



# Onderzoeken over het warmtetransport in Haag-buizen

<https://hdl.handle.net/1874/323761>

*A. gw. 192, 1938.*

ONDERZOEKINGEN OVER  
HET WARMTE-TRANSPORT  
IN HAAG-BUIZEN

C. A. CAMPAGNE

BIBLIOTHEEK DER  
RIJKSUNIVERSITEIT  
UTRECHT.











ONDERZOEKINGEN OVER  
HET WARMTE-TRANSPORT  
IN HAAG-BUIZEN

VERHOOR

ONDERZOEKINGEN OVER HET WARMTE-TRANSPORT IN  
HAAG-BUIZEN





*Diss. Utrecht, 1938*

# ONDERZOEKINGEN OVER HET WARMTETRANSPORT IN HAAG-BUIZEN

PROEFSCHRIFT

TER VERKRIJGING VAN DEN GRAAD VAN  
DOCTOR IN DE WIS- EN NATUURKUNDE AAN  
DE RIJKS-UNIVERSITEIT TE UTRECHT, OP  
GEZAG VAN DEN RECTOR MAGNIFICUS  
Dr. J. BOEKE, HOOGLEERAAR IN DE FACULTEIT  
DER GENEESKUNDE, VOLGENS BESLUIT VAN  
DEN SENAAAT DER UNIVERSITEIT TEGEN DE  
BEDENKINGEN VAN DE FACULTEIT DER WIS- EN  
NATUURKUNDE TE VERDEDIGEN OP MAANDAG  
11 APRIL 1938, DES NAMIDDAGS TE DRIE LIUR

DOOR

CORNELIS ANTONIE CAMPAGNE

GEBOREN TE TIEL

TERNEUZEN — 1938

N.V. HANDELSDRUKKERIJ v/h FIRMA P. J. VAN DE SANDE

BIBLIOTHEEK DER  
RIJKSUNIVERSITEIT  
UTRECHT.





*Aan mijn Vrouw.*





Bij het beëindigen van mijn academische studie betuig ik gaarne mijn oprechten dank aan U, Oud-Hoogleraren, Hoogleraren en Lectoren in de Faculteit der Wis- en Natuurkunde, voor hetgeen Gij tot mijn wetenschappelijke vorming hebt bijgedragen.

In het bijzonder dank ik U, Hooggeleerde ORNSTEIN, Hooggeachte Promotor, voor Uw onderwijs en voor Uw daadwerkelijke belangstelling, niet slechts voor mijn werk, doch ook voor mijn persoon. De jaren, die ik op Uw Laboratorium werkzaam heb mogen zijn, zullen mij steeds in dankbare herinnering blijven.

Zeergeleerde HUYGEN, het is mij een behoefte U mijn diepgevoelde erkentelijkheid te betuigen voor Uw medewerking, voor Uw steeds bereidwillig verleende hulp en voor de vriendelijke raadgevingen, die ik voor en tijdens het bewerken van dit proefschrift van U heb mogen ontvangen.

Ten slotte een woord van dank aan allen, die mij op eenigerlei wijze bij het tot stand komen van dit werk behulpzaam zijn geweest.



# INHOUD

Bladz.

- § 1. Gebruikte begrippen, formules en symbolen . . . 7

## HOOFDSTUK I. Inleiding.

- § 2. Principe van een Haag-buis . . . . . 11  
§ 3. Voorloopers van de Haag-buis . . . . . 13  
§ 4. Doel der proeven . . . . . 13

## HOOFDSTUK II. Beschrijving van het proefapparaat.

- § 5. Samenstellende deelen . . . . . 17  
§ 6. De Haag-buis . . . . . 19  
§ 7. De elektrische verhitting . . . . . 21  
§ 8. De koelmantel . . . . . 22  
§ 9. De condensor . . . . . 23  
§ 10. Hellende stand . . . . . 24  
§ 11. Warmte-isolatie . . . . . 24  
§ 12. De meting van de temperatuur . . . . . 24  
§ 13. Schakeling en ijking der thermo-elementen . . . . . 27  
§ 14. De bepaling van de calorische belasting . . . . . 29  
§ 15. De dampdrukmeting . . . . . 30  
§ 16. Overige meetinstrumenten . . . . . 30

## HOOFDSTUK III. De Haag-buis in verticalen stand zonder circulatiebuis.

- § 17. Methode van onderzoek . . . . . 31  
§ 18. Bewerking der meetresultaten . . . . . 32  
§ 19. Beschouwing van tabel I . . . . . 39  
§ 20. Tabel II . . . . . 46  
§ 21. Proeven bij kleinere belasting . . . . . 49  
§ 22. De warmteovergangscoefficiënt  $\alpha_3$  . . . . . 53  
§ 23. Anomaal gedrag van de buis bij geringe vulling . . . . . 55  
§ 24. Vulhoogte van de buis . . . . . 56  
§ 25. Overzicht van de proeven bij middelbare vulling.  
Gelijkstroomproeven . . . . . 57  
§ 26. Vergelijking met de proeven van anderen en met  
de theorie van Nusselt . . . . . 62



## HOOFDSTUK IV. De buis met circulatiebuis in verticalen stand.

§ 27.	Gebruikte circulatiebuizen . . . . .	69
§ 28.	Overzicht der overeenkomstige tabellen . . . . .	71
§ 29.	Invloed van de circulatiebuis op de inwendige temperatuurverdeling . . . . .	73
§ 30.	Invloed van de circulatiebuis op den inwendigen weerstand . . . . .	76
§ 31.	Invloed van de circulatiebuis op $a_1$ , $a_2$ en $a_3$ . . . . .	76
§ 32.	Invloed van de circulatiebuis op $W$ . . . . .	80
§ 33.	Invloed van de circulatiebuis op de plaatselijke overgangscoefficienten . . . . .	82
§ 34.	Conclusie . . . . .	85

## HOOFDSTUK V. De Haag-buis in hellenden stand.

§ 35.	Algemeene beschouwing . . . . .	86
	<i>a. Zonder circulatiebuis.</i>	
§ 36.	Temperatuurverdeling en oververhitting . . . . .	87
§ 37.	Inwendige weerstand . . . . .	91
§ 38.	De coëfficiënten $a_1$ en $a_2$ en de $a$ 's van onder- en bovenkant . . . . .	94
§ 39.	Totale buisweerstand . . . . .	99
§ 40.	De overgangscoefficiënt $a_3$ . . . . .	100
	<i>b. Met circulatiebuis.</i>	
§ 41.	Grensvulling en oververhitting . . . . .	100
§ 42.	Inwendige weerstand . . . . .	101
§ 43.	Overgangscoefficienten . . . . .	105
§ 44.	De totale weerstand . . . . .	113
§ 45.	Slotbeschouwing . . . . .	113
	<b>Zusammenfassung</b> . . . . .	117
	<b>Literatuuroverzicht</b> . . . . .	120

## § 1. Gebruikte begrippen, formules en symbolen.

De gebruikte eenheden zijn de technische eenheden: kcal, uur, m, °C.

$Q$  = aantal kcal [kcal].

$Q_h$  = aantal kcal per uur [kcal/h].

V.O. = verwarmend oppervlak [ $m^2$ ].

A.O. = afkoelend oppervlak [ $m^2$ ].

$t$  = temperatuur [°C].

$d$  = dikte [m].

$O$  = oppervlak [ $m^2$ ].

$l$  = lengte [m].

$r$  = straal [m].

$\lambda$  = warmtegeleidingscoëfficiënt [kcal/m,h,°C], gedefinieerd door:

het aantal kcal, dat per uur passeert door 2 tegenover elkaar liggende grensvlakken van 1  $m^3$  stof, oppervlak 1  $m^2$ , dikte 1 m, als het temperatuurverschil tusschen die grensvlakken 1 °C bedraagt (aannemende, dat de andere grensvlakken geen warmte doorlaten).

Door een wand, opp.  $O$   $m^2$ , dikte  $d$  m, wandtemperaturen  $t_1$  °C en  $t_2$  °C passeeren dan transversaal:

$$Q_h = \lambda O \frac{t_1 - t_2}{d} \text{ kcal/h.} \quad (1)$$

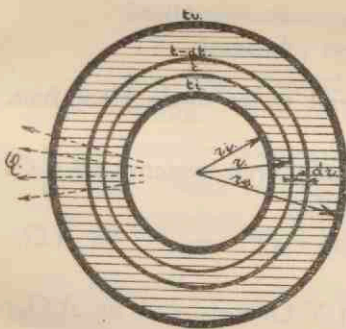


Fig. 1. Radiale warmtestroom door een cylindermantel.

(1), toegepast op den warmtestroom, die van binnen naar buiten transversaal door een buiswand (uitwendige straal  $r_u$ , inwendige straal  $r_i$ ) gaat, geeft voor een volume-element in den vorm van een cylindermantel (wanddikte  $dr$ ; zie fig. 1):

$$Q_h = - \lambda 2 \pi r l \frac{dt}{dr}$$

$$\text{of } \frac{dr}{r} = - \lambda 2 \pi l \frac{1}{Q_h} dt,$$

$$\int_{r_i}^{r_u} \frac{dr}{r} = e \log \frac{r_u}{r_i} = - 2 \pi l \lambda \frac{1}{Q_h} (t_u - t_i),$$

$$Q_h = 2 \pi l \lambda \frac{(t_i - t_u)}{e \log \frac{r_u}{r_i}} \text{ kcal/h.} \quad (2)$$

Voor het geval  $t_i < t_u$  geldt evenzoo:

$$Q_h = 2 \pi l \lambda \frac{(t_u - t_i)}{e \log \frac{r_u}{r_i}} \text{ kcal/h.} \quad (3)$$

$\alpha$  = warmteovergangscoefficiënt [kcal/m<sup>2</sup>,h,°C] van een wand op een vloeistof (damp) of omgekeerd, gedefiniëerd door: het aantal kcal, dat per uur overgaat van een wand, opp. 1 m<sup>2</sup>, op een vloeistof (damp) of omgekeerd, als het temperatuurverschil tusschen wand en vloeistof 1 °C bedraagt.

Voor een wand, opp.  $O$  m<sup>2</sup>, oppervlaktetemp.  $t_1$  °C, en een vloeistof, temp.  $t_2$  °C, volgt dan:

$$Q_h = \alpha O (t_2 - t_1) \text{ kcal/h.} \quad (4)$$

$a_1 = \alpha$  van ijzeren wand V.O. op kokend water in de Haag-buis.  
( $a_6, a_7, a_8, a_{16}, a_{17}, a_{18}$  = plaatselijke  $a$ 's V.O.).

$a_2 = \alpha$  van condenseerenden waterdamp op ijzeren binnenwand A.O.  
( $a_9, a_{10}, a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{14}$  = plaatselijke  $a$ 's A.O.).

$a_B = \alpha$  van de bovenkant van de buis (bij V.O.:  $a_6, 7, 8$ ; bij A.O.:  
 $a_9, 10, 11$ ).

$a_0 = \alpha$  van de onderkant van de buis (bij V.O.:  $a_{16}, 17, 18$ ; bij A.O.:  
 $a_{12}, 13, 14$ ).

$a_3 = \alpha$  van ijzeren buitenwand A.O. op kokend water in den koelmantel.

Combinatie van (1) en (4) levert de formule, benodigd voor de berekening van het warmteverlies aan de buitenlucht van een éénzijdig verwarmde vlakke metalen plaat, aan de andere zijde geïsoleerd door eenige lagen isoleerende stof (dikten resp.  $d_1, d_2, \dots$ ; warmtegeleidingscoëfficiënten resp.  $\lambda_1, \lambda_2, \dots$ ):

$$Q_h = \frac{O (t_i - t_u)}{\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{1}{a}} \quad \text{kcal/h,} \quad (5)$$

waarin:  $t_i$  = temp. van de metalen plaat,

$t_u$  = temp. van de lucht,

$a$  = warmteovergangscoefficiënt van de buitenste isoleerende laag op z.g.n. stilstaande lucht.

Evenzoo levert combinatie van (2) en (4) de overeenkomstige formule voor een cilindrisch gebogen metalen plaat, geïsoleerd door isoleerende lagen in den vorm van cilindermantels (stralen der grensvlakken resp.  $r_1, r_2, \dots, r_u$ ):

$$Q_h = \frac{2 \pi l (t_i - t_u)}{\frac{e_{\log} \frac{r_2}{r_1}}{\lambda_1} + \frac{e_{\log} \frac{r_3}{r_2}}{\lambda_2} + \dots + \frac{1}{a r_u}} \quad \text{kcal/h.} \quad (6)$$

$W = W_{\text{totaal}} =$  totale warmteweerstand [h,°C/kcal] van de Haag-buis, gedefiniëerd door: het temperatuurverschil tusschen buitenzijde V.O. en buitenzijde A.O., gedeeld door het getransporteerde aantal kcal/h.

$R = R_{\text{inw.}} =$  inwendige buisweerstand [h,°C/kcal], gedefiniëerd door: het temperatuurverschil tusschen de vloeistof (damp), die het V.O. inwendig bespoelt en den damp (vloeistof), die het A.O. inwendig bespoelt, gedeeld door het getransporteerde aantal kcal/h.

$k =$  warmtedoorgangscoefficiënt (def., zie § 26).

helling = hoek met een horizontaal vlak.

Lit. = verwijzing naar het literatuuroverzicht.

De Romeinsche cijfers bij de krommen in de grafische voorstellingen corresponderen met de overeenkomstige tabelnummers.





## HOOFDSTUK I.

### INLEIDING.

#### § 2. Principe van een Haag-buis <sup>1)</sup>.

Een Haag-buis is een alzijdig gesloten, meestal buisvormige, luchtledige ruimte, waarin zich vloeistof en haar damp bevindt (zie fig. 2).

Het onderste deel V (het V.O. van de buis) wordt verwarmd door

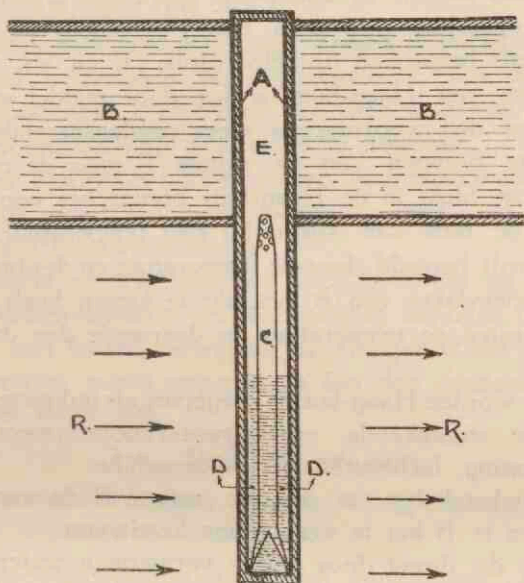


Fig. 2. Principe van een Haag-buis.

rookgassen van een vuurhaard, tengevolge waarvan de vloeistof D gaat koken. De damp condenseert in de ruimte E tegen den kouderen

<sup>1)</sup> Ned. Octrooi No. 9390: „Toestel met Perkins-buizen.”  
Ned. Octrooi No. 10689: „Circulatiepijp, die in een verdampertbuis is opgesteld.”  
Beide octrooien staan ten name van Jacobus Haag; de betreffende apparaten worden in licentie vervaardigd o.a. door de fa. Huygen & Wessel te Amersfoort.

wand A (het A O. van de buis), die op zijn beurt de condensatiewarmte afgeeft aan het te verwarmen medium in B.

Wegens de groote verdampings- en condensatiewarmte van water ligt het voor de hand als vloeistof water te gebruiken.

De buis zelf is doorgaans een naadlooze ijzeren pijp, waaraan een bodem en een deksel zijn vastgelascht. Gebruikelijke diameter der pijpen voor hoogen druk 43/51 - 49/57 mm, en voor lageren druk 46/51 - 51/57 m m.

De opstijgende damp en het afvloeiende condenswater bezitten in de buis een tegengestelde richting, waardoor de mogelijkheid bestaat, dat zij elkaar zullen hinderen, vooral bij groote calorische belasting van de buis. Om aan dit bezwaar tegemoet te komen bracht de uitvinder een nauwere, aan boven- en onderkant open, buis C aan (circulatiebuis).

In hoeverre deze buis werkzaam, nuttig of schadelijk is, wordt elders in dit proefschrift besproken (zie Hoofdstuk IV en V).

Het doel van een Haag-buis is dus, door middel van het kokend water in D en den voortdurend weer condenseerenden damp in E, warmte over te brengen van de ruimte R naar de ruimte B. Het afwezig zijn van lucht in de Haag-buis brengt het voordeel mee, dat het water in de buis kan koken bij elke temperatuur. Deze kooktemperatuur wordt bepaald door de temperatuur en de afmetingen van A.

Door de oppervlakte van A geschikt te kiezen heeft men derhalve bij bedrijfsapparaten de temperatuur en daarmede den druk in de buis in de hand.

In de praktijk worden Haag-buizen toegepast als indirecte verwarmings-elementen voor stoomketels, voedingwatervoorwarmers, ketels voor centrale verwarming, luchtverhitters en dergelijke.

Bij een stoomketel b.v. is dan de ruimte R de vuurhaard of het rookgaskanaal en is B het te verwarmen ketelwater.

Boven pijpen, die direct door het te verwarmen water worden doorstroomd (waterpijpen), bezitten Haag-elementen het voordeel, dat zich in het element zelf geen ketelsteen kan vormen, omdat steeds hetzelfde water in de buis circuleert (Lit. VIII). Alleen ter plaatse van het buitenoppervlak van A zou ketelsteenvorming kunnen plaats hebben. Hier bevinden zich echter geen sterk verhitte punten, zoodat van vastbranden van ketelsteen geen sprake kan zijn. Bovendien kan men door een doeltreffende constructie deze plaatsen toegankelijk maken voor reiniging.

### § 3. Voorloopers van de Haag-buis.

De patent-literatuur vermeldt meerdere indirecte elementen, die overeenkomst met een Haag-buis vertoonen. Zoo is op 7 Augustus 1894 openbaar gemaakt een octrooi (Lit. III), verleend aan Erwin Herz te Weenen, betreffende een verdampingstoestel met luchtledige buizen, ten deele gevuld met water.

Volgens de beschrijving (Lit. IV) werkte Herz met zeer geringe vloeistofvulling, n.l. circa  $\frac{1}{10}$  deel van den inhoud van de buis (Lit. III).

Herz had te kampen met onvoldoende koeling van de wanden van het V.O. en daardoor doorbranden van zijn pijpen, wat gezien zijn geringe vloeistofvulling te begrijpen is (zie dit proefschrift § 23).

Op 5 Mei 1915 werd een aan hem verleend octrooi, betreffende een circulatiebuis, gepubliceerd (Lit. V).

Voordien (1880) was ook reeds aan Bernhard Röber in Dresden een octrooi verleend betreffende een circulatiebuis, van ingenieuze, doch ingewikkelde, constructie. Het doel van deze buis was, dampstroom en condenswaterstroom volledig gescheiden te houden.

Naast de hier besproken buizen bestaan reeds langen tijd z.g.n. Perkins-buizen, die reeds sedert een eeuw toepassing vinden bij de verwarming van bakkersovens (heetwaterovens).

Het principieele verschil tusschen Perkins-buizen en Haag-buizen is evenwel, dat eerstgenoemde een verwarming beoogen door bespoeling van het A.O. met water, terwijl bij de Haag-buis het afgeven van de warmte doelbewust wordt opgedragen aan den condenseerenden damp en niet aan het water zelf.

### § 4. Doel der proeven.

De totale warmteweerstand van een Haag-element is samengesteld uit 7 partieele warmteweerstanden, t.w.:

- a. de warmteovergangsweerstand van rookgassen op de buitenzijde van het V.O.,
- b. de weerstand van de warmtegeleiding in het ijzer van het V.O.,
- c. de warmteovergangsweerstand V.O.  $\rightarrow$  kokend water,
- d. de weerstand bij het calorieëntransport door het water en den damp (inwendige buisweerstand),
- e. warmteovergangsweerstand condenseerende damp  $\rightarrow$  A.O.,
- f. warmteweerstand van het ijzer van het A.O.,
- g. warmteovergangsweerstand ijzer A.O.  $\rightarrow$  te verwarmen medium.



