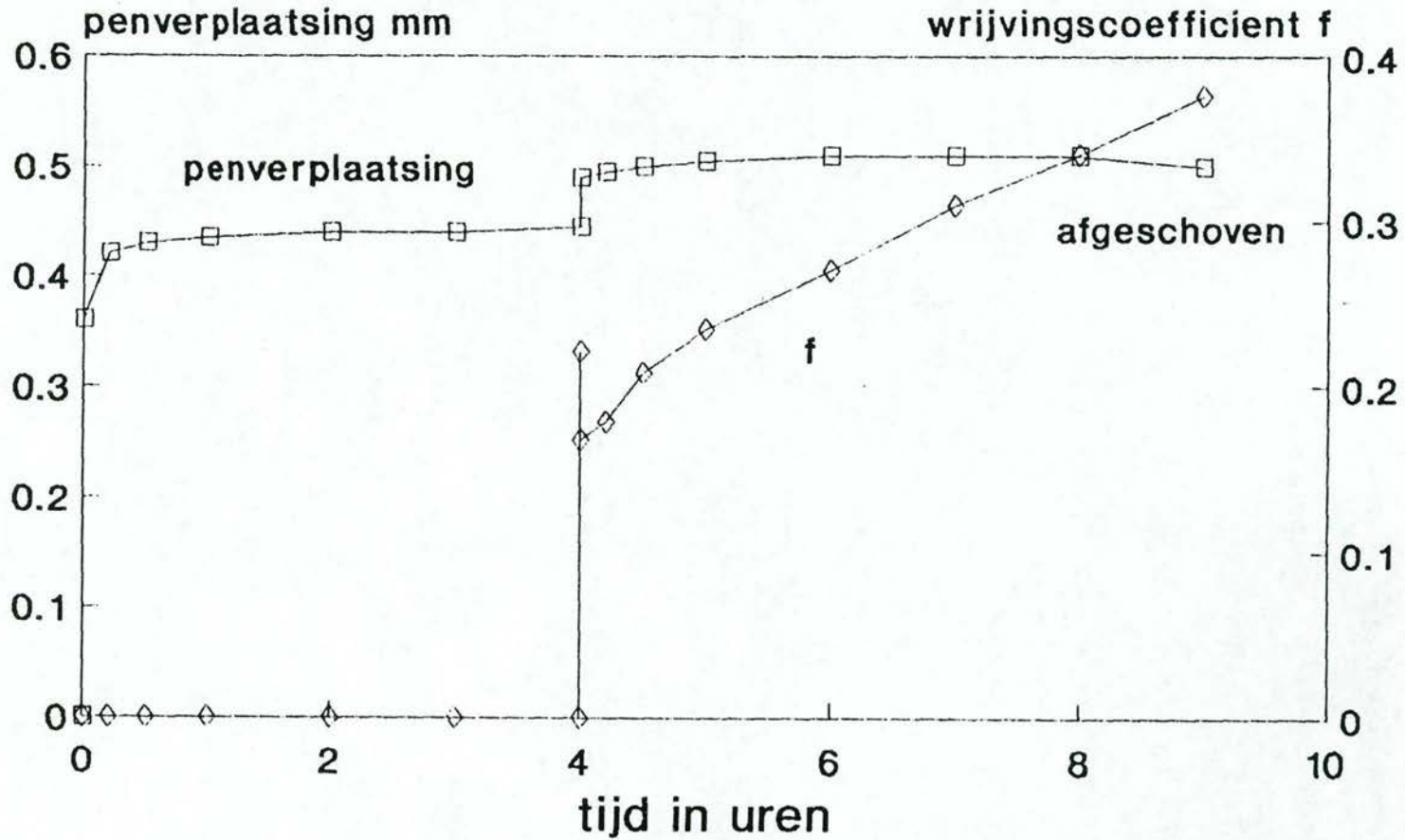
$$1,5 - 0,44 = 1,06 \text{ mm}$$

$$d_{\text{bel}} = 7,35 \cdot \sqrt{\frac{1}{h_{\text{bel}}}} = d_{\text{bel}} = 7,19 \text{ mm}$$

$$V_{\text{glij}} = 3,5 \text{ mm/s}$$

uur	f	ΔW	$K \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{Nm}} \right]$
4-7	0,25	0,02	$3,7 \cdot 10^{-5}$


RIJKSWATERSTAAT - 90-82
Schijf: C45, Penmat: Canvasvezels
 $F_n = 565 \text{ N}$, $v_{glij} = 3,5 \text{ mm/s}$



16.34

Rijkswaktsest - 90-84.

19-11-190.

Benutmaterial: HT 22' gelijnd 

$D = 6 \text{ mm}$

Gelijf: Teconel.

Kamertemp Droog

Belasting: 1000 N.

Glijvelheid: $v_{\text{Glij}} = 3,5 \text{ mm/s}$.

$v_{\text{Glij}} = 0$ na 2 uur 0,645 mm ingedrukt

$$h_{\text{bel}} = h_{\text{nom}} - 0,645$$

$$1,5 - 0,645 = 0,855 \text{ mm}$$

$$d_{\text{bel}} = 7,35 \sqrt{\frac{1}{h_{\text{bel}}}} = d_{\text{bel}} = 7,95$$

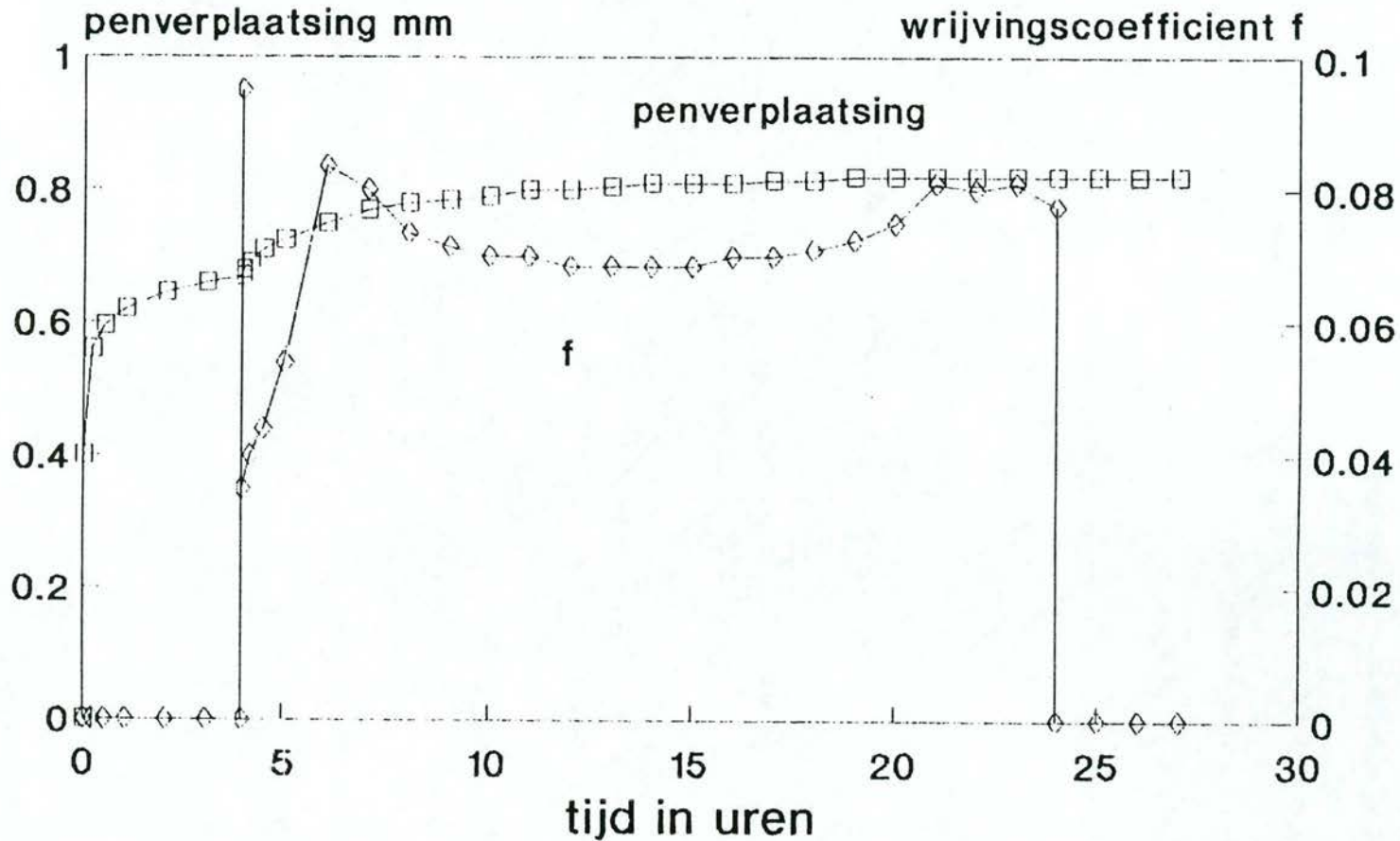
$$v_{\text{Glij}} = 3,5 \text{ mm/s}$$

uur	ΔW	$K \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{Nmm}^2} \right]$
4-7	0,09	$1,2 * 10^{-4}$
11-14	0,01	$1,3 * 10^{-5}$
17-20	0,005	$6,6 * 10^{-6}$

RIJKSWATERSTAAT - 90-84

Schijf: Inconel, Penmat: MT72'Gelijmd 

$F_n = 1000 \text{ N}$, $v_{glij} = 3,5 \text{ mm/s}$



12-36

... ..
 Datum :

Rijkswetsstraat -90-83

15-11-'90.

Benmateriaal: 17T22' gelijnd ⊕

D = 6 mm

Chijf: Inconel.

Temperatuur Droog.

Belasting: 1000 N

Glijmelheid: $V_{glij} = 3,5 \text{ mm/s}$

$V_{glij} = 0$ als ruw 0,57 mm ingedrukt

$$h_{bel} = h_{nom} - 0,57$$

$$1,5 - 0,57 = 0,93 \text{ mm.}$$

$$d_{bel} = 7,35 \sqrt{\frac{1}{h_{bel}}} = d_{bel} = 7,62 \text{ mm}$$

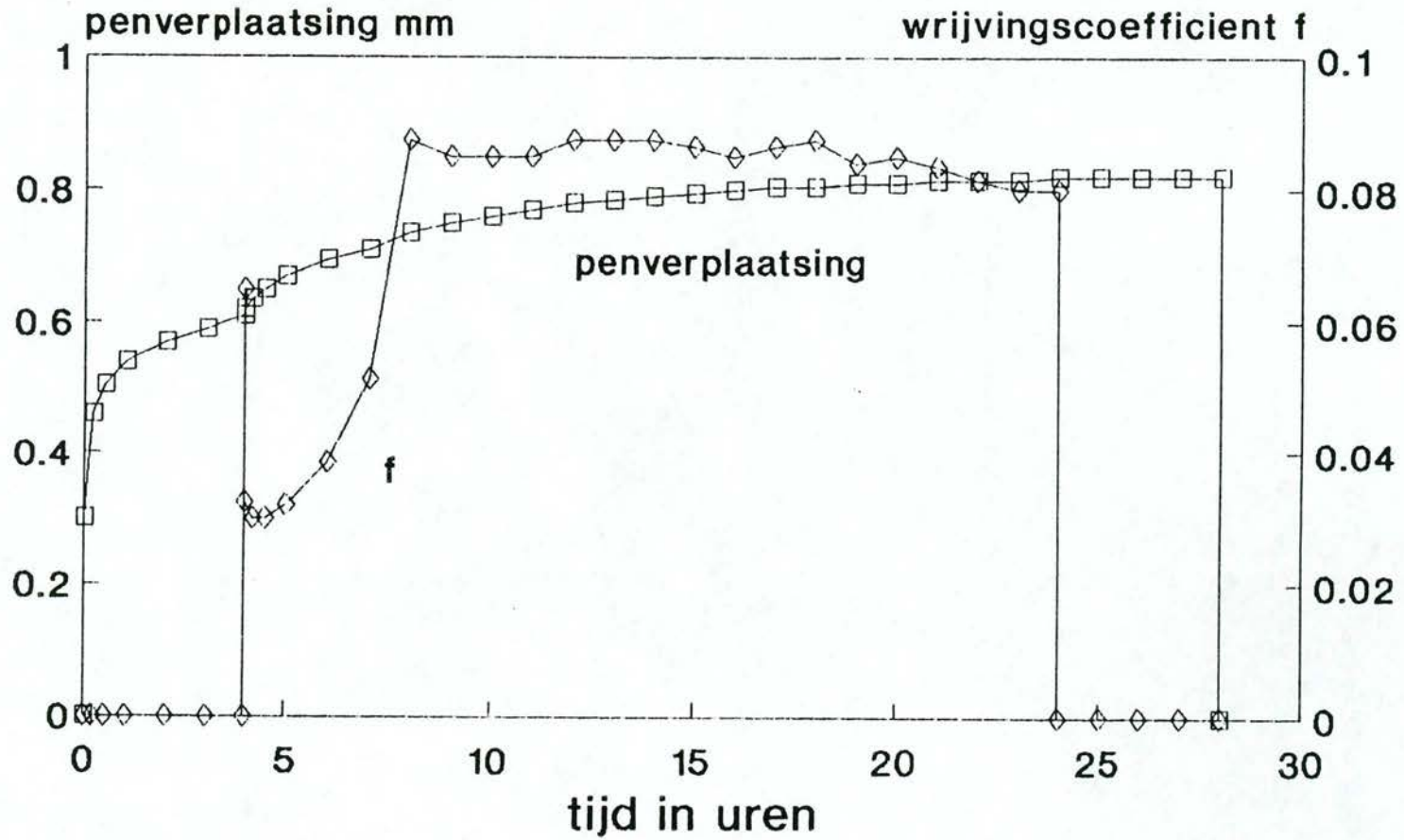
$$V_{glij} = 3,5 \text{ mm/s}$$

ruw	ΔW	$K \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{N mm}} \right]$
4-7	0,09	$1,1 * 10^{-4}$
11-14	0,02	$2,4 * 10^{-5}$
17-20	0,005	$6,0 * 10^{-6}$

RIJKSWATERSTAAT - 90-83

Schijf: Inconel, Penmat: MT72'Gelijmd 

$F_n = 1000 \text{ N}$, $v_{\text{glij}} = 3,5 \text{ mm/s}$



38

Samenlevingswet
Datum
Praktijk

Naam
Achternaam
Instructeur
Cijfer

Rijswaterstraat - 90-77

4-11-1990

Probleem: 11 T 72 LYMBAAR.

$D = 6 \text{ mm}$

Stijf: Inconel

Remmershof 71202

Belasting: 1000 N

Glijwielheid: $v_{\text{glij}} = 3,5 \text{ mm/s}$

$v_{\text{glij}} = 0$ *en nu 0,55 mm ingedrukt*

$$h_{\text{bel}} = h_{\text{norm}} - 0,55$$

$$1,5 - 0,55 = 0,95 \text{ mm}$$

$$d_{\text{bel}} = 7,35 \sqrt{\frac{1}{h_{\text{bel}}}} = d_{\text{bel}} = 7,57 \text{ mm}$$

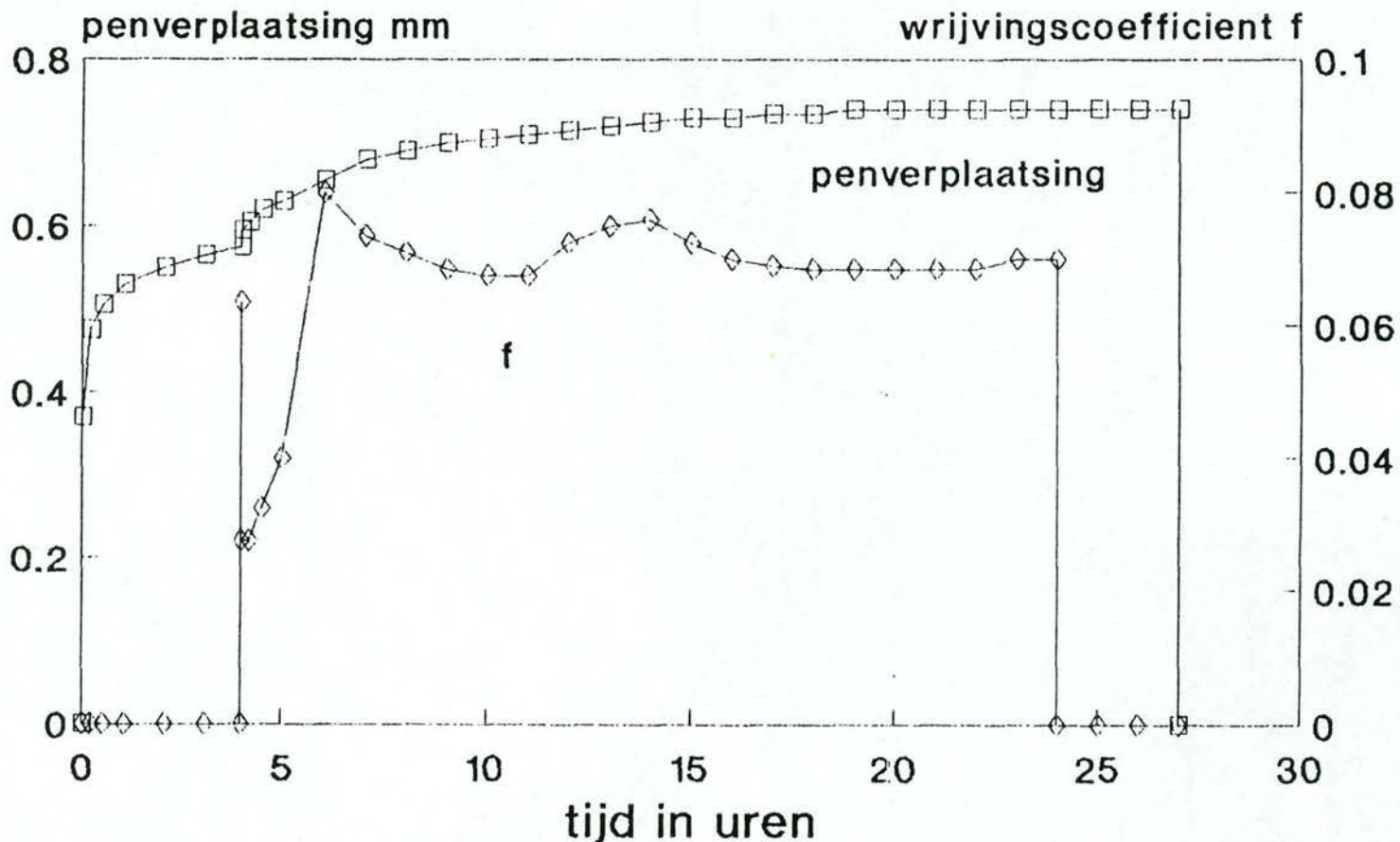
$$v_{\text{glij}} = 3,5 \text{ mm/s}$$

uur	ΔW	$K \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{N mm}} \right]$
4-7	0,085	$1,0 * 10^{-4}$
11-14	0,015	$1,8 * 10^{-5}$
17-19	0,005	$5,9 * 10^{-6}$

RIJKSWATERSTAAT - 90-79

Schijf: Inconel, Penmat: MT72 Lijmbaar

$F_n = 1000 \text{ N}$, $v_{\text{glij}} = 3,5 \text{ mm/s}$



0h 1.1

Rijwielmaat: -90-75.

29-10-190.

Commerciaal: HT 72'

D = 6 mm

Chijf: RVS.

Kanotemp Draag.

Belasting: 1000 N

Glijmetheid: $V_{Glij} = 3,5 \text{ mm/s}$

$V_{Glij} = 0$ da 2 uur 0,42 mm ingedrukt.

$$h_{bel} = h_{nom} - 0,42$$

$$1,5 - 0,42 = 1,08 \text{ mm}$$

$$d_{bel} = 7,35 \sqrt{\frac{1}{h_{bel}}} = d_{bel} = 7,07 \text{ mm}$$

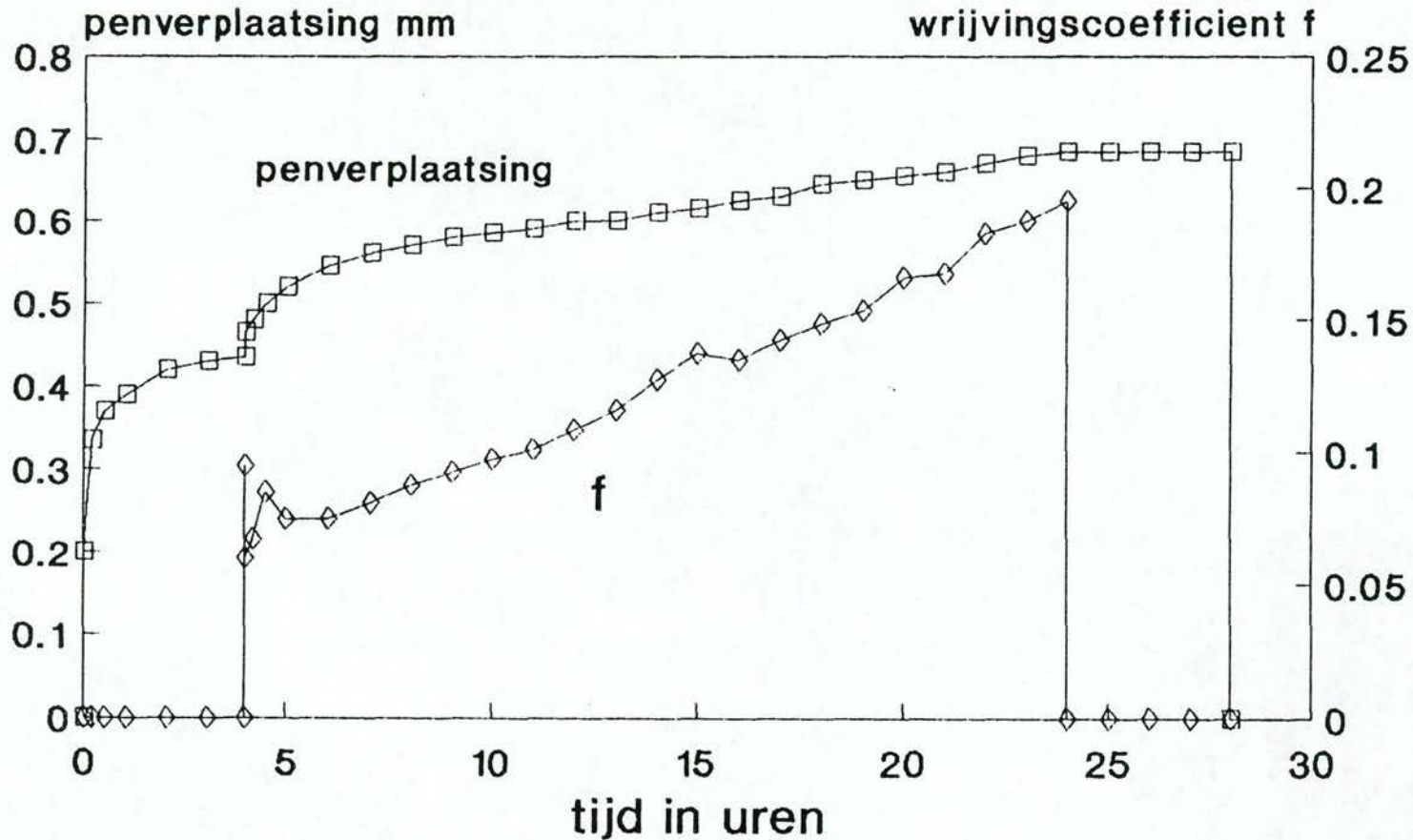
$$V_{Glij} = 3,5 \text{ mm/s}$$

uur	ΔW	$K \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{Nm}} \right]$
4-7	0,095	$9,9 \times 10^{-5}$
11-14	0,02	$2,1 \times 10^{-5}$
17-20	0,025	$2,6 \times 10^{-5}$

RIJKSWATERSTAAT - 90-75

Schijf: RVS, penmateriaal: MT72'

$F_n = 1000 \text{ N}$, $v_{glij} = 3,5 \text{ mm/s}$



42

Rijksuniversiteit - 90-76.

31-10-90.

Permateeriaal: Turcite 109

$D = 6 \text{ mm}$

Slif: RVS.

Remertemp. Droog

Belasting: 1300 N

Glijmtheid: $V_{\text{glij}} = 3,5 \text{ mm/s}$

$V_{\text{glij}} = 0$ Na 2 uur 0,48 mm ingedrukt.

$$h_{\text{bel}} = h_{\text{nom}} = 0,48$$

$$1,5 - 0,48 = 1,02 \text{ mm}$$

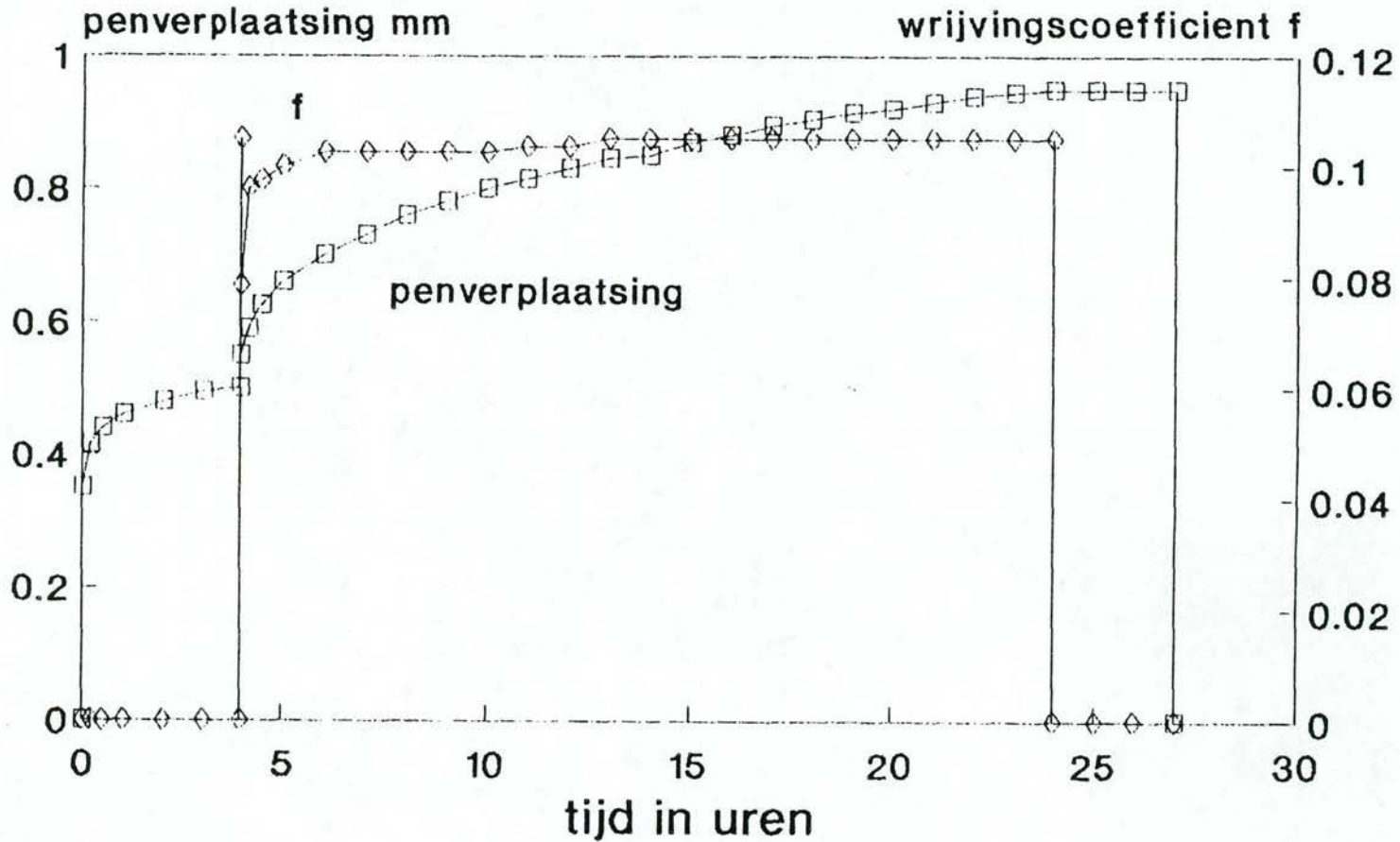
$$d_{\text{bel}} = 7,35 \sqrt{\frac{1}{h_{\text{bel}}}} = d_{\text{eel}} = 7,28 \text{ mm}$$

$$V_{\text{glij}} = 3,5 \text{ mm/s}$$

uur	ΔW	$K \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{N} \cdot \text{mm}^{-4}} \right]$
4-7	0,18	$2,0 * 10^{-4}$
11-14	0,035	$3,9 * 10^{-5}$
17-20	0,025	$2,8 * 10^{-5}$

RIJKSWATERSTAAT - 90-76

Schijf: RVS, penmateriaal: Turcite 109
 $F_n = 1000 \text{ N}$, $v_{glij} = 3,5 \text{ mm/s}$



hh 44

Praktikum :
 Praktikum :
 Samengewerkt met :
 Datum :
 Proef no. :
 Titel :

Blaad no. :
 Aantal bladen :
 Instrukteur :
 Cijfer :

Rijswaterstaat - 91-96. 17-10-91
 Kenmateriaal: 4H14N PA ZWART. Gesmeerd olie DTE 25
 Schijf: C45 Temp 20°C
 Belasting: 565 N D = 6 mm
 Glijnsnelheid: $v_{glij} = 3,5 \text{ mm/s}$
 $v_{glij} = 0$ elke 2 uur 0,30 mm ingedeukt.
 $h_{bel} = h_{nom} - 0,30$
 $1,5 - 0,30 = 1,20 \text{ mm}$

$$d_{bel} = 7,35 \sqrt{\frac{1}{h_{bel}}} = d_{bel} = 6,71 \text{ mm}$$

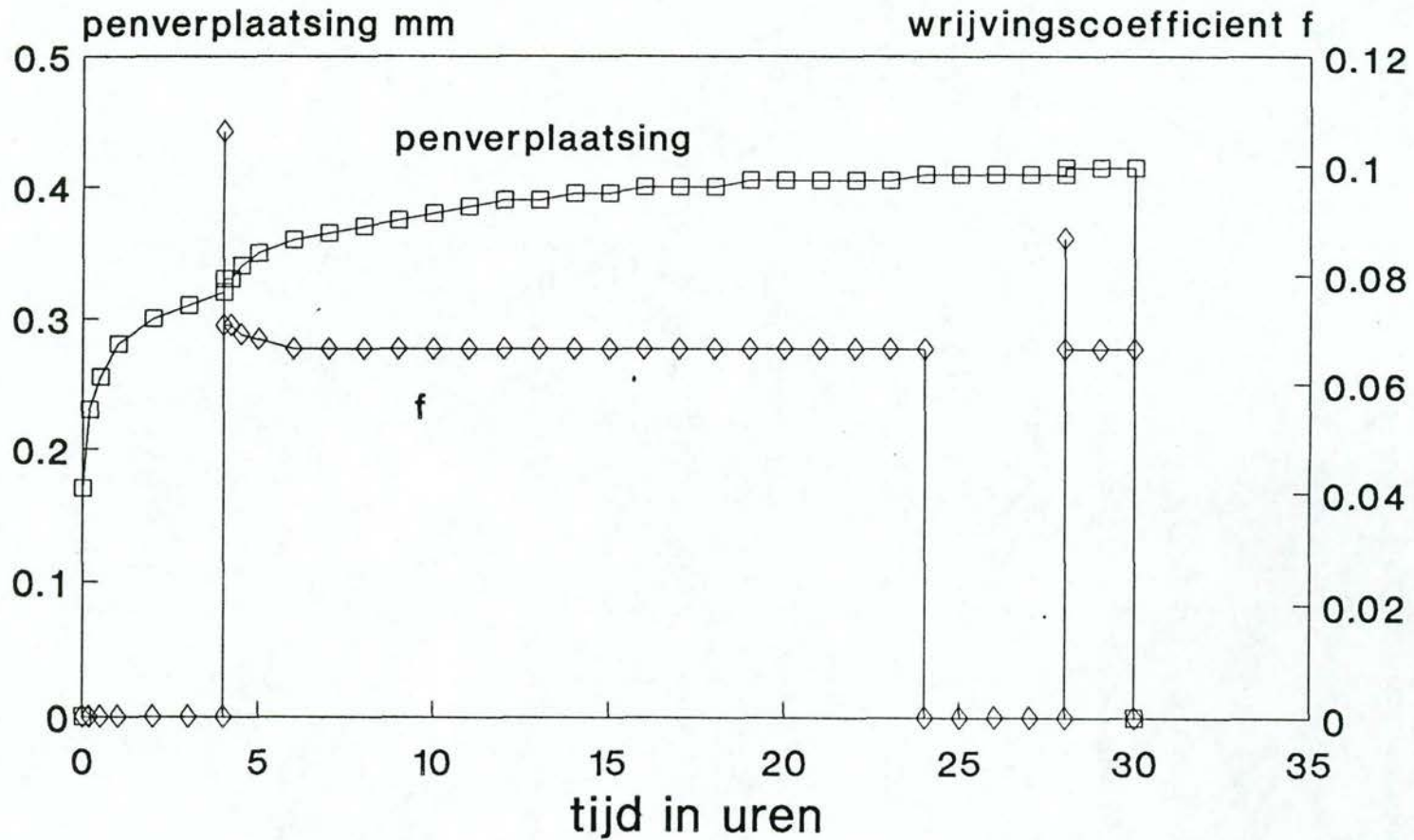
$$v_{glij} = 3,5 \text{ mm/s}$$

uur	ΔW [mm]	K [$\frac{\text{mm}^3}{\text{Nm}}$]
4-7	0,035	$5,8 \times 10^{-5}$
11-14	0,01	$1,7 \times 10^{-5}$
17-20	0,005	$0,83 \times 10^{-5}$

RIJKSWATERSTAAT - 91-96

Schijf: C45, Penmateriaal: UHMW PA zwart

$F_n = 565 \text{ N}$, $v_{glij} = 3,5 \text{ mm/s}$



97
- 91-96
46

Praktikum :
 Praktikant :
 Samengewerkt met :
 Datum :
 Proef no. :
 Titel :

Blaad no. :
 Aantal bladen :
 Instrukteur :
 Cijfer :

Rijkswaterstaat - 91-95

15-10-'91

Benamateriaal: 4H11N. PA. NIT.

Gesmeerd olie DTE 15

Chijf: C45

Temp. 20°C

Belasting: 565 N.

D = 6 mm.

Glijmelheid: $v_{glij} = 3,5 \text{ mm/s}$.

$v_{glij} = 0$ chijf 2 uur 0,585 mm ingedrukt.

$$h_{bel} = h_{nom} - 0,585$$

$$1,5 - 0,585 = 0,915 \text{ mm}$$

$$d_{bel} = 7,35 \frac{\sqrt{1}}{h_{bel}} = d_{bel} = 7,68 \text{ mm}$$

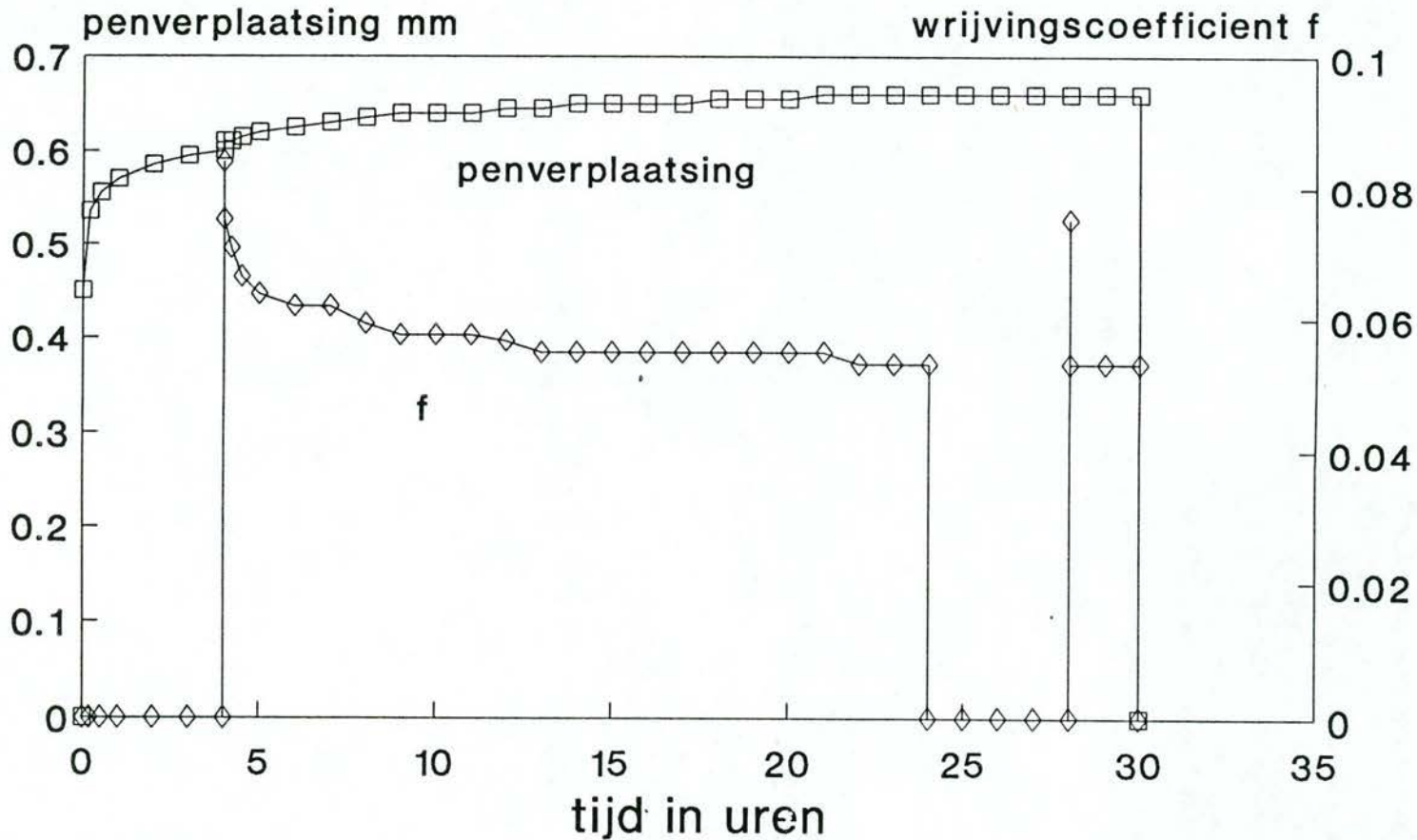
$$v_{glij} = 3,5 \text{ mm/s}$$

uur	ΔW [mm]	K [$\frac{\text{mm}^3}{\text{Nm}}$]
4-7	0,02	$4,3 \cdot 10^{-5}$
11-14	0,01	$2,2 \cdot 10^{-5}$
17-20	0,005	$1,1 \cdot 10^{-5}$

RIJKSWATERSTAAT - 91-95

Schijf: C45, Penmateriaal:UHMW PA wit

$F_n = 565 \text{ N}$, $v_{glij} = 3,5 \text{ mm/s}$



...
 ...
 ...
 ...

...
 ...
 ...
 ...

Rijswaterstaat - 90-77.

1-11-1977

Benamewaal: Turrite 109

D = 6 mm

Stijf: RVS

Gemidd. olie 20°C
 MOBIL DTE 25

Belasting: 1000 N

Glijvelheid: $v_{glij} = 3,5 \text{ mm/s}$

$v_{glij} = 0$ sta. laag 0,48 mm ingedrukt.

$$h_{bel} = h_{nom} - 0,48$$

$$1,5 - 0,48 = 1,02 \text{ mm}$$

$$d_{bel} = 4,35 \sqrt{\frac{1}{h_{bel}}} = d_{bel} = 4,28 \text{ mm}$$

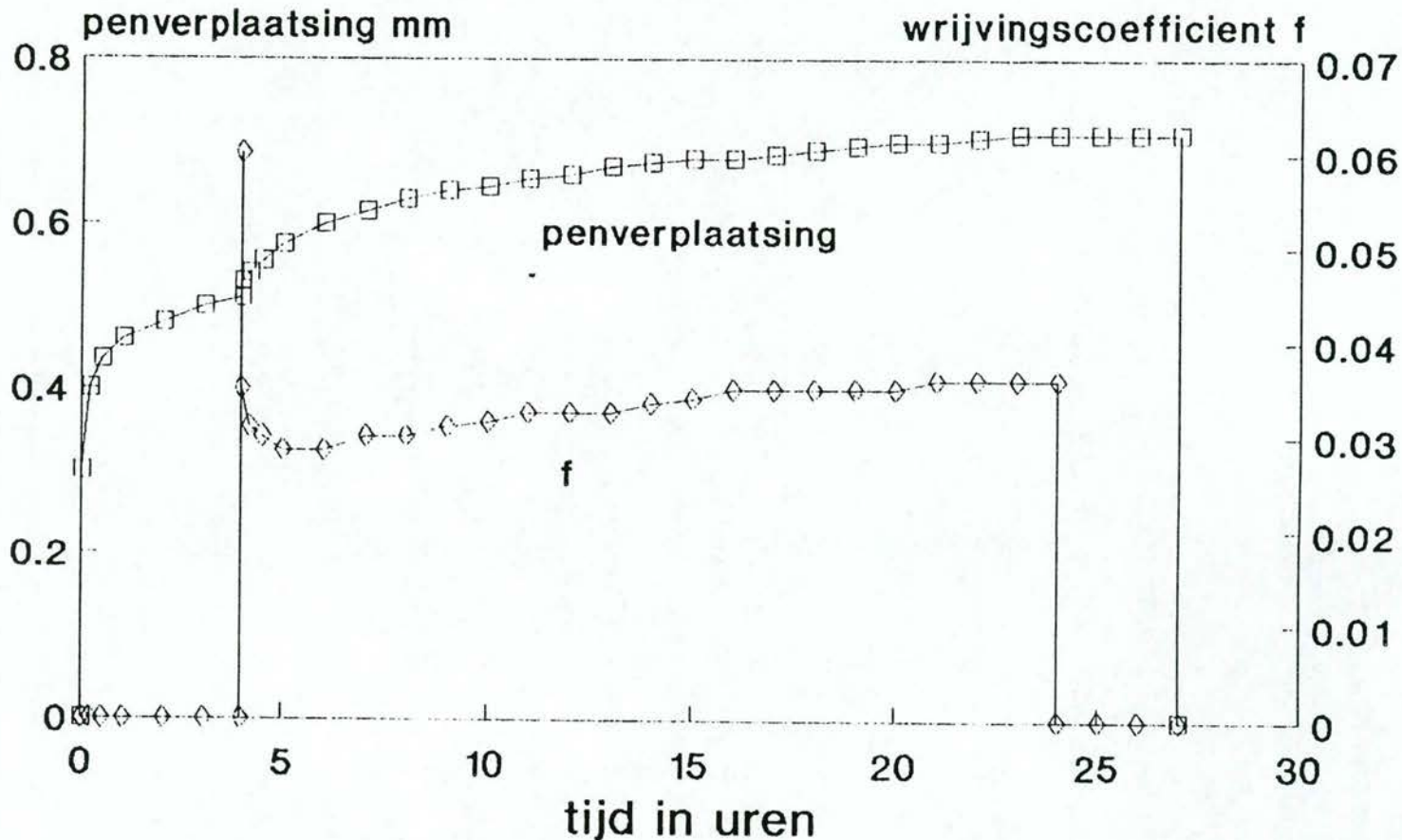
$$v_{glij} = 3,5 \text{ mm/s}$$

uur	ΔW	$K \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{Nm}} \right]$
4-7	0,085	$9,4 * 10^{-5}$
11-14	0,02	$2,2 * 10^{-5}$
17-20	0,015	$1,7 * 10^{-5}$

RIJKSWATERSTAAT - 90-77

Schijf: RVS, penmateriaal: Turcite 109

$F_n = 1000 \text{ N}$, $v_{\text{glij}} = 3,5 \text{ mm/s}$, olie 20 C



50

Praktikum: : Blad no.:
 Praktikum: : Aantal bladen: :
 Samengewerkt met: : Instrukteur: :
 Datum: : Cijfer: :
 Proef no.: :
 Titel: :

Rijswakkerbaat - 91-97

21-10-'91

Leermateriaal: Hammen 451

Gesmeerd olie DTE 25

Chijf: C 45

Temp 20°C.

Belasting: 565 N

D = 6 mm.

Glijmechtheid: $v_{glij} = 3,5 \text{ mm/s}$

$v_{glij} = 0$ over 2 uur 0,23 mm ingedrukt.

$$h_{bel} = h_{nom} - 0,23$$

$$1,5 - 0,23 = 1,27 \text{ mm}$$

$$d_{bel} = 9,35 \sqrt{\frac{1}{h_{bel}}} = d_{bel} = 6,5 \mu\text{m}$$

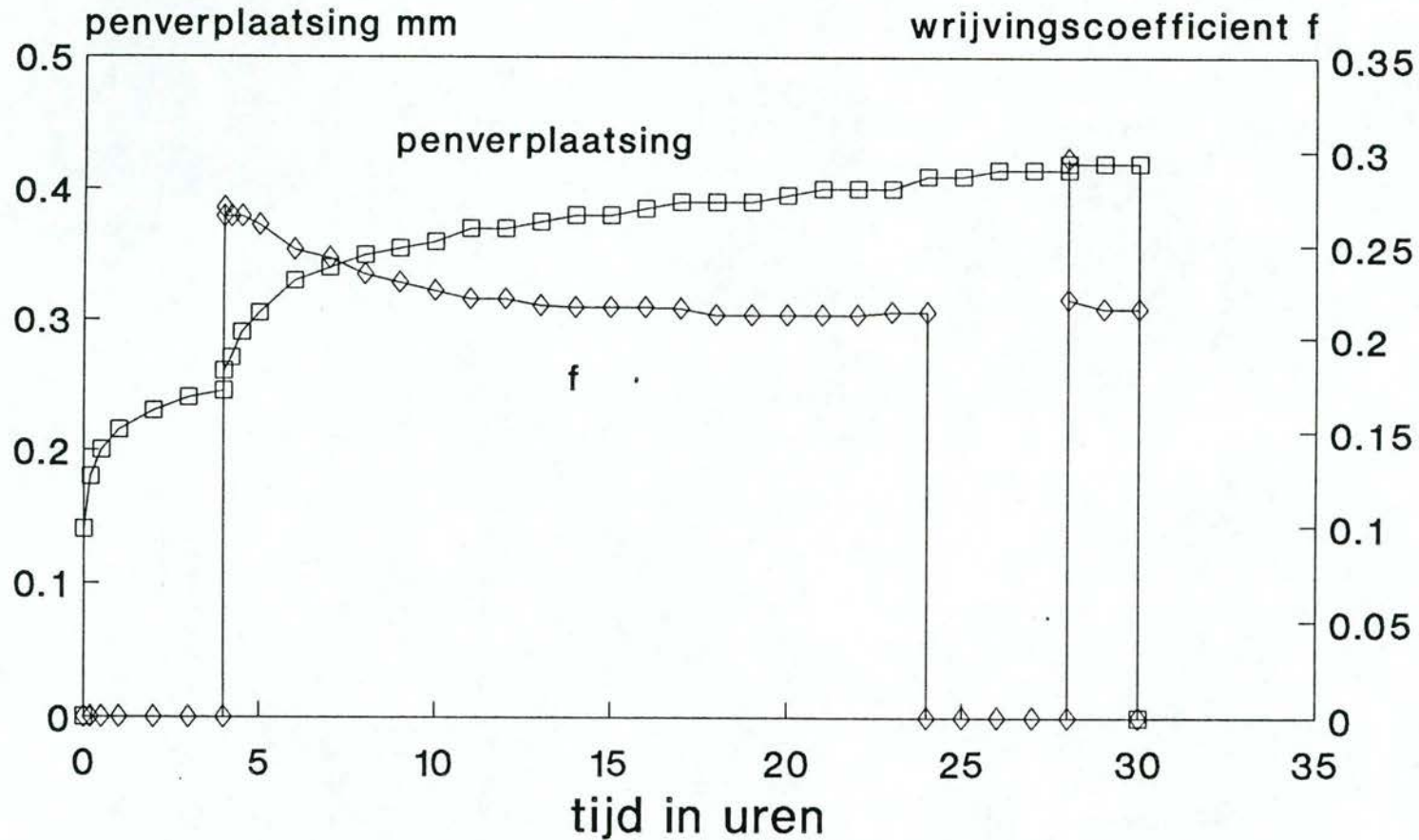
$$v_{glij} = 3,5 \text{ mm/s}$$

uur	ΔW [mm]	K [$\frac{\text{mm}^3}{\text{Nm}}$]
4-7	0,08	$12,5 \cdot 10^{-5}$
11-14	0,01	$1,6 \cdot 10^{-5}$
17-20	0,005	$0,8 \cdot 10^{-5}$

RIJKSWATERSTAAT - 91-97

Schijf: C45, Penmateriaal: SHAMBAN 451

$F_n = 565 \text{ N}$, $v_{glij} = 3,5 \text{ mm/s}$



- 27 - 52

Datum: _____
 Pagina: _____
 Samenvatting met: _____
 Datum: _____
 Proef no.: _____
 Titel: _____

E: _____
 Assistenten: _____
 Instructeur: _____
 Cijfer: _____

Rijkswaterstaat - 90-78

5-11-190

Material: MT 72 LIJMBAR

D = 6 mm

Chijf: Inconel

Gebruik: olie DTE 25
MOBIL Temp 80°C

Belasting: 1000 N

Glijmelheid: $v_{glij} = 3,5 \text{ mm/s}$

$v_{glij} = 0$ die zuur 0,795 mm ingedrukt

$$h_{bel} = h_{nom} - 0,795$$

$$1,5 - 0,795 = 0,705 \text{ mm}$$

$$d_{bel} = 7,35 \sqrt{\frac{1}{h_{bel}}} = d_{bel} = 8,75 \text{ mm}$$

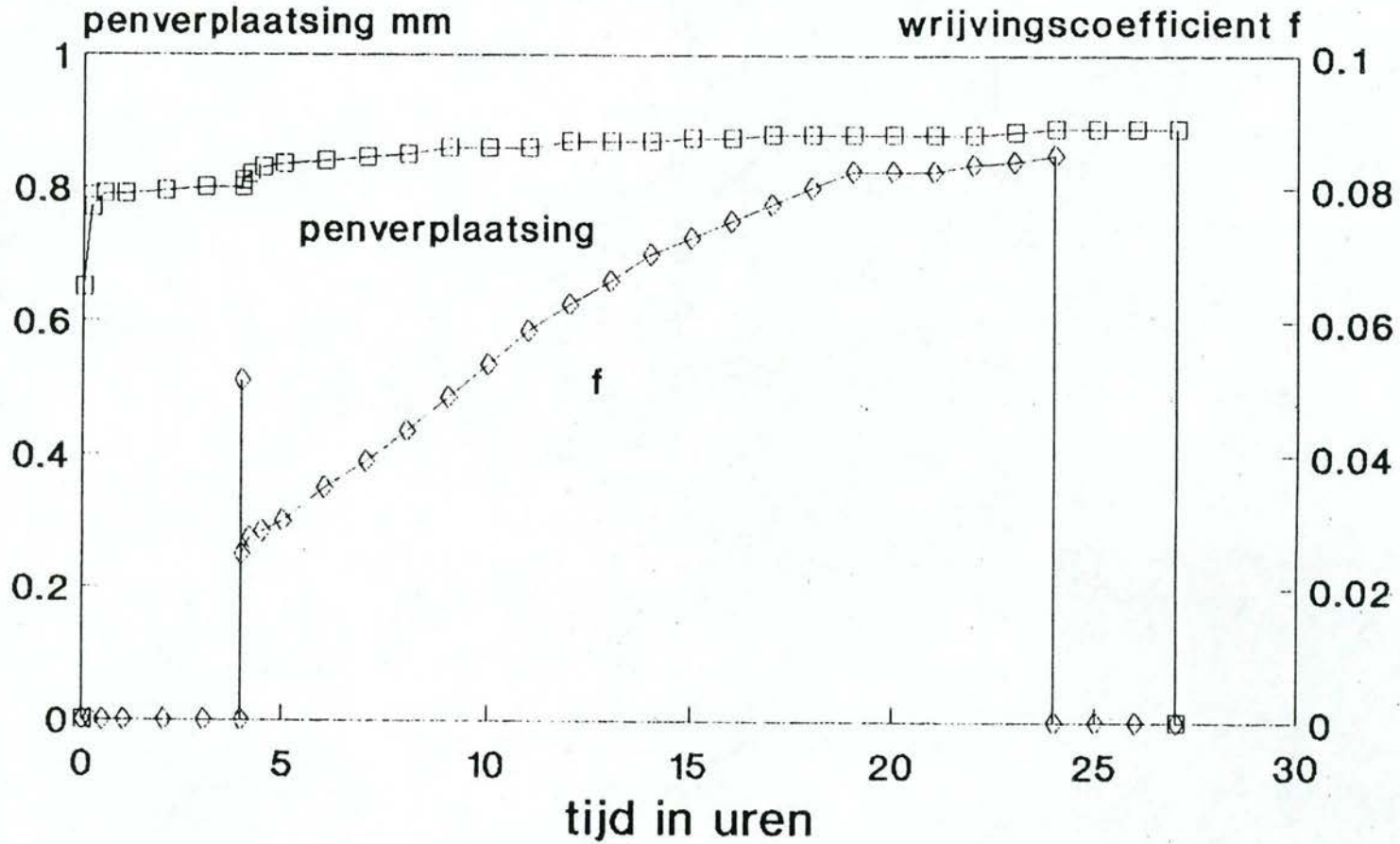
Inv. berekening voor $h_{bel} = 8 \text{ mm}$

$$v_{glij} = 3,5 \text{ mm/s}$$

zuur	ΔW	$K \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{Nmm}} \right]$
4-7	0,035	$4,7 * 10^{-5}$
11-14	0,01	$1,3 * 10^{-5}$
17-20	0	N.M.B.

RIJKSWATERSTAAT - 9J-78

Schijf: Inconel, Penmat: MT72 Lijmbaar
Fn = 1000 N, vglj = 3,5 mm/s, olie 80 C



54

3.2 Het splitsen van slijtage en kruip bij de pen-schijf-proef voor kunststoffen.

Zoals gesteld in 3.1 wordt tijdens de slijtagemetingen het gesommeerde effect van slijtage en kruip geregistreerd als de penverplaatsing.

In dit hoofdstuk wordt een scheiding aangebracht tussen deze beide effecten en worden de "netto" k-waarden voor de slijtage bepaald.

In het vorige hoofdstuk waren de gebruikte slijtagefactoren nog niet gecorrigeerd voor het kruipgedeelte dat mede de pen-verplaatsing veroorzaakt.

Wordt deze correctie wel in rekening gebracht zoals dat hierna wordt uitgevoerd, dan ontstaat de tabel zoals deze op de volgende pagina is weergegeven.

Slijtagefactoren na afsplitsing van het kruipgedeelte

Materiaal	$k * 10^{-6}$ [mm ³ /Nm]		
	inloop	midden	eind
MT 72	55	0	0
UHMW PE wit	21	1	0
UHMW PE zwart	23	0	2
451	74	21	3
80	35	5	1
Rubber / Canvas	21	--	--
109	91	36	24
42	31	8	10

Het splitsen van slijtage en kruip bij de pen-schijf-proef voor kunststoffen.

ir. J.H.M.G. Schroen

INHOUDSOPGAVE

INHOUDSOPGAVE	1
Inleiding.	2
De pen-schijf-proef voor kunststoffen.	2
Geteste materialen en proefomstandigheden.	3
Het afsplitsen van slijtage uit de pen-schijf-proef.	3
Resultaten van de methode van afsplitsen.	3
Bepaling van de slijtagefactor.	4
Conclusies en aanbevelingen.	4
Literatuur.	5

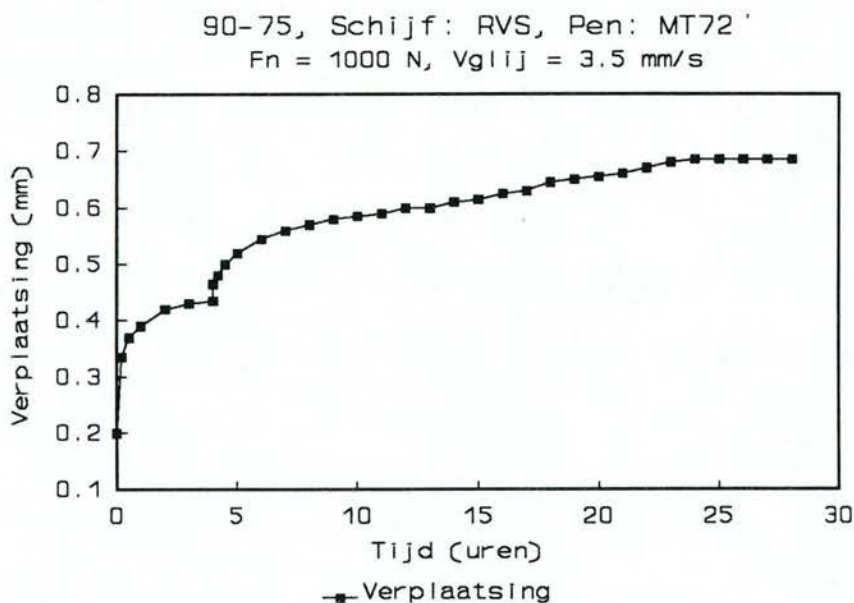
Inleiding.

In het kader van het onderzoek naar afdichtingen, wilde men meer weten over de slijtage van de verschillende afdichtingsmaterialen. Voor dit onderzoek maakt men gebruik van de pen-schijf-proef, die algemeen gebruikelijk is voor het slijtage onderzoek van metalen. Het verschil echter van kunststoffen met metalen is dat de kunststoffen veel meer kruip vertonen dan metalen. Hierdoor werd het noodzakelijk om kruip/stuik te scheiden van slijtage bij de pen-schijf-proef. In dit verslag zal gekeken worden naar mogelijkheden om bij reeds eerder uitgevoerde proeven de slijtage te kunnen afsplitsen.

Ten eerste zal gekeken worden hoe de proeven zijn uitgevoerd en welke materialen hierbij gebruikt zijn. Hierbij zullen ook de omstandigheden vermeld worden. Ten tweede zal een methode van afsplitsen worden besproken. Ten derde zullen de resultaten van deze methode worden besproken. Hierna volgen als laatste de conclusies en aanbevelingen.

De pen-schijf-proef voor kunststoffen.

Bij de pen-schijf-proef wordt een pen tegen een roteerbare schijf aangedrukt, waarna de verplaatsing van de pen wordt gemeten. Deze verplaatsing is dan een maat voor de slijtage van de pen. Omdat kunststoffen grote kruip vertonen heeft men bij deze proef eerst gedurende 4 uur de pen tegen de stilstaande schijf aangedrukt. Dit om enig inzicht in het kruipgedrag van de kunststoffen te verkrijgen. Na deze 4 uur begint de schijf te roteren met een snelheid van 3.5 [mm/s]. Gedurende 20 uur wordt nu de pen tegen de roterende schijf aangedrukt, waarna de schijf wederom wordt stilgezet om van het overgebleven stuk pen het kruipgedrag na 24 uur nog te kunnen bekijken. In sommige gevallen wordt hierna de schijf wederom voor enkele uren opgestart. Tijdens de gehele proef wordt de verplaatsing gemeten en uiteindelijk in tabelvorm weergegeven. Indien in deze tabellen eenzelfde tijdstip meerdere malen achterelkaar voorkomt, betekent dit dat er een overgang van roteren naar niet roteren of andersom plaatsvindt (zie bijlage). Een voorbeeld van een hieruit verkregen grafiek ziet als volgt uit:



Figuur 1. Een resultaat van een pen-schijf-proef in grafiekvorm.

Geteste materialen en proefomstandigheden.

De reeds uitgevoerde proeven omvatten de volgende kunststof pennen: MT 72, Turcite 109, UHMW PA wit, UHMW PA zwart, Canvasvezels, UHMW PE 80, Shamban 42, Shamban 109 en Shamban 451.

Verder werden verschillende materialen gebruikt voor de schijf: RVS, C45 en Inconel.

De glij snelheid bedroeg steeds 3.5 [mm/s]. De aandrukkracht bedroeg 565 of 1000 [N]. Verder werd meestal geen olie gebruikt, maar gewoon droog contact gemaakt. De omgevingstemperatuur van het contact werd ook genoteerd. Indien gesmeerd werd met olie is de olietemperatuur vermeld. De verschillende combinaties die bij de proeven zijn gebruikt staan vermeld in een tabel aan het begin van de bijlage.

Het afsplitsen van slijtage uit de pen-schijf-proef.

Uit eerder gedaan onderzoek [1], blijkt dat voor het kruipgedrag van kunststoffen een logaritmisch verband tussen de indrukking en de indrukkingstijd veelal goed voldoet:

$$I = F \cdot [A + B \cdot \log (t)]$$

I : indrukking

F : kracht

A,B : constanten

t : tijd

Indien men aanneemt dat het kruipgedrag volgens bovenstaande formule verloopt, kan men de verplaatsing splitsen in een kruipgedeelte (U_{stui} in bijlage) en slijtagegedeelte. Het slijtagegedeelte wordt bepaald d.m.v. exponentiële regressie. Uit de meetpunten van de eerste vier uur worden de constanten van bovenstaande formule bepaald en wordt deze geëxtrapoleerd. Zo is dan het kruipgedeelte bepaald. Indien dit nu van de totale verplaatsing wordt afgetrokken blijft het slijtagegedeelte over (U_{slijtage} in bijlage).

Resultaten van de methode van afsplitsen.

Als eerste zal gekeken worden naar de mate waarin de exponentiële regressie voldoet. Uit de resultaten blijkt dat het R^2 -getal, een maat voor de afwijking van de meetwaarden, dichtbij 1 ligt. De berekende functies volgen de meetpunten dus zeer goed en geven een goede weergave van het kruipgedrag. Echter blijft tijdens de eerste vier uur het volume van de proefpen gelijk. Gedurende de tijd dat de schijf roteert, zal materiaal afslijten en hierdoor zal het volume afnemen. Men mag dus aannemen dat de indrukking t.g.v. kruip niet geheel de logaritmische functie volgt, maar daar geleidelijk vanaf wijkt. Het kruipgedeelte zal een beetje kleiner zijn aan het eind dan nu wordt verondersteld. De lengteafname door slijtage bedraagt echter ten hoogste 1.5%.

De verplaatsing van het peneinde is gemeten met een nauwkeurigheid van ± 0.005 [mm]. Bij de gebruikte lengte van de pen is dit te laag, daar de verplaatsing een trapvorm laat zien. De logaritmische functie is een continu stijgende functie. Hierdoor zal de slijtage soms lijken af te nemen. Men moet dus niet te veel de exacte waarden voor de slijtage bekijken, maar vooral de trend.

T.p.v. het contact tussen pen en schijf zal t.g.v. wrijvingswarmte een hogere temperatuur heersen. Deze temperatuurverhoging kan uitzetting van de pen veroorzaken. Dit is bij deze

proeven niet meegenomen.

Bepaling van de slijtagefactor.

Bij de meetdata staan ook drie slijtagefactoren (K) vermeld (zie bijlage). Deze slijtagefactoren zijn allen als volgt bepaald:

$$K = \frac{\Delta l}{\sigma \cdot s} \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{Nm}} \right]$$

$$\Delta l = \text{slijtagelengte [mm]}$$

$$\sigma = \text{aandrukspanning [N/mm}^2\text{]}$$

$$s = \text{afgelegde weg [m]}$$

$$\sigma = \frac{Fn}{A} = \frac{Fn}{\frac{\pi}{4} D^2}$$

$$A = \text{oppervlak van pen [mm}^2\text{]}$$

$$D = \text{pendiameter [mm]}$$

$$s = v \cdot t$$

$$v = \text{snelheid t.p.v. pen [m/s]}$$

$$t = \text{tijd [s]}$$

De diameter van de pen bedroeg steeds 6 [mm].

Er is voor drie verschillende perioden een slijtagefactor bepaald. De duur van deze perioden bedroeg 3 uur = 10800 [s]. De perioden waren:

De eerste 3 uur dat de schijf roteerde: K_inloop (4 - 7 uur).

Ongeveer midden in de proef: K_midden (11 - 14 uur).

Aan het eind van de proef: K_eind (17 - 20 uur).

Als we de onnauwkeurigheid van de metingen (zie vorige paragraaf) doorrekenen naar de nauwkeurigheid van deze slijtagefactoren komen we op hetvolgende uit:

$$Fn = 565 \text{ [N]} \Rightarrow K = \dots \pm 6,6 \left[* 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm} \right]$$

$$Fn = 1000 \text{ [N]} \Rightarrow K = \dots \pm 3,7 \left[* 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm} \right]$$

Hieruit blijkt dat we deze factoren voorzichtig moeten interpreteren, zonder zelfs rekening te houden met fouten als gevolg van de methode van afsplitsen. Negatieve slijtagefactoren zijn uiteraard verkeerd.

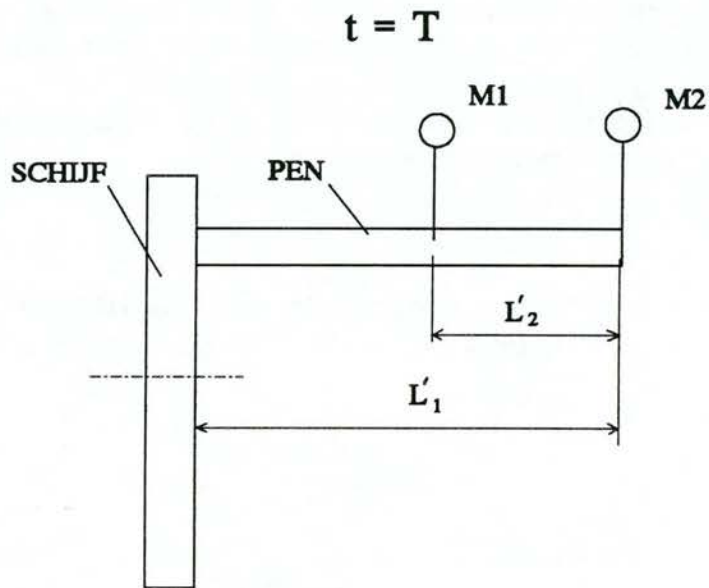
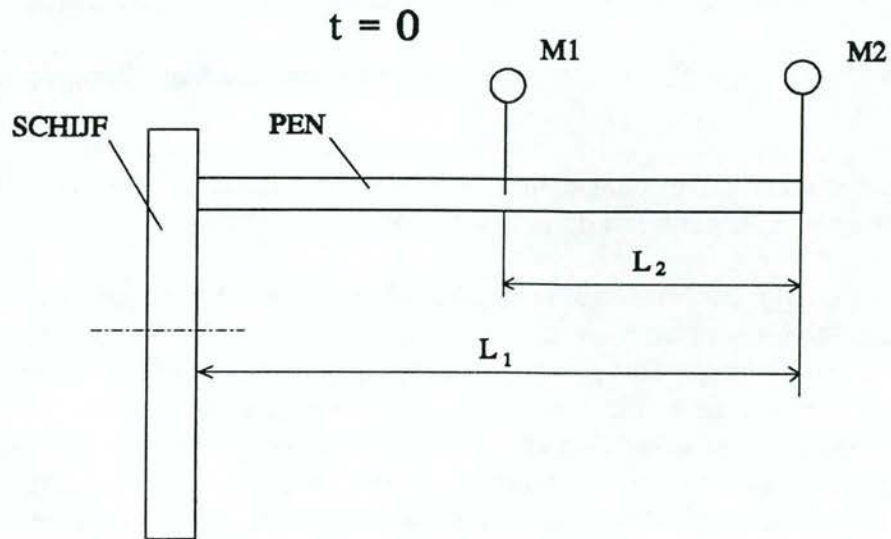
Conclusies en aanbevelingen.

Uit de resultaten van deze bewerking van de reeds eerder uitgevoerde proeven, blijkt dat deze methode voldoet om inzicht in het slijtagegedrag te verkrijgen. Er zijn echter nog enkele verbeteringen mogelijk. Deze zullen nu als aanbevelingen worden beschreven.

- De metingen zullen nauwkeuriger uitgevoerd moeten worden of de penlengte moet worden vergroot, zodat het kruipgedeelte beter uitgefilterd kan worden.
- De metingen zijn nog te onnauwkeurig om aanvaardbare slijtagefactoren te kunnen bepalen.
- De temperatuur in het contactpunt zou gemeten moeten worden om hiermee eventuele uitzetting van de punt van de pen te kunnen verdisconteren.
- Het is wellicht ook mogelijk om tijdens de proef meteen de kruip te scheiden van de slijtage. Men neemt hiervoor niet één, maar twee punten waarvan men de verplaatsing t.o.v. de schijf meet. Het eerste punt blijft gewoon het einde van de pen, dat niet in contact staat met de schijf. Het tweede punt wordt b.v. het midden van de pen, voordat deze wordt belast. De afstand tussen deze twee punten in de tijd, geeft nu het stuikgedrag van dit materiaal weer. Althans voor die lengte die aanvankelijk tussen de twee meetpunten aanwezig was. In dit voorbeeld dus de halve uitgangslengte van de gehele pen. Doordat op ieder moment bekend is, hoeveel procent de afstand tussen de twee meetpunten van de totale lengte bedraagt, is ook bekend met hoeveel men het stuikgedrag van het pengedeelte moet vermenigvuldigen om het stuikgedrag van de gehele pen te verkrijgen. Indien men dit laatste weet, weet men eenvoudig uit de totale verplaatsing het slijtagegedrag (zie figuur 2).
Het is nu niet meer nodig om eerst het stuikgedrag apart te bepalen en er wordt tevens gecorrigeerd voor de volumeafname van de pen.

Literatuur.

- [1] Computeranalyse van indrukking van een cilinder van PE-UHMW, E.L.J.J. Linders, WOC, T.U.E., Eindhoven, nov. 1992.



M1, M2 : Meetpunten

L_1, L_2 : Lengten van pen voor $t = 0$

L'_1, L'_2 : Lengten van pen een tijdje later

Figuur 2. Een nieuwe meetmethode voor de pen-schijf-proef.

