

## C.V. ketels

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

Braak, L. H., & IJzermans, J. M. M. (1983). *C.V. ketels*. (DCT rapporten; Vol. 1983.003). Technische Hogeschool Eindhoven.

***Document status and date:***

Gepubliceerd: 01/01/1983

***Document Version:***

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

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

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

[Link to publication](#)

***General rights***

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

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

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

[www.tue.nl/taverne](http://www.tue.nl/taverne)

***Take down policy***

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

[openaccess@tue.nl](mailto:openaccess@tue.nl)

providing details and we will investigate your claim.

C.V. ketels

Dr.ir. L.H. Braak  
J.M.M. IJzermans

WE 83.03 - maart 1983

Opdrachtgever:

A.W.B. te Beek en Donk

via:

Bestuurscommissie Contacten  
Bedrijfsleven T.H.E.  
Dossier 1517.

## Inhoud

1. <u>Inleiding</u>	3
2. <u>Vorbereiding van de meting</u>	4
2.1. Schakeling	5
3. <u>De metingen</u>	7
3.1. Proefstoken, rekstrookje 1 en 2	7
3.2. De metingen	9
3.3. De rekstrookjes 3 en 4	11
3.4. Voorlopige conclusies	13
4. <u>Speciale effecten</u>	14
4.1. Temperatuurinterval 30-55°C.	14
4.2. Temperatuurinterval 60-80°C.	14
4.3. Naijleffect	15
4.4. Geforceerd koelen	16
5. <u>Het meetprotocol</u>	18
5.1. De beschrijving	18
5.2. Uitvoering	21
5.3. Conclusies uit de vergelijking	24

## Appendices

3.1. Metingen d.d. 83.02.09 strookje 1 en 2
3.2. Metingen d.d. 83.02.10 strookje 1 en 2
3.3. Metingen d.d. 83.02.10 strookje 1 en 2
3.4. Metingen d.d. 83.02.10 strookje 3 en 4
4.1. Metingen d.d. 83.02.22 strookje 1 en 2
4.2. Metingen d.d. 83.02.22 strookje 1 en 2
4.3. Metingen d.d. 83.02.22 strookje 1 en 2
4.4. Metingen d.d. 83.02.22 strookje 1 en 2
5.1. Meetprotocol ketel G6-G12 d.d. 83.02.28
5.2. Meetprotocol ketel G -1822 d.d. 83.03.03

## 1. Inleiding

A.W.B. te Beek en Donk heeft een nieuwe kleine gasgestookte C.V.-ketel ontwikkeld, waarvoor als voorlopige typering de codering G6-G12 wordt gebruikt. Aangezien enige jaren geleden ook spanningsmetingen zijn verricht aan andere C.V.-ketels kwam de firma A.W.B. wederom bij de vakgroep Fundamentele Werktuigbouwkunde van de T.H.E. om spanningsmetingen uit te laten voeren.

In eerste opzet is gekozen voor een beperkt aantal meetpunten en een eenvoudig meetprogramma. De metingen werden uitgevoerd in het gebouw voor Warmte en Strooming van de T.H.E., omdat de outillage daar geschikter was dan in het laboratorium van de vakgroep W.F.W.

In dit verslag wordt melding gemaakt van de voorbereiding van de metingen en van het meetprogramma. De uitwerking van de meetgegevens en de resultaten worden vermeld en waar mogelijk van commentaar voorzien. Naar aanleiding van het onderzoek wordt een meetprotocol opgesteld, waarmee verschillende keteltypes onder vergelijkbare condities kunnen worden gemeten.

Ir. G. Janssen wordt hartelijk dank gezegd voor de steun die hij heeft geboden bij de uitvoering van de metingen.

## 2. Voorbereiding van de meting

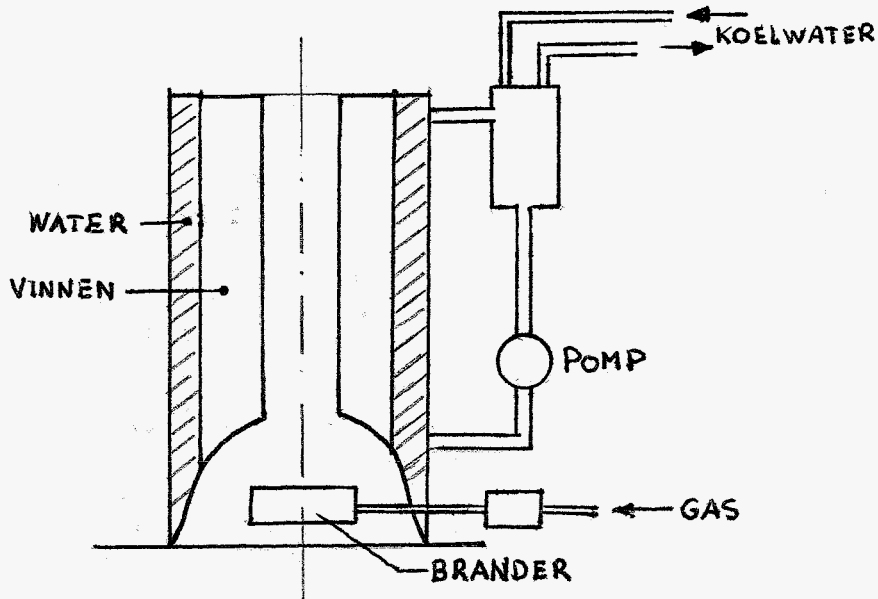


Fig. 1. Globale schets van de opstelling.

Uit eerder verrichte metingen aan aardgasketels van A.W.B. was gebleken dat hoge spanningen ontstonden in het bovenste membraan, dat een verbinding vormt tussen de binnen- en buitenwand van de ketel. De binnenwand van de ketel, het register, is opgebouwd uit een groot aantal, van vinnen voorziene, balkelementen. De warmte van de rookgassen wordt via de vinnen overgedragen aan de binnenwand en vervolgens aan het water. Ook voor het onderhavige proefmodel worden de grootste spanningen verwacht in het bovenmembraan. In fig. 2 wordt aangegeven op welke plaats rekstrookjes en temperaturelementen worden geplakt. Dummy-rekstrookjes zijn geplakt op stukjes materiaal die wel de temperatuur van het membraan aan kunnen nemen, maar niet verder mechanisch worden belast. Schijnbare rekken die ontstaan door temperatuurverhogingen van de rekstrookfilamenten kunnen door het gebruik van dummies in de schakeling worden vermeden.

In elk meetpunt wordt gebruik gemaakt van een rosettestrookje met drie filamenten. Het strookje is zo geplakt dat steeds een filamentrichting samenvalt met de radiale resp. de tangentiële richting. Het derde filament maakt een hoek van  $45^{\circ}$  met de radiale richting.