- a. De overgangscoefficiënt  $\alpha$  van rookgassen op het ijzer van het V.O. is reeds bij vroegere proeven onderzocht in een voor dat doel speciaal gebouwd gasketel, waarin zoowel een enkele Haag-buis als een bundel Haag-buizen beproefd is (Lit. VII, VIII, IX). De gevonden waarden, alsmede die, betrekking hebbende op een waterpijp onder dezelfde omstandigheden, zijn tevens getoetst aan de empirische en theoretische formules, voor dit geval opgesteld door Reiher (Lit. X), Van Iterson (Lit. XI), Nusselt (Lit. XII), en ter Linden (Lit. XIII).
- b, f. Te berekenen uit de afmetingen en de  $\lambda$  van het materiaal.
- c, g. In beide gevallen heeft men te maken met de warmteoverdracht van een metaalwand op een vloeistof, terwijl tevens de aggregatietoestand van een der media verandert. De warmteuitwisseling speelt zich hier hoofdzakelijk af in een dunne grenslaag op de aanrakingsplaats tusschen vloeistof en wand. De  $\alpha$ , die de overgedragen hoeveelheid warmte bepaalt, zal derhalve sterk afhankelijk zijn van de dikte van de grenslaag, d.w.z. van den bewegingstoestand van de vloeistof en van de gesteldheid van den wand (graad van ruwheid, kromtestraal). Voorts van een groot aantal constanten en toestandsgrootheden, zooals: soortelijke warmte,  $\lambda$ , viscositeit, dichtheid, temperatuur, druk, enz. van de warmte-uitwisselende media.
- d. De inwendige weerstand zal afhankelijk zijn van temperatuur, druk en constanten der stroomende media (vloeistof en damp) en voorts van de vormgrootheden en de helling van de buis en van den aard der inwendige circulatie. Vroegere proeven met een glazen Haag-buis (Lit. VII, VIII) hebben aangetoond, dat het koken in de buis voortdurend gepaard gaat met opslingeren van vloeistof, waardoor het A.O. bespoeld wordt. Het geheele kookverschijnsel draagt een intermitterend en explosief karakter. Er stijgen dampbellen omhoog, die grooter worden naarmate zij hooger stijgen, wegens den afnemenden hydrostatischen druk. Zulke bellen tillen vaak een groote waterkolom omhoog.

Af en toe heeft een plotseling opkoken plaats, waardoor bijna de geheele watermassa omhoog geslingerd wordt, zoodat deze met een duidelijk hoorbaren, scherp slag (vacuumslag) tegen de afsluitstop slaat.

Bij hooger dampdruk is het kookverschijnsel rustiger.

In het algemeen kookt een buis voorzien van een circulatiebuis gelijkmatiger, hoewel ook dan het opslingeren nog plaats heeft.

In hellenden stand neemt het bespoelingsverschijnsel toe; de benoedigde opvoerhoogte (van V.O. naar A.O.) is dan geringer.

Bij zeer vlakken stand van de buis ( $16^\circ$  met den horizon) heeft de bespoeling van het A.O. plaats door groote golven.

- e. De condensatie kan plaats vinden in den vorm van druppels of van een aaneengesloten waterhuidje. De snelheid, waarmede het condensaat wordt afgevoerd zal een maat zijn voor de warmte-overdracht. Ook hier zullen dus de vloeistofbeweging en de gesteldheid van den wand van grooten invloed zijn.

Noch voor de  $\alpha$ , bedoeld in de gevallen c en g, noch voor die uit e, heeft men tot op heden een algemeen geldende formule kunnen opstellen. Zoo'n formule zal rekening moeten houden met alle, bovengenoemde elementaire grootheden.

Wel zijn er empirische en theoretische formules opgesteld, geldig in een beperkt bereik en onder zeer bepaalde omstandigheden. De resultaten der verschillende onderzoekers loopen echter sterk uiteen en spreken elkaar ook meerdere malen tegen, wat betreft den invloed der maatgevende grootheden.

Voor  $\alpha_{\text{kokend water}}$  treft men in de literatuur getallen aan van ongeveer  $2000-35000 \text{ kcal/m}^2, \text{h}, ^\circ\text{C}$ .

Voor  $\alpha_{\text{condenseerende waterdamp}}$  zelfs getallen  $> 100.000 \text{ kcal/m}^2, \text{h}, ^\circ\text{C}$  (Lit. II).

In de betrekkelijk nauwe ruimte van de Haag-buis heerschen zeer bijzondere omstandigheden met betrekking tot de snelheden van vloeistof en damp en de afvoermogelijkheden van het condensaat.

A priori is dientengevolge omtrent de grootte der  $\alpha$ 's weinig op goede gronden te voorspellen. Om deze reden is dan ook een proef-

Haag-buis op ware grootte en van het in de praktijk gebezigde materiaal door mij onderzocht. Tevens zijn zoowel de invloeden van temperatuur, vulhoogte, helling en calorische belasting op de warmte-transmissie nagegaan, alsmede de invloed van het al of niet aanwezig zijn van een circulatiebuis.

In de hiernavolgende paragrafen zijn de resultaten van dit onderzoek samengevat.



## HOOFDSTUK II.

### BESCHRIJVING VAN HET PROEFAPPARAAT.

#### § 5. Samenstellende deelen.

In fig. 3 is de apparatuur schematisch aangegeven. De electricch verwarmde Haag-buis A <sup>1)</sup> geeft zijn warmte af aan den koelmantel B, waarin zich het koelwater op kooktemperatuur bevindt. De waterstand in B is af te lezen op het peilglas C. De in B ontwikkelde stoom wordt via de buis D gevoerd naar den oppervlaktecondensor E. Het gevormde condensaat verlaat den condensor via de buis F en vloeit in het condenswaterreservoir R<sub>1</sub>. Van tijd tot tijd wordt dit condenswater door openen van de kraan K<sub>1</sub> toegelaten tot het persreservoir R<sub>2</sub>, waaruit het (na sluiten van K<sub>1</sub>) met behulp van een luchtperspomp via de buis G kan worden geperst naar het hooggelegen toevoerreservoir R<sub>3</sub>. Van hieruit kan het via de buis H en het naaldventiel K<sub>2</sub> weder toegelaten worden tot den koelmantel.

Het voordeel van de aangegeven methode is, dat steeds hetzelfde water in den koelmantel B terugkeert, waardoor ketelsteenvorming tegen het A.O. van de Haag-buis wordt voorkomen, terwijl de waterstand in B bij elke calorische belasting constant gehouden kan worden door het fijn-regelbare toevoerventiel K<sub>2</sub>.

De koeling van den condensor geschiedt met behulp van regenwater uit het regenwaterreservoir R<sub>4</sub> van de eigen waterleiding van de R.H.B.S te Terneuzen, in welk gebouw de hieronder te bespreken proeven voor het grootste gedeelte hebben plaats gehad. Dit regenwater wordt via de regelkraan K<sub>4</sub> toegevoerd aan de koelspiraal in den condensor; het verlaat den condensor via het meetreservoir R<sub>5</sub>. Ter illustratie is na blz. 24 opgenomen een tweetal foto's van het proefapparaat. De hierop aangebrachte letters stemmen overeen met die van fig. 3.

<sup>1)</sup> Ter beschikking gesteld door de fa Huygen & Wessel N.V. te Amersfoort.



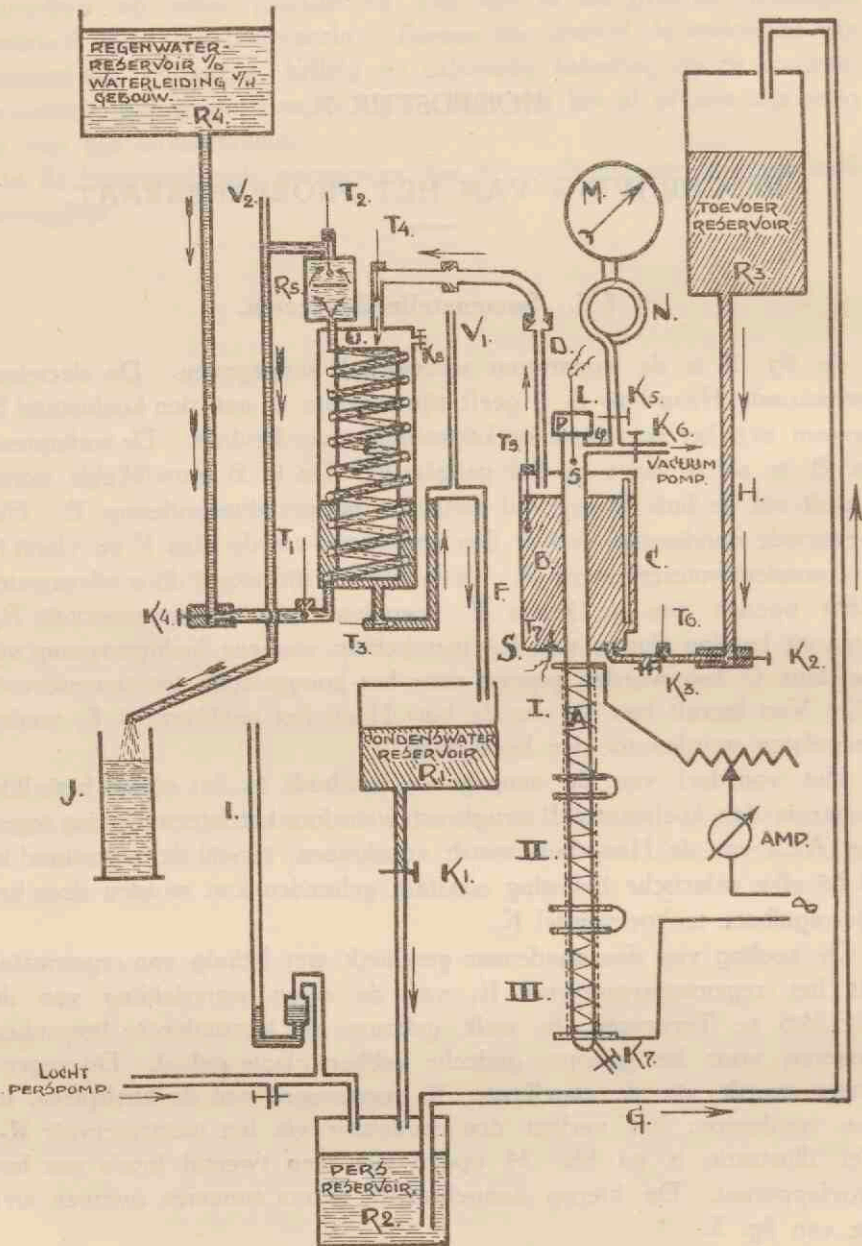


Fig. 3. Schema van de circulatie.

## § 6. De Haag-buis.

De Haag-buis (zie fig. 4) bestaat uit een naadloos getrokken vloeijzeren <sup>1)</sup> Mannesmann-buis, lengte 200 cm, uitwendige diameter 51 mm, inwendige diameter 39 mm. De groote wanddikte (6 mm) is gekozen met het oog op de aan te brengen groeven, ten behoeve van de thermo-elementen voor het meten van de oppervlaktetemperatuur van de buis. Aan de onderzijde is de buis ingetrokken en voorzien van een opening met  $\frac{1}{8}$ " gasdraad. Op resp. 419 mm, 813 mm, 1207 mm boven den bodem zijn spruitstukken aangelascht, eveneens voorzien van openingen met  $\frac{1}{8}$ " gasdraad. In de 4 genoemde openingen zijn een viertal thermo-elementen (zie § 12) geschroefd voor het meten van de temperatuur in het inwendige van de Haag-buis. Een vijfde thermo-element bevindt zich in het sluitstuk L aan het bovineinde van de buis. De afdichting van L is verkregen door een klingeritring <sup>2)</sup>, welke tegen wegblazen beveiligd is door een conisch uitgestoken rand van het cilindrische sluitstuk. Deze scherpe rand drukt den pakkingring met plaatselijk groote kracht tegen den vlakafgedraaiden bovenrand van de Haag-buis. Deze kracht wordt verkregen door een wartel P, die het sluitstuk aandrukt. Om de schroefdraad ten behoeve van dezen wartel te kunnen aanbrengen zonder wanddikteverlies werd het bovineinde van de buis tevoren opgestuikt tot 8 mm wanddikte en daarna voorzien van S.I.-draad van 9 gangen per inch. Direct onder het opgestuikte gedeelte bevindt zich een spruitstuk Q met inwendig  $\frac{1}{2}$ " gasdraad voor het T-stuk, dat de bronzen afsluiters  $K_5$  en  $K_6$  <sup>3)</sup> draagt. Door middel van  $K_5$  kan de buis verbonden worden met den manometer M. In bedrijfstoestand heeft  $K_5$  tevens tot taak den manometer tegen te groote drukverschillen te beveiligen. Door  $K_5$  slechts een weinig te openen, kunnen de heftige drukstooten, die vooral bij het experimenteren met een hoogge vulde Haag-buis ontstaan, worden gesmoord. In de krul N condenseert waterdamp, waardoor tijdens de metingen de manometer zelf practisch op kamertemperatuur blijft.

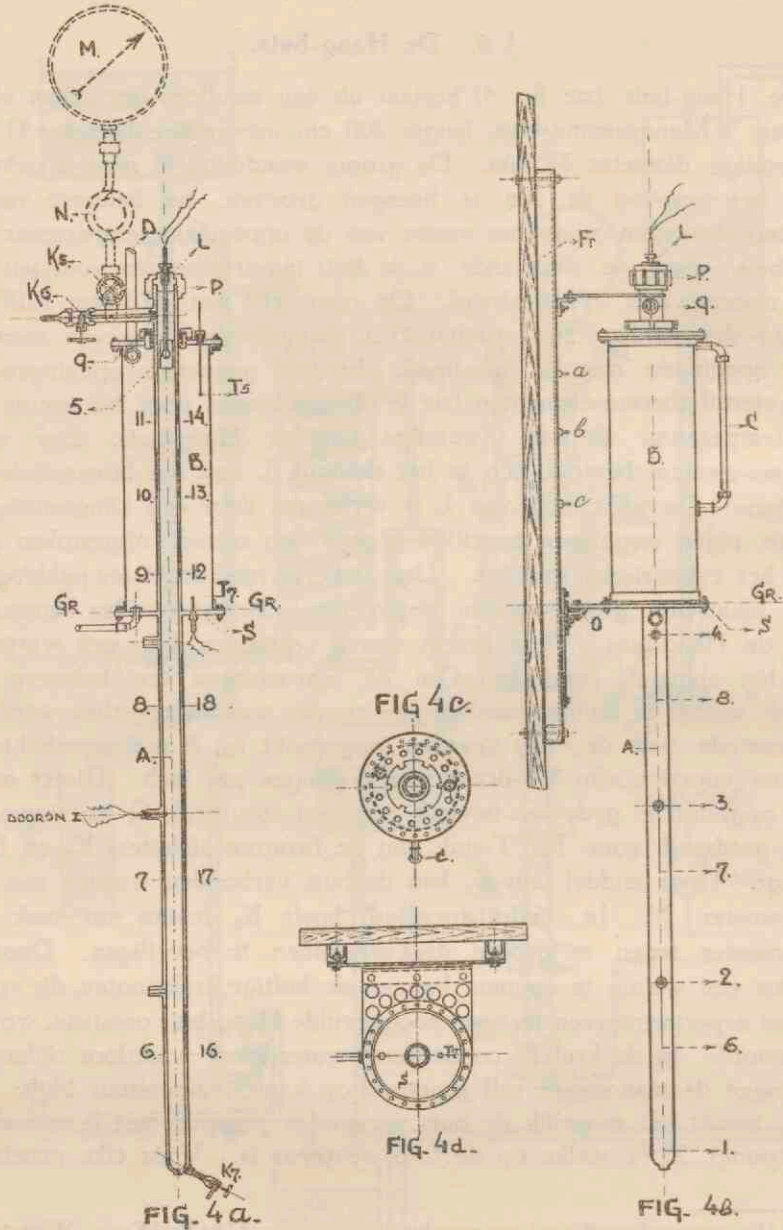
$K_6$  maakt het mogelijk de buis vacuum te pompen met de roteerende luchtpomp Z <sup>4)</sup>, welke op de foto zichtbaar is. Voór elke proefserie

<sup>1)</sup> Het materiaal wordt vaak ten onrechte „staal" genoemd (zie Paul Krais, „Werkstoffe", Band I, blz. 221 vv.).

<sup>2)</sup> Klingerit, een rubber-asbestpreparaat.

<sup>3)</sup> Schäffer und Budenberg.

<sup>4)</sup> Pfeiffer's Röntgenpumpe met olievulling.



- Fig. 4a. Lengtedoorsnede van de proefbuis.  
 Fig. 4b. Zij aanzicht van ophangframe en verticaal gemonteerde buis (a, b en c, boutjes resp. voor montage onder  $60^\circ$ ,  $45^\circ$  en  $30^\circ$ )  
 Fig. 4c. Bovenaanzicht van den mantel.  
 Fig. 4d. Doorsnede Gr - Gr.



is de Haag-buis zoo nauwkeurig mogelijk vacuum <sup>1)</sup> gepompt. De afsluiting der pakkingringen en kranen was zoodanig, dat zelfs na verloop van dagen het vacuum in de buis niet merkbaar veranderde. De Woullfische flesch X en de chloorcalciumbuis Y, beiden op de foto zichtbaar, beveiligen de olievulling van de luchtpomp tegen waterdamp.

Teneinde den waterinhoud van de buis te kunnen aftappen bevindt zich aan de onderzijde een afsluiter K<sub>7</sub>, die het mogelijk maakt ook tijdens het in bedrijf zijn van de buis de vulhoogte te wijzigen.

Op 1260 mm boven het ondereinde van de buis bevindt zich een aan de buis vastgelaschte 1 cm dikke flens S, die den koelmantel draagt en tevens als steunplaat fungeert voor het ophangen van de buis zelf.

Door middel van een aan deze flens bevestigd hoekijzer O is de buis opgehangen aan een U-ijzeren frame Fr, zoodanig dat deze den verticalen stand kan innemen en tevens monteerbaar is onder hoeken van 60° en 30° met den horizon.

Ten einde de warmtestroom van de warme buis via de flens naar het frame zoo gering mogelijk te doen zijn, zijn in de flens gaten geboord en op de ophangpunten klingeritstroken als isolatie aangebracht (fig. 4b en 4d).

### § 7. De electriche verhitting.

Om het V.O. van de buis zijn een drietal electriche, onderling volkomen gelijke verwarmingselementen aangebracht (zie fig. 3, I, II, III), bestaande uit een Brightray <sup>2)</sup>-bandwikkeling op een mica laagje van 0,5 mm dikte.

Daartoe werd voor elk element afgewogen <sup>1</sup>/<sub>10</sub> kg dunne rechthoekige micaplaatjes, welke zoo gelijkmatig en zoo strak mogelijk om de buis zijn aangebracht door plaatje voor plaatje met sterk koord vast te binden. Door volgende plaatjes de vorige gedeeltelijk te laten bedekken

<sup>1)</sup> Hierbij werd als volgt te werk gegaan: de buis wordt eerst leeggemompt; daarna wordt K<sub>5</sub> gesloten. Door K<sub>6</sub> wordt nu de gewenschte hoeveelheid gedestilleerd water toegelaten. Daarna wordt wederom gepompt tot het water in de buis bij kamertemp. flink hoorbaar kookt. Eventueel dan nog aanwezige luchtresten worden bij bedrijfstoestand van de buis nog zooveel mogelijk verwijderd door afblazen. Bij afkoeling van de buis na afloop van de proefserie bleek het vacuum steeds 0,02 à 0,03 kg/cm<sup>2</sup> te bedragen, hetgeen overeenkomt met den dampdruk van verz. waterdamp bij kamertemp.