BIJLAGE

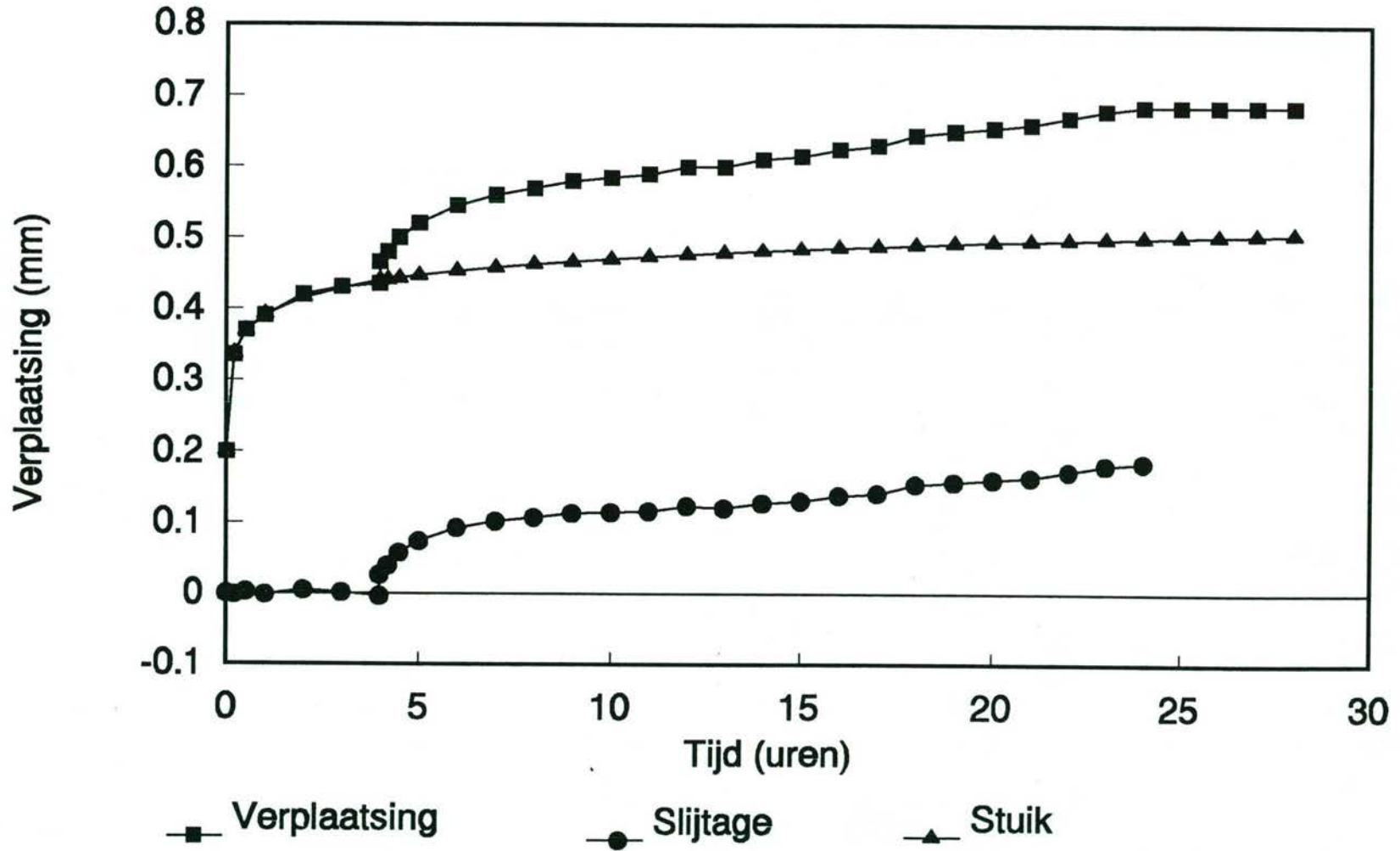
No.	Pen materiaal.	Schijf mat.	Olie?	Temp. [°C]	Fn [N]
90_75	MT 72	RVS	Nee	20	1000
90_76	Turcite 109	RVS	Nee	20	1000
90_77	Turcite 109	RVS	Mobil DTE 25	20	1000
90_78	MT 72 lijmbaar	Inconel	Mobil DTE 25	80	1000
90_79	MT 72 lijmbaar	Inconel	Nee	20	1000
90_80	UHMW PA wit	C45	Nee	20	565
90_81	UHMW PA zwart	C45	Nee	20	565
90_82	Canvasvezels	C45	Nee	20	565
90_83	MT 72 Gelijmd	Inconel	Nee	20	1000
90_84	MT 72 Gelijmd	Inconel	Nee	20	1000
90_86	MT 72	C45	Nee	25	565
91_88	UHMW PE 80	C45	Nee	20	565
91_89	Shamban 109	C45	Nee	20	565
91_91	Shamban 42	C45	Nee	20	565
91_92	Shamban 451	C45	Nee	20	565
91_95	UHMW PA wit	C45	Mobil DTE 25	20	565
91_96	UHMW PA zwart	C45	Mobil DTE 25	20	565
91_97	Shamban 451	C45	Mobil DTE 25	20	565

69

6

90-75, Schijf: RVS, Pen: MT72'

$F_n = 1000 \text{ N}$, $V_{\text{glj}} = 3.5 \text{ mm/s}$



90_75

Tijd	U_tot	LOG(t)	Regression Output:		U_stuik	U_slijtage
0.000	0.200		Constant		0.392	0.200
0.200	0.335	-0.699	Std Err of Y Est		0.003	-0.002
0.500	0.370	-0.301	R Squared		0.994	0.368
1.000	0.390	0.000	No. of Observations		6.000	-0.002
2.000	0.420	0.301	Degrees of Freedom		4.000	0.415
3.000	0.430	0.477				0.429
4.000	0.435	0.602	X Coefficient(s)	0.079		0.439
4.000	0.465	0.602	Std Err of Coef.	0.003		-0.004
4.000	0.465	0.602				0.439
4.200	0.480	0.623				0.439
4.500	0.500	0.653				0.441
5.000	0.520	0.699				0.443
6.000	0.545	0.778				0.447
7.000	0.560	0.845				0.453
8.000	0.570	0.903				0.458
9.000	0.580	0.954				0.463
10.000	0.585	1.000				0.467
11.000	0.590	1.041				0.470
12.000	0.600	1.079				0.474
13.000	0.600	1.114				0.477
14.000	0.610	1.146				0.479
15.000	0.615	1.176				0.482
16.000	0.625	1.204				0.484
17.000	0.630	1.230				0.486
18.000	0.645	1.255				0.488
19.000	0.650	1.279				0.490
20.000	0.655	1.301				0.492
21.000	0.660	1.322				0.494
22.000	0.670	1.342				0.496
23.000	0.680	1.362				0.497
24.000	0.685	1.380				0.499
24.000	0.685	1.380				0.500
25.000	0.685	1.398				0.500
26.000	0.685	1.415				0.502
27.000	0.685	1.431				0.503
28.000	0.685	1.447				0.504
						0.505
						0.180

K_inloop [mm³/Nm * 10⁻⁶]

57

K_midden [mm³/Nm * 10⁻⁶]

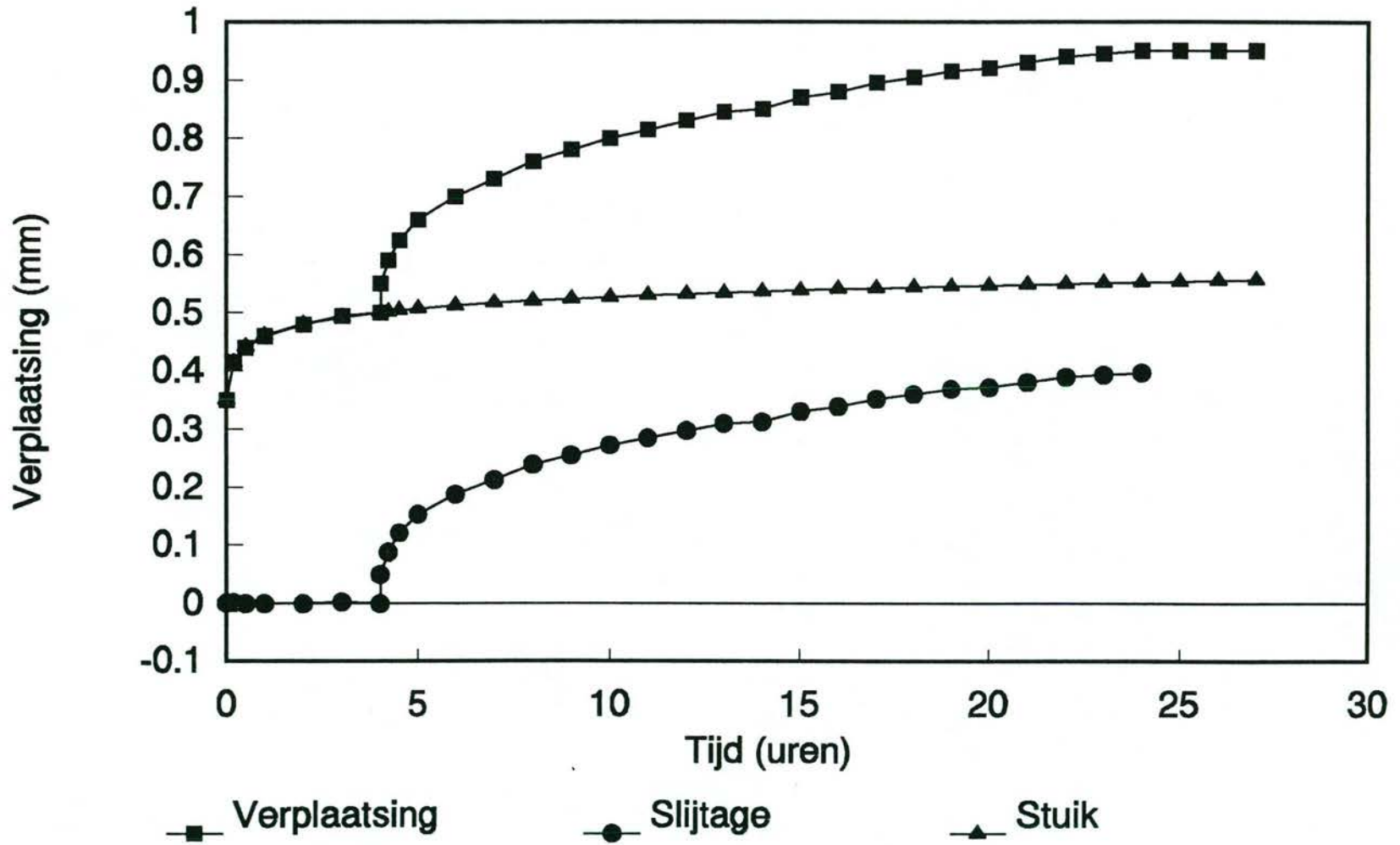
9

K_eind [mm³/Nm * 10⁻⁶]

15

90-76, Schijf: RVS, Pen: Turcite 109

$F_n = 1000 \text{ N}$, $V_{\text{glj}} = 3.5 \text{ mm/s}$



69

11

90_76

Tijd	U_tot	LOG(t)	Regression Output:		U_stuik	U_slijtage	
0.000	0.350		Constant		0.461	0.350	0.000
0.200	0.415	-0.699	Std Err of Y Est		0.002	0.414	0.001
0.500	0.440	-0.301	R Squared		0.998	0.441	-0.001
1.000	0.460	0.000	No. of Observations		6.000	0.461	-0.001
2.000	0.480	0.301	Degrees of Freedom		4.000	0.481	-0.001
3.000	0.495	0.477				0.493	0.002
4.000	0.500	0.602	X Coefficient(s)	0.067		0.501	-0.001
4.000	0.550	0.602	Std Err of Coef.	0.001		0.501	0.049
4.000	0.550	0.602				0.501	0.049
4.200	0.590	0.623				0.502	0.088
4.500	0.625	0.653				0.504	0.121
5.000	0.660	0.699				0.507	0.153
6.000	0.700	0.778				0.513	0.187
7.000	0.730	0.845				0.517	0.213
8.000	0.760	0.903				0.521	0.239
9.000	0.780	0.954				0.524	0.256
10.000	0.800	1.000				0.527	0.273
11.000	0.815	1.041				0.530	0.285
12.000	0.830	1.079				0.533	0.297
13.000	0.845	1.114				0.535	0.310
14.000	0.850	1.146				0.537	0.313
15.000	0.870	1.176				0.539	0.331
16.000	0.880	1.204				0.541	0.339
17.000	0.895	1.230				0.543	0.352
18.000	0.905	1.255				0.544	0.361
19.000	0.915	1.279				0.546	0.369
20.000	0.920	1.301				0.547	0.373
21.000	0.930	1.322				0.549	0.381
22.000	0.940	1.342				0.550	0.390
23.000	0.945	1.362				0.552	0.393
24.000	0.950	1.380				0.553	0.397
24.000	0.950	1.380				0.553	0.397
25.000	0.950	1.398				0.554	0.396
26.000	0.950	1.415				0.555	0.395
27.000	0.950	1.431				0.556	0.394

K_inloop [mm³/Nm * 10⁻⁶]

123

K_midden [mm³/Nm * 10⁻⁶]

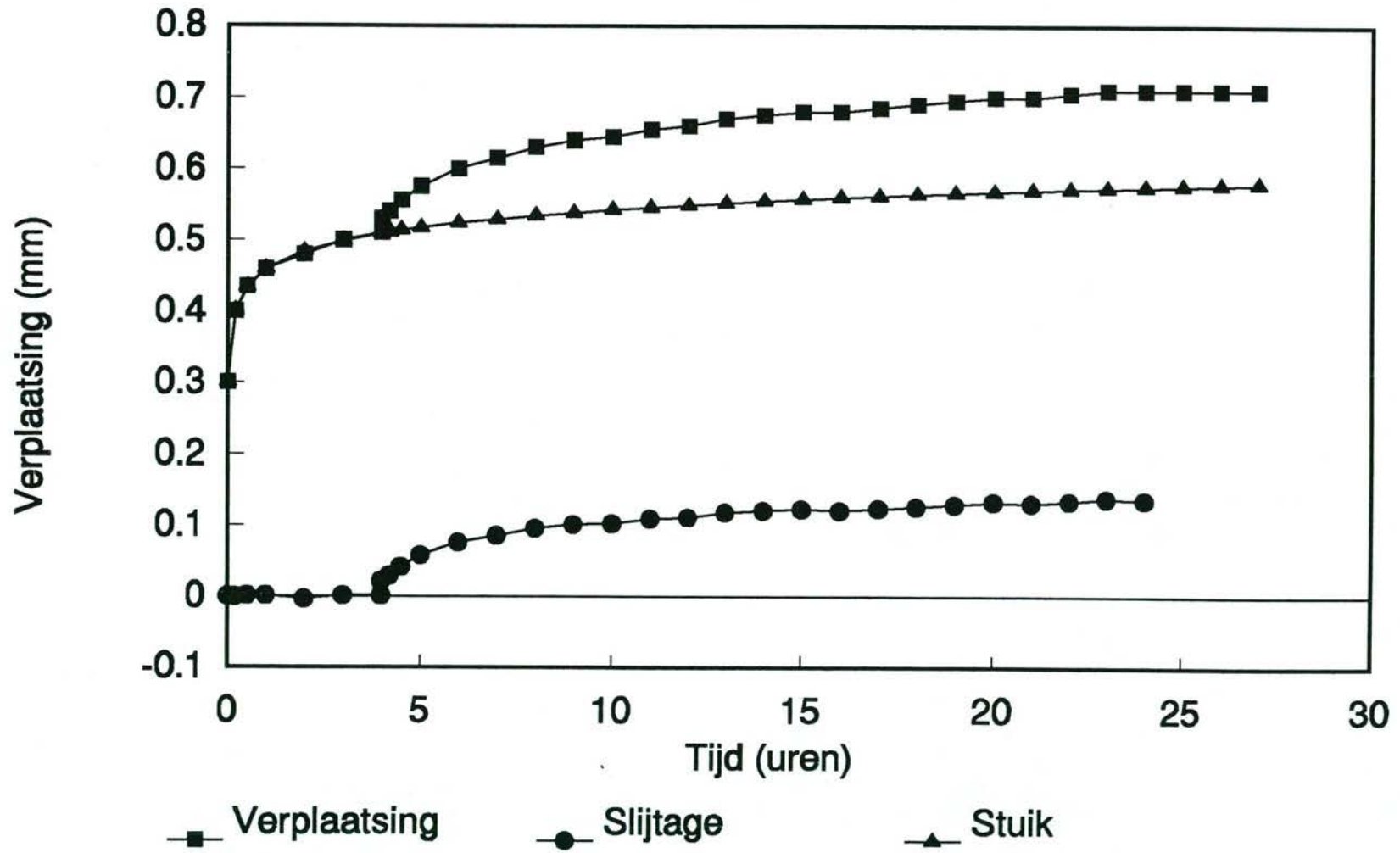
21

K_eind [mm³/Nm * 10⁻⁶]

15

90-77, Schijf: RVS, Pen: Turcite 109

$F_n = 1000 \text{ N}$, $V_{\text{glij}} = 3.5 \text{ mm/s}$, $\text{Olie} = 80 \text{ C}$



11

13

90_77

Tijd	U_tot	LOG(t)	Regression Output:		U_stuik	U_slijtage
0.000	0.300		Constant	0.459	0.300	0.000
0.200	0.400	-0.699	Std Err of Y Est	0.002	0.401	-0.001
0.500	0.435	-0.301	R Squared	0.997	0.434	0.001
1.000	0.460	0.000	No. of Observations	6.000	0.459	0.001
2.000	0.480	0.301	Degrees of Freedom	4.000	0.484	-0.004
3.000	0.500	0.477			0.499	0.001
4.000	0.510	0.602	X Coefficient(s)	0.083	0.509	0.001
4.000	0.530	0.602	Std Err of Coef.	0.002	0.509	0.021
4.000	0.530	0.602			0.509	0.021
4.200	0.540	0.623			0.511	0.029
4.500	0.555	0.653			0.513	0.042
5.000	0.575	0.699			0.517	0.058
6.000	0.600	0.778			0.524	0.076
7.000	0.615	0.845			0.529	0.086
8.000	0.630	0.903			0.534	0.096
9.000	0.640	0.954			0.538	0.102
10.000	0.645	1.000			0.542	0.103
11.000	0.655	1.041			0.546	0.109
12.000	0.660	1.079			0.549	0.111
13.000	0.670	1.114			0.552	0.118
14.000	0.675	1.146			0.554	0.121
15.000	0.680	1.176			0.557	0.123
16.000	0.680	1.204			0.559	0.121
17.000	0.685	1.230			0.562	0.123
18.000	0.690	1.255			0.564	0.126
19.000	0.695	1.279			0.566	0.129
20.000	0.700	1.301			0.567	0.133
21.000	0.700	1.322			0.569	0.131
22.000	0.705	1.342			0.571	0.134
23.000	0.710	1.362			0.572	0.138
24.000	0.710	1.380			0.574	0.136
24.000	0.710	1.380			0.574	0.136
25.000	0.710	1.398			0.575	0.135
26.000	0.710	1.415			0.577	0.133
27.000	0.710	1.431			0.578	0.132

K_inloop [mm³/Nm * 10⁻⁶]

48

K_midden [mm³/Nm * 10⁻⁶]

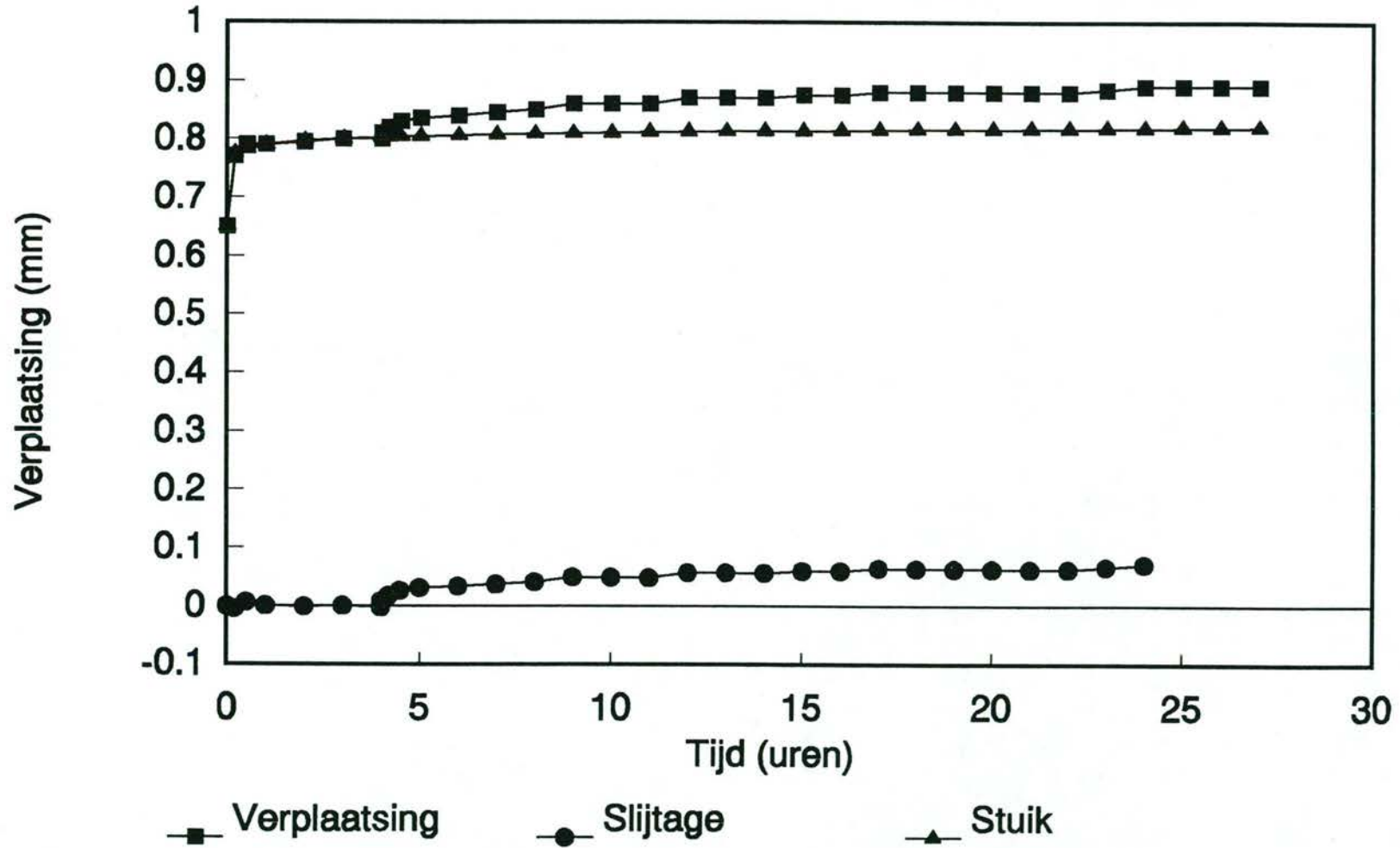
8

K_eind [mm³/Nm * 10⁻⁶]

7

90-78, Schijf: Inconel, Pen: MT72 lijmbaar

$F_n = 1000 \text{ N}$, $V_{\text{glj}} = 3.5 \text{ mm/s}$, $\text{Olie} = 80 \text{ C}$



Y3

15

90_78

Tijd	U_tot	LOG(t)	Regression Output:		U_stuik	U_slijtage	
0.000	0.650		Constant		0.790	0.650	0.000
0.200	0.770	-0.699	Std Err of Y Est		0.004	0.775	-0.005
0.500	0.790	-0.301	R Squared		0.878	0.783	0.007
1.000	0.790	0.000	No. of Observations		6.000	0.790	0.000
2.000	0.795	0.301	Degrees of Freedom		4.000	0.796	-0.001
3.000	0.800	0.477				0.800	0.000
4.000	0.800	0.602	X Coefficient(s)	0.021		0.802	-0.002
4.000	0.810	0.602	Std Err of Coef.	0.004		0.802	0.008
4.000	0.810	0.602				0.802	0.008
4.200	0.820	0.623				0.803	0.017
4.500	0.830	0.653				0.803	0.027
5.000	0.835	0.699				0.804	0.031
6.000	0.840	0.778				0.806	0.034
7.000	0.845	0.845				0.807	0.038
8.000	0.850	0.903				0.808	0.042
9.000	0.860	0.954				0.810	0.050
10.000	0.860	1.000				0.811	0.049
11.000	0.860	1.041				0.811	0.049
12.000	0.870	1.079				0.812	0.058
13.000	0.870	1.114				0.813	0.057
14.000	0.870	1.146				0.814	0.056
15.000	0.875	1.176				0.814	0.061
16.000	0.875	1.204				0.815	0.060
17.000	0.880	1.230				0.815	0.065
18.000	0.880	1.255				0.816	0.064
19.000	0.880	1.279				0.816	0.064
20.000	0.880	1.301				0.817	0.063
21.000	0.880	1.322				0.817	0.063
22.000	0.880	1.342				0.818	0.062
23.000	0.885	1.362				0.818	0.067
24.000	0.890	1.380				0.818	0.072
24.000	0.890	1.380				0.818	0.072
25.000	0.890	1.398				0.819	0.071
26.000	0.890	1.415				0.819	0.071
27.000	0.890	1.431				0.820	0.070

K_inloop [mm³/Nm * 10⁻⁶]

22

K_midden [mm³/Nm * 10⁻⁶]

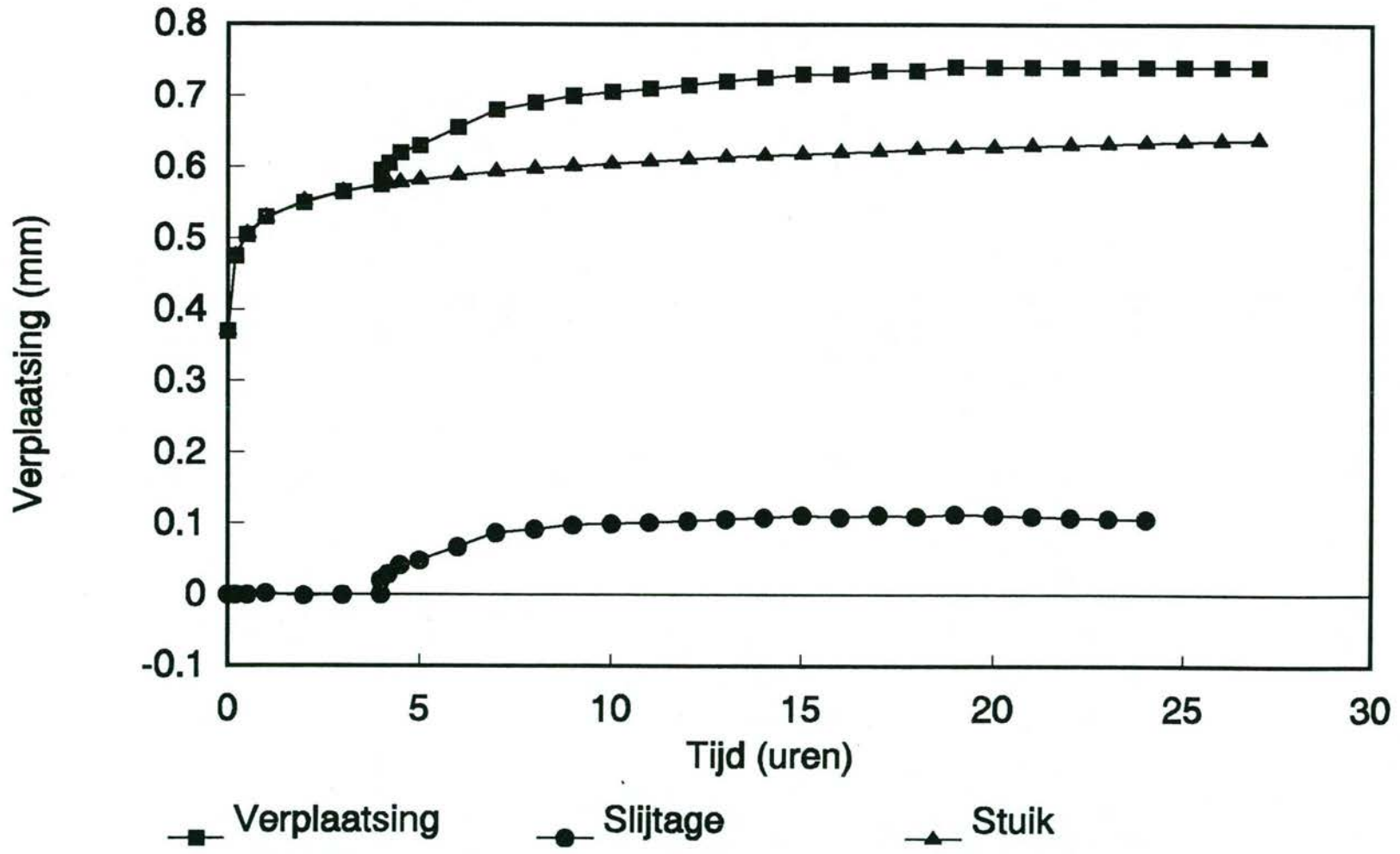
6

K_eind [mm³/Nm * 10⁻⁶]

-1

90-79, Schijf: Inconel, Pen: MT72 lijmbaar

$F_n = 1000 \text{ N}$, $V_{\text{glj}} = 3.5 \text{ mm/s}$



75

17

90_79

Tijd	U_tot	LOG(t)	Regression Output:		U_stuik	U_slijtage
0.000	0.370		Constant	0.528	0.370	0.000
0.200	0.475	-0.699	Std Err of Y Est	0.001	0.475	0.000
0.500	0.505	-0.301	R Squared	0.999	0.505	0.000
1.000	0.530	0.000	No. of Observations	6.000	0.528	0.002
2.000	0.550	0.301	Degrees of Freedom	4.000	0.552	-0.002
3.000	0.565	0.477			0.565	0.000
4.000	0.575	0.602	X Coefficient(s)	0.076	0.575	0.000
4.000	0.595	0.602	Std Err of Coef.	0.001	0.575	0.020
4.000	0.595	0.602			0.575	0.020
4.200	0.605	0.623			0.576	0.029
4.500	0.620	0.653			0.578	0.042
5.000	0.630	0.699			0.582	0.048
6.000	0.655	0.778			0.588	0.067
7.000	0.680	0.845			0.593	0.087
8.000	0.690	0.903			0.598	0.092
9.000	0.700	0.954			0.601	0.099
10.000	0.705	1.000			0.605	0.100
11.000	0.710	1.041			0.608	0.102
12.000	0.715	1.079			0.611	0.104
13.000	0.720	1.114			0.614	0.106
14.000	0.725	1.146			0.616	0.109
15.000	0.730	1.176			0.618	0.112
16.000	0.730	1.204			0.621	0.109
17.000	0.735	1.230			0.623	0.112
18.000	0.735	1.255			0.624	0.111
19.000	0.740	1.279			0.626	0.114
20.000	0.740	1.301			0.628	0.112
21.000	0.740	1.322			0.630	0.110
22.000	0.740	1.342			0.631	0.109
23.000	0.740	1.362			0.633	0.107
24.000	0.740	1.380			0.634	0.106
24.000	0.740	1.380			0.634	0.106
25.000	0.740	1.398			0.635	0.105
26.000	0.740	1.415			0.637	0.103
27.000	0.740	1.431			0.638	0.102

K_inloopp [mm³/Nm * 10⁻⁶]

50

K_midden [mm³/Nm * 10⁻⁶]

5

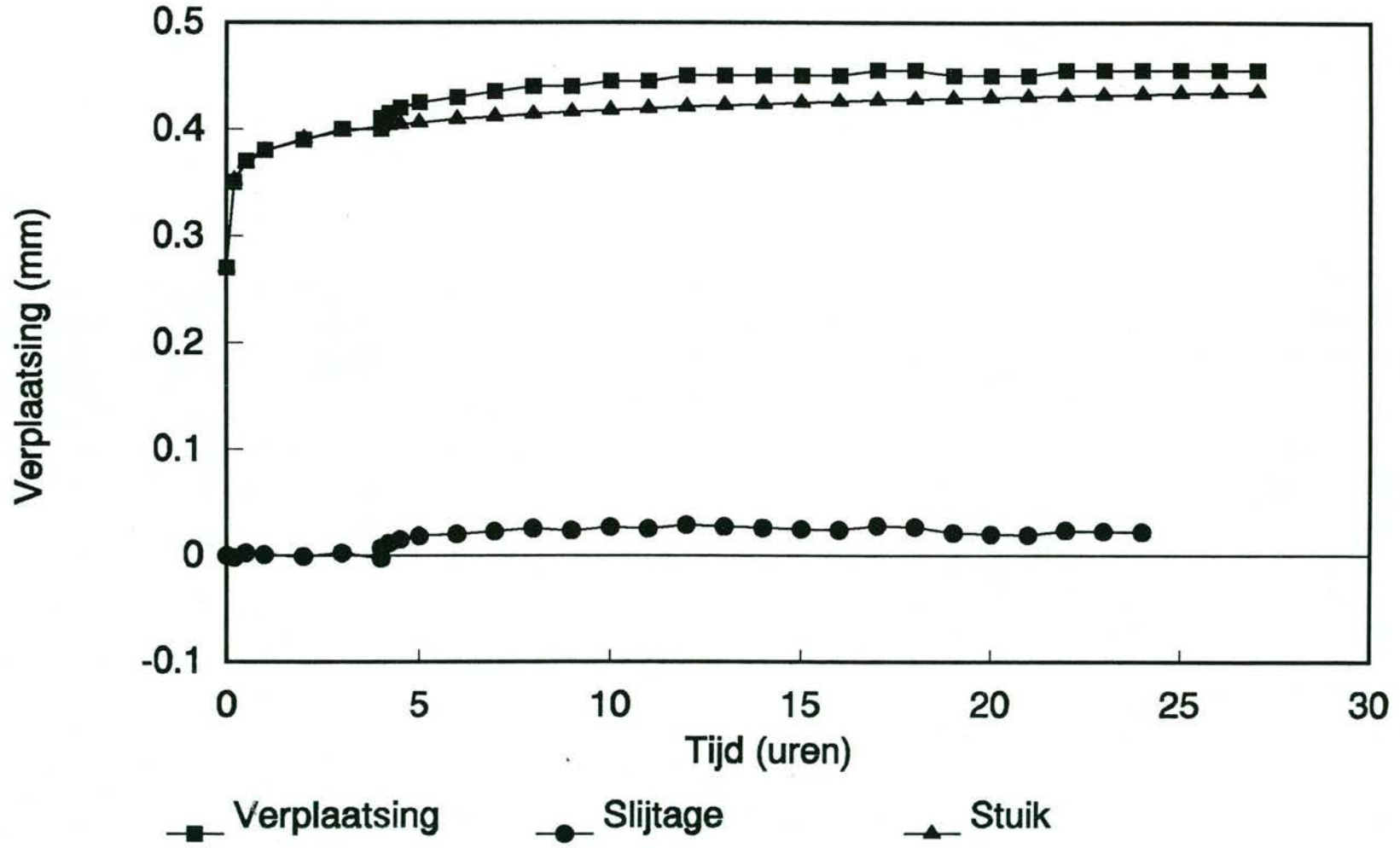
K_eind [mm³/Nm * 10⁻⁶]

0

11

19

90-80, Schijf: C45, Pen: UHMW PA wit
Fn = 565 N, Vglij = 3.5 mm/s



90_80 Tijd	U_tot	LOG(t)	Regression Output:		U_stuik	U_slijtage
0.000	0.270		Constant	0.379	0.270	0.000
0.200	0.350	-0.699	Std Err of Y Est	0.002	0.352	-0.002
0.500	0.370	-0.301	R Squared	0.987	0.368	0.002
1.000	0.380	0.000	No. of Observations	6.000	0.379	0.001
2.000	0.390	0.301	Degrees of Freedom	4.000	0.391	-0.001
3.000	0.400	0.477			0.398	0.002
4.000	0.400	0.602	X Coefficient(s)	0.039	0.403	-0.003
4.000	0.410	0.602	Std Err of Coef.	0.002	0.403	0.007
4.000	0.410	0.602			0.403	0.007
4.200	0.415	0.623			0.403	0.012
4.500	0.420	0.653			0.405	0.015
5.000	0.425	0.699			0.406	0.019
6.000	0.430	0.778			0.409	0.021
7.000	0.435	0.845			0.412	0.023
8.000	0.440	0.903			0.414	0.026
9.000	0.440	0.954			0.416	0.024
10.000	0.445	1.000			0.418	0.027
11.000	0.445	1.041			0.420	0.025
12.000	0.450	1.079			0.421	0.029
13.000	0.450	1.114			0.422	0.028
14.000	0.450	1.146			0.424	0.026
15.000	0.450	1.176			0.425	0.025
16.000	0.450	1.204			0.426	0.024
17.000	0.455	1.230			0.427	0.028
18.000	0.455	1.255			0.428	0.027
19.000	0.450	1.279			0.429	0.021
20.000	0.450	1.301			0.430	0.020
21.000	0.450	1.322			0.430	0.020
22.000	0.455	1.342			0.431	0.024
23.000	0.455	1.362			0.432	0.023
24.000	0.455	1.380			0.433	0.022
24.000	0.455	1.380			0.433	0.022
25.000	0.455	1.398			0.433	0.022
26.000	0.455	1.415			0.434	0.021
27.000	0.455	1.431			0.435	0.020

K_inloop [mm³/Nm * 10⁻⁶]

21

K_midden [mm³/Nm * 10⁻⁶]

1

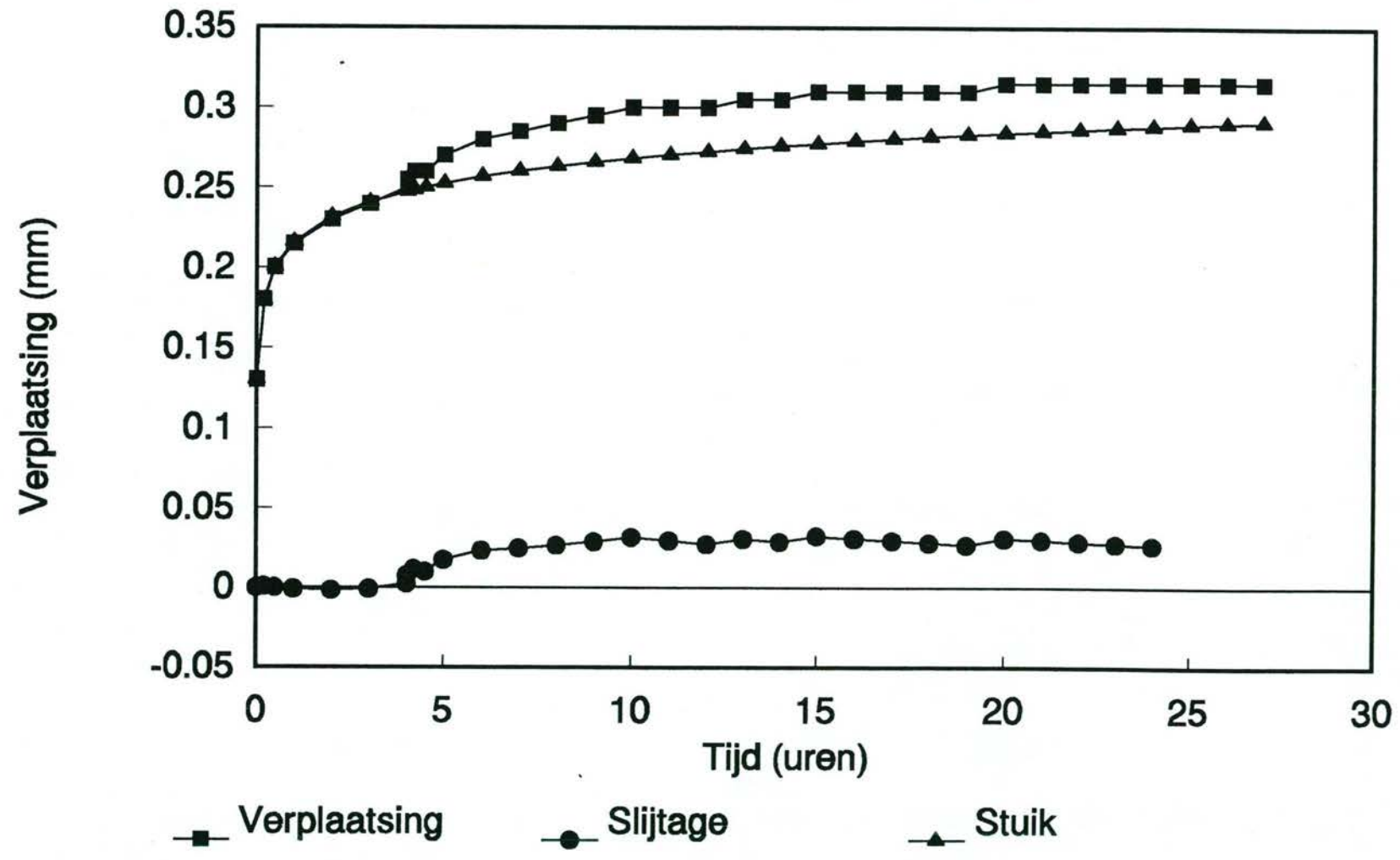
K_eind [mm³/Nm * 10⁻⁶]

-10

61

21

90-81, Schijf: C45, Pen: UHMW PA zwart
Fn = 565 N, Vglij = 3.5 mm/s



90 81

Tijd	U_tot	LOG(t)	Regression Output:		U_stuik	U_slijtage
0.000	0.130		Constant	0.216	0.130	0.000
0.200	0.180	-0.699	Std Err of Y Est	0.002	0.179	0.001
0.500	0.200	-0.301	R Squared	0.997	0.200	0.000
1.000	0.215	0.000	No. of Observations	6.000	0.216	-0.001
2.000	0.230	0.301	Degrees of Freedom	4.000	0.232	-0.002
3.000	0.240	0.477			0.241	-0.001
4.000	0.250	0.602	X Coefficient(s)	0.053	0.247	0.003
4.000	0.255	0.602	Std Err of Coef.	0.002	0.247	0.008
4.000	0.255	0.602			0.247	0.008
4.200	0.260	0.623			0.249	0.011
4.500	0.260	0.653			0.250	0.010
5.000	0.270	0.699			0.253	0.017
6.000	0.280	0.778			0.257	0.023
7.000	0.285	0.845			0.260	0.025
8.000	0.290	0.903			0.263	0.027
9.000	0.295	0.954			0.266	0.029
10.000	0.300	1.000			0.268	0.032
11.000	0.300	1.041			0.271	0.029
12.000	0.300	1.079			0.273	0.027
13.000	0.305	1.114			0.274	0.031
14.000	0.305	1.146			0.276	0.029
15.000	0.310	1.176			0.278	0.032
16.000	0.310	1.204			0.279	0.031
17.000	0.310	1.230			0.280	0.030
18.000	0.310	1.255			0.282	0.028
19.000	0.310	1.279			0.283	0.027
20.000	0.315	1.301			0.284	0.031
21.000	0.315	1.322			0.285	0.030
22.000	0.315	1.342			0.286	0.029
23.000	0.315	1.362			0.287	0.028
24.000	0.315	1.380			0.288	0.027
24.000	0.315	1.380			0.288	0.027
25.000	0.315	1.398			0.289	0.026
26.000	0.315	1.415			0.290	0.025
27.000	0.315	1.431			0.291	0.024

K_inloop [mm³/Nm * 10⁻⁶]

23

K_midden [mm³/Nm * 10⁻⁶]

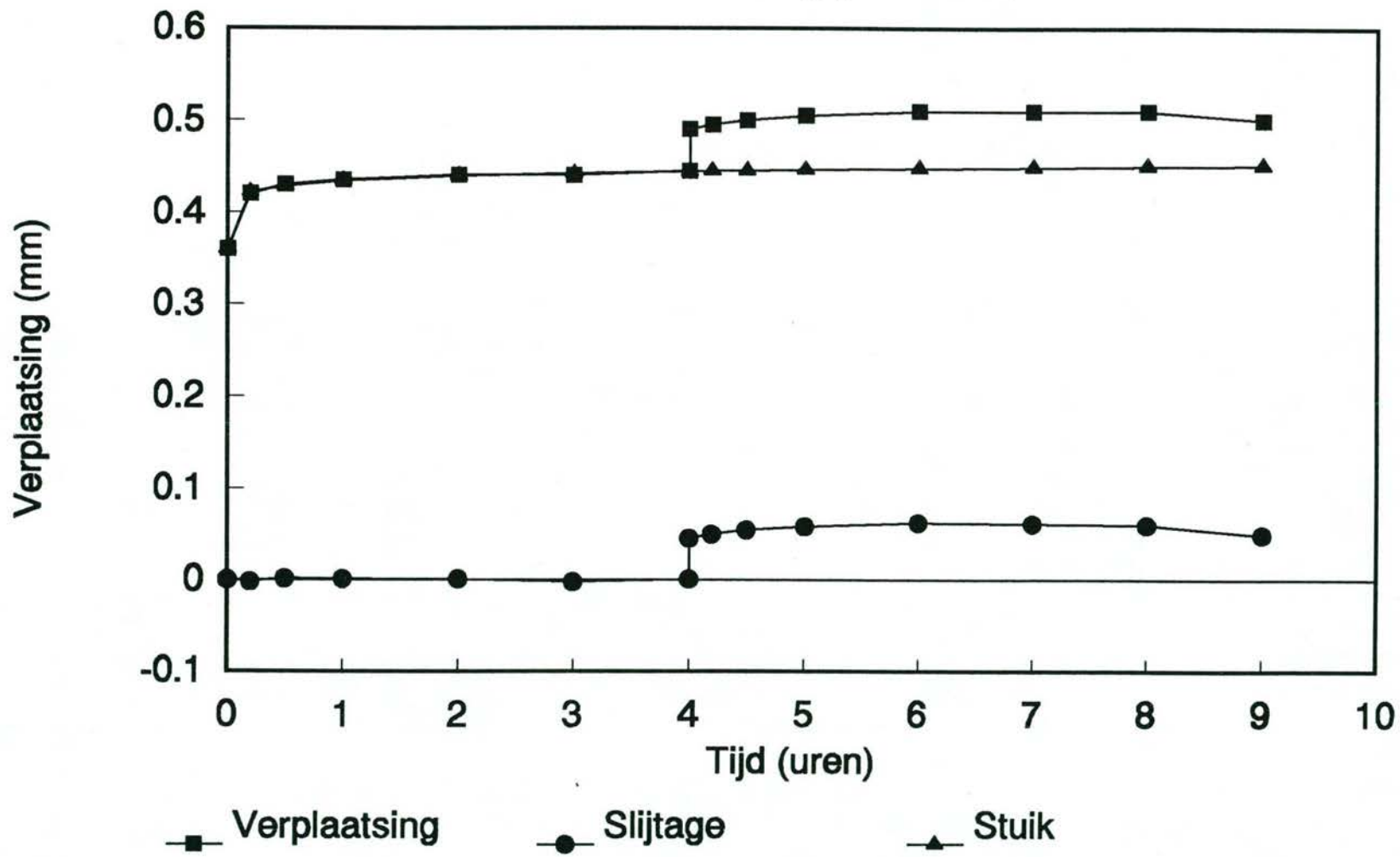
-1

K_eind [mm³/Nm * 10⁻⁶]

2

90-82, Schijf: C45, Pen: canvasvezels

$F_n = 565 \text{ N}$, $V_{\text{glij}} = 3.5 \text{ mm/s}$

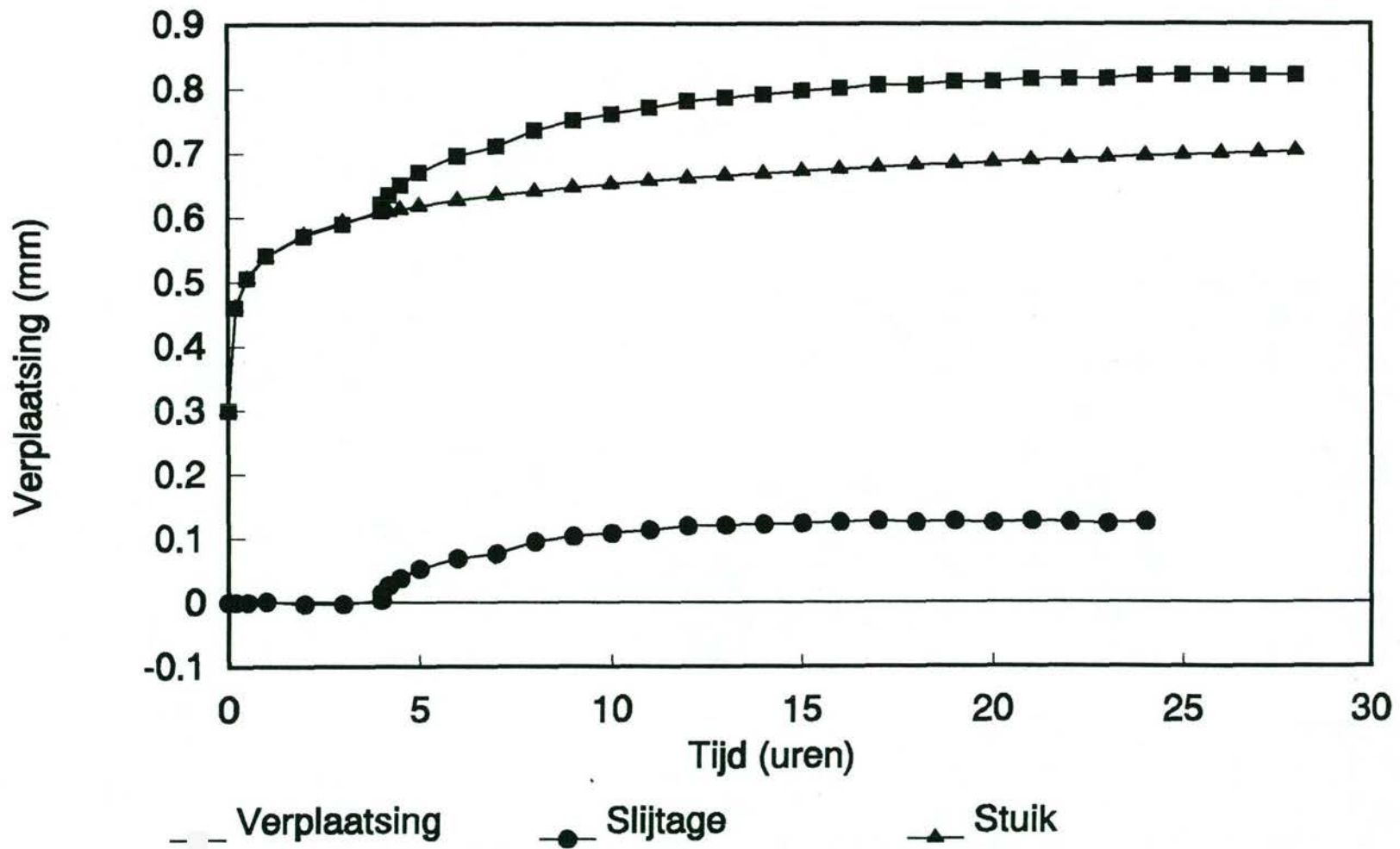


90_82 Tijd	U_tot	LOG(t)	Regression Output:		U_stuik	U_slijtage	
0.000	0.360		Constant		0.434	0.360	0.000
0.200	0.420	-0.699	Std Err of Y Est		0.002	0.421	-0.001
0.500	0.430	-0.301	R Squared		0.970	0.429	0.001
1.000	0.435	0.000	No. of Observations		6.000	0.434	0.001
2.000	0.440	0.301	Degrees of Freedom		4.000	0.439	0.001
3.000	0.440	0.477				0.442	-0.002
4.000	0.445	0.602	X Coefficient(s)	0.018		0.445	0.000
4.000	0.490	0.602	Std Err of Coef.	0.002		0.445	0.045
4.000	0.490	0.602				0.445	0.045
4.200	0.495	0.623				0.445	0.050
4.500	0.500	0.653				0.445	0.055
5.000	0.505	0.699				0.446	0.059
6.000	0.510	0.778				0.448	0.062
7.000	0.510	0.845				0.449	0.061
8.000	0.510	0.903				0.450	0.060
9.000	0.500	0.954				0.451	0.049

K_inloop [mm³/Nm * 10⁻⁶]

90-83, Schijf: Inconel, Pen: MT72' Gelijmd $\text{\textcircled{1}}$

$F_n = 1000 \text{ N}$, $V_{\text{glj}} = 3.5 \text{ mm/s}$



83

25

90_83 Tijd	U_tot	LOG(t)	Regression Output:		U_stuik	U_slijtage
0.000	0.300		Constant	0.539	0.300	0.000
0.200	0.460	-0.699	Std Err of Y Est	0.003	0.460	0.000
0.500	0.505	-0.301	R Squared	0.998	0.505	0.000
1.000	0.540	0.000	No. of Observations	6.000	0.539	0.001
2.000	0.570	0.301	Degrees of Freedom	4.000	0.573	-0.003
3.000	0.590	0.477			0.592	-0.002
4.000	0.610	0.602	X Coefficient(s)	0.113	0.607	0.003
4.000	0.620	0.602	Std Err of Coef.	0.002	0.607	0.013
4.000	0.620	0.602			0.607	0.013
4.200	0.635	0.623			0.609	0.026
4.500	0.650	0.653			0.612	0.038
5.000	0.670	0.699			0.617	0.053
6.000	0.695	0.778			0.626	0.069
7.000	0.710	0.845			0.634	0.076
8.000	0.735	0.903			0.640	0.095
9.000	0.750	0.954			0.646	0.104
10.000	0.760	1.000			0.651	0.109
11.000	0.770	1.041			0.656	0.114
12.000	0.780	1.079			0.660	0.120
13.000	0.785	1.114			0.664	0.121
14.000	0.790	1.146			0.668	0.122
15.000	0.795	1.176			0.671	0.124
16.000	0.800	1.204			0.674	0.126
17.000	0.805	1.230			0.677	0.128
18.000	0.805	1.255			0.680	0.125
19.000	0.810	1.279			0.683	0.127
20.000	0.810	1.301			0.685	0.125
21.000	0.815	1.322			0.688	0.127
22.000	0.815	1.342			0.690	0.125
23.000	0.815	1.362			0.692	0.123
24.000	0.820	1.380			0.694	0.126
24.000	0.820	1.380			0.694	0.126
25.000	0.820	1.398			0.696	0.124
26.000	0.820	1.415			0.698	0.122
27.000	0.820	1.431			0.700	0.120
28.000	0.820	1.447			0.702	0.118

K_inloop [mm³/Nm * 10⁻⁶]

47

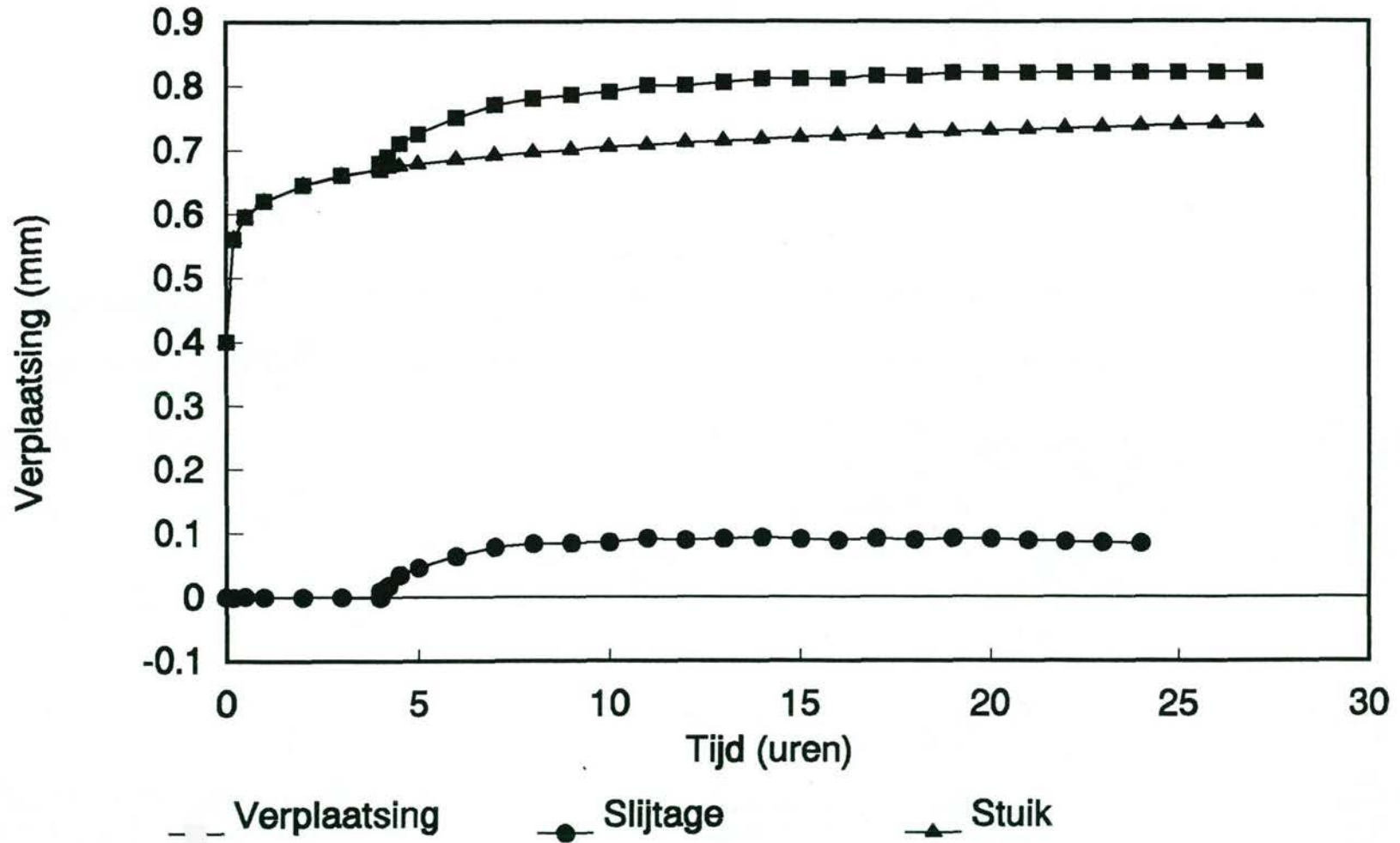
K_midden [mm³/Nm * 10⁻⁶]

6

K_eind [mm³/Nm * 10⁻⁶]

-2

90-84, Schijf: Inconel, Pen: MT72' Gelijmd \ominus
Fn = 1000 N, Vglij = 3.5 mm/s



90_84

Tijd	U_tot	LOG(t)	Regression Output:		U_stuik	U_slijtage
0.000	0.400		Constant	0.620	0.400	0.000
0.200	0.560	-0.699	Std Err of Y Est	0.001	0.561	-0.001
0.500	0.595	-0.301	R Squared	1.000	0.594	0.001
1.000	0.620	0.000	No. of Observations	6.000	0.620	0.000
2.000	0.645	0.301	Degrees of Freedom	4.000	0.645	0.000
3.000	0.660	0.477			0.660	0.000
4.000	0.670	0.602	X Coefficient(s)	0.084	0.670	0.000
4.000	0.680	0.602	Std Err of Coef.	0.001	0.670	0.010
4.000	0.680	0.602			0.670	0.010
4.200	0.690	0.623			0.672	0.018
4.500	0.710	0.653			0.675	0.035
5.000	0.725	0.699			0.679	0.046
6.000	0.750	0.778			0.685	0.065
7.000	0.770	0.845			0.691	0.079
8.000	0.780	0.903			0.696	0.084
9.000	0.785	0.954			0.700	0.085
10.000	0.790	1.000			0.704	0.086
11.000	0.800	1.041			0.708	0.092
12.000	0.800	1.079			0.711	0.089
13.000	0.805	1.114			0.714	0.091
14.000	0.810	1.146			0.716	0.094
15.000	0.810	1.176			0.719	0.091
16.000	0.810	1.204			0.721	0.089
17.000	0.815	1.230			0.723	0.092
18.000	0.815	1.255			0.726	0.089
19.000	0.820	1.279			0.728	0.092
20.000	0.820	1.301			0.729	0.091
21.000	0.820	1.322			0.731	0.089
22.000	0.820	1.342			0.733	0.087
23.000	0.820	1.362			0.735	0.085
24.000	0.820	1.380			0.736	0.084
24.000	0.820	1.380			0.736	0.084
25.000	0.820	1.398			0.738	0.082
26.000	0.820	1.415			0.739	0.081
27.000	0.820	1.431			0.740	0.080

K_inloop [mm³/Nm * 10⁻⁶]

52

K_midden [mm³/Nm * 10⁻⁶]

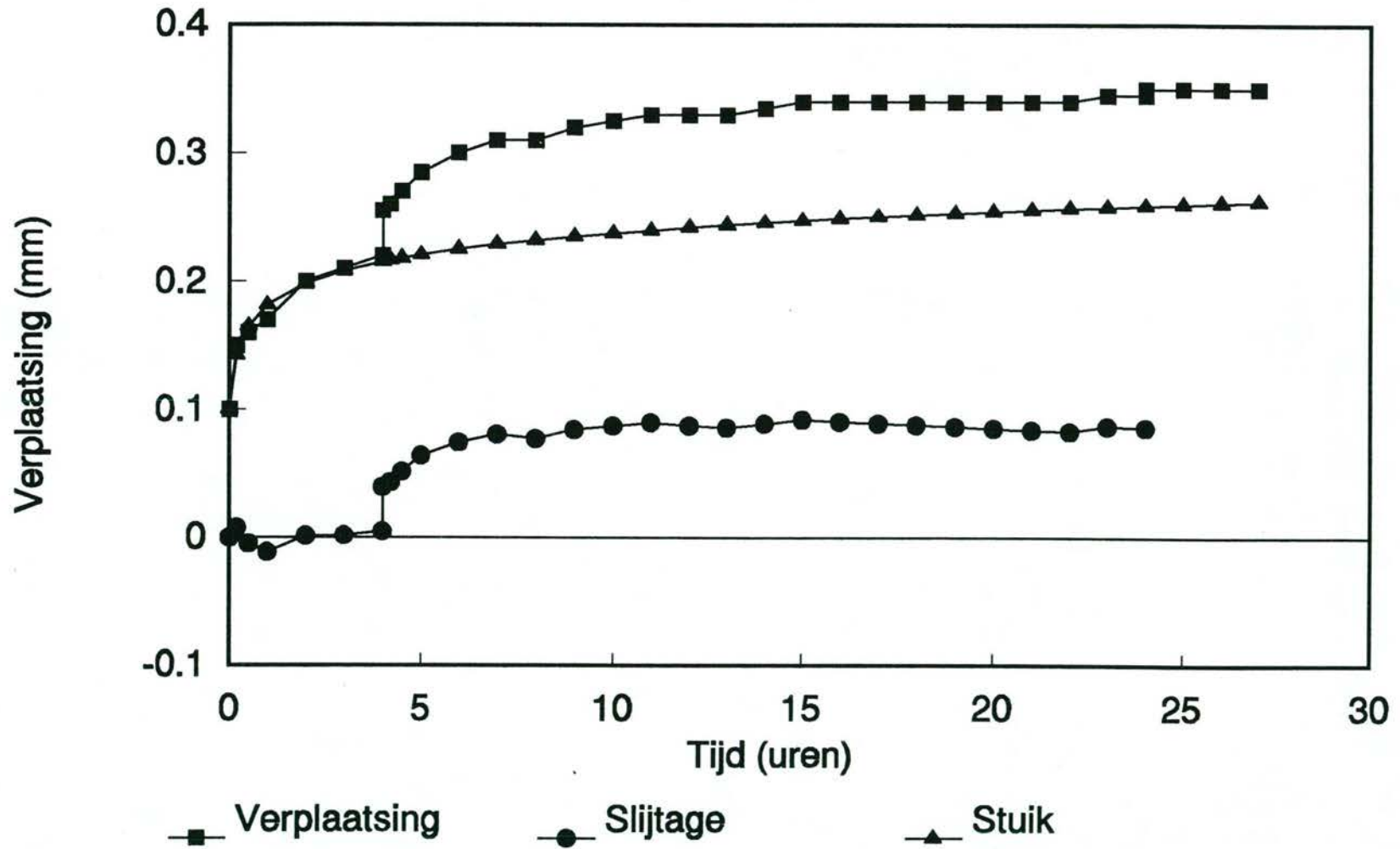
1

K_eind [mm³/Nm * 10⁻⁶]

-1

90-86, Schijf: C45, Pen: MT72

$F_n = 565 \text{ N}$, $V_{\text{glij}} = 3.5 \text{ mm/s}$



87

90_86

Ti_jd	U_tot	LOG(t)	Regression Output:		U_stuik	U_slijtage
0.000	0.100		Constant	0.181	0.100	0.000
0.200	0.150	-0.699	Std Err of Y Est	0.008	0.142	0.008
0.500	0.160	-0.301	R Squared	0.942	0.165	-0.005
1.000	0.170	0.000	No. of Observations	6.000	0.181	-0.011
2.000	0.200	0.301	Degrees of Freedom	4.000	0.198	0.002
3.000	0.210	0.477			0.208	0.002
4.000	0.220	0.602	X Coefficient(s)	0.056	0.215	0.005
4.000	0.255	0.602	Std Err of Coef.	0.007	0.215	0.040
4.000	0.255	0.602			0.215	0.040
4.200	0.260	0.623			0.216	0.044
4.500	0.270	0.653			0.218	0.052
5.000	0.285	0.699			0.221	0.064
6.000	0.300	0.778			0.225	0.075
7.000	0.310	0.845			0.229	0.081
8.000	0.310	0.903			0.232	0.078
9.000	0.320	0.954			0.235	0.085
10.000	0.325	1.000			0.238	0.087
11.000	0.330	1.041			0.240	0.090
12.000	0.330	1.079			0.242	0.088
13.000	0.330	1.114			0.244	0.086
14.000	0.335	1.146			0.246	0.089
15.000	0.340	1.176			0.248	0.092
16.000	0.340	1.204			0.249	0.091
17.000	0.340	1.230			0.251	0.089
18.000	0.340	1.255			0.252	0.088
19.000	0.340	1.279			0.253	0.087
20.000	0.340	1.301			0.255	0.085
21.000	0.340	1.322			0.256	0.084
22.000	0.340	1.342			0.257	0.083
23.000	0.345	1.362			0.258	0.087
24.000	0.345	1.380			0.259	0.086
24.000	0.350	1.380			0.259	0.091
25.000	0.350	1.398			0.260	0.090
26.000	0.350	1.415			0.261	0.089
27.000	0.350	1.431			0.262	0.088

K_inloop [mm^3/Nm * 10^-6]

55

K_midden [mm^3/Nm * 10^-6]

-1

K_eind [mm^3/Nm * 10^-6]

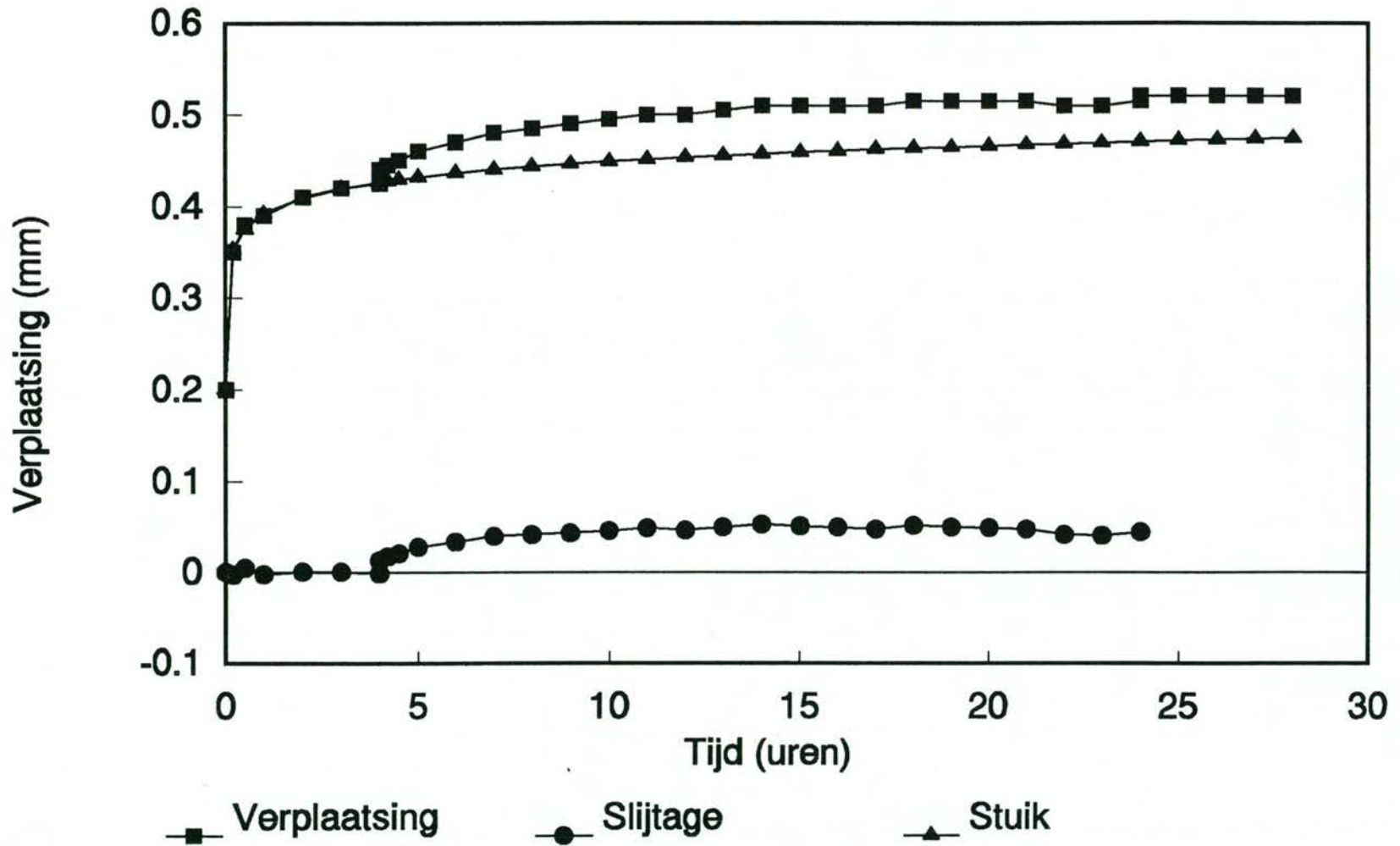
-5

88

31

91-88, Schijf: C45, Pen: UHMW PE 80

$F_n = 565 \text{ N}$, $V_{\text{glij}} = 3.5 \text{ mm/s}$



91_88 Tijd	U_tot	LOG(t)	Regression Output:		U_stuik	U_slijtage	
0.000	0.200		Constant		0.392	0.200	0.000
0.200	0.350	-0.699	Std Err of Y Est		0.003	0.353	-0.003
0.500	0.380	-0.301	R Squared		0.991	0.375	0.005
1.000	0.390	0.000	No. of Observations		6.000	0.392	-0.002
2.000	0.410	0.301	Degrees of Freedom		4.000	0.409	0.001
3.000	0.420	0.477				0.419	0.001
4.000	0.425	0.602	X Coefficient(s)	0.057		0.426	-0.001
4.000	0.440	0.602	Std Err of Coef.	0.003		0.426	0.014
4.000	0.440	0.602				0.426	0.014
4.200	0.445	0.623				0.428	0.017
4.500	0.450	0.653				0.429	0.021
5.000	0.460	0.699				0.432	0.028
6.000	0.470	0.778				0.436	0.034
7.000	0.480	0.845				0.440	0.040
8.000	0.485	0.903				0.444	0.041
9.000	0.490	0.954				0.446	0.044
10.000	0.495	1.000				0.449	0.046
11.000	0.500	1.041				0.451	0.049
12.000	0.500	1.079				0.454	0.046
13.000	0.505	1.114				0.455	0.050
14.000	0.510	1.146				0.457	0.053
15.000	0.510	1.176				0.459	0.051
16.000	0.510	1.204				0.461	0.049
17.000	0.510	1.230				0.462	0.048
18.000	0.515	1.255				0.463	0.052
19.000	0.515	1.279				0.465	0.050
20.000	0.515	1.301				0.466	0.049
21.000	0.515	1.322				0.467	0.048
22.000	0.510	1.342				0.468	0.042
23.000	0.510	1.362				0.470	0.040
24.000	0.515	1.380				0.471	0.044
24.000	0.520	1.380				0.471	0.049
25.000	0.520	1.398				0.472	0.048
26.000	0.520	1.415				0.473	0.047
27.000	0.520	1.431				0.473	0.047
28.000	0.520	1.447				0.474	0.046

K_inloop [mm³/Nm * 10⁻⁶]

35

K_midden [mm³/Nm * 10⁻⁶]

5

K_eind [mm³/Nm * 10⁻⁶]

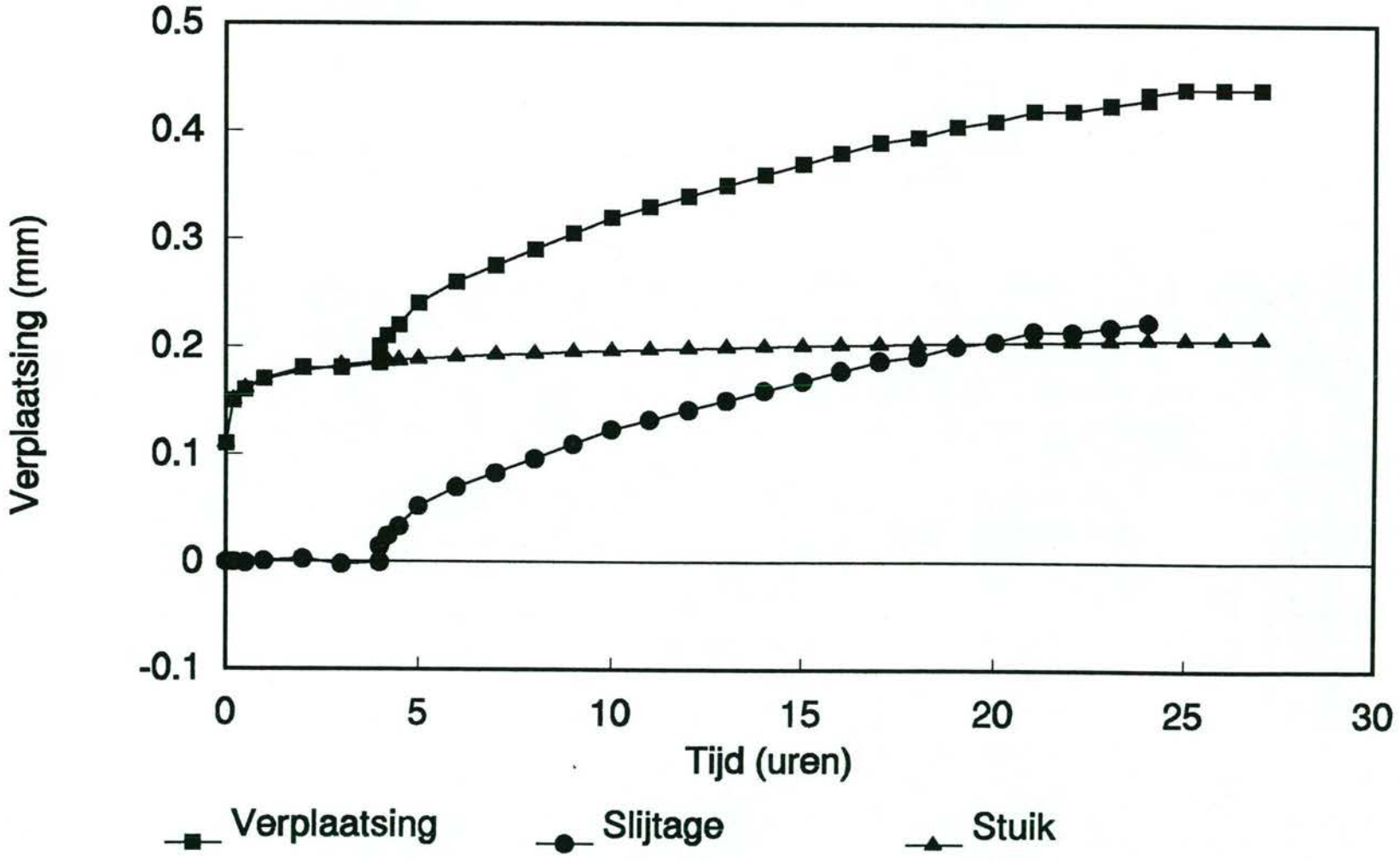
1

go

91

33

91-89, Schijf: C45, Pen: SHAMBAN 109
 $F_n = 565 \text{ N}$, $V_{\text{glij}} = 3.5 \text{ mm/s}$



91_89			Regression Output:		U_stuik	U_slijtage
Tijd	U_tot	LOG(t)				
0.000	0.110		Constant	0.169	0.110	0.000
0.200	0.150	-0.699	Std Err of Y Est	0.002	0.150	0.000
0.500	0.160	-0.301	R Squared	0.985	0.161	-0.001
1.000	0.170	0.000	No. of Observations	6.000	0.169	0.001
2.000	0.180	0.301	Degrees of Freedom	4.000	0.177	0.003
3.000	0.180	0.477			0.182	-0.002
4.000	0.185	0.602	X Coefficient(s)	0.027	0.185	0.000
4.000	0.200	0.602	Std Err of Coef.	0.002	0.185	0.015
4.000	0.200	0.602			0.185	0.015
4.200	0.210	0.623			0.186	0.024
4.500	0.220	0.653			0.187	0.033
5.000	0.240	0.699			0.188	0.052
6.000	0.260	0.778			0.190	0.070
7.000	0.275	0.845			0.192	0.083
8.000	0.290	0.903			0.194	0.096
9.000	0.305	0.954			0.195	0.110
10.000	0.320	1.000			0.196	0.124
11.000	0.330	1.041			0.197	0.133
12.000	0.340	1.079			0.198	0.142
13.000	0.350	1.114			0.199	0.151
14.000	0.360	1.146			0.200	0.160
15.000	0.370	1.176			0.201	0.169
16.000	0.380	1.204			0.202	0.178
17.000	0.390	1.230			0.202	0.188
18.000	0.395	1.255			0.203	0.192
19.000	0.405	1.279			0.204	0.201
20.000	0.410	1.301			0.204	0.206
21.000	0.420	1.322			0.205	0.215
22.000	0.420	1.342			0.205	0.215
23.000	0.425	1.362			0.206	0.219
24.000	0.430	1.380			0.207	0.223
24.000	0.435	1.380			0.207	0.228
25.000	0.440	1.398			0.207	0.233
26.000	0.440	1.415			0.207	0.233
27.000	0.440	1.431			0.208	0.232

K_inloop [mm³/Nm * 10⁻⁶]

91

K_midden [mm³/Nm * 10⁻⁶]

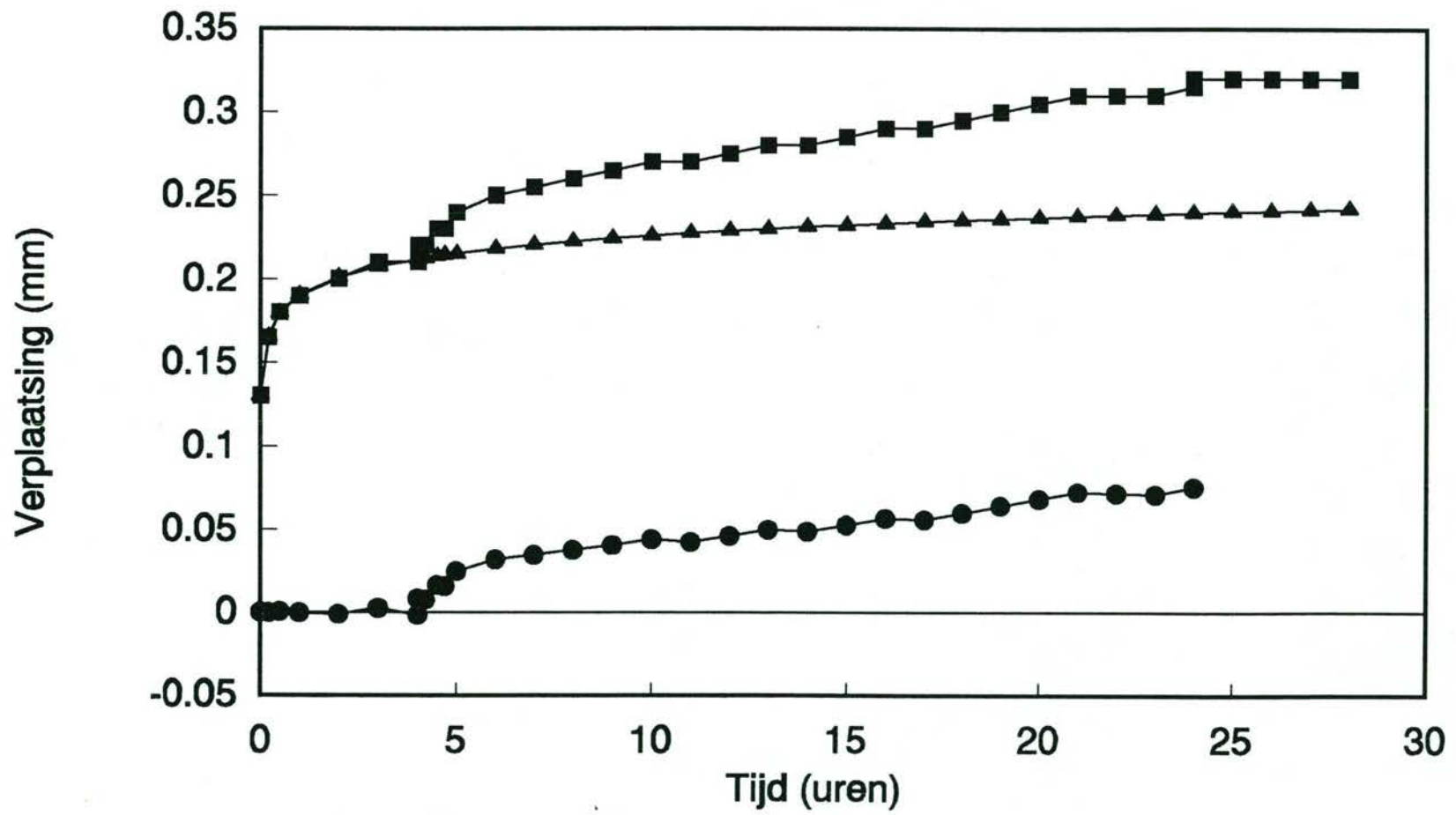
36

K_eind [mm³/Nm * 10⁻⁶]