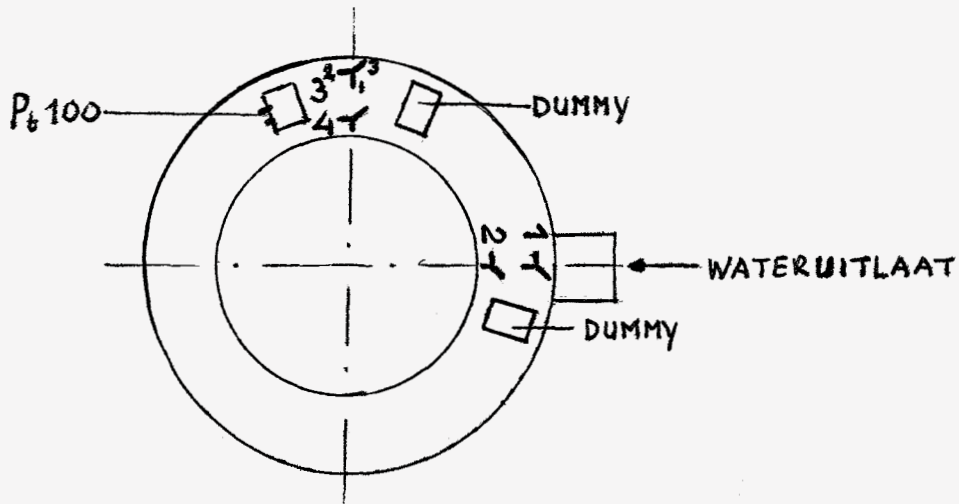


Fig. 2. Plaats meetelementen.

Bij de water-uitlaat worden twee rosettes aangebracht, die zo dicht mogelijk bij resp. de binnen- en buitenwand gepositioneerd zijn. Twee andere rosettes zijn aangebracht in een radiaal-vlak dat  $90^\circ$  verdraaid is t.o.v. het vlak van de water-uitlaat. Wij hopen daar een relatief ongestoorde omgeving aan te treffen. In de omgeving van de rekstrookjes worden temperaturelementen geplakt om een indruk te krijgen van de membraan-temperatuur.

Type rosette: PR 5-11; k-factor 2,06; fabr.TOKIO SOKKI.  
Type lijm : P2, tweecomponentenlijm; fabr.TOKIO SOKKI.  
Type temperaturelementen: PT-100, Thermo Electra b.v.

### 2.1. Schakeling

Elk actief filament van een rosette vormt samen met een filament van een dummy-rekstrookje een halve brug van Wheatstone. Deze halve bruggen worden gehangen aan een zes-kanaals meetversterker. De uitgangssignalen worden aan een schrijver toegevoerd, zie fig. 3.

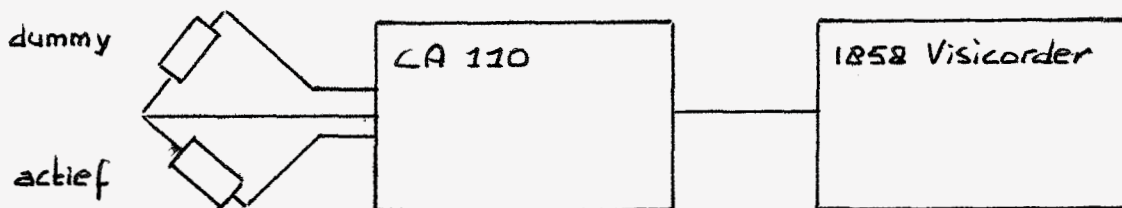


Fig. 3. Instrumentatie voor rekstrookjes.

De meetversterker, CA 110 van het fabricaat Peekel, heeft een draaggolf gevoede brugspanning. De draaggolfrequentie is 5000 Hz. en dus hoog

genoeg om de uiterst laag frequente signalen tijdens het stoken van de ketel onvervormd te kunnen weergeven. De schrijver is een zg. lichtpenschrijver waar frequenties tot 5000 Hz mee kunnen worden geregistreerd. De signalen worden op fotogevoelig papier afgeleverd. Helaas is het niet goed mogelijk copieën van dit papier te maken.

Wegens een defect aan één van de meetversterkers hadden wij tijdens het experiment slechts de beschikking over zes meetkanalen, waardoor het meetprogramma dubbel moest worden uitgevoerd. De invloed van het proefstoken is ook alleen maar gemeten voor de strookjes 1 en 2, die zich recht tegenover de wateruitlaat bevinden.

De registratie van de temperaturen gebeurde met de schakeling zoals die in fig. 4 is aangegeven.

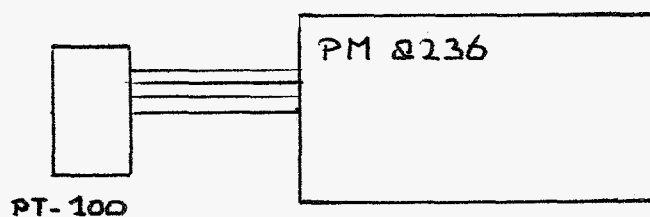


Fig. 4. Instrumentatie voor temperatuurmeting.

De temperatuurvoelers zijn zogenaamde PT-100 elementen. Tijdens het installeren van de ketel brak de verbinding van een van de PT-100 elementen. Een nieuw element was niet snel voorradig. Het overgebleven temperaturelement bevindt zich tussen beide meetplaatsen voor de rek. De registratie gebeurt op een Philips multirecorder type PM 8236.

### 3. De metingen

#### 3.1. Proefstoken, rekstrookje 1 en 2

Nadat de ketel zo goed mogelijk was ontvlucht is een proefmeting uitgevoerd, enerzijds om de werking van alle opnemers te testen, anderzijds om het nivo van de rekken en de tijdsduur van een stookcyclus te bepalen. Bij het proefstoken zijn alleen de rekstrookjes 1 en 2 gemeten. Voordat de brander werd aangezet werden alle rekstrookbruggen zodanig afgeregeld dat de uitgangssituatie voor onze metingen als een onbelaste toestand wordt beschouwd.

Met behulp van de gevolgde meettechniek is het niet mogelijk rekening te houden met spanningen die in het materiaal zijn gekomen door het lassen of andere fabricagetechnieken.

Tijdens het stoken wordt er geen koelwater door de warmtewisselaar gestuurd. De warmtecapaciteit van het totale systeem is daardoor relatief laag en het opwarmen van het water zal dan ook relatief snel verlopen.

Uit het verloop van de rekken blijkt dat de maximale rekken en dus ook de maximale spanningen worden bereikt halverwege de stookcyclus, ongeveer drie minuten na het starten van de brander als de temperatuur van het membraan circa  $50^{\circ}\text{C}$  is. Daarna wordt de spanning weer wat minder totdat de brander afslaat. In fig. 5 is het verloop van de radiale en tangentiale spanning weergegeven voor rekstrookje 2, tijdens het proefstoken.