<sup>2)</sup> Brightray, een alliage 20 % chroom, 80 % nikkel; smeltpunt 1375 °C; fabr. Henry Wiggins & Co. Ltd., Birmingham.

konden telkens koorden worden verwijderd tot ten slotte een gelijkmatig dikke mica-laag verkregen was. Daaromheen werd eerst aangebracht een doorlopende hulpwikkeling van ijzerdraad, zoodanig gespatieerd, dat daarna de verhittingsband in de openingen kon worden gelegd. Na het aanbrengen van ijzeren eindklemmen, die tevens als stroomtoe- en afvoer dienst doen, kon de hulpwikkeling worden verwijderd.

Elk element bevat 40 windingen, bandbreedte 4 mm, spatieering 3 mm, weerstand bij kamertemperatuur 8,1  $\Omega$ . De lengte tusschen de klemmen bedraagt 30 cm.

De keuze van 3 elementen maakt het mogelijk deze op het 380 V-draaistroomnet naar believen te gebruiken in serie- (op 380 of 220 V), in ster- of driehoekschakeling, waardoor een economisch gebruik bij elke gewenschte belasting wordt verkregen.

Om de elementen is als eerste warmte-isolatie aangebracht een aantal lagen asbestpapier, waarvan de binnenste waren gedrenkt in waterglas, waardoor na verhitting een steenharde mantel ontstond. Door het gebruik van waterglas werd de verhittingsband vanzelf aan dezen mantel vastgekit. Verschuiven van de windingen is hierdoor buitengesloten.

Tusschen de eerste en de tweede laag werd in elk element nog een chromel-alumel thermo-element geplaatst voor het meten van de temperatuur ter plaatse.

Verbindingen en uitsteeksels werden geïsoleerd met asbestkoord en magnesiacompositie zoodat een gladde oppervlakte werd verkregen. Om het geheele verwarmde gedeelte van de buis werd daarna een alfol<sup>1)</sup>-isolatie aangebracht, bestaande uit een spiraalsgewijs gewikkeld aluminiumfolie met lucht-tusschenruimte (wegens het groote terugkaatsend vermogen van aluminium<sup>2)</sup> fungeeren de lagen als uiterst werkzame stralingsschermen, terwijl de warmtegeleiding langs de folie te verwaarloozen is wegens de geringe dikte, n.l. 0,007 mm). Een cilindrisch gebogen aluminiumscherm, diameter 18 cm, beschermt de isolatie tegen mechanische beschadiging.

### § 8. De koelmantel.

De koelmantel (B, fig. 3 en 4), een plaatijzeren cylinder, 1 mm dik, inwendige diameter 20 cm, hoogte 58 cm, is met een loodring als

<sup>1)</sup> N.V. Int. Alfol-Mij, Amsterdam.

<sup>2)</sup> Lit. II, pag. 242.



pakking, met boutjes op de flens S gemonteerd. Op den bovenrand van deze cylinder is, eveneens met boutjes (en klingeritpakking) een ijzeren deksel bevestigd. De dichting van dit deksel om de buis blijkt uit fig. 4. Zij bestaat uit een in olie gedrenkte asbestkoordpakking, opgesloten tusschen buis en deksel, van boven afgesloten door een tweetal halve koperen ringen, aangedrukt door den wartel W. Bij de constructie van den koelmantel werd rekening gehouden met de omstandigheid, dat de samenstellende deelen verwijderd moeten kunnen worden voor het aanbrengen en uitwisselen van thermo-elementen in het A.O. van de buis.

### § 9. De condensor.

De condensor is een oppervlaktecondensor, werkend volgens het tegenstroomprincipe. De damp uit D wordt geleid in de ruimte U tusschen buiten- en binnenwand (fig. 3).

In deze ruimte bevindt zich een roodkoperen buis (15/17 mm), die tot een spiraal van 21 windingen is gewonden, uitwendig opp. 0,55 m<sup>2</sup>.

Door deze spiraal stroomt het koelwater van R<sub>4</sub> naar het meetvat J; de invoer bevindt zich aan de onder-, de uitlaat aan de bovenzijde. In- en uitlaattemperatuur worden resp. aangegeven door de thermometers T<sub>1</sub> en T<sub>2</sub>.

T<sub>2</sub> bevindt zich in het mengreservoir R<sub>5</sub>, waardoor T<sub>2</sub> een vrijwel constante aanwijzing geeft (zonder R<sub>5</sub> is deze aanwijzing aan scherpe fluctuaties onderhevig). De doorstroomsnelheid is regelbaar met de kraan K<sub>4</sub>.

Het condenswater in E wordt door de buis F naar het condenswaterreservoir R<sub>1</sub> afgevoerd. Doordat F viermaal rechthoekig omgebogen is, wordt bereikt, dat het condensaat gedurende eenigen tijd in den condensor verblijft alvorens af te vloeien en zodoende gelegenheid krijgt zijn warmte volledig aan het koelwater af te geven. De open buis V<sub>1</sub> voorkomt hevelwerking van F (een soortgelijke buis V<sub>2</sub> is in de koelwaterleiding aangebracht).

Uit het feit, dat T<sub>1</sub> en T<sub>3</sub> bij alle proeven een vrijwel gelijke temperatuur aanwijzen blijkt, dat het condensaat inderdaad volledig tot koelwaterinlaattemperatuur afkoelt.

De werking van den condensor is zeer constant. Bij het begin van een proef wordt K<sub>8</sub> geopend en zoodra de stoomontwikkeling in B begonnen is, kan K<sub>8</sub> zonder bezwaar gesloten worden; de druk in B

en E is en blijft dan practisch gelijk aan den barometerdruk, getuige de aanwijzing van de thermometers  $T_4$  en  $T_5$ .

### § 10. Hellende stand.

Om het onderzoek in hellenden stand te kunnen verrichten kan de Haag-buis onder hoeken van  $60^\circ$  en  $30^\circ$  met den horizon geplaatst worden (zie § 6). De verbinding met den vastaangebrachten condensor wordt in dien stand verkregen door buigzame, van wartels voorziene looden buizen, welke in D kunnen worden ingelascht.

### § 11. Warmte-isolatie.

Voor de isolatie van het V.O. zijn gebezigd de temperatuurbestendige isolatiemiddelen asbest, magnesiacompositie en alfol (§ 7).

De overige tegen warmteverlies te beschermen gedeelten bevinden zich alle op veel lagere temperatuur; hiervoor kan derhalve met voordeel gebruik gemaakt worden van de meer effectieve isolatiemiddelen wolvilt en grijze watten. Koelmantel, verbindingsbuis, condensor en  $R_5$  zijn eerst omgeven door een laag wolvilt, daarna door eenige lagen watten en als deklaag wederom door een laag vilt; de kranen  $K_5$  en  $K_6$  (zie foto) zijn voorzien van gemakkelijk afneembare viltdeksels.

Deugdelijke isolatie van bovengenoemde gedeelten is geboden, omdat bij de proeven de calorische belasting van de Haag-buis gemeten wordt via de warmte-opname van het koelwater in den condensor. De warmte-isolatie van het V.O. heeft uitsluitend ten doel een zoo groot mogelijk gedeelte van de electrisch toegevoerde energie door den wand van de Haag-buis te zenden.

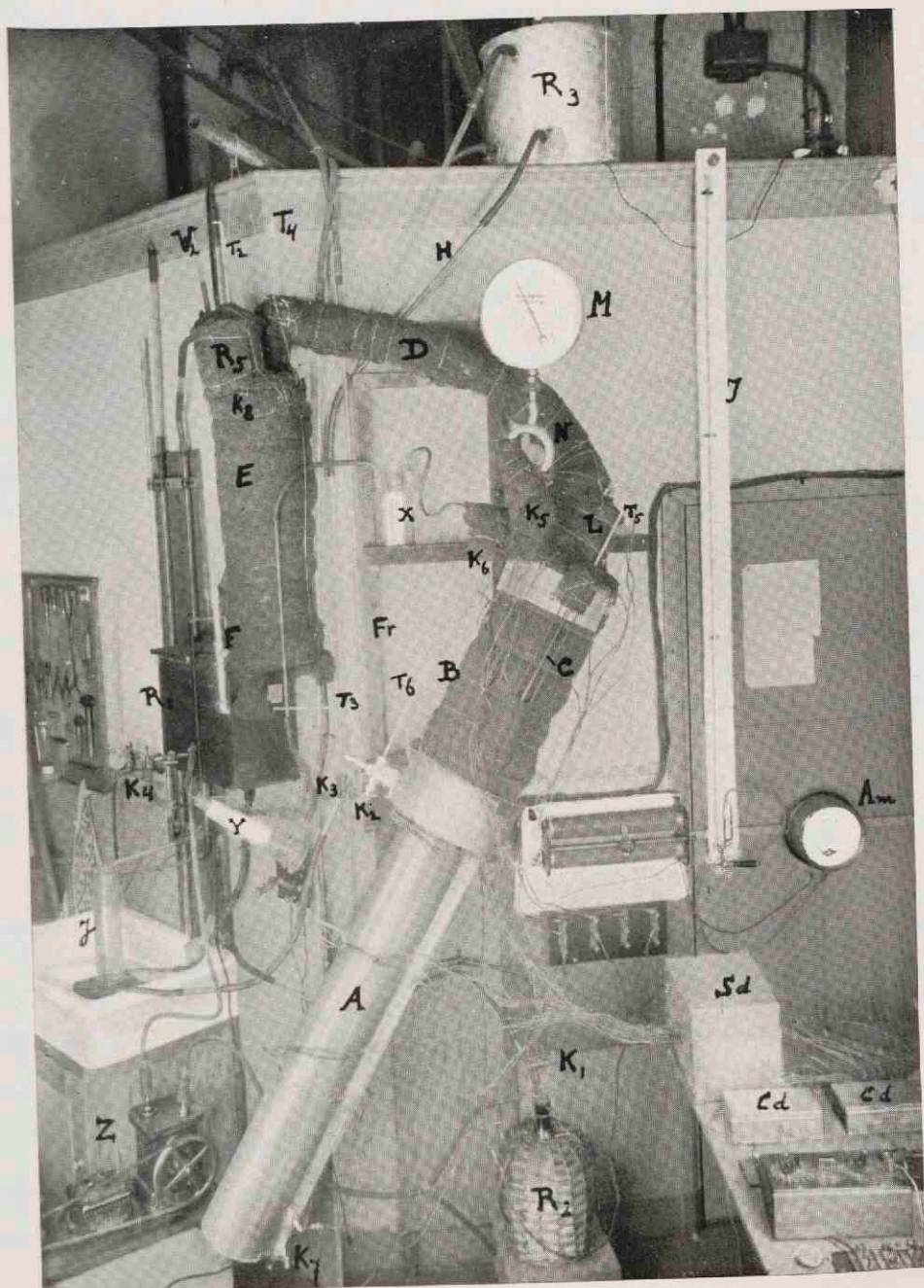
### § 12. De meting van de temperatuur.

De temperaturen van het koelsysteem en de calorische meetinrichting zijn allen gemeten met kwikthermometers (fig. 3,  $T_1$  t/m  $T_6$ ); alleen de temperatuur op 34 mm boven den bodem van den koelmantel nabij den invoer, is langs thermo-electrischen weg gemeten ( $T_7$ ).

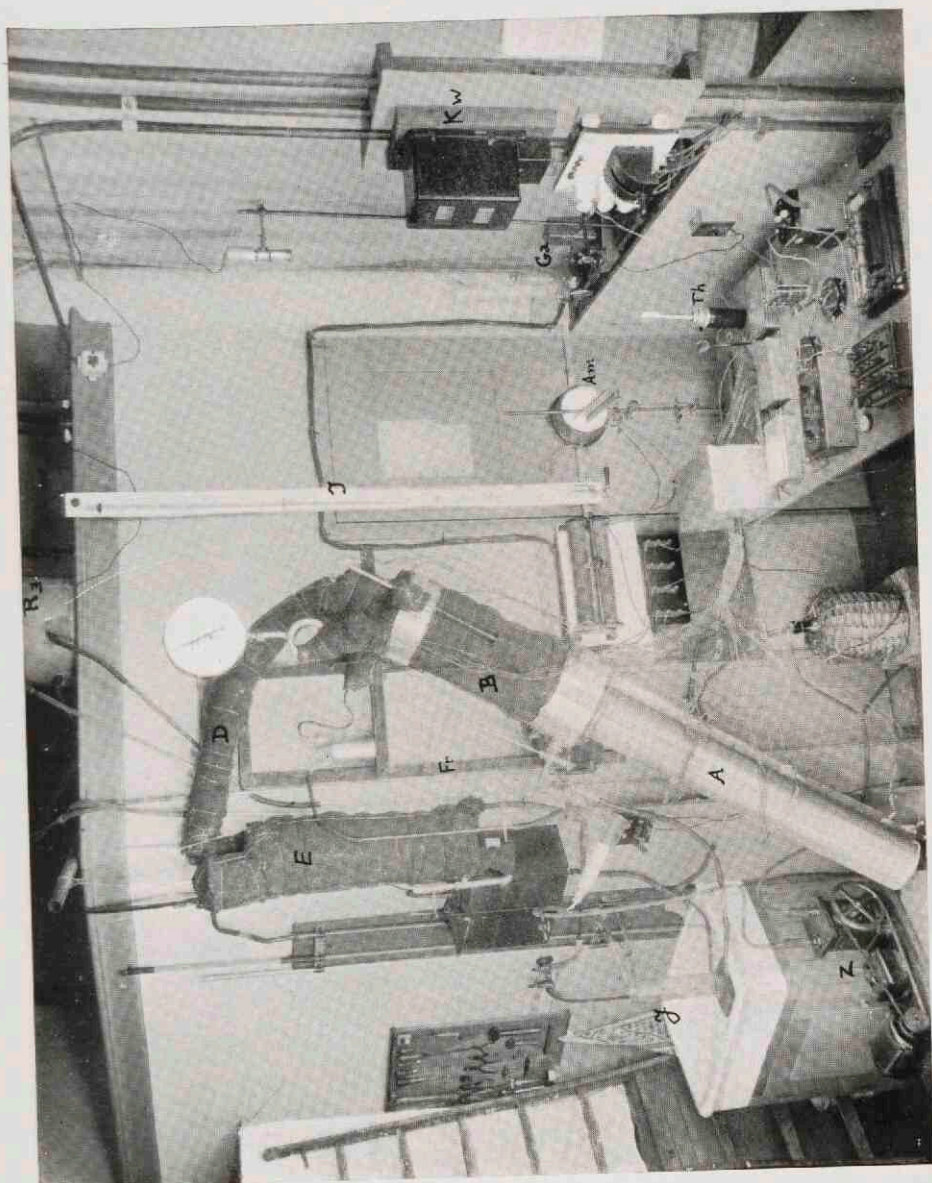
Voor laatstgenoemde meetplaats en trouwens ook voor alle overige (zoowel in het inwendige als in den wand van de Haag-buis) zijn constantaan-ijzer thermo-elementen gebezigd.

Deze thermo-elementen zijn vervaardigd uit constantaandraad, diameter 0,4 mm, en tevoren uitgegloeid ijzerdraad, diameter 0,3 mm. Beide





Proefbuis gemonteerd onder  $60^\circ$  ( $1/20 \times$  de ware grootte)



Overzicht van de opstelling (Haag-buis gemonteerd onder 60°)



draden zijn op homogeniteit onderzocht; van het ijzerdraad zijn alleen die stukken gebruikt, die na gloeien geen parasitaire thermokrachten vertoonden <sup>1)</sup>.

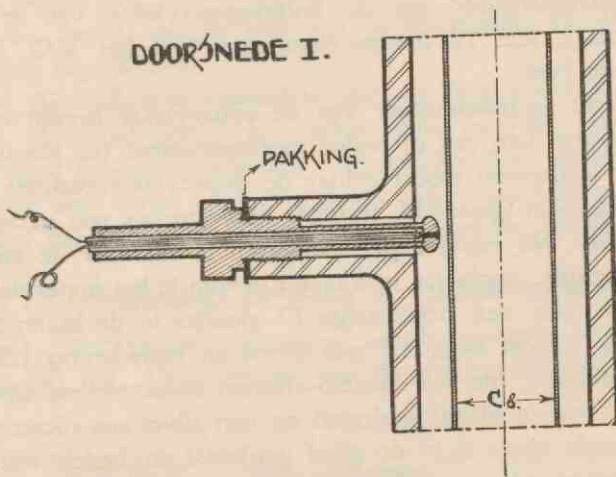


Fig. 5. Situatie bij een schroef-element (verticale doorsnede bij doorsn. I, fig. 4a).

De temperatuur in het inwendige van de Haag-buis wordt gemeten met een vijftal thermo-elementen (in fig. 4 genummerd 1 t/m 5), waarvan de constructie blijkt uit fig. 5. De thermo-elementen 1 t/m 4 zijn geschroefd in de spruitstukken van den buiswand (§ 6) en hun lengte is zoodanig gekozen, dat de contactplaats juist gelegen is in de cilindrische Haag-buisruimte. Deze contactplaats is hardgesoldeerd in een doorlopende boring van het verdikte rechteruiteinde bevestigd. Door de dunne steel is de warmtegeleiding van de warmere V.O.-wand naar de contactplaats gering, terwijl het vergrootte oppervlak van de verdikking een goed warmtecontact met de vloeistof verzekert <sup>2)</sup>.

De constantaan- en de ijzerdraad, elk geïsoleerd door een dunwandig uitgetrokken glazen buisje, treden door de 3 mm wijde boring naar buiten.

Het vijfde thermo-element heeft tot taak de damptemperatuur te meten in het bovineinde van de buis. Het is daartoe (met behulp van een langere steel) verschuifbaar aangebracht in het sluitstuk L van de kop

<sup>1)</sup> Kohlrausch, Lehrbuch der praktischen Physik, 13. Auflage, s. 150.

<sup>2)</sup> Meetfout door geleiding  $< 0,01$  °C bij de hoogst gebruikte belasting.

en omgeven door een cilindrisch nikkelen stralingsschermpje om uitstraling naar den kouderen A.O.-wand te voorkomen.

De wandtemperatuur aan de buitenoppervlakte van de Haag-buis wordt gemeten met 12 thermo-elementen, 6 in het V.O. en 6 in het A.O. van de buis.

Meting van de temperatuur van de oppervlakte brengt noodzakelijk het aanbrengen van een of ander meetinstrument ter plaatse met zich mede. Dit instrument stoort echter de oppervlaktecondities ter plaatse. Er moet dus naar gestreefd worden, deze storing zoo gering mogelijk te doen zijn. Na eenig experimenteren is hiervoor de methode van thermo-elementen, geplaatst in kleine groeven in het oppervlak, gekozen. Hiertoe zijn met een cirkelzaagje 12 gleufjes in de buitenoppervlakte gezaagd, elk 12 cm lang, 1,7 mm breed en nauwkeurig 1,3 mm diep. De beide draden, die het thermo-element samenstellen, zijn over een lengte van 1 cm in elkaar gedraaid en met zilver aan elkaar gesoldeerd. Dit gesoldeerde einde is in de gleuf geplaatst en, bedekt met een stripje ijzer van buiswandsamenstelling, met zoo weinig mogelijk zilver in de groef vastgesoldeerd. Hierna is de buiswand ter plaatse van de lasch uitwendig glad gemaakt. Bij doorzagen van enkele proefwerkstukken is gebleken, dat de contactplaats op 0,5 mm boven den bodem van de groef en derhalve op 0,8 mm onder de oppervlakte gelegen is.

De contactplaatsen van de 6 thermo-elementen in het oppervlak van het V.O. zijn gelegen onder het mica van de verhittingswikkeling (§ 7), onder elk element 2, op 10 cm afstand van den bovenrand van het element.

De door een glazen capillair geïsoleerde constantaandraad en de geoxydeerde ijzerdraad liggen beide over een afstand van ca. 11 cm in de groef, alvorens zij naar buiten worden gevoerd. Beide draden zijn derhalve over deze lengte op buiswandtemperatuur, waardoor afkoeling van de contactplaats door warmtegeleiding langs de draden wordt voorkomen.

De 6 thermo-elementen van het V.O. zijn aangeduid door de nummers, 6, 16, 7, 17, 8, 18.