24

91-91, Schijf: C45, Pen: SHAMBAN 42

$F_n = 565 \text{ N}$, $V_{\text{glj}} = 3.5 \text{ mm/s}$



■ Verplaatsing ● Slijtage ▲ Stuik

93

35

91_91 Tijd	U_tot	LOG(t)	Regression Output:		U_stuik	U_slijtage
0.000	0.130		Constant	0.190	0.130	0.000
0.200	0.165	-0.699	Std Err of Y Est	0.002	0.165	0.000
0.500	0.180	-0.301	R Squared	0.993	0.179	0.001
1.000	0.190	0.000	No. of Observations	6.000	0.190	0.000
2.000	0.200	0.301	Degrees of Freedom	4.000	0.201	-0.001
3.000	0.210	0.477			0.207	0.003
4.000	0.210	0.602	X Coefficient(s)	0.036	0.212	-0.002
4.000	0.220	0.602	Std Err of Coef.	0.002	0.212	0.008
4.000	0.220	0.602			0.212	0.008
4.200	0.220	0.623			0.212	0.008
4.500	0.230	0.653			0.214	0.016
4.700	0.230	0.672			0.214	0.016
5.000	0.240	0.699			0.215	0.025
6.000	0.250	0.778			0.218	0.032
7.000	0.255	0.845			0.220	0.035
8.000	0.260	0.903			0.222	0.038
9.000	0.265	0.954			0.224	0.041
10.000	0.270	1.000			0.226	0.044
11.000	0.270	1.041			0.227	0.043
12.000	0.275	1.079			0.229	0.046
13.000	0.280	1.114			0.230	0.050
14.000	0.280	1.146			0.231	0.049
15.000	0.285	1.176			0.232	0.053
16.000	0.290	1.204			0.233	0.057
17.000	0.290	1.230			0.234	0.056
18.000	0.295	1.255			0.235	0.060
19.000	0.300	1.279			0.236	0.064
20.000	0.305	1.301			0.237	0.068
21.000	0.310	1.322			0.237	0.073
22.000	0.310	1.342			0.238	0.072
23.000	0.310	1.362			0.239	0.071
24.000	0.315	1.380			0.240	0.075
24.000	0.320	1.380			0.240	0.080
25.000	0.320	1.398			0.240	0.080
26.000	0.320	1.415			0.241	0.079
27.000	0.320	1.431			0.241	0.079
28.000	0.320	1.447			0.242	0.078

K_inloop [mm³/Nm * 10⁻⁶]

31

K_midden [mm³/Nm * 10⁻⁶]

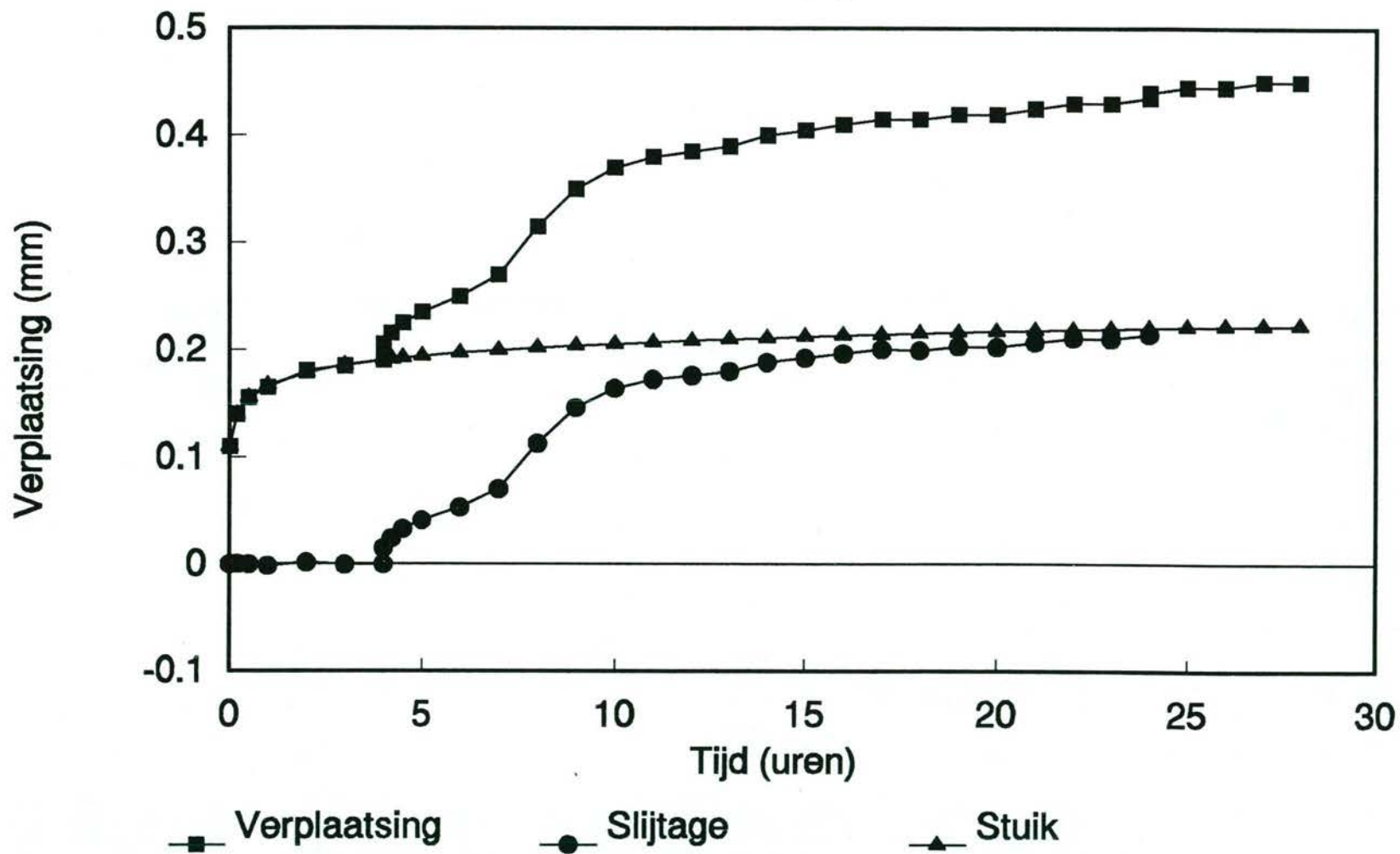
8

K_eind [mm³/Nm * 10⁻⁶]

10

91-92, Schijf: C45, Pen: SHAMBAN 451

$F_n = 565 \text{ N}$, $V_{\text{glij}} = 3.5 \text{ mm/s}$



95

37

91_92

Tijd	U_tot	LOG(t)	Regression Output:		U_stuik	U_slijtage
0.000	0.110		Constant	0.167	0.110	0.000
0.200	0.140	-0.699	Std Err of Y Est	0.001	0.140	0.000
0.500	0.155	-0.301	R Squared	0.997	0.155	0.000
1.000	0.165	0.000	No. of Observations	6.000	0.167	-0.002
2.000	0.180	0.301	Degrees of Freedom	4.000	0.178	0.002
3.000	0.185	0.477			0.185	0.000
4.000	0.190	0.602	X Coefficient(s)	0.039	0.190	0.000
4.000	0.205	0.602	Std Err of Coef.	0.001	0.190	0.015
4.000	0.205	0.602			0.190	0.015
4.200	0.215	0.623			0.191	0.024
4.500	0.225	0.653			0.192	0.033
5.000	0.235	0.699			0.194	0.041
6.000	0.250	0.778			0.197	0.053
7.000	0.270	0.845			0.200	0.070
8.000	0.315	0.903			0.202	0.113
9.000	0.350	0.954			0.204	0.146
10.000	0.370	1.000			0.206	0.164
11.000	0.380	1.041			0.207	0.173
12.000	0.385	1.079			0.209	0.176
13.000	0.390	1.114			0.210	0.180
14.000	0.400	1.146			0.211	0.189
15.000	0.405	1.176			0.212	0.193
16.000	0.410	1.204			0.213	0.197
17.000	0.415	1.230			0.215	0.200
18.000	0.415	1.255			0.215	0.200
19.000	0.420	1.279			0.216	0.204
20.000	0.420	1.301			0.217	0.203
21.000	0.425	1.322			0.218	0.207
22.000	0.430	1.342			0.219	0.211
23.000	0.430	1.362			0.220	0.210
24.000	0.435	1.380			0.220	0.215
24.000	0.440	1.380			0.220	0.220
25.000	0.445	1.398			0.221	0.224
26.000	0.445	1.415			0.222	0.223
27.000	0.450	1.431			0.222	0.228
28.000	0.450	1.447			0.223	0.227

K_inloop [mm³/Nm * 10⁻⁶]

74

K_midden [mm³/Nm * 10⁻⁶]

21

K_eind [mm³/Nm * 10⁻⁶]

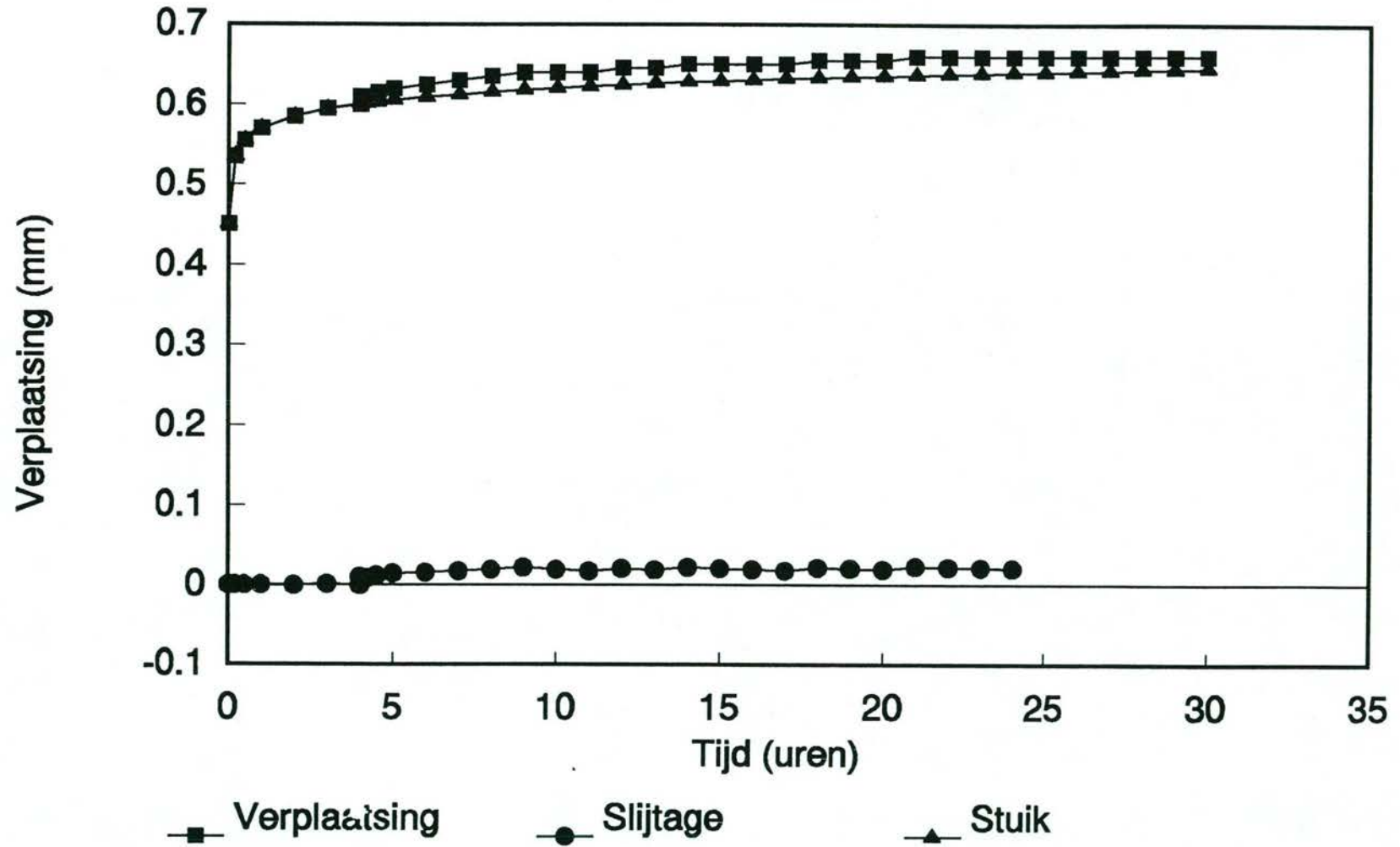
3

g6

97

39

91-95, Schijf: C45, Pen: UHMW PA wit
 $F_n = 565 \text{ N}$, $V_{\text{glij}} = 3.5 \text{ mm/s}$



91-95

Tijd	U_tot	LOG(t)	Regression Output:		U_stuik	U_slijtage	
0.000	0.450		Constant		0.570	0.450	0.000
0.200	0.535	-0.699	Std Err of Y Est		0.001	0.535	0.000
0.500	0.555	-0.301	R Squared		1.000	0.555	0.000
1.000	0.570	0.000	No. of Observations		6.000	0.570	0.000
2.000	0.585	0.301	Degrees of Freedom		4.000	0.585	0.000
3.000	0.595	0.477				0.594	0.001
4.000	0.600	0.602	X Coefficient(s)	0.050		0.600	0.000
4.000	0.610	0.602	Std Err of Coef.	0.000		0.600	0.010
4.000	0.610	0.602				0.600	0.010
4.200	0.610	0.623				0.602	0.008
4.500	0.615	0.653				0.603	0.012
5.000	0.620	0.699				0.605	0.015
6.000	0.625	0.778				0.609	0.016
7.000	0.630	0.845				0.613	0.017
8.000	0.635	0.903				0.616	0.019
9.000	0.640	0.954				0.618	0.022
10.000	0.640	1.000				0.620	0.020
11.000	0.640	1.041				0.623	0.017
12.000	0.645	1.079				0.624	0.021
13.000	0.645	1.114				0.626	0.019
14.000	0.650	1.146				0.628	0.022
15.000	0.650	1.176				0.629	0.021
16.000	0.650	1.204				0.631	0.019
17.000	0.650	1.230				0.632	0.018
18.000	0.655	1.255				0.633	0.022
19.000	0.655	1.279				0.635	0.020
20.000	0.655	1.301				0.636	0.019
21.000	0.660	1.322				0.637	0.023
22.000	0.660	1.342				0.638	0.022
23.000	0.660	1.362				0.639	0.021
24.000	0.660	1.380				0.640	0.020
24.000	0.660	1.380				0.640	0.020
25.000	0.660	1.398				0.641	0.019
26.000	0.660	1.415				0.641	0.019
27.000	0.660	1.431				0.642	0.018
28.000	0.660	1.447				0.643	0.017
28.000	0.660	1.447				0.643	0.017
29.000	0.660	1.462				0.644	0.016
30.000	0.660	1.477				0.645	0.015

K_inloop [mm³/Nm * 10⁻⁶]

10

K_midden [mm³/Nm * 10⁻⁶]

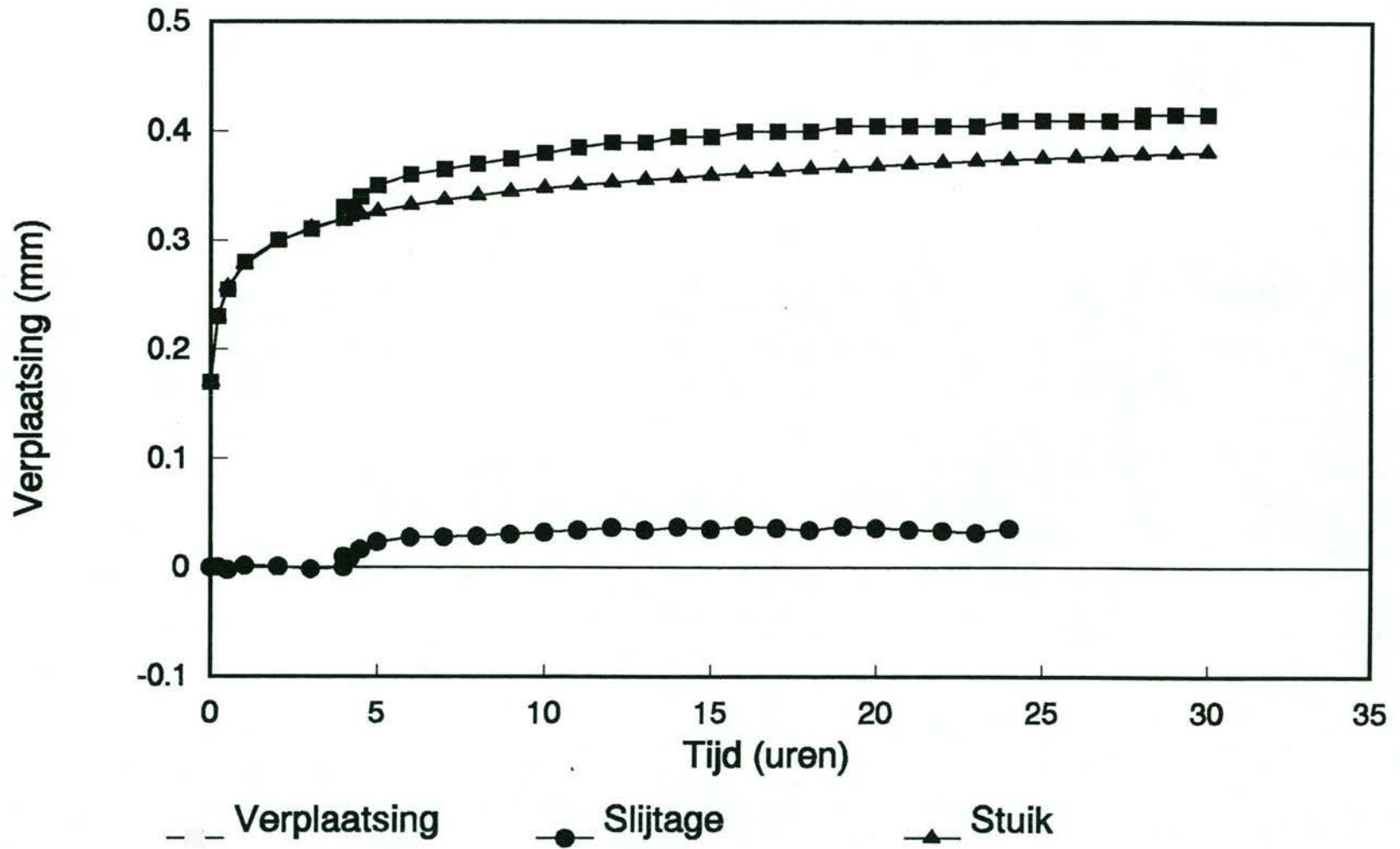
6

K_eind [mm³/Nm * 10⁻⁶]

2

98

91-96, Schijf: C45, Pen: UHMW PA zwart
 $F_n = 565 \text{ N}$, $V_{\text{glij}} = 3.5 \text{ mm/s}$



99

41

91_96

Tijd	U_tot	LOG(t)	Regression Output:		U_stuik	U_slijtage
0.000	0.170		Constant	0.278	0.170	0.000
0.200	0.230	-0.699	Std Err of Y Est	0.002	0.229	0.001
0.500	0.255	-0.301	R Squared	0.998	0.257	-0.002
1.000	0.280	0.000	No. of Observations	6.000	0.278	0.002
2.000	0.300	0.301	Degrees of Freedom	4.000	0.299	0.001
3.000	0.310	0.477			0.311	-0.001
4.000	0.320	0.602	X Coefficient(s)	0.070	0.320	0.000
4.000	0.330	0.602	Std Err of Coef.	0.002	0.320	0.010
4.000	0.330	0.602			0.320	0.010
4.200	0.330	0.623			0.321	0.009
4.500	0.340	0.653			0.324	0.016
5.000	0.350	0.699			0.327	0.023
6.000	0.360	0.778			0.332	0.028
7.000	0.365	0.845			0.337	0.028
8.000	0.370	0.903			0.341	0.029
9.000	0.375	0.954			0.344	0.031
10.000	0.380	1.000			0.348	0.032
11.000	0.385	1.041			0.351	0.034
12.000	0.390	1.079			0.353	0.037
13.000	0.390	1.114			0.356	0.034
14.000	0.395	1.146			0.358	0.037
15.000	0.395	1.176			0.360	0.035
16.000	0.400	1.204			0.362	0.038
17.000	0.400	1.230			0.364	0.036
18.000	0.400	1.255			0.365	0.035
19.000	0.405	1.279			0.367	0.038
20.000	0.405	1.301			0.369	0.036
21.000	0.405	1.322			0.370	0.035
22.000	0.405	1.342			0.371	0.034
23.000	0.405	1.362			0.373	0.032
24.000	0.410	1.380			0.374	0.036
24.000	0.410	1.380			0.374	0.036
25.000	0.410	1.398			0.375	0.035
26.000	0.410	1.415			0.376	0.034
27.000	0.410	1.431			0.378	0.032
28.000	0.410	1.447			0.379	0.031
28.000	0.415	1.447			0.379	0.036
29.000	0.415	1.462			0.380	0.035
30.000	0.415	1.477			0.381	0.034

K_inloop [mm³/Nm * 10⁻⁶]

24

K_midden [mm³/Nm * 10⁻⁶]

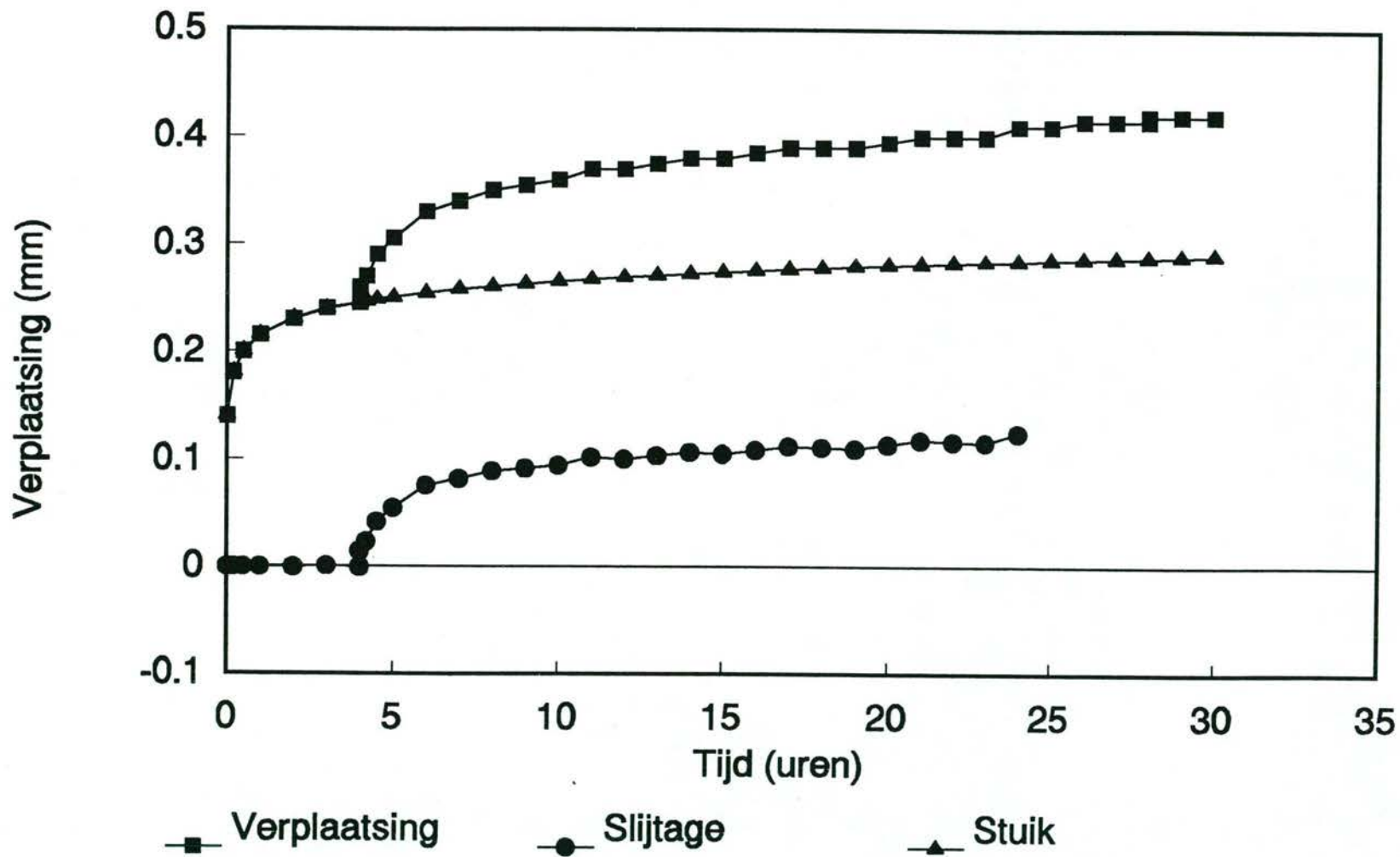
4

K_eind [mm³/Nm * 10⁻⁶]

0

91-97, Schijf: C45, Pen: SHAMBAN 451

$F_n = 565 \text{ N}$, $V_{\text{glj}} = 3.5 \text{ mm/s}$



91-97

Tijd	U_tot	LOG(t)	Regression Output:		U_stuik	U_slijtage
0.000	0.140		Constant	0.215	0.140	0.000
0.200	0.180	-0.699	Std Err of Y Est	0.001	0.180	0.000
0.500	0.200	-0.301	R Squared	1.000	0.200	0.000
1.000	0.215	0.000	No. of Observations	6.000	0.215	0.000
2.000	0.230	0.301	Degrees of Freedom	4.000	0.230	0.000
3.000	0.240	0.477			0.239	0.001
4.000	0.245	0.602	X Coefficient(s)	0.050	0.245	0.000
4.000	0.260	0.602	Std Err of Coef.	0.000	0.245	0.015
4.000	0.260	0.602			0.245	0.015
4.200	0.270	0.623			0.247	0.023
4.500	0.290	0.653			0.248	0.042
5.000	0.305	0.699			0.250	0.055
6.000	0.330	0.778			0.254	0.076
7.000	0.340	0.845			0.258	0.082
8.000	0.350	0.903			0.261	0.089
9.000	0.355	0.954			0.263	0.092
10.000	0.360	1.000			0.265	0.095
11.000	0.370	1.041			0.268	0.102
12.000	0.370	1.079			0.269	0.101
13.000	0.375	1.114			0.271	0.104
14.000	0.380	1.146			0.273	0.107
15.000	0.380	1.176			0.274	0.106
16.000	0.385	1.204			0.276	0.109
17.000	0.390	1.230			0.277	0.113
18.000	0.390	1.255			0.278	0.112
19.000	0.390	1.279			0.280	0.110
20.000	0.395	1.301			0.281	0.114
21.000	0.400	1.322			0.282	0.118
22.000	0.400	1.342			0.283	0.117
23.000	0.400	1.362			0.284	0.116
24.000	0.410	1.380			0.285	0.125
24.000	0.410	1.380			0.285	0.125
25.000	0.410	1.398			0.286	0.124
26.000	0.415	1.415			0.286	0.129
27.000	0.415	1.431			0.287	0.128
28.000	0.415	1.447			0.288	0.127
28.000	0.420	1.447			0.288	0.132
29.000	0.420	1.462			0.289	0.131
30.000	0.420	1.477			0.290	0.130

K_inloop [mm³/Nm * 10⁻⁶]

90

K_midden [mm³/Nm * 10⁻⁶]

6

K_eind [mm³/Nm * 10⁻⁶]

2

- 3.3**
- **Bepaling van mechanische eigenschappen: spanning-rek-tijd-gedrag**
 - **Onderzoek van lijmverbindingen**
 - **Bepaling van extrusie-eigenschappen**

In dit gedeelte van het onderzoek zijn de volgende aspecten bestudeerd:

- De mechanische eigenschappen als resultaat van 1-dimensionale trekproeven zodat het spanning-rek-verband bekend is bij een konstante reksnelheid. De resultaten zijn grafisch gepresenteerd.
- Onderzoek van lijmverbindingen.
Op het hiervoor gekozen materiaal PUR Zurcon 451 werden verschillende lijmsoorten en lijmtechnieken getest. Beoordeling van het resultaat vond plaats door middel van trekproeven op gelijmde proefstaven.
- Extrusie-eigenschappen werden gemeten in een daartoe ontworpen meetopstelling.

De resultaten van deze mechanische tests werden gekompleteerd door hieraan de resultaten van eerder beschreven wrijving- en slijtagemetingen toe te voegen.

In de volgende paragraaf worden de resultaten gekombineerd en vergeleken.

Experimenten aan:
Hogedruk afdichtingen

INHOUDSOPGAVE

	pag.
1. Inleiding	2
2. Aanvullende gegevens op de uitgevoerde metingen	3
2.1 Tabel, kandidaat materialen en de uitgangsvorm	3
3. Beproeving van de lijmnaden	3
3.1 Tabel, overzicht van de beproefde lijmverbindingen	4
4. Bepaling van de extrusie-eigenschappen	4
4.1 Meetopstelling extrusie gedrag	5

Grafiek rek/spannings relatie 451, gelijmd

Grafiek rek/spannings relatie 451, gelijmd

Grafiek rek/spannings relatie 451, gelijmd

Grafiek rek/spannings relatie, seal materialen, 12% rek

Grafiek rek/spannings relatie, seal materialen, 40% rek

Grafiek extrusie gedrag

Grafiek wrijving- en slijtage gedrag, droog

Grafiek wrijving- en slijtage gedrag, gesmeerd

Overzicht meet- en verwerkings files 4/4

Overzicht meet- en verwerkings files 4a/4

Overzicht meet- en verwerkings files 4b/4

Telefax Hydraudyne/ Loctite

1 Inleiding.

In overeenstemming met het programma van het Rijkswaterstaat Project, zijn een aantal experimenten uitgevoerd, zie ook: Exp. aan Hogedruk afdichtingen -1-.

De meetresultaten moeten leiden tot een verantwoorde selectie van de kandidaat-materialen zoals vermeld onder 1.1. van het R.W.S. programma.

De uitgevoerde experimenten hebben uitsluitend betrekking op de bepaling van

- extrusie-eigenschappen (1.3).
- beproeving basismaterialen op treksterkte, vernoemd onder 1.1 van het R.W.S. programma.
- beproeving van lijmnaden op treksterkte in vergelijking met het basismateriaal. (1.6).

Tevens zijn relevante meetresultaten van de slijtage- en wrijvingsproeven, zowel droog als gesmeerd, in dit rapport opgenomen.

Als basismateriaal voor de lijmverbindingen is gekozen voor PUR "Zurcon 451" van Shamban, dat als redelijk lijmbaar bekend staat.

Overleg tussen Hydraudyne Cylinders en de fa. Loctite leverde een voorkeur op voor een drietal Cyanoacrylaat lijmen uit de methyl reeks,

t.w. de typen: - 380
- 405
- 406

Met deze lijmtypen zijn treksterkte experimenten uitgevoerd.

De extrusie experimenten zijn uitgevoerd met een bestaande meet-opstelling, waarmee alleen relatieve meetresultaten verkregen worden, in het verdere verloop van dit verslag wordt hier verder op ingegaan.

Voor meetcondities en geometrie van de trekstaven, zie verslag Hogedruk afdichtingen -1-, resp. de pagina's 4 en 6.

Evenals bij "Experimenten aan Hogedruk afdichtingen -1-", is het aantal metingen per experiment beperkt, afhankelijk van de hoeveelheid beschikbare materialen, het gaat hier dan ook om globale meetresultaten.

prof.dr.ir. M.J.W. Schouten.

C.R.v.d. Laan.

(experimentele onderbouw)

Instituut voor Aandrijf- en Tribotechniek.
Technische Universiteit Eindhoven.

oktober, 1991.

2. Aanvullende gegevens op de uitgevoerde metingen.

Hieronder volgt een overzicht van de soorten materialen waaraan trek- en extrusie experimenten zijn uitgevoerd.

De temperatuur bij alle trek-experimenten is 303 K., terwijl de extrusie experimenten bij een temp. van 295 K. uitgevoerd zijn, dit als gevolg van het ontbreken van een klimaatkast.

Alle basis materialen zijn in nieuwe staat toegeleverd.

Materiaal	Nr.	Basisvorm	Samenstelling
UHMW PE	1a	plaat, dik 15mm.	vlg. eisen RWS, zwart
UHMW PE	1b	plaat, dik 15mm.	vlg. eisen RWS, wit
Mat. 80	2	staf, Ø 20mm.	UHMW PE, Shamban, zwart
Turcite 109	3	staf, Ø 20mm.	PTFE+Turcon+K&G, zwart, Shamban
Zurcon 451	4	staf, Ø 20mm.	PUR, wit, Shamban
Turcite 42	5	staf, Ø 20mm.	PTFE+glas+smeermiddel, Shamban
MT72	6	plaat, dik 15mm.	PTFE+15%glasvezels+5%MoS ₂
Rub/Can	7	best.afdicht.ring	rubber+canvas

Tabel 2.1 Kandidaat materialen en de uitgangsvorm.

Het materiaal MT72 is alleen meegenomen als referentie materiaal en behoort als zodanig niet tot de kandidaat-materialen.

3. Beproeving van lijmverbindingen.

Overeenkomstig het gestelde onder 1.6. van het RWS programma zijn een aantal lijmverbindingen beproefd.

Als basismateriaal is het z.g. Zurcon 451 gebruikt, een redelijk verlijmbaar materiaal op PUR basis.

De firma Loctite stelde 3 leverbare lijmtypen voor, t.w.: Loctite 380, 405, en 406.

Na overleg met de fa. Loctite zijn ook experimenten uitgevoerd met Loctite 460 verlijmingen, waarbij de te verlijmen oppervlakken behandeld zijn met aktivator type 770, die mogelijk de lijmnaadkwaliteit kan verbeteren.

Omdat bij de fa. Loctite geen ervaring is opgedaan met het verlijmen van afdichtingsmaterialen, zijn alle voorgestelde types en alle mogelijke lijmcombinaties op treksterkte beproefd en in een grafiek tegen het basis materiaal afgezet.

Een complicatie bij de experimenten was wel de geometrie van het beschikbare basismateriaal.

De uitgangs-strippen waren in de lengterichting enigszins gekromd, $R=60$ mm., en verlijming kan dan op twee manieren uitgevoerd worden.

- a. verlijming in de kromtestraal positie.
- b. verlijming, in een opgelegde vlakke positie.

In beide gevallen is er sprake van een belasting dat een lijmsort vereist die, naast een hoge treksterkte, ook een hoge pelweerstand heeft.

In geval a. gaat de pelweerstand een rol spelen tijdens de beproeving op treksterkte, omdat het materiaal dan gestrekt wordt.

In geval b. treedt dit effect al op als na de verlijming, het materiaal uit zichzelf weer de gekromde vorm aanneemt, en tijdens de beproeving nog eens gestrekt wordt. Zowel de onder a. als b. vernoemde verlijmingen zijn meegenomen in het meetschema. Hieronder volgt een overzicht van de beproefde combinaties. De twee rechter kolommen geven de rek-spanningsrelatie weer, op het moment dat breuk optrad.

Basismateriaal: PUR "Zurcon 451" van Shamban.
 Temperatuur : 303 K.

Lijmtype	Primer	Cleaner	Lijmsituatie	max.rek [%]	σ br. [MPa]
406	770	703	gekromd	1.8	8.43
406	770	703	vlak	-	2.67
406	-	703	gekromd	14.3	16.39
406	-	703	vlak	12.7	16.38
405	-	703	gekromd	10.4	16.34
405	-	703	vlak	4.6	14.62
380	-	703	gekromd	2.8	12.44
380	-	703	vlak	-	< 1.0

Tabel 3.1. Overzicht van de beproefde lijmverbindingen.

Oppervlakte ruwheid van de lijmvlakken: Ra 6.3 μ m.
 Uithardingstijd: min. 24 uur, bij een rel. vochtigheidsgr. 65%

4. Bepaling van de extrusie-eigenschappen.

Zoals gesteld onder 1.3 van het RWS programma, kan worden volstaan met het uitvoeren van vergelijkende metingen.

Er is gebruik gemaakt van een bestaande meetopstelling; de afmeting van het proefstuk is $\varnothing 10 \times 4$ mm. In fig.4.1 is de meetopstelling afgebeeld.

De opstelling bestaat uit een:

- gehard stalen huis, $\varnothing 10$ mm.
- gehard stalen bovenstempel $\varnothing 8.5$ mm.
- gehard stalen onderstempel $\varnothing 10$ mm.
- proefstuk $\varnothing 10$ mm.

Het bovenstempel is aan de onderzijde cilindrisch verjongd, zodat daar een lokale concentrische extrusie-spleet ontstaat.

Het boven- en onderstempel passen nauwkeurig in het huis. Door een kracht op het bovenstempel uit te oefenen, zal het proefstuk langs het onderstempel gaan extruderen.

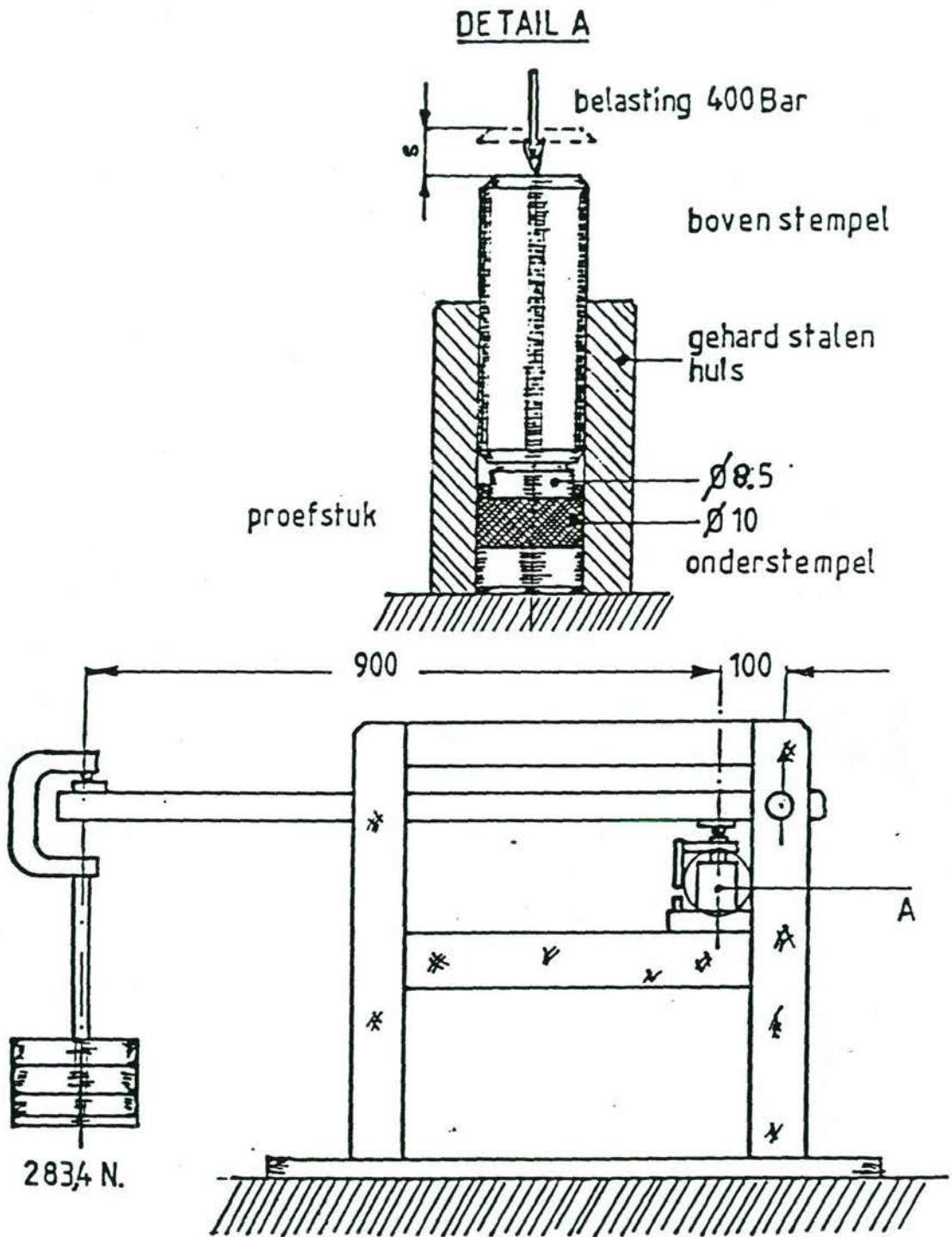
D.m.v. een stangenstelsel en gewichten wordt de kracht F constant gehouden.

Gemeten wordt de verplaatsing "s" van het bovenstempel t.o.v. een vast punt, als functie van de tijd.

Er is gekozen voor 24 uur's experimenten, en de belasting is zodanig aangepast, dat de stempel verplaatsing ca. 0.4 mm. is. De drukspanning bedraagt dan 400 bar.

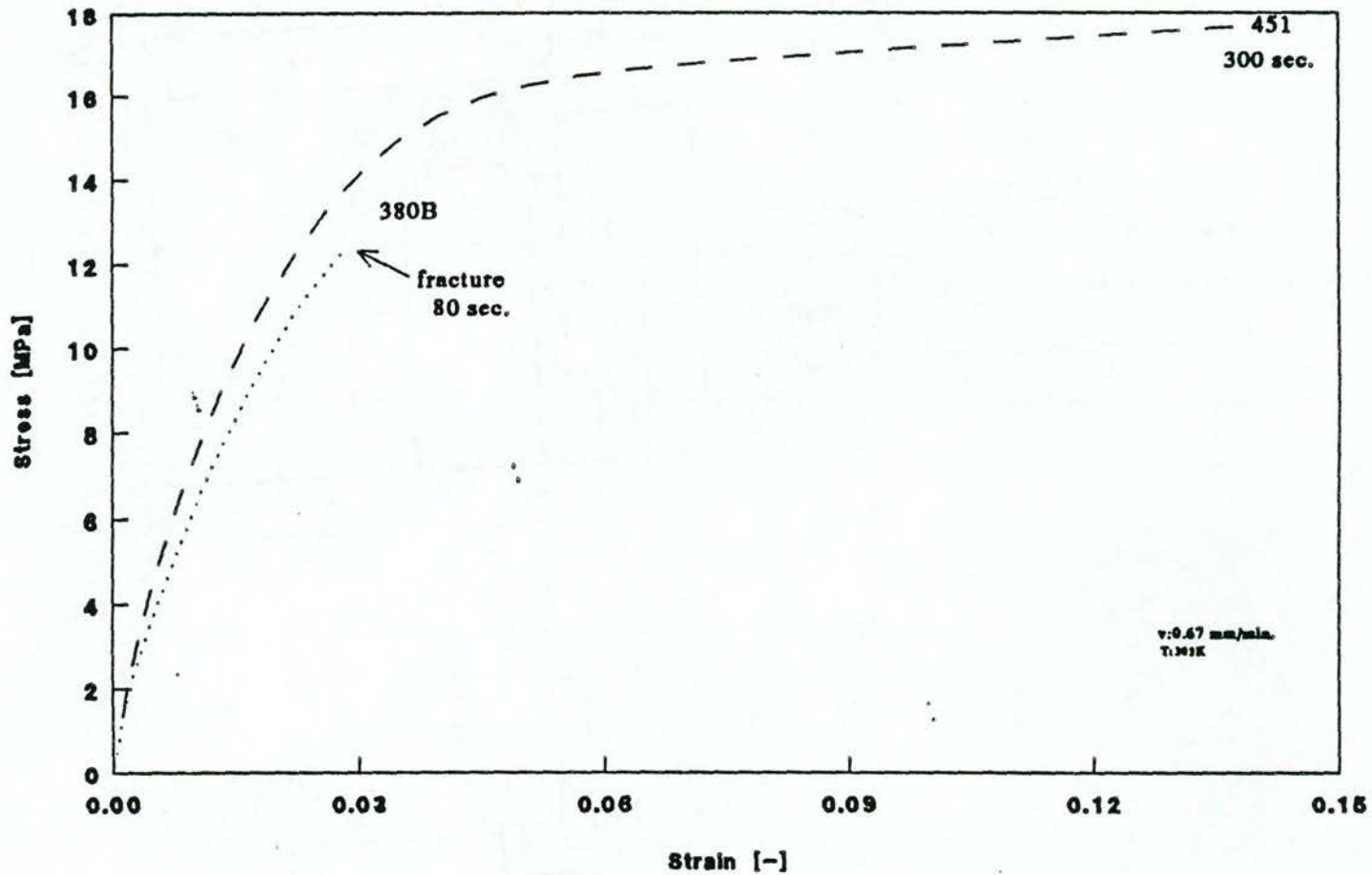
Ook daar waar de extrusie minimaal is, is de verplaatsing nog nauwkeurig meetbaar.

Meetopstelling extrusie gedrag.



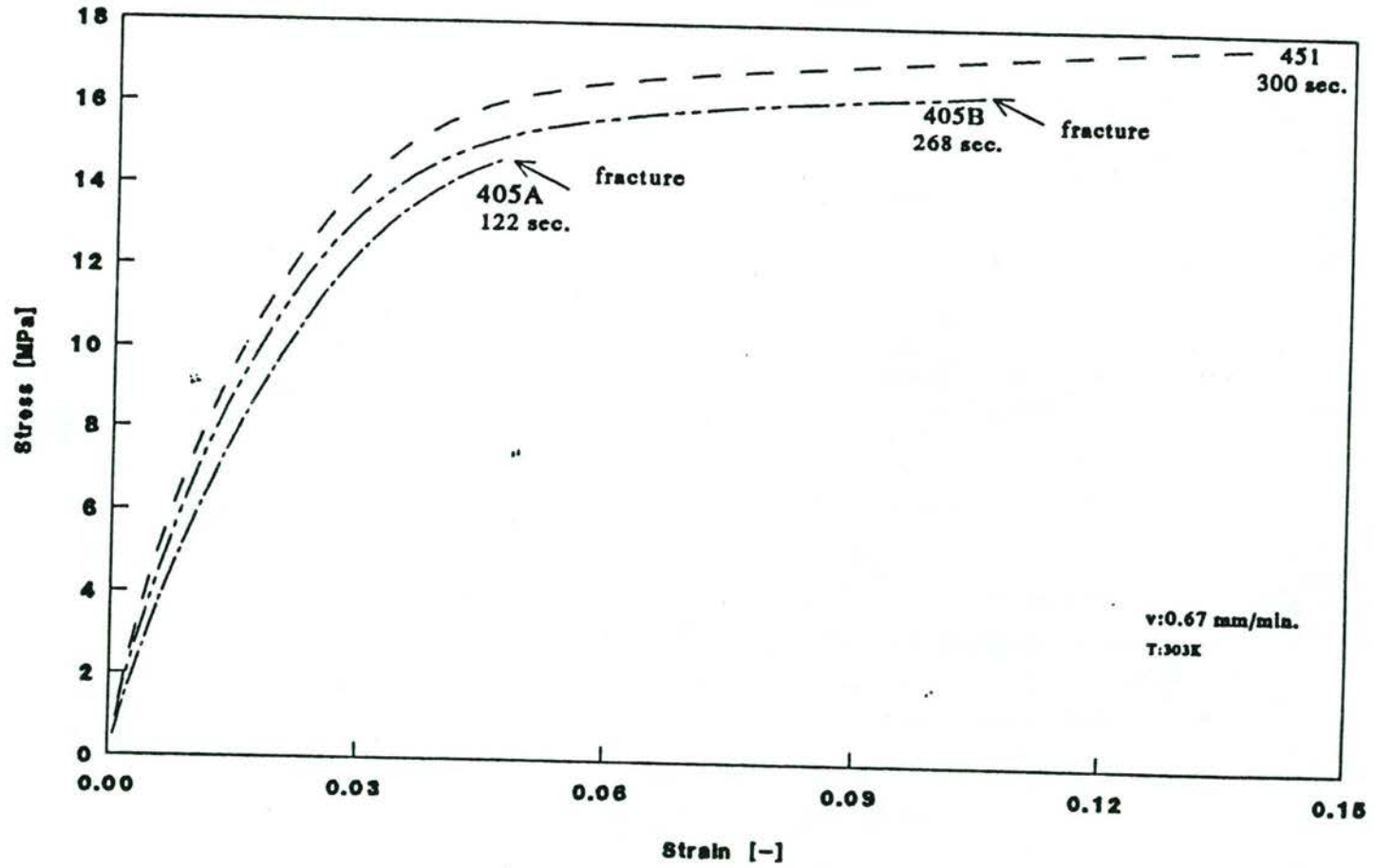
TUE, oktober 1991

Stress v Strain Glued materials



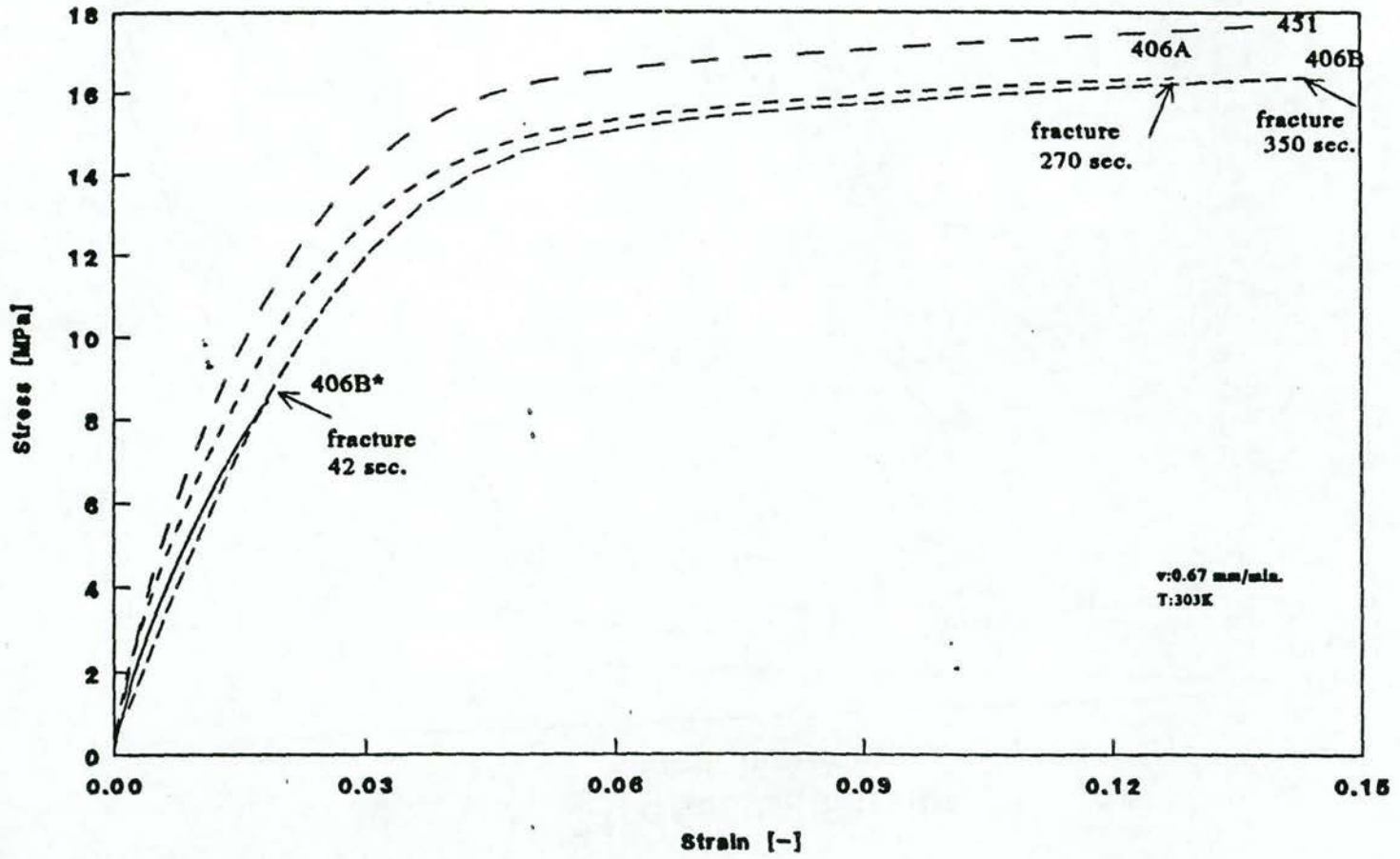
TUE, oktober 1991

Stress v Strain Glued materials



TUE, oktober 1991

Stress v Strain Glued materials



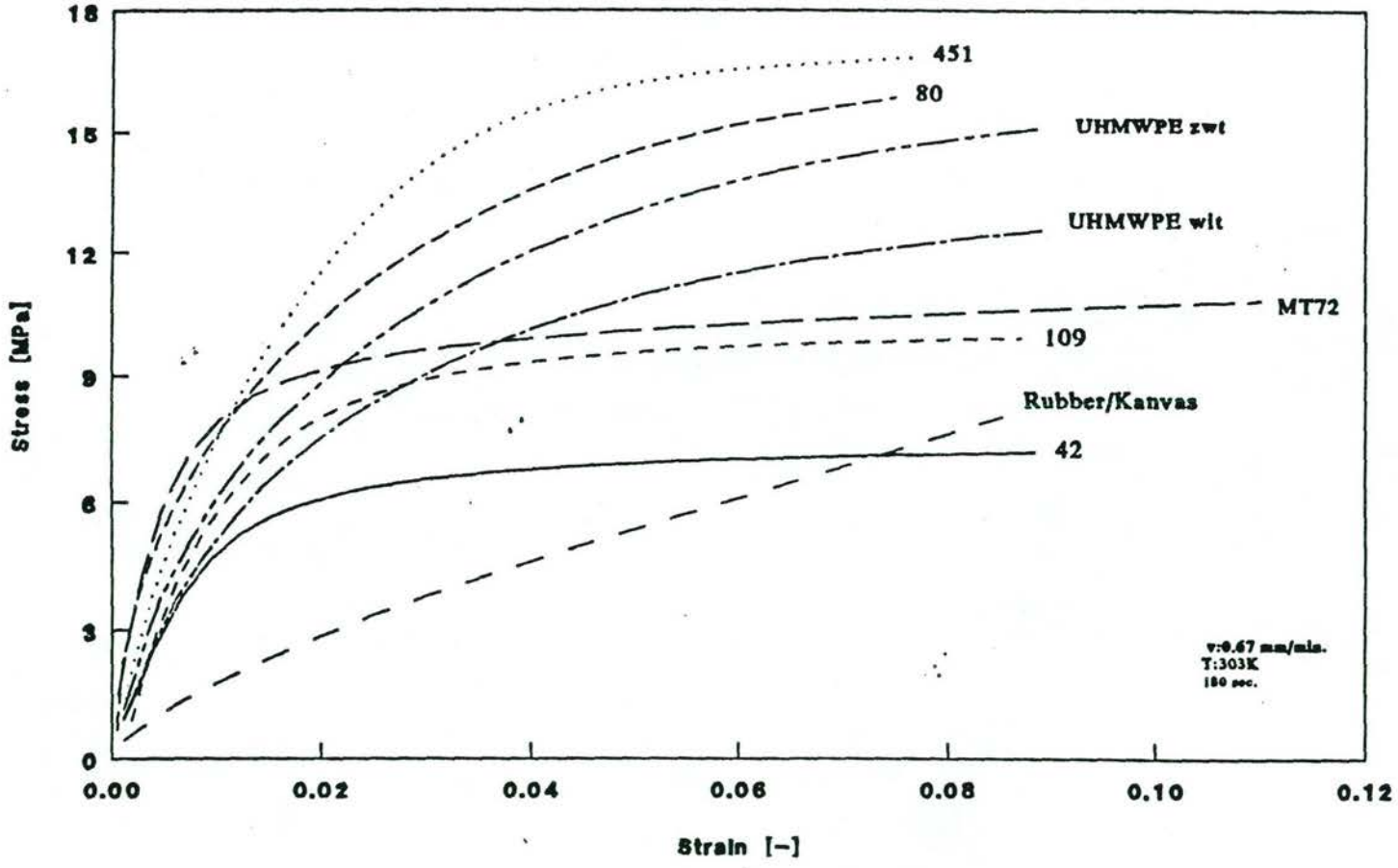
112

TUE, oktober 1991

113

Stress v Strain Seal materials

en82306.36

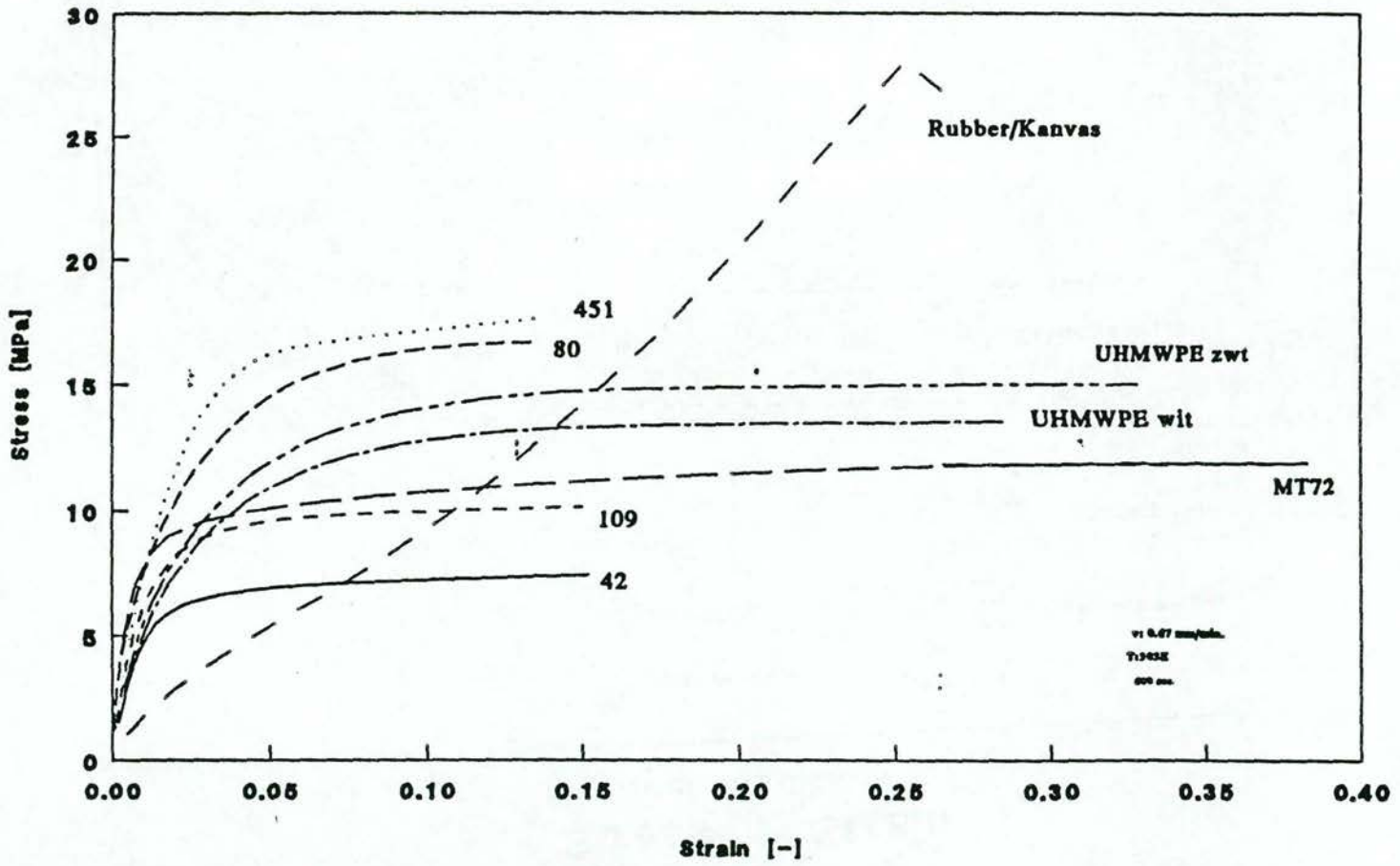


TUE, oktober 1991

h11

Stress v Strain Seal materials

en-82198



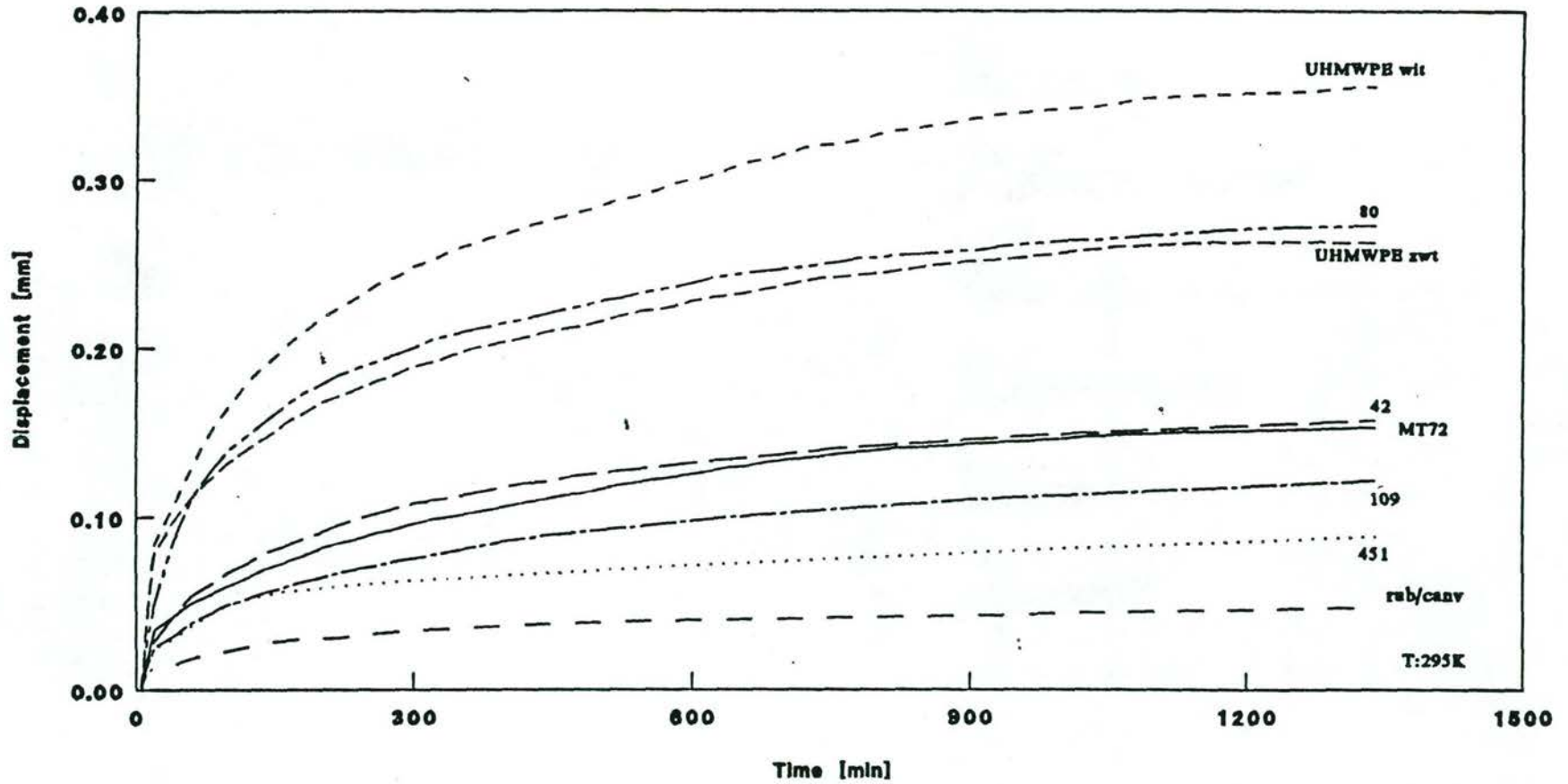
TUE, oktober 1991

115

Displacement v Time

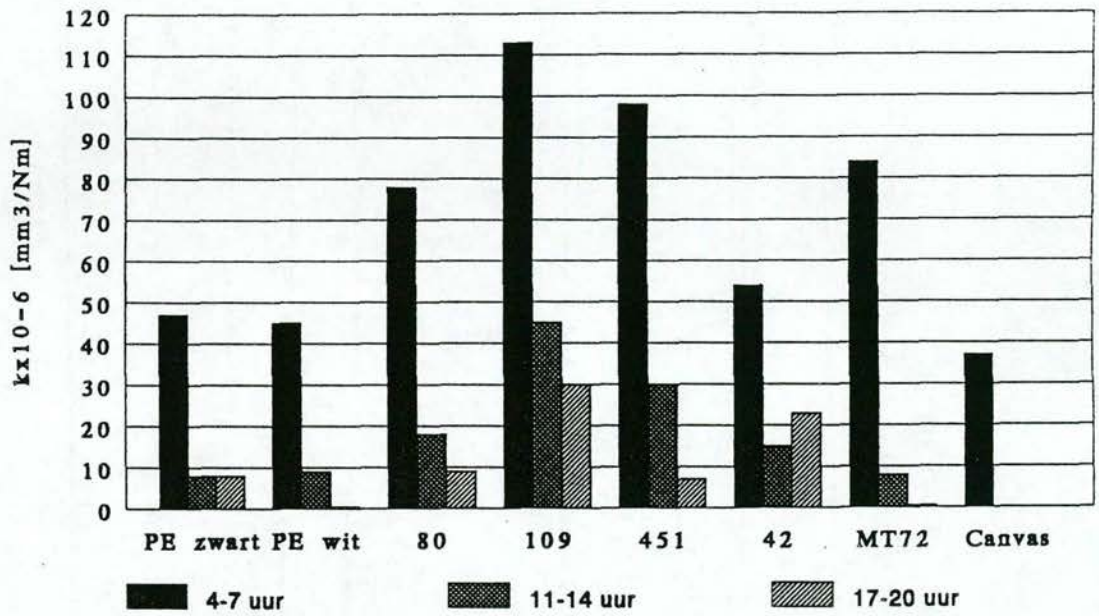
Extrusion Seal materials

extron2.1a

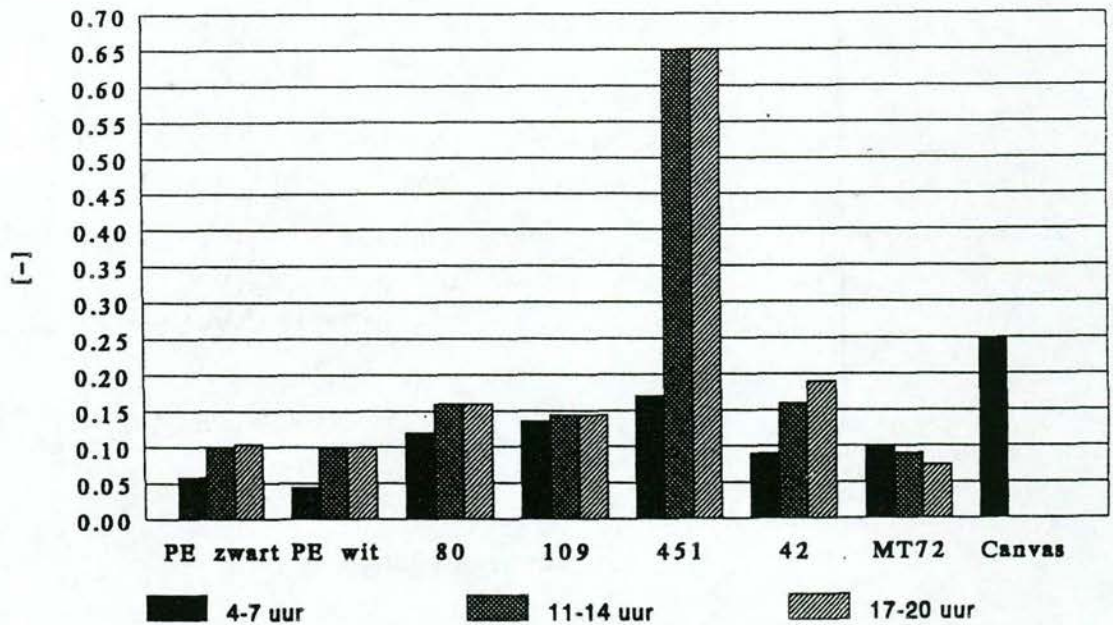


© 1991 Extrusion Seal Technology, Inc. All rights reserved.

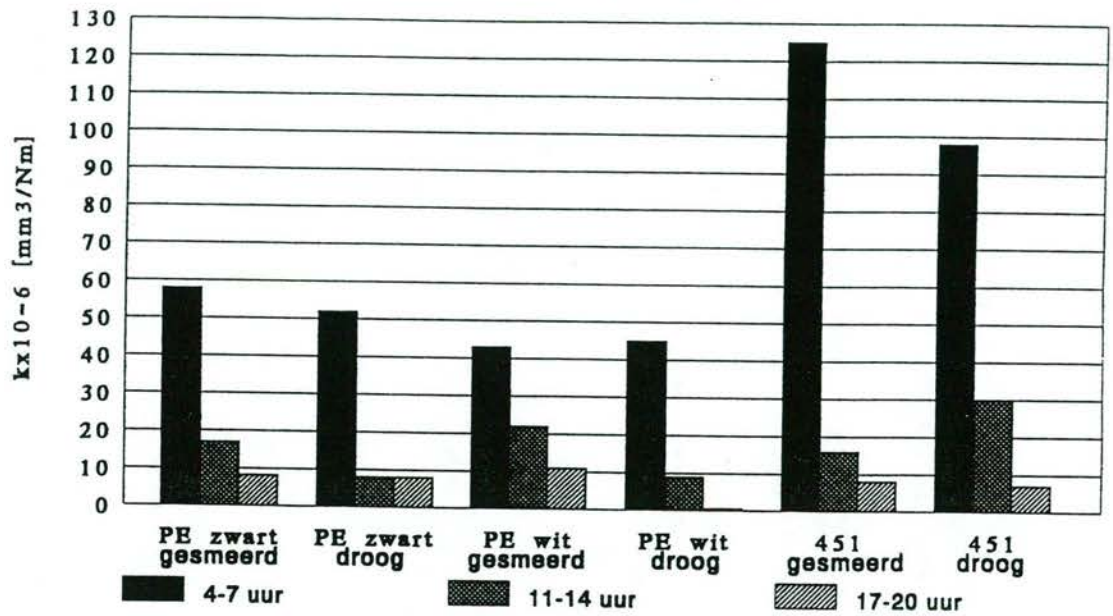
k factor (droog)



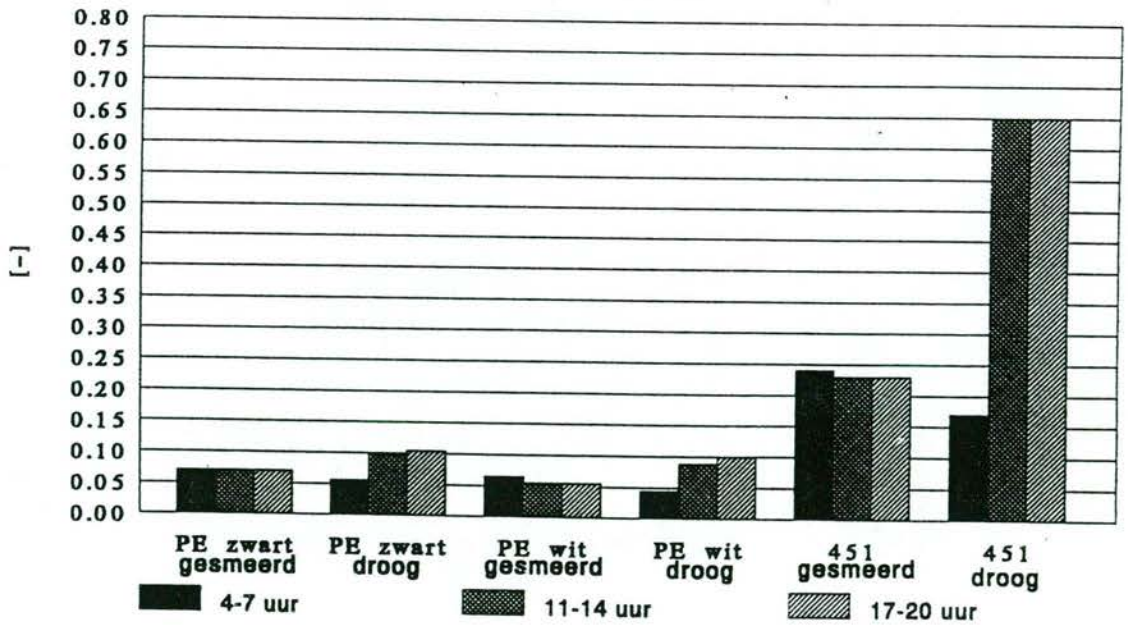
f factor (droog)



k factor
olie: DTE 25 (mobile) 20 C.



f factor
olie: DTE 25 (mobile) 20 C.