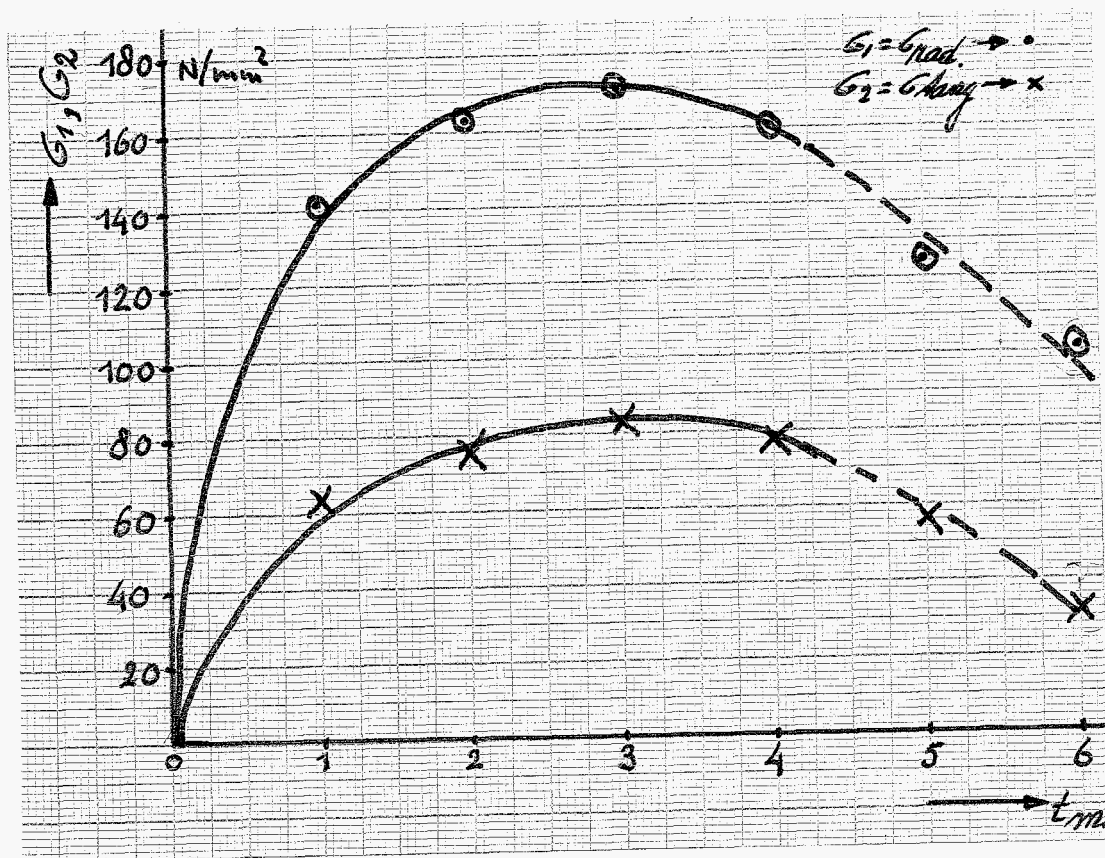


Fig. 5. Spanningsverloop aan binnenzijde membraan tijdens proefstoken.

De hoogste spanning bereikt een waarde van  $171 N/mm^2$ . De vergelijkspanning in dat meetpunt heeft dan een waarde van  $148 N/mm^2$ . Nadat de brander is uitgeschakeld lopen de rekken nagenoeg exponentieel terug. De rekken en dus ook de spanningen komen niet op nul, er blijven restspanningen over. Tevens blijkt dat na het afkoelen de hoofdspanningsrichtingen gedraaid zijn. In tabel 3.1 zijn de spanningen tijdens het proefstoken vermeld, als basis dienen rekwaarden uit appendix 3.1.

Tabel 3.1. Spanningen tijdens het proefstoken.

24° - 95°C.	Rekstrookje 1				Rekstrookje 2			
	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_{verg}$	$\psi$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_{verg}$	$\psi$
Start	0	0	0	0	0	0	0	0
Halverwege brandtijd	-43	34	67	-5	171	84	148	-6
Einde brandtijd	-30	33	55	-1	103	32	91	-40
Na afkoelen	-35	2	36	+44	-129	63	170	+15

De spanningen worden uitgedrukt in  $N/mm^2$ , de hoofdspansingsrichting  $\varphi$  in graden wordt gemeten vanaf de radiale richting (tegen de klokrichting is positief).

De maximale temperatuur is  $93^{\circ}C$ , de begintemperatuur is  $24^{\circ}C$ .  
De maximale waterdruk is 2,5 bar.

Halverwege de brandtijd vallen de hoofdrichtingen 1 en 2 nog ongeveer samen met de radiale resp. tangentiale richting. Bij rekstrookje 2 is aan het einde van de stookperiode de hoofdrichting gedraaid. Hoewel in het rekstrookje geen hogere rekwaarde dan circa 700  $\mu$ rek werd gemeten en er dus ter plaatse van het strookje geen vloeiverschijnsel is opgetreden kan de draaiing van de hoofdspansingsrichting wel veroorzaakt zijn door plastische verschijnselen in de lassen in de nabijheid van het strookje.

### 3.2. De metingen

Na het proefstoken wordt er geen wijziging aangebracht in de afstelling van de meetbruggen. De beginsituatie van de seriemetingen is dezelfde als de uitgangssituatie na het proefstoken, ondanks het feit dat er op twee verschillende dagen is gemeten.

Bij deze metingen wordt de ketel een aantal malen opgestookt, waarna het water weer wordt afgekoeld. Bij de eerste drie metingen is steeds:

de maximale watertemperatuur  $95^{\circ}C$ .

de maximale waterdruk 2,5 bar.

In de vierde meting is de waterdruk zo hoog mogelijk gekozen, maar deze wordt beperkt doordat het overdrukventiel afblaast. De maximale druk is 2,7 bar.

Door verstelling van de thermostaat wordt in de vijfde meting geprobeerd de watertemperatuur te maximaliseren. De hoogst mogelijke temperatuur is  $95^{\circ}C$ .

Bij alle metingen blijkt dat na afloop van een meting de rekken weer ongeveer op hetzelfde niveau terugkomen. De verschillen tussen begin- en eindwaarden in rek zijn per filament minder dan 50  $\mu$ rek. (dit is een rek van  $50 \times 10^{-6}$ ). Omdat niet in alle metingen gedurende dezelfde tijd de resultaten geregistreerd zijn ontstaan er kleine verschillen omdat het afkoelen op het laatst erg langzaam verloopt.

Bij alle metingen geldt ook dat de maximale spanningen optreden ongeveer halverwege de stooktijd, circa 3 minuten nadat de brander aanslaat. In tabel 3.2 zijn de resultaten voor de rekstrookjes 1 en 2 verzameld, als basis dienen de rekwaarden uit appendix 3.3.

Tabel 3.2. Maximale spanningen in de strookjes 1 en 2; alleen als gevolg van het stoken.

Serie	rekstrookje 1				rekstrookje 2			
	$\sigma_r$	$\sigma_t$	$\sigma_{\text{verg}}$	$\varphi$	$\sigma_r$	$\sigma_t$	$\sigma_{\text{verg}}$	$\varphi$
II	-51	27	68	-1	155	76	134	-3
III	-46	28	65	-2	156	73	135	-8
IV	-43	26	60	-1	148	69	128	-7
V	-44	33	68	-2	163	76	141	-8
IX	-43	34	66	-1	167	80	145	-7

II, III en IV:  $T = 93^{\circ}\text{C}$ ;  $p = 2,5$  bar.

V :  $T = 93^{\circ}\text{C}$ ;  $p = 2,7$  bar.

IX :  $T = 95^{\circ}\text{C}$ ;  $p = 2,6$  bar.