6 en 16 bevinden zich onder het onderste, 7 en 17 onder het middelste, 8 en 18 onder het bovenste element, zoodanig dat bij hellenden stand van de Haag-buis de meetplaatsen 6, 7 en 8 aan de bovenzijde, 16, 17 en 18 aan de onderzijde liggen (zie fig. 20).

De contactplaatsen van de 6 thermo-elementen 9, 12, 10, 13, 11, 14 in het A.O. van de buis liggen eveneens twee aan twee diametraal tegenover elkaar; 9 en 12, 10 en 13, 11 en 14 resp. op 8 cm, 25 cm en 42 cm boven den bodem van den koelmantel. 9, 10 en 11 liggen bij hellenden stand van de buis aan de bovenzijde, 12, 13 en 14 aan de onderzijde (fig. 20).

Ook bij deze thermo-elementen zijn de draden over 10 cm lengte langs den buiswand geleid; hier echter over de volle lengte vochtvrij gehouden door rubberventielslang. Zij worden door middel van looden buisjes door het water van den koelmantel naar buiten gevoerd via gaten in het deksel, afgedicht met rubberstopjes en wartels.

### § 13. Schakeling en ijking der thermo-elementen.

De e.m.k. der thermo-elementen wordt gemeten in compensatieschakeling (fig. 6). Door middel van de contactendoos Cd kunnen de

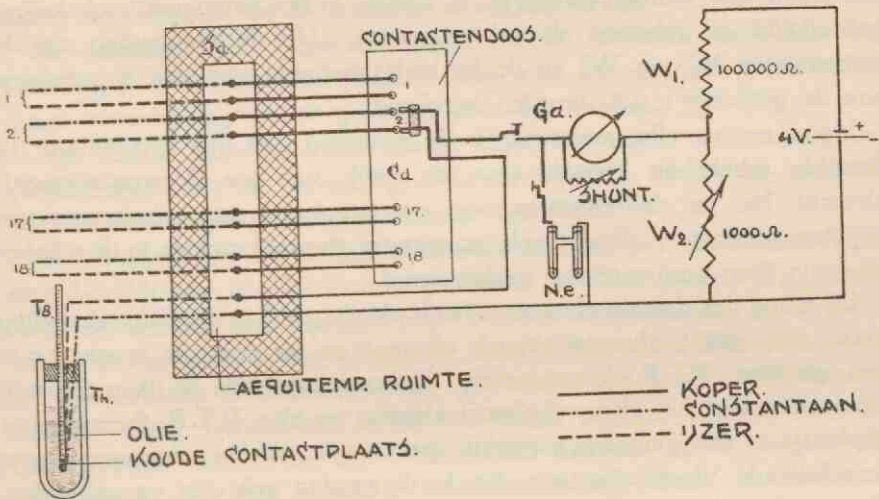


Fig. 6. Schakeling der thermo-elementen.

18 thermo-elementen op en in de Haag-buis met de gemeenschappelijke koude contactplaats worden verbonden. Deze laatste bevindt zich in een thermosflesch  $T_h$ , gevuld met olie. De temperatuur van de koude contactplaats kan worden afgelezen op den geijkten thermometer  $T_8$ , tegen welks kwikvat deze contactplaats is vastgebonden. Gebruik



makend van de eigenschap, dat tusschengeschakelde metalen de thermo-electromotorische kracht niet storen mits de betreffende contactplaatsen zich op dezelfde temperatuur bevinden, zijn alle constantaan- en ijzerdraden eerst gevoerd naar een dubbelwandige, als ruimte van gelijke temperatuur fungerende doos Sd, en in deze doos verbonden met koperdraden. De buitenwand van de doos is van aluminium vervaardigd, waardoor ca. 95 % van event. opvallende warmtestraling (Haag-buis) wordt teruggekaatst. De binnenwand is een blikken doos, van binnen dofzwart gelakt. In deze binnendoos, die de eigenlijke equitemperatuuruimte vormt, bevinden zich de bovengenoemde contactplaatsen. Deze zijn met elkaar en met den zwarten dooswand in stralingsevenwicht. De ruimte tusschen buiten- en binnenwand is met watten opgevuld.

De overige deelen van de schakeling bestaan uit een vasten weerstand  $W_1$  van 100.000  $\Omega$ , een regelbare weerstandsbank  $W_2$  tot 1000  $\Omega$ , een accumulator en een draaispoel-galvanometer Ga (volgens Moll). Deze draaispoel-galvanometer, waarvan de gevoeligheid met behulp van een shunt kan worden geregeld, is, zooals in een compensatieschakeling gebruikelijk is, gebezigd als nul-instrument. Uit de verhouding van de weerstanden  $W_1$  en  $W_2$  en de bekende spanning van den accumulator kan de gezochte e.m.k. worden berekend.

Vóór en na elke meetreeks is de spanning van den accumulator in dezelfde schakeling bepaald t.o.v. de e.m.k. van een Weston-normalelement Ne en daarenboven nog gecontroleerd met behulp van een geijkten voltmeter. Eventuele parasitaire thermokrachten in de schakeling zijn door commuteeren geëlimineerd.

De ijking der thermo-elementen heeft plaats gehad in dezelfde schakeling t.o.v. een geijkt chromel-alumel element en ter controle tevens t.o.v. een geijkten P.T.R.-thermometer. Daartoe zijn alle te ijken thermo-elementen met het chromel-alumel element en den P.T.R.-thermometer geplaatst in een gemeenschappelijk ijzeren vat, waarin achtereenvolgens verschillende vloeistoffen aan den kook werden gebracht en gehouden. Zoo is bij de resp. kookpunten dier vloeistoffen de e.m.k. van alle thermo-elementen bepaald.

De schroef-elementen (fig. 5) waren daarbij in den wand van het ijzeren vat geschroefd op volkomen gelijke wijze als bij gebruik in de Haag-buis.

Alle thermo-elementen zijn voor het aanbrengeen in de Haag-buis geijkt en na afloop der proeven wederom geijkt. Hun aanwijzingen verschilden



in beide gevallen en onderling minder dan  $1/4$  0/0, zoodat met één ijkingskromme kon worden volstaan.

Bij het uitwerken der meetresultaten is voorts met voordeel gebruik gemaakt van de door W. Koch aangegeven t/e-methode <sup>1)</sup>.

#### § 14. De bepaling van de calorische belasting.

De warmtestroom, die door den wand van het V.O. op het kokende water in de Haag-buis overgaat, wordt (afgezien van enkele in § 18 nader berekende verliezen) overgedragen aan het water in den koelmantel, waar een equivalente hoeveelheid water van inlaattemperatuur tot ca. 100 °C wordt verwarmd en vervolgens verdampt. De opgenomen warmte wordt vervolgens in den condensor afgestaan aan het koelwater, dat door de spiraal stroomt. De warmte-opname van dit koelwater is eenvoudig te berekenen uit de snelheid waarmee het water doorstroomt en de temperatuurstijging ervan.

De snelheid van doorstroming wordt bepaald door den tijd, benodigd voor het volstromen van een litermaatglas J, terwijl de temperatuurstijging wordt gegeven door het verschil  $T_2 - T_1$ .

Het aantal calorieën opgenomen door het water in de koelspiraal vermeerderd met de afkoelingsverliezen van E, D en B levert de warmtestroom, die gepasseerd is door het A.O.

In het algemeen zal de uitlaattemperatuur van het condenswater ( $T_3$ ) niet dezelfde zijn als de inlaattemperatuur van den mantel ( $T_6$ ), zoodat voor dit verschil een correctie moet worden aangebracht. Ter bepaling van deze correctie is het noodig de hoeveelheid condenswater te weten, die per uur den condensor verlaat (en weder den koelmantel B binnentreedt). Deze hoeveelheid is bij een aantal proeven bepaald door het condenswater uit F in een afzonderlijk meetvat op te vangen. Bij vergelijking met het calorisch transport bleek steeds, dat practisch droge stoom door de buis D moest zijn gepasseerd.

<sup>1)</sup> Forschung 1931, Bd. 2, Nr. 8, pag. 302.

In plaats van de thermo-electromotorische kracht  $e$  grafisch uit te zetten tegen de temperatuur  $t$ , zet Koch eerst het quotiënt  $t/e$  uit tegen  $t$ . Aangezien  $e$  ongeveer rechtvenredig is met  $t$ , verloopt het quotiënt slechts weinig. Eventuele onnauwkeurigheden in de waarneming vallen zodoende direct op. Uit de  $t/e$ -curve, waarvoor slechts weinig punten noodig zijn, kan men nu een nauwkeurige grafische voorstelling van  $e$  als functie van de temperatuur verkrijgen.

### § 15. De dampdrukmeting.

Gebruikt zijn 2 manometers <sup>1)</sup>, één voor het gebied  $-1$  tot  $10$  atü en één voor het gebied  $0$  tot  $100$  atü.

Beide meters hebben een schaaldiameter van  $26$  cm <sup>2)</sup>. Zij geven den overdruk aan t.o.v. den atmosferischen druk. Gecorrigeerd is steeds voor het gewicht van de waterkolom in de krul N. De luchtdruk is afgelezen op een kwikbarometer (voor de temperatuur wordt gecorrigeerd).

### § 16. Overige meetinstrumenten.

Behalve de in den condensor afgegeven hoeveelheid warmte is ter controle ook steeds waargenomen de toegevoerde elektrische energie (afgelezen op een geijkte kilowattuurmeter Kw). Deze controle is noodig voor het opmaken van de warmtebalans, immers, de afgegeven hoeveelheid warmte, vermeerderd met de berekende afkoelingsverliezen moet de toegevoerde energie opleveren.

De ampèremeter Am is eveneens een controle-instrument.

De open manometer I geeft den druk aan, waarmede de perspomp Z het water uit  $R_2$  oppompt naar  $R_3$ .

1) Geijkt in het Laboratorium voor Thermodynamica te Amsterdam, waarvoor op deze plaats gaarne dank wordt betuigd.

2) Mano-Vacuummesser für Feinmessungen; fabr. Schäffer und Budenberg.

## HOOFDSTUK III.

### DE HAAG-BUIS IN VERTICALEN STAND ZONDER CIRCULATIEBUIS.

#### § 17. Methode van onderzoek.

Als basis van het onderzoek is gekozen de Haag-buis zonder circulatiebuis in verticalen stand. In dezen toestand is de buis onderzocht bij 2 vaste calorische belastingen, verkregen door de 3 verhittingswickelingen in serie, zonder voorschakelweerstand, aan te sluiten resp. op 380 en 220 Volt. De resultaten dezer metingen bij verschillende vulhoogten van de Haag-buis zijn vermeld in de tabellen I en III. Onder vulhoogte wordt verstaan de hoogte van den waterspiegel in het inwendige van de buis bij kamertemperatuur <sup>1)</sup>.

Ten einde de reproduceerbaarheid der metingen te controleeren zijn telkens bepaalde proeven uit bovengenoemde reeksen herhaald; deze controlemetingen zijn mede in de tabellen I en III opgenomen. Zij zijn geenszins overbodig, want de literatuur vermeldt meerdere gevallen van scherp veranderende  $a$ 's met den tijd.

Zoo vonden b.v. Kirschbaum, Kranz en Starck (Lit. XIV, Lit. XV) bij hun onderzoek over de  $a$  van condenseerenden stoom tegen den buitenwand van een verticale koperen pijp aanvankelijk een ca. 3 maal zoo groote waarde voor  $a$  als uit de theorie van Nusselt volgt (Lit. XVI). Later echter een waarde, die slechts 0,8 tot 2 maal zoo groot was. Bij onderzoek bleek hun, dat zich op den buitenwand een dunne, nauwelijks zichtbare aanslag had gevormd.

Met het oog op deze mogelijke oppervlakteveranderingen is de toestand van de proefbuis voortdurend nauwkeurig gadeslagen.

Bij het in bedrijf stellen van de buis voor de hieronder te bespreken proeven, bleek de binnenwand bedekt te zijn met een weinig fijn zwart poeder. Dit poeder (ijzercarbide) is door borstelen verwijderd. Na het beëindigen der experimenten bleek wederom eenig poeder aanwezig te zijn. Blijkbaar hindert het de warmteoverdracht niet noemenswaard, want de op zeer verschillende tijdstippen genomen proeven uit de tabellen I en III

<sup>1)</sup> Ter vergelijking zij vermeld, dat  $100 \text{ cm}^3$  van  $4^\circ \text{C} = 104,3 \text{ cm}^3$  bij  $100^\circ \text{C}$   
 $= 115,9 \text{ cm}^3$  bij  $200^\circ \text{C}$ .



leveren alle goed reproduceerbare waarden. Ernstige oppervlakteveranderingen in het inwendige van een Haag-buis zijn ook niet waarschijnlijk, gezien het feit, dat hierin voortdurend, onder uitsluiting van de buitenlucht, hetzelfde water circuleert.

De buitenwand heeft geen speciale behandeling ondergaan. Bij het monteren van de buis is hij gereinigd met een ijzerborstel.

### § 18. **Bewerking der meetresultaten.**

Zooals uit het volgende blijken zal, moeten voor de praktische toepassing der Haag-buizen de middelbare vulhoogten (watervulling omstreeks  $\frac{1}{3}$  van den totalen buisinhoud) als het normale geval worden beschouwd. Om deze reden is als voorbeeld van bewerking der waarnemingen gekozen proef no. 9 uit tabel I (vulhoogte 75 cm).

#### *Proef no. 9.*

De gemeten thermo-electromotorische krachten der thermo-elementen op de meetplaatsen 1 t/m 18 zijn, omgerekend in graden Celsius, in kolom 9 van tabel I vermeld. De temperaturen op de diametraal gelegen meetplaatsen van V.O. en A.O. zijn daarbij paarsgewijze gegroepeerd.

Behalve de genoemde temperaturen 1 t/m 18 waren de waarnemingen nog de volgende:

$$T_1 = \text{koelwaterinlaattemp.} = 20,3 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$T_2 = \text{koelwateruitlaattemp.} = 51,4 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$T_3 = \text{condensoruitlaattemp.} = 20,5 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$T_4 = \text{damptemp.} = 100,4 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$T_5 = \text{manteltemp.} = 101,1 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$T_6 = \text{mantelinlaattemp.} = 22,9 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$\text{kamertemp.} = 22 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$\text{temp. na 1e asbestlaag van het onderste element} = 531 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$\text{temp. na 1e asbestlaag van het middelste element} = 574 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$\text{temp. na 1e asbestlaag van het bovenste element} = 569 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$\text{doorstroomsnelheid van het koelwater} 141,2 \text{ l/h},$$

$$\text{electrisch toegevoerd} 5,75 \text{ kw} = 4950 \text{ kcal/h},$$

$$\text{stroomsterkte} 14,78 \text{ Amp. } ^1),$$

$$\text{atü } 1,45^5 \text{ kg/cm}^2,$$

$$\text{B.S. } 769 \text{ mm (gecorr.)}.$$

<sup>1)</sup> Spanning 380 Volt + eenige procenten overspanning wegens den geringen afstand tot het transformatorhuis van de P.Z.E.M.



Uit deze waarden volgt:

*Calorische belasting:*

Opgenomen door het koelwater in den condensor:

$$141,2 \times 31,1 = 4391 \text{ kcal/h}$$

condenswater 7,1 l/h,

dus af voor correctie temp.verschil  $T_6 - T_3$ :  $7,1 \times 2,4 = 17 \text{ kcal/h}$

blijft derhalve: 4374 kcal/h.

Hierbij moeten worden opgeteld de calorïën, die via de isolatie zijn afgegeven aan de buitenlucht. Deze zijn te berekenen met behulp van de formules (5) en (6) van § 1:

warmteverlies van den condensor	32 kcal/h
" " van het meetvat $R_5$	2 kcal/h
" " van de verbindingspijp	22 kcal/h
" " van den mantel	63 kcal/h
" " door steunplaat, peilglas	28 kcal/h
" " door meetdraden, loodbuisjes	2 kcal/h

in totaal gegaan door A.O.: 4523 kcal/h

verliezen van buiskop, kranenstelsel en manometerleiding 47 kcal/h

in totaal gegaan door V.O.: 4570 kcal/h.

*Warmtebalans:*

Uit de gemeten temperaturen tusschen 1e en 2e asbestlaag van de isolatie der verhittingswikkelingen kan ter controle een schatting gemaakt worden van het verlies door de asbest-alfol-isolatie:

gemiddelde temp. = 558 °C,

2e asbestlaag  $r = 29 \text{ mm}$ ,

buitenste asbestlaag  $r = 34 \text{ mm}$ ,

aluminiumschem  $r = 90 \text{ mm}$ ,

$l = 1300 \text{ mm}$ ,

$\lambda$  asbest-waterglass 0,3 [kcal/m,h,°C] bij  $t = 547 \text{ °C}$  gem.,

$\lambda$  alfol 0,08 [kcal/m,h,°C] bij  $t = 294 \text{ °C}$  gem.,

$\alpha$  (lucht) 15 [kcal/m<sup>2</sup>,h,°C].

Formule (6) levert:

warmteverlies cilindrisch deel . . . . . 326 kcal/h

warmteverlies eindvlakken, uitsteeksels . . . . . 54 kcal/h

totale V. O.-verlies: 380 kcal/h.

De warmtebalans luidt derhalve:

electrisch toegevoerd	4950 kcal/h	opgenomen in	
V. O.-verlies	380 kcal/h	condensor	4391 kcal/h
gegaan door V. O.:	4570 kcal/h	( $T_6 - T_3$ )-correctie	17 kcal/h
		opname:	4374 kcal/h
		warmteverlies	
		koelcircuit	149 kcal/h
		$Q_A =$	4523 kcal/h
		warmteverlies	
		buiskop, enz.	47 kcal/h
		gegaan door	
		V. O.:	$Q_1 = 4570$ kcal/h.

*Ijzergeleiding V. O.  $\rightarrow$  A. O.*

Deze vormt een bedrag, dat verwaarloosd kan worden.

De afstand van den bovenrand van het bovenste element tot de steunplaat bedraagt 8 cm, de temp. gemeten bij 8 en 18 gem. 138,4 °C, de temp. gemeten bij 9 en 12 gem. 112,6 °C. De temp. bij de steunplaat zal door geleiding lager zijn dan 112,6 °C; rekenen wij overdreven laag door aan te nemen, dat de temp. van de steunplaat bij de lasch-plaats = temp. water = 101 °C, dus  $\Delta t = 37,4$  °C.

Met deze overdreven waarde komt er voor den warmtestroom door het ijzer 19,6 kcal/h, waarvan een gedeelte zijdelings afgegeven zal worden aan het water in de buis en aan de isolatie.

*Calorische belasting van het A. O.*

Niet de geheele  $Q_A = 4523$  kcal/h gaat transversaal door den A. O.-wand, die door het water in B wordt bespoeld. Een fractie (50 kcal/h) zal via de steunplaat op dit water overgaan; een ander deel (12 kcal/h) via de schroefpakking van het deksel van den mantel.

Het waterpeil in B is bij alle proeven op 50 cm gehouden. Van het A. O. rest derhalve boven den waterspiegel een stuk ter lengte van 8 cm, dat door damp en eventueel opkokend water wordt bespoeld. Ten einde de overdracht door dit gedeelte gering te maken (10 kcal/h) is dit 8 cm lange stuk omgeven door een klingerit-isolatie, op zijn

plaats gehouden door een ijzerdraadomwikkeling. Derhalve gaat transversaal door den watergekoelden A. O.-wand:

$$Q_2 = 4523 - 72 = 4451 \text{ kcal/h}^1).$$

### Calorische belasting van het V. O. Inductie.

Door het V. O. zijn transversaal  $Q_1 = 4570 \text{ kcal/h}$  gegaan.