Overzicht van de meet- en verwerkings files
 -- Experimenten aan Hogedruk afdichtingen --

rapport, oktober 1991 (pag4/4)

Dat	res.file	wk1/tc	tc	grafiek σ/ϵ ϵ/t	Mat.	behand.	temp [K]		tijd [sec]		V1 [mm/min]	opm.
							303	353	180	600		
1/8	042k003	cm8230k	a	*	42	nieuw	*		*			
1/8	109k003	cm8230k	b	*	109	nieuw	*		*			
1/8	080k003	cm8230k	c	*	080	nieuw	*		*			
1/8	451k001	cm8230k	d	*	451	nieuw	*		*			
1/8	uhwk001	cm8230k	e	*	uhmwpe	nieuw	*		*			kleur wit
1/8	uhzk002	cm8230k	f	*	uhmwpe	nieuw	*		*			kleur zwart
1/8	knvk001	cm8230k	g	*	kanvas	nieuw	*		*			rubber bas.
1/8	mtkw102	cm8230k	h	*	mt72	nieuw	*		*			
1/8	042i003	cm8230i	a	*	42	nieuw	*		*			
1/8	109i003	cm8230i	b	*	109	nieuw	*		*			
1/8	080i003	cm8230i	d	*	080	nieuw	*		*			
1/8	451i001	cm8230i	d	*	451	nieuw	*		*			
1/8	uhwi001	cm8230i	e	*	uhmwpe	nieuw	*		*			kleur zwart
1/8	uhzi002	cm8230i	f	*	uhmwpe	nieuw	*		*			kleur wit
1/8	knvi001	cm8230i	g	*	kanvas	nieuw	*		*			rubber bas.
8/8	451i001	lycom406	g	*	451	basis	*		*			
8/8	451x005	lycom4	a	*	406B*	lym	*			42 sec.		breuk
8/8	451z002	lycom406	b	*	406A	lym	*			270 sec.		breuk
8/8	451w007	lycom406	c	*	406B	lym	*			350 sec.		breuk
8/8	451i001	lycom380	g	*	451	basis	*					
8/8	451v003	lycom380	d	*	380B	lym	*			80 sec.		breuk
8/8	451i001	lycom405	g	*	451	basis	*					
8/8	451t005	lycom405	e	*	405A	lym	*			122 sec.		breuk
8/8	451u004	lycom405	f	*	405B	lym	*			268 sec.		breuk

- voorzover niet vermeld V1 = 0,67 mm/min.
 - metingen, oktober 1991

Overzicht van de meet- en verwerkings files
 -- Experimenten aan Hogedruk afdichtingen --

rapport oktober 1991 (pag4a/4)

Dat	res.file	wk1/tc	tc	grafiek		Mat.	behand.	temp [K]		tijd [sec]		V1 [mm/min]	opm.
				σ/ϵ	ϵ/t			303	353	180	600		
13/8	geen	extrusie	a	*	MT72	nieuw	295			1340		n.v.t.	
13/8	geen	extrusie	b	*	pe zw.	nieuw	295			1340		n.v.t.	
13/8	geen	extrusie	c	*	pe wt.	nieuw	295			1340		n.v.t.	
13/8	geen	extrusie	d	*	451	nieuw	295			1340		n.v.t.	
13/8	geen	extrusie	e	*	109	nieuw	295			1340		n.v.t.	
13/8	geen	extrusie	f	*	sealbas	nieuw	295			1340		n.v.t.	
13/8	geen	extrusie	g	*	seal rin.	nieuw	295			1340		n.v.t.	
20/8	geen	extrusie	h	*	42	nieuw	295			1340		n.v.t.	
27/8	geen	extrusie	a	*	MT72	nieuw	295			1340		n.v.t.	
27/8	geen	extrusie	b	*	pe wt.	nieuw	295			1340		n.v.t.	
27/8	geen	extrusie	c	*	pe zw.	nieuw	295			1340		n.v.t.	
27/8	geen	extrusie	d	*	451	nieuw	295			1340		n.v.t.	
27/8	geen	extrusie	e	*	109	nieuw	295			1340		n.v.t.	
27/8	geen	extrusie	f	*	80	nieuw	295			1340		n.v.t.	
27/8	geen	extrusie	g	*	seal rin.	nieuw	295			1340		n.v.t.	
27/8	geen	extrusie	h	*	42	nieuw	295			1340		n.v.t.	

- voorzover niet vermeld V1 = 0.67 mm/min.
 - metingen, augustus 1991

119

Overzicht van de meet- en verwerkings files
 -- Experimenten aan Hogedruk afdichtingen --

rapport oktober 1991 (pag4b/4)

Dat	res.file	wk1/tc	tc	grafiek σ/ϵ ϵ/t	Mat.	behand.	temp [K]		tijd [sec]		V1 [mm/min]	opm.
							303	353	180	600		
27/8	geen	extruall	a	*	MT72	nieuw	295				1340	nv.t.
27/8	geen	extruall	b	*	pe wt.	nieuw	295				1340	nv.t.
27/8	geen	extruall	c	*	pe zw.	nieuw	295				1340	nv.t.
27/8	geen	extruall	d	*	451	nieuw	295				1340	nv.t.
27/8	geen	extruall	e	*	109	nieuw	295				1340	nv.t.
27/8	geen	extruall	f	*	80	nieuw	295				1340	nv.t.
27/8	geen	extruall	g	*	nib/can	nieuw	295				1340	nv.t.
27/8	geen	extruall	h	*	42	nieuw	295				1340	nv.t.
27/8	geen	selectgr	selectie kandidaat mat.			nv.t.	nv.t.				nv.t.	nv.t.

- voorzover niet vermeld V1 = 0.67 mm/min.
- metingen, november en december in 1990

T E L E F A X

TELEFAX : 040- 440015
TO : T.U. Eindhoven
ATT. : Prof. dr. Ir. M.J.W. Schouten
CC. :
FROM : R. Eijkemans

P.O. Box 32,
5280 AA Bortel,
The Netherlands
Phone: (0)4116-51951
Telex 50825 Hydr
Telecopier: (0) 4116-74125

YOUR REF. : RWS-onderzoek
OUR REF. : RE/90111

DATE: 14-11-1990
PAGE: 1 OF 1

Geachte Professor,

Ten aanzien van het lijmen van afdichtingen uit het materiaal 451 PUR heb ik navraag gedaan bij onze afdeling montage: Ervaring met het lijmen van afdichtingen is er niet, wel met afstrijkers. Daarvoor gebruiken wij normale 2-secondenlijm, maar deze is niet geschikt voor gebruik in olie.

Na overleg met de firma Loctite kan ik u 3 types voorstellen, die geschikt zijn om PUR te lijmen: -Loctite 380
-Loctite 405
-Loctite 406

Er bestaat bij de firma Loctite wel enige twijfel omtrent de levensduur van de verbinding, veroorzaakt door oliebestendigheid, druk en temperatuur. Dit gaarne in uw beschouwing medenemen. Mocht u nadere informatie omtrent de genoemde types lijm willen hebben, dan kan ik dat met de firma Loctite regelen.

Met vriendelijke groeten,



R. Eijkemans

TUE, oktober 1991

3.4 Samenvatting van materiaaleigenschappen: een eerste aanzet tot een keuze-methode.

In de vorige paragraaf werden de volgende materiaaleigenschappen als resultaat van metingen beschreven:

- Spanning-rek-relaties op grond van 1-dimensionale trekbelasting
- Extrusieweerstand
- Wrijvingseigenschappen
- Slijtageweerstand.

Niet elke materiaaleigenschap is voor een afdichtingskonstructie van hetzelfde belang; bovendien kan de belangrijkheid van een eigenschap per toepassing sterk verschillen.

Het relatieve belang van verschillende eigenschappen moet dan ook per toepassing worden beoordeeld, waarbij per eigenschap met weegfactoren gewerkt kan worden.

Een eerste aanzet om te komen tot een keuze-methode is hierna opgenomen.

Selectie van de kandidaat materialen.

Genoemde deel-percentages zijn telkens gerelateerd aan het resp. materiaal met de beste eigenschap, (100 %), en ondergebracht in onderstaande matrix. Onder "totaal" zijn de verschillende deel-percentages gesommeerd.

Op deze wijze kunnen de verschillende materialen gerangschikt worden op toepassings-prioriteit.

Nadien kunnen weeg- en andere factoren ingebracht worden, om te komen tot een verantwoorde selectie van de materialen.

M.b.t. wrijving- en slijtage proeven dient vermeld te worden, dat er geen smering is toegepast.

mater. type	COEF. wrijv. [-]	rel. [%]	k * 10 ⁻⁶ [mm ² /Nm.]	rel. [%]	extr. [mm]	rel. [%]	trek [MPa]	rel. [%]	Tot. [%]
451	0.65	11.4	7.5	13.3	0.089	56.2	16.26	100.0	180.99
80	0.16	46.3	9.1	11.0	0.273	18.3	14.46	89.0	164.6
uhmwit	0.10	74.0	<1	100.0	0.355	14.1	11.92	73.3	261.4
uhmzwt	0.104	71.1	7.8	12.8	0.262	19.1	13.15	80.9	183.9
mt72	0.074	100.0	<1	100	0.153	32.7	10.2	62.7	295.4
109	0.144	51.4	30	3.3	0.122	41.0	9.56	58.8	154.5
42	0.19	39.0	23	4.3	0.157	31.9	6.9	42.4	117.6
rub/can	0.25	29.6	37	2.7	0.050	100.0	5.23	32.2	164.5

Tabel 5.1. Overzicht selectie kandidaat materialen.

Hieronder de score zoals die volgt uit bovenstaande tabel.

1. MT72	295
2. UHMWPE wit	261
3. UHMWPE zwart	184
4. 451	181
5. 80	165
6. Rubber/canvas	165
7. 109	155
8. 42	118

Tabel 5.2. Overzicht eind score kandidaat materialen.

Opgemerkt dient te worden, dat bij deze beoordeling aan elk aspect (nog) dezelfde prioriteit wordt toegekend. (geen weegfactoren).

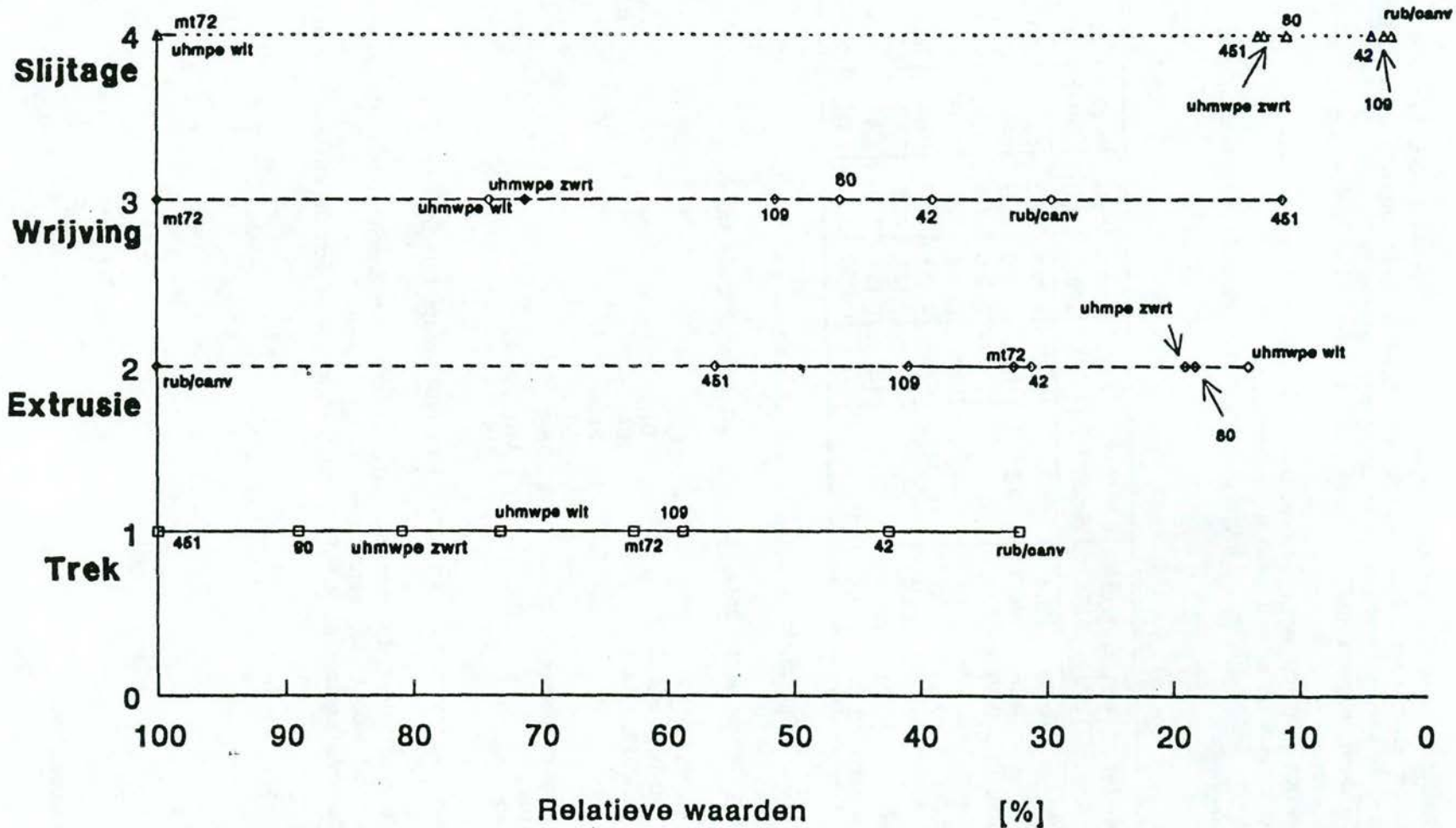
Nader overleg met de R.W.S. participanten levert een definitieve selectie keuze op.

TUE, oktober 1991

Hogedruk afdichtings materialen.

Kwaliteitspositie, hoogste kwal. 100%

oeloeogr.de



124

In het overzicht op de vorige pagina waren de gebruikte slijtagefactoren nog niet gecorrigeerd voor het kruipgedeelte dat mede de pen-verplaatsing veroorzaakt.

Wordt deze correctie wel in rekening gebracht zoals dat is uitgevoerd in paragraaf 3.2 dan ontstaat de tabel zoals deze op de volgende pagina is weergegeven.

De k-factoren zoals deze aan het einde van de beproevingsduur gelden, zijn vervolgens verwerkt in de overzichtsgrafiek waarin de relatieve waarden van de verschillende eigenschappen zijn vermeld, zoals dat ook op de vorige pagina het geval was. Daaruit ontstaat een nieuwe, aangepaste overzichtsgrafiek die als leidraad bij de materiaalkeuze kan worden gebruikt.

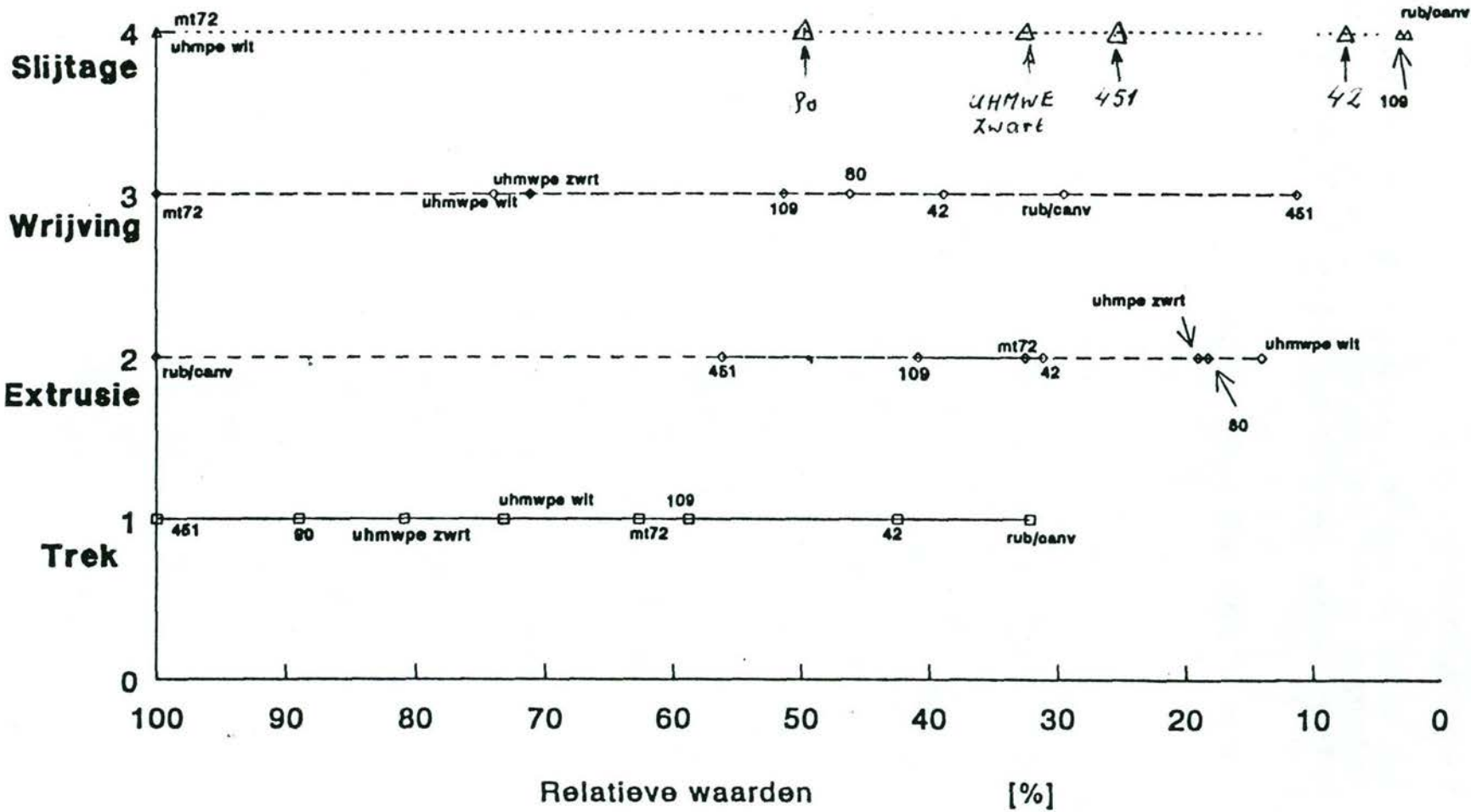
Slijtagefactoren na afsplitsing van het kruipgedeelte

Materiaal	$k * 10^{-6} \text{ [mm}^3/\text{Nm]}$		
	inloop	midden	eind
MT 72	55	0	0
UHMW PE wit	21	1	0
UHMW PE zwart	23	0	2
451	74	21	3
80	35	5	1
Rubber / Canvas	21	--	--
109	91	36	24
42	31	8	10

TUE, oktober 1991

Hogedruk afdichtings materialen.

Kwaliteits-positie, hoogste kwal. 100%



198

overzicht na correctie van de slijtage-gegevens voor het kruipgedeelte

3.5 Eisen, gesteld aan het spanning-rek-verloop voor een goed afdichtingsmateriaal.

Analyse van het vervormingsgedrag van materialen in afdichtingen leert dat de spanning-rek-karakteristiek nog afgezien van de getalwaarden, een bepaald kwalitatief verloop moet vertonen om als goed afdichtingsmateriaal gekenmerkt te worden.

In deze paragraaf wordt daarop ingegaan.

Een aspekt van de materiaal-
karakteristiek van hoge druk
afdichtingen ter voorkoming
van scheurvorming

Notitie t.b.v. Rijkswaterstaatproject:
"afdichtingen"

prof.dr.ir. M.J.W. Schouten

C.R. v.d. Laan
(experimentele onderbouwing)

Instituut voor Aandrijf- en Tribotechniek
Technische Universiteit Eindhoven

maart 1991

Tekst in trefwoorden

Veel hoge druk afdichtingen hebben als grondvorm de geometrie zoals aangegeven in fig. 1a.

Een veel voorkomend probleem, naast problemen in het direkte afdichtingsvlak, is scheurvorming zoals in fig. 1a aangegeven. Dit is het gevolg van de hoge druk belasting aan de binnenkant vlg. fig. 1b en 1c.

De totale vervorming in hoogte richting die de afdichting moet ondergaan wordt "gehaald" uit een slechts korte lengte vlg. fig. 1c. Dat betekent grote lokale rekken en hoge spanningen.

Om het bovenstaande te voorkomen kan de konstruktie volgens fig. 2 worden gekozen waarbij de totale deformatie uit een grotere lengte wordt gehaald zodat rekken en spanningen lager zijn. Dit blijkt nog eens uit fig. 3, waarin beide konstrukties naast elkaar gezet zijn. In deze twee gevallen is ervan uitgegaan dat de totale verlenging Δl in de twee gevallen dezelfde is. Dit is de max. ruimte die opgevuld kan worden als verschil tussen de oorspronkelijke speling en het aanliggen tegen as en huis.

Wezenlijk om dit te kunnen realiseren is naast de geometrie, ook het materiaalmodel, met name het spanning~~rek~~verloop, zie fig. 4.:

Bij de karakteristiek volgens b zal op de eerste plaats waar vloeï optreedt, het materiaal verzwakt zijn (er is geen "versteving") en juist op deze plaats zal alle verdere rek optreden met als gevolg een insnoering.

Bij de materiaalkarakteristiek volgens a wordt op de plaats van de eerste vloeï het materiaal sterker. Vervolgens zal dan ook vloeï op een andere plaats optreden met als gevolg dat de totale vervorming zich gelijkmatig zal verdelen met een zo klein mogelijke lokale vervorming.

Beide materiaalkarakteristieken komen voor. Zie de metingen van fig. 5.

De juiste combinatie van geometrie en materiaalkarakteristiek is nog eens aangegeven in fig. 6.

Hoe hiermee nu te werken ?

In fig. 7 zijn de maximaal op te vullen spelings δ_1 en δ_2 aangegeven. Deze waarden worden lineair en berekenbaar groter als de druk toeneemt: Het huis wordt ~~groter~~; de stang wordt (vrijwel niet) kleiner in diameter. De maximale Δl bij de maximale druk moet gerealiseerd kunnen worden. Bij een bepaalde waarde van l_0 volgt daaruit de maximale rek. Die moet voor het materiaal toelaatbaar zijn.

Een en ander is als methode nog eens samengevat in fig. 8. Bij een goed ontwerp is het vervormingsgedrag van de afdichting elastisch. Omdat de seal meer vervormt dan de metalen gedeelten, kan de konstruktie zo worden uitgevoerd dat over het gehele drukbelastingstrajekt geen kontakt tussen de achterkant van de seal en de as optreedt. Dit voorkomt extra en onnodige wrijving bij translatie.

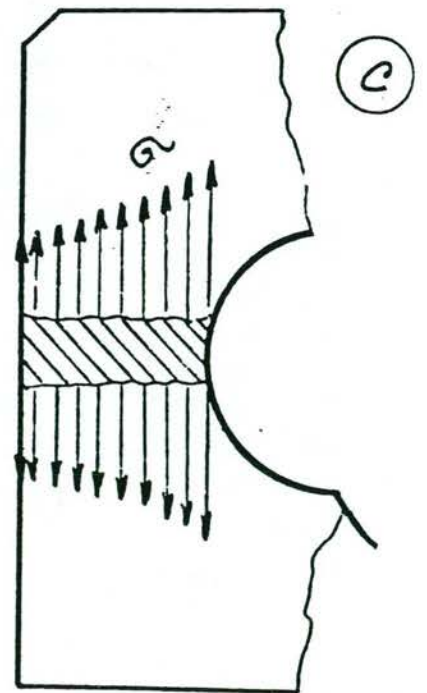
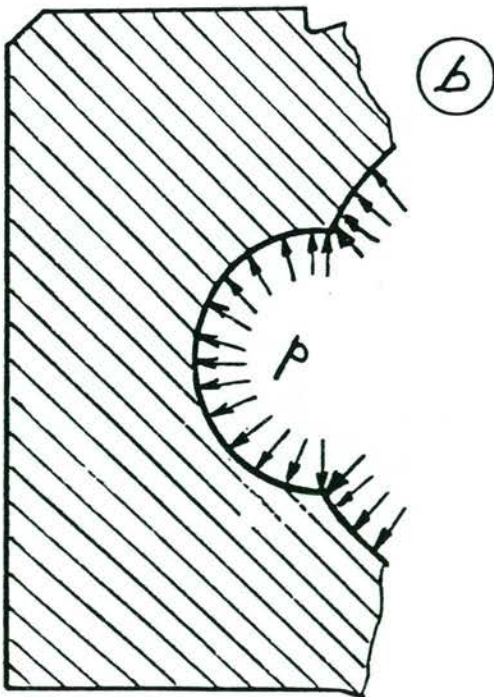
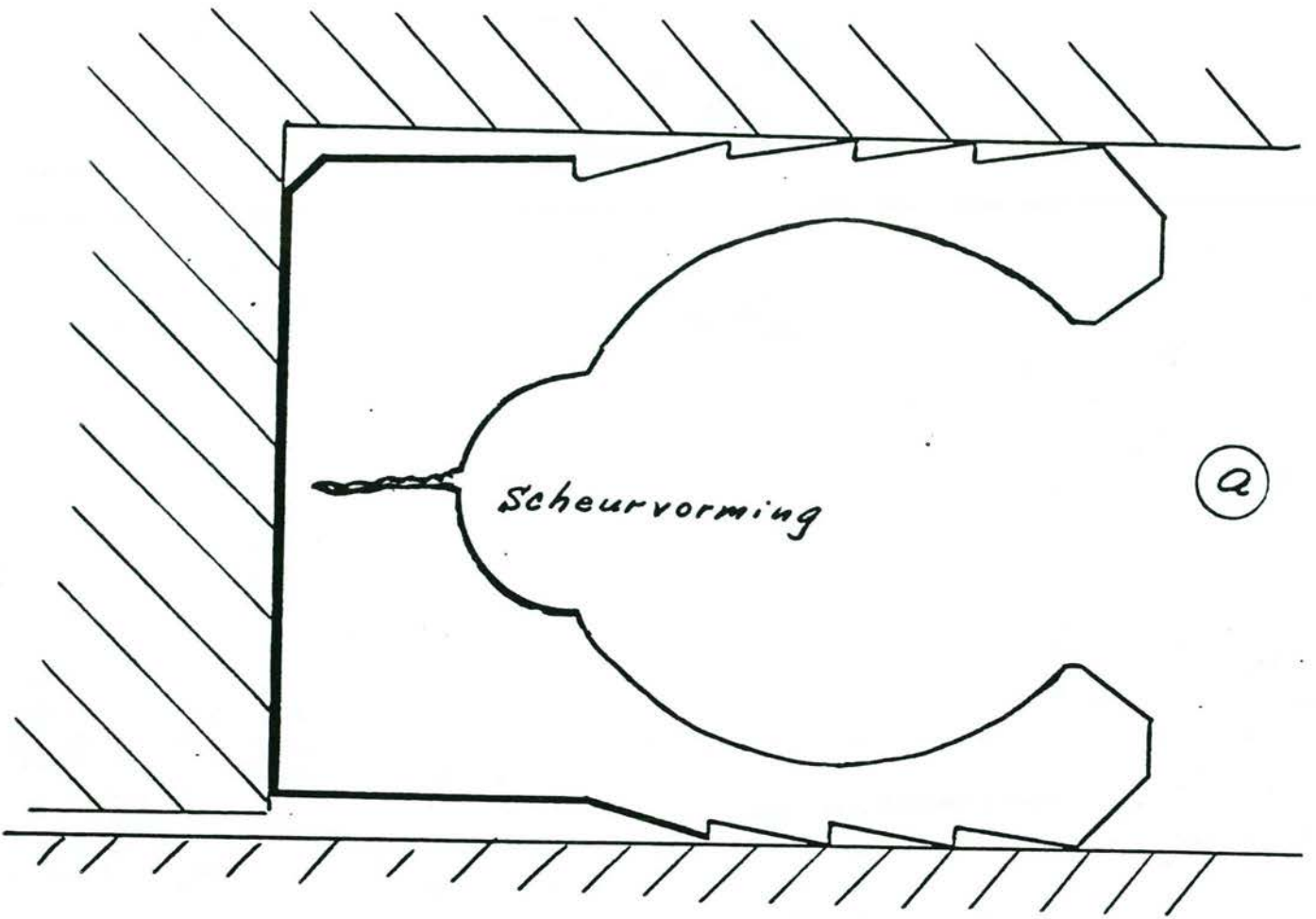


Fig. 1

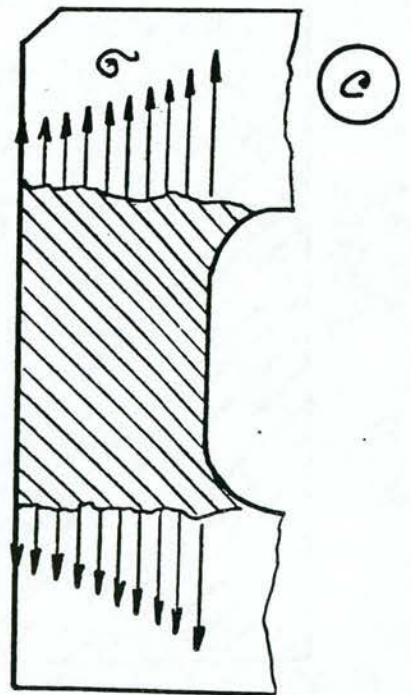
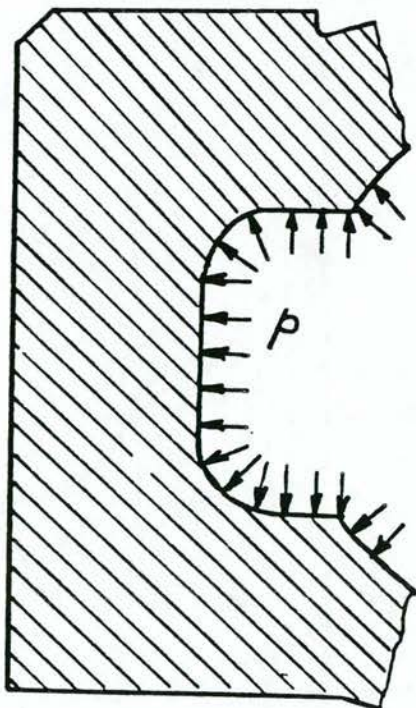
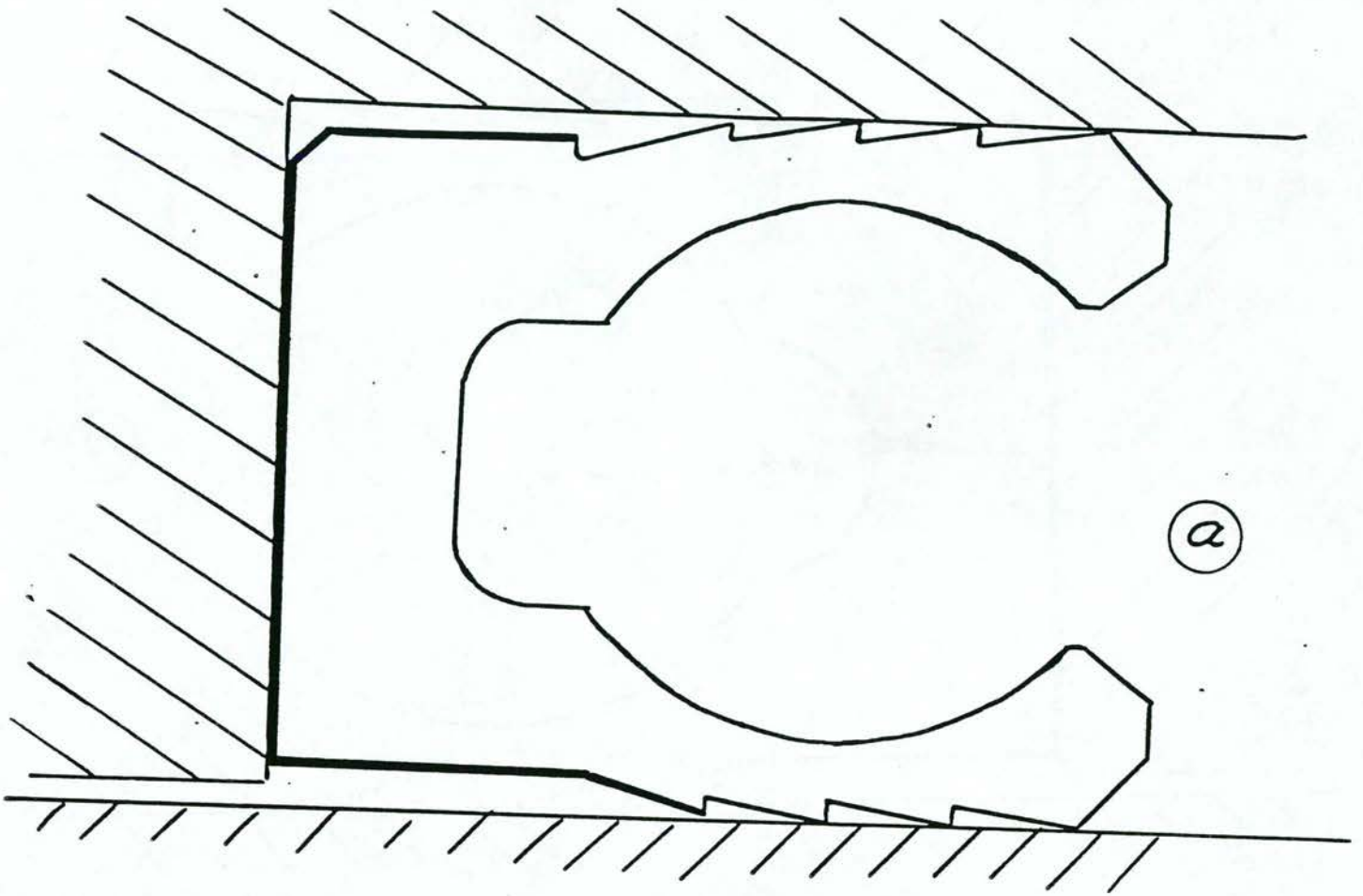


Fig. 2.

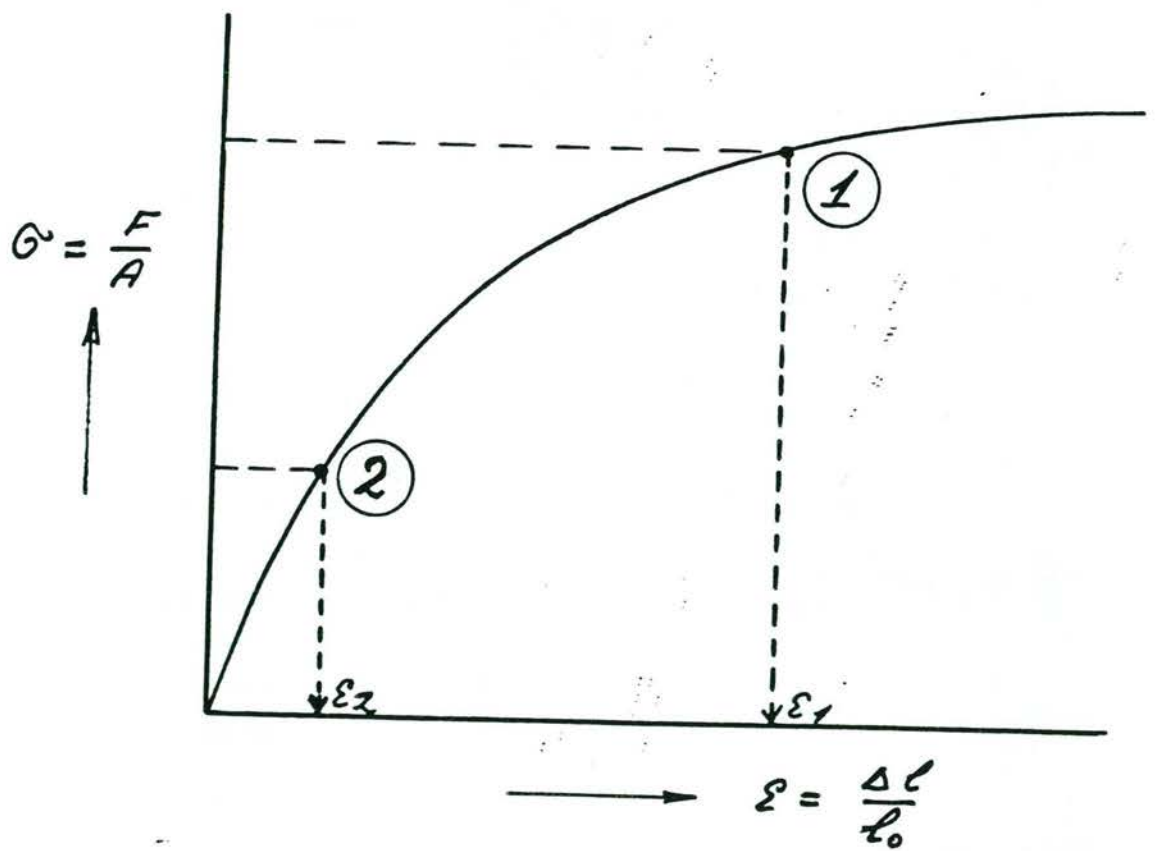
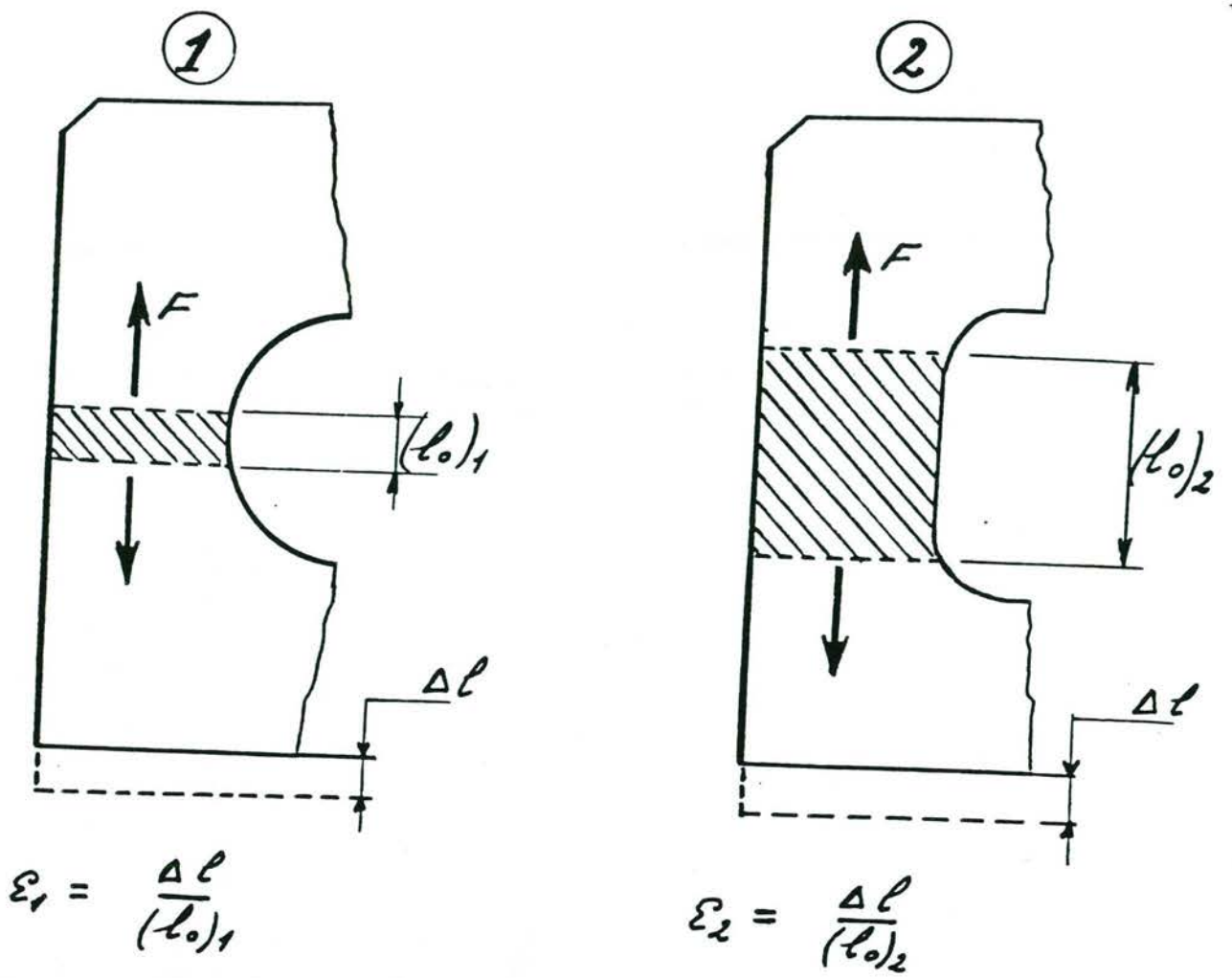
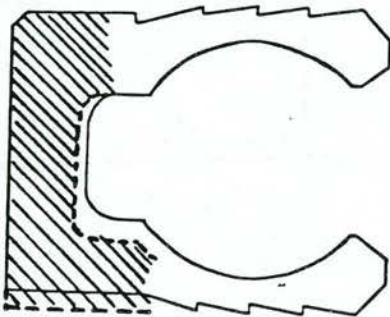
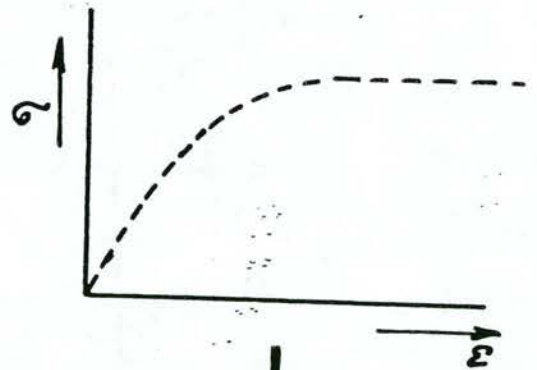
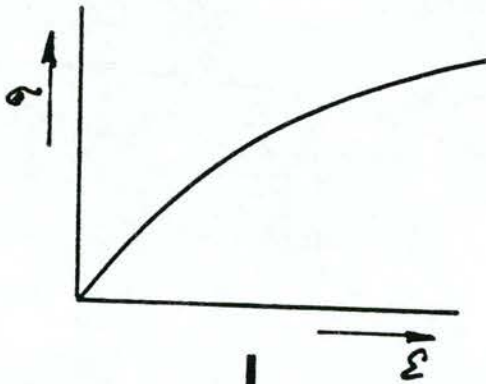
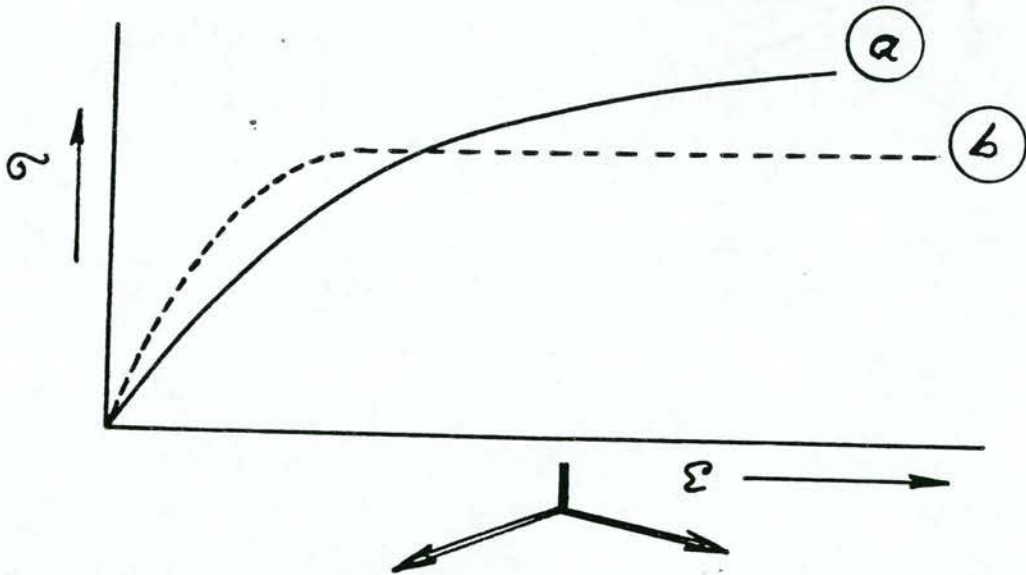
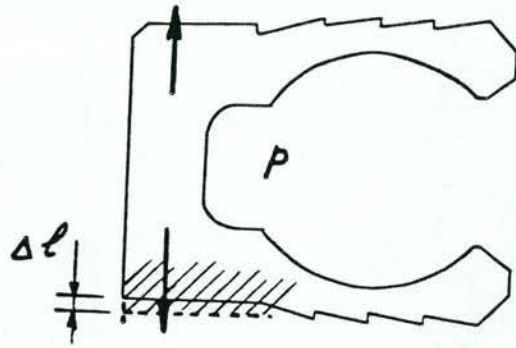
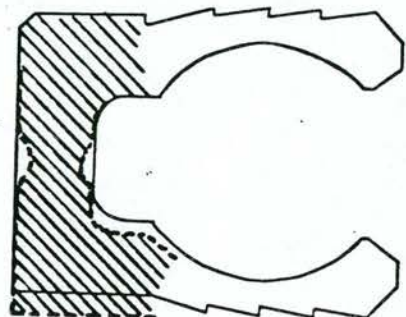


Fig. 3.



+



-

Fig. 4

135

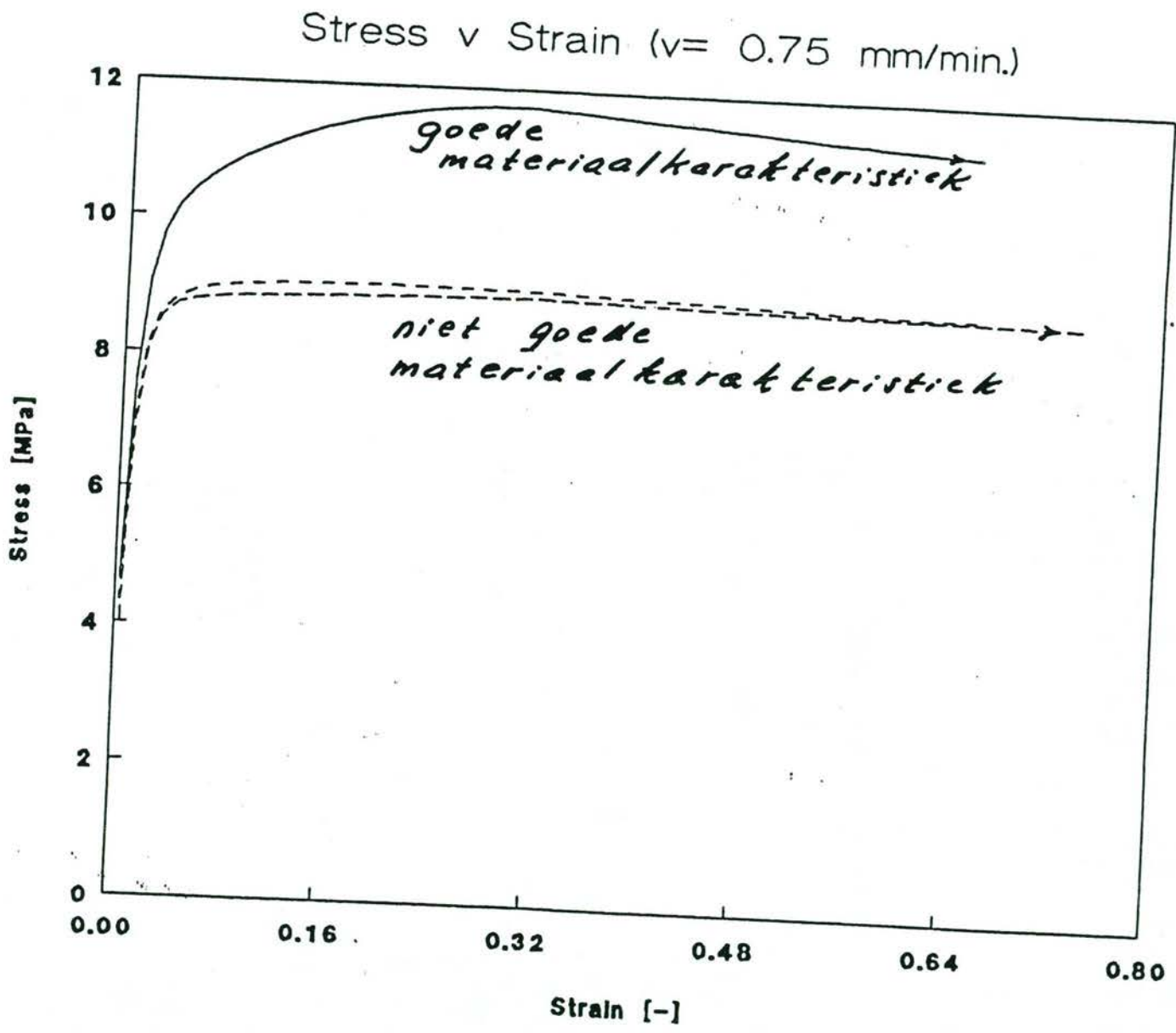


Fig. 5

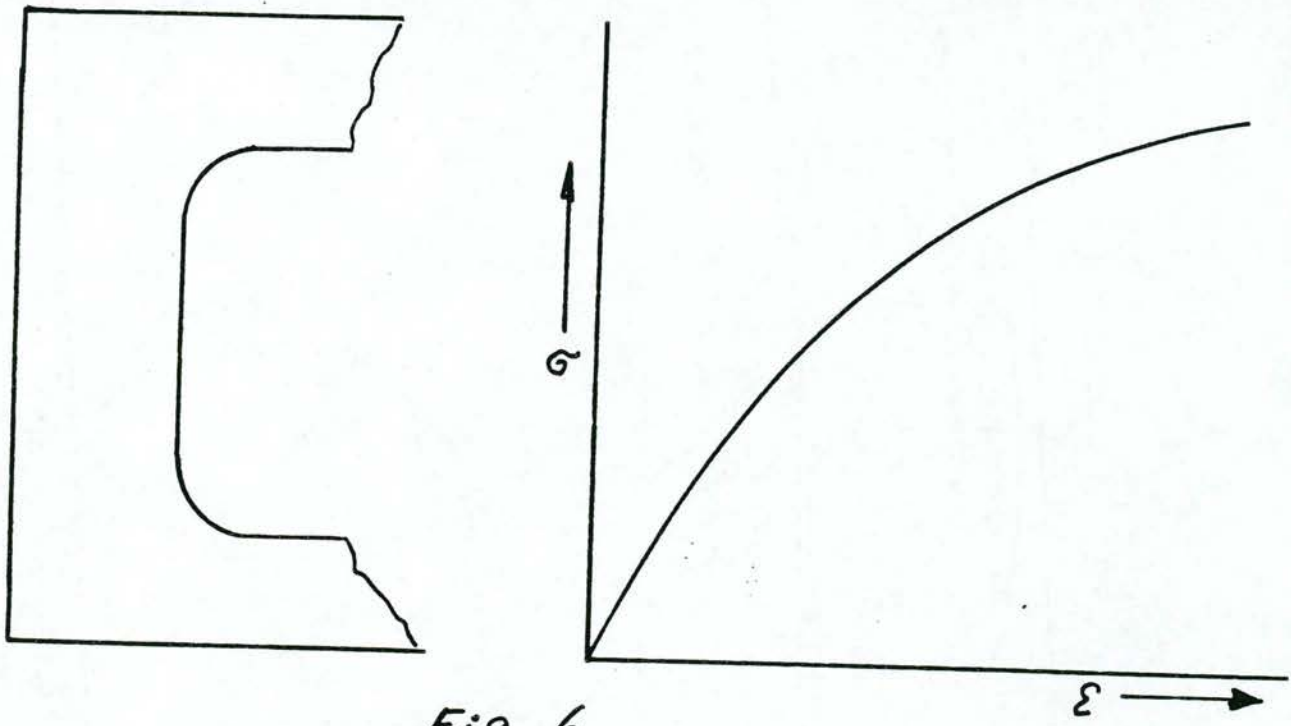
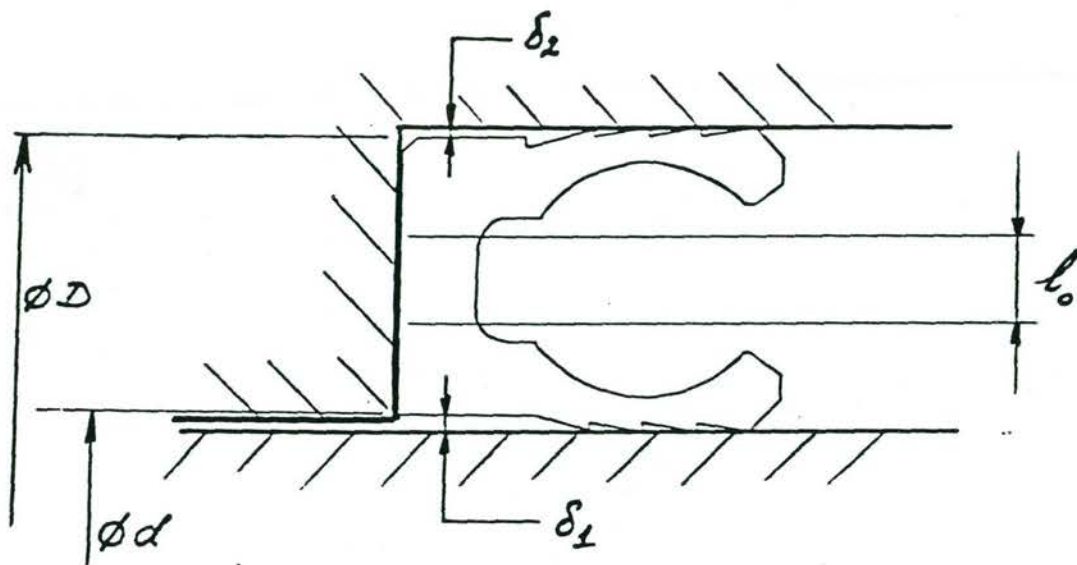


Fig. 6



$(\Delta l)_{nomina} = \delta_1 + \delta_2;$
 $\delta_1^+ = \delta_1$ met min as ϕ en max. seal ϕd
 $\delta_2^+ = \delta_2$ met max. huis ϕ en min. seal ϕD .

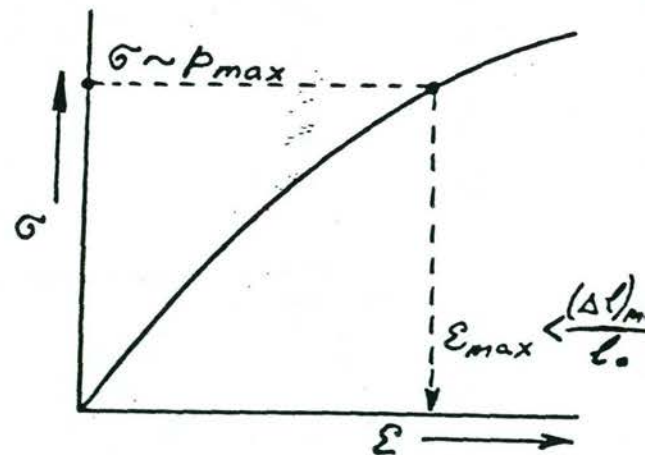
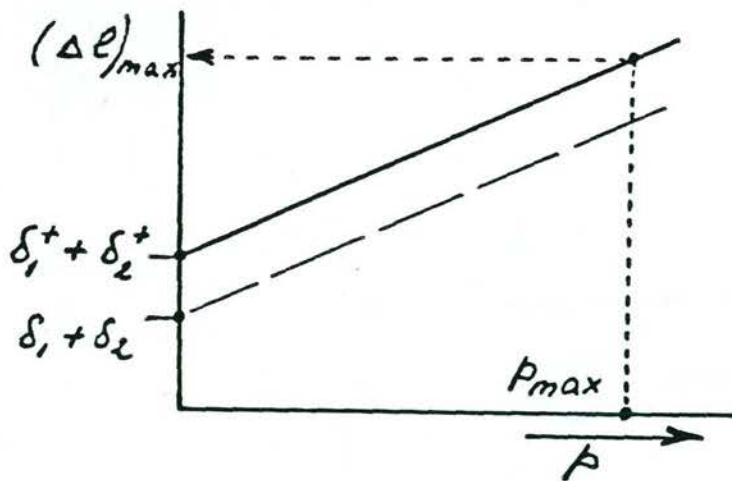


Fig. 7

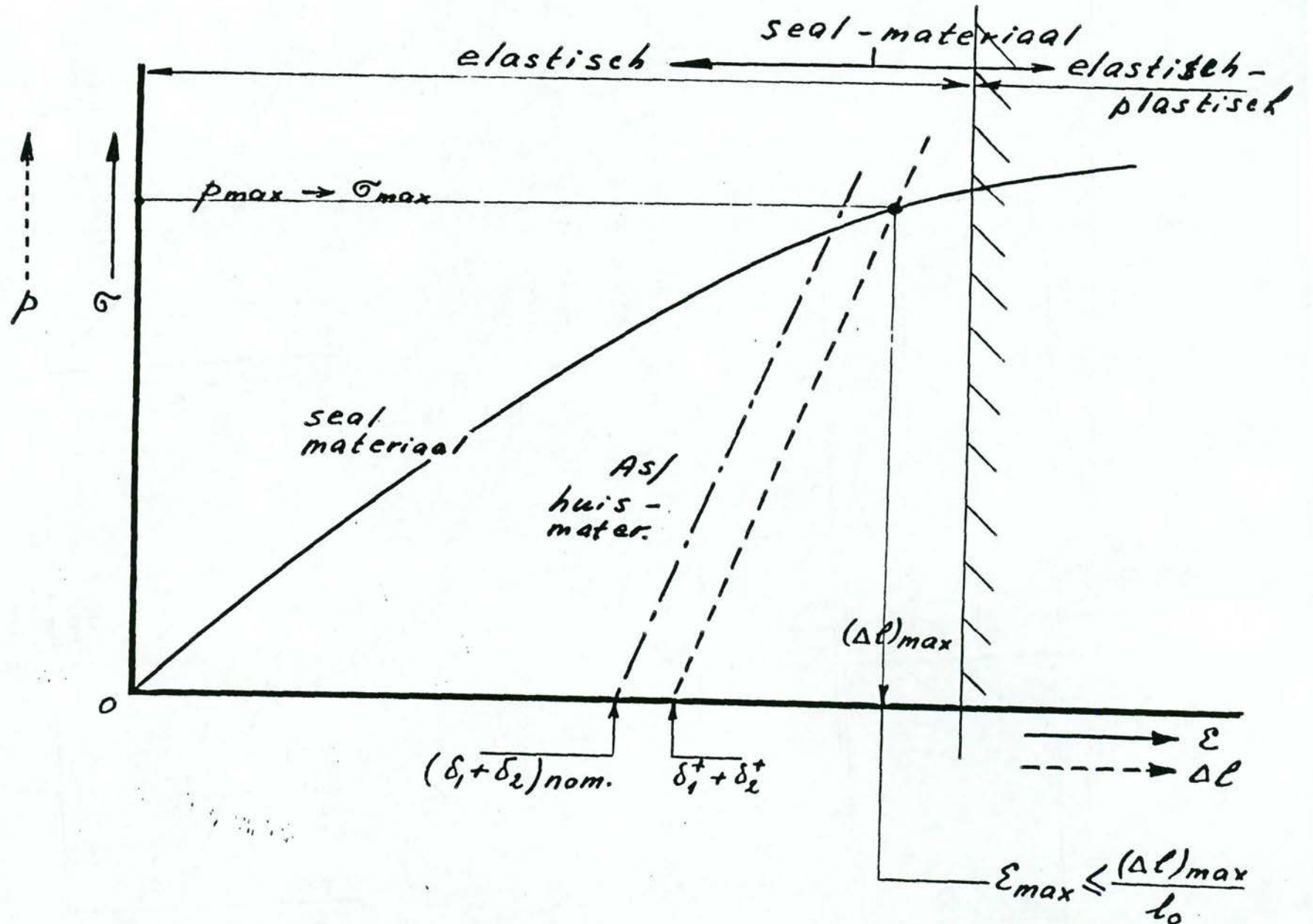


Fig. 8

$\epsilon_{max} \leq \frac{(\Delta l)_{max}}{l_0}$
 om contact tussen
 de seal-rug en
 de as te voorkomen

**3.6 Een rekentoepassing van de mechanische eigenschappen:
computeranalyse van indrukking van een cilinder van PE-UHMW.**

Als voorbeeld wordt in deze paragraaf met behulp van het eindige elementen pakket ABAQUS gerekend aan het spannings- en vervormingsgedrag van een belast proefstuk dat uit PE-UHMW is vervaardigd.

Deze paragraaf dient mede ter inleiding van het volgende hoofdstuk waarin uitvoerig aandacht wordt besteed aan EEM-berekeningen van seals.

Computeranalyse van indrukking van een cilinder van PE-UHMW

Auteur: E.L.J.J. Linders
Identiteitsnummer: 250544

Plaats en datum: Eindhoven, november 1992

Vakcode: 4 S 805
Opdracht: Interne stage (interim-opdracht, 250 SBU)
Begeleiding: prof.dr.ir. M.J.W. Schouten



Vakgroep Werktuigkundig Ontwerpen en Construeren
Faculteit Werktuigbouwkunde
Technische Universiteit Eindhoven

Inhoudsopgave

Symbolenlijst	3
1 Inleiding	4
2 Software en model	5
2.1 Simulatie met een kubusvormig proefstuk	5
2.2 Mesh polyethyleen	5
2.3 Pers	7
3 Materiaal eigenschappen	8
3.1 Handmatige berekening volgens Hoechst	8
3.2 Materiaal beschrijving voor ABAQUS	9
3.2.1 Elastisch gedrag	9
3.2.2 Kruip	9
4 Analyse en resultaten	11
4.1 Wrijving	11
4.2 Resultaten	11
5 Conclusies	14
Literatuurvermelding	15
Bijlage; ABAQUS-programma's	16

Symbolenlijst

A	oppervlak	mm^2
E	elasticiteitsmodulus	N/mm^2
F	kracht	N
h	hoogte	mm
I	indrukking	$\%$
p	druk	N/mm^2
r	straal	mm
r	coördinaat in radiale richting	mm
t	tijd	s
u	verplaatsing	mm
z	coördinaat in axiale richting	mm
μ	wrijvingscoëfficiënt	-
ν	dwarscontractiecoëfficiënt	-

1 Inleiding

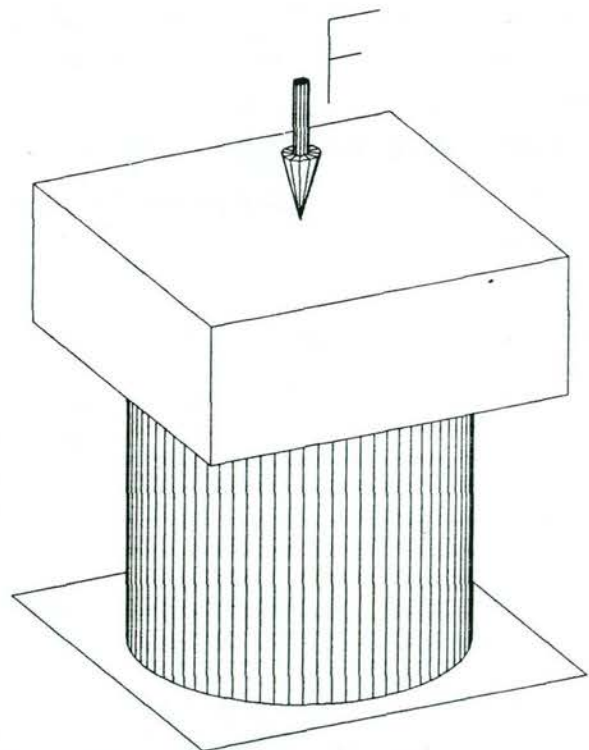
De opdracht van deze interne stage is het simuleren met de computer van een experiment zoals dat door Hoechst is gedaan. Dit experiment onderzoekt hoe een stuk kunststof zich in de tijd gedraagt als het onder invloed van een constante kracht wordt samengeperst. Men constateert dat de indrukking logaritmisch toeneemt. Dit verschijnsel heet kruip.

Het onderzochte materiaal is ultrahoogmoleculair polyethyleen (Engels: polyethylene ultra high molecular weight) van de fabrikant Hoechst. Dit wordt afgekort als PE-UHMW. De volledige aanduiding is PE-UHMW Hostalen GUR 412. Van dit kunststof bestaan twee varianten, namelijk een waarbij het materiaal met roet gevuld is en een zonder roet. Hier wordt alleen het onge vulde kunststof beschouwd.

Het experiment wordt als volgt gemodelleerd. Een stuk kunststof bevindt zich in een pers waarbij de twee helften volledig vlak zijn en dat ook blijven. Aan de onderkant wordt de kunststof opgelegd. Aan de bovenkant wordt het PE-UHMW belast door een constante, voorgeschreven kracht F . Deze kracht wordt op het beproefde materiaal overgebracht door het vlakke oppervlak van de pers.

Figuur 1 laat een schets zien hoe het experiment voorgesteld kan worden. Om de simulatie te kunnen vergelijken met de uitgevoerde proef zijn we vooral geïnteresseerd hoe de indrukking van het onderzochte materiaal toeneemt in de tijd.

In het volgende hoofdstuk wordt een model voor de simulatie opgesteld. Hierbij wordt gekozen voor het experiment waarbij de druk p gelijk is aan 20 N/mm^2 . Dan wordt behandeld hoe de materiaaleigenschappen kunnen worden beschreven. Vervolgens wordt aan de hand van de berekeningsresultaten het model met het experiment vergeleken.



Figuur 1 Principeschets van de gesimuleerde beproeving

2 Software en model

De simulatie wordt doorgerekend volgens de Eindige Elementen Methode. Omdat de geometrie en materiaal analyse niet-lineair is, wordt gebruik gemaakt van het EEM-programma ABAQUS. Bij deze software kan het EEM-probleem niet met behulp van een grafische interactie worden ingevoerd. Het moet in de vorm van een programma worden aangeboden. In de bijlage zijn de benodigde programma's opgenomen.

2.1 Simulatie met een kubusvormig proefstuk

De experimenten van Hoechst zijn uitgevoerd op een kubusvormig proefstuk. De afmetingen zijn $10 \times 10 \times 10$ mm. Het eerste EEM-model is driedimensionaal waarbij het polyethyleen is gemodelleerd door een "mesh" van $6 \times 6 \times 6$ elementen. Deze elementen zijn rechthoekige, massieve elementen. Op de bovenkant wordt via een star oppervlak een constante kracht uitgeoefend. Dit model loop zeer snel vast. Ook met of zonder wrijving tussen het polyethyleen en de pers convergeert het model niet. Het gebruik van andere typen elementen heeft geen succes. In overleg met de begeleider wordt afgezien van het verder modelleren van een kubusvormig proefstuk. In plaats van een kubus wordt voor cilinder gekozen.

2.2 Mesh polyethyleen

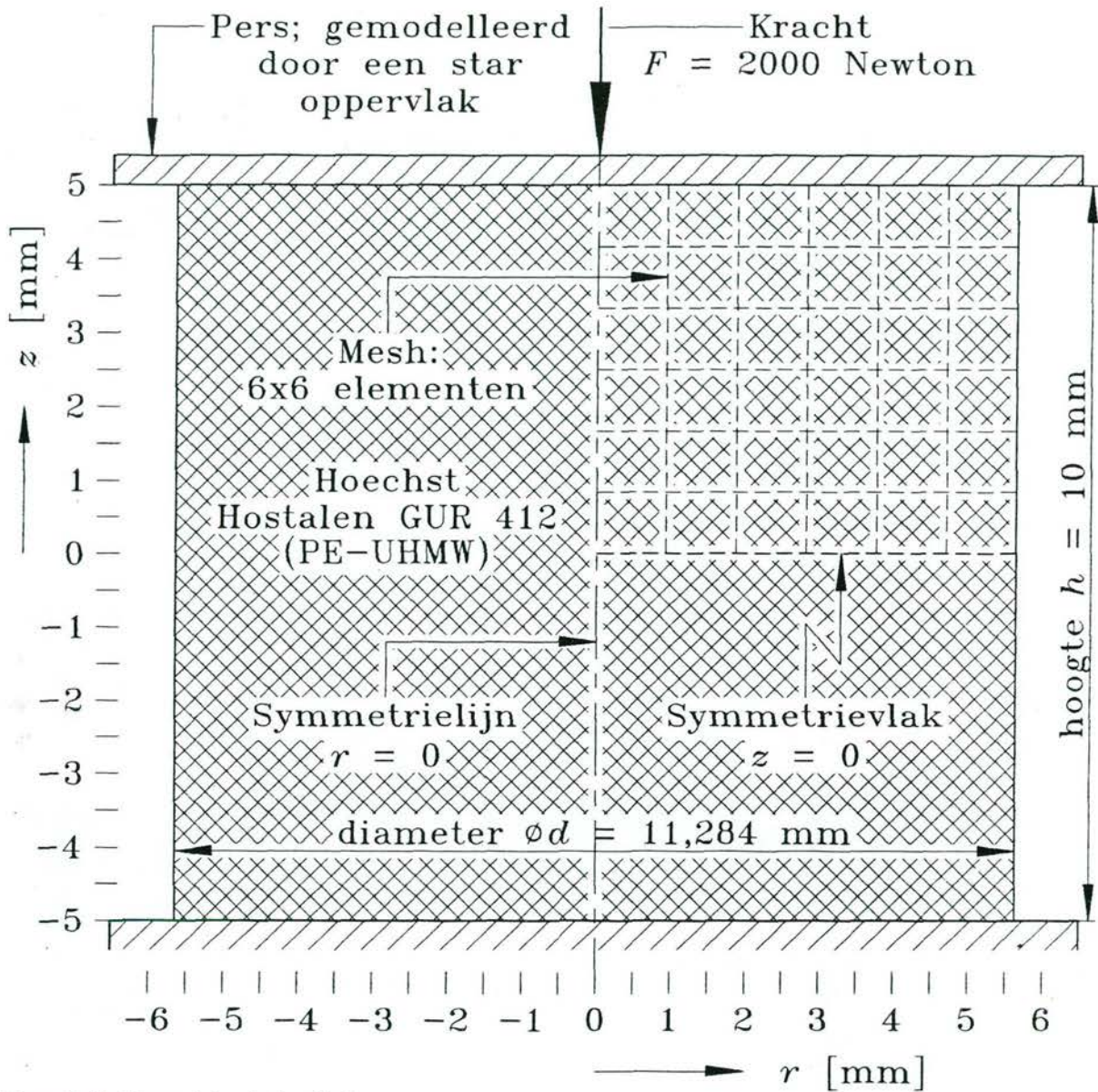
Het proefstuk heeft nu de vorm van een cilinder. De hoogte wordt gelijk gehouden aan de hoogte van de kubus, namelijk $h = 10$ mm. De straal $r_{cilinder}$ wordt zo gekozen dat de cilinder dezelfde hoeveelheid materiaal heeft als de kubus. Dus het volume van de kubus is dan gelijk aan die van de cilinder. Dit is

$$\begin{aligned} V_{kubus} &= V_{cilinder} \\ h^3 &= \pi r^2 h. \end{aligned} \quad (1)$$

De straal van de cilinder is dan gelijk aan

$$r_{cilinder} = \sqrt{\frac{h^2}{\pi}} = 5,642 \text{ mm.} \quad (2)$$

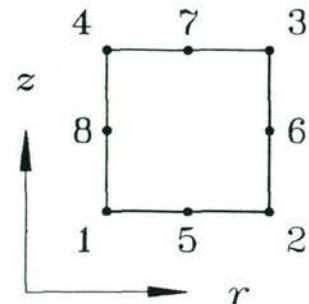
Het probleem is rotatiesymmetrisch. Een voordeel is dat elk knooppunt in dit een driedimensionaal model nu slechts twee vrijheidsgraden (radiaal r en axiaal z) heeft. Er wordt gebruik gemaakt van cilin-



Figuur 2 Model van de ingedrukte cilinder

dercoördinaten. Uit figuur 2 blijkt dat de centerlijn ($r = 0$) van de cilinder een symmetrielij is. Ook kan er een symmetrievlak door $z = 0$ gelegd worden. Door gebruik te maken van de symmetrielij en symmetrievlak hoeft slechts een deel van de cilinder en slechts een helft van de pers te modelleren. Dit bespaart rekentijd.

Het bovengenoemde deel is voorzien van een "mesh" van 6 bij 6 elementen van het ABAQUS-type CAX8R. Dit zijn tweede orde, axisymmetrische, massieve elementen met acht knooppunten per element, twee vrijheidsgraden per knooppunt en gereduceerde integratie. De volgorde van knooppuntnummering wordt in figuur 3 getoond.



Figuur 3 Knooppuntnummering van element CAX8R

2.3 Pers

Ten opzichte van kunststof is de stijfheid van de pers zeer groot. De elasticiteitsmodulus van staal ($E_{\text{staal}} \approx 200 \text{ kN/mm}^2$) is ongeveer 700 maal groter dan die van PE-UHMW ($E_{\text{PE}} \approx 300 \text{ N/mm}^2$, zie volgend hoofdstuk). De pers kan dus door een star oppervlak worden gemodelleerd. Dit oppervlak kan alleen axiaal (in z -richting) bewegen. Op dit vlak staat een naar beneden gerichte kracht F van 2000 Newton. Deze kracht is gekozen omdat er dan op $t = 0$ een druk van

$$p = \frac{F}{A} = \frac{2000 \text{ N}}{\pi r_{\text{cilinder}}^2} = 20 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (3)$$

op het polyethyleen staat.

3 Materiaal eigenschappen

3.1 Handmatige berekening volgens *Rijkswaterstaat*

Aan de hand van proeven geeft *Rijkswaterstaat* een formule waarmee de indrukking op een eenvoudige wijze met de hand kan worden bepaald [1]. Deze vergelijking is

$$I = p \cdot [A + B \cdot \log(t)] \quad (4)$$

waarbij (let op eenheden):

I	indrukking	%
p	druk	N/mm ²
A	constante	
B	constante	
t	tijd	min.

Voor het onge vulde polyethyleen en een druk p van 20 N/mm² geeft Hoechst voor de constanten de volgende waarden: $A = 0,48$; $B = 0,17$. In figuur 5 wordt de bovenstaande formule met deze constanten weergegeven (onderbroken lijn).

Echter de constanten A en vooral B zijn niet onafhankelijk van de druk p . Bij $p = 5$ N/mm² is de waarde voor B gelijk aan 0,09. De waarde voor A is dan 0,49. Het verschil tussen de twee waarden van constante A is zo klein dat we aannemen dat constante A onafhankelijk is van de druk. Voor de parameter B nemen we een lineair verband tussen de bekende waarden. De vergelijking voor B wordt dan

$$B = B_0 + B_1 \cdot p. \quad (5)$$

Als we de bovenstaande waarden voor parameter B en druk p invullen en oplossen, krijgen we de volgende constanten: $B_0 = 0,063$ en $B_1 = 0,00533$. Vergelijking (4) voor de indrukking wordt dan

$$I = p \cdot \{A + [B_0 + B_1 \cdot p] \cdot \log(t)\} \quad (6)$$

waarbij:

$$\begin{aligned} A &= 0,48 \\ B_0 &= 0,063 \\ B_1 &= 0,00533. \end{aligned}$$

3.2 Materiaal beschrijving voor ABAQUS

In deze paragraaf wordt onderzocht hoe de eigenschappen van het materiaal PE-UHMW Hostalen GUR 412 ongevuld van Hoechst kunnen worden gemodelleerd in het EEM-programma ABAQUS. Het materiaalgedrag wordt beschreven door middel van elasticiteit en kruip.

3.2.1 Elastisch gedrag

We nemen aan dit isotroop is. Het elastisch gedrag wordt beschreven door de elasticiteitsmodulus en de dwarscontractiecoëfficiënt. In de literatuur worden de volgende waarden voor de elasticiteitsmodulus E [1] en de dwarscontractiecoëfficiënt ν [2] gevonden:

- $E \approx 1000 \text{ N/mm}^2$
- ν tussen 0,4 en 0,5. Neem: $\nu = 0,45$.

3.2.2 Kruip

Met het EEM-programma ABAQUS kan kruip worden gemodelleerd. Dit moet dan wel zelf geprogrammeerd worden zoals uit het programma in de bijlage blijkt. De software vraagt voor de afgeleide van de rek (indrukking) in de tijd. Deze wordt dan als volgt gebruikt:

$$\Delta \epsilon = \dot{\epsilon} \cdot \Delta t = \dot{\epsilon} \cdot \Delta t. \quad (7)$$

Hiertoe wordt de afgeleide bepaald van vergelijking (6):

$$\dot{\epsilon} = \frac{\partial I}{\partial t} = \frac{p \cdot [B_0 + B_1 \cdot p]}{t \cdot \ln 10}. \quad (8)$$

Het gebruik van deze vergelijking in deze vorm is in ABAQUS niet mogelijk. Er treden namelijk twee problemen op.

Als de simulatie op $t = 0$ begint, geeft bovenstaande vergelijking een oneindige grote waarde. Het programma loopt dan meteen vast. Dit is op te lossen door de tijd niet bij 0 te laten beginnen maar bij een zeer kleine, positieve waarde. Bij ABAQUS kan dit worden gedaan door in bovenstaande formule de tijd t te vervangen door de som van de tijd met een klein getal (10^{-9}). Dit heeft geen invloed op de resultaten.