De maximale spanningen die in tabel 2. zijn weergegeven, worden bepaald ten opzichte van de beginsituatie van de dag. Hierbij is geen rekening gehouden met de aanwezige restspanningen ten gevolge van het proefstoken. De in deze tabel gegeven waarden kunnen worden opgevat als de dynamische componenten van de spanning die gedurende een stookcyclus kan optreden. Hoewel de berekende hoofdspanningsrichtingen niet precies samenvallen met de tangentiële en radiale richting wordt dit richtingsverschil zo klein geacht dat de orde van grootte van de spanning hierdoor nauwelijks zal worden beïnvloed; dit geldt in ieder geval voor rekstrookje 1. Voor rekstrookje 2 zijn de verschillen in hoofdspanningsrichting groter; zij variëren tussen +1,5 en -12 graden.

Opmerkelijk is dat de radiale spanning van binnen naar buiten van teken wisselt hetgeen duidt op buiging van het membraan. Bij strookje 2 heersen hoge trekspanningen, bij strookje 1 drukspanningen. Omdat de strookjes niet aan de rand van het membraan konden worden geplakt moet worden verwacht dat de radiale spanning in de binnenlas nog hoger is dan de hier berekende waarde (zie fig. 6).

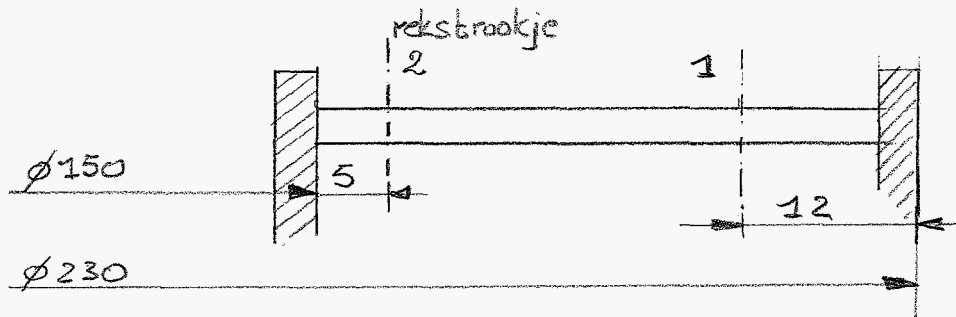


Fig. 6. Plaats rekstrookjes 1 en 2 op het membraan.

Houden wij rekening met de restspanningen na het proefstoken en superponeren wij de maximale spanning uit tabel 2 op die restspanningen dan ontstaan spanningstoestanden waarbij de hoofdspansingen niet meer samenvallen met de radiale en tangentiële richting. De vergelijkspanning neemt dan voor de strookjes 1 resp. 2 waarden aan van 82 resp. 156  $N/mm^2$ .

### 3.3. De rekstrookjes 3 en 4

Hoewel voor het proefstoken alle filamenten getest en in orde waren bevonden bleek dat na de eerste serie metingen één filament van rekstrookje 4 niet meer te balanceren was. Gelukkigerwijs staan de twee overgebleven filamenten in radiale en tangentiële richting.

Voor de rekstrookjes 3 en 4 is geen meting uitgevoerd tijdens het proefstoken. Restspanningen zoals bij de strookjes 1 en 2 zijn dan ook niet te bepalen. Alleen het effect van het herhaald stoken wordt op deze plaatsen gemeten.

Het algemene rekverloop volgt dezelfde tendens als bij de strookjes 1 en 2. Ook nu is het weer zo dat de hoogste rekken worden gemeten halverwege het opstoken. Terwijl de brander nog aan staat en de watertemperatuur verder stijgt, neemt de rek geleidelijk af. Tijdens het afkoelen neemt de rek vervolgens weer exponentieel af tot ongeveer de beginwaarde. In de afkoelperiode treden wat kleine verstoringen op die waarschijnlijk veroorzaakt worden door het verspringen van vinnen, die niet over de gehele lengte vast aan elkaar bevestigd zijn.

Voor de rekstrookjes 3 en 4 zijn drie meetseries uitgevoerd:

twee series waarbij de temperatuur  $93^{\circ}C$  en de druk 2,6 bar was;

een serie waarbij de temperatuur zo hoog mogelijk werd gekozen:  $98^{\circ}C$  en de druk een waarde van 2,7 bar bereikte.

In tabel 3.3 staan de hoofdspansingen vermeld. Uit de resultaten van rekstrookje 3 blijkt dat de hoofdspansingsrichtingen samenvallen met de

radiale en tangentiële richting. Voor rekstrookje 4 wordt aangenomen dat die richtingen hoofdrichtingen zijn, omdat een controle daarop door het ontbreken van een derde filament niet mogelijk was.

Tabel 3.3.: Maximale spanningen in de strookjes 3 en 4, als gevolg van het stoken.

	strookje 3			strookje 4		
	$\sigma_{\text{rad}}$	$\sigma_{\text{tan}}$	$\sigma_{\text{verg}}$	$\sigma_{\text{rad}}$	$\sigma_{\text{tan}}$	$\sigma_{\text{verg}}$
T = 93°C; p = 2,6 bar	-59,6	22,1	73	136,3	58,7	118
T = 98°C; p = 2,6 bar	-63,5	33,5	85	151,7	71,8	131
T = 98°C; p = 2,7 bar	-57,7	24,7	73	137,1	57,9	119

In vergelijking met de rekstrookjes 1 en 2 blijkt dat opnieuw het strookje aan de binnenzijde het zwaarst wordt belast, hoewel de maxima bij strookje 4 wat lager uitvallen dan bij strookje 2. Daarentegen zijn de spanningen in strookje 3 wat hoger dan in strookje 1.

De radiale spanning levert wederom de grootste bijdrage, deze spanning wisselt ook van teken bij de overgang van binnen naar buitenzijde.

### 3.4. Voorlopige conclusies

Bij het proefstoken, met maximaal temperatuurverschil en kleine warmtecapaciteit treden relatief hoge spanningen op. Waarschijnlijk ten gevolge van plastische vervorming blijft er na deze cyclus een aanzienlijke restspanning over. Ook de hoofdspanningsrichtingen vallen dan niet meer samen met de radiale en tangentiële richting.

De extra belasting die vervolgens gemeten wordt onder een aantal condities is redelijk reproduceerbaar. Extra plastische vervorming is niet merkbaar. De hoogte van de vergelijkingsspanning voor rekstrookje 2 bevindt zich rond de  $135 - 145 \text{ N/mm}^2$ . Nemen wij vermoeiingsaspecten mee in onze beoordeling dan moet deze spanning waarschijnlijk wel te hoog geacht worden, immers in de las zal de spanning een nog hogere waarde hebben.

Op de andere meetdoorsnede, niet in de buurt van de wateruitlaat liggen de spanningen aan de binnenzijde wat lager, aan de buitenzijde wat hoger dan in de eerst bemeeten plaatsen.

Op grond van de meetresultaten lijkt de spanning vooral te worden veroorzaakt door het verschil in uitzetting van binnen- en buitenwand. Tijdens het stoken neemt dit uitzettingsverschil in eerste instantie sterk toe door de verhitting van de vinnen. De spanningsreductie die in het tweede deel van de stookcyclus wordt geconstateerd zal het gevolg zijn van het opwarmen van het ketelwater en dus van de buitenwand.

Om deze hypothese te toetsen wordt in hoofdstuk 4 een aantal proeven uitgevoerd met langere stooktijden en grotere warmtecapaciteit van het systeem.