Een fractie hiervan, n.l. de door inductie overgebrachte energie, zal niet de volle wanddikte doorkruist hebben, doch slechts een gedeelte daarvan. Het door wervelstromen geïnduceerde bedrag is te berekenen uit het aantal ampère-windingen (waardoor de veldsterkte  $H$  bekend is). Uitgaande van de betrekking dat  $E = -\frac{dN}{dt}$  is, komt men voor een ring van  $l$  cm hoogte, dikte  $dx$  tot:

$$A_x = 16 \pi \frac{f^2}{\varrho} c^2 \mu^2 H^2 \left( x^3 - 2xr_0^2 + \frac{r_0^4}{x} \right) 10^{-16} dx \quad \text{Watt,}$$

waarin:  $f$  = vormfactor van den stroom,  
 $c$  = frequentie,  
 $\varrho$  = soortelijke weerstand van het ijzer,  
 $\mu$  = permeabiliteit,  
 $H$  = effectieve veldsterkte,  
 $x$  = straal van den beschouwden ring,  
 $r_0$  = inwendige straal van de buis;

derhalve voor de geheele buis per cm lengte tot:

$$A = \frac{16 \pi c^2 f^2 \mu^2 H^2 10^{-16}}{\varrho} \int_{r_0}^{r_1} \left( x^3 - 2xr_0^2 + \frac{r_0^4}{x} \right) dx \quad \text{Watt,}$$

waarin  $r_1$  = uitwendige straal van de buis.

Hierbij moet de ontwikkelde hysteresiswarmte worden opgeteld.

Omdat  $\mu$  van het betreffende materiaal niet nauwkeurig bekend is, schuilt in de becijfering een groote onzekerheid. Wel is uit de formule voor  $A_x$  af te leiden, dat de door de wervelstromen geïnduceerde warmtehoeveelheid voor een belangrijk deel aan den rand wordt ontwikkeld en derhalve de buiswand toch bijna geheel doorkruisen moet om het kokende water te bereiken.

Wegens de bovengenoemde onzekerheid is de voorkeur gegeven aan de proefondervindelijke bepaling van de geïnduceerde hoeveelheid (uit een verschilmeting).

<sup>1)</sup> In de tabellen zijn de Q-waarden op veelvoud van 5 afgerond.

Daartoe is tevoren de weerstand van de wikkeling bij verschillende gelijkstroombelastingen bepaald door nauwkeurige meting van stroomsterkte en spanning.

Deze bedroeg bij 14,78 Amp. 25,95  $\Omega$ ; dus is de ontwikkelde stroomwarmte in den verhittingsband zelf:  $0,24 i^2 r t = 4898$  kcal/h.

Electrisch toegevoerd in totaal: 4950 kcal/h; derhalve overgebracht door inductie:  $4950 - 4898 = 52$  kcal/h, hetgeen dus slechts ca. 1% van het hoofdbedrag is.

Mede in verband met het boven opgemerkte is derhalve bij de berekening van het temperatuurverval in het ijzer, aangenomen dat  $Q_1 = 4570$  kcal/h, het geheele ijzertraject doorkruist.

Dat de hierdoor gemaakte fout te verwaarloozen is, blijkt bovendien uit de grafische voorstellingen van fig. 12, waar een aantal resultaten van proeven met gelijkstroombelasting en wisselstroombelasting in één figuur zijn samengevat.

#### *Berekening van het temperatuurverval in het ijzer.*

$$\begin{aligned} \text{Afmetingen: } r_i &= 19,5 \times 10^{-3} \text{ m,} \\ r_u &= 24,7 \times 10^{-3} \text{ m (zie § 12),} \\ l &= 0,9 \text{ m bij het V.O.,} \\ l &= 0,5 \text{ m bij het A.O.} \end{aligned}$$

Voor het V.O. levert formule (3) dan bij  $Q_1 = 4570$  kcal/h, een temp.verval:

$$\Delta t = \frac{Q_1}{2 \pi l \lambda} e \log \frac{r_u}{r_i} = 3,77 \text{ }^\circ\text{C,}$$

waarbij de  $\lambda$  van het vloeijzer van de Haag-buis <sup>1)</sup> is ontleend aan Landolt-Börnstein, Physik. Chem. Tabellen. Deze warmtegeleidingscoëfficiënt neemt bij toenemende temperatuur nagenoeg lineair af van  $\lambda = 51,2$  bij 100  $^\circ\text{C}$  tot  $\lambda = 48,4$  bij 300  $^\circ\text{C}$ .

Voor het A.O. komt men op analoge wijze tot:

$$\Delta t = 6,56 \text{ }^\circ\text{C bij } Q_2 = 4450 \text{ kcal/h.}$$

<sup>1)</sup> Het materiaal bevat volgens chemische analyse Fe, C, Mn en sporen Si; geen wolfram. Koolstofgehalte ca. 0,09%.



*Berekening  $a$ 's (V.O.).*

Om de plaatselijke  $a$ 's van het V.O. te berekenen zijn opgemaakt de plaatselijke temperatuurverschillen:

$$\frac{6 + 16}{2} - \frac{1 + 2}{2} = 11,65 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

$$\frac{7 + 17}{2} - \frac{2 + 3}{2} = 12,00 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

$$\frac{8 + 18}{2} - \frac{3 + 4}{2} = 11,40 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Van deze plaatselijke temp.verschillen moet worden afgetrokken het temperatuurverval in het ijzer = 3,77  $^{\circ}\text{C}$ , zoodat resp. overblijven als plaatselijke temperatuursprongen tusschen binnenwand van het ijzer en het kokende water in de buis:

$$v_{6,16} = 7,88 \text{ }^{\circ}\text{C}; \quad v_{7,17} = 8,23 \text{ }^{\circ}\text{C}; \quad v_{8,18} = 7,63 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Toepassing van (4) levert dan de plaatselijke  $a$ 's:

$$a_{6,16} = 5260; \quad a_{7,17} = 5040; \quad a_{8,18} = 5440.$$

Op analoge wijze volgt gemiddeld over het geheele V.O.:

$$\frac{6 + 16 + 7 + 17 + 8 + 18}{6} - \frac{1 + 2 + 3 + 4}{4} = 11,65 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

$$\text{dus } v_{\text{gem.}} = 11,65 - 3,77 = 7,88 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

$$a_{\text{gem.}} = a_1 = 5260.$$

Bij de berekening der plaatselijke  $a$ 's is aangenomen, dat de radiale warmtestroom, die bij de meetplaatsen door den buiswand gaat, overal even groot is, wat wegens de drie geheel gelijke verhittingswikkelingen zeer ten naaste bij het geval zal zijn.

*Berekening  $a_2$  (A.O.).*

Een berekening van de plaatselijke  $a$ 's heeft hier geen zin, omdat er geen zekerheid bestaat, dat de radiale warmtestroom over de hoogte gelijkmatig verdeeld is. Zeer waarschijnlijk is dit zelfs niet het geval, omdat de overdracht belemmerende condenswaterhuid niet overal even dik is (Waterhuid-theorie van Nusselt, zie § 26). Om die reden is voor het A.O. uitsluitend opgemaakt de  $a$  gemiddeld over het geheele oppervlak ( $a_2$ ).

Op analoge wijze als bij  $a_1$  volgt hier:

$$v_2 = 7,42 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

$$a_2 = 9800 \text{ bij } l = 0,5 \text{ m, } Q_2 = 4450 \text{ kcal/h.}$$

*Berekening  $a_3$ .*

De temp. van het kokende koelwater in den mantel B is vrijwel egaal. Zij bedraagt bovenin gemeten  $T_5 = 101,1$  °C en onderin den bak op 3 cm boven den bodem en 10 cm afstand van de invoeropening (meetplaats 15)  $100,2$  °C, dus reeds nagenoeg kooktemperatuur. Voor de berekening van  $a_3$  is daarom eenvoudigheidshalve als temp. van het koelwater in de geheele ruimte B aangenomen:  $T_5 = 101,1$  °C.

$$\begin{array}{r}
 \text{gemiddelde temp. } 9 \dots \dots \dots 14 = 112,67 \text{ } ^\circ\text{C} \\
 \text{mantel } T_5 \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad = 101,1 \text{ } ^\circ\text{C} \\
 \hline
 \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad 11,57 \text{ } ^\circ\text{C} \\
 \text{temp.verval in 8 mm dikke ijzerschil} = 0,89 \text{ } ^\circ\text{C} \\
 \hline
 \Delta t = 10,68 \text{ } ^\circ\text{C}.
 \end{array}$$

Hieruit volgt bij  $l = 0,5$  m en  $Q_2 = 4450$  kcal/h:

$$a_3 = 5210.$$

*Inwendige buisweerstand (R).*

Om een maat te hebben voor het temperatuurverval bij het dampwatertransport in het inwendige van de buis, is het begrip: inwendige weerstand van de buis, ingevoerd. Deze wordt gedefiniëerd als het temperatuurverschil tusschen de vloeistof (damp), die het V. O. inwendig bespoelt en de damp (vloeistof), die het A. O. inwendig bespoelt, gedeeld door het getransporteerde aantal kcal/h.

Voor de gemiddelde temperatuur van het kokende water (damp) in het V. O. is genomen het gemiddelde der gemeten temperaturen op de meetplaatsen 1, 2, 3 en 4, en voor de gemiddelde temperatuur in de A. O.-ruimte het gemiddelde van 4 en 5. Bij proef no. 9 bedroeg het getransporteerde aantal calorïën:  $Q_1 = 4570$  kcal/h, derhalve:

$$R = \frac{127,55 - 126,65}{4570} = 1,97 \times 10^{-4} \text{ [h, } ^\circ\text{C/kcal]}.$$

*Totale buisweerstand (W).*

Met totalen buisweerstand is bedoeld de warmteweerstand van het geheele element, gerekend vanaf de meetplaatsen in het V.O. tot de meetplaatsen in het A.O., gedefiniëerd als het temperatuurverschil tusschen buitenzijde van het V.O. en buitenzijde van het A. O., gedeeld door het getransporteerde aantal kcal/h.





TABEL I.

Z. Cb. Verticaal. Spec. uitw. V.O.-belasting 30,000 kcal/m<sup>2</sup>h.

Prof.-no.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Vulhoogte	138	135	116	115	97	95	85	75	75	70	65	60	55	55	30	25
<i>I</i>	166,9	165,8	137,8	138,1	128,4	128,6	127,1	127,4	128,7	128,8	127,3	128,0	126,4	126,3	127,1	126,2
2	166,7	165,4	137,5	137,7	127,8	127,9	126,6	125,9	127,5	127,8	126,2	126,8	125,0	124,7	125,9	125,2
3	166,4	165,4	137,0	137,6	127,4	127,7	126,4	125,7	127,4	127,6	126,1	126,8	125,1	124,5	125,7	124,9
4	162,2	161,7	135,7	135,6	126,4	126,5	125,2	125,0	126,6	126,8	125,4	126,2	124,6	124,1	125,6	125,1
5	108,3	110,2	114,1	115,6	123,7	124,2	125,4	125,0	126,7	127,0	125,6	126,3	124,6	124,3	125,8	125,0
6	176,7	176,0	148,2	148,5	139,0	139,2	137,7	137,5	139,8	140,0	138,2	138,9	136,3	136,3	138,0	137,1
16	176,3	175,6	148,3	148,5	139,2	139,6	137,4	137,8	139,7	139,8	138,7	139,3	136,6	136,6	137,3	137,0
7	176,3	175,8	148,3	148,7	139,1	139,0	137,8	137,0	139,6	139,0	138,5	138,5	135,9	135,9	137,3	138,4
17	176,6	175,9	147,9	148,2	139,1	139,3	137,6	136,8	139,3	139,4	138,6	138,6	136,0	135,5	137,3	142,0
8	175,6	174,9	147,2	147,7	138,0	138,0	136,4	136,0	138,5	138,5	137,2	138,2	135,6	135,2	138,4	137,2
18	175,2	174,6	147,0	147,3	137,9	138,2	136,3	136,1	138,3	138,6	137,2	138,2	135,5	135,2	137,9	137,1
9	111,2	110,3	108,3	109,2	109,9	109,7	112,4	111,4	112,5	113,2	110,3	112,1	111,3	110,8	111,9	112,0
12	118,4	120,9	110,5	112,4	111,9	111,5	112,1	111,6	112,7	112,8	110,7	112,0	111,4	110,6	111,7	112,6
10	107,3	106,9	109,8	111,6	110,5	110,6	111,9	111,8	112,9	112,8	111,3	113,3	111,4	111,3	111,9	112,0
13	104,0	104,2	110,0	112,2	111,3	111,3	111,5	111,7	112,2	113,0	111,5	112,6	111,9	111,5	112,3	112,6
11	100,0	100,8	103,4	102,3	109,3	109,5	112,2	111,8	113,0	113,5	111,7	112,8	112,5	111,5	112,3	113,6
14	101,2	101,1	105,4	105,0	109,6	110,0	111,8	112,0	112,7	113,5	111,3	112,0	112,1	111,6	112,1	112,0
15	99,1	99,9	99,1	99,7	99,0	99,7	99,7	99,6	100,2	100,3	98,9	100,2	99,8	99,5	99,5	99,8
mantel	99,7	100,6	99,7	100,6	99,7	100,6	100,6	100,6	101,1	101,3	99,7	101,2	100,7	100,5	100,6	100,8
input	4730	4920	4700	4860	4820	4740	4700	4740	4950	4910	4940	4890	4660	4670	4910	4790
Q <sub>1</sub>	4360	4500	4340	4450	4420	4385	4355	4330	4570	4490	4565	4520	4320	4285	4510	4385
Q <sub>2</sub>	4250	4385	4225	4335	4300	4270	4235	4210	4450	4370	4445	4400	4200	4160	4390	4265
ata	7,19	7,15	3,30	3,31	2,47	2,50	2,40	2,39	2,50	2,52	2,42	2,46	2,34	2,33	2,42	2,37
verz. temp.	165,2	165,0	136,2	136,3	126,4	126,8	125,4	125,3	126,8	127,1	125,7	126,3	124,6	124,5	125,7	125,0
10 <sup>3</sup> W	16,05	15,33	9,32	8,96	6,49	6,57	5,87	5,89	5,88	5,89	5,98	5,85	5,68	5,82	5,77	5,93
10 <sup>4</sup> R	69,5	63,6	27,9	26,2	5,54	5,32	2,36	2,26	1,97	1,89	1,64	1,55	1,57	1,63	0,84	0,68
a <sub>1</sub>	5720	5730	5460	5590	5310	5270	5440	5380	5260	5260	5140	5210	5500	5300	5190	4350
a <sub>6,16</sub>	6530	6340	5670	5840	5470	5330	5600	5340	5260	5160	5260	5160	5460	5250	5520	5160
a <sub>7,17</sub>	6370	6110	5470	5720	5120	5160	5230	5230	5040	5230	4830	5220	5380	5140	5270	3470
a <sub>8,18</sub>	5310	5530	5550	5600	5430	5400	5680	5560	5440	5330	5430	5160	5540	5280	4700	4670
a <sub>2</sub>	3140	3220	6370	6740	8380	7990	9720	9650	9800	9680	9230	9740	10300	9870	9900	10900
a <sub>3</sub>	8160	9210	7150	7350	5420	5920	5010	5100	5210	4960	5230	5260	5120	5250	5170	4910



9 t/m 14 van het A.O. Onderaan, bij 9 en 12 is de temp. in het ijzer hoog, dus ook de temperatuursprong ijzer  $\rightarrow$  kokend water van den koelmantel hoog. Daar concentreert zich derhalve de warmteoverdracht, om naar boven toe gaandeweg af te nemen en bij 11 en 14 zeer gering te worden. 11 en 14 wijzen een temp. aan, nagenoeg overeenkomende met die van het kokende water in den koelmantel.

Dat dit temp.verloop van het A.O. niet veroorzaakt wordt door een toenemende warmteovergangscoefficiënt  $\alpha_3$  van onderen naar boven, blijkt duidelijk uit de proeven met middelbare en kleine vulling; hier is de temp.verdeeling over het A.O. zeer gelijkmatig.

Bij afnemende vulling wordt het inwendige verval voortdurend kleiner en daarmee ook de inwendige weerstand (R) van de buis.

In fig. 7 is het verloop van R grafisch voorgesteld als functie van de vulhoogte; de getrokken lijn geeft duidelijk de aanvankelijk scherp afnemende R aan bij kleiner wordende vulling, terwijl beneden 85 cm R slechts langzaam afneemt. De meetplaatsen 4 en 5 wijzen nu ook een nagenoeg gelijke temp. aan en bij openen van  $K_6$  blaast uitsluitend damp uit de opening. De A.O.-ruimte is nu met damp gevuld.

De dampdruk bij middelbare en lage vulling bedraagt ca.  $2,4 \text{ kg/cm}^2$  en de tevens in de tabel opgegeven verzadigingstemp. blijkt binnen de grenzen der meetnauwkeurigheid overeen te komen met de temp. van 4 en 5; de A.O.-ruimte bevat derhalve verzadigden damp.

Bij hoge vulling loopt de dampdruk abnormaal op tot ruim  $7 \text{ kg/cm}^2$  <sup>1)</sup>. De verzadigingstemp. is gelegen tusschen de temperaturen van de meetplaatsen 3 en 4. Uit het verloop der verzadigingstemperaturen blijkt duidelijk, dat er bij geen enkele vulling sprake is van oververhitten damp. Dit is ook niet waarschijnlijk zoolang voldoende vloeistof in de buis aanwezig is, gezien het feit dat voortdurend veel water mee omhoog geslingerd wordt en men dus altijd met natten damp te maken heeft.

Het abnormale gedrag van de buis bij hoge vulling laat zich als volgt verklaren: de dampbellen, die in de V.O.-ruimte ontstaan, stuwen nu blijkbaar een hoeveelheid water voor zich uit naar den kop van de buis; dit water krijgt geen gelegenheid naar beneden af te vloeien, terwijl de dampbellen zelf niet hooger komen dan het begin van het

<sup>1)</sup> 138 cm bij kamertemp. komt overeen met 154 cm vulhoogte bij  $175^\circ\text{C}$ . De totale buishoogte bedraagt 200 cm, dus bij de heerschende temp. is de buis nog geenszins geheel gevuld met vloeistof.

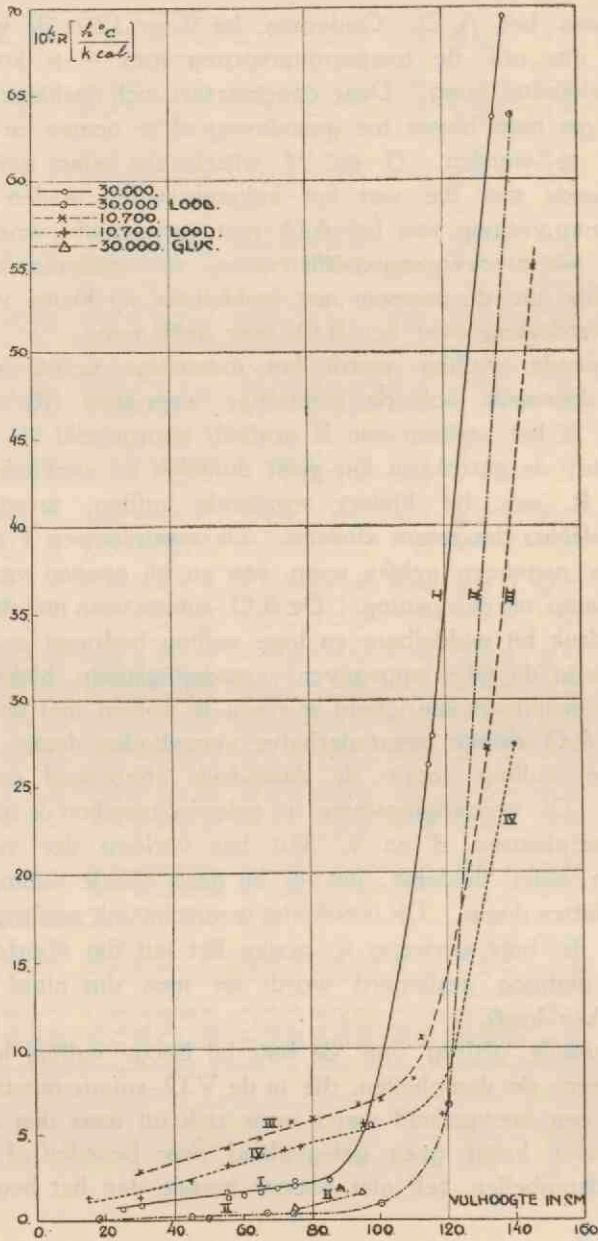


Fig. 7. Graf. voorstelling van R (Z Cb, verticaal).