Verder gebruikt ABAQUS niet dezelfde eenheden als in de vergelijkingen (4) en (6). In de onderstaande tabel zijn de verschillen weergegeven. Als men vergelijking (6) aangepast zodat de eenheden overeenkomen met die van de software dan krijgt men:

Grootheid	Symbool	Eenheid	
		Formule (4) en (6)	ABAQUS
Druk	p	N/mm ²	N/m ²
Tijd	t	minuut	seconde
Indrukking	I	%	1

$$I = \frac{1}{100} \cdot \frac{p}{10^6} \cdot \left\{ A + \left[B_0 + B_1 \cdot \frac{p}{10^6} \right] \cdot \log \left(\frac{t}{60} \right) \right\} \quad (9)$$

De afgeleide is dan

$$\dot{I} = \frac{\frac{p}{10^6} \cdot \left[B_0 + B_1 \cdot \frac{p}{10^6} \right]}{100 \cdot \ln 10 \cdot (t + 10^{-9})} \quad (10)$$

Bovenstaande vergelijking wordt in een subroutine voor kruip gebruikt.

4 Analyse en resultaten

4.1 Wrijving

Tussen het oppervlak van de pers en de buitenkant van de polyethyleen wordt wrijving gemodelleerd. Verschillende waarden voor de wrijvingscoëfficiënt zijn doorgerekend, maar de beste resultaten zijn verkregen met de volgende waarden:

- wrijvingscoëfficiënt $\mu = 10^{15}$
- stiffness in stick: 10^{15} N/m².

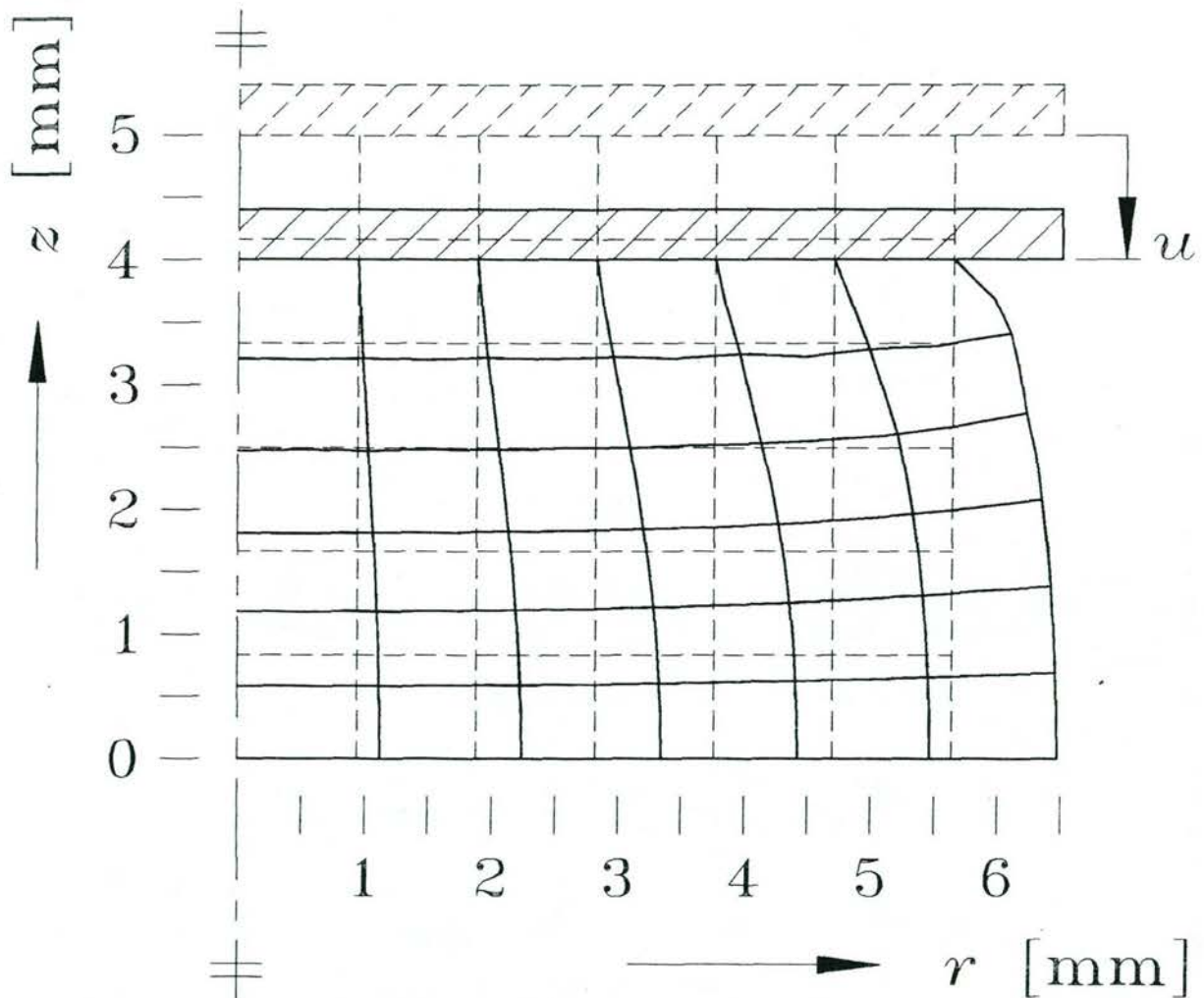
Het effect hiervan is dat het oppervlak van de pers als zeer ruw kan worden beschouwd. De elementen die de pers raken, zullen dus geen of slechts een kleine radiale verplaatsing hebben. Door de hoge wrijving is de verplaatsing van de pers (u in figuur 4) kleiner dan wanneer er geen wrijving is.

4.2 Resultaten

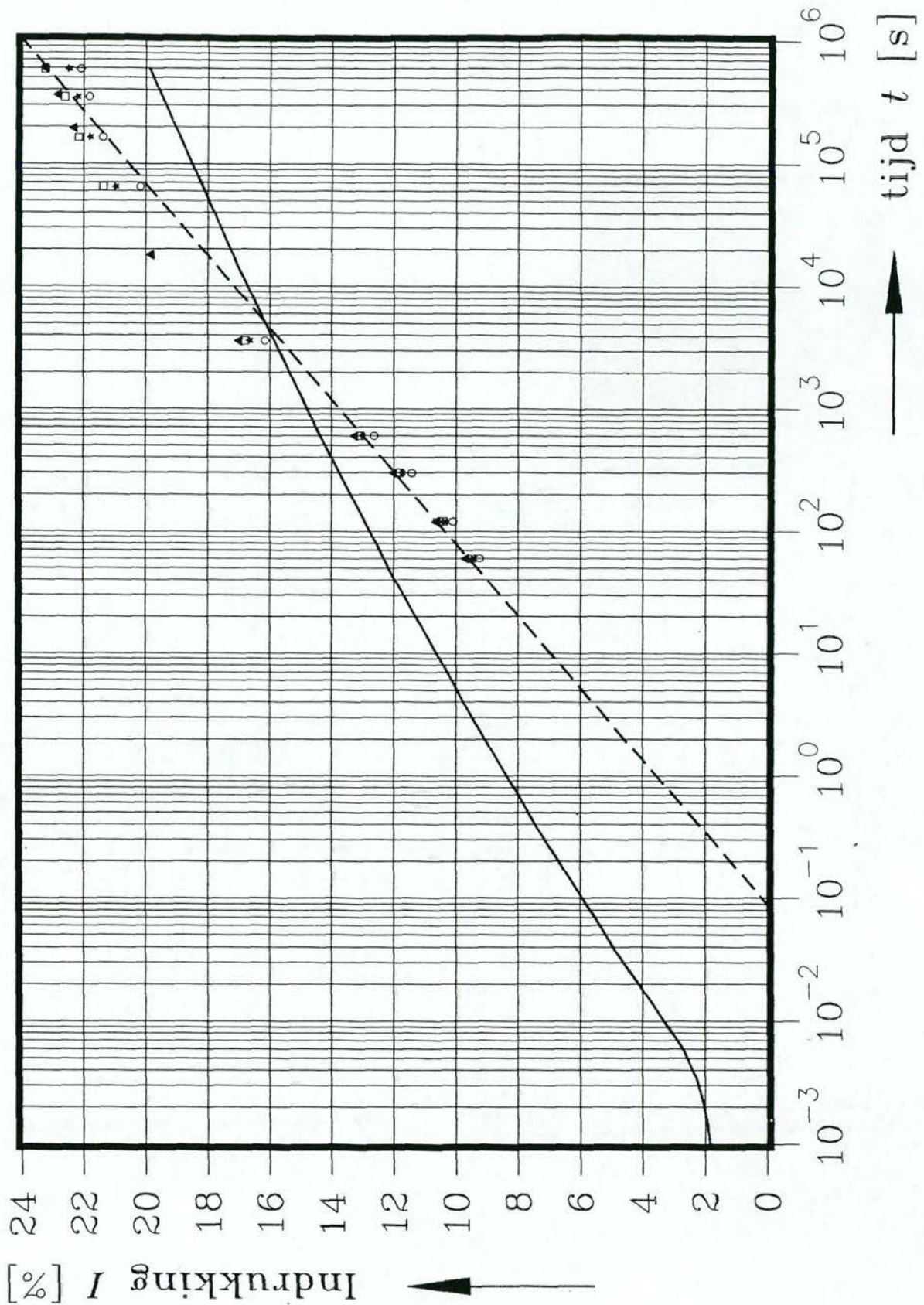
Met behulp van de programma's in de bijlage is het experiment gesimuleerd. Het polyethyleen wordt op druk belast door een kracht van 2000 Newton. Het betreft ongevuld materiaal. De figuren 4 en 5 laten de resultaten zien.

Figuur 4 toont de vervormde "mesh" aan het einde van de simulatie ($t = 6 \cdot 10^5$ s). Ter vergelijking wordt ook de onvervormde "mesh" aan het begin van de simulatie getoond. Zoals verwacht, hebben de elementen aan de bovenkant geen radiale verplaatsing.

De indrukking I wordt bepaald door de verplaatsing van de pers u te delen door de oorspronkelijke hoogte van het proefstuk. Vanwege het symmetrievlak is slechts de bovenste helft gemodelleerd en daarom wordt hier voor de oorspronkelijke lengte 5 mm gebruikt. In figuur 5 is de indrukking als functie van de tijd weergegeven. De schaal voor de tijd is logaritmisch.



Figuur 4 De vervorming van de elementen bij $t = 10^4$ minuten. De onderbroken lijnen laten de onvervormde elementen op $t = 0$ zien. De kunststof cilinder is belast met een kracht F van 2000 N



Figuur 5 De indrukking van de PE-UHMW I als functie van de tijd t . De onderbroken lijn is de indrukking volgens de formule van Hoechst. De symbolen \triangle , \square , \star en \circ zijn de gegevens van de experimenten die door Hoechst zijn gedaan. De doorgetrokken lijn is de indrukking zoals die met het programma ABAQUS is berekend.

5 Conclusies

- De wrijving tussen het kunststof en de pers heeft een invloed op de indrukking. Een hoge wrijvingscoëfficiënt heeft kleine indrukking tot gevolg.
- De indrukking van de simulatie komt in orde van grootte overeen met de waarde zoals die verkregen wordt uit de vergelijking van Hoechst.
Uit figuur 5 blijkt dat de formule van Hoechst ook niet door alle experimentele punten gaat. Als men zelf een lijn door de experimenteel bepaalde punten trekt, dan krijgt men een licht gebogen lijn bij een logaritmische tijdsschaal. De lijn die verkregen is uit de simulatie vertoont ook een gebogen lijn. De simulatie gaat echter niet door de experimenteel bepaalde punten.
- Als er betere materiaalgegevens beschikbaar zijn, dan kan men pas goed beoordelen of een computer analyse experimenten kan vervangen. De resultaten die hier bepaald zijn, zijn veel belovend.

Literatuurvermelding

- [1] Brief van Hoechst aan de heer Ros, Rijkswaterstaat van Hoechst met de gegevens van de experimenten met het PE-UHMW Hostalen GUR 412.

- [2] Saechtling, Hansjürgen;
Kunststoff Taschenbuch.
Carl Hanser Verlag, München, 23^e uitgave, 1986.

- [3] Harper, Charles A.;
Handbook of Plastics and Elastomers.
McGraw-Hill Book Company, New York.

Bijlage

ABAQUS-programma's

```
*****
** BESTAND : PEAXI.INP
** AUTEUR : E. LINDERS
** DATUM : 26 OKTOBER 1992
** PROGRAMMA: ABAQUS 4.9
** EENHEDEN : AFMETINGEN: METER; KRACHTEN: NEWTON; TIJD: SECONDE
*****
**
*HEADING
HOECHST HOSTALEN PE-UHMW GUR 412 ONGEVULD AXISYMMETRISCH
**
*****
** KNOOPPUNTEN
*****
**
*NODE,NSET=PERS
9999,0.,5.E-3
*NODE
1,
13,5.641895835478E-3
1201,0.,5.E-3
1213,5.641895835478E-3,5.E-3
*NGEN,NSET=MIDDLE
1,13
*NGEN,NSET=TOP
1201,1213
*NFILL,NSET=PE
MIDDLE, TOP,12,100
*NSET,NSET=AXIS,GENERATE
1,1201,100
**
*****
** ELEMENTEN EN STAR OPPERVLAK
*****
**
*ELEMENT,TYPE=CAX8R,ELSET=PE
1,1,3,203,201,2,103,202,101
*ELGEN,ELSET=PE
1,6,2,1,6,200,100
*ELEMENT,TYPE=IRS21A
9901,1201,1203,9999
*ELEMENT,TYPE=IRS22A
9907,1213,1113,1013,9999
```

```

*ELGEN, ELSET=CONTACT
9901, 6, 2, 1
9907, 6, -200, 1
*RIGID SURFACE, ELSET=CONTACT, TYPE=SEGMENTS
START, 10.E-3, 5.E-3
LINE, -1.E-4, 5.E-3
**
*****
** MATERIAAL BESCHRIJVING
*****
**
*SOLID SECTION, ELSET=PE, MATERIAL=GUR_412
*MATERIAL, NAME=GUR_412
*ELASTIC
1000.E6, 0.45
*CREEP, LAW=USER
**
*****
** INTERFACE KUNSTSTOF - PERS
*****
**
*INTERFACE, ELSET=CONTACT
*FRICTION
1.E15, 1.E15
**
*****
** KINEMATISCHE RANDVOORWAARDEN
*****
**
*BOUNDARY
MIDDLE, 2
AXIS, 1
PERS, 1
PERS, 6
**
*****
** MPC-EQUATION IRS ELEMENTEN
*****
**
*NSET, NSET=MIDSIDE, GENERATE
1202, 1212, 2
*NSET, NSET=LEFT, GENERATE
1201, 1211, 2
*NSET, NSET=RIGHT, GENERATE
1203, 1213, 2
*MPC
1, MIDSIDE, LEFT, RIGHT
**
*****
** PRE-PROCESSING PLOTS
*****
**
*PLOT
*DRAW
*DRAW, NODENUM
*DRAW, ELNUM

```

```

**
*****
** SUBROUTINE KRUIP
*****
**
*USER SUBROUTINE
  SUBROUTINE CREEP(DECRA, DESWA, ECO, ESWO, P, QTILD, TEMP, DTEMP,
1PREDEF, DPRED, TIME0, DTIME, STATEV, CMNAME, LEXIMP)
C
  IMPLICIT REAL*8(A-H, O-Z)
C
  CHARACTER*8 CMNAME
C
  DIMENSION DECRA(5), DESWA(5), PREDEF(1), DPRED(1), STATEV(1)
C
  DEFINE CONSTANTS
C
  B0=0.063
  B1=5.33E-3
C
  DRUK=QTILD*1.E-6
  TIJD=TIME0+1.E-9
  DECRA(1)=(DRUK/100)*(B0+B1*DRUK)/(2.302585092994*TIJD)*DTIME
  RETURN
  END
**
*****
** INDRUKKING KUNSTSTOF PE
*****
**
*STEP, AMPLITUDE=STEP, INC=1000, CYCLE=10, NLGEOM, SUBMAX
*VISCO, PTOL=1., GETOL=5.E-3
1.E-3, 6.E5
*LOAD
PERS, 2, -2000.
*PRINT, RESIDUAL=NO, FREQUENCY=1
*EL PRINT, ELSET=PE, FREQUENCY=5
S, E
MISES, CE11, CE22, CE33, CE12, CEEQ, CEMAG
*EL PRINT, ELSET=CONTACT, FREQUENCY=5
S, E
*NODE PRINT, NSET=PERS, FREQUENCY=1
U2, RF
*PLOT, FREQUENCY=5
*DISPLACED
U
*NODE FILE, NSET=PERS
U
*END STEP
**
*****
** EINDE PROGRAMMA
*****

```

```

*****
** BESTAND   : POSTAXI.INP
** AUTEUR    : E. LINDERS
** DATUM     : 22 OKTOBER 1992
** PROGRAMMA: ABAQUS 4.9
** EENHEDEN  : AFMETINGEN: METER; KRACHTEN: NEWTON; TIJD: SECONDE
*****
** POST-PROCESSING RESULTATEN
*****
**
**
*HEADING
HOECHST HOSTALEN PE-UHMW GUR 412 ONGEVULD AXISYMMETRISCH
**
*POST FILE
VERPLAATSING VAN DE PERS
*HISTORY, TIME=VISCO, GRID=BOTH, XSCALE=LOG
TIJD IN SEC.          INDRUKKING
U2, 1000., INDRUKK. IN MM, 9999
*HISTORY, TIME=VISCO, GRID=BOTH, XSCALE=LOG
TIJD IN SEC.          INDRUKKING
U2, -20000., INDRUKK. IN %, 9999
**
*****
** EINDE PROGRAMMA
*****

```

4 **Eindige elementen berekeningen als gereedschap bij het ontwerpen van een seal.**

Het berekenen van spanningen en vervormingen in afdichtingen en met name van de belangrijke contactspanningsverdeling tussen seal en stang is met analytische methoden niet uitvoerbaar.

De grote vervormingen en het niet-lineaire materiaalgedrag maken dit tot een gecompliceerd probleem.

Op dit moment is het rekenen met eindige elementenpakketten de enige manier om dit probleem op te lossen.

Deze techniek is hiervoor in ontwikkeling en het is verre van een standaard berekening om tot de juiste contactdrukverdeling te komen.

In dit hoofdstuk wordt verslag gedaan van de ontwikkeling van deze methode.

De tekst van dit hoofdstuk is als afzonderlijk ingebonden deelrapport bij dit rapport gevoegd met de titel:

"Static analysis of high pressure seals".

Voor de compleetheid zijn de titelpagina en de inhoudsopgave van het betreffende deelrapport hier opgenomen.

Static analysis
of high pressure seals

Development of a calculation method

Alex Bron (id.nr. 206847)

Eindhoven University of Technology
Department of Mechanical Engineering
Power Transmissions and Tribology Group

Master thesis

Coach: Prof.dr.ir. M.J.W. Schouten
ir. E.A. Kaas

October 1993

Contents

Summary	2
List of symbols	3
Contents	4
Introduction	6
Chapter 1: Introduction to the Finite Element Method.....	9
1.1: Introduction	9
1.2.1: Structural Mechanics; theory	10
1.2.2: Evaluation for a solid body	12
1.3: Theory of the finite element method.....	17
1.4: Special element types for performance improvement	21
1.5: Hyperelastic materials	22
1.6: Large displacements.....	23
1.7: Contact problems.....	25
Chapter 2: Static analysis of a seal	27
2.1: Strategy for a FEM analysis	27
2.1.1: Problem definition	27
2.1.2: Mesh definition	28
2.1.3: Boundary conditions.....	31
2.1.4: Solving	32
2.1.5: Post processing	33
2.1.6: Presentation	33
2.2: Method for the analysis of a high pressure seal	34
2.3: Problem definition for a high pressure seal	34
2.4: Mesh generation of the high pressure seal	36
2.5: History definition.....	37
2.6: Solving process for the high pressure seal	38
2.7: Post processing	38
2.8: Presentation of the results	39
Chapter 3: Second application of the analysis method	40
3.1: Problem definition for the step seal	40
3.2: Mesh definition	41
3.3: History definition.....	42
3.4: Running the calculation	42

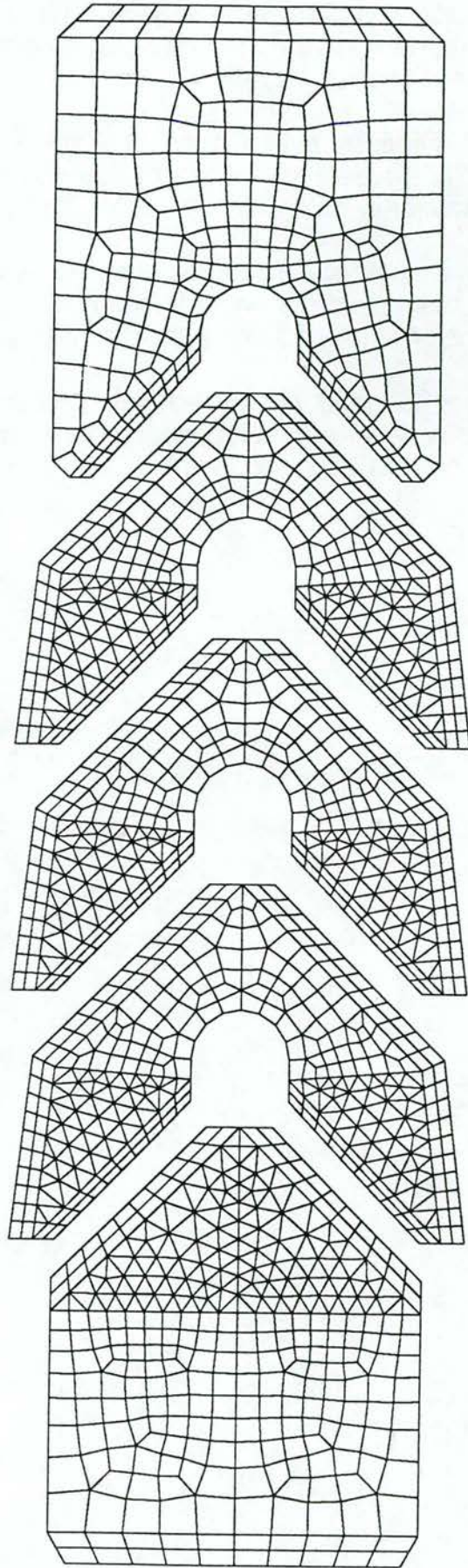
Chapter 4: Conclusions and recommendations	43
4.1: Conclusions	43
4.2: Recommendations.....	44
Literature	45
Appendices	46
Appendix A	46
Appendix B	63

Met de ontwikkelingen in deze rekentechnieken tot nu toe, zoals beschreven in de passages hiervoor, kan het gedrag van seals die uit een element bestaan of uit een seal-element en een veer, goed worden gesimuleerd. Dit is het geval voor de enkelvoudige seal van het U-type.

Bij seals die uit meerdere seal-elementen bestaan zoals sets van dakvormmanchetten of de stepseal treden tengevolge van de onderlinge beïnvloeding en de grote vervormingen, nog grote problemen op bij het rekenen.

Daardoor zijn wel de eerste aanzetten voor het behandelen van seals van deze soort gemaakt kunnen worden maar konden deze geometrieën binnen het kader van dit onderzoek nog niet tot een oplossing worden gebracht.

Als indicatie voor de stand van de techniek zijn aansluitend wel voor een bepaalde configuratie van een dakvorm-set gegeven: de elementverdeling, de spanningen in x en y-richting, de Von Mises-spanning en de vervorming.



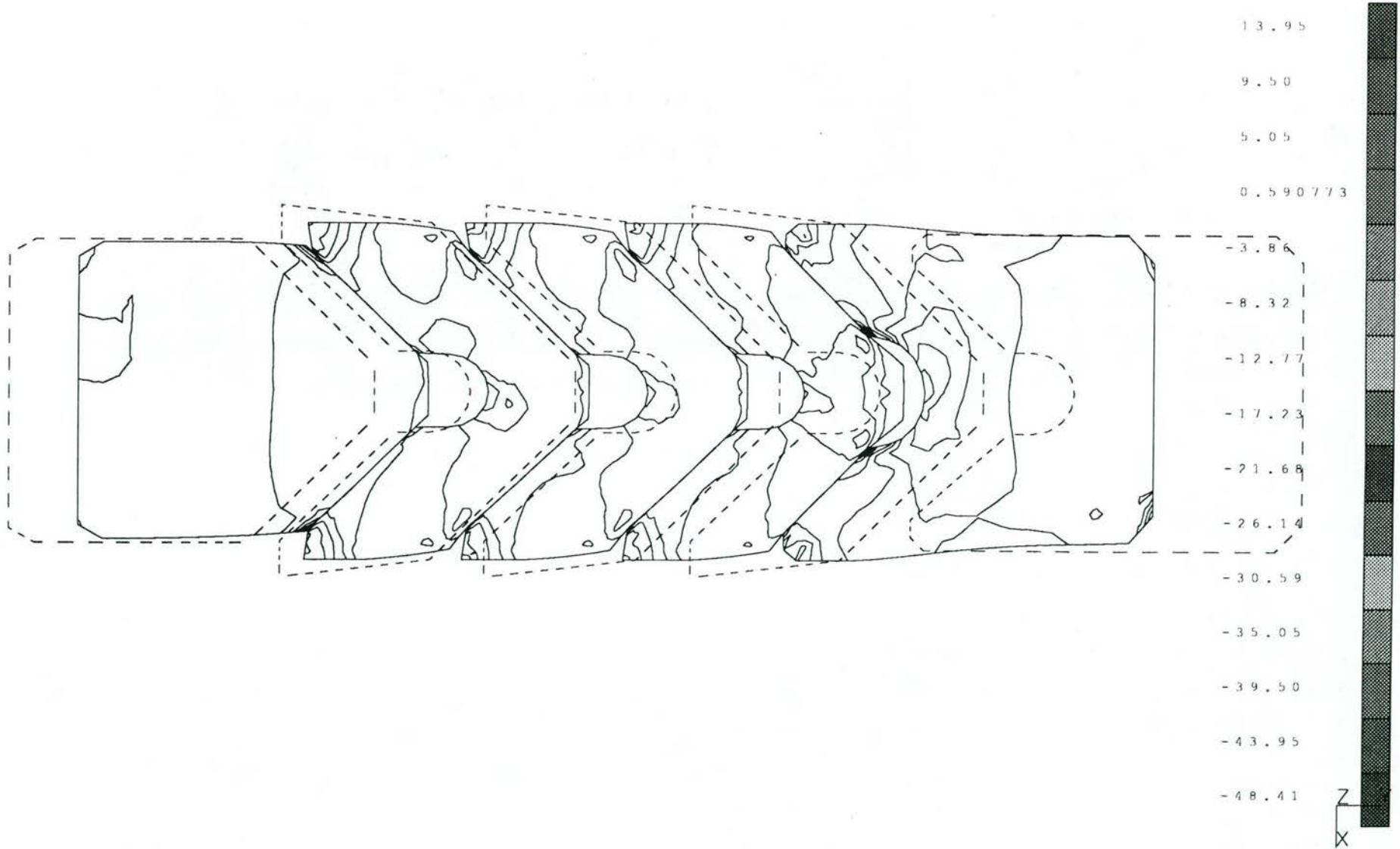
ABAQUS 4-9-1 : *STATIC

LOAD SET: 2 TIMESTEP: 60 TIME: 1.9691610

FRAME OF REF: GLOBAL

STRESS - X MIN: -52.86 MAX: 18.41

165

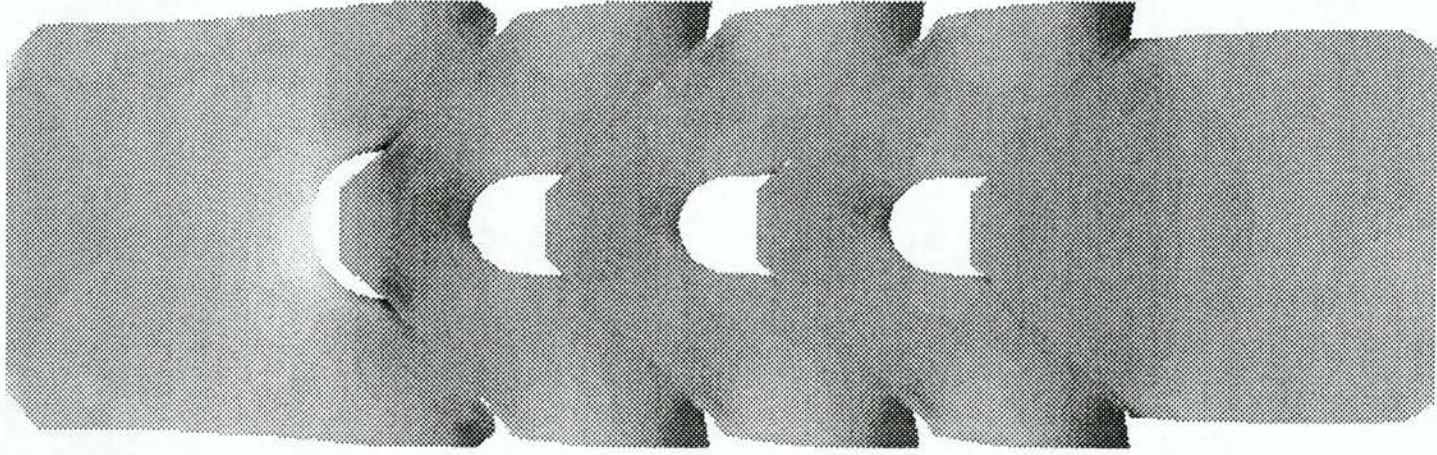
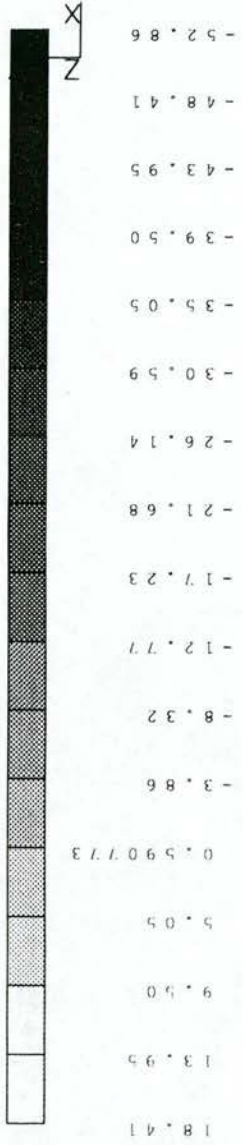


AHA005 4-9-1 : *STATIC

LOAD SET: 2 TIMESTEP: 60 TIME: 1.9691610

FRAME OF REF: GLOBAL

STRESS - X MIN:-52.86 MAX: 18.41



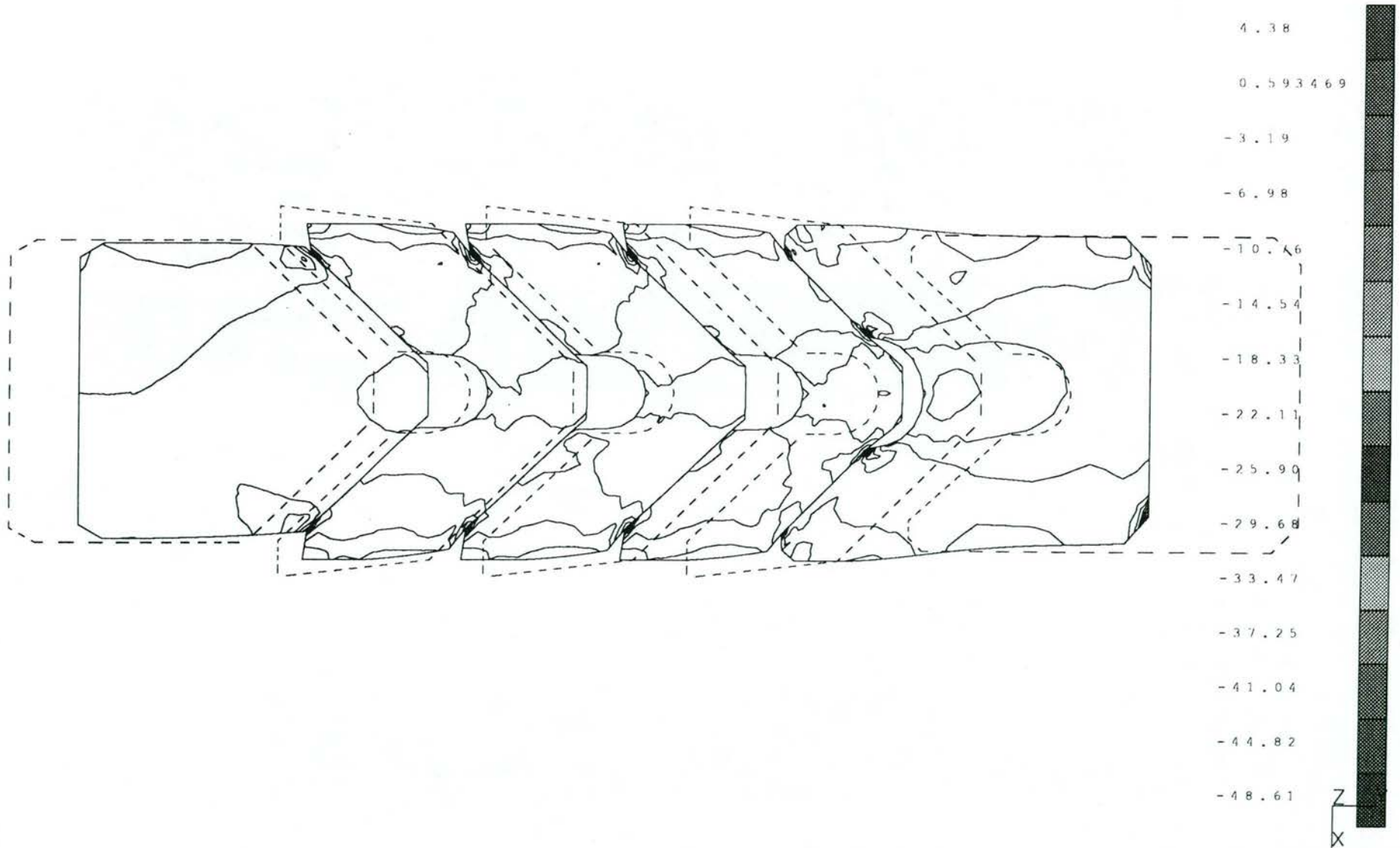
ABAQUS 4-9-1 : *STATIC

LOAD SET: 2 TIMESTEP: 60 TIME: 1.9691610

FRAME OF REF: GLOBAL

STRESS - Y MIN: -52.39 MAX: 8.16

167



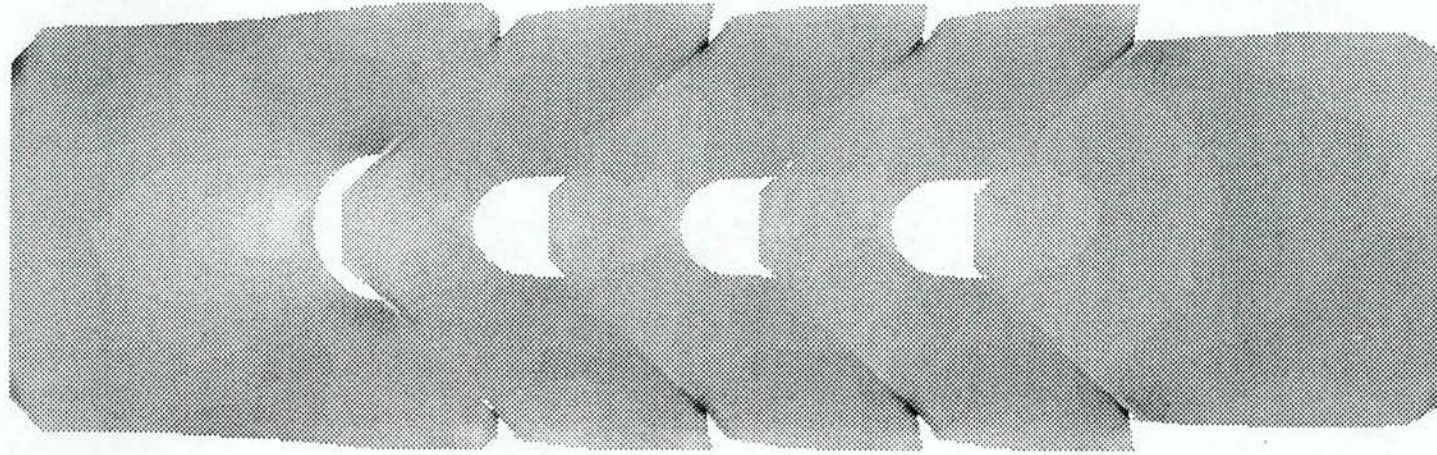
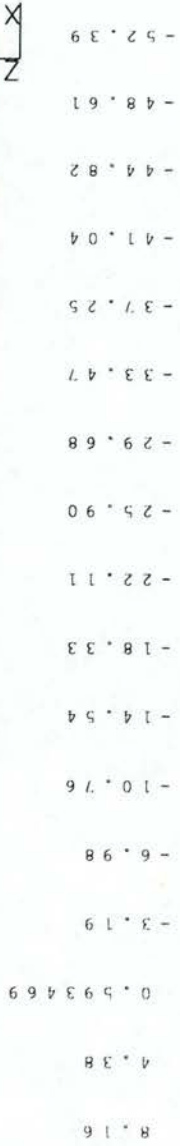
ABAQUS 4-9-1 : *STATIC

LOAD SET: 2 TIMESTEP: 60

TIMER: 1.9691610

FRAME OF REF: GLOBAL

STRESS - Y MIN:-52.39 MAX: 8.16



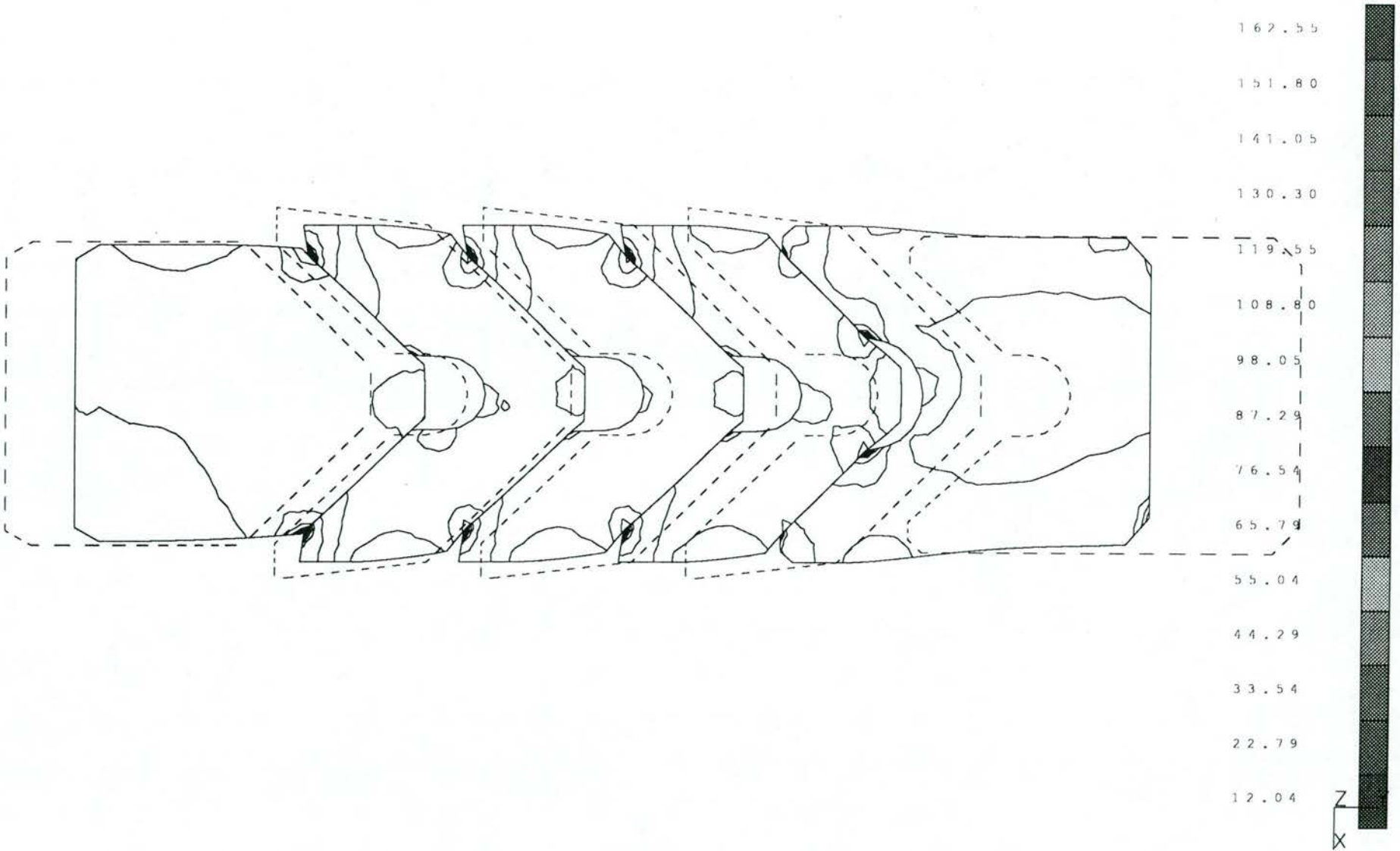
ABAQUS 4-9-1 : *STATIC

LOAD SET: 2 TIMESTEP: 60 TIME: 1.9691610

FRAME OF REF: GLOBAL

STRESS - VON MISES MIN: 1.29 MAX: 173.30

169

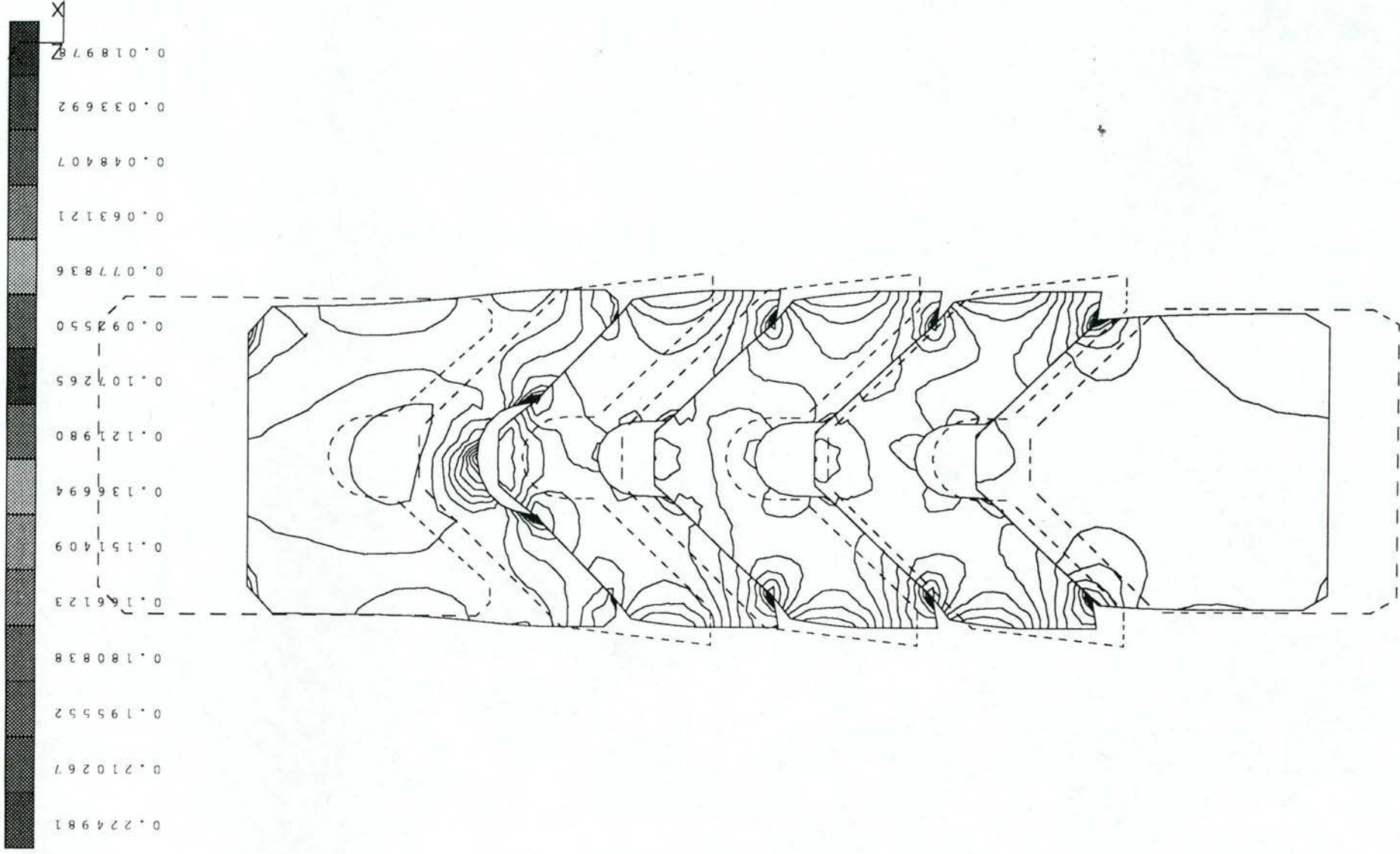


ABR00S 4-9-1 : *STATIC

LOAD SET: 2 TIMESTEP: 60 TIME: 1.9691610

FRAME OF REF: GLOBAL

STRAIN - VON MISES MIN: 0.004263 MAX: 0.239696



5 Vervaardiging van seals ten behoeve van modeltests.

Ten behoeve van de wrijvingsmetingen in de modeltests met \varnothing 50 mm stang werden seals vervaardigd.

De volgende seals werden getest:

- Dakvorm-manchetten vervaardigd van:
 - Canvas-Rubber, fabrikaat Merkel
 - UHMWPE-zwart, deze seals zijn speciaal voor dit doel vervaardigd. Daarbij werden de afmetingen gekozen zoals deze door Merkel worden gehanteerd.
- Step-seals, volgens het fabrikaat Busak / Shamban

De hierna volgende informatie werd samengesteld uit de NC-files waarmee de sets dakvorm-manchetten werden vervaardigd uit UHMWPE.

X, Z coördinaten van de seals

(Afgeleiden van de machine NC list)

Roof- shaped seal set (endless)

Reference No. B0008 120.647

Series: ES

House dimension [mm]:

$D: \varnothing 60 H11 \quad H11 = \begin{matrix} +140 \mu\text{m} \\ 0 \mu\text{m} \end{matrix}$

$d: \varnothing 50 f8 \quad f8 = \begin{matrix} -25 \mu\text{m} \\ -64 \mu\text{m} \end{matrix}$

$l: 16^{+0.2\text{mm}}$

NB. De X-coördinaten zijn diametrale maten. !!!

S10			S11			S12		
Regel	X [mm]	Z [mm]	Regel	X [mm]	Z [mm]	Regel	X [mm]	Z [mm]
N170	55.800	0.000	N100	61.379	1.000	N100	60.579	1.000
N180	59.500	-1.850	N110	55.000	-2.189	N110	55.000	-1.789
N190	59.500	-4.929	N130	48.621	1.000	N130	49.421	1.000
N200	58.958	-5.400	N140	55.000	-2.189	N140	55.000	-1.789
N420	54.200	0.000	N150	55.000*	-2.306*	N150	55.000*	-2.100*
N430	50.500	-1.850	N320	49.244	1.000	N240	58.300	0.500
N440	50.500	-4.929	N330	50.000	-2.206	N250	59.700	-0.200
N450	51.042	-5.400	N340	54.400	-4.406	N260	59.700	-5.375
N520	61.500	-5.300	N440	60.756	1.000	N270	58.691	-5.880
			N450	60.000	-2.206	N450	51.700	0.500
			N460	55.600	-4.406	N460	50.300	-0.200
			N530	-62.500	-4.306	N470	50.300	-5.375
			N540	-52.000	-4.306	N480	51.309	-5.880

De met een "*" gemerkte maten, hebben betrekking op het middelpunt van een cirkelboog met een radius van 0.6 mm.

X, Z coördinaten van de seals

(Afgeleiden maten van de complete seal set)

Roof- shaped seal set (endless)

Reference No. B0008 120.647

Series: ES

House dimension [mm]:

D: 060 H11 H11 = $\begin{matrix} +140 \mu\text{m} \\ 0 \mu\text{m} \end{matrix}$

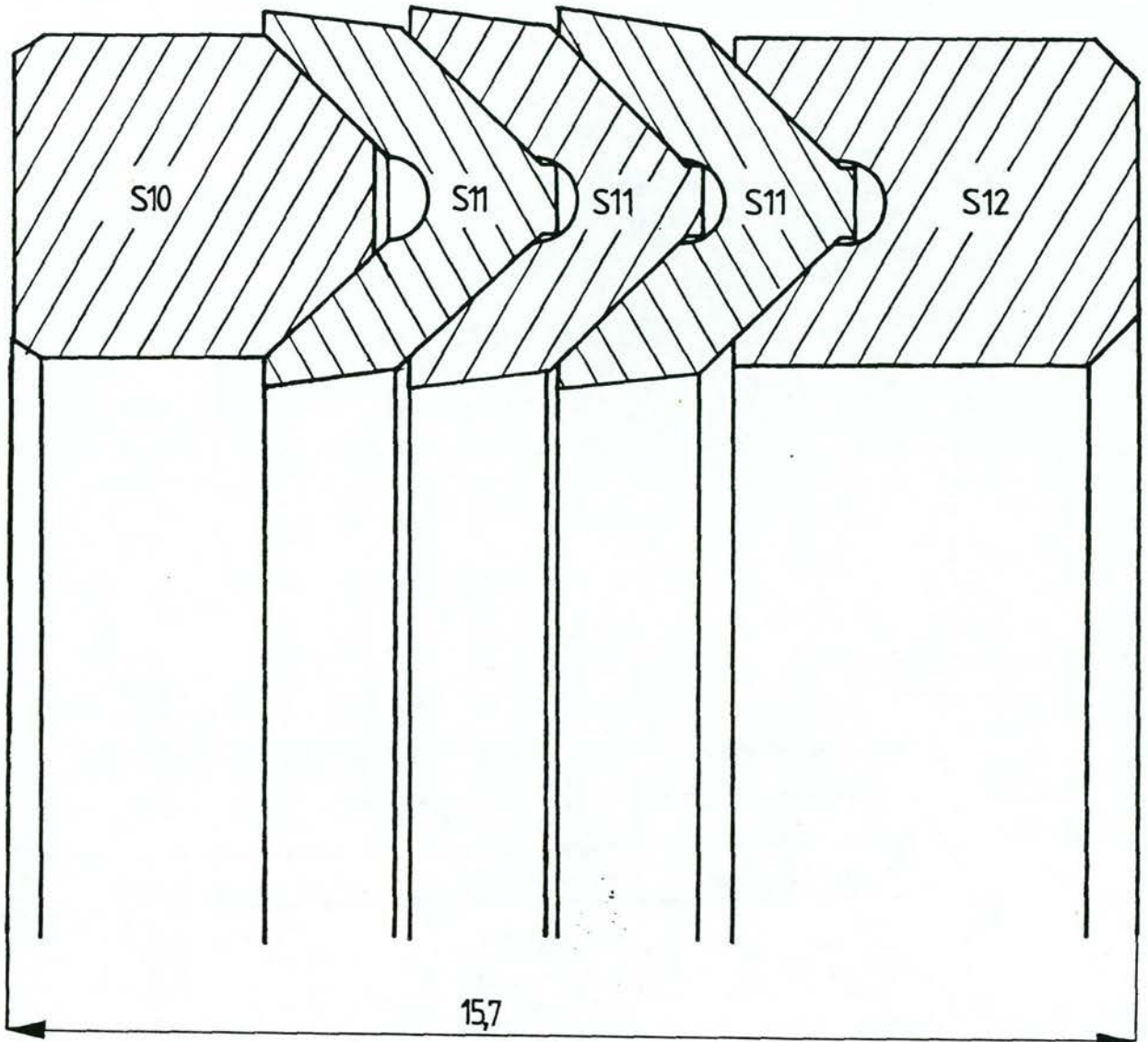
d: 050 f8 f8 = $\begin{matrix} -25 \mu\text{m} \\ -64 \mu\text{m} \end{matrix}$

l: 16^{+0.2mm}.

Material: UHMWPE.

NB. De X-coördinaten zijn diametrale maten. !!!

S10			S11			S12		
Regel	X [mm]	Z [mm]	Regel	X [mm]	Z [mm]	Regel	X [mm]	Z [mm]
N170	56.60	0.00	N105	60.10	0.00	N105	59.30	0.00
N180	59.70	-1.55	N106	56.45	-1.80	N106	56.40	-1.45
N190	59.70	-4.80	N110	-	-	N107	56.40	-1.55
N195	58.90	-5.20	N135	50.40	0.00	N110	-	-
N420	53.80	0.00	N136	54.05	-1.80	N135	51.10	0.00
N430	50.70	-1.55	N140	-	-	N136	54.00	-1.45
N440	50.70	-4.80	N150	55.25*	-1.80*	N137	54.00	-1.55
N445	51.50	-5.20	N325	49.80	0.00	N140	-	-
			N330	50.30	-1.95	N150	55.20*	-1.55*
			N332	54.40	-4.00	N245	59.90	0.00
			N335	54.40	-4.25	N260	59.90	-5.15
			N445	60.70	0.00	N265	58.70	-5.38
			N450	60.20	-1.95	N455	50.50	0.00
			N452	56.20	-4.00	N470	50.50	-5.15
			N455	56.20	-4.25	N475	51.70	-5.75

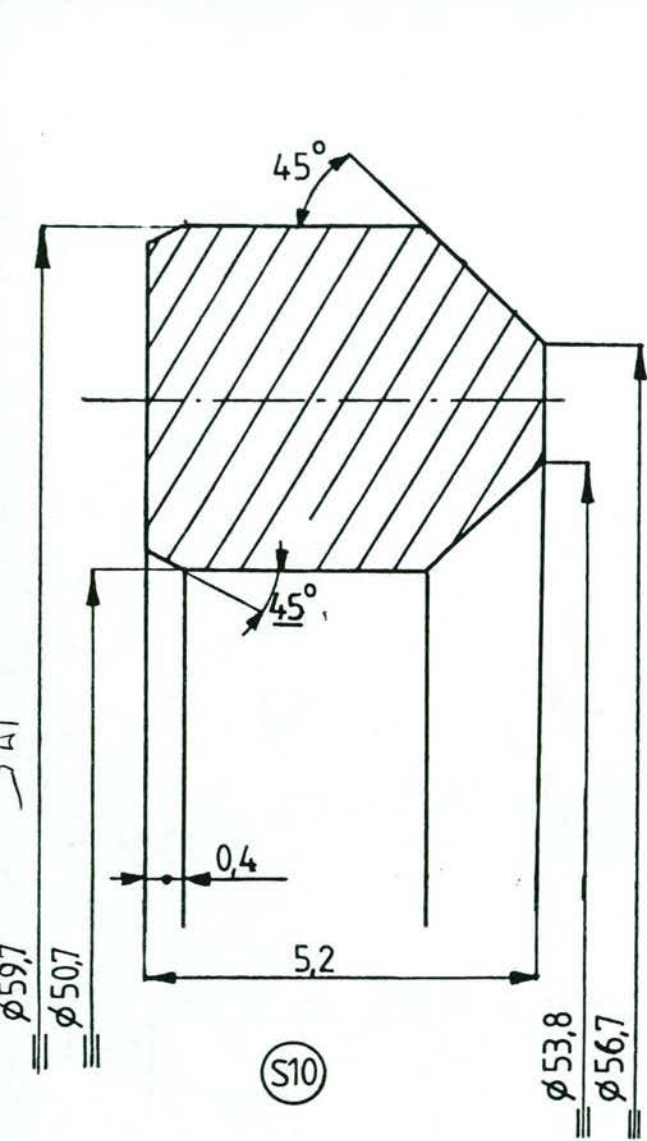


Roof-shaped seal set (endless)
 Reference No. B0008 120.647 (Merkel)
 Material UHMWPE

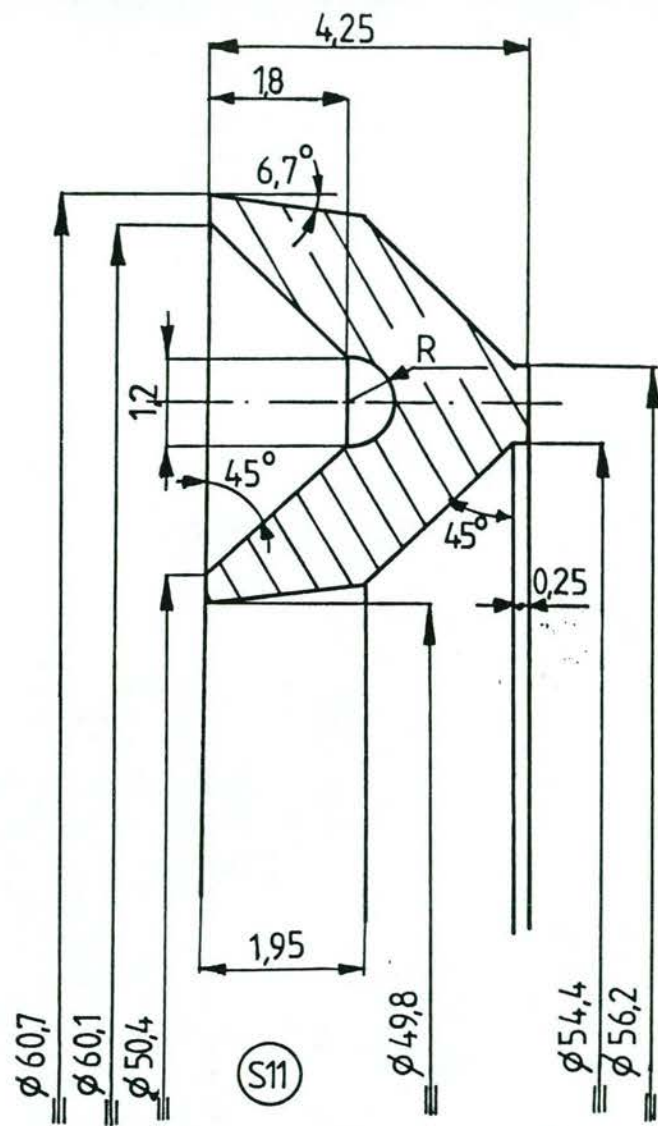
Scale 10:1

- S10 Male adapter
- S11 Roof shaped ring
- S12 Female ring

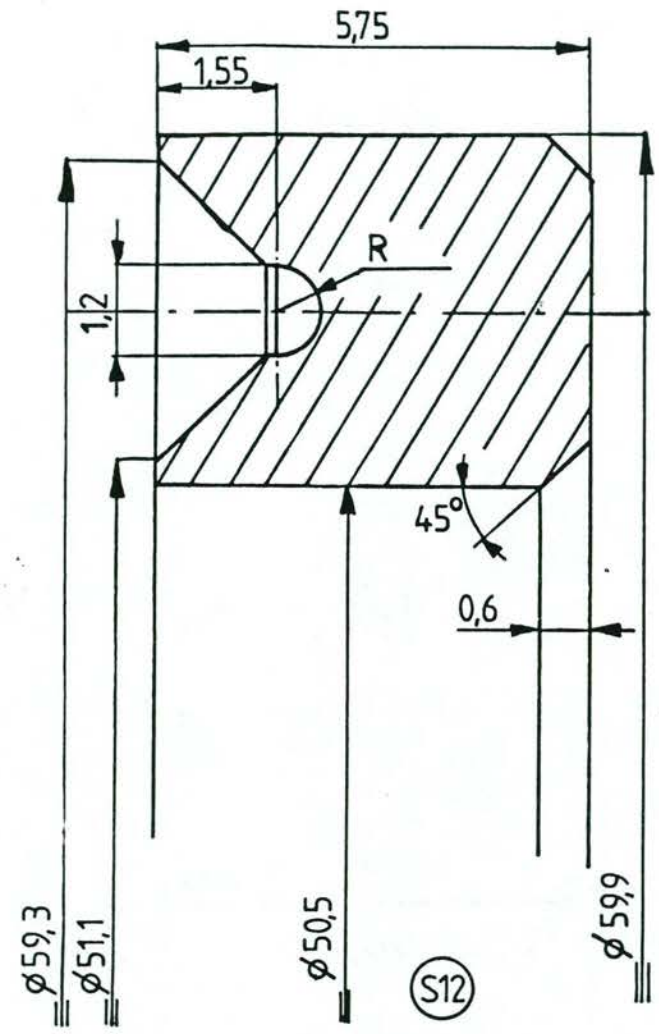
C.v.d.Laan TUE
 92.02.28



Male adapter



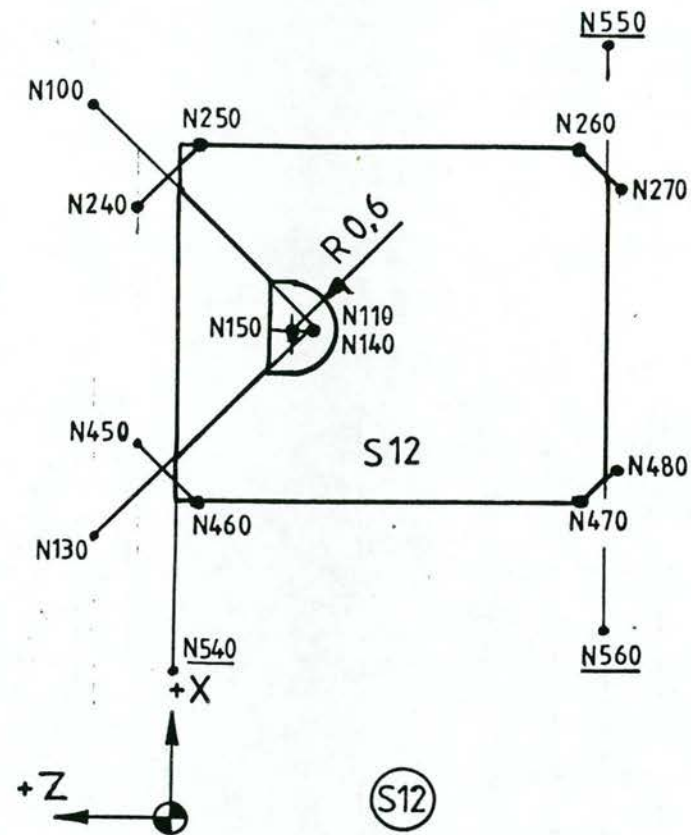
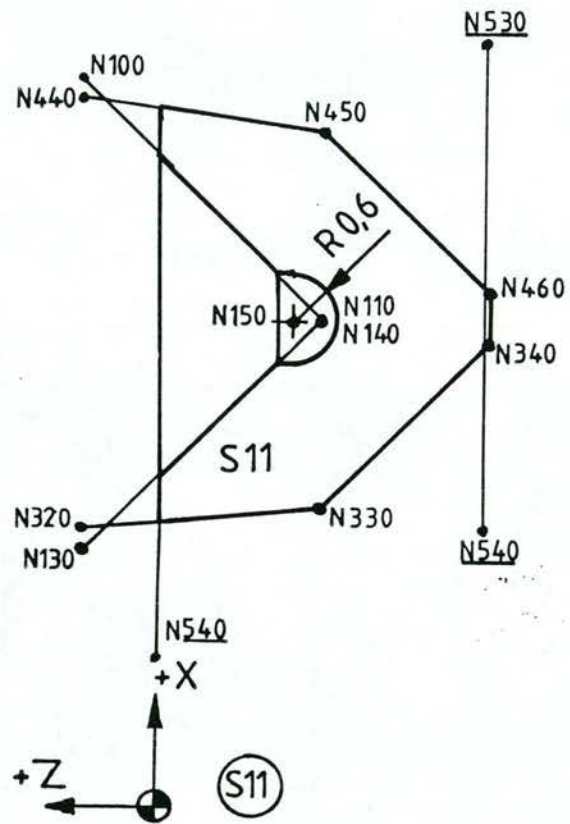
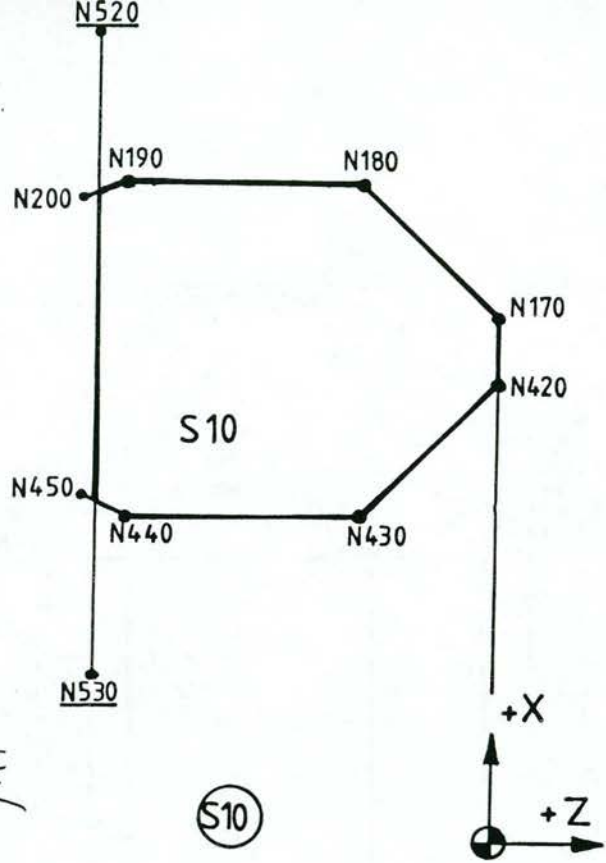
Roof shaped ring



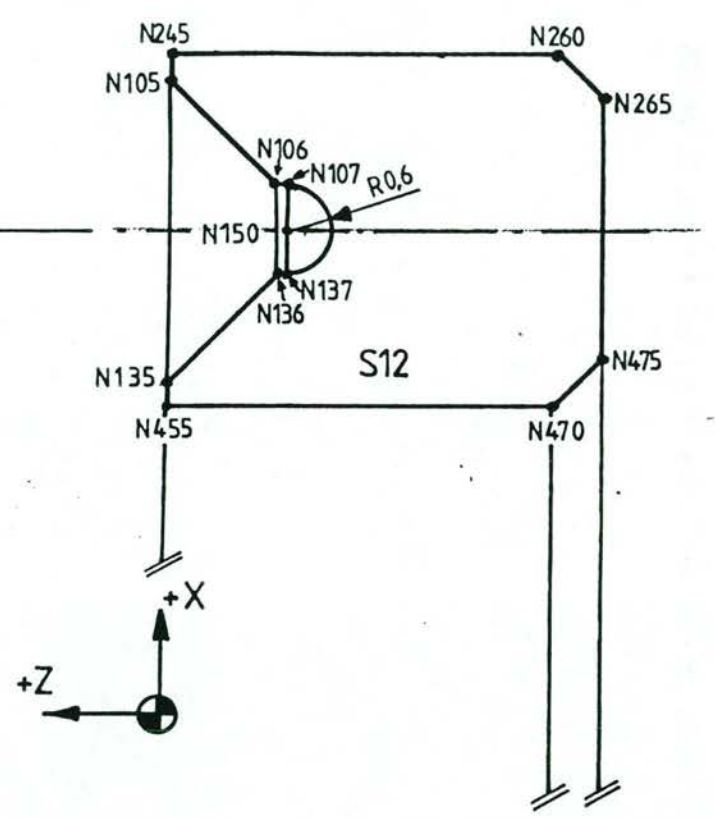
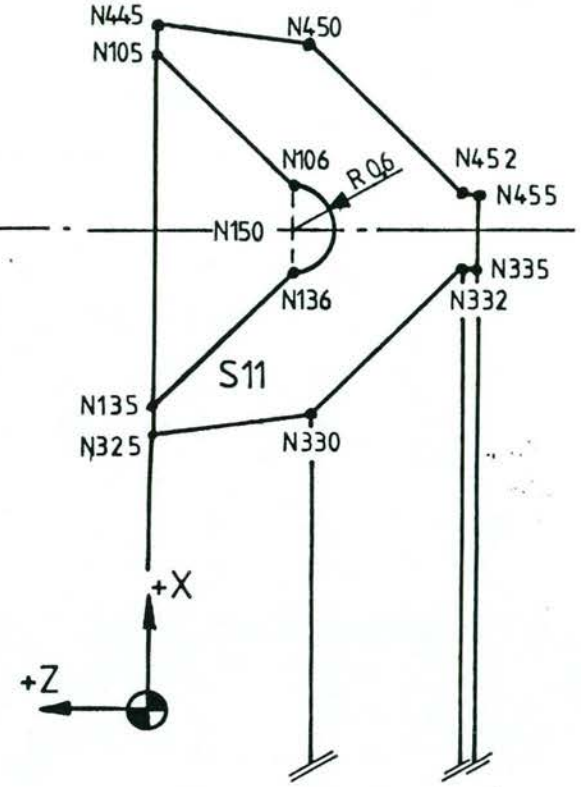
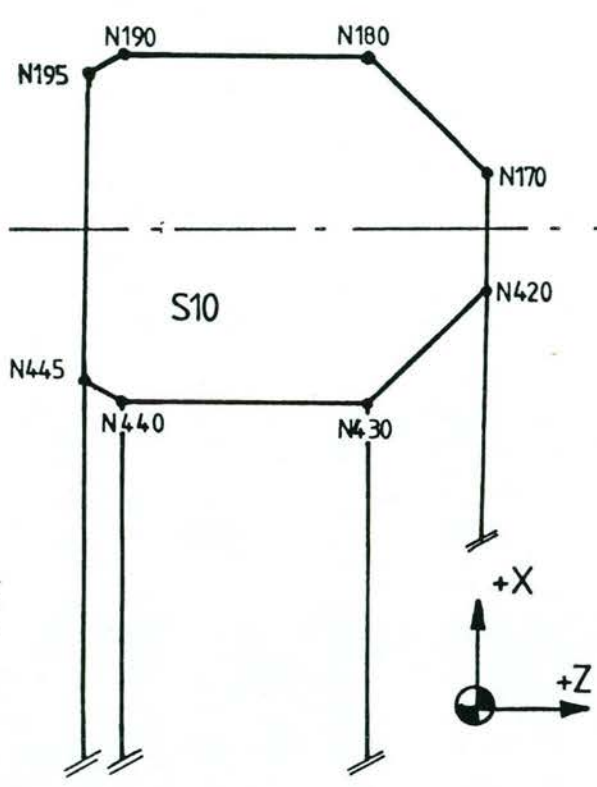
Female ring

(actuele afmetingen)

Scale 10:1
 Mat. UHMWPE



NC GEOMETRIE



Actuele geometrie

441

Inhoudsopgave hoofdstuk 6, testen van bestaande en nieuwe seals in modeltests.

6.1 De seals	1
6.1.1 Kanvas-rubber	1
UHMWPE, zwart	1
6.1.2 Stepseal-afdichting	2
6.2 De meetopstelling	2
6.3 De meetmethode	2
6.4 Schets van de meetopstelling	4
6.5 Grafieken met meetresultaten, dakvormmanchet	5
<u>Dakvormmanchet, Kanvas/NBR</u>	
Afb. 6.2 Hysterese verschijnsel, v stang: 10 mm/sec	5
Afb. 6.3 Hysterese verschijnsel, v stang: 2 mm/sec	5
Afb. 6.4 Opvoerende druk, Fw/p	6
Afb. 6.5 Afnemende druk, Fw/p	6
Afb. 6.6 Opvoerende druk, Fw/v	7
Afb. 6.7 Afnemende druk, Fw/v	7
<u>Dakvormmanchet, UHMWPE, Compressie spleet 0.5 mm.</u>	
Afb. 6.8 Opvoerende druk, Fw/p	8
Afb. 6.9 Afnemende druk, Fw/p	8
Afb. 6.10 Opvoerende druk, Fw/v	9
Afb. 6.11 Afnemende druk, Fw/v	9
<u>Dakvormmanchet, UHMWPE, Compressie spleet 0.2 mm.</u>	
Afb. 6.12 Opvoerende druk, Fw/p	10
Afb. 6.13 Afnemende druk, Fw/p	10
Afb. 6.14 Opvoerende druk, Fw/v	11
Afb. 6.15 Afnemende druk, Fw/v	11
<u>Stepseal, UHMWPE</u>	
Afb. 6.16 Opvoerende druk, Fw/p	12
Afb. 6.17 Afnemende druk, Fw/p	12
Afb. 6.18 Opvoerende druk, Fw/v	13
Afb. 6.19 Afnemende druk, Fw/v	13
6.6 Matrix met numerieke waarden	14
Dakvormmanchet, Kanvas/NBR	14
Dakvormmanchet, UHMWPE, zwart, compressiespleet 0.5 mm.	15
Dakvormmanchet, UHMWPE, zwart, compressiespleet 0.2 mm.	16
Stepseal, S-55013-0500-80-K-R	17
6.7 Vergelijkende karakteristieken, F/v	18
Afb. 6.20 Werkdruk 0 Bar	18
Afb. 6.21 Werkdruk 50 Bar	18
Afb. 6.22 Werkdruk 75 Bar	19
Afb. 6.23 Werkdruk 100 Bar	19
Afb. 6.24 Werkdruk 125 Bar	20
Afb. 6.25 Werkdruk 150 Bar	20
Afb. 6.26 Werkdruk 175 Bar	21
Afb. 6.27 Werkdruk 200 bar	21

Hoofdstuk 6. Testen van de bestaande en de nieuwe seals in modeltests.

6.1 De seals.

Met een bestaande testopstelling (afb.6.3.1) zijn, wrijvingskracht-metingen uitgevoerd aan de volgende afdichtingen:

- * Dakvormmanchet-afdichtingen.
- * Stepseals.

6.1.1. Dakvormmanchet-afdichtingen.

Kanvas-rubber

Sealtype Kanvas/NBR : Dakvormmanchet-afdichting, bestaande uit 5 ringen.
 Fabrikaat : Merkel
 Codenummer : B 0008-12.647

De middelste manchetring is uit rubber (NBR) vervaardigd.

Als kamerlengte L is de lengte van de niet gemonteerde seal +0.2 mm. aangehouden, overeenkomstig de richtlijnen van Merkel, (afb.6.3.2.).

UHMWPE, zwart

Sealtype UHMWPE : Dakvormmanchet-afdichting, bestaande uit 5 ringen.
 Fabrikaat : Uitbesteding, prototype.
 Codenummer : afmetingen overeenkomstig Merkel, B 0008-12.647.

De steuning van de set is vervangen door een kanvas steuning uit de kanvas/rubber set.

Afwijkend van de kanvas/rubber seals is de kamerlengte bepaald aan de hand van richtlijnen zoals ze in de praktijk worden uitgevoerd. De seal wordt in het huis geplaatst, waarna de as door de seal wordt gestoken.

De kamerlengte moet 0.4-0.8 mm. korter zijn dan de lengte van de set in deze situatie, en dit verschil wordt in het vervolg van dit verslag aangeduid met compressiespleet, (afb.6.3.3.).

Om de invloed van de z.g. compressiespleet op de wrijvingskracht te onderzoeken, zijn twee meetsessies uitgevoerd, t.w.:

- a. compressiespleet van 0.5 mm.
- b. compressiespleet van 0.2 mm.

Hierbij dient opgemerkt te worden, dat de metingen aan dezelfde set zijn verricht, waarbij de meetsessie met een compressiespleet van 0.2 mm. het laatst plaats vond.

Bij demontage van de seals, na de meetsessie met 0.5 mm. compressiespleet, was een duidelijke vervorming van de afzonderlijke seal-elementen waarneembaar.

De elementen met de uitstekende dakvormen hadden de contravormen van het tegenliggende element geheel overgenomen.

Een experiment met een seal zonder "voorgeschiedenis", geeft waarschijnlijk een juister beeld, maar bij gebrek aan seals, kon zo'n experiment niet worden uitgevoerd.

6.1.2. Stepseal-afdichting.

Sealtype	:Stepseal.
Fabrikaat	:Busak/Shamban B.V.
Codenummer	:S-55013-0500-80-K-R.