#### 4. Speciale effecten

In de voorafgaande metingen is tijdens het opstoken er steeds voor gezorgd dat er geen koelwater door de warmtewisselaar stroomde, de warmtecapaciteit van het systeem was zo klein mogelijk en bovendien werd steeds een zo groot mogelijk temperatuurverschil in zo kort mogelijke tijd overbrugd.

In de volgende serie metingen is getracht het effect na te gaan van het stoken tussen verschillende temperatuurnivo's en van extra koeling of een vergrote warmtecapaciteit.

De metingen zijn alleen uitgevoerd voor de rekstrookjes 1 en 2.

##### 4.1. Temperatuurinterval 30-55°C

Vanuit een begintemperatuur van 26,5°C wordt driemaal een temperatuur bereikt van ongeveer 55°C. Bij het begin van de metingen zijn alle meetbruggen op nul afgeregeld.

Het opstoken duurt in de opeenvolgende cycli resp. 150, 149 en 148 sec. Uit de geregistreeerde rekken, zie appendix 4.1, wordt een gemiddelde rek per filament bepaald, waarna de spanningen worden berekend (zie tabel 4.1).

Tabel 4.1. Rekken en spanningen bij 35 - 55°C.

Rekstrookje	$\mu_{rek}$	$\sigma_r$	$\sigma_t$	$\sigma_{verg}$	$\varphi$
Filament 1.1	-225				
1.2	+170	-40,2	23,7	56	-2
1.3	- 40				
Filament 2.1	+600				
2.2	+105	+146,5	65,0	127	-5
2.3	+400				

##### 4.2. Temperatuurinterval 60 - 80°C.

Opnieuw wordt aan het begin van deze cyclus de rek van elk filament op nul gesteld. Alleen de extra rekken ten gevolge van het stoken worden gemeten. Als maximumtemperatuur wordt een waarde van ongeveer 75°C bereikt. Voor de drie cycli duurt het opstoken resp. 216, 183 en 185

sec. Uit de geregistreeerde rekken, zie appendix 4.2, wordt een gemiddelde rek per filament bepaald en vervolgens een spanning per strookje, zie tabel 4.2.

Tabel 4.2. Rekken en spanningen bij 60 - 80°C.

Rekstroomkje	$\mu$ rek.	$\sigma_r$	$\sigma_t$	$\sigma_{\text{verg}}$	$\varphi$
Filament 1.1	-210				
1.2	+80	-43,1	4,1	45	-4
1.3	-85				
Filament 2.1	+445				
2.2	+30	104,9	37,6	92	-2
2.3	+225				

Uit de vergelijking met het normale interval 30 - 55°C blijkt dat onder vollastcondities (60 - 80°C) de gemeten maximale spanningen bij rekstroomkje 2 lager liggen. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat de rekken en spanningen in hoofdzaak een gevolg zijn van een verschil in uitzetting tussen binnen- en buitenrand. Wij veronderstellen dat bij het opstoken de temperatuur van de vinnen ongeveer gelijk is; doordat bij vollast een gemiddelde hogere watertemperatuur en dus ook hogere buitenwandtemperatuur optreedt, is het temperatuurverschil over het membraan lager en dus ook de spanningen in het membraan.

#### 4.3. Naijleffect

Geprobeerd wordt de ketel snel op te stoken en dan bij circa 60°C de brander aan te laten, zodat mogelijke temperatuurverschillen in de ketel en in de dummy-rekstroomkjes zich stabiliseren. Bij het begin van deze serie worden opnieuw alle rekken nul verondersteld. De meetwaarden staan in appendix 4.3. De berekende spanningen worden in tabel 4.3 gegeven.



Tabel 4.3. Spanningen bij constant stoken op 60°C.

Tijd sec.	Rekstroomkje 1				Rekstroomkje 2			
	$\sigma_r$	$\sigma_t$	$\sigma_{\text{verg}}$	$\varphi$	$\sigma_r$	$\sigma_t$	$\sigma_{\text{verg}}$	$\varphi$
100	-38	+35	63	-1	158	74	137	-7
200	-47	+29	66	-1	159	75	137	-7
300	-50	+44	81	0	177	93	153	-8
400	-47	+54	88	0	184	101	160	-9
500	-57	+54	97	+1	187	104	162	-9
600	-48	+57	91	0	187	107	163	-8

Na 200 sec. treedt een vrij sterke verhoging van de berekende spanningen op, stabilisatie van de spanningen op een vast nivo wordt nagenoeg niet bereikt. In hoeverre het niet constant zijn van de watertemperatuur hier een rol speelt is niet duidelijk. Wel blijkt uit deze meting dat door het snel opstoken een relatief te gunstig meetresultaat wordt verkregen.

#### 4.4. Geforceerd koelen

Vanaf een begintemperatuur van circa 38°C wordt een zo hoog mogelijke temperatuur bereikt, afhankelijk van het al dan niet sterk koelen via de warmtewisselaar. In eerste instantie wordt niet extra gekoeld, de temperatuur loopt op tot circa 95°C. In het laatste geval wordt zo sterk gekoeld dat de maximum temperatuur de 70°C niet overschrijdt. Bij het begin van dit experiment worden alle rekken nul verondersteld. De meetwaarden worden om de 150 sec. bemeaten, tenzij de maxima ergens anders optreden. De meetwaarden staan in appendix 4.4, de spanningen in tabel 4.4.

Tabel 4.4. Spanningen bij verschillende warmtecapaciteiten.

Serie		Rekstroomkje 1				Rekstroomkje 2			
$T_{\max}$	tijd(s)	$\sigma_r$	$\sigma_t$	$\sigma_{\text{verg}}$	$\varphi$	$\sigma_r$	$\sigma_t$	$\sigma_{\text{verg}}$	$\varphi$
97,5°	0	-	-	-	-	-	-	-	-
	143	-41	23	57	-1	145	66	126	-5
	240	-50	22	64	-2	139	61	121	-6
	325	-51	21	63	-1	128	55	111	-6
80,0°	0	-9	3	10	+4	-6	3	7	+26
	150	-52	28	70	+1	151	73	130	-9
	300	-61	30	81	0	151	75	131	-9
	450	-59	35	82	0	145	72	126	-10
67,5°	0	-14	2	5	+12	6	19	17	+32
	150	-77	-13	71	+20	167	88	145	-11
	300	-65	35	88	+1	175	95	152	-11
	450	-60	45	91	+1	178	102	155	-11

Ook in deze serie blijkt dat bij het toenemen van de koeling en dus van het temperatuurverschil tussen binnen- en buitenwand, de berekende spanningen toenemen. In de eerste en tweede serie wordt op de lange duur de maximale spanning iets lager doordat de buitenwandtemperatuur voor enige spanningsreductie zorgt. In de laatste serie wordt de ketel te sterk gekoeld zodat een blijvend groot temperatuur- en verlengingsverschil tussen binnen- en buitenwand blijft gehandhaafd.

## 5. Het meetprotocol

Het interpreteren van de meetresultaten voor een experimentele ketel levert de nodige problemen op. De berekende spanningen kunnen niet nauwkeurig genoeg worden vergeleken met gebruikelijk toelaatbare spanningen vooral omdat de wisselende belastingscomponenten nauwelijks te combineren zijn met gegevens over vermoeiingsverschijnselen. Bovendien zijn gegevens over de voorkomende belastingscycli tijdens de levensduur van een ketel niet beschikbaar.