A.O. en daar hun condensatiewarmte afgeven. Door het sterk verkleinde A.O. wordt de warmteoverdracht belemmerd, tengevolge waarvan de temp. in de V.O.-ruimte oploopt en daarmee tevens de dampdruk, tot zich een evenwichtstoestand heeft ingesteld.

Bij nog hogere vulling dan 138 cm is een evenwicht niet meer te bereiken; de druk en de temp. blijven oploopen. Door het oploopen van de temp. zet de waterinhoud verder uit, waardoor de overdracht sterker bemoedigt wordt, waardoor de temp. weer verder oploopt, enz.

Het kookverschijnsel is bij hoge vulling sterk hoorbaar bruisend en stootend en de manometernaald slingert heftig heen en weer. Om den manometer tegen beschadiging te vrijwaren moet  $K_5$  bijna geheel gesloten worden, teneinde de drukstooten te smoren. Bij kleiner wordende vulling is het kookverschijnsel uiterst rustig en staat de manometernaald zelfs bij wijdgeopende  $K_5$  volkomen stil.

#### De overgangscoefficienten.

Bij het V.O. In tabel I zijn zowel de waarden  $\alpha_1$ , als die van  $\alpha_{6,16}$ ,  $\alpha_{7,17}$  en  $\alpha_{8,18}$  opgenomen; in fig. 8 is  $\alpha_1$  grafisch voorgesteld als functie van de vulhoogte (getrokken kromme I)<sup>1)</sup>.

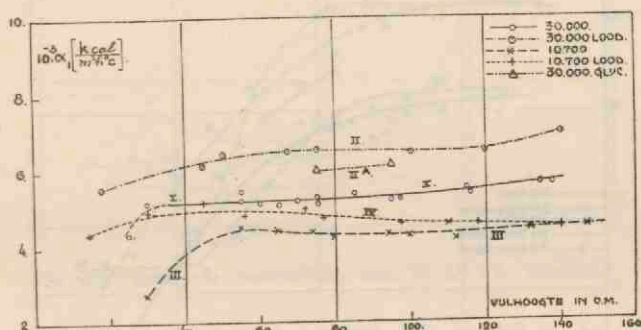


Fig. 8. Grafische voorstelling van  $\alpha_1$  (Z Cb, verticaal).

Uit deze grafische voorstelling blijkt, dat de waarde van  $\alpha_1$  toeneemt met de vulling, een verschijnsel dat verklaard kan worden uit de hogere temp., waarbij dan het koken plaats vindt. (Dat inderdaad de temp. de oorzaak is zal nog duidelijker blijken in § 20.)

<sup>1)</sup> In de grafische voorstellingen komen de Rom. cijfers steeds overeen met de betreffende tabelnummers.

Het temp.effect overheerscht hier blijkbaar de bemoeilijking van de circulatie door de hooge vulling.

Omtrent het verloop van  $a_1$  met de hoogte geven de plaatselijke  $a$ 's uitsluitel.

Zooals uit de belangrijk geringere waarde van  $a_{8,18}$  bij hooge vulling blijkt, is in dat geval de overdracht aan het bovenste deel van het V.O. merkbaar geringer, een verschijnsel, dat zijn oorzaak moet vinden in de eigenaardige circulatie van den waterinhoud bij hooggevulde buis (zie ook fig. 19, § 31).

Bij middelbare vulling daarentegen komt  $a_{8,18}$  juist gunstiger dan  $a_{7,17}$  en  $a_{6,16}$  naar voren, om bij zeer geringe vulling (30 cm) plotseling kleiner te worden.

Bij 25 cm vulling daalt ook  $a_{7,17}$  zeer sterk. De verklaring hiervan moet gezocht worden in de onvoldoende koeling van de meetplaatsen 8, 18 en 7, 17, wat in overeenstemming is met de oplopende waarden van de resp. temperaturen. (Voor het gedrag van de buis bij zeer geringe vulling, zie § 23.)

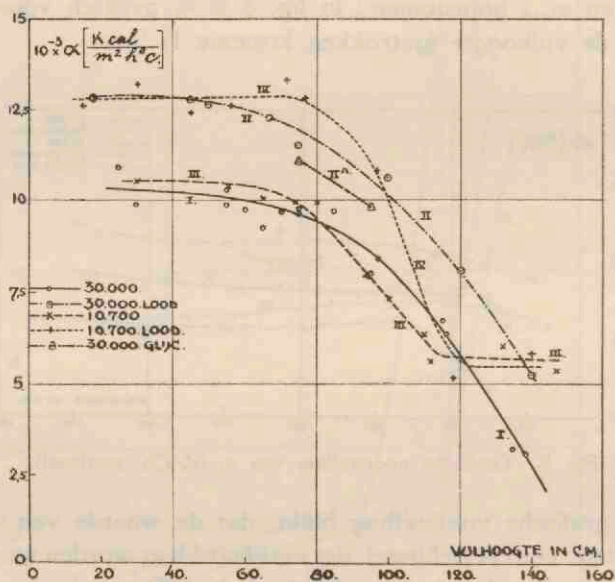


Fig. 9. Grafische voorstelling van  $a_2$  (Z Cb, verticaal).

Bij het A. O. Het verloop van  $a_2$  is in fig. 9 grafisch voorgesteld. Bij lage en middelbare vulling is de overgangscoefficiënt nagenoeg



constant (ca. 10.000 kcal/m<sup>2</sup>,h,°C), om bij hogere vulling snel af te nemen. Dit laatste is te verwachten wegens de bemoeilijkte overdracht bij hooge vulling door het verkleinde werkzame deel van het A.O.

a<sub>3</sub>. Zie § 22.

#### Totale buisweerstand (W) van de buis.

Het verloop is in fig. 10 voorgesteld als functie van de vulhoogte. Zooals uit de hierboven beschreven componenten, die W samenstellen reeds volgt, zal W bij lage en middelbare vulling nagenoeg constant moeten zijn en bij hooge vulling sterk moeten toenemen. Afgezien

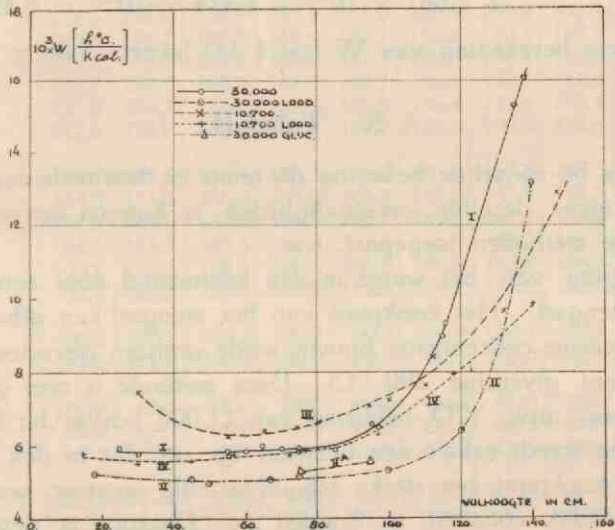


Fig. 10. Grafische voorstelling van W (Z Ch, verticaal).

van de geringe verschillen tusschen  $Q_1$ ,  $Q_2$  en  $Q_{\text{gem.}}$  kan W n.l. als een som van weerstanden worden voorgesteld <sup>1)</sup> en wel:

$$W = \frac{e \log \frac{r_u}{r_i}}{2 \pi l_1 \lambda_1} + \frac{1}{a_1 O_1} + R + \frac{1}{a_2 O_2} + \frac{e \log \frac{r_u}{r_i}}{2 \pi l_2 \lambda_2}$$

<sup>1)</sup> Inplaats van de overgangscoefficienten  $a_1$  en  $a_2$  kan men n.l. ook invoeren de overgangsweerstanden  $\frac{1}{a_1}$  en  $\frac{1}{a_2}$ .

waarin:  $O_1 =$  werkzame inwendig opp. van de V.O.-ruimte ( $= 0,11 \text{ m}^2$ ),  
 $l_1 =$  lengte van het werkzame V.O. ( $= 0,9 \text{ m}$ ),  
 $O_2 =$  werkzame inwendig opp. van de A.O.-ruimte ( $= 0,06 \text{ m}^2$ ),  
 $l_2 =$  lengte van het werkzame A.O. ( $= 0,5 \text{ m}$ ).

De inwendige buisweerstand  $R$  (orde van grootte  $10^{-4}$ ) vormt slechts een geringe fractie van de totale weerstand van de buis (orde van grootte  $10^{-3}$ ).

Dat bovenstaande som een zeer goede benadering van  $W$  voorstelt, blijkt het beste uit een voorbeeld.

Voor proef no. 9 levert deze formule n.l.:

$$W = 0,824 \times 10^{-3} + 1,728 \times 10^{-3} + 0,197 \times 10^{-3} + \\ + 1,667 \times 10^{-3} + 1,474 \times 10^{-3} = 5,890 \times 10^{-3},$$

terwijl directe berekening van  $W$  (zie § 18) levert:  $5,88 \times 10^{-3}$ .

## § 20. Tabel II.

Ten einde bij éénzelfde belasting de temp. en daarmee den dampdruk onder overigens dezelfde omstandigheden te kunnen opvoeren, zijn 2 verschillende methoden toegepast, t.w.:

- vervanging van het water in den koelmantel door een glycerine-watremengsel. Het kookpunt van het mengsel kan, afhankelijk van de glycerine-concentratie binnen wijde grenzen gevarieerd worden (kookpunt glycerine  $290 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Deze methode is zeer geschikt tot een spec. uitw. V.O.-belasting van  $11.000 \text{ kcal/m}^2\text{h}$ ; bij hoogere belasting treedt echter een bezwaar op, n.l. dat in den koelmantel bij het kookpunt een sterke schuimvorming ontstaat, waardoor het peil moeilijk constant te houden is. Daarom is deze methode verlaten voor:
- kokend water in den koelmantel en omwikkeling van het A.O. door een laag lood. Hierdoor neemt de warmteweerstand van het A.O. en daarmee het temperatuurverval toe, waardoor de inwendige Haag-buistemp. stijgt.

Om een goed warmtecontact van den loodmantel met het ijzeroppervlak van het A.O. te verkrijgen is als volgt te werk gegaan: eerst werd het ijzeroppervlak van het A.O. met een ijzerborstel gereinigd en daaromheen een blank geschuurde loodlaag van 2 mm dikte gelegd. Onder voortdurend flink hameren werd om deze loodlaag een ijzerdraadwikkeling strak aangebracht. Dit ijzerdraad

TABEL II.

Z Cb. Verticaal. Spec. uitw. V.O.-belasting 30.000 kcal/m<sup>2</sup>.h.

Proef-no.	Loodmantelproeven								Glycerineproeven	
	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Vulhoogte	140	120	100	75	67	50	45	18	95	75
1	213,4	186,8	179,5	179,1	178,0	177,2	180,1	181,2	157,5	161,7
2	213,2	186,6	179,2	178,9	177,7	176,9	179,8	180,8	156,8	161,3
3	213,3	186,7	179,2	178,9	177,7	176,8	179,8	180,9	156,7	161,2
4	211,2	185,8	178,3	178,8	177,6	177,0	179,8	180,9	156,1	161,0
5	156,1	181,1	179,0	178,8	177,6	176,9	179,8	181,0	156,0	161,0
6	222,6	196,4	188,9	188,6	187,6	186,8	189,9	191,2	167,2	172,0
16	222,5	196,7	189,2	188,6	187,2	186,6	190,1	192,5	167,7	171,6
7	222,1	196,7	189,3	189,0	187,3	186,3	190,4	191,8	166,8	171,4
17	222,7	196,6	188,9	188,7	187,1	186,4	190,1	192,0	167,0	171,1
8	223,0	196,7	188,7	188,5	186,9	186,4	190,4	192,4	166,3	170,7
18	222,8	196,7	188,6	188,9	187,2	186,6	190,6	193,4	166,6	170,9
9	185,1	172,5	166,4	166,3	165,5	165,0	167,5	168,5	142,3	148,4
12	184,0	171,3	166,0	165,9	166,0	165,7	167,9	168,9	142,1	148,6
10	167,9	168,7	165,0	166,3	165,7	165,2	167,7	168,5	142,7	149,0
13	166,3	168,3	164,6	166,6	165,8	165,3	168,2	169,1	142,4	148,7
11	136,8	163,4	166,3	166,4	166,5	166,0	167,8	168,8	143,1	148,8
14	138,8	163,8	166,3	166,6	166,6	166,2	167,7	168,8	143,3	149,0
15 mantel	100,6 101,0	100,5 101,0	100,2 100,9	100,2 100,9	99,9 100,7	100,4 100,9	100,1 101,0	100,2 100,9	115- 125,4	129,0 129,4
input	4990	4990	4860	4860	4660	4660	4920	4960		
Q <sub>1</sub>	4590	4545	4420	4415	4255	4265	4475	4555	4405	4275
Q <sub>2</sub>	4455	4395	4270	4265	4100	4115	4325	4405	4265	4130
ata	20,41	11,71	9,98	9,92	9,70	9,55	10,15	10,43	5,70	6,46
verz. temp.	212,4	186,0	178,9	178,6	177,7	177,0	179,7	180,8	156,1	161,0
10 <sup>3</sup> W	13,15	6,40	5,33	5,15	5,07	5,00	5,10	5,23	5,60	5,36
10 <sup>4</sup> R	63,5	6,67	0,90	0,29	0,35	0,07	0,18	0	1,66	0,70
a <sub>1</sub>	7010	6520	6510	6600	6530	6480	6140	5560	6170	6050
a <sub>6-16</sub>	7770	6840	6760	6800	6500	6420	6500	5880	6080	5770
a <sub>7-17</sub>	8000	6740	6490	6420	6500	6580	6060	5760	6220	6080
a <sub>8-18</sub>	6210	6270	6540	6590	6670	6420	5850	5050	6270	6330
a <sub>2</sub>	5230	8030	10600	11500	12300	12700	12800	12800	9800	11100
a <sub>3</sub>	—	—	—	—	—	—	—	—	2210	2760



was te voren een weinig plat gewalst. Door het hameren wordt de ijzerdraadwikkeling in het lood gedreven en tevens de loodlaag strak tegen de ijzeroppervlakte van het A. O. gedrukt. Vervolgens wederom een loodlaag, dan weder een ijzerdraadlaag, enz.

Aangezien het lood bij verwarming sterker uitzet dan het ijzer, wordt bij in bedrijf stellen van de buis een compacte, overal goed aanliggende metaalmantel verkregen.

In tabel II zijn de resultaten van een aantal proeven resp. met loodmantel en glycerinevulling weergegeven.

De spec. V. O.-belasting is dezelfde als bij tabel I, de werktemp. echter aanzienlijk hoger.

#### *De inwendige weerstand.*

De inwendige weerstand (zie fig. 7, kromme II) is bij alle vulhoogten geringer dan bij I; R neemt dus af bij hogere temp. Dit effect is duidelijk, immers, bij hogere temp., d.w.z. hoogerem druk, is het s.g. van den damp grooter; er behoeft dus bij gelijke belasting minder damp per tijdseenheid van het V.O. naar het A.O. van de buis getransporteerd te worden. Bovendien is bij hogere temp. per °C-temp.verschil tusschen onder- en bovenzijde van de buis het verschil in dampdruk grooter; de benodigde voortstuwende kracht voor het dynamisch transport zal dus reeds bij een geringer temp.verschil bereikt zijn. In de definitie van R wordt de teller dus kleiner, d.w.z. R wordt kleiner.

#### *Overgangscoefficienten.*

*Bij het V. O.* Het verloop van  $a_1$  (zie fig. 8, II) vertoont het analoge beeld van I. Ook hier een geringe toename bij hoge vulling en een duidelijke afname bij kleine vulling. De oorzaak van dit laatste blijkt weer uit het verloop van de plaatselijke  $a$ 's. De meetplaatsen 7, 17 en 8, 18 vertoonen reeds bij 45 cm vulhoogte onvoldoende koeling, welk verschijnsel zich bij 18 cm vulhoogte gaat uitbreiden tot 6, 16 (zie verder § 31).

Verder blijkt duidelijk het temp.effect van  $a_1$ ; bij alle vulhoogten is de overdracht bij hogere temp. belangrijk gunstiger. In overeenstemming hiermede liggen ook de  $a$ -waarden van de glycerine-proeven (zie fig. 8, II<sup>A</sup>) tusschen die van I en II, als gevolg van het feit, dat de werktemperaturen tusschen die van I en II gelegen zijn.

*Bij het A. O.* Uit fig. 9, II en II<sup>A</sup> blijkt, dat ook  $a_2$  bij hogere



temp. een niet onaanzienlijken vooruitgang vertoont en derhalve ook een duidelijk temp.-effect bezit.

### *Totale buisweerstand.*

Aangezien zoowel de overgangsweerstanden bij het V. O. als die bij het A. O. belangrijk kleiner worden bij hogere temp. en ook R datzelfde verschijnsel vertoont, zal de totale buisweerstand  $W$  bij hogere temp. een vermindering moeten vertoonen<sup>1)</sup>, hetgeen uit de curve II (en II<sup>A</sup>) van fig. 10 ook overtuigend blijkt.

Evenals bij curve I is  $W$  bij middelbare vulling ten naaste bij constant, om bij kleine vulling neiging tot stijgen te vertoonen.

*Opmerking.* Van de proeven met glycerine-watremengels is proef no. 26 een proef met een kokend mengsel, terwijl bij proef no. 25 het mengsel met behulp van een centrifugaalpompje door den koelmantel in den condensor werd gepompt, met een zoodanige snelheid, dat het mengsel in B bijna tot het kookpunt werd verwarmd (temp. bovenin B 125,4 °C; kookpunt 129 °C).

Overeenkomstig de verwachting is  $a_3$  bij kookproef no. 26 grooter dan bij doorstroomproef no. 25.

Bij de proeven met loodmantel is  $a_3$  niet berekend, omdat de warmte-weerstand van den loodmantel niet nauwkeurig bekend is.

### § 21. Proeven bij kleinere belasting.

In de tabellen III, IV en V zijn de resultaten weergegeven van proeven, waarbij de verhittingswikkelingen in serie waren aangesloten op 220 Volt wisselstroom, hetgeen een V.O.-belasting opleverde van gemiddeld 1540 kcal/h, overeenkomende met een spec. uitw. V.O.-belasting van 10.700 kcal/m<sup>2</sup>,h en een spec. inw. V.O.-belasting van 14.000 kcal/m<sup>2</sup>,h.

Tabel III omvat de waarnemingen met een normaal water-gekoeld A.O.; tabel IV die met een loodomwikkeld oppervlak en tabel V die met glycerinekoeling.

De grafische voorstellingen (curven III en IV) van  $R$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  en  $W$  uit de tabellen III en IV zijn ter vergelijking met de overeenkomstige resultaten bij hogere belasting (tabellen I en II) mede in de figuren 7, 8, 9 en

<sup>1)</sup> De ijzerweerstand ondergaan slechts een geringe vergrooting bij hogere temp. (1e en 5e term van  $W$ , zie § 19).

TABEL III.

Z Cb. Verticaal. Spec. uitw. V.O.-belasting 10.700 kcal/m<sup>2</sup>,h.