M.b.t. de metingen aan de stepseals dient het volgende te worden opgemerkt:

In tegenstelling tot de dakvormmanchet-seal, is de lengte van de stepseal veel kleiner, zodat de resulterende radiale opsluiting van de twee gemonteerde stepseals minder stijf is. Het aanbrengen van geleidingsbussen, zoals in de praktijk veelal toegepast, geeft een extra ongewenste wrijvingscomponent, en deze zijn om die reden dan ook niet gemonteerd. Als gevolg van de toegepaste koppeling tussen de krachtmeetdoos en de as, treedt tijdens de stangslag een uitlijnafwijking op met een lineair verloop. De grootst gemeten afwijking is ca. 0.2 mm. over een lengte van 100 mm.

E.e.a. heeft tot gevolg dat de gemeten wrijvingskrachten een aflopende waarde vertonen bij het maken van de slag. Als meetwaarde is steeds de laagst gemeten waarde verwerkt.

6.2 De meetopstelling.

De wrijvingskracht-metingen zijn uitgevoerd met een testopstelling, die nauwkeurig de wrijvingskracht als functie van de verplaatsing over een afstand van max. 100 mm. kan meten. De verplaatsing wordt, in tegenstelling tot die in de praktijk, gerealiseerd door het huis langs de stang te bewegen, (afb.6.3.1.).

Daarbij zijn instelbaar: - de hydraulische werkdruk in de cylinder, (0-200 Bar).
 - de stangsnelheid, (2-100 mmsec-1).

Zowel de Ra- als Rt waarde van het huis en de as liggen ver beneden de gestelde eisen van Merkel.

M.b.v. opvulringen is de compressiespleet in te stellen.

Aanvullende gegevens

Hydraulische oliesoort	: Tellus 46
Type krachtmeetdoos	: Hottinger 22004-2003
Meetversterker	: HBM KWS 3020C
Schrijver	: Kipp BD8

6.3 De meetmethode.

In feite maakt het huis (pos. 6), t.o.v. de stang een heen en weergaande beweging zie (afb. 6.3.1.), toch zal voor het gemak deze beweging in het vervolg van dit verslag stangsnelheid genoemd worden. De gemeten wrijvingskrachten hebben betrekking op een combinatie van 2 seals, waarbij afhankelijk van de bewegingsrichting, één van de twee seals, een z.g. "slepende" beweging maakt.

Ca. 30 uur nadat de seals werden gemonteerd, is een aanvang gemaakt met het meten van de wrijvingskrachten.

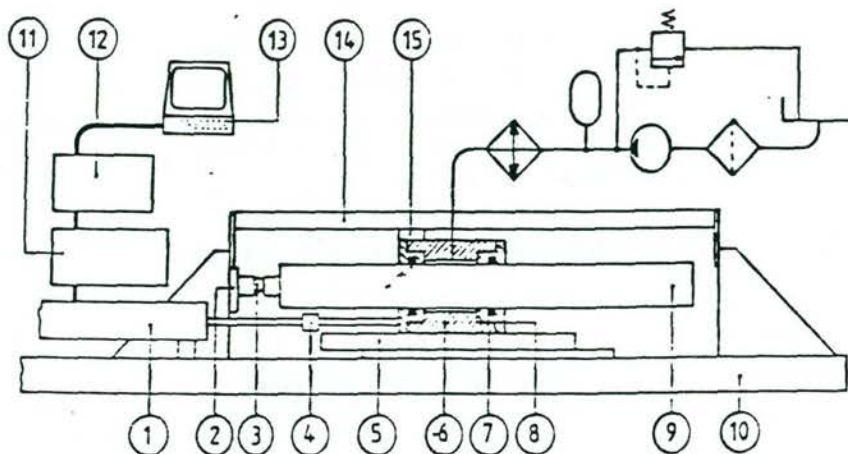
Voor elke nieuwe meetsessie zijn ca. 50 inloopslagen gemaakt, met een stangsnelheid van 10 mm/sec., onder een werkdruk van 150 Bar.

Bij een ingestelde constante stangsnelheid werd de werkdruk in stappen van 0-50-75-100-125-150-175 en 200 Bar opgevoerd, en de wrijvingsweerstand F [N] gemeten over een traject van 100 mm.

Tussen elke meting is een pauze van 5 minuten ingelast, om de seal de gelegenheid te geven, zich te "zetten". Evenzo werd dezelfde meetcyclus bij een afnemende druk uitgevoerd, waarbij de ingelaste pauzes 10 minuten bedroegen.

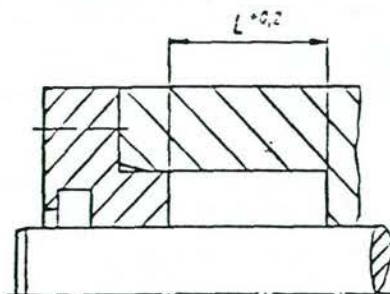
De ingestelde stangsnelheden waren: 2-10-50-100 mmsec-1.

6.4. Schets van de meetopstelling.

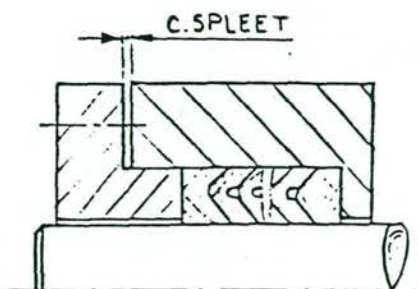


- | | |
|--------------------------------|--------------------------------|
| 1 hydraulic actuator | 9 rod |
| 2 force transducer | 10 frame |
| 3 universal joints | 11 hydraulic supply unit |
| 4 joint | 12 control module |
| 5 linear motion roller bearing | 13 personal computer |
| 6 body of the seal housing | 14 optical position transducer |
| 7 seal | |
| 8 lid of the seal housing | |

Afb. 6.3.1.



Afb. 6.3.2.

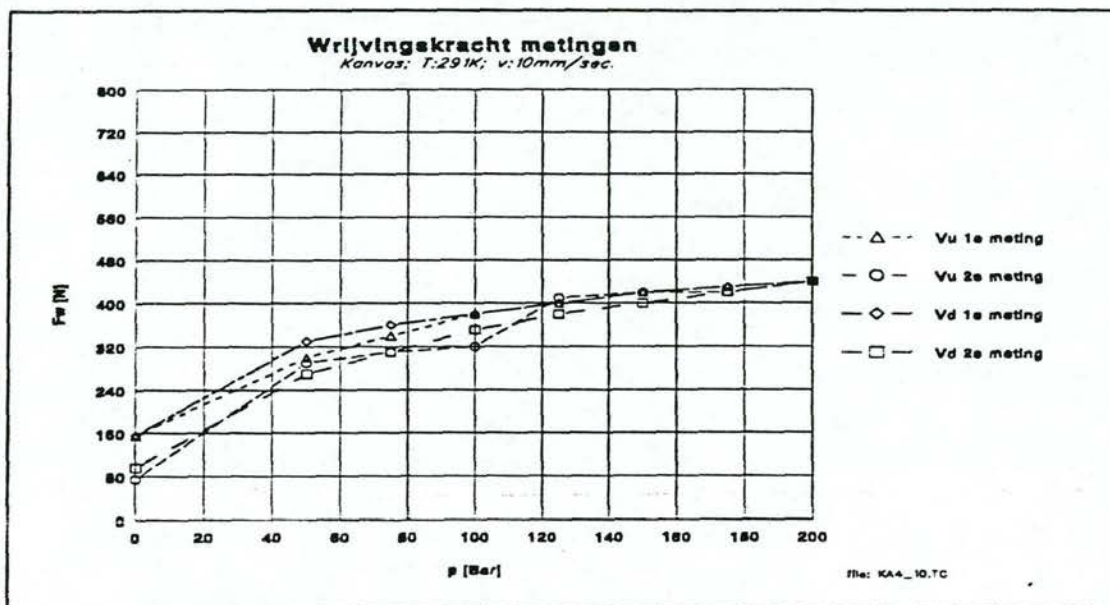


Afb. 6.3.3.

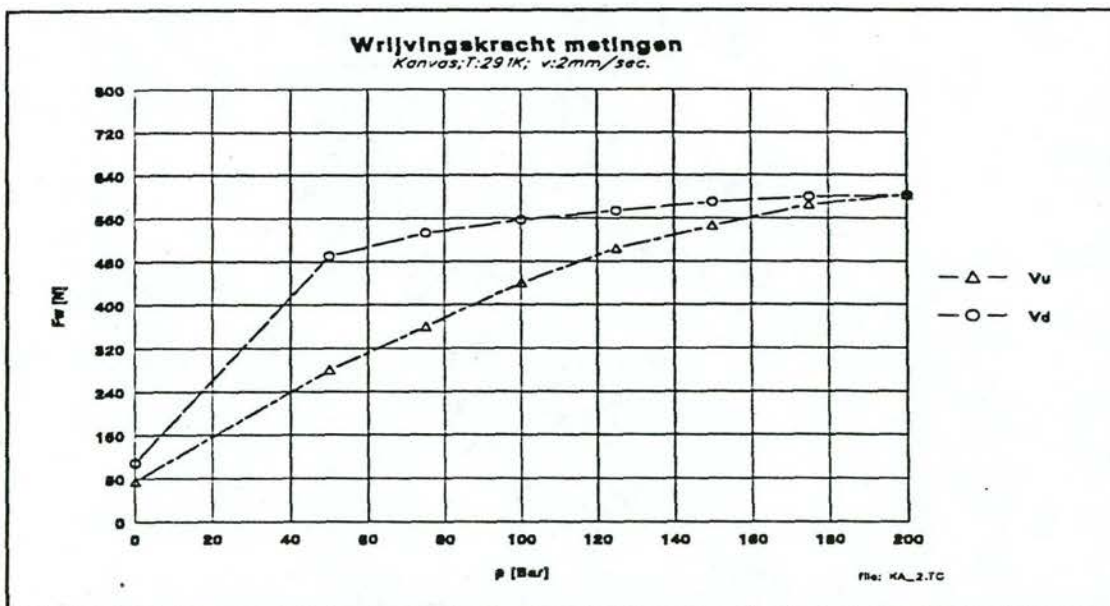
6.5 Uitwerking van de meetresultaten in grafiekvorm.

Afb. 6.2 geeft een globale indruk van de reproduceerbaarheid van de metingen. De 2e meting vond plaats na ca. 1 week, tussentijds zijn de seals niet belast geweest. Hoewel tussen elke meting een relaxatie-pauze van 5 min. is ingelast, is bij afnemende druk duidelijk sprake van een hysteresis verschijnsel. (afb. 6.3), Vu is de meetcyclus bij oplopende- en Vd de meetcyclus bij afnemende druk.

Sealtype :Dakvormmanchet-afdichting, Canvas/NBR
 Fabrikaat :Merkel
 Codenr. :B 0008-120.647



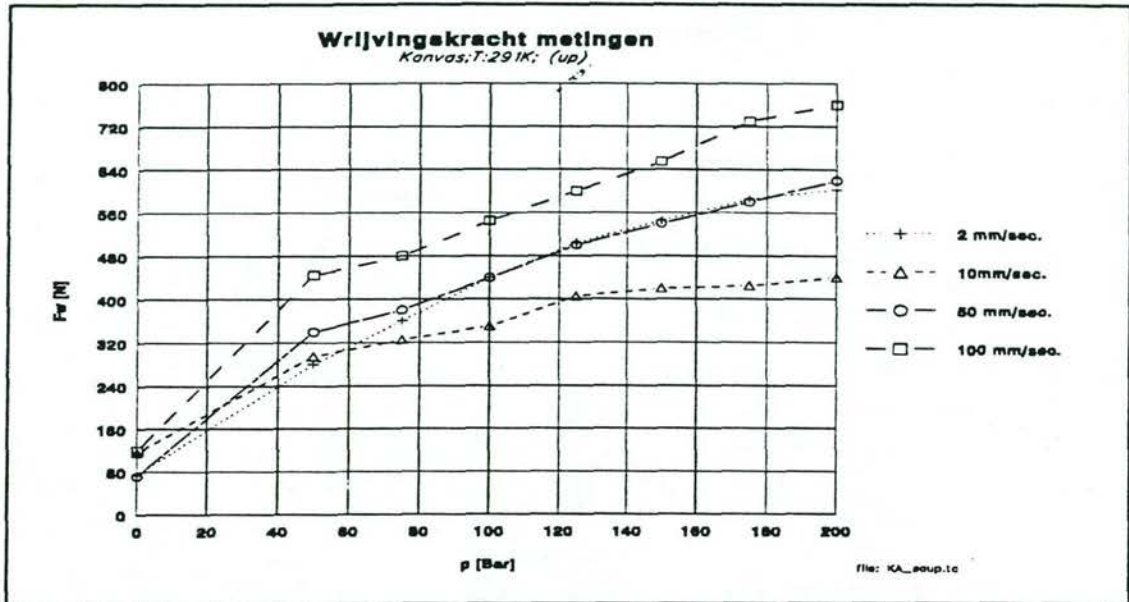
Afb. 6.2. Stangsnelheid 10mm/sec. (1 maal herhaald).



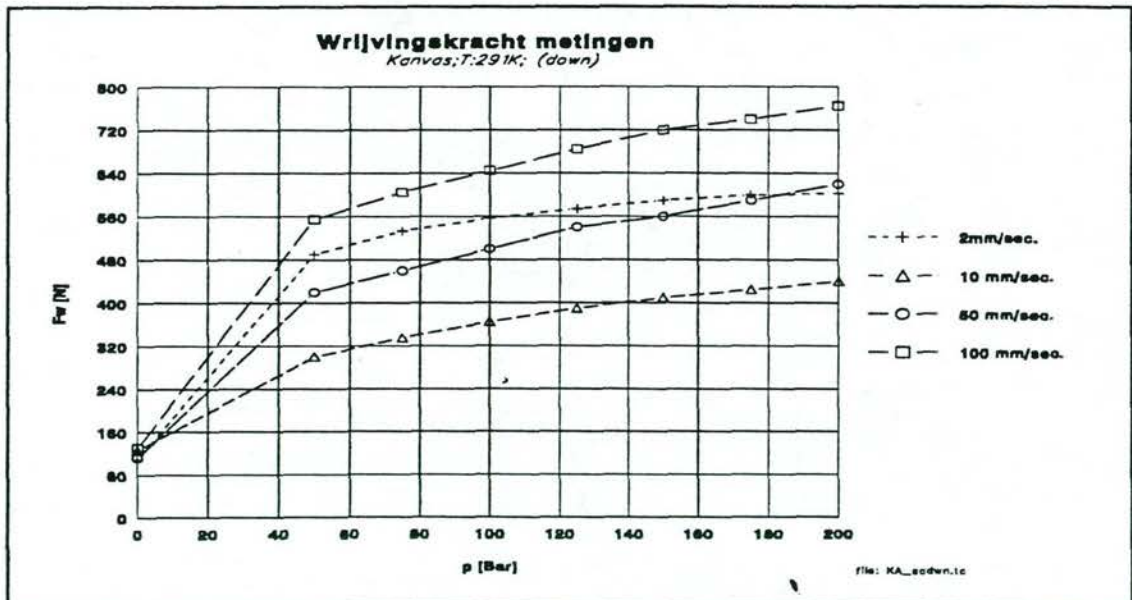
Afb. 6.3. Stangsnelheid 2mm/sec. (enkelvoudige meting).

De onderstaande grafieken geven de wrijvingskracht "Fw" als functie van de werkdruk "p" in het huis. Afb. 6.8. voor oplopende drukken, afb. 6.9. voor afnemende drukken.

Sealtype : Dakvormmanchet-afdichting, Kanvas/NBR
 Fabrikaat : Merkel
 Codenr. : B 0008-120.647



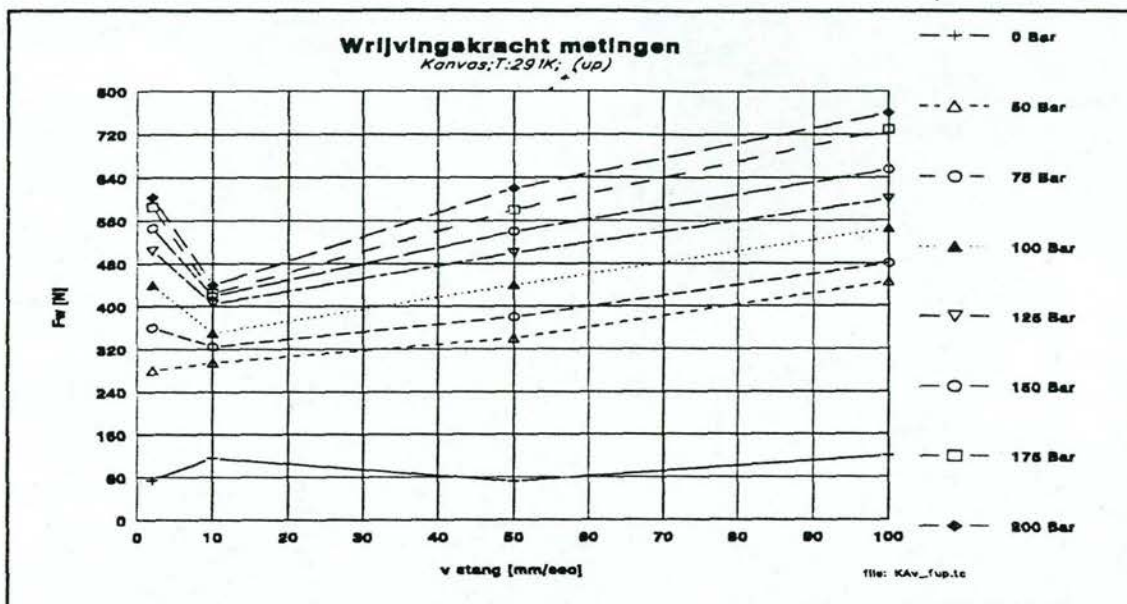
Afb. 6.4. Druk opgevoerd na elke meting.



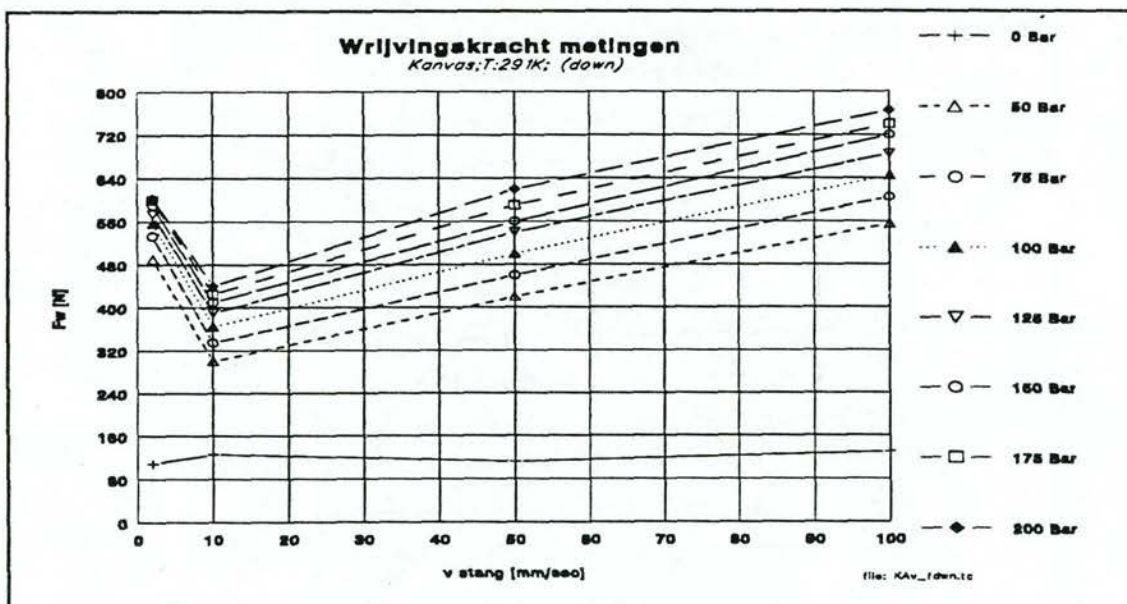
Afb. 6.5. Afnemende druk na elke meting.

In onderstaande grafieken staat de wrijvingskracht "Fw", uit tegen de snelheid "v" van de (zuiger)stang, afb. 6.6. voor oplopende drukken, afb. 6.7. voor afnemende drukken.

Sealtype :Dakvormmanchet-afdichting, Canvas/NBR
 Fabrikaat :Merkel
 Codenr. :B 0008-120.647



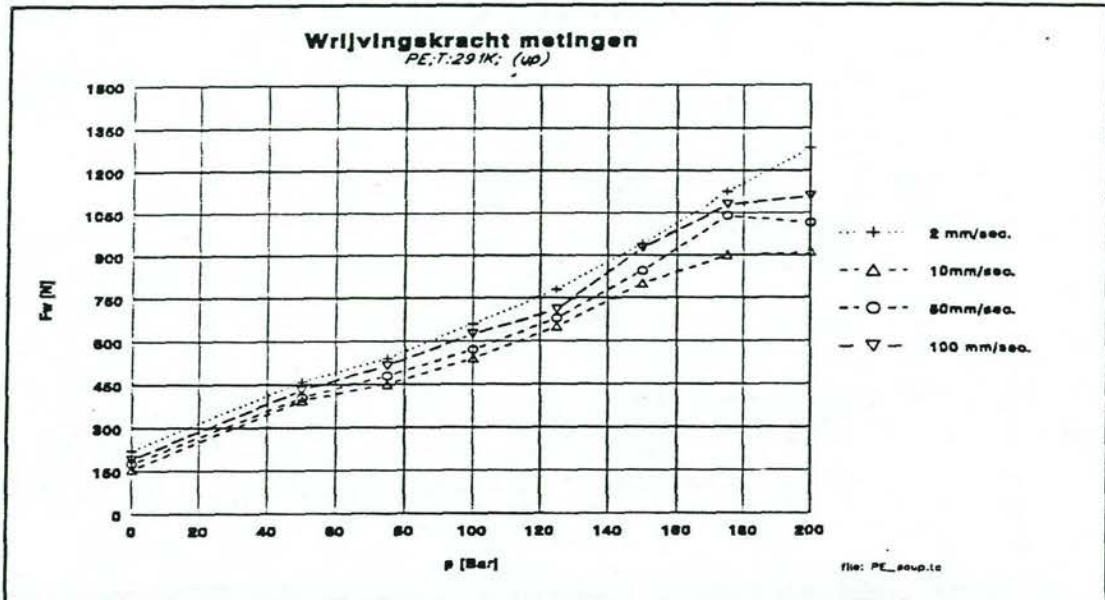
Afb. 6.6. Oplopende druk na elke meting.



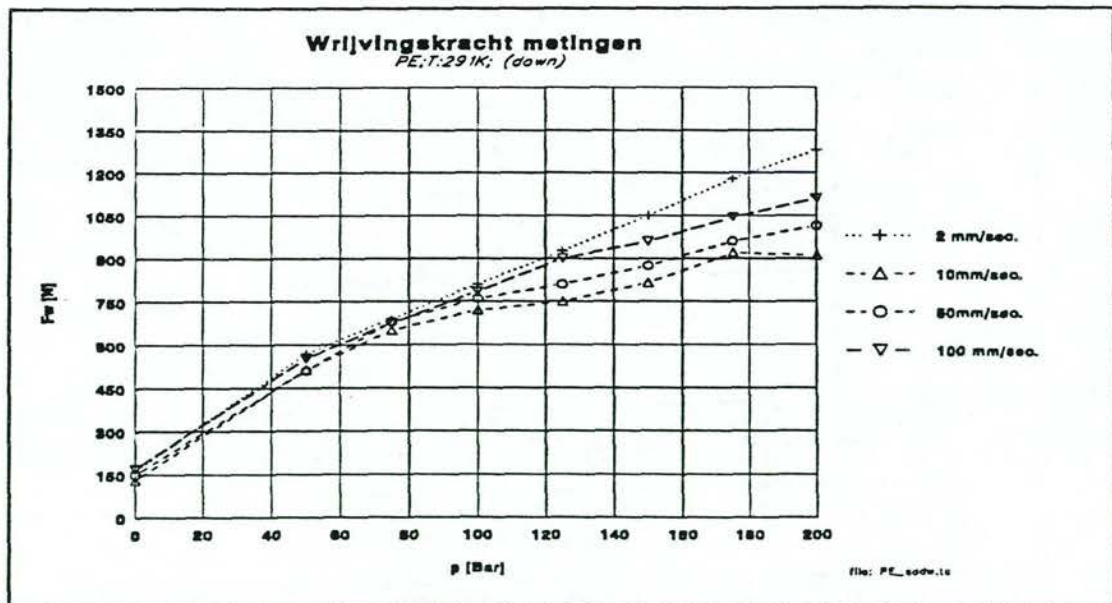
Afb. 6.7. Afnemende druk na elke meting.

De onderstaande grafieken geven de wrijvingskracht "Fw" als functie van de werkdruk "p" in het huis. Afb. 6.8. voor oplopende drukken, afb. 6.9. voor afnemende drukken.

Sealtype : Dakvormmanchet-afdichting, UHMWPE, zwart; compressiespl.: 0.5mm.
 Fabrikaat : Uitbesteding
 Codenr. : overeenkomstig Merkel, model B 0008-120.647



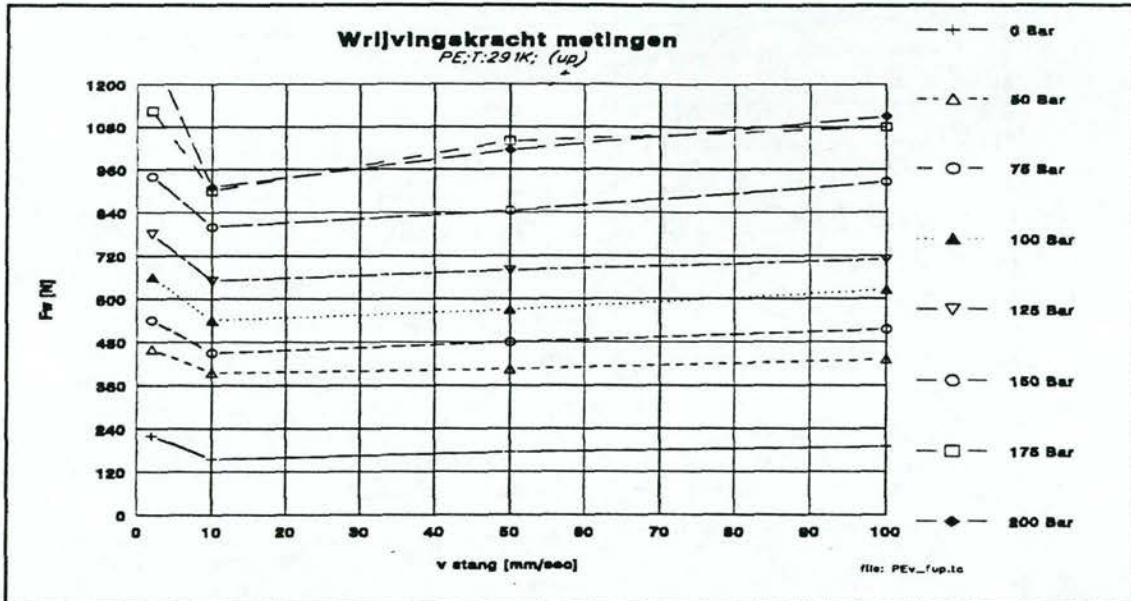
Afb. 6.8. Oplopende werkdruk, (compressiespleet 0.5mm).



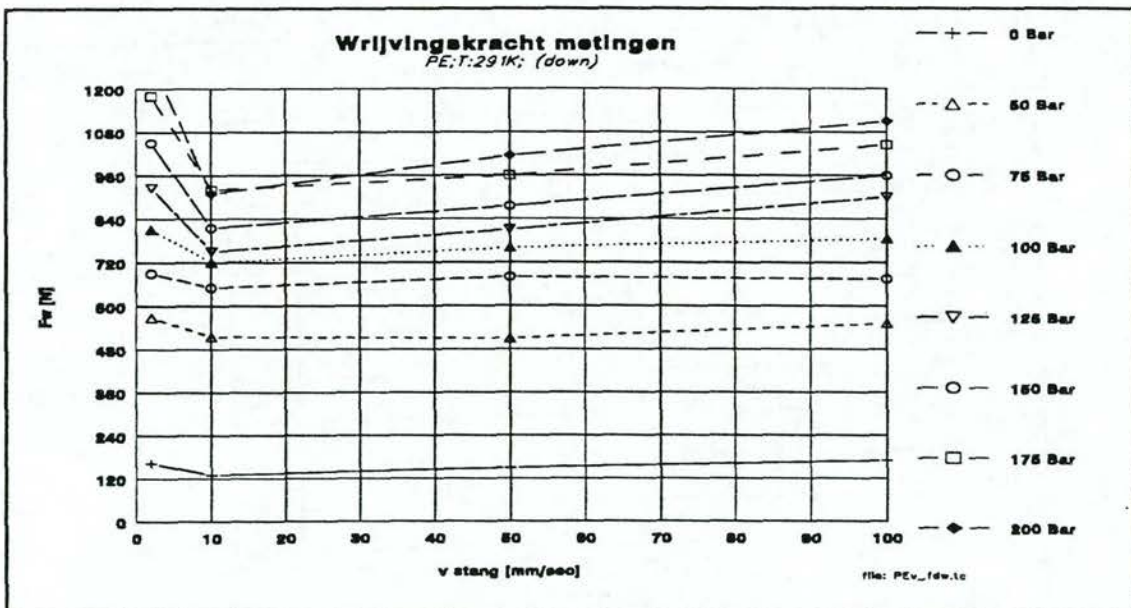
Afb. 6.9. Afnemende werkdruk, (compressiespleet 0.5mm).

In de onderstaande grafieken staat de wrijvingskracht "Fw", uit tegen de snelheid "v" van de stang. Afb. 6.10. voor oplopende drukken, afb. 6.11. voor afnemende drukken.

Sealtype : Dakvormmanchet-afdichting, UHMWPE, zwart; compressiespl.: 0.5mm.
 Fabrikaat : Uitbesteding
 Codenr. : overeenkomstig Merkel,model B 0008-120.647



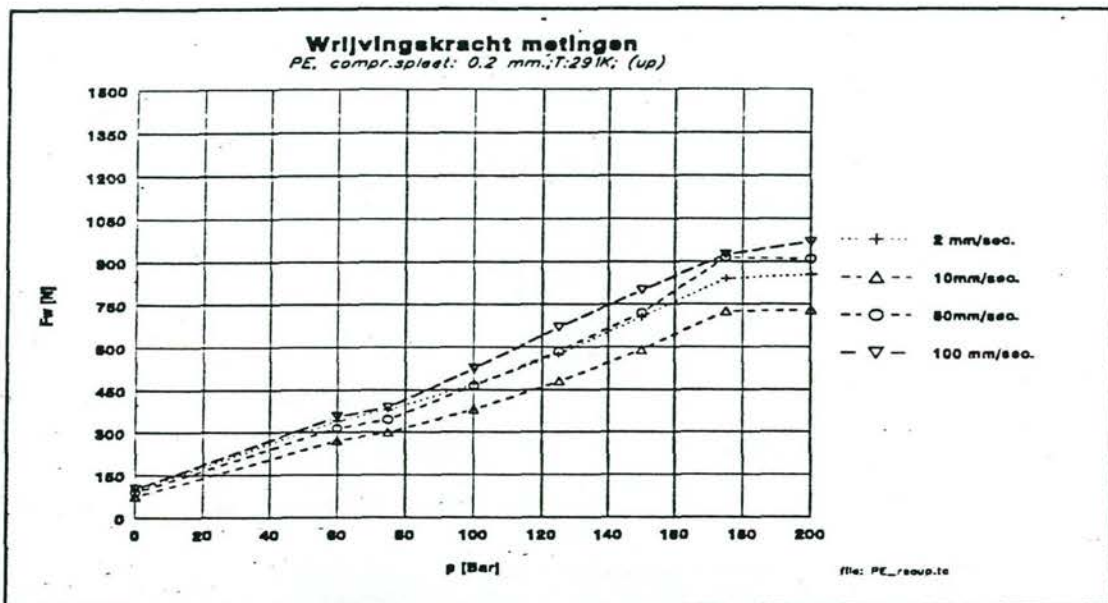
Afb. 6.10. Oplopende werkdruk, (compressiespleet 0.5mm).



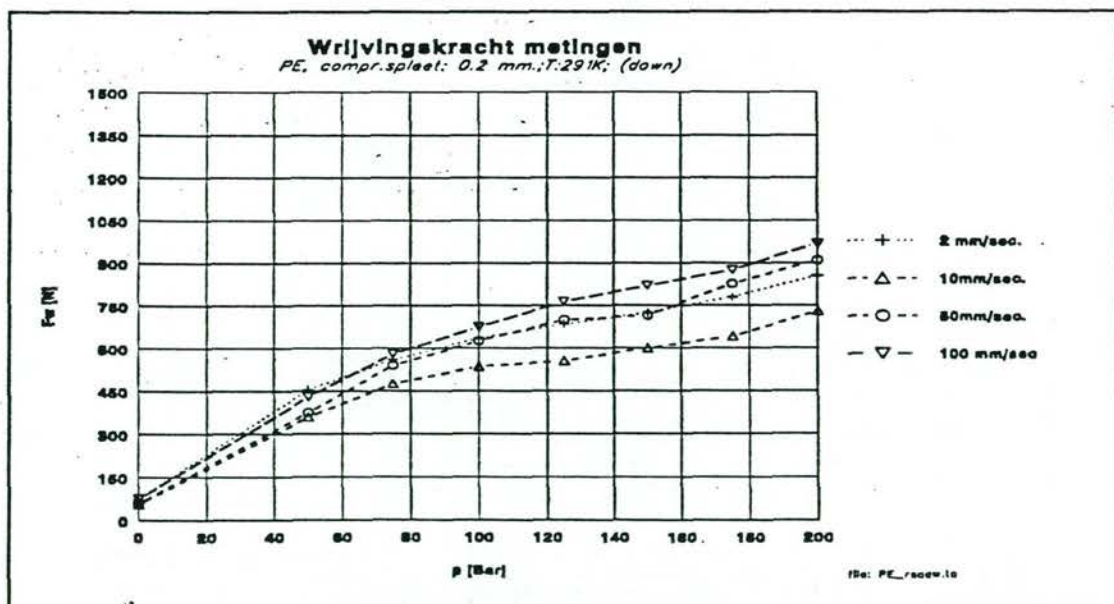
Afb. 6.11. Afnemende werkdruk, (compressiespleet 0.5mm).

De onderstaande grafieken geven de wrijvingskracht "Fw" als functie van de werkdruk "p" in het huis. Afb. 6.12. voor oplopende drukken, afb. 6.13. voor de afnemende drukken.

Sealtype : Dakvormmanchet-afdichting, UHMWPE, zwart; compressiespl.: 0.2mm.
 Fabrikaat : Uitbesteding
 Codenr. : overeenkomstig Merkel, model B 0008-120.647



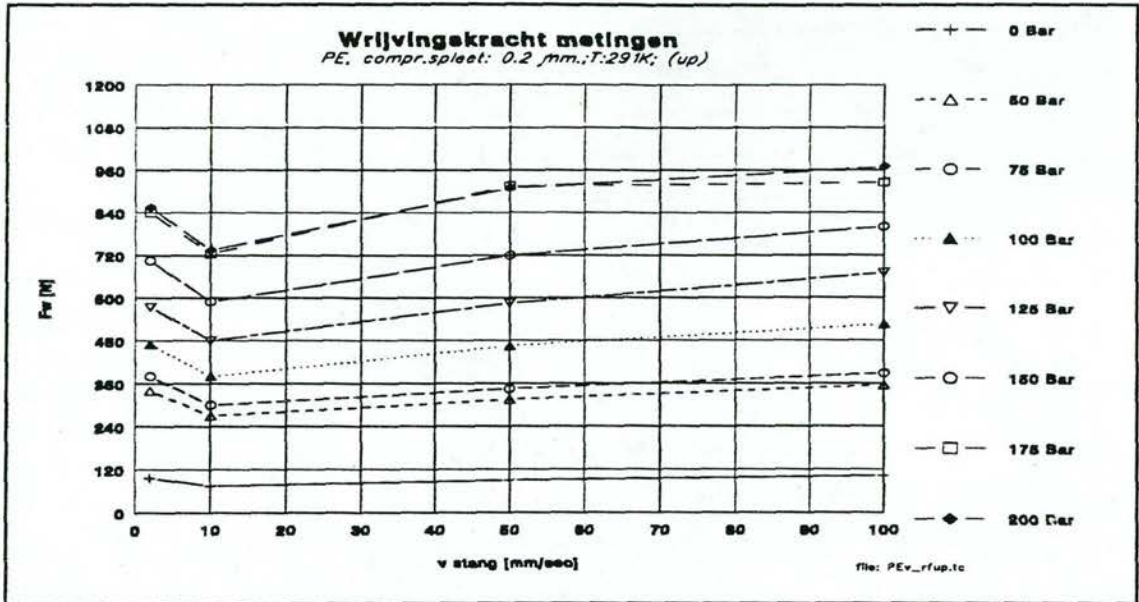
Afb. 6.12. Oplopende werkdruk, (compressiespleet 0.2mm).



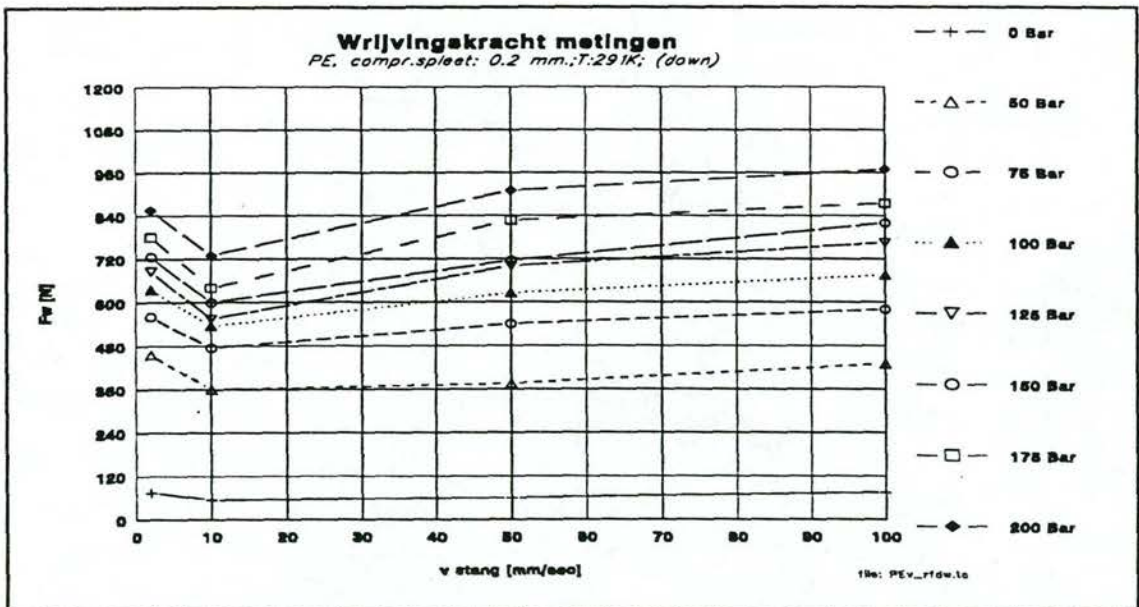
Afb. 6.13. Afnemende werkdruk, (compressiespleet 0.2mm).

In de onderstaande grafieken staat de wrijvingskracht "Fw", uit tegen de snelheid "v" van de stang. Afb. 6.14. voor oplopende drukken, afb. 6.15. voor afnemende drukken.

Sealtype : Dakvormmanchet-afdichting, UHMWPE, zwart; compressiespl.: 0.2mm.
 Fabrikaat : Uitbesteding
 Codenr. : overeenkomstig Merkel,model B 0008-120.647



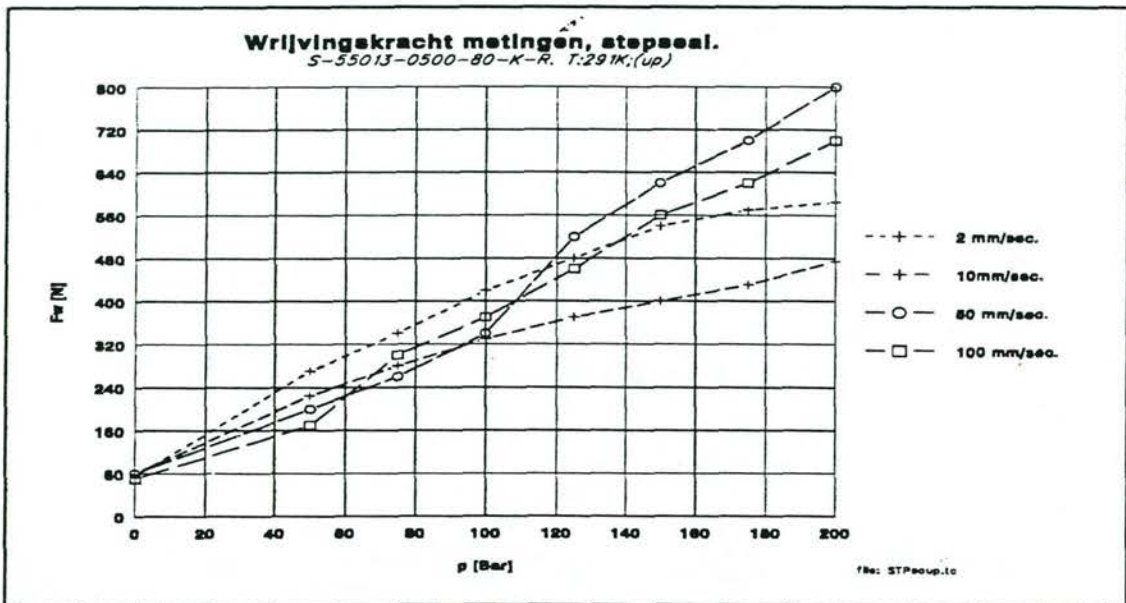
Afb. 6.14. Oplopende werkdruk, (compressiespleet 0.2mm.)



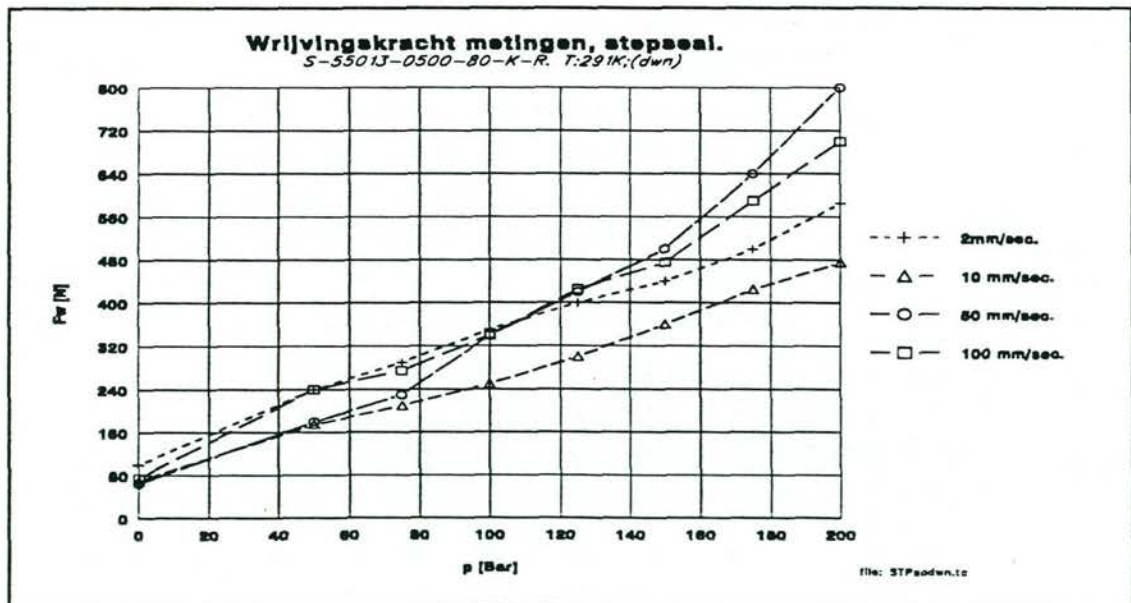
Afb. 6.15. Afnemende werkdruk, (compressiespleet 0.2mm.)

De volgende grafieken, Afb. 6.16. en 6.17. resp. oplopende- en afnemende drukken, hebben betrekking op **stepseal-metingen** en tonen de wrijvingskracht "Fw" als functie van de werkdruk "p" in het huis.

Sealtype : Stepseal.
 Fabrikaat : Busak/Shamban B.V.
 Codenr. : S-55013-0500-80-K-R.



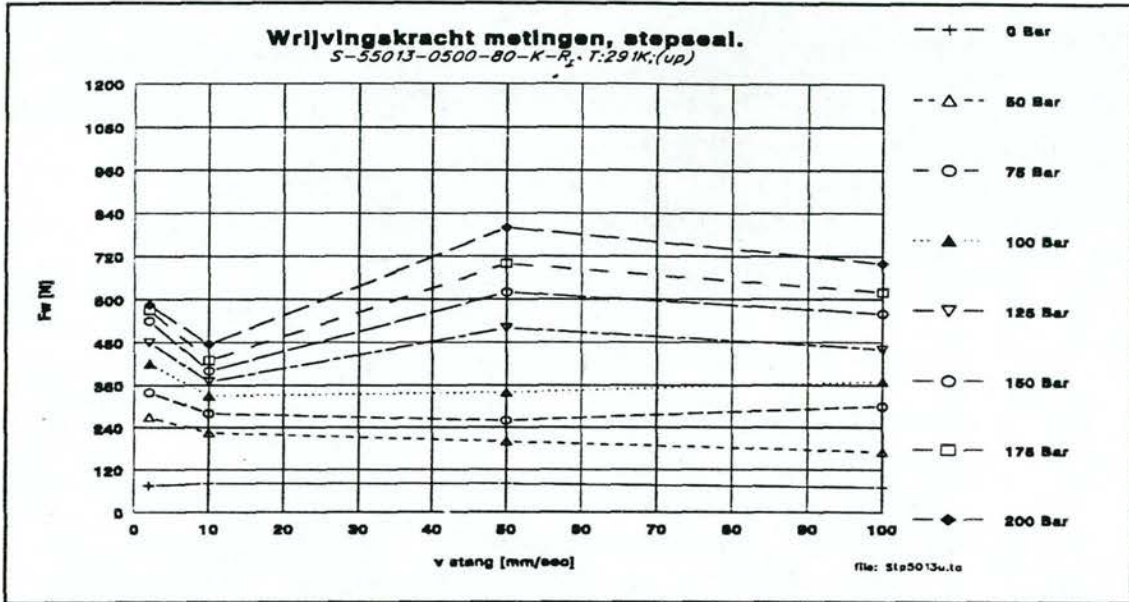
Afb. 6.16. Oplopende druk na elke meting.



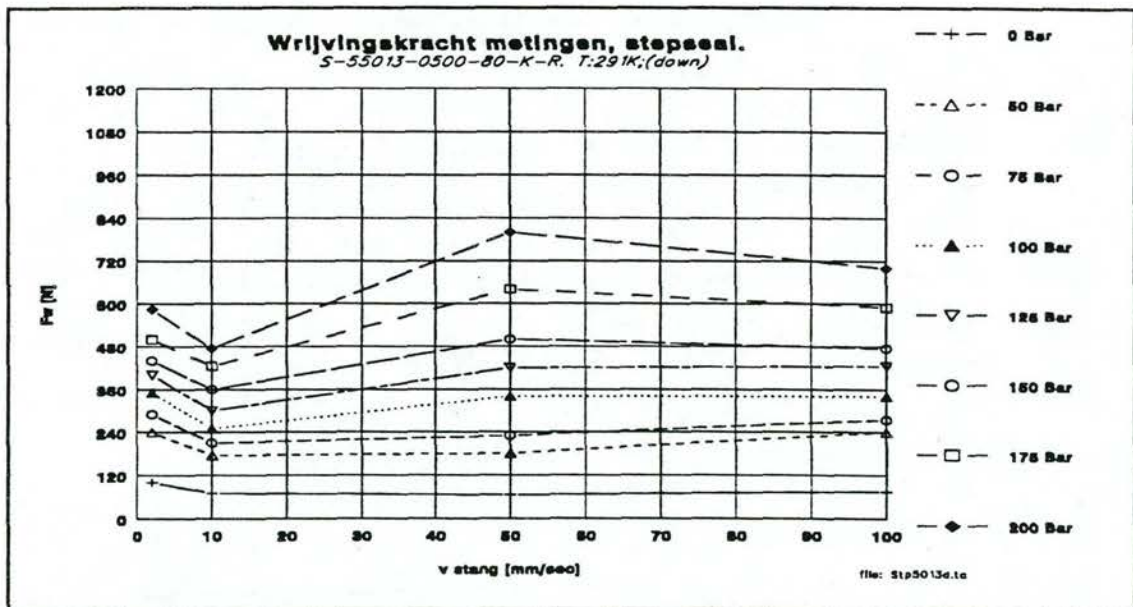
Afb. 6.17 Afnemende druk na elke meting.

De onderstaande grafieken geven de wrijvingskracht "Fw" als functie van de stang-snelheid "v". Afb.6.18. voor de oploopcyclus, afb. 6.19. voor de aflopende druk cyclus.

Sealtype : Stepseal.
 Fabrikaat : Busak/Shamban B.V.
 Codenr. : S-55013-0500-80-K-R.



Afb. 6.18. Oplopende druk na elke meting.



Afb. 6.19. Afnemende druk na elke meting.

6.6 Matrix met numerieke waarden.

Dakvormmanchet.
KANVAS/NBR
(wrijvingskrachten in [N]).

v \ P	0 Bar	50 Bar	75 Bar	100 Bar	125 Bar	150 Bar	175 Bar	200 Bar
oplopend--> 0.002 m/sec <--dalend	75	280	360	440	504	546	585	603
	109	490	533	557	574	590	600	603
oplopend--> 0.01 m/sec <--dalend	115.5	295	325	350	405	420	425	440
	126	300	335	365	390	410	425	440
oplopend--> 0.05 m/sec <--dalend	72	340	380	440	500	540	580	620
	112	420	460	500	540	560	590	620
oplopend--> 0.1 m/sec <--dalend	120	445	480	545	600	655	730	760
	130	555	605	645	685	720	740	765

Dakvormmanchet.

UHMWPE, zwart; compressiespleet: 0.5mm.

(wrijvingskrachten in [N]).

v \ P	0 Bar	50 Bar	75 Bar	100 Bar	125 Bar	150 Bar	175 Bar	200 Bar
oplopend--> 0.002 m/sec	220	460	540	660	780	940	1125	1280
<--dalend	163	568	690	810	926	1050	1180	1280
oplopend--> 0.01 m/sec	155	395	450	540	650	800	900	910
<--dalend	130	515	650	720	750	815	920	910
oplopend--> 0.05 m/sec	175	405	480	570	680	845	1040	1015
<--dalend	150	510	680	760	810	875	960	1015
oplopend--> 0.1 m/sec	190	432	515	625	710	925	1080	1110
<--dalend	170	552	675	785	900	960	1045	1110

194

Dakvormmanchet.

UHMWPE, zwart; compressiespleet: 0.2mm.

(Wrijvingskrachten in [N]).

v \ P	0 Bar	50 Bar	75 Bar	100 Bar	125 Bar	150 Bar	175 Bar	200 Bar
oplopend--> 0.002 m/sec <--dalend	96	340	380	470	575	705	840	855
	75	455	560	635	685	725	780	855
oplopend--> 0.01 m/sec <--dalend	75	270	300	380	480	590	725	735
	55	360	475	535	555	600	640	730
oplopend--> 0.05 m/sec <--dalend	90	315	345	465	580	720	915	925
	60	375	540	625	700	715	827	910
oplopend--> 0.1 m/sec <--dalend	102	355	388	525	670	800	925	970
	75	430	580	675	765	820	875	970

195

Step seal, PE

Type : S-55013-0500-80-K-R.

Fabr : Busak-Shamban B.V.

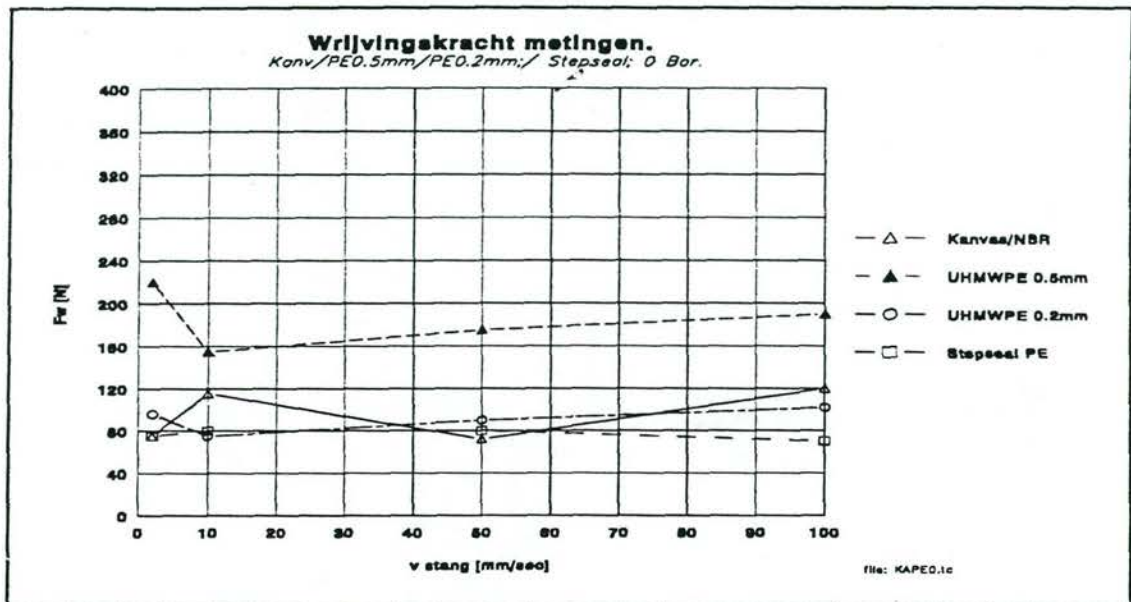
(wrijvingskrachten in [N]).

v \ P	0 Bar	50 Bar	75 Bar	100 Bar	125 Bar	150 Bar	175 Bar	200 Bar
oplopend--> 0.002 m/sec <--dalend	75	270	340	420	480	540	570	585
	100	240	290	350	400	440	500	585
oplopend--> 0.01 m/sec <--dalend	80	225	280	330	370	400	430	475
	70	175	210	250	300	360	425	475
oplopend--> 0.05 m/sec <--dalend	80	200	260	340	520	620	700	800
	65	180	230	340	420	500	640	800
oplopend--> 0.1 m/sec <--dalend	70	170	300	370	460	560	620	700
	75	240	275	340	425	475	590	700

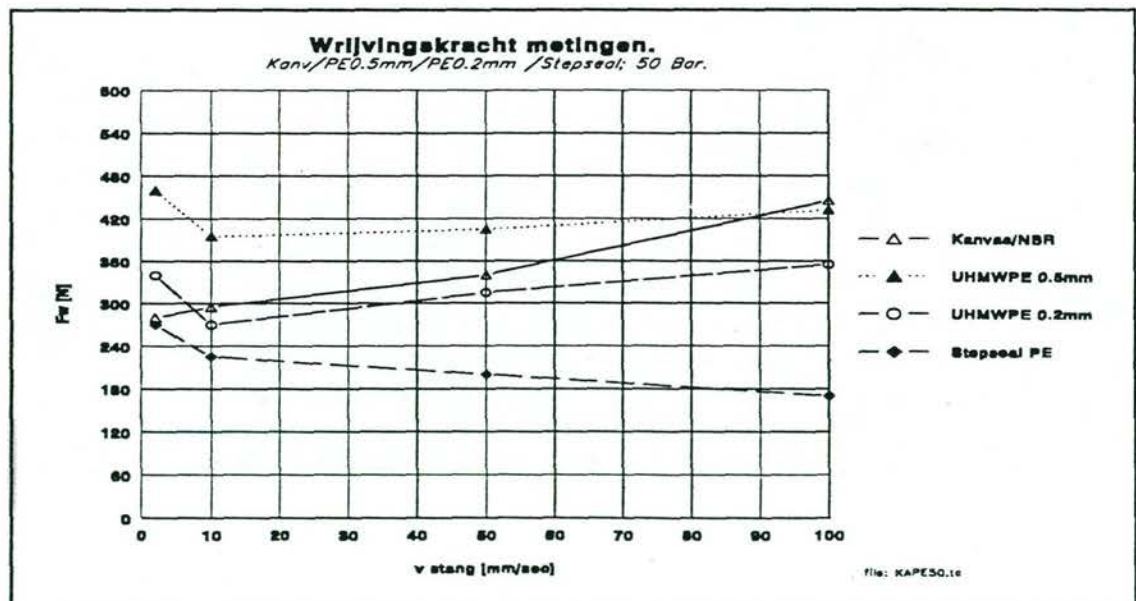
196

6.7. Vergelijkende karakteristieken.

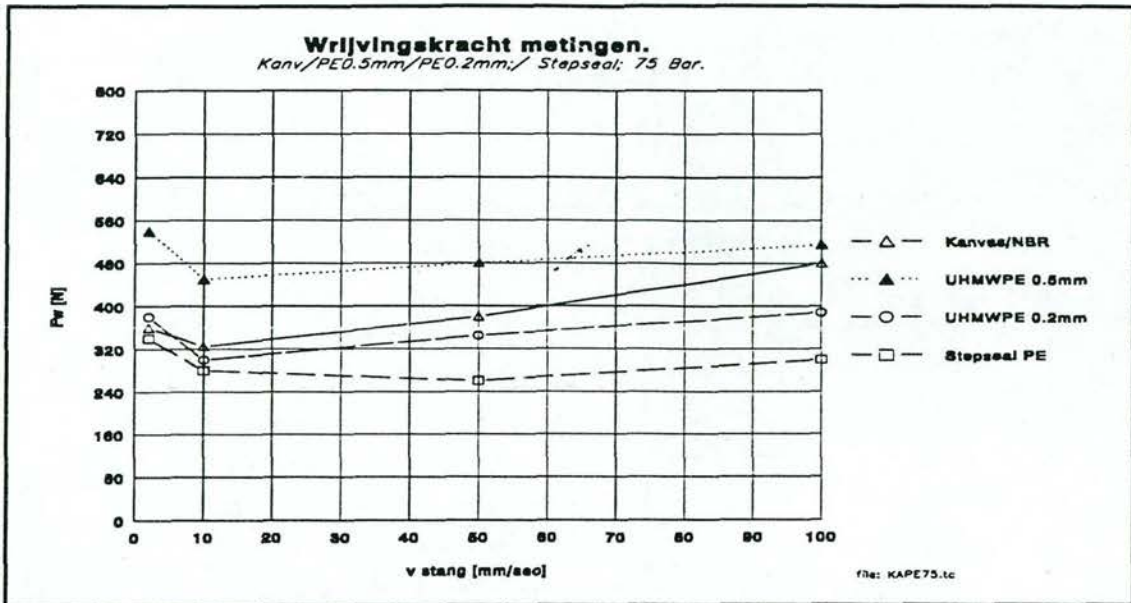
In de volgende 8 grafieken, pag. 18 t.m. pag. 21, zijn de meetresultaten verwerkt van:
 - Dakvormmanchet: Kanvas/NBR, UHMWPE zwart, 0.2mm. en 0.5mm. cmpr.spleet.
 - Stepseal.



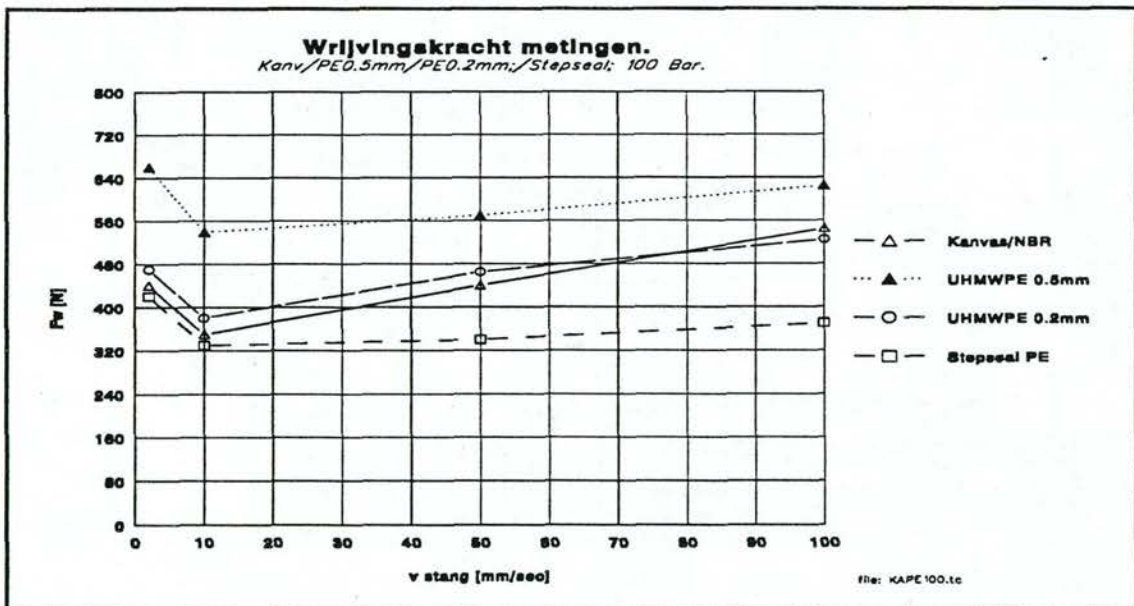
Afb. 6.20. Vergelijkende karakteristieken, 0 Bar.



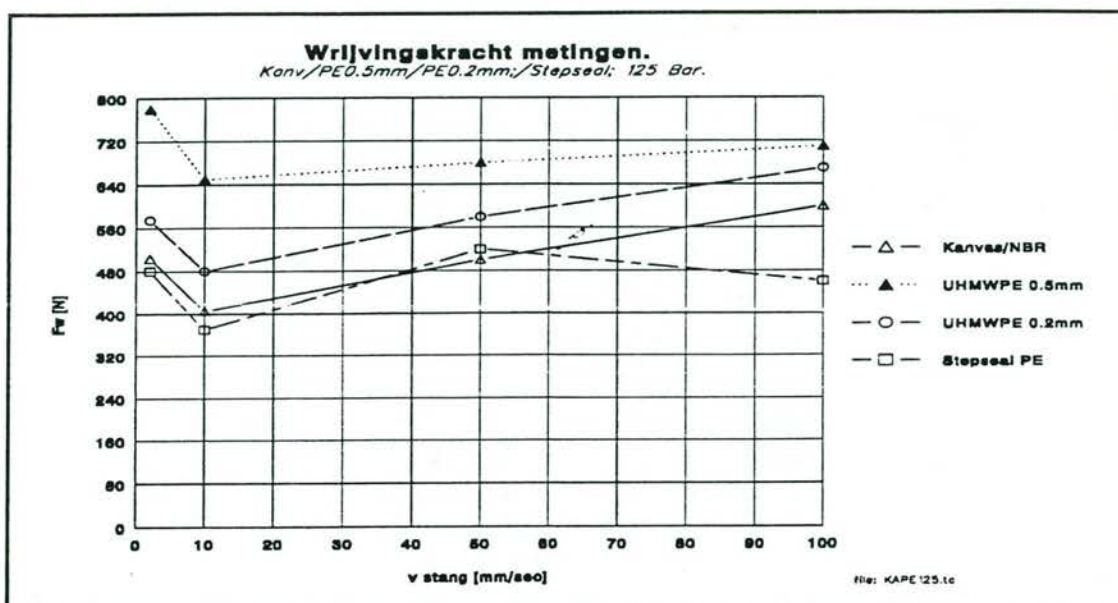
Afb. 6.21. Vergelijkende karakteristieken, 50 Bar.



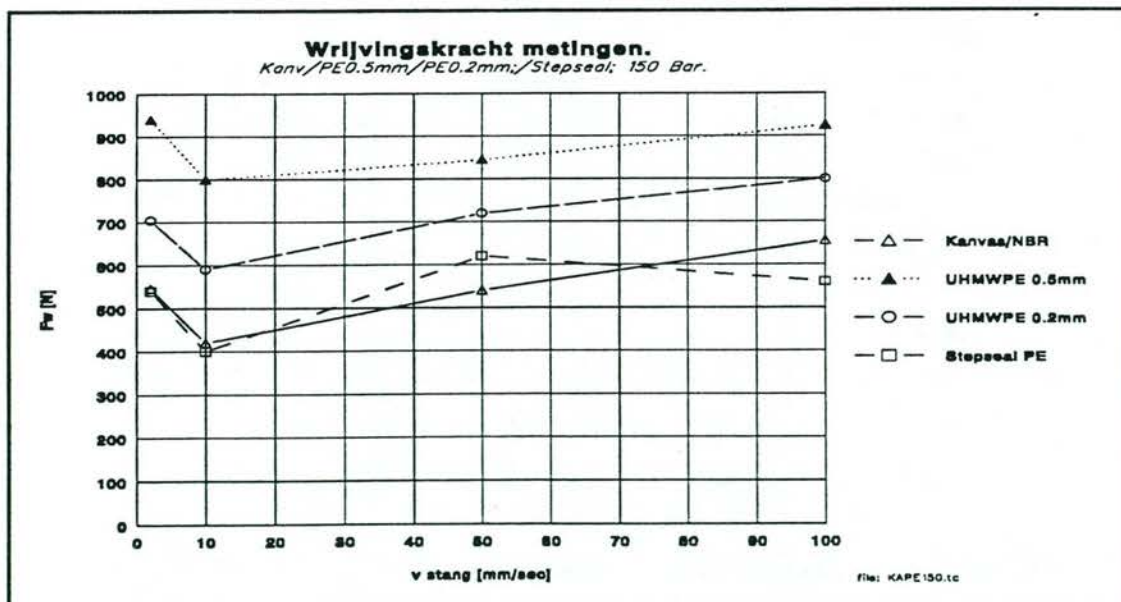
Afb. 6.22. Vergelijkende karakteristieken, 75 Bar.



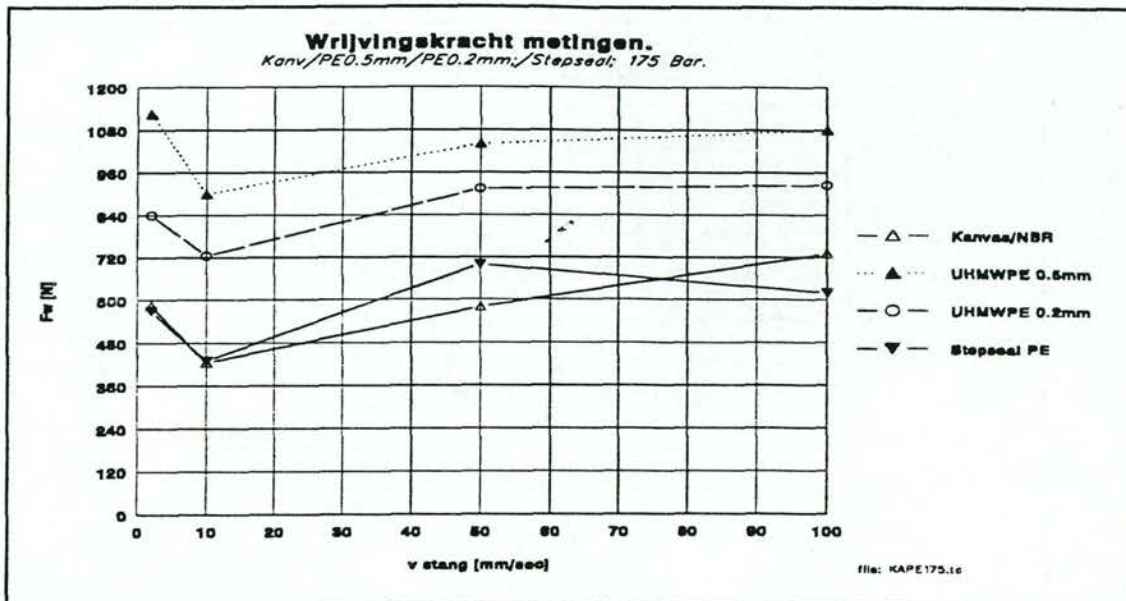
Afb. 6.23. Vergelijkende karakteristieken, 100 Bar.



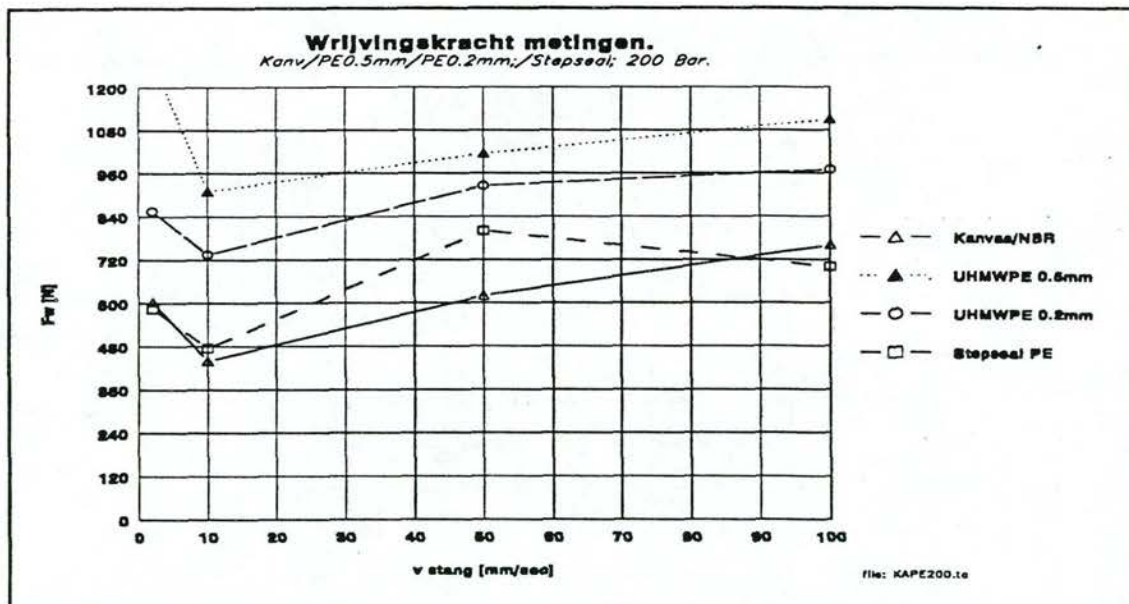
Afb. 6.24. Vergelijkende karakteristieken, 125 Bar.



Afb. 6.25. Vergelijkende karakteristieken, 150 Bar.

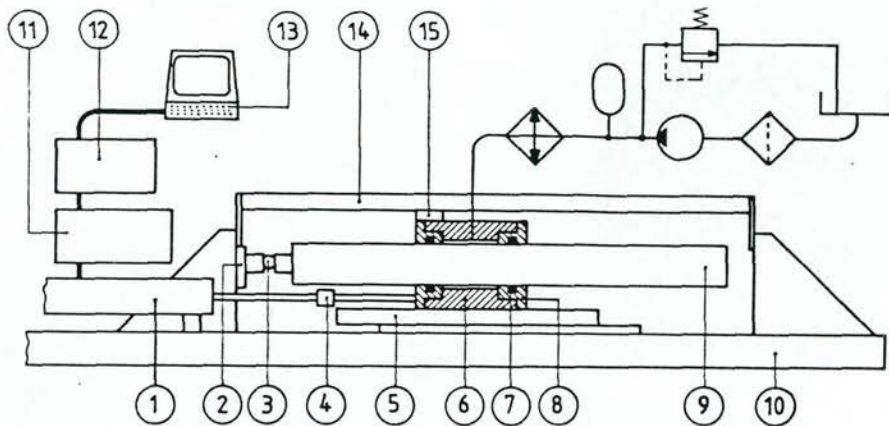


Afb. 6.26. Vergelijkende karakteristieken, 175 Bar.



Afb. 6.27. Vergelijkende karakteristieken, 200 Bar.

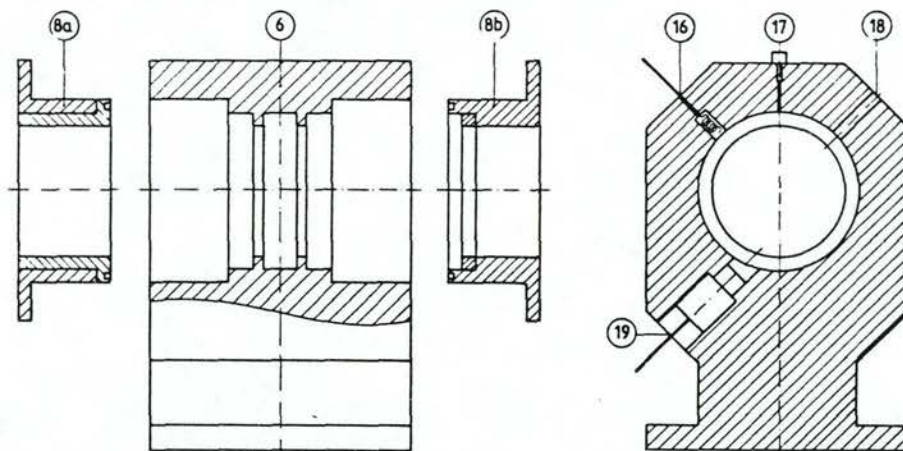
Samenstellende delen van de proefstand



- | | |
|--------------------------------|--------------------------------|
| 1 hydraulic actuator | 9 rod |
| 2 force transducer | 10 frame |
| 3 universal joints | 11 hydraulic supply unit |
| 4 joint | 12 control module |
| 5 linear motion roller bearing | 13 personal computer |
| 6 body of the seal housing | 14 optical position transducer |
| 7 seal | |
| 8 lid of the seal housing | |

Figure 2.5 Test rig used in this thesis.