In het navolgende wordt geprobeerd een meetprotocol op te stellen dat gebruikt kan worden voor nieuw ontworpen ketels. De resultaten uit dit protocol dienen dan te worden vergeleken met resultaten van ketels die al enige jaren in productie zijn en die, blijkens de reacties in de praktijk, geen of nauwelijks aanleiding hebben gegeven tot klachten op mechanisch gebied.

In principe wordt op deze manier een vrij conservatieve beoordeling toegepast. Op grond van de bestaande keteluitvoering is niet na te gaan in hoeverre de spanningen kunnen worden verhoogd.

### 5.1. De beschrijving

Het protocol bevat de volgende belastingssituaties.

#### 1. Uitgangssituatie

De watertemperatuur wordt geregeld naar  $T = 20^{\circ}\text{C}$ . De waakvlam van de ketel is uit. De ketel is zo goed mogelijk ontvlucht, de waterdruk ligt in de orde van 1,5 bar. In deze situatie worden alle rekken op nul afgeregeld. Vervolgens wordt de waakvlam ontstoken en worden de rekken afgelezen op de rekmeter.

#### 2. Proefstoken

Gezien eerder opgetreden plastische vervormingen in de ketel en het optreden daardoor van restspanningen na een eerste stookcyclus wordt voor dit protocol ook eerst proefgestookt. Tweemaal wordt een groot temperatuurinterval  $20-95^{\circ}$  zo snel mogelijk doorlopen.

Na dit proefstoken zullen er in het membraan restspanningen overblijven. Als de temperatuur weer  $20^{\circ}\text{C}$  worden de rekken op de rekmeter afgelezen.

N.B. Voor het berekenen van de spanningen gaan wij uit van een situatie waarbij de restspanningen worden genegeerd. De rekken worden vervolgens bepaald ten opzichte van als laatst bepaalde waarden bij het proefstoken. Deze rekken en spanningen zien wij als dynamische componenten van de belastingscyclus.

3. Maximum interval

Zonder externe koeling wordt nog eenmaal het traject 20-95°C doorlopen.

4. Normale stookcyclus

Tweemaal wordt het stooktraject 35-55°C doorlopen. De minimum- en maximumtemperatuur wordt door middel van de ketelthermostaat bereikt.

5. Vollastcyclus

Bij vollast wordt het temperatuur-interval 60°C-80°C doorlopen.

Vanuit 35°C wordt het systeem zodanig ingesteld dat inderdaad de hoogste temperatuur wordt bereikt, daarna wordt de cyclus nog tweemaal doorlopen.

6. Stoken met vergrote warmtecapaciteit

Vanuit 60°C wordt opgewarmd tot circa 90°C, waarbij de brander aan moet blijven. De warmtecapaciteit van het systeem wordt vergroot door tijdens het stoken de koeling van de warmtewisselaar aan te laten. Na het bereiken van deze temperatuur wordt afgekoeld tot 30°C, waarna opnieuw langzaam wordt opgewarmd tot 90°C.

7. Afkoelen

Als laatste stap wordt het ketelwater weer op 20°C gebracht en vervolgens wordt de waakvlam uitgezet. De rekken worden ook nog op de rekmeter afgelezen.

Het meetprotocol is als volgt in beeld te brengen: fig. 1.

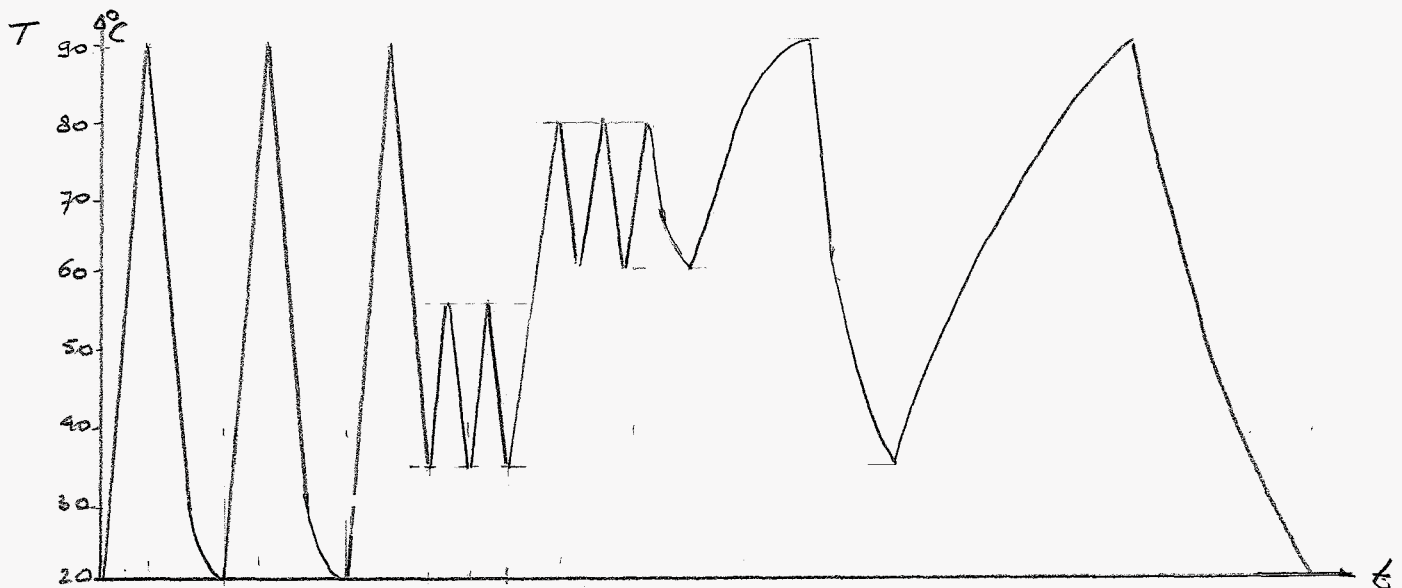


fig. 1. Meetprotocol.

Meetprotocol gasgestookte C.V.-ketel

Beginwatertemperatuur:  $T = 20^{\circ}\text{C}$

Vuldruk  $p = 1,5 \text{ bar}$

Serie	Waakvlam	$T_{\min}$	$T_{\max}$	Extra koeling	Opmerkingen
1	uit	20°		--	alle rekken nul
	aan	20°		--	
2	"	20°	95°	--	proefstoken restmetingen
	"	20°		--	
3	"	20°	95°	--	
4	"	30°	55°	--	normaal interval
	"	30°	55°	--	
5	"	30°	80°	--	vollast
	"	60°	80°	--	
	"	60°	80°	--	
6	"	60°	90°	+	extra koeling
	"	30°	90°	+	
7	aan	20°			
	uit	20°			

## 5.2. Uitvoering

Volgens het zojuist beschreven protocol zijn twee verschillende ketels doorgemeten. Opnieuw is de experimentele ketel beproefd. Uiteraard konden wij hierbij niet van een ongestookte ketel uitgaan. Toch is het begin van het meetprotocol ook hier doorlopen. In de tabel met meetresultaten zijn de restrekken en -spanningen opgenomen die tijdens de eerste stookcyclus gemeten werden. Voor deze ketel zijn alle metingen dus te beschouwen als dynamische componenten.