Proef-no.	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37
Vulhoogte	147	132	112	110	100	94	80	74	65	55	30
1	121,2	116,6	114,4	114,5	113,4	112,4	111,4	111,5	112,1	111,1	110,7
2	120,8	115,9	113,6	113,9	113,1	111,5	110,6	110,7	111,3	110,3	109,6
3	120,2	115,7	113,3	113,3	112,7	111,1	110,3	110,3	110,8	109,9	109,4
4	118,9	114,4	112,1	112,7	111,7	110,2	109,6	109,6	110,5	109,6	109,2
5	104,3	108,3	111,3	111,9	111,6	110,3	109,6	109,7	110,4	109,6	109,4
6	125,4	120,7	118,5	118,6	117,8	116,4	115,4	115,6	116,1	115,0	114,4
16	125,1	120,5	118,4	118,5	117,6	116,3	115,5	115,3	116,0	114,8	114,2
7	124,9	120,2	117,9	118,0	117,4	115,8	114,9	115,0	115,6	114,5	117,8
17	124,8	120,2	118,0	118,0	117,4	115,8	114,9	115,0	115,5	114,6	115,5
8	124,3	120,0	117,4	117,7	116,9	115,4	114,5	114,5	115,2	114,1	118,7
18	124,0	119,6	117,6	117,6	116,8	115,4	114,5	114,7	115,3	114,4	116,3
9	105,9	105,1	104,9	105,8	106,0	104,8	104,9	104,7	105,6	104,9	104,5
12	106,4	105,4	105,1	106,0	106,1	104,8	104,7	104,7	105,7	104,9	104,5
10	106,0	105,4	105,2	106,2	105,9	104,5	105,1	105,0	105,8	105,0	104,3
13	105,8	105,3	105,2	106,3	105,8	104,5	105,2	105,2	105,9	105,2	104,5
11	102,4	104,7	105,5	106,4	106,7	105,4	105,2	105,2	106,1	105,2	105,8
14	102,0	104,3	105,2	106,1	106,4	105,8	105,6	105,6	106,3	105,5	105,2
15	99,7	100,0	99,8	100,4	100,3	99,6	99,4	99,4	99,8	99,1	98,8
mantel	100,0	100,5	100,5	101,2	101,3	100,3	100,4	100,3	101,0	100,3	100,2
input	1720	1720	1680	1730	1690	1690	1630	1700	1670	1680	1670
Q <sub>1</sub>	1580	1595	1555	1590	1565	1570	1505	1560	1550	1540	1555
Q <sub>2</sub>	1515	1530	1485	1525	1500	1500	1440	1490	1485	1475	1490
ata	2,05	1,69	1,57	1,60	1,54	1,46	1,45	1,45	1,49	1,45	1,44
verz. temp.	120,4	114,3	112,2	112,7	111,6	110,0	109,7	109,7	110,5	109,7	109,5
10 <sup>3</sup> W	12,92	9,71	8,41	7,66	7,29	7,09	6,67	6,52	6,40	6,27	7,45
10 <sup>4</sup> R	54,9	27,0	10,61	8,18	6,90	6,69	5,85	5,64	4,71	4,09	2,77
$\alpha_1$	4530	4480	4220	4580	4300	4370	4220	4410	4450	4550	2740
$\alpha_{6,16}$	4870	4860	4440	4760	4570	4660	4240	4610	4570	4770	5000
$\alpha_{7,17}$	4710	4700	4440	4680	4420	4440	4240	4400	4430	4390	2410
$\alpha_{8,18}$	4420	4280	4000	4330	4230	4180	4110	4270	4290	4390	2040
$\alpha_2$	5340	6050	5600	6320	7290	7920	9970	9960	10000	10400	10500
$\alpha_3$	4260	4520	4240	4120	4120	4290	4070	4170	4030	4080	4350

10 opgenomen. De waarden van tabel V geven volkomen analoge curven.

#### *De inwendige buisweerstand.*

De inwendige buisweerstand (fig. 7) vertoont hetzelfde verloop en hetzelfde temp. effect als bij hoogere belasting. Verloop en temp. effect zijn op analoge wijze als in § 20 te verklaren.

Voorts toont fig. 7 duidelijk aan, dat de inwendige weerstand bij kleinere belasting (III en IV) aanzienlijk grooter is dan die bij grootere belasting (I en II). Beschouwt men de krommen I en IV, waarbij de inwendige buistemp. ongeveer even groot is, dan blijkt, dat ook bij gelijke inwendige buistemp. de weerstand bij kleinere belasting grooter is.

#### *Overgangscoefficienten.*

$a_1$  (fig. 8) blijkt ook een duidelijke functie te zijn van de calorische V.O.-belasting, zooals te verwachten was uit den bewegingstoestand van het medium (§ 4, c, g). Bij kleine belasting is de beweging van het medium uiteraard geringer en de warmteovergangscoefficiënt derhalve kleiner. Overigens vertoonen de curven III en IV een soortgelijk beeld als I en II. Ook hier is bij geringe vulling een duidelijke neiging tot afnemen van  $a_1$ .

Over de anomalie van proef no. 55, zie § 23.

$a_2$  (fig. 9, III en IV) geeft in tegenstelling met  $a_1$  in het algemeen bij middelbare en geringe vulling iets gunstiger resultaten dan bij hoogere belasting (I en II). De verklaring moet hier gezocht worden in de geringere dikte van de naar beneden stroomende condenswaterlaag bij kleinere belasting (zie verder § 26).

Merkwaardig is voorts nog de duidelijke neiging tot constant worden bij hooge vulling. Niet alleen III en IV geven bij vullingen boven 110 cm een nagenoeg horizontaal verloop, maar ook tabel V geeft hetzelfde resultaat. Mogelijk gaat zich bij deze vulling weder een betere inwendige circulatie instellen.

$a_3$ , zie § 22.

#### *Totale buisweerstand.*

Het gedrag van W (fig. 10, III en IV) is weer uit de samenstellende componenten af te leiden. Bij middelbare en kleine vulling wordt de gunstiger  $a_2$  overheerscht door de vermindering van  $a_1$  en de verhooging van R, getuige het feit, dat de krommen III en IV resp. boven I en II gelegen zijn. Bij geringe vulling loopt de weerstand op door de slechte overdracht bij het V.O.

De waarden uit tabel V geven hetzelfde beeld.



TABEL IV.

Z Cb. Verticaal. Loodmantelproeven. Spec. uitw. V.O.-belasting 10.700 kcal/m<sup>2</sup>.h.

Proef-no.	38	39	40	41	42	43	44	45	46
Vulhoogte	140	118	97	77	72	56	45	30	15
1	138,4	136,9	135,2	134,2	134,6	133,6	133,7	133,5	133,6
2	138,1	136,0	134,1	133,1	133,4	132,5	132,6	132,2	132,5
3	137,9	135,8	134,0	133,0	133,2	132,2	132,3	132,3	132,6
4	137,0	134,9	133,2	132,6	132,9	132,2	132,4	132,4	132,7
5	130,4	135,0	133,3	132,5	132,9	132,1	132,4	132,4	132,6
6	142,4	140,6	138,9	137,8	138,0	137,2	137,3	137,2	136,9
16	142,6	140,7	138,9	137,9	138,0	137,1	137,2	137,2	139,7
7	142,3	140,3	138,5	137,4	137,6	136,7	136,6	136,6	137,0
17	142,1	140,2	138,4	137,5	137,6	136,6	136,3	136,3	136,6
8	141,9	139,9	138,1	137,2	137,4	136,5	136,7	136,8	137,2
18	141,8	139,9	138,1	137,3	137,2	136,4	136,5	136,7	137,2
9	130,7	129,5	128,4	128,3	128,7	127,9	128,0	128,1	128,4
12	130,6	129,3	128,3	128,4	128,9	128,1	128,1	128,2	128,5
10	128,2	128,4	128,5	128,4	128,9	128,1	128,3	128,3	128,5
13	128,0	128,2	129,0	128,4	128,7	128,2	128,3	128,4	128,4
11	123,6	126,6	129,4	128,7	129,1	128,3	128,4	128,5	128,7
14	123,9	126,7	129,5	128,6	129,1	128,3	128,3	128,4	128,6
15	100,1	100,2	100,1	100,1	99,3	99,8	99,8	99,8	99,7
mantel	100,3	100,4	100,4	100,4	99,9	100,3	100,3	100,4	100,4
input	1670	1680	1680	1710	1700	1680	1720	1720	1720
Q <sub>1</sub>	1520	1560	1570	1575	1560	1535	1565	1575	1580
Q <sub>2</sub>	1445	1485	1490	1500	1480	1455	1490	1500	1505
ata	3,40	3,20	3,05	2,98	3,03	2,91	2,95	2,96	2,99
verz. temp.	137,2	135,1	133,4	132,6	133,2	131,9	132,3	132,4	132,7
10 <sup>3</sup> W	9,90	7,98	6,29	5,88	5,74	5,76	5,59	5,51	5,77
10 <sup>4</sup> R	27,3	6,09	5,61	4,32	4,04	3,13	2,24	1,27	1,27
α <sub>1</sub>	4510	4610	4660	4800	5040	4880	5220	4950	4380
α <sub>6-16</sub>	4710	4960	4900	5030	5230	5000	5160	4780	3690
α <sub>7-17</sub>	4710	4640	4660	4710	4700	4660	5360	5030	4960
α <sub>8-18</sub>	4480	4420	4430	4560	4870	4660	4900	4710	4490
α <sub>2</sub>	5800	5170	10800	12800	13300	12600	12400	13200	12600

## § 22. De warmteovergangscoefficiënt $a_3$ .

In fig. 11 zijn de  $a_3$ -waarden uit de hierboven besproken tabellen als functie van de vulhoogte weergegeven. Vanzelfsprekend zal het al of niet aanwezig zijn van een circulatiebuis in het inwendige van de Haag-buis voor  $a_3$  van heel weinig belang zijn, reden waarom in fig. 11 tevens de waarden van  $a_3$ , behorende bij de Haag-buis met circulatiebuis (Hoofdstuk IV) zijn opgenomen.

A geeft de waarden weer uit tabel I, B die uit de tabellen VII en VIII, C die uit de tabellen III en IX, terwijl D en E de waarden van  $a_3$  voor de glycerineproeven voorstellen, resp. uit de tabellen II en V.

In bijna alle gevallen zijn de overeenkomstige waarden zonder circulatiebuis en met circulatiebuis door éénzelfde kromme voor te stellen; alleen de krommen A en B wijken bij hoge vulling van elkaar af. Dit verschil is echter onwezenlijk en is een gevolg van de consequente toepassing van de rekenwijze ter berekening van  $a_3$ . Zooals reeds in § 19 is beschreven, treedt bij de Z Cb.-proeven uit tabel I een zeer eigenaardige temp.verdeeling op over de hoogte van het A.O., waardoor de overdracht zich vooral aan de onderzijde van het A.O. concentreert. Voor een nauwkeurige berekening van  $a_2$  en  $a_3$  zou het derhalve noodzakelijk zijn het A.O. te verdeelen in smalle zones en voor iedere zone de Q te bepalen. Aangezien dit een afzonderlijk onderzoek vereischt ten aanzien van de verdeeling van Q over de hoogte, die met deze apparatuur niet mogelijk is, is met een uniforme  $a_2$ - en  $a_3$ -berekening volstaan.

In overeenstemming met hetgeen gevonden is voor  $a_1$  (zie § 21), stijgt ook hier  $a_3$  met de belasting, van ca. 4100 kcal/m<sup>2</sup>.h.°C bij curve C tot ca. 5100 kcal/m<sup>2</sup>.h.°C bij curve A-B. De waarden van de overgangscoefficienten ijzer → glycerine-watermengsel liggen uiteraard veel lager (krommen D en E) wegens de grootere viscositeit van het mengsel, waardoor de beweging in de grenslaag veel moeilijker is dan bij kokend water.

Het horizontale verloop van de krommen A-B, C en E is plausibel, immers de  $a_3$ -waarde zal (afgezien van het bovenvermelde geval van hoge vulling) weinig te maken hebben met de inwendige vulhoogte van de Haag-buis.

TABEL V.

Z Cb. Verticaal. Glycerineproeven. Spec. uitw. V.O.-belasting 10.700 kcal/m<sup>2</sup>.h.

Proef-no.	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57
Vulhoogte	140	120	107	90	80	70	65	55	54	45	32
1	150,7	145,4	143,2	140,3	141,5	140,0	139,7	141,4	140,3	140,9	140,5
2	150,3	145,0	142,6	139,8	140,7	139,5	139,1	140,9	139,4	140,2	139,9
3	150,3	144,8	142,5	139,6	140,7	139,3	138,9	140,6	139,4	140,0	140,0
4	149,1	144,1	141,9	139,3	140,3	139,1	138,7	140,6	<b>162,4</b>	140,0	140,0
5	135,6	143,4	141,4	139,3	140,4	139,2	138,8	140,8	144,3	140,1	140,1
6	154,4	149,4	146,8	143,8	145,0	143,7	143,5	145,4	143,8	144,8	144,9
16	154,5	149,4	146,9	144,0	145,0	143,9	143,4	145,1	143,6	144,5	144,6
7	154,4	149,0	146,7	143,8	144,8	143,6	143,0	145,1	143,8	<b>150,4</b>	<b>168,7</b>
17	154,2	149,1	146,6	143,7	144,9	143,5	143,0	144,8	143,9	144,1	147,8
8	154,2	148,4	146,3	143,4	144,6	143,3	143,2	145,1	<b>398—</b>	144,4	146,2
18	153,9	148,8	146,5	143,6	144,7	143,4	143,3	145,3	<b>384—</b>	144,8	147,0
9	137,1	137,6	136,2	134,8	136,1	134,9	134,7	136,5	135,6	136,1	135,6
12	137,9	138,2	136,4	135,1	136,3	135,1	134,6	136,4	135,8	136,4	136,2
10	137,4	137,5	136,3	134,9	136,5	135,3	134,8	136,6	136,2	136,2	136,0
13	137,3	137,4	136,6	135,3	136,6	135,4	134,8	136,7	135,8	136,2	136,3
11	131,2	134,8	137,5	135,4	136,6	135,4	135,0	136,7	135,7	136,3	136,2
14	131,0	134,5	137,4	135,4	136,8	135,5	135,0	137,0	135,7	136,3	136,2
15	126,0	125,9	126,1	125,9	126,8	125,9	124,7	125,6	126,6	125,3	125,3
mantel	125,4	125,5	126,1	126,1	126,8	126,1	124,9	125,9	126,3	125,5	126,0
input	1710	1680	1680	1640	1700	1640	1680	1680	1700	1680	1680
Q <sub>1</sub>	1565	1555	1535	1505	1540	1515	1540	1545	1540	1550	1540
Q <sub>2</sub>	1490	1480	1460	1430	1465	1440	1465	1470	1460	1475	1465
ata	4,77	4,13	3,89	3,62	3,70	3,60	3,57	3,74	3,56	3,69	3,69
verz. temp.	149,3	144,1	141,9	139,4	140,1	139,2	138,9	140,5	138,8	140,0	140,0
10 <sup>3</sup> W	12,40	8,14	6,61	5,85	5,56	5,62	5,60	5,62	<b>60,3</b>	6,11	9,17
10 <sup>4</sup> R	49,5	6,95	5,86	2,99	2,92	2,18	2,27	1,17	—	1,48	0,32
a <sub>1</sub>	4930	4880	4970	5020	5080	4850	4890	4730	<b>180</b>	3580	<b>1650</b>
a <sub>6-16</sub>	5350	4860	5210	5350	5330	5010	5040	5070	5600	5090	4290
a <sub>7-17</sub>	5240	4950	5020	4870	4860	4750	5130	4900	4450	<b>2400</b>	<b>830</b>
a <sub>8-18</sub>	4650	5030	4760	4960	4860	4750	4400	4230	<b>60</b>	4250	2630
a <sub>2</sub>	4980	4880	8500	11500	13600	13100	13200	12800	<b>1540</b>	14500	12900
a <sub>3</sub>	1930	1700	1760	2040	1950	2030	1900	1750	1990	1760	1870



### § 23. Anomaal gedrag van de buis bij geringe vulling <sup>1)</sup>.

De anomalie van proef no. 55 is voor het gedrag van de buis bij geringe vulling zeer leerrijk. Bij deze proef was de buis bij kamertemp. gevuld tot 54 cm hoogte (+ de hoeveelheid water, die zich in den manometer bevond).

Bij het in bedrijf stellen deed zich een, bij deze vulhoogte, onverwacht verschijnsel voor. De temp. van de meetplaatsen 8 en 18 bleef voortdurend stijgen zonder eenige aanwijzing, dat een evenwicht zou worden bereikt. Binnen weinige minuten steeg de temp. van genoemde meetplaatsen tot bijna 400 °C, waarna de proef werd gestaakt om beschadiging van de thermo-elementen te voorkomen.

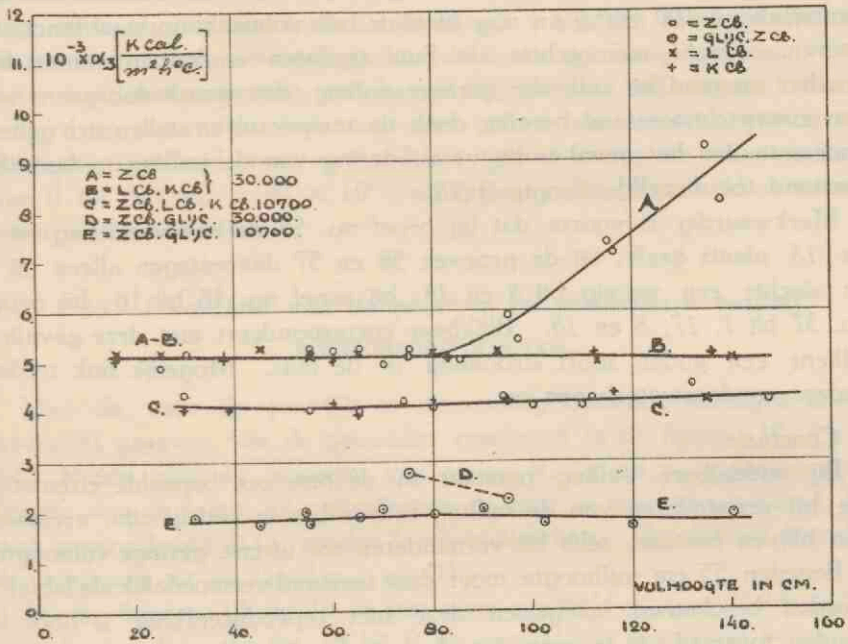


Fig. 11. Grafische voorstelling van  $\alpha_3$  (Z Cb, L Cb en K Cb; verticaal).

De inwendige meetplaats 4 geeft duidelijk aan, dat het bovenste deel van het V.O. totaal onvoldoende werd gekoeld en dat zich daar sterk oververhitte damp bevond. Klaarblijkelijk was de circulatie in de buis zeer abnormaal.

<sup>1)</sup> Opvallende afwijkingen zijn in de tabellen door dik gedrukte cijfers aangegeven.

Toen na afkoeling de vulhoogte gecontroleerd werd, bleek deze nog precies 54 cm te bedragen; van vullingvermindering door lekkage was dus geen sprake geweest. Vanzelfsprekend is later getracht dit abnormale gedrag te reproduceeren, hetgeen echter nimmer gelukt is. Tenminste niet bij genoemde vulhoogte, wel bij veel geringere vullingen en zelfs dan stelde zich meestal tenslotte een evenwichtstoestand in, zij het met plaatselijk oververhitte gebieden.

In de verschillende tabellen zijn proefresultaten verwerkt bij veel kleinere vulhoogten dan 54 cm, waarbij de buis volkomen normaal functionneert. Deze proeven werden genomen door in bedrijfstoestand de vulling te verminderen tot dit lage bedrag (door openen van  $K_7$ ). Zelfs kon vaak de vulling verminderd worden tot beneden 10 cm (waterinhoud 100 cm<sup>3</sup>!) en nog bleef de buis volmaakt normaal functionneeren. Tracht men echter de buis te laten aanloopen vanuit den kouden toestand bij zulk een geringe vulling, dan wordt doorgaans wel een evenwichtstoestand bereikt, doch de temperaturen stellen zich geheel anders in dan het geval is bij vermindering van de vulling in bedrijfs-toestand tot diezelfde hoogte (§ 28).

Merkwaardig is voorts, dat bij proef no. 55 de oververhitting bij 8 en 18 plaats heeft; bij de proeven 56 en 57 daarentegen alleen bij 7 en slechts een weinig bij 8 en 18; bij proef no. 46 bij 16; bij proef no. 37 bij 7, 17, 8 en 18. Blijkbaar correspondeert met deze gevallen telkens een ander soort strooming in de buis. Mogelijk ook treden andere condenswaterbanen op.