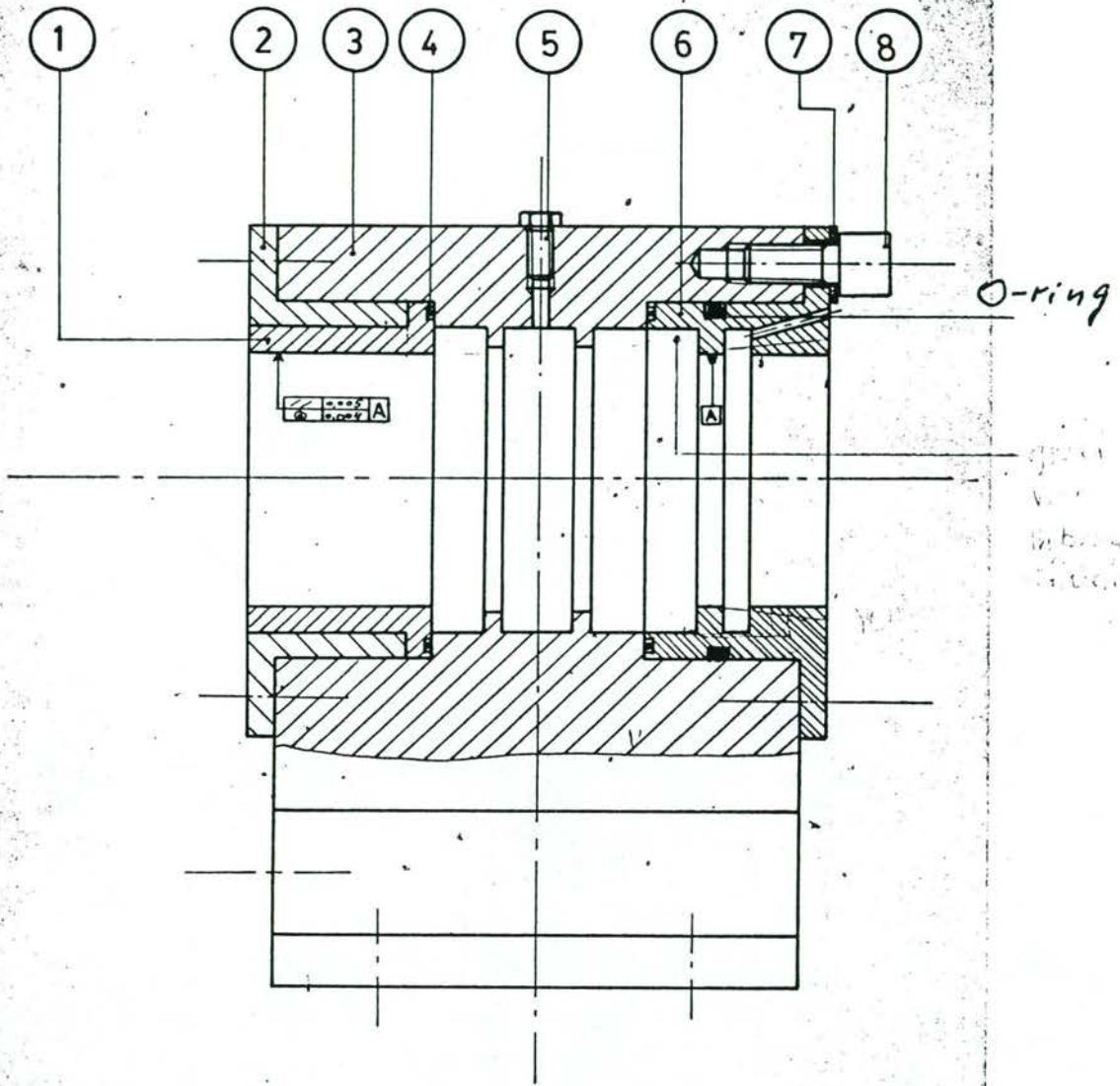
The seal housing consists of a body (6) and two easy exchangeable lids (8). It is displayed in more detail in figure 2.6.



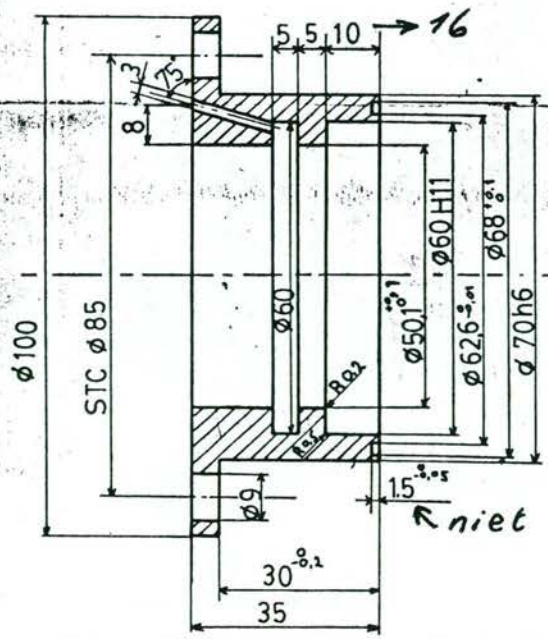
- | | |
|-----------------------------------|---------------------------|
| 6 body of the seal housing | 16 temperature transducer |
| 8a leak lid (hydrostatic bearing) | 17 air relief screw |
| 8b seal lid | 18 bore for oil supply |
| | 19 pressure transducer |

29

ZIJAANZICHT

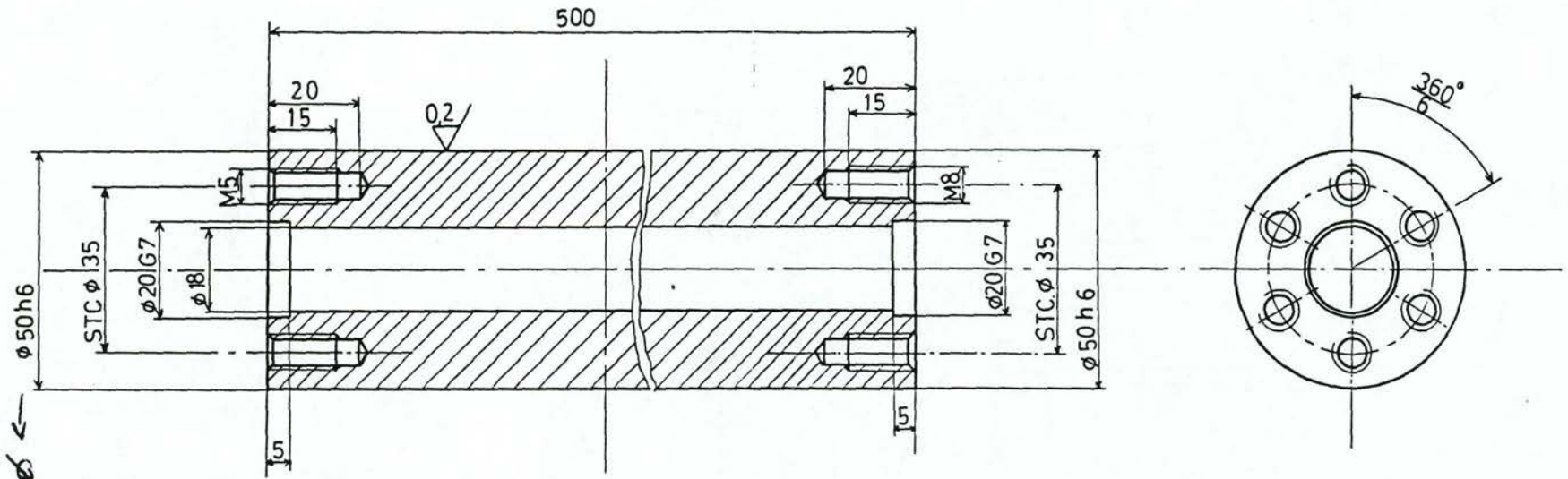


6 ∇ 1.6



1.6/

28 $\frac{16}{\nabla}$ / $\frac{0.2}{\nabla}$




204

$\varnothing f_{n-5} \varnothing$

$\varnothing 20 G7 = \varnothing 20^{+0.021}_{-0.007}$
 $\varnothing 50 h6 = \varnothing 50^{+0.016}_{-0.008}$

OPMERKING
 maten, welke niet zijn voorzien van toleranties,
 getolereerd denken met $\pm 0,5$ mm resp ± 1

AS VERCHROMEN

TOLERANTIES VLGS NEN 2365		PROJECTIE	BENAMING	
b.v. $B \pm 0,15$ $\begin{matrix} +0,10 \\ -0,25 \end{matrix}$ \triangle $30^\circ 10' \pm 30'$		AM	AS	
PASSINGEN VLGS N 802	RUWHEIDSWAARDEN VLGS NEN 630	AANTAL	1	MATERIAAL
				FE 360
 TECHNISCHE HOGESCHOOL EINDHOVEN AFDELING: GROEP:	SCHAAL	1:1	DATUM	TEKENINGNR.
	GET.	Wd.Smit	11-86	3
	GEC.		WIJZIGING	

A3

6.8 De afdichtende eigenschappen van geteste seals

Bij het uitvoeren van de modeltests werd steeds de wrijvingskracht gemeten als karakteristieke grootte bij verschillende bedrijfscondities en verschillende seals.

De lekkage werd niet als afzonderlijke grootte gemeten. Wel werden bij alle tests waarnemingen gedaan om na te gaan of de afdichtende werking op grond van visuele waarnemingen goed was.

Op grond van visuele waarneming werd geen noemenswaardige lekkage vastgesteld.

Daarbij geldt de uiterst dunne olielamelle op de stang, na het naar buiten bewegen van de stang, niet als lekkage indien zich na het weer naar binnen bewegen geen oliedruppels voor de afstriker verzamelen

7 Vervaardiging van prototypes en prototypebeproeving op ware grootte

In dit hoofdstuk wordt het experimentele gedeelte beschreven dat door Hydraudyne Cylinders B.V. is uitgevoerd aan afdichtingen op ware grootte.

Auteur: ir. W. Voskuyl / Hydraudyne

Wrijvingskrachtbepaling van
stangafdichtingen
op Chroom- en Ceramax®
zuigerstangen
op praktijkschaal

R&D Hydraudyne Cylinders B.V.

April 1995
W. Voskuyl

INHOUDSOPGAVE

1. Inleiding
2. Meetopstelling
3. Meetmethode
4. Stangoppervlakken
5. Afdichtingen
6. Meetcompensatie
7. Meetresultaten
8. Conclusie

- Bijlagen
- | | |
|-----|--------------------------------------|
| I | Meetopstelling |
| II | Diverse onderdelen |
| III | Voorbeeld meetopname |
| IV | Meetresultaten |
| V | Grafische presentatie meetresultaten |

1. Inleiding

Dit deelrapport is onderdeel van het project "Hydraulische seals", uitgevoerd in een samenwerkingsverband tussen:

- Bouwdienst Rijkswaterstaat, Zoetermeer
- Technische Universiteit, Eindhoven
- Hydraudyne Cylinders B.V., Boxtel
- Busak & Shamban Nederland, Rotterdam

In dit rapport wordt de weerstand nagegaan van diverse afdichtingstypen voor het afdichten van met Chroom beklede en met Ceramax® beklede zuigerstangen.

De schaalgrootte van \emptyset 180 mm werd zodanig gekozen dat deze proeven overeenkomen met in de praktijk toegepaste maten voor cilinders van bewegingswerken in de civiele bouw, de tunnelbouw en de staalindustrie.

De proeven werden uitgevoerd met een dubbel gemonteerde afdichting. De weerstandwaarden zoals deze worden gepresenteerd zijn een gemiddelde van de waarden bij ingaande en uitgaande slag.

Bij interpretatie van de metingen naar een praktijksituatie attendeer ik hierop.

2. Meetopstelling

De meetopstelling wordt grafisch weergegeven in het overzicht "Principal Friction Measurement Arrangement for Piston Rod Seals".

De meting is gebaseerd op de bepaling van de druk benodigd in een hydraulische cilinder om een testeenheid bestaande uit een bewegende zuigerstang met twee afdichtingen (onder ingestelde druk) te bewegen met een vooraf ingestelde snelheid.

De aandrijfcilinder is een enkelwerkende cilinder met een effectief zuigeroppervlak van $49,1 \times 10^{-3} \text{m}^2$ ($\varnothing 250 \text{ mm}$).

Deze ondervindt een "last" bestaande uit de volgende componenten:

1. Eigen gewicht zuigerstang, zuiger en aangebouwde delen
2. Olievulling in de cilinder
3. Weerstand van de afdichting op de zuiger
4. Lageringsweerstand (in theorie= 0 i.v.m. verticale opstelling)
5. Weerstand van de gecombineerde stangafdichting

De bewegingssnelheid werd ingesteld middels een snelheids regelventiel, waarbij de drukval over dit ventiel, afhankelijk van de benodigde druk in de cilinder in de orde van grootte lag van 60 bar.

Technische gegevens van de meetopstelling

Olietype	:	Shell Tellus 32
Meettemperatuur	:	16-23°C
Eigen gewicht zuigerstang zuiger en aangebouwde delen	:	222kg; bepaling hiervan zowel theoretisch berekend als gewogen.
Diameter zuigerstang	:	$\varnothing 180 \text{ f8}$
Meetapparatuur (drukmeting in de cilinder)	:	Hydac 60 bar elektronische opnemer. Data-opname via schrijver.
Meetapparatuur (drukmeting in het afdichtpakket)	:	gecalibreerde manometers (0-100 bar; 0-400 bar)
Slaglengte	:	maximaal 420 mm

Lagering:

- 1 x 25 mm band Orkot TLG gemonteerd op de zuiger.
- 1 x 25 mm band Orkot TLG gemonteerd in de kop.

Zuigerafdichting

Een lage wrijvingsafdichting op de zuiger.

Materiaal : PTFE brons (T46)

Uitvoering : Glydring T (Busak & Shamban) Ø 250

Opstelling

Verticaal.

3. Meetmethode

De meetmethode bestond uit twee fasen:

Fase A) **BEPALING WEERSTAND VAN DE ZUIGERAFDICHTING IN COMBINATIE MET LAGERING EN EIGEN GEWICHT**

Met de correctie voor het eigen gewicht van de stang en middeling van de met de slaghoogte variabele statische oliedruk is hiermee de weerstand op de hoofdlast (stangafdichtingen) te bepalen.

Deze weerstandbepalingen werden uitgevoerd zonder stang afdichting last bij snelheden van 2, 10 en 50 mm/s.

Er treedt een zeer klein verschil op tussen de weerstand op de zuigerafdichting bij geringe last en bij zwaardere last. Maximale druk benodigd voor de aandrijving van de stangafdichting was ca. 12 bar. Gezien deze geringe druk werd het verschil tussen de weerstand van de zuigerafdichting bij hogere en lagere belasting verwaarloosd.

Fase B) **BEPALING WEERSTAND STANGAFDICHTING**

Na montage van de afdichtingen werd het systeem 20 slagen bewogen bij de druk op de afdichtingen van 25 bar en snelheid van 50 mm/s.

Speciale attentie werd gegeven om de olie op de afdichtingen te ontluchten. Een visuele controle hierop was niet mogelijk.

De stroomregelkleppen werden ingesteld op een vaste waarde behorende bij snelheden van 2, 10 en 50 mm/s. De snelheidsbepaling vond plaats door tijdsmeting op een aangetekend traject.

Werkwijze

- 1° Drukinstelling op stangafdichting
- 2° Snelheidsinstelling met stroomregelklep
- 3° Stabilisatie van de drukdruk in aandrijfaggregaat
- 4° Klep B dicht, klep A openen
- 5° Bepaling van de druk in de aandrijfcilinder bij uitgaande slag

Het systeem werd weer in de beginpositie gebracht door perslucht aan te brengen op de stangzijde van de aandrijfcilinder. Met name bij de hogere drukken op de stangafdichting en toepassing van de NBR dakvormset was het tevens nodig de druk op de afdichtingen te verlagen om met perslucht de beginsituatie te bereiken.

De meetcyclus vond plaats met oplopende druk in de afdichtingen en bepaling van de weerstand bij de ingestelde snelheid. Als controlemeting werd na de meting bij een druk van 200 bar wederom de weerstand bepaald bij niet hydraulisch belaste afdichtingen.

Detailinformatie meetopstelling

Meer gedetailleerde gegevens betreffende de toegepaste onderdelen in de meetopstelling wordt gegeven in bijlage II.

Bepaling van de weerstand

De druk in de aandrijfcilinder werd geschreven middels een X-Y recorder.

Hierbij was de meetsonde ingesteld op directe presentatie van de gemeten waarde zonder capacitieve filtering. Dit resulteerde in fluctuerende meetwaarden waarbij de druk werd bepaald aan de hand van delen van de geschreven meetwaarde waarin de druk kort stabiel was. Het in de bijlage geven voorbeeld geeft hiervan een indruk. Het spreekt vanzelf dat met deze "methodiek" een afleesfout optreedt. Als orde van grootte hiervan werd 0,05 bar aangenomen (245 N). Tevens is aan het voorbeeld goed te zien dat de gemiddelde druk mogelijk wat hoger is dan genoteerd omdat de waarde bij de korte stabiliteitsperiode gemiddeld iets lager liggen dan de gemiddelde weerstand.

Genoemde drukk bepaling is consequent doorgevoerd voor alle meetwaarden, waardoor onderling vergelijk mogelijk is.

4. Stangoppervlakken

Getest werd op een Chromoppervlak en een Ceramax 1000® oppervlak. Beide stangen waren standaard betrokken uit de produktie van Hydraudyne Cylinders.

Technische gegevens van deze oppervlakken:

Oppervlak Chroom

Diameter : Ø 180 f 8 nominaal (Ø 180 (-0,043,-0,106))
Ø 180 - 0,07 minimaal
- 0,05 maximaal
- 0,06 gemiddeld

Ruwheid : 0,10 mu (Ra) minimaal *
0,21 mu (Ra) maximaal *
0,13 mu (Ra) gemiddeld *

Oppervlak Ceramax:

Diameter : Ø 180 f 8 nominaal (Ø 180 (-0,043,-0,106))
Ø 180 - 0,06 minimaal
- 0,04 maximaal
- 0,05 gemiddeld

Ruwheid : 0,14 mu (Ra) minimaal *
0,29 mu (Ra) maximaal *
0,21 mu (Ra) gemiddeld *

* Bepaling met ruwheidsmeter: Perthen

Ter controle werden met een ruwheidsmeter fabrikaat Hommel de ruwheidswaarden en parameters van de Abbott curve bepaald voor het Ceramax oppervlak en ook de Ra waarde voor beide oppervlakken. Deze Ra metingen geven systematisch lagere waarden.

Oppervlakte Chroom:

Ruwheid : 0,05 mu (Ra) ** minimaal
0,10 mu (Ra) ** maximaal
0,07 mu (Ra) ** gemiddeld

Oppervlak Ceramax:

Ruwheid : 0,12 mu (Ra) ** minimaal
0,18 mu (Ra) ** maximaal
0,15 mu (Ra) ** gemiddeld

Relevante waarden van de Abbotte curve (DIN 4776)

Rpk: max: 0,08 : min: 0,04 : gemid. 0,06 mu **
Rvk: max: 0,77 : min: 0,41 : gemid. 0,54 mu **
Rk : max: 0,25 : min: 0,18 : gemid. 0,21 mu **

MR1: max: 7,1 : min: 2,6 : gemid. 4,4 % **
MR2: max: 82,3 : min: 76,3 : gemid. 79,2% **

** Bepaald met Hommel ruwheidsmeter

Het is een bekend verschijnsel dat de Ra ruwheidswaarden door een Hommel-ruwheidsmeter systematisch lager zijn dan de metingen met een Perthen meter.

Beide meetinstrumenten gaven vergelijkbare waarden bij een ijking met een proefplaatje met $Ra=0,33 \mu m$.

5. Afdichtingen

NBR canvas dakvormmanchetcombinatie (op Cr)

Fabricage : Merkel Ø 180 (Ø210)
Opbouw : NBR-canvas steunring
NBR-canvas V lippen 4x
PTFE brons drukring

Getest werd zowel met "ongespannen" dakvormsets waarbij de niet gemonteerde sets een geringe axiale voorspanning hadden ten opzichte van de beschikbare ruimte van 0,20 mm per set, als met een voorgespannen set met een voorspanning van 0,7 mm.

De uitvoering met PTFE bronzen drukring is een standaard Hydraudyne dakvormset met een lagere wrijving aan een vol NBR-canvas set. Voor de grotere typen dakvormsets wordt in tegenstelling tot eerder geteste proeven geen vol NBR middelste ring toegepast.

UHMWPE (wit) dakvormmanchetcombinatie (op Cr en Ceramax®)

Fabricage : Merkel Ø 180 (Ø 210)
Opbouw : NBR-NBR canvas noppen geveerde steunring
UHMWPE V lippen (4x)
UHMWPE drukring

Getest werd met een voorspanning van 1,4 mm per set. De aanbevolen voorspanning is 1,70, met als tolerantie: (+0,25, - 0,45) mm.

Twee stepseals

Ø 180 (breedte groef 6,3 mm op Cr en Ceramax®)

Fabricage : Busak & Shamban

Getest werd met een "insert" waarin beide stepseals werden gemonteerd.

Uitvoering stepseals : standaard vorm, materiaal UHMWPE compound Z80

7. Meetresultaten

De meetresultaten zijn gegeven in bijlage V.

Hier worden gepresenteerd:

- A. De meetwaarden (bar)
- B. De voor drukverlies gecorrigeerde meetwaarden, met compensatie van drukverlies bij niet gemonteerde afdichtingen.
- C. De berekende wrijvingskracht voor de afdichting.

Als waarde is gegeven de halve waarde van de wrijving in verband met de dubbele (tweezijdige) afdichting.

De grafische presentatie van de meetwaarden wordt gegeven in bijlage VI, waarbij uitgezet is de wrijvingkracht (N) voor de geteste afdichtingen in relatie tot de snelheid.

8. Conclusie

Bij de interpretatie van de meetresultaten dringt zich direkt een vergelijk op met de eerdere meetwaarden gemeten bij de TU-Eindhoven.

Voorafgaande aan dit vergelijk is het nodig de volgende aspecten in dit vergelijk te betrekken.

NBR-canvas afdichtingen

Zowel diameter als hoogte is verschillend.

In tegenstelling tot de TU-E test werd voor de \varnothing 180 mm test een PTFE bronzen drukring toegepast en werd geen vol rubberen V-ring toegepast.

UHMWPE afdichting

De voorspanning was in de gemeten test hoger dan voorheen getest. De uitvoering was met een aanzienlijk flexibeler rubberelement als steuning uitgevoerd.

Stepseals

Getest werd met twee stepseals in tegenstelling tot de test op \varnothing 50 mm uitgevoerd bij de TU-E, die werd uitgevoerd met een enkele stepseal

* VERGELIJK PROEVEN \varnothing 180 MET DE PROEVEN \varnothing 50 OP CHROOM MET NBR DAKVORMSETS

Opvallend zijn:

- 1° De met toenemende snelheid "dalende" weerstand bij de \varnothing 180 proeven in tegenstelling tot de proeven \varnothing 50.
- 2° De beduidend hogere weerstandswaarden bij de \varnothing 180 mm proeven, die zowel hoger zijn dat op grond van lineaire verscaling van diameter te verwachten is (faktor 180/50) als ook op grond van lineaire verscaling van diameter x hoogte van de set te verwachten is (hoogteverschil factor 2).

* VERGELIJK PROEVEN Ø180 MET DE PROEVEN Ø50 OP CHROOM MET UHMWPE DAKVORMSETS

Opvallend hierbij is lagere wrijving bij nul druk bij de Ø 180 test in vergelijking met de Ø 50 test, dan op grond van lineaire verschaling van de diameter verwacht kan worden. Bij hogere drukken is de gemeten wrijving veel hoger dan op grond van lineaire verschaling verwacht kan worden. Betreft men het hoogte verschil van de dakvormsets (bij Ø 180 2x zo hoog als bij Ø 50) bij de wrijving, uitgaande van het model dat de wrijving van een dakvormset evenredig is met de diameter x de hoogte van de set, dan is de wrijving bij hoge druk bij Ø 180 in redelijke overeenstemming met de Ø 50 testen.

* VERGELIJK PROEVEN Ø180 MET DE PROEVEN Ø50 OP CHROOM MET UHMWPE STEPSEALS

Bij de proeven Ø 50 werden bij met name lagere drukken minima gemeten in het snelheidsverloop, waarbij met toenemende snelheid de weerstand afnam. Dit werd niet bevestigd in de metingen op Ø 180 mm. Bij de metingen Ø 50 zou ervan uitgegaan kunnen worden dat de weerstand (met volledig voorbijgaan aan de snelheidsinvloed) beschreven kan worden door de reactie:
 $F_w = 80 + 2,8 (x \text{ druk in bar}) (N)$.
Voor de Ø 180 mm testen treedt bij 200 bar een plotseling hoog weerstandsniveau op waarbij 200 bar een lineaire verschaling met de Ø 50 mm proeven mogelijk is (korrektie van de berekende waarbij bij Ø 50 met de faktor (180/50)). Echter tot 150 bar is de weerstand aanzienlijk lager en ruwweg het dubbele van de Ø 50 mm testen.

* VERGELIJK WRIJVING AFDICHTINGEN OP CHROOM OPPERVLAKKEN MET DEZELFDE AFDICHTING OP CERAMAX

UHMWPE dakvormset

Bij lagere druk is het wrijvingsverschil gering. Bij hogere druk is de wrijving van een UHMWPE dakvormset beduidend hoger op Ceramax dan op chroom. De met de pin-disk testen gemeten verschillen in wrijvingsweerstand met een faktor 2,5 (Ceramax / UHMWPE ~ 0,1 en chroom / UHMWPE ~ 0,04) tonen zich globaal ook in de testen waarbij wrijvingsverschillen werden gemeten met een faktor 2,7 (V = 2 mm/s.) tot 1,7 à 1,9 (V = 50 mm/s.).

UHMWPE stepseal(s)

Bij lagere druk is het wrijvingsverschil gering. Bij hogere drukken (50 bar - 150 bar) is de wrijvingsweerstand op Ceramax in vergelijking tot chroom hoger met een faktor 2,2 tot 1,5. Bij 200 bar echter werden geringe verschillen in wrijving gemeten.

* VERSCHILLEN IN WRIJVING TUSSEN STEPSEALS UHMWPE EN DAKVORMSETS UHMWPE

Zeer opvallend is het zeer grote verschil in wrijving tussen dakvormsets en stepseals. De wrijving van stepseals is een faktor 4 tot 10 geringer dan bij dakvormsets zowel op chroom als op Ceramax.

* VERGELIJK TUSSEN DE KLASSIEKE OPLOSSING (DAKVORMSET NBR OP CHROOM MET EEN NIEUWE OPLOSSING (STEPSEALS OP CERAMAX))

Als afronding van dit onderzoek is een direkt vergelijk te maken tussen de "klassieke oplossing" (chromstang met NBR dakvormset) met een mogelijke "nieuwe oplossing" (Ceramaxstang met stepseals).

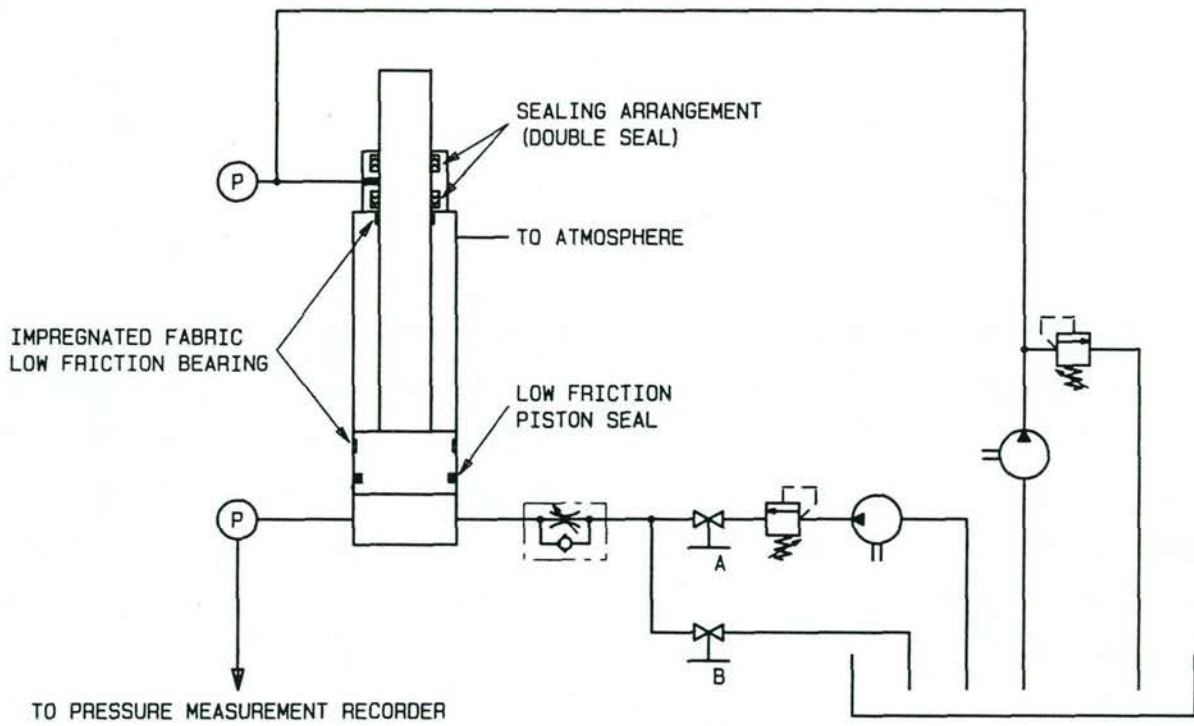
Hieruit blijkt dat zelfs met een licht voorgespannen dakvormset (0,2 mm voorspanning) de weerstand van de Chrom-dakvormset combinatie bij lage druk en lage snelheid zeer aanzienlijk (orde van grootte 10x zo groot) veel hoger is dan met een Ceramax-Stepseal (UHMWPE) combinatie te bereiken is. Met hoge druk en hogere snelheid (200 bar, 50 mm/s) is het verschil nog bijzonder significant (orde van grootte 4,6x).

WVo2703.2
WVo/ab
27-03-95

BIJLAGE I

Meetopstelling

PRINCIPAL FRICTION MEASUREMENT ARRANGEMENT
FOR PISTON ROD SEALS



CYLINDER: $\varnothing 250 \times \varnothing 180$ (PISTON ROD) $\times 420$ (STROKE)

7u/v1a/cad/schema

BIJLAGE II

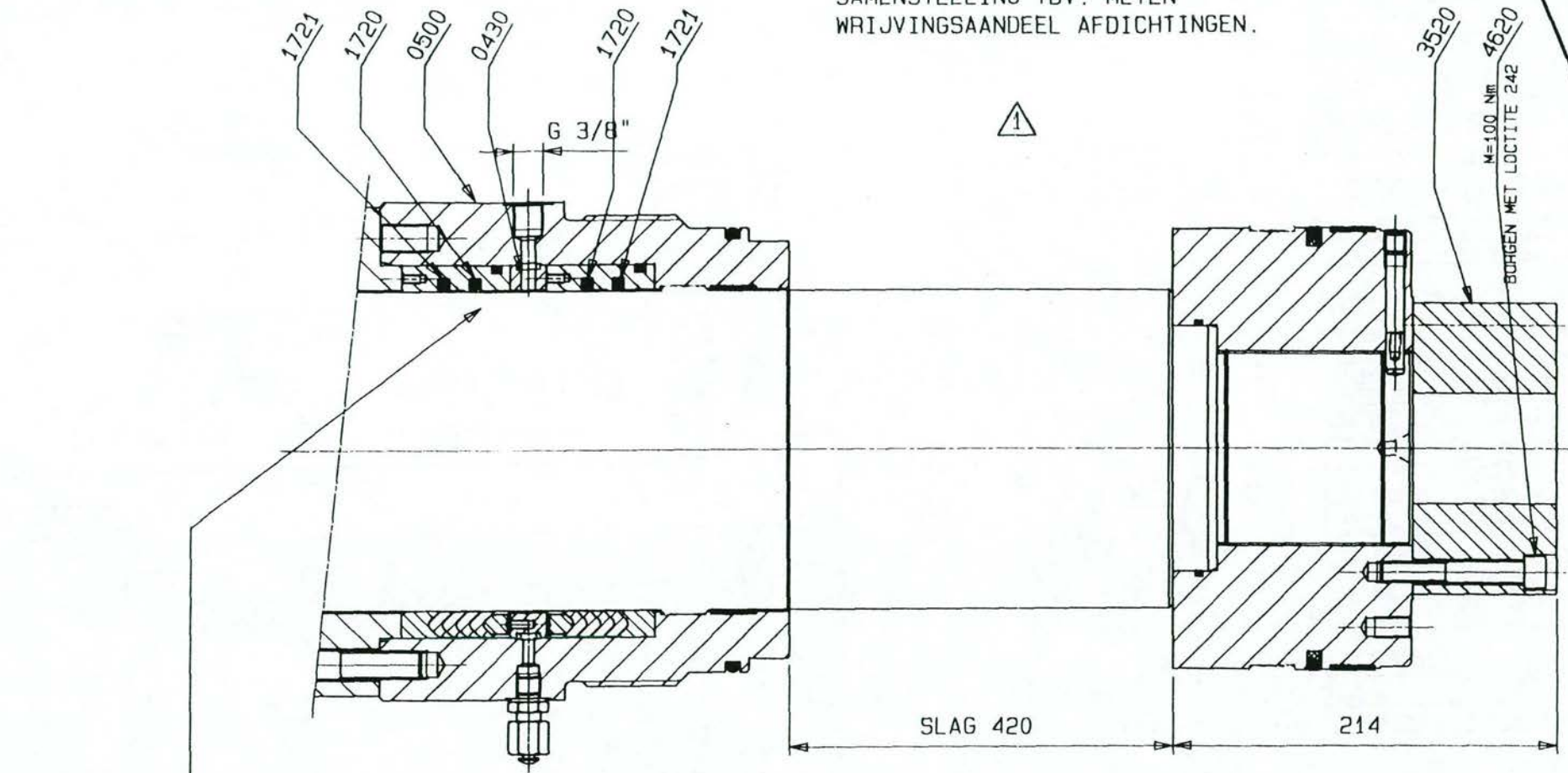
Diverse onderdelen

PROPERTY OF HYDRAULYNE BOXTEL, NETHERLANDS.
REPRODUCTION, OR DISCLOSURE TO THIRD PARTIES IN
ANY FORM WHATSOEVER, NOT ALLOWED WITHOUT
WRITTEN CONSENT OF THE PROPRIETORS.

225

VERMINTING VAN VERVALING BOXTEL, NEDERLANDS.
VERMEENTING VAN DERDE PARTIJEN OF REPRODUCTIE
IN WELKE FORM DAN OOK, IS ZONDER SCHRIFTELIJKE
TOESTEMMING VAN EIGENAARS NIET GEDOELFD.

SAMENSTELLING TBV. METEN
WRIJVINGSAANDEEL AFDICHTINGEN.



INDIEN KOP POS.NR.0500 GEMONTEERD WORDT,
MOET VULRING POS.NR.3520 GEMONTEERD WORDEN
IVM. STANGLENGTE (SLAG = 420 ipv. 500)

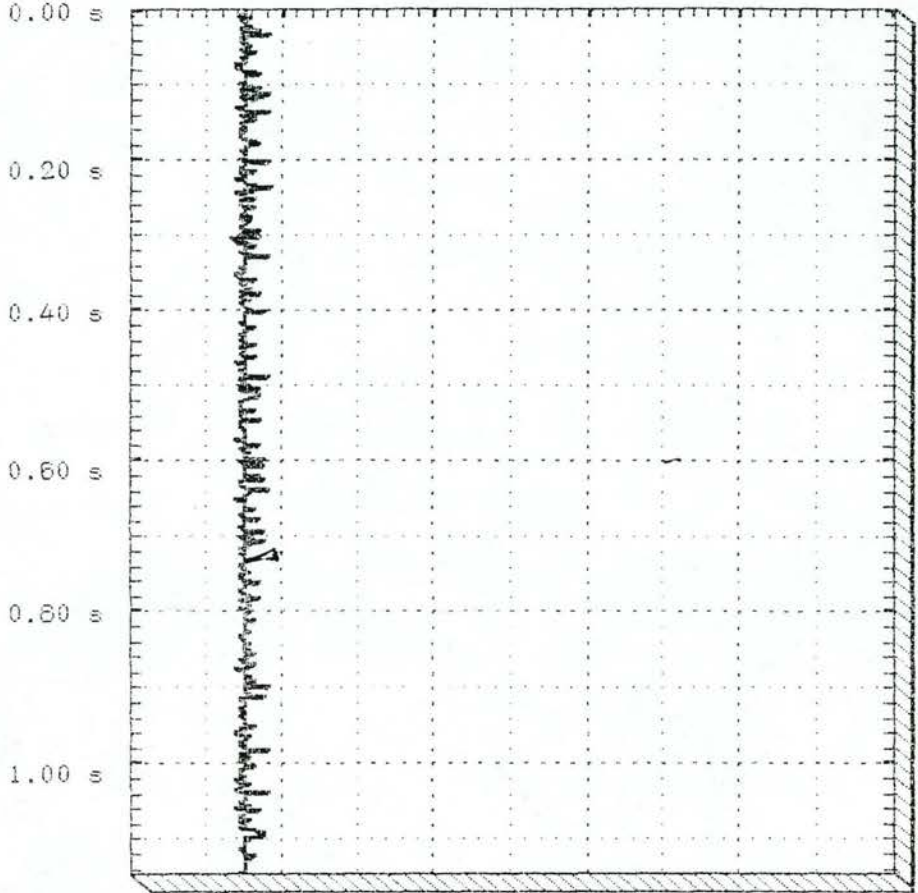
BIJLAGE III

Voorbeeld meetopname

HYDAC electronic Tr1: Meßwert Kanal A 60.00 bar fallend *21.03.95*
* HMG 2010 * Tr2: inaktiv *10:29:06*
*aktuelle Kurve * Aufnahme: 1000 * 2ms -> 2.00s * 0*

A ———

A : 0.00 2.00 4.00 6.00 8.00 10.00 bar Zoom: 6.0



Ausdruck abgebrochen

Als repräsentativ
angenommen druck.

BIJLAGE IV

Meetresultaten

WRIJVINGSBEPALING

AFDICHTING:

Dakvorm 4 lips NBR-canvas

Voorgespannen 0,2mm per set (norm)

STANG:

Chroom

METING (weerstand in bar)

		V = 2mm/s	V = 10mm/s	V = 50 mm/s
DRUK (bar):	0	1,15	1,05	0,8
DRUK (bar):	25	2,35	2	1,25
DRUK (bar):	50	3,45	3,05	1,55
DRUK (bar):	100	4,5	4	2,2
DRUK (bar):	150	4,7	4,2	2,7
DRUK (bar):	200	5,25	4,45	2,95

METING (weerstand)

(waarden in bar, met correctie voor
drukverlies zuiger+stang gewicht)

		V = 2mm/s	V = 10mm/s	V = 50 mm/s
DRUK (bar):	0	0,69	0,59	0,33
DRUK (bar):	25	1,89	1,54	0,78
DRUK (bar):	50	2,99	2,59	1,08
DRUK (bar):	100	4,04	3,54	1,73
DRUK (bar):	150	4,24	3,74	2,23
DRUK (bar):	200	4,79	3,99	2,48

METING (weerstand)

(waarden in N, met correctie voor
drukverlies zuiger+stang gewicht en
correctie voor dubbele afdichting)

		2	10	50
DRUK (bar):	0 bar	1.693	1.448	810
DRUK (bar):	25 bar	4.639	3.780	795
DRUK (bar):	50 bar	7.338	6.357	2.651
DRUK (bar):	100 bar	9.915	8.688	4.246
DRUK (bar):	150 bar	10.406	9.179	5.473
DRUK (bar):	200 bar	11.756	9.793	6.087

AFDICHTING:
Dakvorm 4 lips NBR-canvas
Voorgespannen 0,7mm per set

STANG:
Chroom

METING (weerstand in bar)

		V = 2mm/s	V = 10mm/s	V = 50 mm/s
DRUK (bar):	0	1,7	1,4	0,65
DRUK (bar):	25	2,5	1,6	0,9
DRUK (bar):	50	3,65	2,6	1,8
DRUK (bar):	100	4,65	3,25	2
DRUK (bar):	150	5,8	3,8	2,25
DRUK (bar):	200	8,2	5,15	3,8

METING (weerstand)

(waarden in bar, met correctie voor
drukverlies zuiger+stang gewicht)

		V = 2mm/s	V = 10mm/s	V = 50 mm/s
DRUK (bar):	0	1,24	0,94	0,18
DRUK (bar):	25	2,04	1,14	0,43
DRUK (bar):	50	3,19	2,14	1,33
DRUK (bar):	100	4,19	2,79	1,53
DRUK (bar):	150	5,34	3,34	1,78
DRUK (bar):	200	7,74	4,69	3,33

METING (weerstand)

(waarden in N, met correctie voor
drukverlies zuiger+stang gewicht en
correctie voor dubbele afdichting)

		2	10	50
DRUK (bar):	0 bar	3.043	2.307	442
DRUK (bar):	25 bar	5.007	2.798	438
DRUK (bar):	50 bar	7.829	5.252	3.264
DRUK (bar):	100 bar	10.284	6.847	3.755
DRUK (bar):	150 bar	13.106	8.197	4.369
DRUK (bar):	200 bar	18.996	11.511	8.173

WRIJVINGSBEPALING

AFDICHTING:

Dakvorm UHMWPE normvoorsp. 1,4mm

STANG:

Chroom

METING (weerstand in bar)

		V = 2mm/s	V = 10mm/s	V = 50 mm/s
DRUK (bar):	0	0,7	0,65	0,65
DRUK (bar):	25	1,2	1,1	0,75
DRUK (bar):	50	1,3	1,1	0,9
DRUK (bar):	100	2	1,9	1,75
DRUK (bar):	150	2,95	2,95	2,8
DRUK (bar):	200	3	3	3,2

METING (weerstand)

(waarden in bar, met correctie voor drukverlies zuiger+stang gewicht)

		V = 2mm/s	V = 10mm/s	V = 50 mm/s
DRUK (bar):	0	0,24	0,19	0,18
DRUK (bar):	25	0,74	0,64	0,28
DRUK (bar):	50	0,84	0,64	0,43
DRUK (bar):	100	1,54	1,44	1,28
DRUK (bar):	150	2,49	2,49	2,33
DRUK (bar):	200	2,54	2,54	2,73

METING (weerstand)

(waarden in N, met correctie voor drukverlies zuiger+stang gewicht en correctie voor dubbele afdichting)

		2	10	50
DRUK (bar):	0 bar	589	466	442
DRUK (bar):	25 bar	1.816	1.571	285
DRUK (bar):	50 bar	2.062	1.571	1.055
DRUK (bar):	100 bar	3.780	3.534	3.142
DRUK (bar):	150 bar	6.111	6.111	5.719
DRUK (bar):	200 bar	6.234	6.234	6.700

WRIJVINGSBEPALING

AFDICHTING:

Stepseal 2 stuks in tandem UHMWPE

STANG:

Chroom

METING (weerstand in bar)

		V = 2mm/s	V = 10mm/s	V = 50 mm/s
DRUK (bar):	0	0,52	0,5	0,48
DRUK (bar):	25	0,58	0,55	0,55
DRUK (bar):	50	0,6	0,55	0,6
DRUK (bar):	100	0,75	0,7	0,7
DRUK (bar):	150	0,9	0,8	0,8
DRUK (bar):	200	1,4	1,35	1,35

METING (weerstand)

(waarden in bar, met correctie voor drukverlies zuiger+stang gewicht)

		V = 2mm/s	V = 10mm/s	V = 50 mm/s
DRUK (bar):	0	0,06	0,04	0,01
DRUK (bar):	25	0,12	0,09	0,08
DRUK (bar):	50	0,14	0,09	0,13
DRUK (bar):	100	0,29	0,24	0,23
DRUK (bar):	150	0,44	0,34	0,33
DRUK (bar):	200	0,94	0,89	0,88

METING (weerstand)

(waarden in N, met correctie voor drukverlies zuiger+stang gewicht en correctie voor dubbele afdichting)

		2	10	50
DRUK (bar):	0 bar	147	98	25
DRUK (bar):	25 bar	295	221	81
DRUK (bar):	50 bar	344	221	319
DRUK (bar):	100 bar	712	589	564
DRUK (bar):	150 bar	1.080	834	810
DRUK (bar):	200 bar	2.307	2.184	2.160

WRIJVINGSBEPALING

AFDICHTING:

Dakvorm UHMWPE normvoorsp. 1,4mm

STANG:

CERAMAX®

METING (weerstand in bar)

		V = 2mm/s	V = 10mm/s	V = 50 mm/s
DRUK (bar):	0	0,65	0,65	0,65
DRUK (bar):	25	1,75	1,75	1,7
DRUK (bar):	50	2,3	2,15	1,75
DRUK (bar):	100	4,45	4,2	2,65
DRUK (bar):	150	5,35	5,2	3,75
DRUK (bar):	200	7,45	7,55	5,8

METING (weerstand)

(waarden in bar, met correctie voor drukverlies zuiger+stang gewicht)

		V = 2mm/s	V = 10mm/s	V = 50 mm/s
DRUK (bar):	0	0,19	0,19	0,18
DRUK (bar):	25	1,29	1,29	1,23
DRUK (bar):	50	1,84	1,69	1,28
DRUK (bar):	100	3,99	3,74	2,18
DRUK (bar):	150	4,89	4,74	3,28
DRUK (bar):	200	6,99	7,09	5,33

METING (weerstand)

(waarden in N, met correctie voor drukverlies zuiger+stang gewicht en correctie voor dubbele afdichting)

		2	10	50
DRUK (bar):	0 bar	466	466	442
DRUK (bar):	25 bar	3.166	3.166	1.253
DRUK (bar):	50 bar	4.516	4.148	3.142
DRUK (bar):	100 bar	9.793	9.179	5.350
DRUK (bar):	150 bar	12.002	11.633	8.050
DRUK (bar):	200 bar	17.156	17.401	13.081

WRIJVINGSBEPALING

AFDICHTING:

Stepseal 2 stuks in tandem UHMPE

STANG:

CERAMAX®

METING (weerstand in bar)

		V = 2mm/s	V = 10mm/s	V = 50 mm/s
DRUK (bar):	0	0,5	0,48	0,47
DRUK (bar):	25	0,6	0,6	0,6
DRUK (bar):	50	0,75	0,75	0,75
DRUK (bar):	100	1	0,95	0,85
DRUK (bar):	150	1,15	1,1	0,95
DRUK (bar):	200	1,45	1,25	1

METING (weerstand)

(waarden in bar, met correctie voor drukverlies zuiger+stang gewicht)

		V = 2mm/s	V = 10mm/s	V = 50 mm/s
DRUK (bar):	0	0,04	0,02	0
DRUK (bar):	25	0,14	0,14	0,13
DRUK (bar):	50	0,29	0,29	0,28
DRUK (bar):	100	0,54	0,49	0,38
DRUK (bar):	150	0,69	0,64	0,48
DRUK (bar):	200	0,99	0,79	0,53

METING (weerstand)

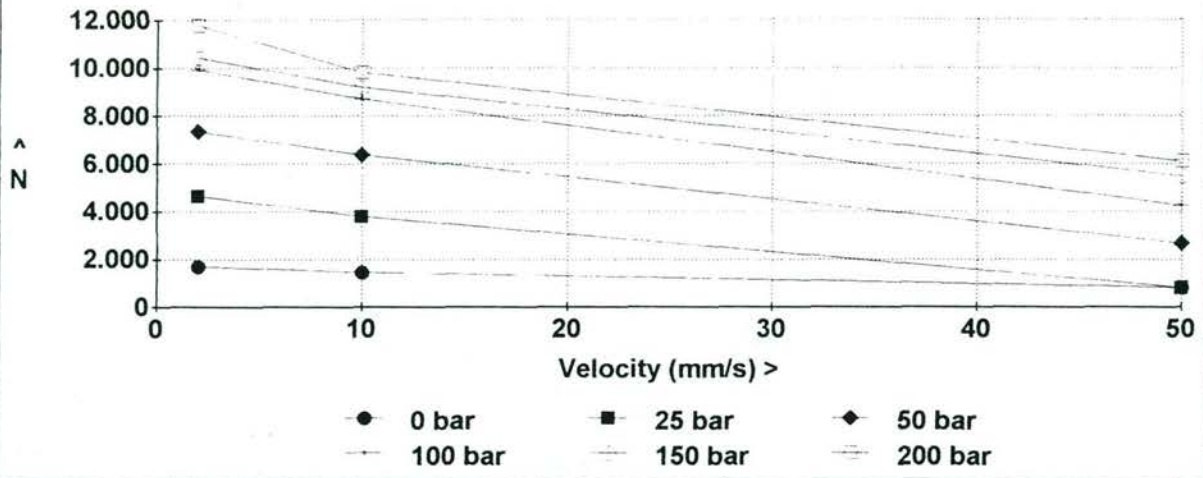
(waarden in N, met correctie voor drukverlies zuiger+stang gewicht en correctie voor dubbele afdichting)

		2	10	50
DRUK (bar):	0 bar	98	49	0
DRUK (bar):	25 bar	344	344	132
DRUK (bar):	50 bar	712	712	687
DRUK (bar):	100 bar	1.325	1.203	933
DRUK (bar):	150 bar	1.693	1.571	1.178
DRUK (bar):	200 bar	2.430	1.939	1.301

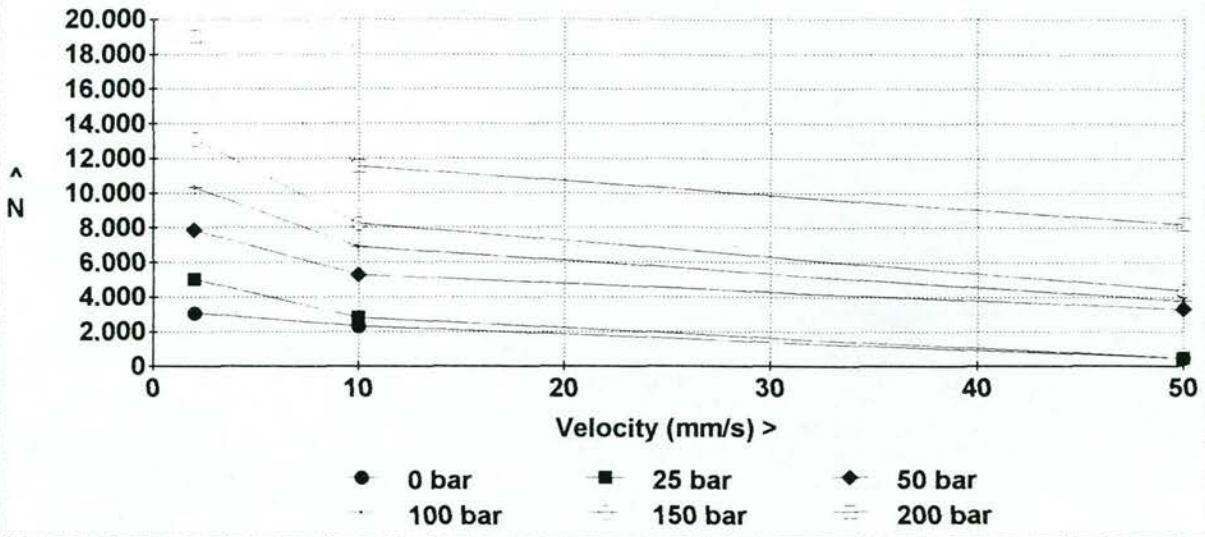
BIJLAGE V

Grafische presentatie meetresultaten

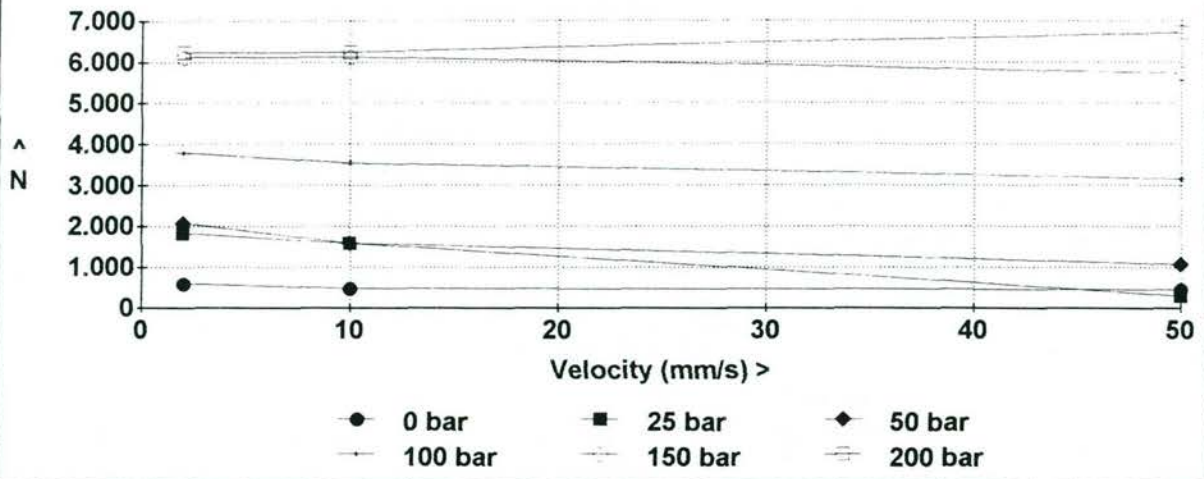
Friction on pistonrodseal Ø 180mm
NBR chevron seal on Cr

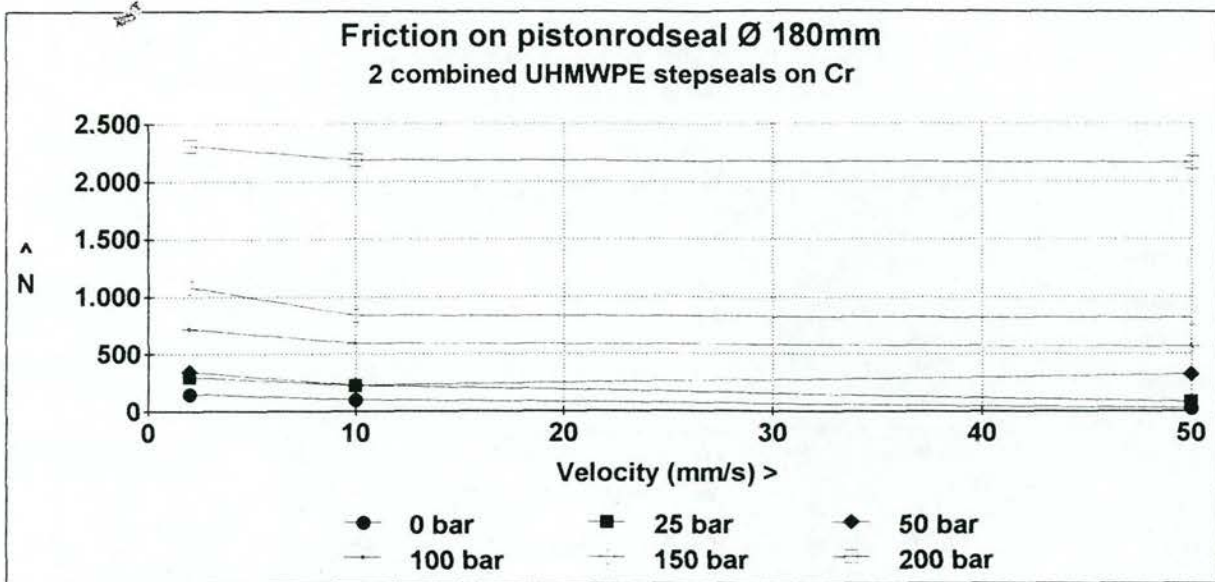


Friction on pistonrodseal Ø 180mm
NBR chevron seal on Cr (+ 0,7mm)

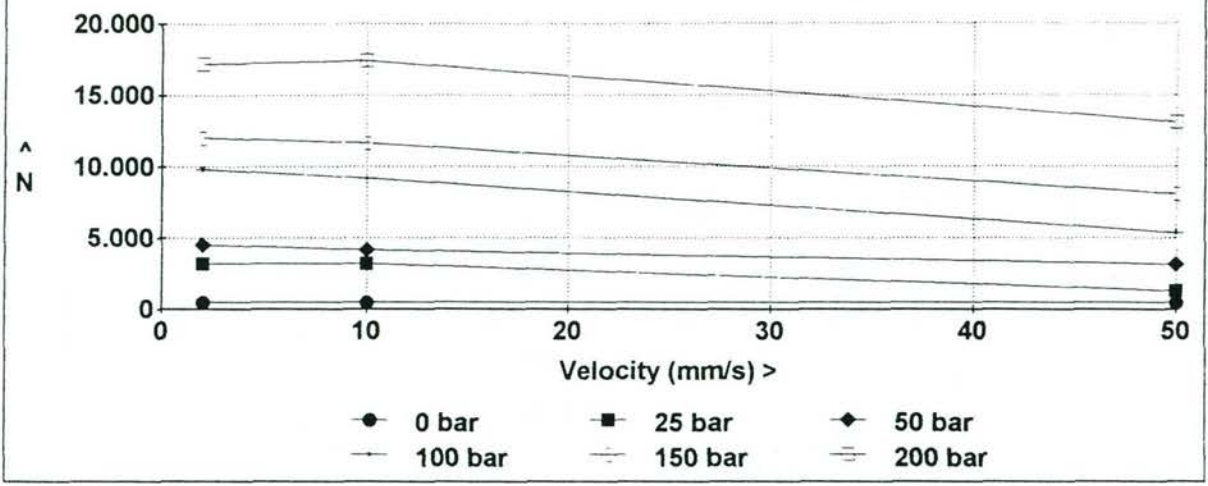


Friction on pistonrodseal Ø 180mm
UHMWPE chevron seal on Cr

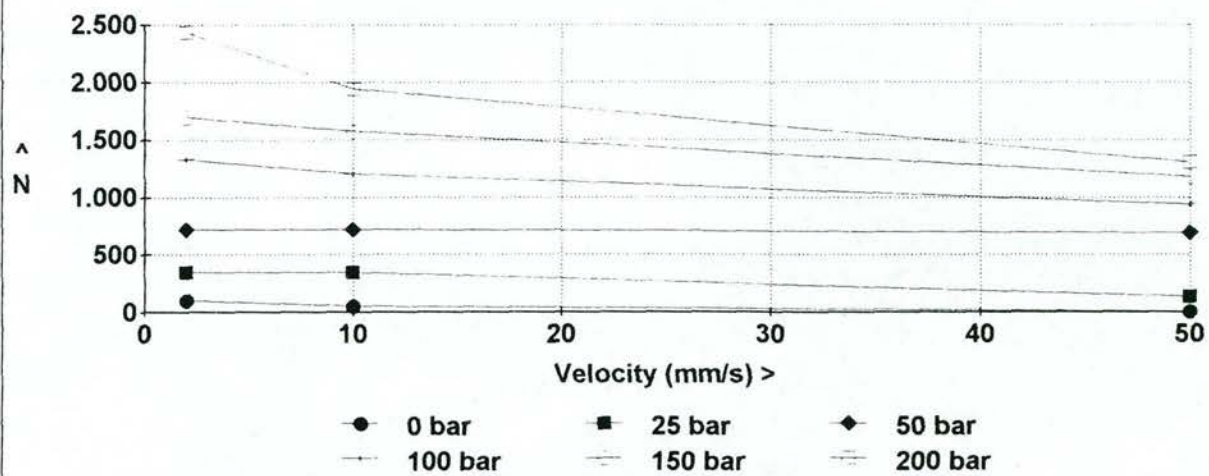




Friction on pistonrodseal Ø 180mm
UHMWPE chevron seal on Ceramax®

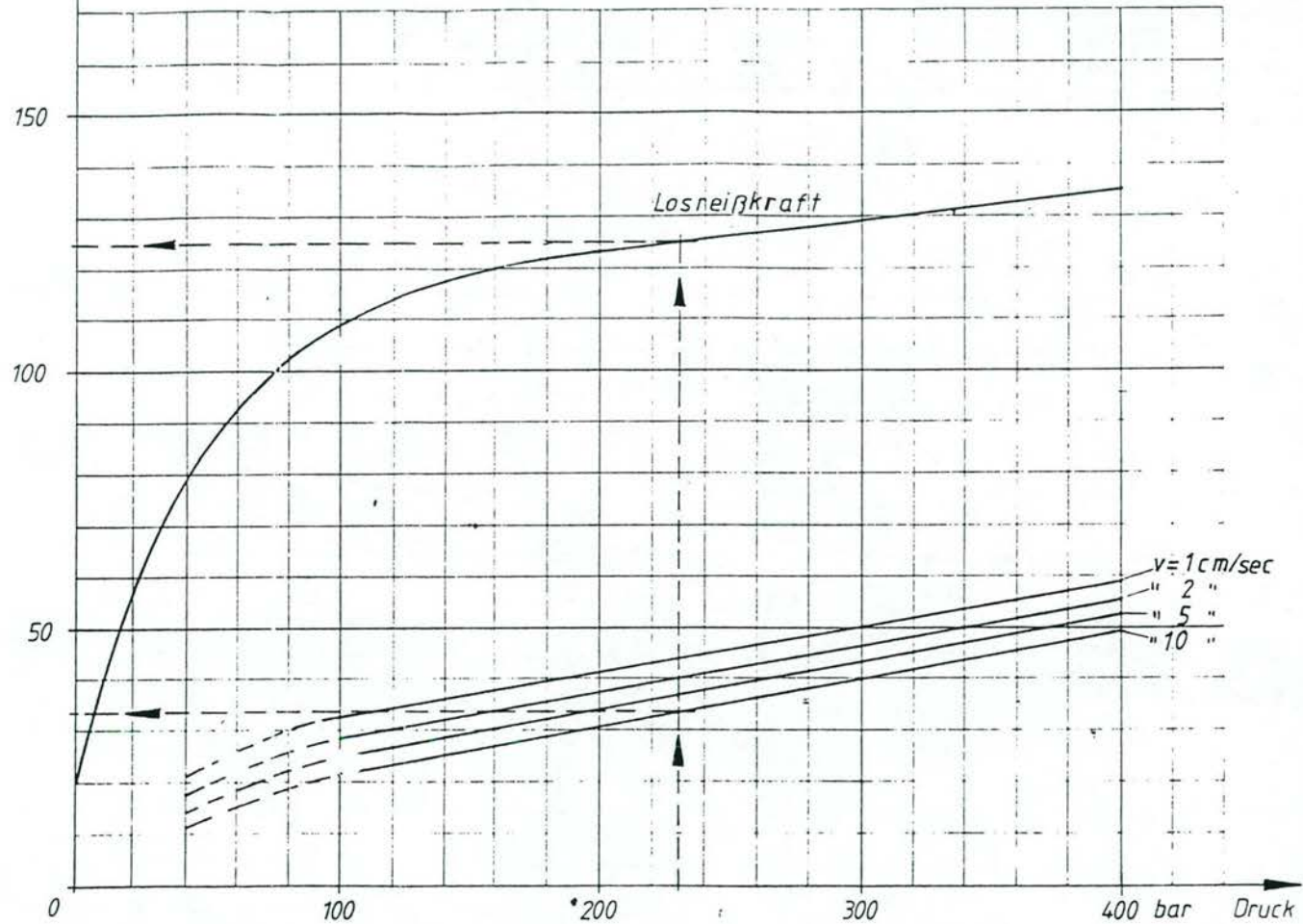
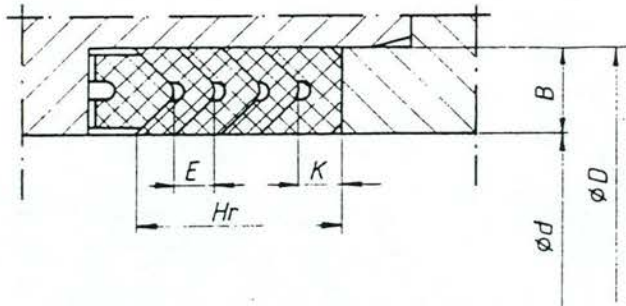


Friction on pistonrodseal Ø 180mm
2 comb. UHMWPE stepseals on Ceramax®



N/cm^2 $pr = \text{spez. Reibkraft}$

Reibkraft $R = A \times pr$ (N)
 $A = \phi d \text{ (bzw } \phi D) \times \pi \times Hr$ (cm^2)
 $Hr = n \times E + K + B \times 0,4$ (cm)
 $n = \text{Anzahl der Manschetten}$



Beispiel Manschettensatz 5 teilig für Plunger
 $\phi d = 25 \text{ cm}$; $\phi D = 29 \text{ cm}$; $B = 2 \text{ cm}$; $E = 1 \text{ cm}$; $K = 1 \text{ cm}$
 Betriebsdruck 230 bar
 pr für Losreibkraft = 125 N/cm^2
 pr für $v = 10 \text{ cm/s} = 33,5 \text{ N/cm}^2$
 $Hr = 3 \times 1 + 1 + 2 \times 0,4 = 4,8 \text{ cm}$
 $A = 25,0 \times \pi \times 4,8 = 377 \text{ cm}^2$

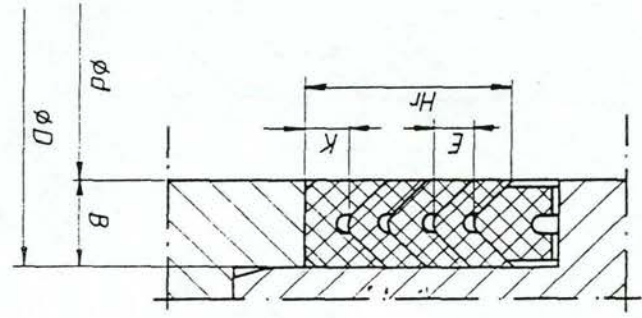
Für Losreibkraft
 $R = 377 \times 125 = 47125 \text{ N}$

Für $v = 10 \text{ cm/s}$
 $R = 377 \times 33,5 = 12630 \text{ N}$

Wegen der Vielfachverwendung dieses Diagramms ist es für die Fertigung von Ersatzteilen vorgesehen. Bitte beachten, dass die Angaben nur für die angegebenen Betriebsbedingungen gelten.	Datum	Name	Martin Merkel GmbH & Co KG 2102 Hamburg 93
	9.8.82	Lehler	
Material:	Reibkraftdiagramm Dachmanschetten 1170 Hydr.-Öl 25 °C		SK 5973
Ersatz: Ersatzteil: Entnommen aus:			

243

Reibkraft $R = A \times pr$ (N)
 $A = \phi \text{ (bzw } \phi D) \times \pi \times Hr$ (cm²)
 $Hr = n \times E + K + B \times 0,4$ (cm)
 $n = \text{Anzahl der Manschetten}$



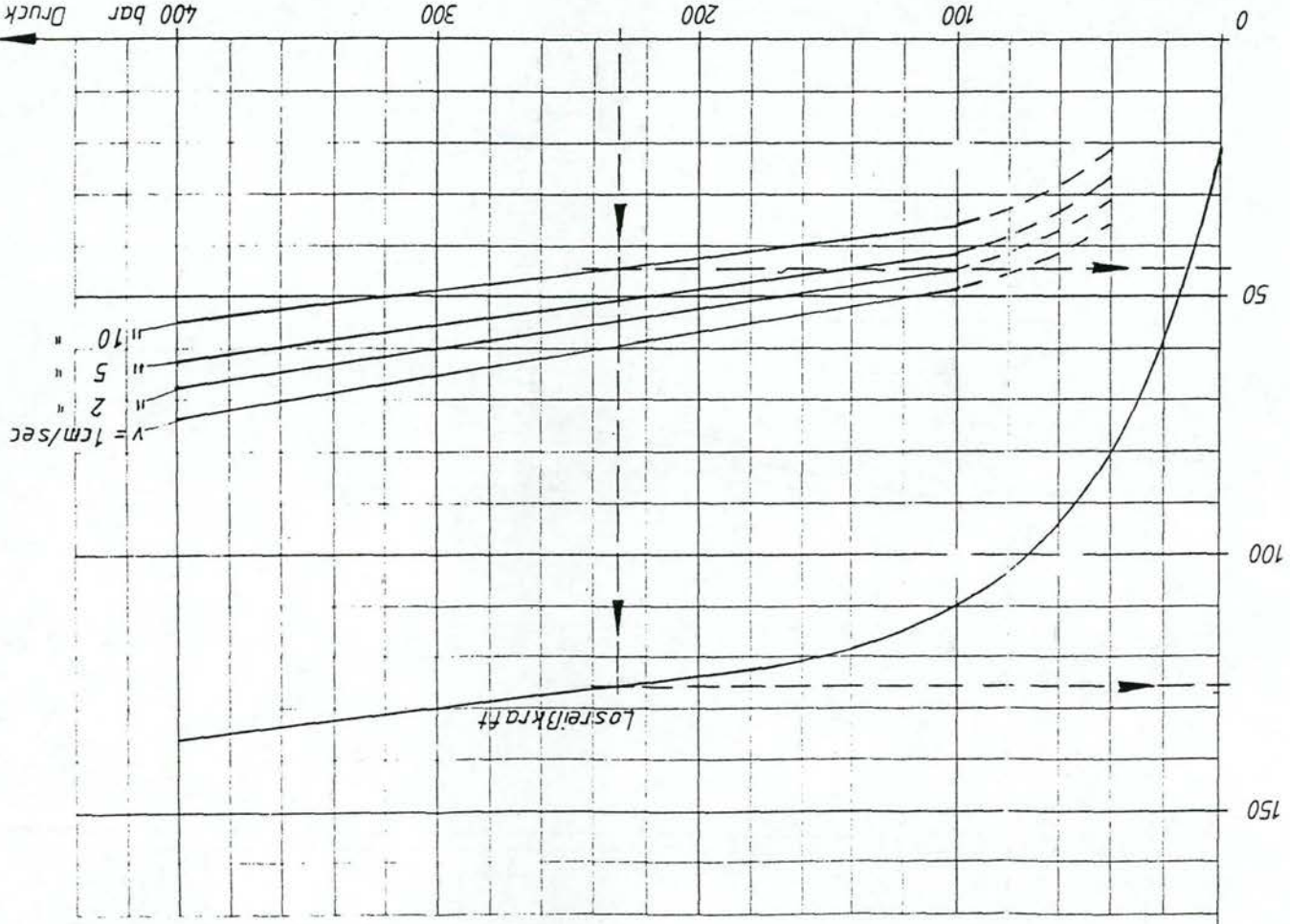
Beispiel: Manschettenersatz 5 teilig für Plunger
 $\phi d = 25 \text{ cm}; \phi D = 29 \text{ cm}; B = 2 \text{ cm}; E = 1 \text{ cm}; K = 1 \text{ cm}$

Betriebsdruck 230 bar
 $pr \text{ für Losreibkraft} = 125 \text{ N/cm}^2$
 $pr \text{ für } v = 10 \text{ cm/s} = 44,5 \text{ N/cm}^2$
 $A = 25,0 \times \pi \times 4,8 = 377 \text{ cm}^2$
 $Hr = 3 \times 1 + 1 + 2 \times 0,4 = 4,8 \text{ cm}$
 $n = 5$

Für Losreibkraft
 $R = 377 \times 125 = 47125 \text{ N}$

Für $v = 10 \text{ cm/s}$
 $R = 377 \times 44,5 = 16777 \text{ N}$

$pr = \text{spez. Reibkraft}$ N/cm²



$v = 1 \text{ cm/sec}$
 " 2
 " 5
 " 10

Ersetzt d Ersatz aus Hydr-Oil 70°C Dachmänschetten 1170		Maßstab % Ersetzt d Ersatz aus		Unsere auf Jahreverlängerung Erhaltungskosten techn Maßnahmen, die die Dichtschicht und Leber rufen werden empfohlen. Nachher Sorgen dabei Vorgehen der Hersteller in der Praxis. Anwendung in Entwürfen möglichenfalls weichen kann aber keine Gewährleistung und Haftung für die Richtigkeit und Vollständigkeit der Angaben übernehmen können werden.	
Martin Merket GmbH & Co KG 2102 Hamburg 93		Datum 9.8.82		Zeichner K. Müller	
MERKEL 2102 Hamburg 93		Reibkraftdiagramm SK 5974			

8 Vergelijking van wrijvingskrachten in modeltests en in afdichtingen op ware grootte (C.R. v.d. Laan, TUE)

In het kader van het project "Hydraulische seals" zijn door de TUE wrijvingskrachtmetingen verricht van verschillende seals op een verchromde as met een diameter van 50mm, zie Hoofdst. 6: Testen van bestaande en nieuwe seals in modeltests. Als vervolg daarop zijn door Hydraudyne soortgelijke metingen verricht aan verchromde stangen met een diameter van 180mm, meer overeenkomend met de praktijk situatie.

Vermeldenswaardig is het gegeven dat Hydraudyne witkleurig UHMWPE voor de stepseal experimenten heeft gebruikt, dit in tegenstelling tot de experimenten door de TUE verricht met zwartkleurige UHMWPE stepseals waarvan de wrijvingsfactor nagenoeg overeen komt met de wit gekleurde.

NBR canvas dakvormmanchetcombinatie tegen chroom

De nog niet gemonteerde set heeft al een geringe axiale voorspanning in een kamer met een lengte $L_{set}+0.2$ mm. Conform Merkel voorschrift, en door de TUE ook zo uitgevoerd, is de kamerlengte L , 0.2mm groter gehouden dan de breedte van een niet gemonteerde set. In niet gemonteerde toestand heeft de set a.h.w. een fictieve speling van 0.2mm in de kamer. Natuurlijk zal in gemonteerde toestand de setbreedte groter worden a.g.v. de diametrale voorspanning om de as en in de kamer en dientengevolge een axiale voorspanning opleveren. De mechanische voorspanning in gemonteerde toestand zal bij Hydraudyne **hoger** liggen dan die van de TUE. Hogere voorspanningen leveren hogere wrijvingskrachten op.

UHMWPE (wit) dakvormmanchetcombinatie tegen chroom

De omschreven voorspanning van 1.4mm per set, a.g.v. een aangepaste kamerlengte, is niet gedefinieerd en daarom als vergelijkingsmateriaal met de door TUE gedefinieerde voorspanning a.g.v. een compressiespleet, niet hanteerbaar. Zoals bekend zijn de door de TUE toegepaste compressie spleten 0.2mm en 0.5mm, na overleg met Hydraudyne en Shamban Nederland. Zowel bij de NBR/Canvas- als de UHMWPE dakvormmanchetten rijst de vraag, wat de invloed en vooral de grootte van de operationele mechanische voorspanning van de afdichtingsset is op de wrijvingskracht. Als de voorspanning van de door Hydraudyne toegepaste juist geïnterpreteerd is, zullen de gemeten wrijvings krachten hoger uitvallen dan de vergelijkbare TUE gemeten wrijvingskrachten.

Verdere opmerkingen:

In tegenstelling tot de TUE heeft Hydraudyne de gemeten F_w waarden gehalveerd gepresenteerd. De reden waarom de TUE dat niet heeft gedaan, is gelegen in het feit dat verondersteld mag worden dat de F_w richtingsafhankelijk kan zijn, zodat de wrijvingskracht in de ene set niet hoeft overeen te komen met de andere.

De door Hydraudyne gepresenteerde meetwaarden in [N] hebben dus betrekking op de **twee** in tandem staande stepseals.

Enkele opmerkingen over de vergelijking van proeven \varnothing 180 mm met de proeven \varnothing 50 mm op chroom met NBR dakvormsets

De algemene tendens is dat de weerstand bij de \varnothing 180 mm proeven daalt met toenemende snelheid.

Ook de experimenten door de TUE verricht, (zie afb. 6.6.), geven een dalende F_w tendens t.m. 10mm/sec te zien, maar het zou zeer wel mogelijk kunnen zijn, dat deze tendens zich, (minder progressief) zou voortzetten over een groter snelheids traject, alleen is dat bij het ontbreken van meetpunten niet aantoonbaar.

Voor de geometrische verschalingsfactor geldt het volgende: Los van het feit of het wel juist is om een lineaire verscaling toe te passen, lijkt de door HD gebruikte factor 2 te klein. De Merkel documentatie vermeldt een N180 set breedte van 50mm, terwijl de N50mm set een breedte van 16mm heeft. Bij een lineaire verscaling is het logisch het "kontaktoppervlak" van beide sets in ogenschouw te nemen. De verscaling op de diameter is: 180/50 en op de setbreedte: 50/16, de verschalings factor wordt dan: $(180 \times 50) / (50 \times 16) = \text{ca. } 11.3$. Om het een en ander overzichtelijker te maken, zijn hierna een aantal vergelijkingen in tabelvormen weergegeven. Onder kolom **A** is het quotient van de dubbele Hydraudyne waarden en verschalingsfactor 11.3 weergegeven.

Opm: In de tabel is:
HD = Hydraudyne-meting \varnothing 180 mm
TUE = TUE-meting \varnothing 50 mm
A = Hydraudyne-meting, gedeeld door schaalfactor

Canvas/NBR tegen Chrom, dakvorm, 0.2mm voorspanning

Druk [Bar]	Snelheid [mm/sec]								
	2			10			50		
	HD	TUE	A	HD	TUE	A	HD	TUE	A
0	3386	75	299	2896	116	256	1620	72	143
50	9287	280	812	12714	295	1125	5302	340	469
100	14676	440	1298	17376	350	1537	8492	440	752
150	20812	546	1841	18358	420	1624	10946	540	986
200	23512	603	2080	19586	440	1733	12174	620	1077

^x) Meetwaarden in [N]

Hierna zijn deze wrijfingswaarden ook als staafdiagrammen opgenomen

Conclusies:

- Rekening houdend met de vergelijkbare **dubbele** waarden van de Hydraudyne-metingen liggen de TUE F_w waarden tussen de 1,7 en 3.5 lager, dan op basis van de lineaire verschalingsfactor verwacht zou worden.
- Bij stijgende zuigersnelheid, nemen deze afwijkingen wat af, onafhankelijk van de oliedruk tussen de afdichtingen.