Ter vergelijking van de resultaten stelde AWB een ketel G-1822 ter beschikking die rechtstreeks van de productielijn kwam. Dit type ketel, met tulprand, is al weer enige jaren in gebruik en tot nu toe zijn hierbij geen mechanische defecten geconstateerd. Aangenomen mag worden dat de spanningen hierbij op een aanvaardbaar nivo liggen.

De meetresultaten zijn in appendix 5.1 resp. 5.2 genoteerd. De berekende spanningen zijn tabel 5.1 resp. 5.2 verzameld.

De spanningen  $\sigma_1$  en  $\sigma_2$  worden uitgedrukt in  $N/mm^2$ . De richting van  $\sigma_1$  wordt bepaald t.o.v. de radiale richting. De afwijking  $\varphi$  wordt gegeven in graden.

Tabel 5.1. Spanningen tijdens meetprotocol.  
 Keld G6-G12 Datum 03.02.20.

Serie	Temp °C	$\sigma_{z1}$	$\sigma_{z2}$	$\sigma_{oorg1}$	$\phi_1$	$\sigma_{z1}$	$\sigma_{z2}$	$\sigma_{oorg2}$	$\phi_2$
1	20	-	-	-	-	-	-	-	-
2	50	-45	35	70	-2	150	30	138	-6
	95	-50	27	68	-4	116	20	108	-5
	20	7	2	7	+42	4	8	7	+31
	50	-40	37	66	-3	148	35	134	-7
	95	-46	30	66	-5	116	21	107	-5
9 FEB. RESTWAKEDEN	20	-35	2	36	+44	-129	63	170	16
3	20	3	8	7	-33	3	9	8	+27
	50	-39	39	68	-3	148	35	134	-7
	95.5	-46	31	67	-4	116	20	108	-6
4	35	5	22	21	-3	23	15	20	-45
	52.5	-34	38	62	-2	137	32	124	-8
	35	2	22	21	-5	23	17	21	-36
	54	-37	37	64	-2	137	31	124	-9
	35	0	21	21	-2	27	17	24	-39
5	74.5	-57	48	91	-3	130	28	119	-8
	55.5	-16	37	47	0	52	30	45	-17
	76.5	-53	49	88	-3	128	28	116	-7
	56.5	-16	36	46	+1	54	29	46	-17
6	77	-53	48	87	-3	127	28	116	-7
	30	3	6	6	-39	0	6	6	+15
	89.5	-55	63	103	-3	124	33	112	-8
7	20	4	1	4	+39	-8	2	9	+8
	20	5	0	5	+19	-14	-1	14	+5

Tabel 5.2. Spanningen tijdens meetprotocol.  
 Keel G-1822 Datum 03.03.03

Serie	Temp [°C]	$\sigma_{1.1}$	$\sigma_{2.1}$	Sverg.1	$\phi_1$	$\sigma_{1.2}$	$\sigma_{2.2}$	Sverg.2	$\phi_2$
1	21	-	-	-	-	-	-	-	-
	21	-2	1	3	+3	3	2	3	-23
2	65	-105	15	113	-2	140	116	135	+6
	98	-24	48	64	-5	103	203	176	-3
	20	96	38	84	-10	21	151	141	+3
	65	-106	23	119	-2	127	98	115	+10
	100	-100	16	109	-4	84	60	75	+19
REST.	20	95	37	83	-12	21	155	145	+3
3	65	-105	22	117	-1	126	101	115	+10
	100	-102	14	110	-3	86	61	77	+33
4	33.5	-1	7	8	+18	1	8	7	+23
	55	-95	22	108	-1	118	92	107	+13
	36	-6	6	10	+17	0	15	15	-36
	62.5	-99	21	111	-1	114	91	105	+11
	35	-3	6	8	+15	1	11	11	-36
5	87	-102	17	112	-3	91	71	83	+31
	62	-11	23	30	0	20	35	31	-34
	85	-101	17	111	-2	94	74	86	+31
	61	-10	20	26	+2	16	32	28	-33
6	82	-101	17	111	-2	93	74	85	+31
	29	-6	3	9	+40	-14	5	17	+42
	88	-98	32	117	-2	101	79	92	+34
7	20	8	-4	11	-2	-33	-27	31	-19
	20	12	-6	16	-1	-38	-30	35	-19
REST	20	107	31	95	-9	-16	123	132	+2



### 5.3. Conclusies uit de vergelijking

Ook de productieketel G-1822 vertoont het verschijnsel dat na de eerste stookperiode restspanningen in het membraan achterblijven. Deze restspanningen kunnen ondermeer ontstaan doordat de vinnen dichtbij de brander roodgloeiend worden gestookt en na het afkoelen voor een restspanning in de binnenwand en dus ook in het membraan zorgen. De grootste vergelijkspanning bereikt in rekstrookje 2 een waarde die vergelijkbaar is met die tijdens de meting van de experimentele ketel (zie tabel 3.1). Uit de meetserie 3 en volgende, waarin uitsluitend de dynamische componenten zijn genoteerd blijkt dat de hoogst belaste plaats verschilt. In de experimentele ketel worden de hoogste vergelijkspanningen gevonden bij rekstrookje 2, bij de productieketel is dat juist rekstrookje 1 aan de buitenkant van het membraan.

De hoogte van de maxima verschillen ongeveer 10% ten nadele van de experimentele ketel; waarden van 124 tegen 111 N/mm<sup>2</sup> in meetserie 4. De hoge spanning in serie 3 is niet helemaal maatgevend omdat deze belastingstoestand zich waarschijnlijk veel minder vaak voordoet.

Opmerkelijk is dat de al geteste ketel na afloop van het meetprotocol niet volledig op nul terugkomt.

Vergelijken wij bij de productieketel de twee restwaarden: de eerste na afloop van het proefstoken, de tweede na afloop van het totale protocol dan blijkt de hoogste spanning, rekstrookje 2, wat in restspanning verlaagd, terwijl de buitenzijde rekstrookje 1 een wat hogere restspanning heeft verkregen. Of dit verschijnsel zich zal blijven vertonen is op grond van deze experimenten niet uit te maken.

Vergelijking van de spanningsnivo's met de vermoeiingscurve zoals die geconstrueerd werd door Dortman en Peters (Dortmans, A. en Peters, G.: C.V.-ketels, een spannings- en vermoeiingsanalyse, intern THE-rapport juli 1981) doet vermoeden dat een spanningsverhoging van circa 10% de levensduur circa 20% doet afnemen.

Gezien de relatieve onbetrouwbaarheid van de vermoeiingscurve, het gebrek aan inzicht in de praktische belastingspatronen van een C.V.-ketel en het relatief geringe verschil in spanningsamplitude mag worden aangenomen dat de levensduur van een ketel, zoals voorgesteld in het experimentele model, vergelijkbaar is met die van de productieketel.

### Appendix 3.1.

Metingen d.d. 83.02.09. Rekstrookjes 1 en 2. [µvek]

Filament	$t=0$	1	2	3	4	5	6 min	rest
1.1	-	-200	-220	-230	-260	-250	-200	-80
1.2	-	+200	+220	+220	+230	+240	+230	-50
1.3	-	0	-20	-30	-50	-60	0	+40
2.1	-	+580	+660	+675	+640	+550	+330	-580
2.2	-	+120	+150	+160	+170	+180	+320	+360
2.3	-	+400	+460	+470	+460	+440	+420	+150

### Appendix 3.2.

Metingen d.d. 83.02.10 Rekstrookjes 1 en 2. [µvek]

Filament	$t=0$	1	2	3	4	5	6 min	rest.
1.1	-60	-165	-215	-250	-270	-275	-250	-50
1.2	-50	+165	+200	+210	+210	+210	+195	+60
1.3	+60	0	-15	-40	-50	-55	-60	-20
2.1	-620	+535	+625	+640	+615	+575	+525	+35
2.2	+400	+95	+125	+130	+120	+100	+60	-30
2.3	+200	+360	+430	+450	+420	+380	+320	+50

Rekken na 1, 2... min gemeten t.o.v. het fischeve nulniveau bij  $t=0$ . De ware rekken op die tijdstippen worden gevonden door de bijdrage ten tijde  $t=0$  er bij op te tellen.

### Appendix 3.3

Metingen dd. 03.02.10 Rekstrookjes 1 en 2 ; [ $\mu$ rek]

Filament	Serie II	III	IV	V	IX
1.1	-200	-260	-240	-255	-250
1.2	+200	+200	+185	+220	+220
1.3	-45	-50	-35	-30	-20
2.1	+630	+630	+600	+655	+675
2.2	+140	+135	+125	+140	+150
2.3	+410	+450	+420	+470	+480

### Appendix 3.4

Metingen dd. 03.02.10 Rekstrookjes 3 en 4 [ $\mu$ rek]

Filament	Serie VI	VII	VIII
3.1	-315	-350	-310
3.2	+190	+250	+200
3.3	-50	-45	-45
4.1	+570	+620	+565
4.2	+85	+120	+75

Trekkwaarden zijn maxima gemeten d.o.v. de toestand voor het stoken.  
Eventueel aanwezige restrekken zijn niet verrekend.

## Appendix 4.1

Metingen d.d. 03.02.22 Rekstrookje 1 en 2

Filament	T = 26.5	55	30	55	29.5	56.8 °C
1.1	-	-250	-30	-250	-20	-250
1.2	-	+220	+50	+220	+50	+220
1.3	-	-25	+20	-20	+20	-20
2.1	-	+650	+50	+650	+50	+645
2.2	-	+140	+45	+150	+35	+145
2.3	-	+450	+55	+450	+50	+450

## Appendix 4.2

Metingen d.d. 03.02.22 Rekstrookje 1 en 2

Filament	T = 30.5	75.5	45.0	76.5	45.0	76.2 °C.
1.1	-	-225	-	-210	-	-210
1.2	-	+120	+50	+125	+40	+125
1.3	-	-75	+25	-60	+25	-60
2.1	-	+495	+50	+490	+50	+495
2.2	-	+60	+30	+60	+30	+60
2.3	-	+310	+50	+300	+40	+300

### Appendix 4.3

Metingen dd. 03.02.22. Releestroomcijfer 1 en 2.

Filament	$t=100$	200	300	400	500	600 s
1.1	-230	-265	-300	-300	-305	-310
1.2	+220	+205	+200	+325	+340	+340
1.3	-10	-40	-10	+10	+10	+20
2.1	+640	+640	+700	+720	+730	+730
2.2	+135	+140	+200	+230	+240	+250
2.3	+450	+450	+525	+550	+560	+560

### Appendix 4.4

Metingen dd. 03.02.22. Releestroomcijfer 1 en 2.

Filament	$T_{max} 97.5^{\circ}C$			$T_{max} 80.0^{\circ}C$				$T_{max} 67.5^{\circ}C$			
	$t=143$	240	325	$t=0$	150	300	450	$t=0$	150	300	450 s
1.1	-230	-270	-270	-45	-285	-335	-330	-65	-300	-360	-350
1.2	+170	+175	+170	+25	+205	+230	+250	+25	+225	+260	+300
1.3	-35	-60	-55	-5	-30	-50	-40	-	-20	-35	-15
2.1	+595	+570	+525	-20	+600	+600	+575	+25	+650	+675	+685
2.2	+110	+95	+85	+10	+145	+155	+150	+60	+200	+225	+250
2.3	+390	+380	+350	+15	+450	+450	+440	+80	+520	+550	+560

APPENDIX 5.1

Tleet protocol: Kabel: G6-G12

Datum: 03.02.20

Serie	Temp °C	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	stoottijd [s]
1	20	-	-	-	-	-	-	waakvlam aan
2	50	-265	230	-35	710	150	490	t=180s
	95	-275	+200	-70	550	100	365	t=400s
	20	18	15	1	24	33	35	⊗
	50	-240	230	-30	700	175	500	t=180s
	95	-260	205	-65	550	105	365	t=400s
	20	13	25	5	20	38	41	⊗
REST	20	-60	-50	+60	-620	+400	+200	RESTWAARDEN gfeb.
3	50	-240	240	-25	695	175	500	t=180s
	95.5	-260	210	-60	550	100	370	t=400s
4	35	-10	100	40	90	90	110	
	52.5	-215	230	-10	640	160	470	t=125s
	35	-20	100	30	100	90	110	
	54	-230	230	-15	640	160	475	t=125s
	35	-30	100	30	110	100	130	
5	74.5	-270	225	-50	610	140	440	t=245s
	55.5	-75	175	50	240	150	225	
	76.5	-250	230	-35	600	140	430	t=160s
	56.5	-75	170	50	245	150	230	
6	77	-250	225	-40	600	140	425	t=160s
	30	20	25	15	0	25	20	
	89.5	-260	300	-10	585	165	430	t=160s
7	20	15	12	6	-36	7	-8	⊗ waakvlam aan.
	20	21	1	3	-66	-4	-29	⊗ waakvlam uit.

⊗ Afleringen op CA110 rekmeter.

APPENDIX 5.2

Meetprotocol: ketel: G-1822 datum: 83.03.03

Serie	Temp[°C]	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	tijd(stok-) [s]
1	21	0	0	0	0	0	0	waakvlam uit
	21	-11	9	0	9	2	9	⊗ " aan.
2	65	-520	220	170	540	340	420	t=270s
	98	-180	260	0	200	820	400	t=520s
	20	392	54	286	-113	685	334	⊗
	65	-535	260	-160	460	290	345	t=270s
	100	-495	215	-185	280	200	175	t=510s
REST:	20	386	54	293	-120	704	341	⊗
3	65	-520	255	-150	450	305	350	t=280s
	100	-505	210	-190	275	215	175	t=510s
4	33.5	-10	30	25	0	30	0	
	55	-485	240	-140	420	280	315	t=185s
	36	-30	30	20	10	40	-20	
	62.5	-500	240	-140	410	275	315	t=205s
5	35	-20	30	20	10	30	-10	
5	87	-510	225	-175	300	240	215	t=380s
	62	-85	125	20	75	110	50	
	85	-505	225	-160	310	250	225	t=250s
	61	-75	110	25	60	100	35	
6	82	-505	225	-160	305	250	225	t=275s
	29	-10	0	25	-20	-10	45	
	88	-510	290	-135	325	275	235	t=110s
7	20	44	-32	9	-116	-85	-113	⊗
	20	65	-47	10	-131	-96	-127	⊗ waakvlam uit
REST:	20	451	7	303	-251	608	214	⊗ waakvlam uit

⊗ aflezingen op de CA110 rekenmeter.