Vergelijking van proeven met \varnothing 180 mm met de proeven \varnothing 50 mm op chrom met UHMWPE dakvorm sets

De vergelijkingen tussen de Hydraudyne en TUE waarden zijn hieronder weergegeven, als verschalingsfactor is eveneens 11,3 toegepast.

UHMW PE tegen Chrom, dakvorm

Druk [Bar]	Snelheid [mm/sec]								
	2			10			50		
	HD	TUE	A	HD	TUE	A	HD	TUE	A
0	1196	96	106	932	75	83	884	90	78
50	4124	340	364	3142	270	278	2110	315	187
100	7560	470	669	7086	380	625	6284	465	556
150	12222	705	1081	12222	590	1081	11438	720	1021
200	12468	855	1103	12468	735	1103	13400	925	1185

^x) Meetwaarden in [N]

Conclusie:

In het algemeen, met inachtneming van de aangenomen verschalingsfactoren, liggen de UHMWPE wrijvingskrachten van Hydraudyne en TUE relatief dichter bij elkaar dan die van de NBR afdichtingen.

Vergelijking van proeven \varnothing 180 mm met de proeven \varnothing 50 mm op chroom met UHMWPE stepseals

Een verschalingsfactor van 180/50 lijkt hier voor de hand liggend, omdat de contactbreedteverschalings bij dit soort afdichtingen minder relevant is.

UHMW PE tegen Chroom, stepseal

Druk [Bar]	Snelheid [mm/sec]								
	2			10			50		
	HD	TUE	A	HD	TUE	A	HD	TUE	A
0	147	75	41	98	80	27	25	80	7
50	344	270	96	221	225	61	319	200	89
100	712	420	198	589	330	163	564	340	157
150	1080	540	300	834	400	232	810	620	225
200	2307	585	641	2184	475	606	2160	800	600

*) Meetwaarden in [N]

Conclusie:

Hier liggen de door de TUE gemeten wrijvingskrachten bij de lagere drukken belangrijk lager dan op grond van de verschalingsfactor vanuit de Hydraudyne metingen verwacht mag worden. Een omslagpunt is te vinden bij 200 bar waar de wrijvingskrachten m.u.v. de wrijvingskrachten bij 200 bar (2-10mm/sec), iets hoger liggen.

Algemene conclusies:

Dakvormmanchet afdichtingen:

- De door Hydraudyne gevonden NBR wrijvingskrachten op Chroom liggen **hoger**, dan de UHMWPE wrijvingskrachten, m.u.v. de waarden bij drukken van 150- en 200 bar, bij een verplaatsingssnelheid van 50mm.sec.
- De TUE wrijvingskrachtmetingen aan Canvas/NBR liggen allen **lager** dan die van de UHMWPE metingen.

Stepseals:

- De Hydraudyne stepseal-wrijvingskrachten van alle metingen liggen belangrijk lager dan die van de dakvormmanchet afdichtingen, bij de TUE is dit voor de meeste gevallen ook zo, zij het in veel mindere mate.

Algemene opmerking:

De conversie van de door Hydraudyne gemeten druk, (in de aandrijfcylinder) naar wrijvingskracht F_w is kritisch, omdat de vermenigvuldigingsfactor van het zuigeroppervlak hierin is verdisconteerd. De aflezing van de druk moet dus relatief nauwkeuriger geschieden om geen al te grote meetfouten te introduceren. De gepresenteerde meetresultaten komen representatief over, temeer ook omdat de opstelling qua ontwerp en constructie een goede indruk maakt.

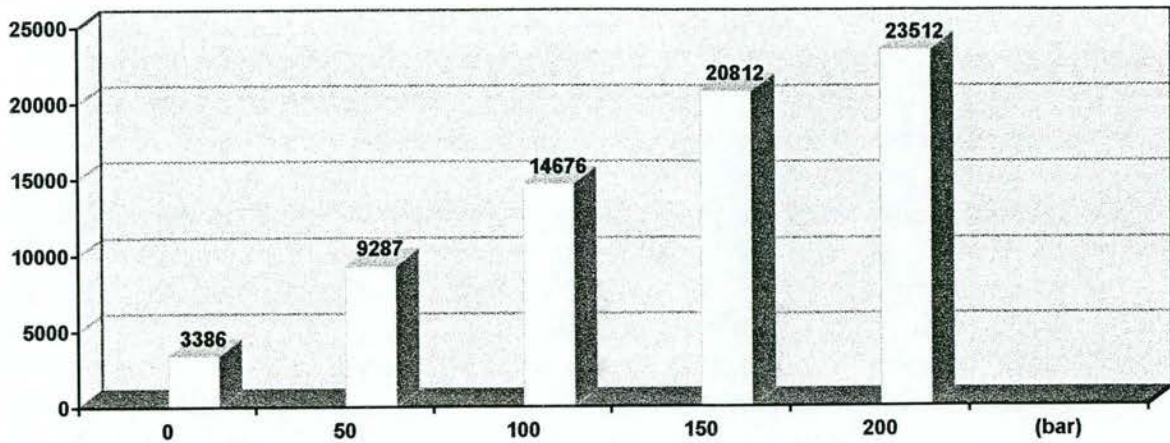
Onbekend is ook wat de invloed is op het verschil in toegepaste materialen, gJJn vol NBR middenring bij de dakvormafdichtingen en het toepassen van een PTFE-bronzen drukring.

- In de meeste gevallen geven de metingen aan objecten op ware grootte, optimale meetresultaten en de door Hydraudyne verrichtte metingen zullen daar geen uitzondering op vormen.
- Uit de vergelijking van de meetresultaten van Hydraudyne met die van de TUE blijkt dat geometrische verschalingsfactoren niet zondermeer toegepast mogen worden.
- Verschillen in axiale voorspanning van de afdichtingen kunnen, zeker na een eventuele verschaling, een invloedrijke factor op de verschillen in wrijvingskrachten zijn.
- Voor het verkrijgen van optimale wrijvingskrachtmetingen is het noodzakelijk de asdiameter in de meetopstelling zoveel mogelijk overeen te laten komen met de praktijksituatie.

Wrijvingskrachten in N voor 2 seals Canvas / NBR dakvorm-chroom

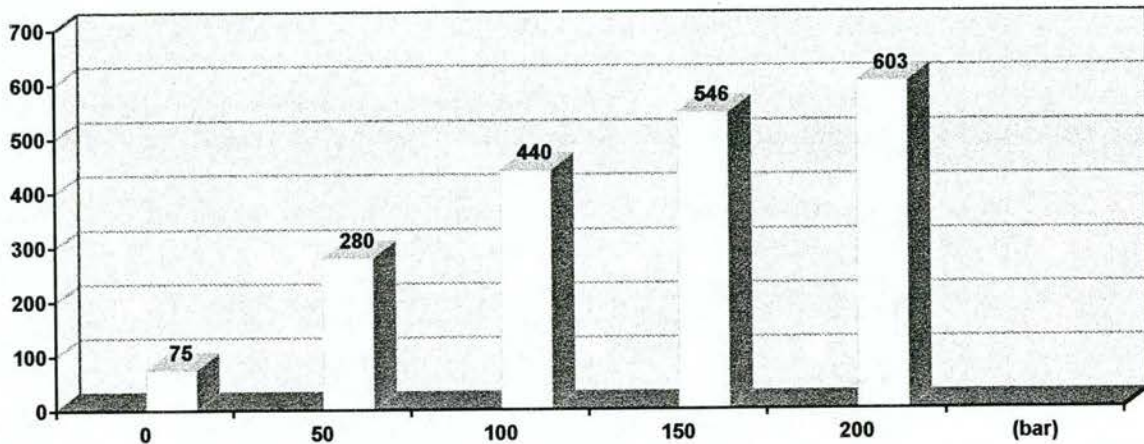
snelheid 2 mm/sec

wrijvingskracht F(N)



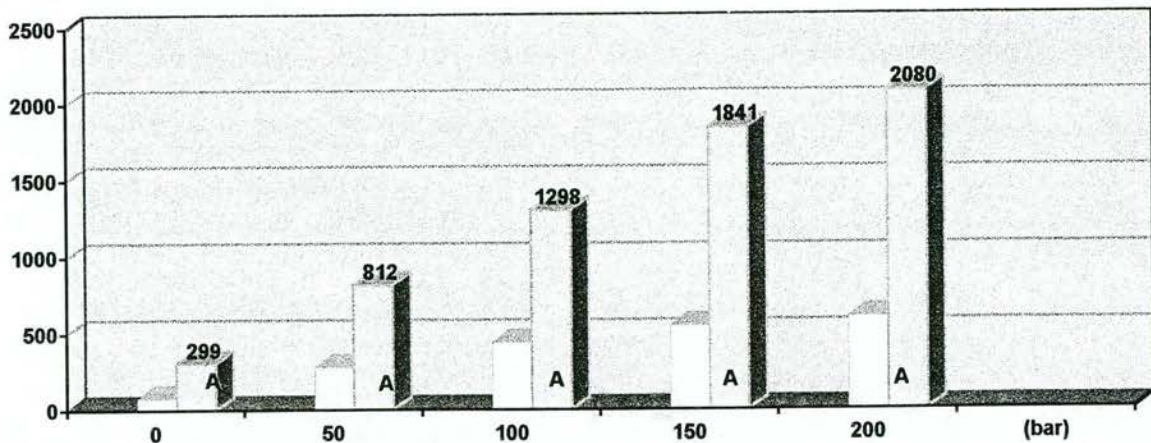
Ø180 mm

wrijvingskracht F(N)



Ø 50 mm

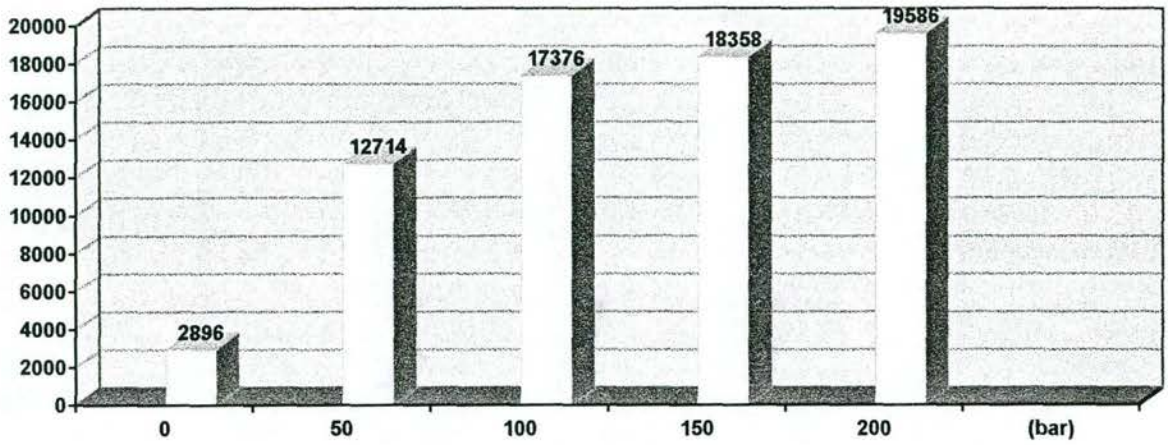
wrijvingskracht F(N)



Ø 50 mm en A

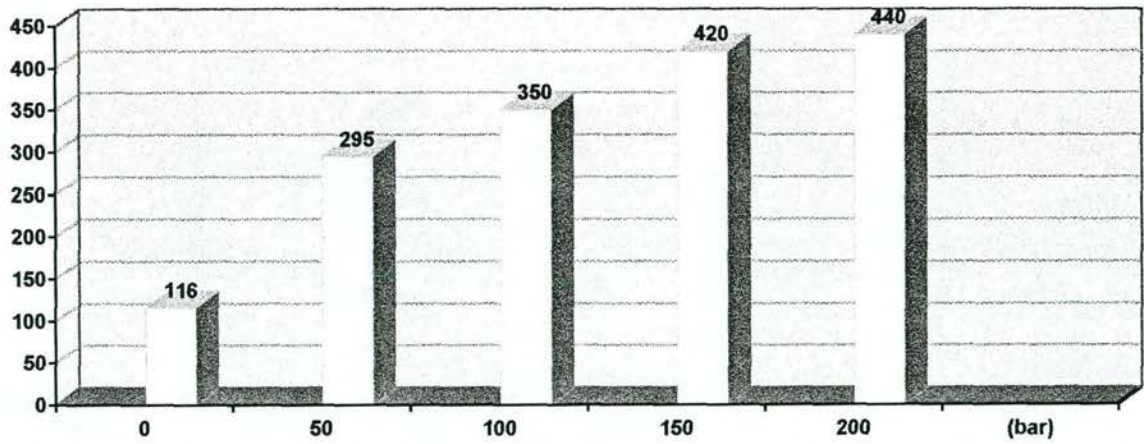
snelheid 10 mm/sec

wrijvingskracht F(N)



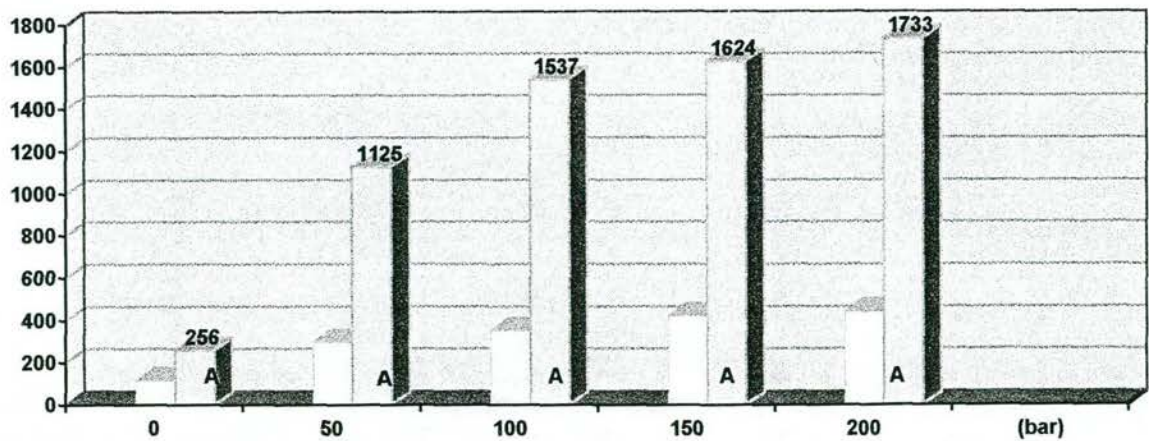
Ø180 mm

wrijvingskracht F(N)



Ø 50 mm

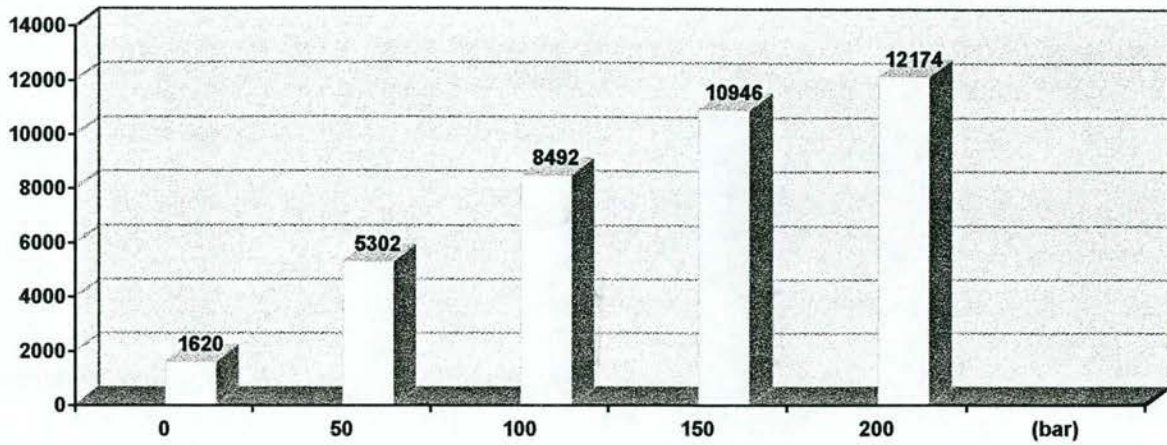
wrijvingskracht F(N)



Ø 50 mm en A

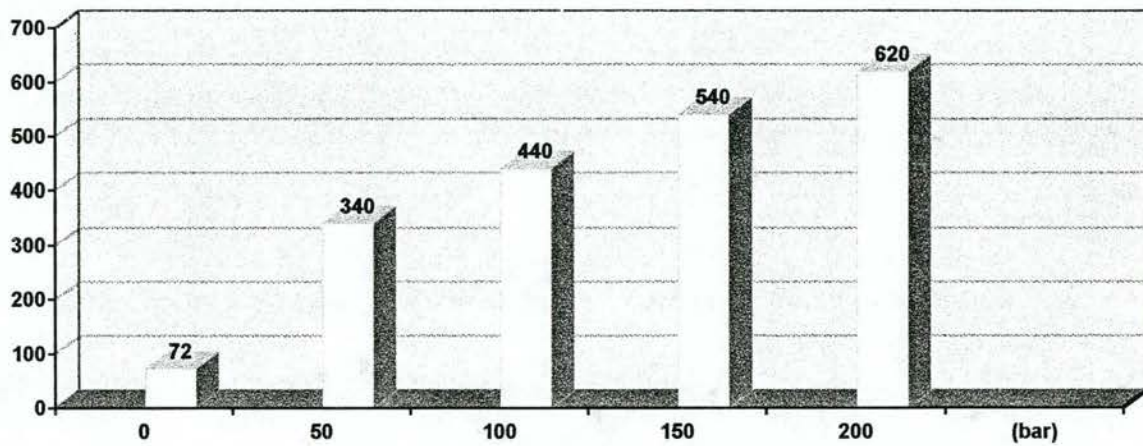
snelheid 50 mm/sec

wrijvingskracht F(N)



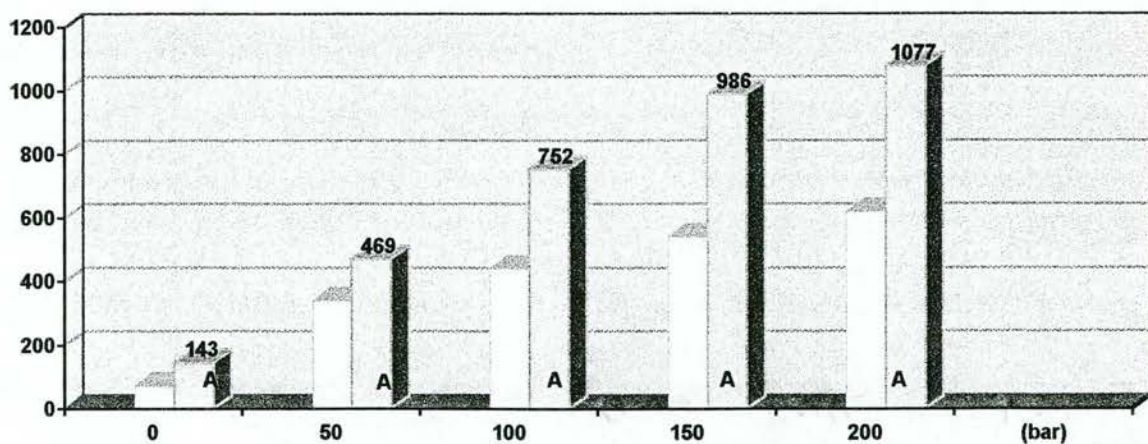
Ø180 mm

wrijvingskracht F(N)



Ø 50 mm

wrijvingskracht F(N)

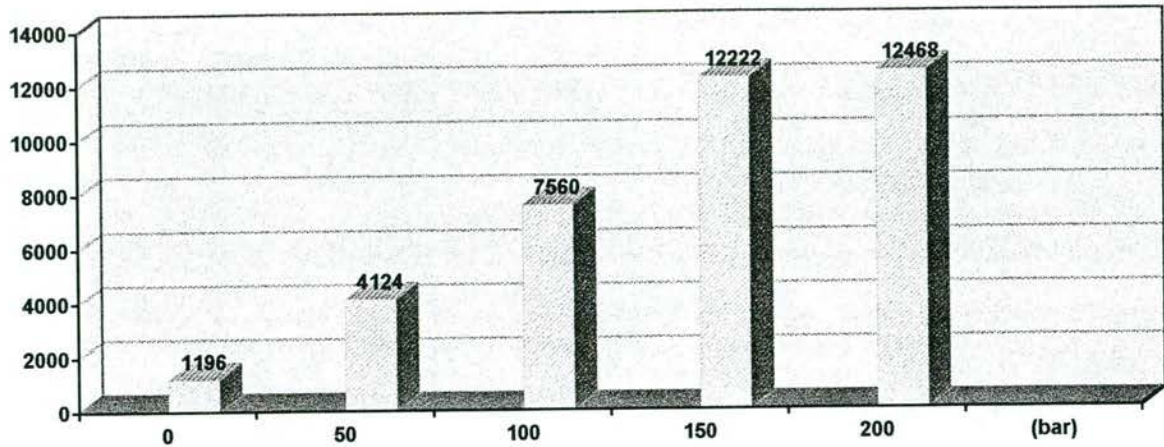


Ø 50 mm en A

Wrijvingskrachten in N voor 2 seals UHMW PE dakvorm-chroom

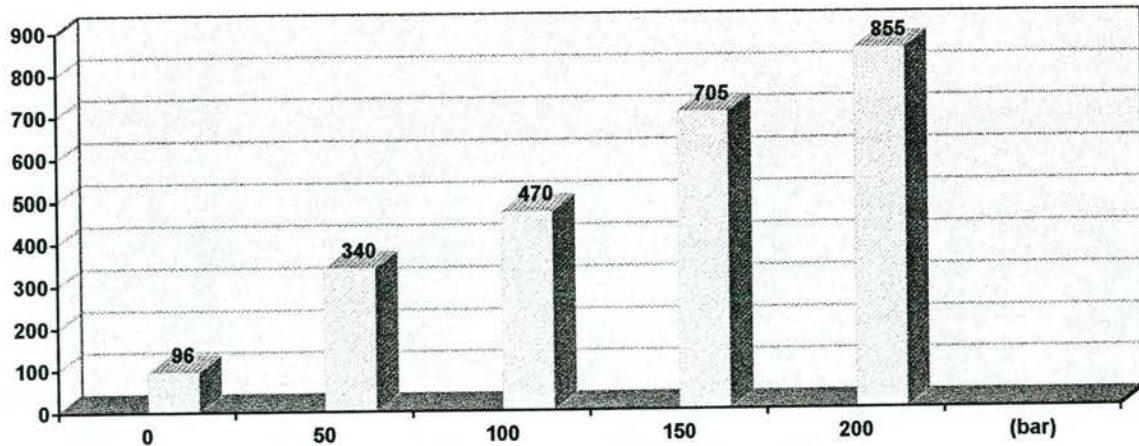
snelheid 2 mm/sec

wrijvingskracht F(N)



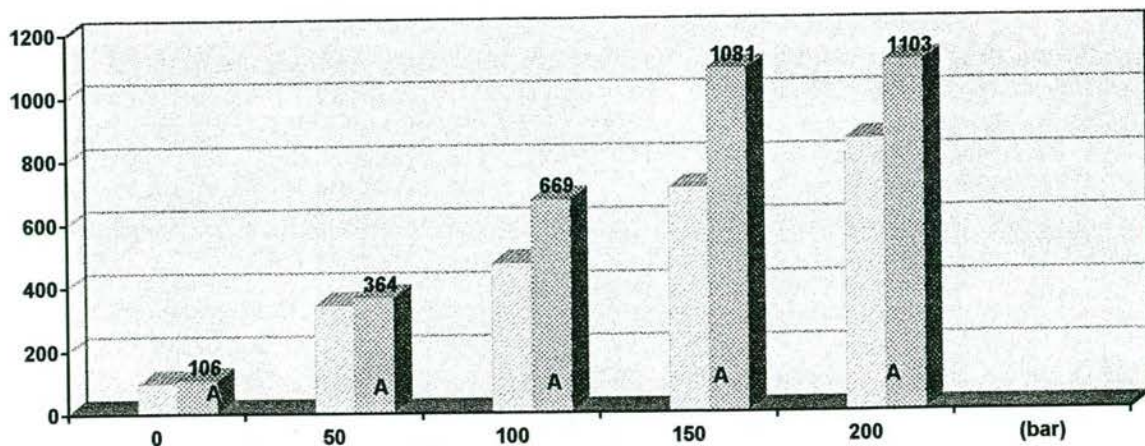
Ø180 mm

wrijvingskracht F(N)



Ø 50 mm

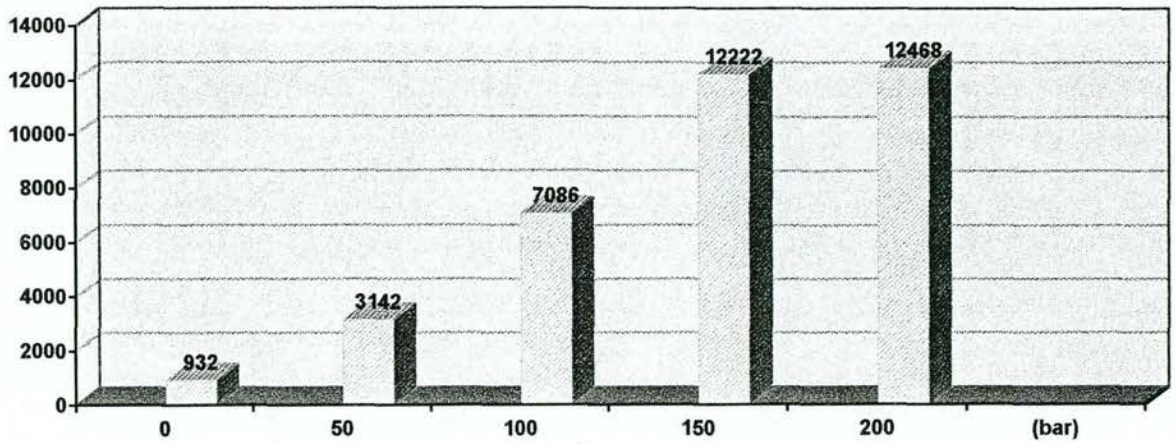
wrijvingskracht F(N)



Ø 50 mm en A

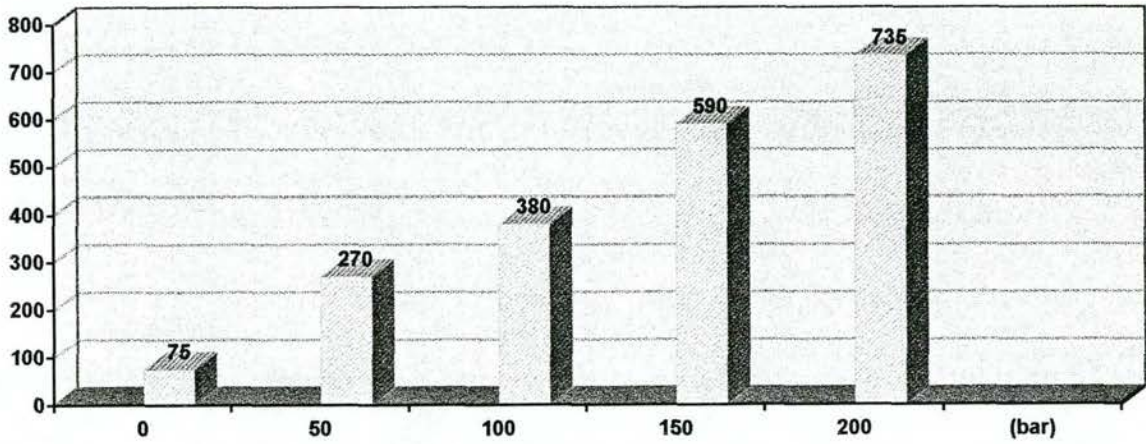
snelheid 10 mm/sec

wrijvingskracht F(N)



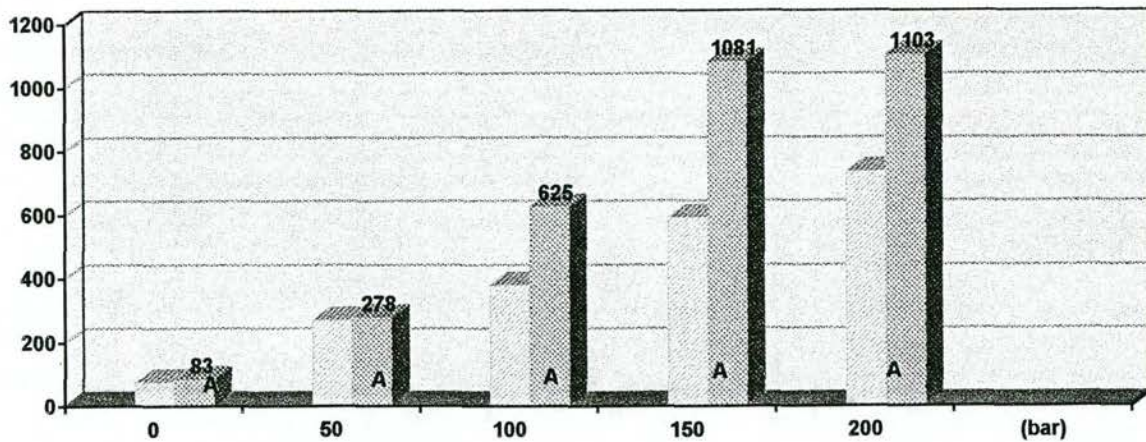
Ø180 mm

wrijvingskracht F(N)



Ø 50 mm

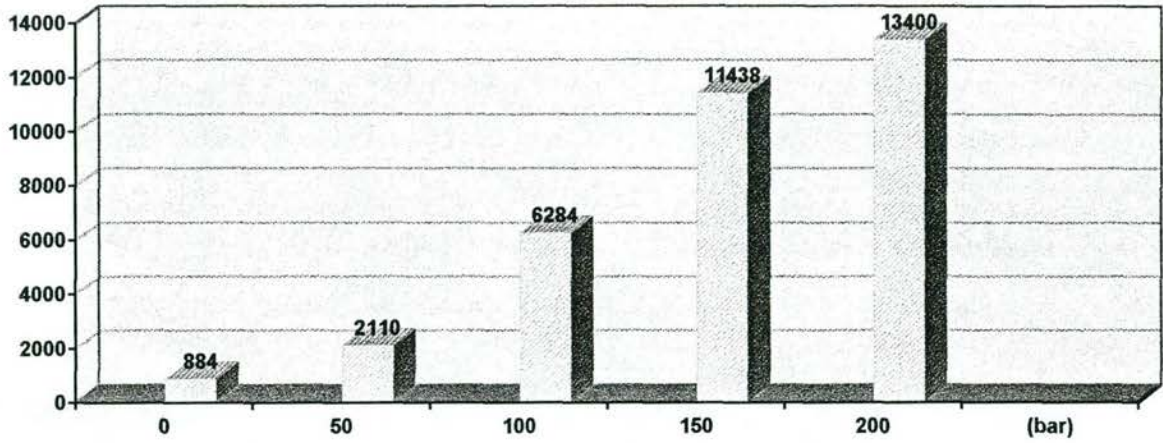
wrijvingskracht F(N)



Ø 50 mm en A

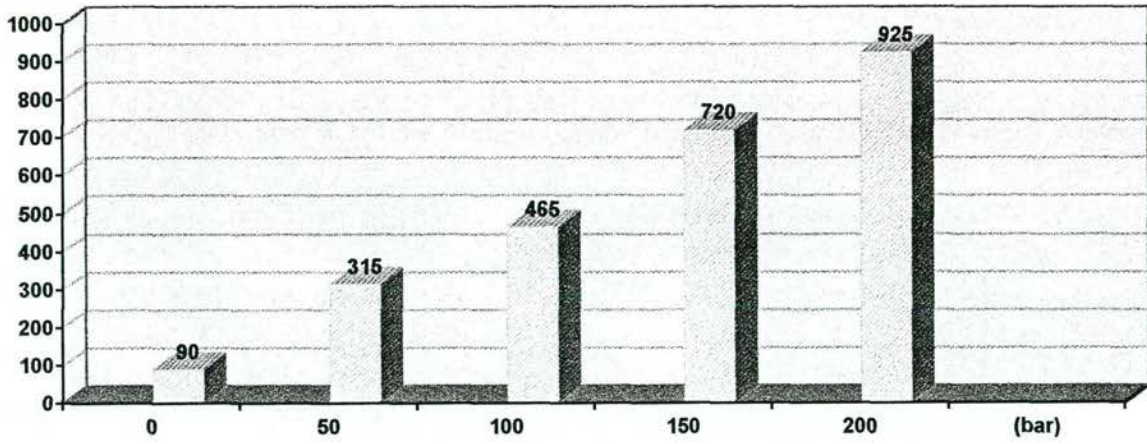
snelheid 50 mm/sec

wrijvingskracht F(N)



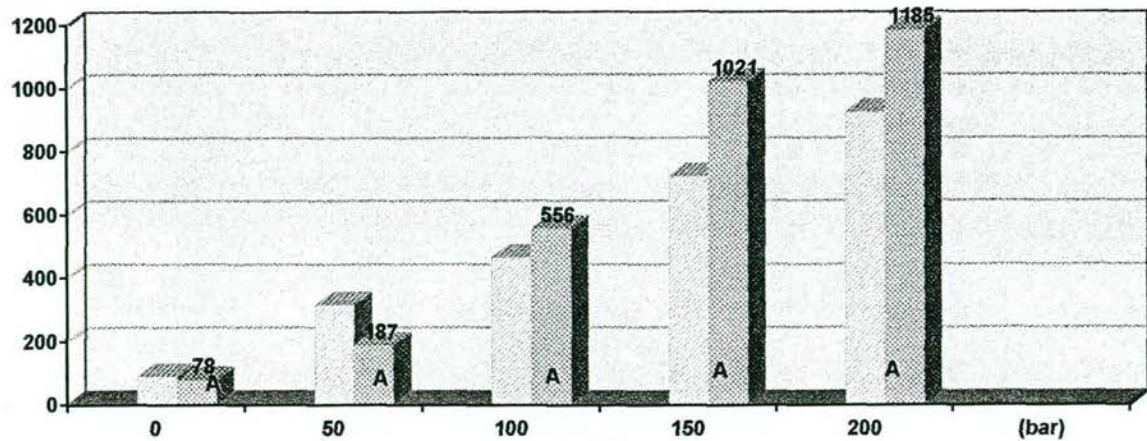
Ø180 mm

wrijvingskracht F(N)



Ø 50 mm

wrijvingskracht F(N)



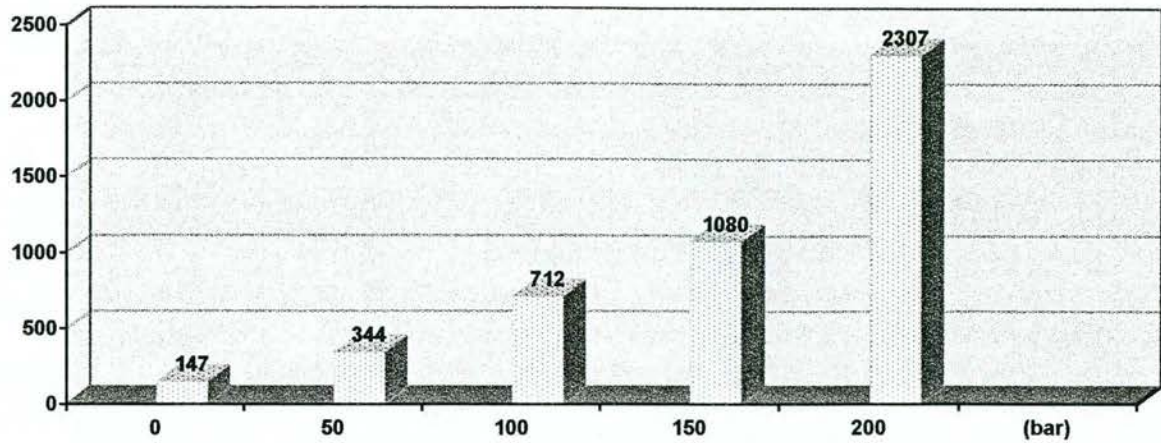
Ø 50 mm en A

Wrijvingskrachten in N voor 2 seals UHMW PE stepseal-chroom

7

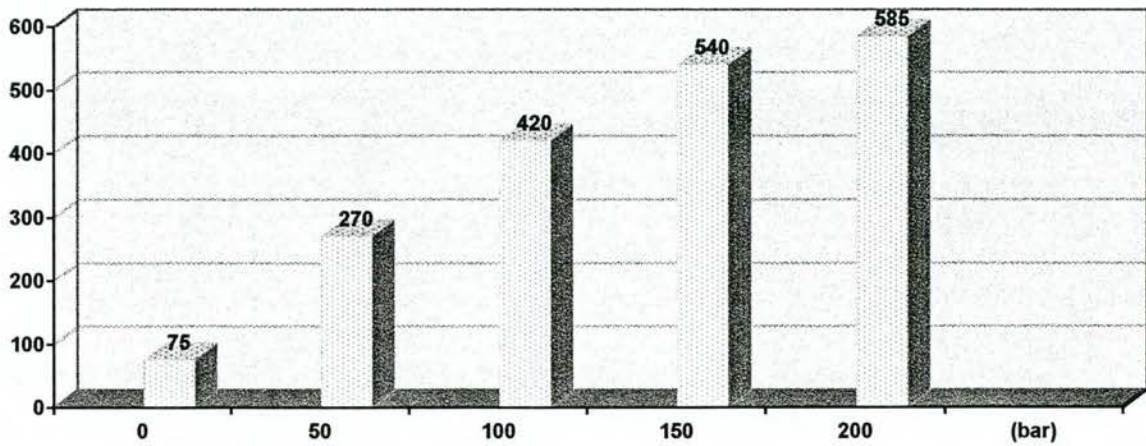
snelheid 2 mm/sec

wrijvingskracht F(N)



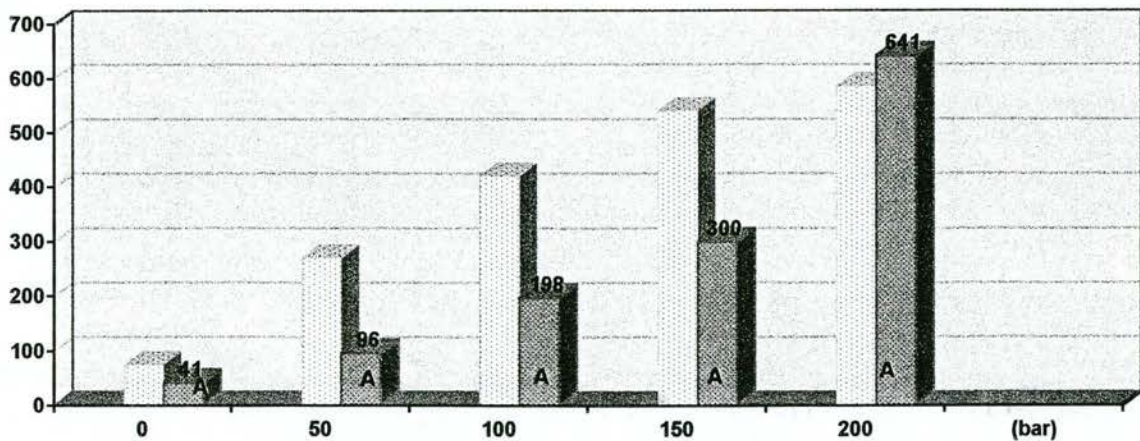
Ø180 mm

wrijvingskracht F(N)



Ø 50 mm

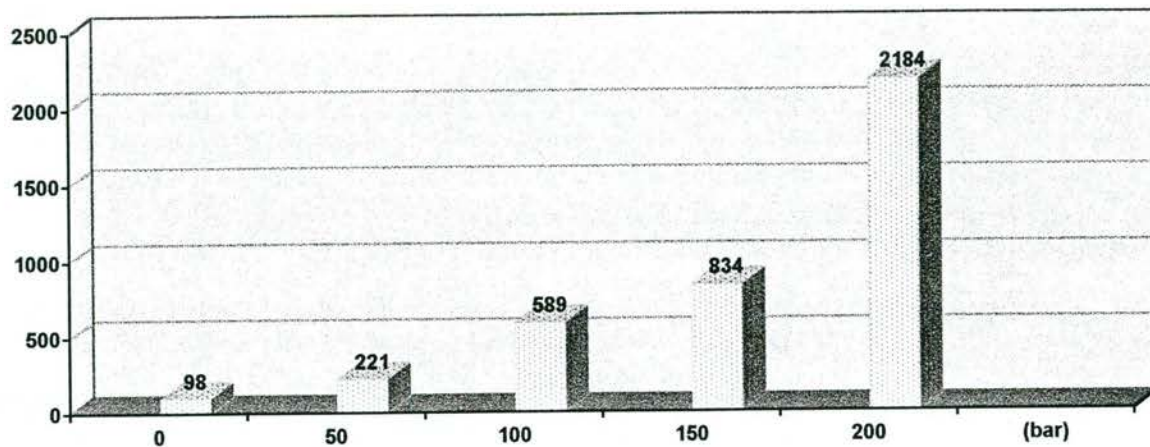
wrijvingskracht F(N)



Ø 50 mm en A

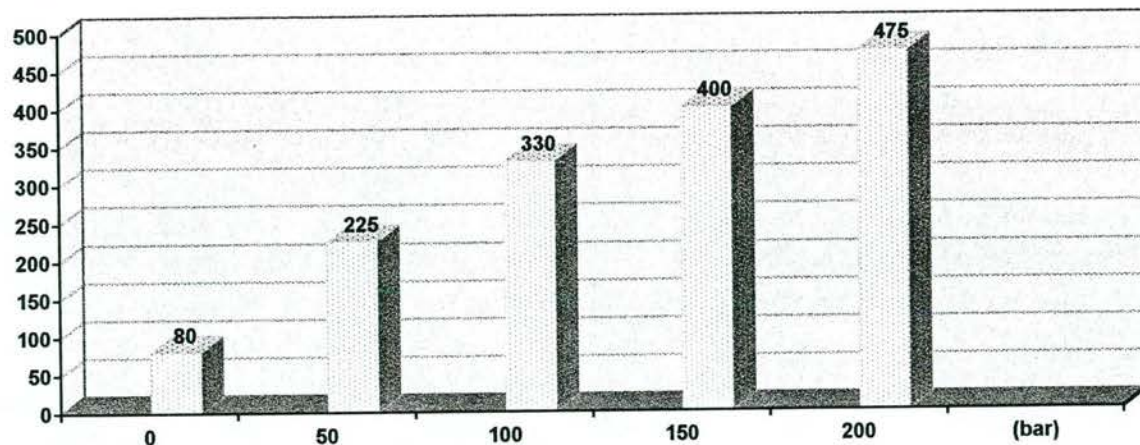
snelheid 10 mm/sec

wrijvingskracht F(N)



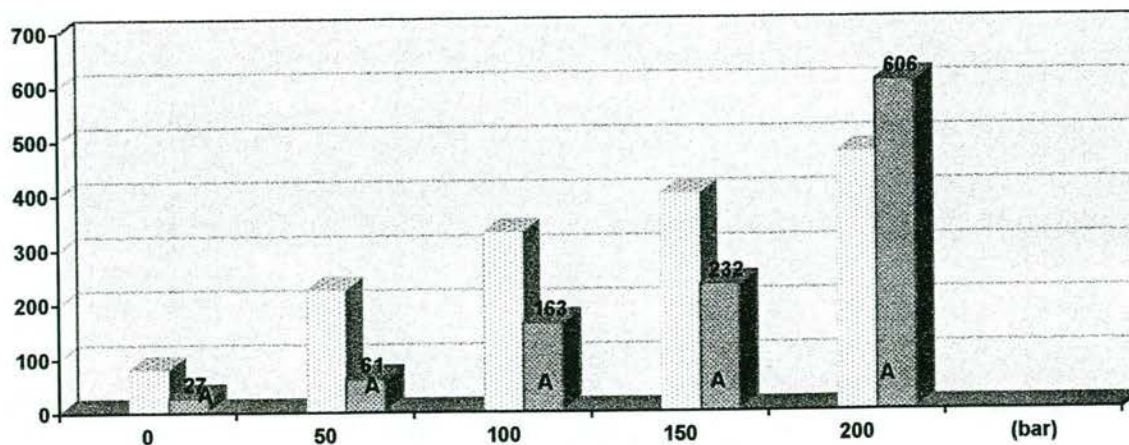
Ø180 mm

wrijvingskracht F(N)



Ø 50 mm

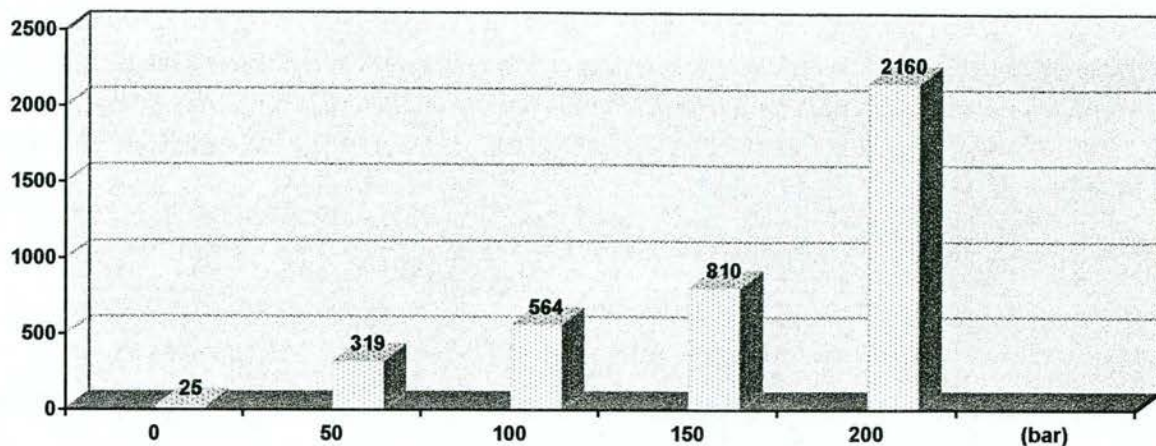
wrijvingskracht F(N)



Ø 50 mm en A

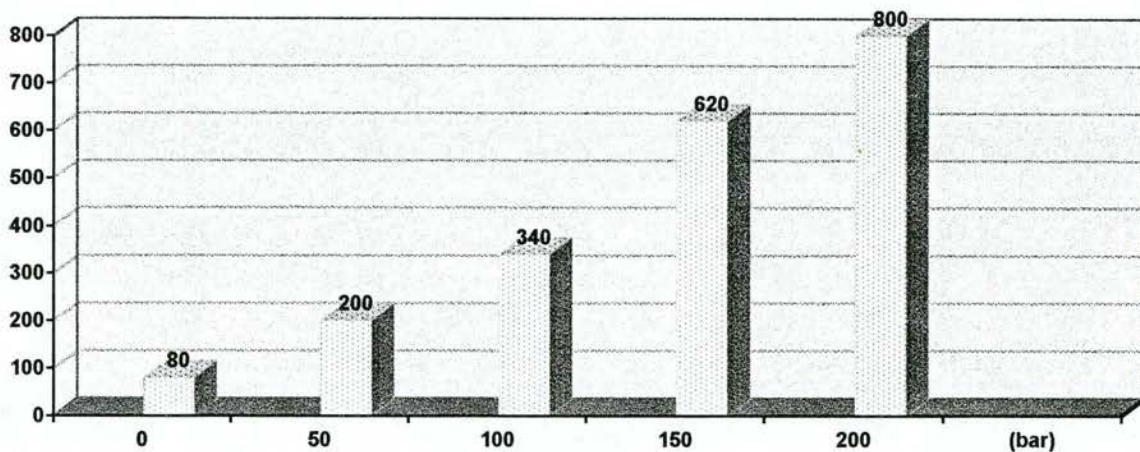
snelheid 50 mm/sec

wrijvingskracht F(N)



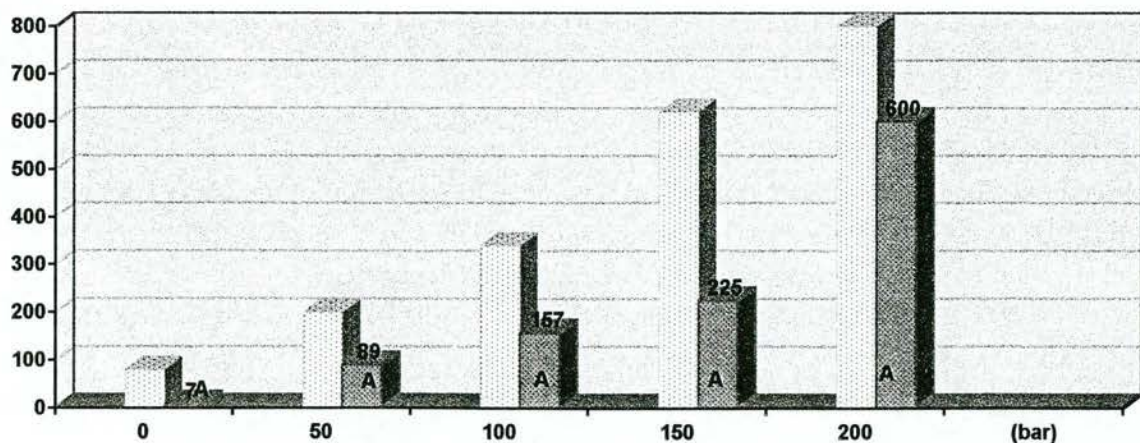
Ø180 mm

wrijvingskracht F(N)



Ø 50 mm

wrijvingskracht F(N)

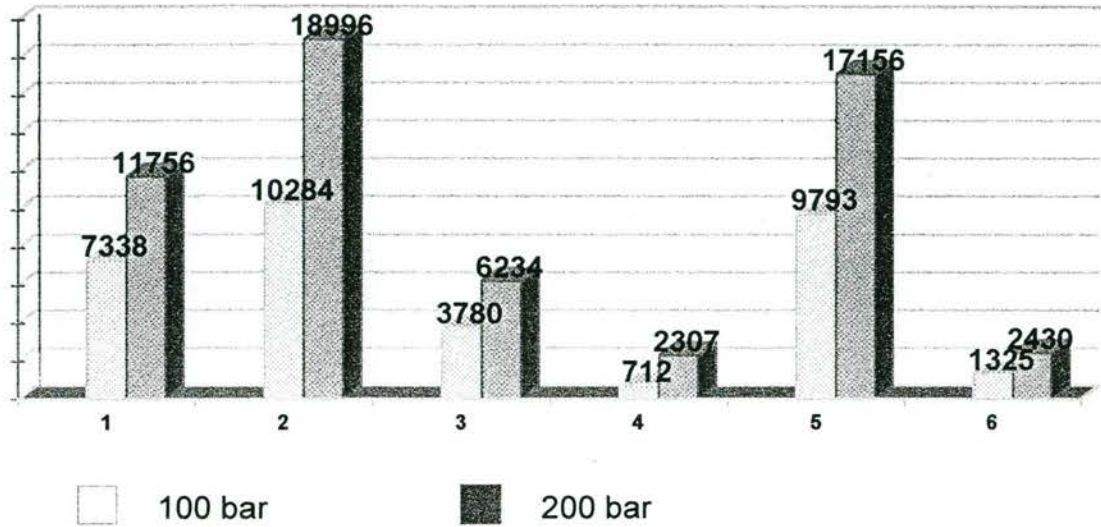


Ø 50 mm en A

Samenvatting wrijvingsmetingen translenderende seals

Ø180 mm; snelheid 2 mm/sec

wrijvingskracht (N)



- 1 Dakvorm NBR 0,2 mm voorspanning, tegen chroom
- 2 Dakvorm NBR 0,7 mm voorspanning, tegen chroom
- 3 Dakvorm UHMW PE; 1,4 mm voorspanning; tegen chroom
- 4 2 stepseals UHMW PE; tegen chroom
- 5 Dakvorm UHMW PE; 1,4 mm voorspanning; tegen Ceramax
- 6 2 stepseals UHMW PE; tegen Ceramax

Projektbeschrijving

bouwdienst rijkswaterstaat

hoofdafdeling natte infrastructuur

ontwikkeling technieken

onderzoekplan hydrauliekafdichtingen 900124

Notitie 900124 Doelstelling onderzoek hydrauliekafdichtingen

van : D. Ros
aan : Belangstellenden voor een gezamenlijk onderzoekproject
datum : 24 januari 1990
betreft: Stang- en asafdichtingen

Vanouds werden voor het afdichten van hydraulische cilinders gedeelde stapelafdichtingen van een rubber/canvasweefsel gebruikt. Dit materiaal is stroef en het verschil tussen de statische en de dynamische wrijvingscoëfficiënt is aanzienlijk. Vooral bij lage cilindersnelheden blijken deze afdichtingen stickslip te kunnen veroorzaken; soms gaat dit gepaard met hevige geluidsverschijnselen, een onaanvaardbaar trillingsnivo in de aangedreven installatie, en aanzienlijke wrijvingsverliezen.

Het is bekend dat ook buiten Rijkswaterstaat stickslipproblemen voorkomen.

Bij roterende afdichtingen - bijvoorbeeld van wentellagers in de wielen van onderrolwagens voor sluisdeuren - veroorzaken deze afdichtingen slijtage van het loopvlak (veelal een chroomlaag); bovendien laten deze afdichtingen weinig radiale asbewegingen toe. Doordat deze afdichtingen niet volledig dicht zijn, is men aangewezen op het gebruik van een wateropneembaar lagervet, of op het gebruik van overdruksmering van de lagers en de afdichting.

Veel installaties waarin deze afdichtingen werden toegepast, zijn tientallen jaren oud. Het is waarschijnlijk dat deze binnen afzienbare tijd zullen worden gerevideerd, waarbij ook de afdichting kan worden vervangen. Daarnaast worden er regelmatig nieuwe installaties met afdichtingen in gebruik genomen.

Afdichtingen bevinden zich vaak in moeilijk demonteerbare installaties. Deze afdichtingen moeten daarom vernieuwd kunnen worden met minimale demontagewerkzaamheden. Dit geldt vooral als het gaat om de stangafdichting.

Rijkswaterstaat heeft behoefte aan stickslipvrije, wrijvingsarme en slijtvaste afdichtingen met voldoende radiale bewegingsmogelijkheid:

- voor het vervangen van oude gedeelde stapelafdichtingen; deze afdichtingen dienen in de bestaande installatie te passen;
- voor het gebruik in nieuwe en tevens moeilijk demonteerbare installaties;
- voor het gebruik in nieuwe en gemakkelijk demonteerbare installaties; deze afdichtingen zouden ongedeeld kunnen zijn.

Uit eerdere contacten met de TUE is gebleken dat er op dit gebied bijzonder veel ontwikkeling heeft plaats gevonden, zowel op het gebied van nieuwe materialen, als op het gebied van afdichtingsgeometrieën en inbouwvoorschriften.

Daarom lijkt het ons zinvol om samen met andere belanghebbenden een onderzoek te stimuleren voor het realiseren van afdichtingen waarin deze ontwikkelingen zijn verwerkt, en waarbij de door ons gesignaleerde problemen niet (meer) voorkomen. Het ontwikkelen van een gedeelde enkele afdichting met een goede afdichting van de deling, of van een afdichting die ter plaatse lasbaar is, behoeft niet te worden uitgesloten.

Hoewel in het bovenstaande gesproken wordt van zowel translerende als rote-
rende afdichtingen, lijkt ons een onderzoek naar translerende afdichtingen
voor hydraulische cilinders het meest urgent. In dit onderzoek zou het
gebruik van kunststof glijstrippen in plaats van bronzen geleidingsbussen
meegenomen kunnen worden.

De omstandigheden waaronder translerende hydraulische afdichtingen bij
Rijkswaterstaat moeten functioneren, kunnen worden afgeleid uit de gegevens
in de onderstaande tabel.

Maten:

-	stang	50...250	mm
-	boring	100...500	mm
-	slag	1...12	m

Conditie:

-	oliedruk	50...150	bar
-	stangsnelheid	0,1...0,002	m/s
-	temperatuur	-20...+30	graden C
-	glijweg	<50	km/jaar
-	aantal bewegingen:		
	* schutsluizen	<40	per dag
	* spuisluizen	4	per dag
-	stilstandtijden:		
	* schutsluizen	1...6	uur
	* recreatiesluizen	0,5	jaar
	* spuisluizen	dagen tot weken	
-	cilinderstand:		
	* verticaal; langdurig hangende last; omkeerbare belastingsrich- ting		
	* horizontaal; voorgespannen last; wisselende belastingsrichting		

Loopvlakken:

-	stang:	
	* chroom (nikkel onderlaag), geslepen	
	* RVS AISI 431, geslepen	
	* keramiek, geslepen	
-	boring:	
	koolstofstaal, gehoond	

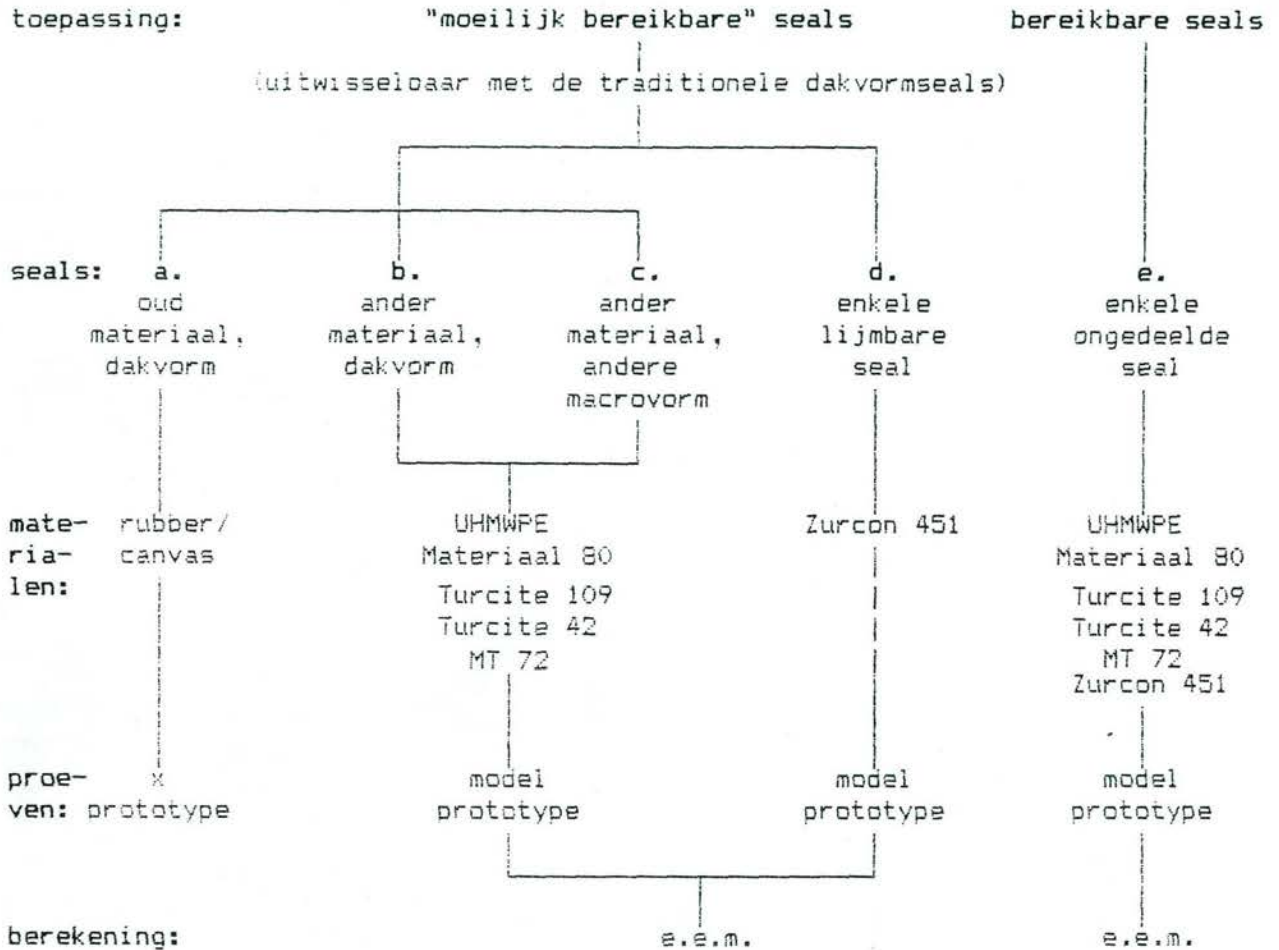
Medium:

-	binnen:	
	hydrauliekolie, bijvoorbeeld	
	* Nuto H15	
	* biologisch afbreekbare olie	
	* reinheidsgraad: NAS-klasse 8 volgens NAS 1638	
-	buiten:	
	* (zee)water	
	* lucht met stuifzand	
	* ijs	
	* pekels	

(stasafd1.wp5)

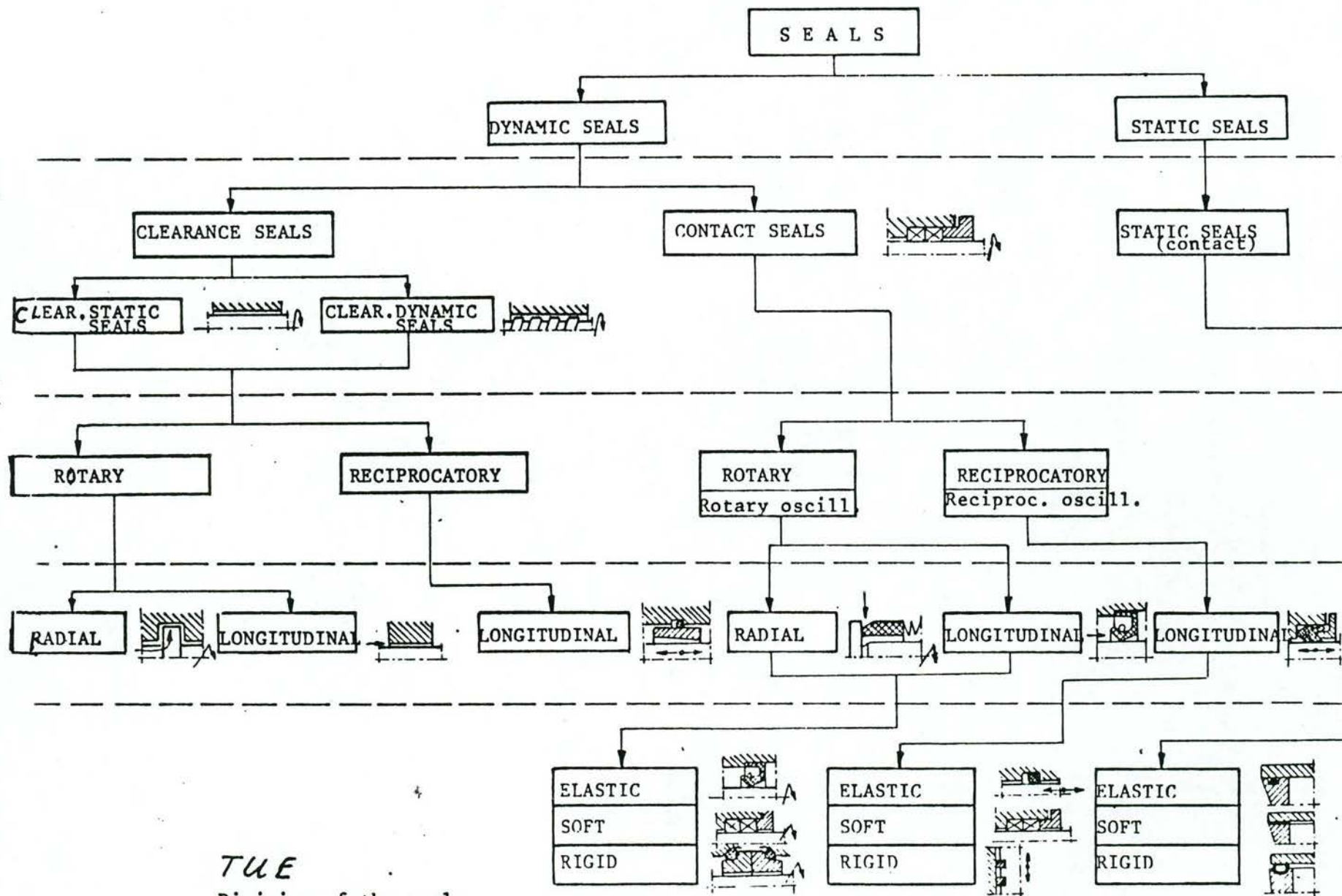
BIJLAGE DOELSTELLING EN OVERZICHT VAN HET ONDERZOEK HYDRAULISCHE SEALS

SCHEMA VAN HET ONDERZOEK HYDRAULISCHE SEALS



Overzicht van de te onderzoeken materialen

1. UHMWPE volgens Eisen Kunststoffen RWS, zwart¹⁾ (TUE, RWS);
2. UHMWPE, wit "Materiaal 80" (Shamban);
3. PTFE+Turcon+K&G "Turcite 109" (Shamban);
4. PUR "Zurcon 451", lijmbaar (Shamban);
5. PTFE+glasvezel+Turcon+zelfsmerende toevoegingen, "Turcite 42" (Shamban);
6. PTFE+15%glasvezel+5%MoS₂ "MT 72" als referentie voor de TUE;
7. Rubber/canvas als referentie voor het traditionele sealmateriaal.



Division regard to:

relative motion of the sealed surfaces

way of creating the resistance to fluid flow

sort of motion

direction of flow of sealed medium

the seal materials

1974

TUE
Division of the seals

Programma

1 Selektie van Materialen

1.1 Bepaling wrijvingscoëfficiënt, zowel de startwrijving als bewegend voor de materialen:

- 1a UHMW PE volgens eisen RWS, zwart
- 1b UHMW PE volgens eisen RWS, wit
- 2 UHMW PE, wit "materiaal 80", Shamban
- 3 PTFE + Turcon + K&G "Turcite 109", Shamban
- 4 PUR "Zurcon 451", lijmbaar, Shamban
- 5 Turcite 42, PTFE + glas + smeermiddel, Shamban
- 6 PTFE + 15% glasvezels + 5% MoS₂ "MT72"
- 7 Rubber / canvas

Beproevingssomstandigheden:

Proefopstelling:	pen/schijf opstelling
Tegenloopvlak:	koolstofstaal C45
Oppervl. gesteldheid:	roterend geslepen met Ra = 0,2 ... 0,4 µm
Omgeving:	droog, temperatuur 24 à 25 °C
Vlaktedruk:	200 bar
Glijnsnelheid:	startwaarde bepalen. Daarna snelheid oplopend: 0, .. 0,0035 ... 0,5 m/s

Totaal: 8 meetseries.

1.2 Bepaling specifieke slijtfactor

Materialen: zoals bij 1.1
PUR "Zurcon 451" gelijmd met de lijmmaad in het midden van het proefstuk. (Lijmmaad in de glijrichting).
Beproevingssomstandigheden: zoals bij 1.1 echter alleen bij glijnsnelheid 3,5 mm/sek.

Totaal: 8 meetseries.

1.3 Bepaling extrusie-eigenschappen.

Dit is een vergelijkende meting, uit te voeren op een proefstuk \varnothing 10 mm van het materiaal.

Materialen: zoals bij 1.2
Belasting : 100 bar
Temperatuur: 24 à 25 °C

Totaal 8 meetseries.

1.4 Voor de 2 materialen die uit de metingen 1.1 t/m 1.3 als beste naar voren komen:

Bepaling van de wrijvingscoëfficiënt, zowel de startwaarde als bewegend.

Beproevingssomstandigheden:

Zoals bij 1.1 echter met omgeving: gesmeerd met hydraulische olie, temp. 24 à 25 °C.

Totaal: 2 meetseries.

- 1.5 Voor de 2 materialen zoals bedoeld in punt 1.4:
Bepaling van de specifieke slijtfactor.

Materialen: zoals bij 1.4.

Als dit lijmbare materialen betreft, dan deze test ook uitvoeren met proefstukken waarbij zich de lijmnaad in het contactvlak bevindt.

Beproevingssomstandigheden: zoals bij 1.4.

Totaal (waarschijnlijk): 3 meetseries.

- 1.6 Beproeving van lijmnaden op treksterkte in vergelijking met het oorspronkelijke, ongelijmde materiaal.
Uitvoeren van trekproeven op gelijkde en ongelijmde proefstaven, van elk 5 stuks.

Materialen: zoals bij punt 1.5

Temperatuur: 24 à 25 °C

Totaal: 10 trekproeven.

- 1.7 Van de 2 materialen zoals beproefd in punt 1.5 (of, indien uit 1.5 slechts één duidelijke kandidaat naar voren komt, dan van dit materiaal):

Bepaling van spanning-rek-tijd relaties die nodig zijn als invoergegevens voor eindige elementen berekeningen.

Uitvoeren van kruip-relaxatiemetingen aan 8 verschillende trekstaven voor 8 verschillende belastingen.

Temperatuur 24 à 25 °C

Opstellen van het materiaalmodel voor elk van de 2 beproefde materialen.

Totaal: 16 kruip/relaxatiemetingen
opstellen van 2 materiaalmodellen.

- 2 Ontwerp van een nieuwe sealgeometrie, gebaseerd op de geselecteerde materialen resp. het geselecteerde materiaal.
-

2.1 Globaal ontwerp van de geometrie

2.2 Eindige-elementenberekening ter bepaling van

- vervormingen
- spanningsverdeling
- kontaktdrukverdeling

Er worden 2 geometriën geanalyseerd: de gebruikelijke macrovorm van dakvorm seals en een nieuwe vorm.

2.3 Bepaling van smeerfilmvorming in het contactvlak, gebruikmakend van de resultaten van 2.2 welke als invoer voor het programma PROGRESS dienen.

2.4 Eventueel: geometrie-aanpassingen.

Het bovenstaande is gebaseerd op de ontwikkeling van één geometrie.

- 3 Vervaardiging van seals ten behoeve van modeltests met stang \varnothing 50 mm.
(Shamban)

- 4 Testen van de nieuwe seal in modeltests.

In modeltests worden prototype seals voor een stangdiameter van 50 mm beproefd. Dit geldt voor de bestaande geometrie in nieuw materiaal en voor de nieuwe geometrie in nieuw materiaal.

- 4.1 Wrijving, stick-slip en lekkagemeting voor de nieuwe seal.
4.2 Vergelijkende wrijving, stick-slip en lekkagemeting bij een vergelijkbare canvas seal.

- 5 Eventueel, indien de metingen in 4 daar aanleiding toe geven: aanpassing geometrie. (P.M.).

- 6 Vervaardiging van prototype seals voor tests op ware grootte. (Shamban).

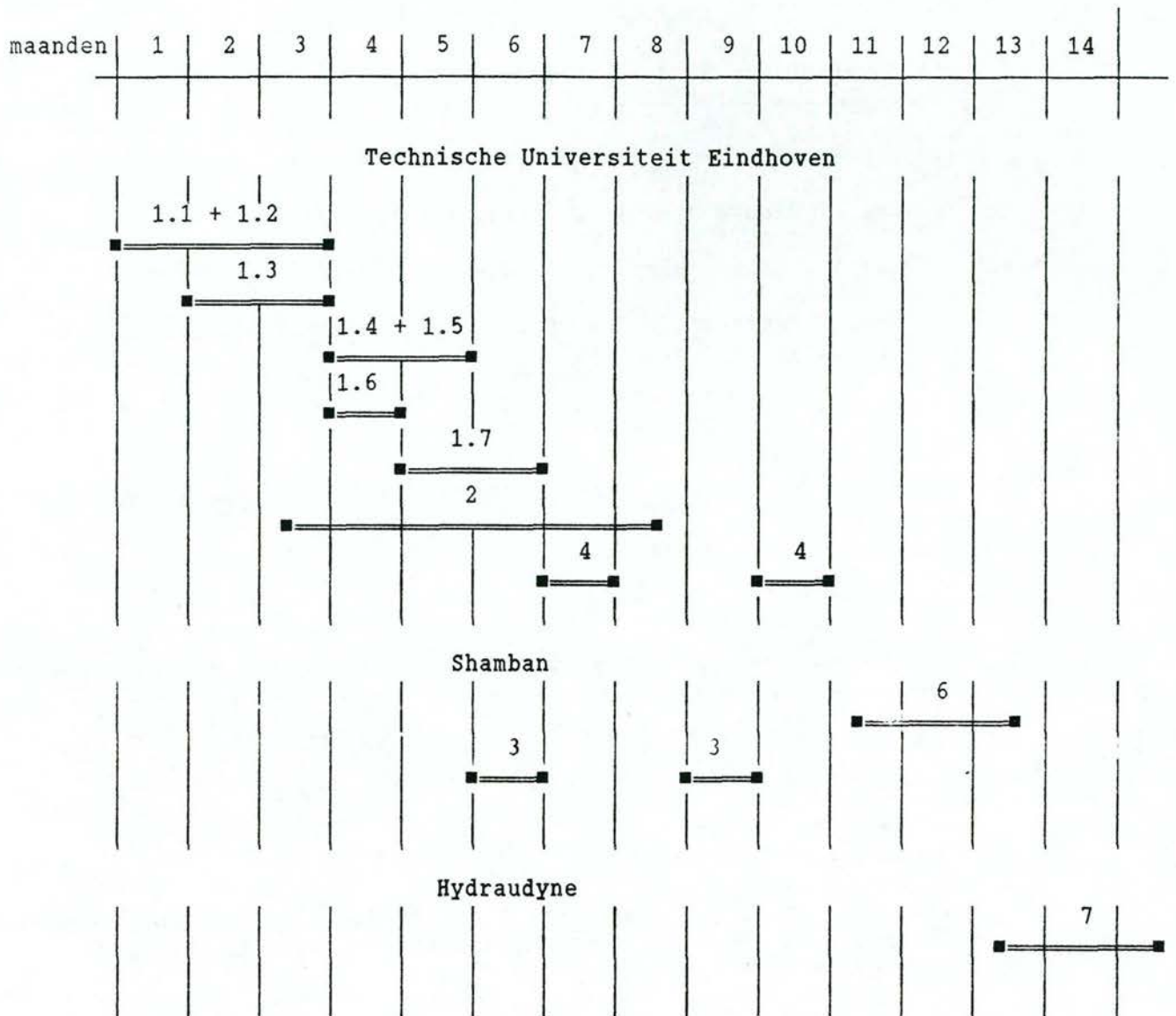
- 7 Prototype-beproeving

Beproeving van de seals uit punt 6 in een cilinder met doorlopende stang \varnothing 160 mm, druk 100 bar. Tevens observatie van het extrusiegedrag. (Hydraudyne).

- 8 Rapportage

De bedragen voor de diverse stappen zijn inclusief tussenrapportage.

Tijdschema



Kostenspecificatie

Gedeelte TUE

Stappen 1.1 + 1.2		
8 x 1.200,--	f	9.600,--
Stap 1.3		
8 x 900,--		7.200,--
Stappen 1.4 + 1.5		
4 x 1.200,--		4.800,--
Stap 1.6		
10 x 400,--		4.000,--
Stap 1.7		
16 x 900,--		14.400,--
Stap 2		
totaal		26.000,--
Stap 4		
totaal		18.000,--
Stap 8		4.000,--
		<hr/>
	f	88.000,--

Gedeelte Shamban

Stappen 3 en 6		
Vervaardiging van 10 à 20 seals		
Begeleiding Engineering mede vanuit Denemarken		35.000,--

Gedeelte Hydraudyne

Stap 7 + extrusietest		22.000,--
Ondersteuning engineering		17.400,--
		<hr/>
		39.400,--

Gedeelte Rijkswaterstaat

Algemene projektbegeleiding		
14 x 1300, + 3 x 14 x 900,-		56.000,--
		<hr/>

Totaal excl. BTW

f 218.400,--

269