#### *Conclusie.*

Bij middelbare vulling ontstaat in de buis een bepaalde circulatie, die bij verminderen van de vulling tijdens het in bedrijf zijn, urenlang kan blijven bestaan, zelfs bij verminderen tot uiterst geringe vulhoogte.

Beneden 55 cm vulhoogte moet deze toestand vermoedelijk als labiel<sup>1)</sup> worden beschouwd, aangezien deze niet reproduceerbaar is door in kouden toestand uit te gaan van de betreffende vulling.

#### § 24. Vulhoogte van de buis.

Uit de voorgaande paragraaf volgt zonder voorbehoud, dat geringe vulhoogten voor practische toepassingen niet in aanmerking kunnen

<sup>1)</sup> Uit de stoomketelpraktijk zijn ook gevallen bekend van het blijven voortbestaan van een circulatie, die er eenmaal is, b.v. bij waterpijpketels, waar het water in als valpijpen bedoelde buizen voortdurend omhoog blijft gaan (Lit. XVIII).

komen. Ook hoge vullingen zijn zeker niet geschikt; het abnormaal oploopen van den druk is uiteraard niet gewenscht.

Perkins-buizen (§ 3) werken doorgaans met hoge vullingen en de vele met zulke buizen ondervonden teleurstellingen moeten wel hieraan worden geweten. Krijgt men onder omstandigheden ketelsteenaanzetting om het A.O. van de pijpen, dan stijgt de inwendige temp. en daarmede de dampdruk tot een waarde, die springen der buizen onvermijdelijk maakt.

De middelbare vullingen zijn derhalve voor practisch gebruik de aangewezenen. Bij voorkeur zal men de vulling tevens zoo kiezen, dat de buis door uitzetting van de vloeistof nimmer geheel met vloeistof gevuld zal kunnen zijn. Bij de gebruikelijke afmetingen zal een vulling van circa  $\frac{1}{3}$  van den totalen buisinhoud <sup>1)</sup> geschikt zijn. Mocht dan door onvoorziene omstandigheden de inwendige temp. oploopen (b.v. door ketelsteenaanzetting om het A.O.) dan zal zelfs bij de kritische temp. van water de buis nog niet geheel met vloeistof gevuld zijn (kritische dichtheid van water 0,33; gem. kubieke u.c. van vloeijzer van 0 tot 374 °C =  $41 \times 10^{-6}$ ) en springen door vloeistofdruk nimmer kunnen plaats hebben.

## § 25. Overzicht van de proeven bij middelbare vulling. Gelijkstroomproeven.

Van de voor de praktijk in aanmerking komende vullingen is een overzicht gegeven van de gevonden resultaten in de figuren 12, 13 en 14. Hierin zijn de waarden van  $a_1$ ,  $a_2$ , R, W en  $a_3$  opgenomen als functie van de temp. bij gebruik van de buis in normalen toestand, dus met watergekoeld A.O. zonder loodromwikkeling. Het betreft hier dus de resultaten uit de tabellen I en III.

In de figuren 12 en 14 is met temp. bedoeld de gemiddelde temp. van de grenslaag; in fig. 13 bij R de gemiddelde inwendige buistemp., bepaald door:

(gem. temp. van V.O.-ruimte + gem. temp. van A.O.-ruimte) : 2,  
en bij W de gemiddelde buistemp., bepaald door:

(gem. temp. ijzeropp. V.O. + gem. temp. ijzeropp. A.O.) : 2.

De V.O.-belasting is bij de verschillende temp. verschillend, want

<sup>1)</sup> Voor de gebruikte proefbuis b.v. 70 cm vulhoogte.



de verschillende temperaturen op de abscis ontstaan juist door de V.O.-belasting te varieeren.

In de figuren zijn ook opgenomen enkele metingen aan een buis voorzien van een korte circulatiebuis (zie hiervoor Hfdst. IV) en de waarden uit tabel VI.

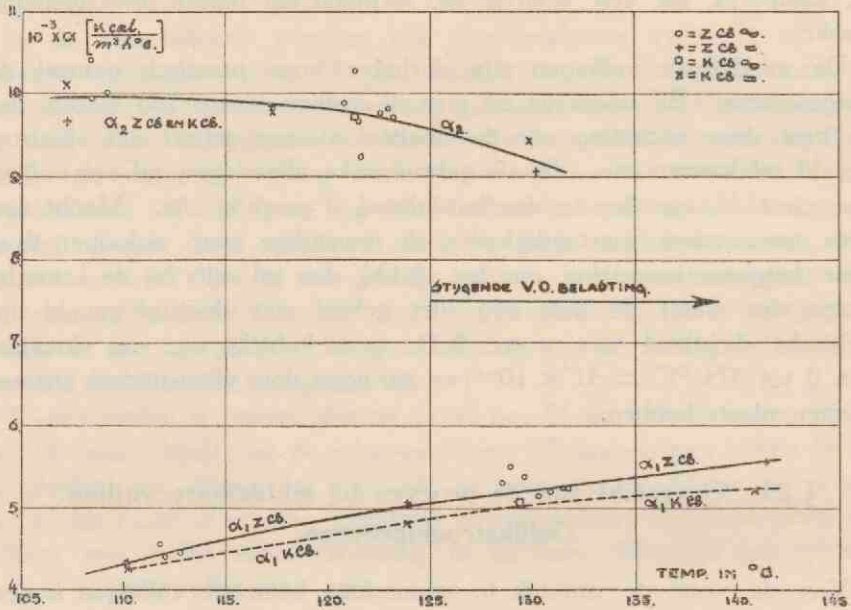


Fig. 12. Grafische voorstelling van  $\alpha_1$  en  $\alpha_2$  als functie van de temperatuur, bij variabele belasting. [Verticaal, normaal watergekoeld A.O., middelbare vulhoogte (55 t/m 79 cm)]

In tabel VI zijn weergegeven de resultaten van een aantal proeven, genomen met gelijkstroombelasting van de V.O.-windingen. Deze proeven hebben plaats gehad vóór de wisselstroomproeven, met dezelfde buis, doch met een eenvoudiger apparatuur dan in Hfdst. II beschreven is. O.a. waren op het V.O. en op het A.O. slechts 3 meetplaatsen aangebracht.

Uit de grafische voorstellingen blijkt, dat de bij deze gelijkstroomproeven behorende punten zeer goed aansluiten bij de proeven uit de tabellen I en III.

De inductie- en hysteresisinvoeden bij wisselstroombelasting zijn dus,

TABEL VI.

Proeven met gelijkstroom.

Verticaal.

Proef-no.	Z Cb.			K Cb.		
	58	59	60	61	62	63
Spec. uitw. V.O.-bel.	9000	23500	43500	9000	23500	43500
Spec. inw. V.O.-bel.	11700	30700	56600	11700	30700	56600
Vulhoogte	60	60	60	62	62	62
1	109,9	122,0	136,9	109,9	121,1	135,7
2	108,9	120,8	136,4	108,9	120,9	135,6
3	108,5	120,6	136,3	108,4	120,7	135,6
4	108,3	120,1	135,6	108,3	120,0	135,1
5	108,1	120,0	135,6	108,0	120,0	135,0
6	113,2	130,4	153,4	113,0	130,0	152,4
7	112,6	129,7	151,7	112,7	130,3	152,1
8	112,2	129,1	150,1	112,4	129,4	150,0
9	104,0	109,3	115,0	104,3	109,5	114,3
10	104,3	109,7	115,0	104,5	110,0	115,4
11	104,7	110,6	116,6	104,5	109,5	117,1
mantel	100,3	100,7	100,8	100,3	100,6	100,8
Q <sub>1</sub>	1295	3380	6270	1295	3400	6230
Q <sub>2</sub>	1225	3270	6120	1225	3290	6080
ata	1,38	2,04	3,25	1,37	2,04	3,19
verz. temp.	108,3	120,2	135,7	108,1	120,2	135,0
10 <sup>3</sup> W	6,62	5,97	5,84	6,56	6,05	5,83
10 <sup>4</sup> R	5,40	2,46	1,11	5,64	2,00	0,72
a <sub>1</sub>	4340	5060	5560	4260	4810	5220
a <sub>2</sub>	9650	9860	9040	10100	9790	9420
a <sub>3</sub>	4070	4770	5570	3960	4860	5510

zoals in § 18 reeds werd aangenomen, inderdaad van ondergeschikt belang.

De verklaring van het verloop der krommen uit fig. 12 komt in

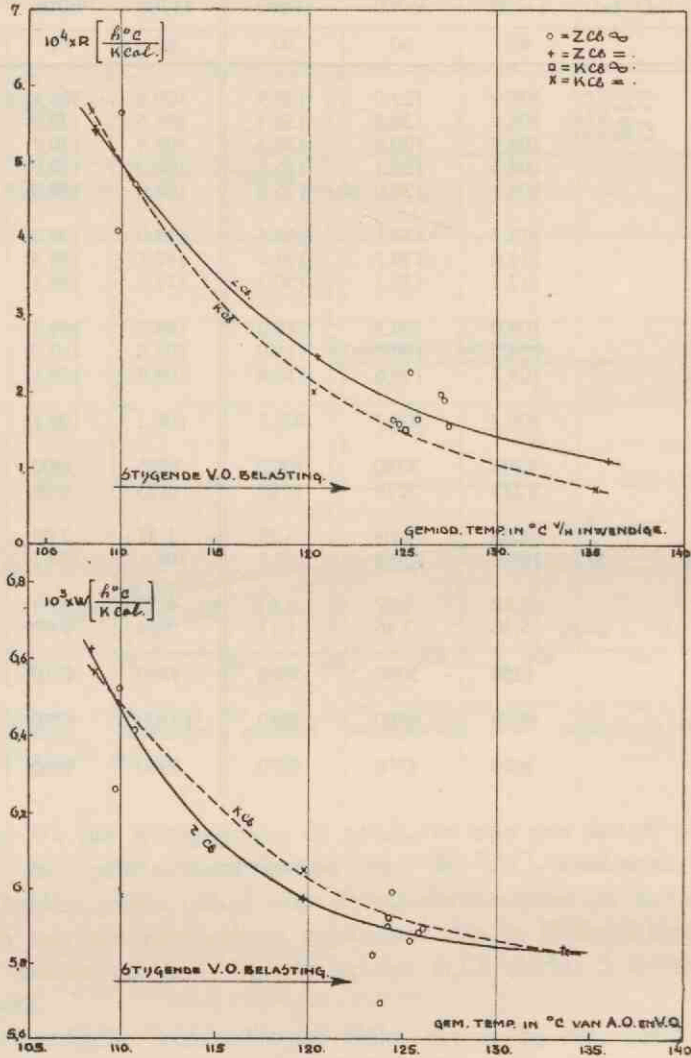


Fig. 13. Grafische voorstelling van  $R$  en  $W$  als functie van de temperatuur, bij variabele belasting.  
 [Verticaal, normaal watergekoeld A.O., middelbare vulhoogte (55 t/m 79 cm)]



hoofdzaak neer op hetgeen reeds in de paragrafen 19, 20 en 21 omtrent het gedrag der betreffende grootheden is vermeld.

De waarde van  $a_1$  (fig. 12) neemt toe met de gemiddelde grenslaagtemp. Dit effect is duidelijk, immers, eenerzijds neemt de temp. toe, waardoor  $\alpha$  toeneemt (§ 20), anderzijds neemt tegelijk de belasting toe, waardoor de vloeistofbeweging heftiger wordt, hetgeen eveneens een gunstig effect op  $\alpha$  uitoefent (§ 21).

$a_3$  (fig. 14) is een overgangscoefficiënt van dezelfde soort als  $a_1$  en vertoont dan ook eenzelfde effect als  $a_1$ . Hun absolute waarden zijn niet direct vergelijkbaar. Afgezien van het verschil in geometrische verhoudingen van de beide verwarmende oppervlakken en de verschillende specifieke belasting <sup>1)</sup>, is bovendien ook bij dezelfde belasting de temp. in den koelmantel veel lager dan die in de V.O.-ruimte.

De waarden van  $a_2$  (fig. 12) vertoonen een daling bij toenemende grenslaagtemp. Dit verschijnsel is het gevolg van twee elkaar tegenwerkende oorzaken, n.l.:  $a_2$  neemt toe met de temp. (§ 20) en neemt af bij stijgende belasting (§ 21). Aangezien  $a_2$  in fig. 12 een afname vertoont, overtreft het laatste effect blijkbaar het eerste.

R (fig. 13) laat een scherpe afname met de temp. zien. Dit is begrijpelijk, omdat de beide oorzaken, temp.stijging en verhoogen van de belasting, elk afzonderlijk reeds een effect in de aangegeven richting geven (§ 21).

<sup>1)</sup> V.O. : A.O. = 9 : 5.

Rekening houdend met de warmteverliezen van manometer, kranen, enz. geldt voor de twee meest gebruikte calorische belastingen de volgende tabel, waarin de in één kolom staande waarden bij elkaar behoreen:

	220 V	380 V
werkelijke V.O.-belasting . . . . .	1540	4350
spec. uitw. V.O.- " . . . . .	10700	30000
spec. inw. V.O.- " . . . . .	14000	40000
werkelijke A.O.- " . . . . .	1470	4230
spec. uitw. A.O.- " . . . . .	18400	52800
spec. inw. A.O.- " . . . . .	24000	69000

Het gedrag bij stijgende V.O.-belasting van een Haag-buis als geheel beschouwd, wordt tenslotte weergegeven door het gedrag van W (fig. 13) <sup>1)</sup>.

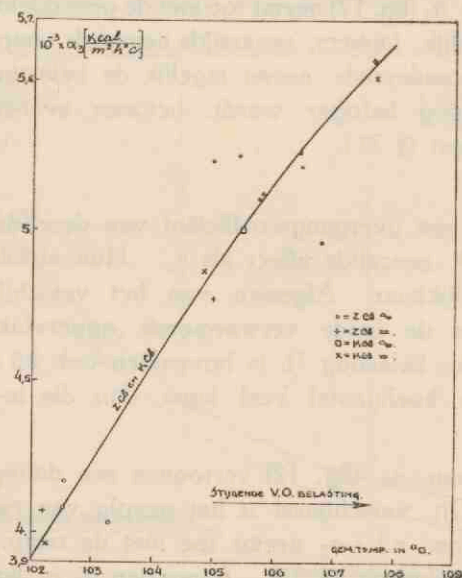


Fig. 14. Grafische voorstelling van  $\alpha_3$  als functie van de temperatuur, bij variabele belasting.  
[Verticaal, normaal watergekoeld A.O., middelbare vulhoogte (55 t/m 79 cm)]

Hieruit volgt, dat een Haag-buis (binnen de grenzen der beschreven experimenten) gunstiger gaat werken bij verhooging van de V.O.-belasting en dus, als weerstand beschouwd, een negatieve karakteristiek bezit.

## § 26. Vergelijking met de proeven van anderen en met de theorie van Nusselt.

*Herz-buis.* Erwin Herz (§ 3) beschrijft in zijn voordracht van 4 April 1894 (Lit. IV) een, eerst met kolen, later met watergas gestookt keteltje, werkend met soortgelijke elementen als de in voorgaande paragrafen beschreven proef-Haag-buis. De buizen van het keteltje

<sup>1)</sup> Het verloop van W is weer te verklaren als resulterend effect van het verloop der componenten  $\alpha_1$ , R en  $\alpha_2$ .

waren verticaal opgesteld. Het totale V.O. was gelijk aan het totale A.O. Zooals reeds in § 3 is opgemerkt, gebruikte Herz bij voorkeur zeer kleine vullingen „om zoo weinig mogelijk V.O. te onttrekken aan langstroomenden damp.”

Hij berekende, dat bij 5 atm. druk een vulling van  $1/360$  van het volume van de buis voldoende was om deze geheel met verzadigden damp te vullen; bij 10 atm.  $1/190$  van het volume. Veiligheidshalve vulde Herz zijn buizen voor ongeveer  $1/10$  (Lit. III). Herz ondernam zijn experimenten voornamelijk met het oog op het nuttig effect van zijn ketel en verrichtte dan ook geen temp. metingen aan de buizen zelf, doch bepaalde zich tot het meten van den dampdruk in één van zijn buizen, den dampdruk in den ketel en de temperatuur van de rookgassen. Omtrent het juiste gedrag van zijn buizen bleef hij derhalve in het onzekere. Toen hij bij zijn proeven last ondervond van het doorbranden der pijpen (aan de onderzijde), weet hij dit aan oververhitting van den damp door onvoldoende circulatie in de pijpen. Op grond van zijn onderstelling, dat het condensaat eerst zou afvloeien langs den A.O.-wand en zich dan zou contraheeren tot een dunne straal in de as van de buis<sup>1)</sup>, trachtte hij dit euvel te ondervangen door het aanbrenge van een circulatiebuis (met T-vormig bovenende). Op 13 Febr. 1914 werd hem dienaangaande een octrooi verleend (Lit. V).

Volgens de teekening in het patentschrift is de vulling van de buis nu ook grooter.

In de praktijk hebben de Herz-buizen echter geen ingang kunnen vinden.

Aan de hand van § 23 van dit proefschrift valt het niet moeilijk de desillusies van Herz te verklaren. De vulling van zijn buizen is beslist te gering (zie ook § 28, Hfdst. IV).

#### *Overgangscoefficiënt bij verdamping.*

De resultaten omtrent  $a_1$  en  $a_3$  uit de voorgaande paragrafen leveren in hoofdzaak samengevat een toename van  $a$  met de calorische belasting ( $Q$ ) en de temp. (dampdruk). De absolute waarden zijn, meer speciaal voor  $a_1$ , gelegen tusschen 4000 en 7000 kcal/m<sup>2</sup>,h,°C.

<sup>1)</sup> Een dergelijk verschijnsel is bij de proeven met de glazen Haagbuis (Lit. VII en VIII) nimmer geconstateerd. Volledigheidshalve moet hierbij echter opgemerkt worden, dat de calorische belasting bij deze proeven gering was.



Herz kon met zijn proefketel geen  $\alpha$ 's meten bij het V.O., wel echter een  $k$ -waarde berekenen voor den overgang van rookgassen op het inwendige van zijn buizen, zonder de tusschentrappen te bestudeeren. De voornaamste warmteweerstand zetelt hier in den overgang van rookgassen op de ijzeropp., waartegenover de geleidingsweerstand van het ijzer en de overgangswaerstand ijzer  $\rightarrow$  kokend water slechts een fractie uitmaken.

Aangezien eerstgenoemde overgangswaerstand in een ketel van vele factoren afhankelijk is, biedt de opgegeven  $k$ -waarde geen mogelijkheid tot het trekken van conclusies omtrent  $\alpha_1$ .

Metingen van anderen aan buizen, die overeenkomst met Haag-buizen vertoonen, zijn niet bekend.

Wel proeven op het gebied van verdamping in met water doorstroomde buizen van waterpijpketels. Zoo vond Cleve (Lit. XIX) bij modelproeven over den natuurlijken omloop in zulke ketels waarden voor  $\alpha$  gelegen tusschen 5000 en 11000 en evenals bij de Haag-buis gevonden is, een toename van  $\alpha$  bij toenemende belasting. Direct vergelijkbaar met de resultaten van de Haag-buis zijn deze proeven niet, omdat verhooging van de belasting bij een waterpijpketel tevens een verandering in den natuurlijken omloop teweeg brengt.

Proeven bij Sulzer in Winterthur aan buizen van 9 en 10 cm middellijn gaven  $\alpha$ -waarden van 4500 tot 4800, waarbij men in aanmerking dient te nemen, dat een grootere diameter  $\alpha$  ongunstig beïnvloedt.

Overigens loopen de resultaten van de verschillende onderzoekers sterk uiteen, Zoo vond Fehrmann, dat  $\alpha$  onafhankelijk was van den dampdruk (temp.), terwijl de meeste onderzoekers een duidelijk temp.-effect constateeren (Lit. II, 3e dr., Hfdst. E, § 2), n.l. een toename van  $\alpha$  met de temp., evenals bij de Haag-buis gevonden is.

Recente onderzoekingen van Kirschbaum (Lit. XIV en XV) aan een verticale verdampingsbuis leverden ook een duidelijk temp.effect in den zin als bij de Haag-buis gevonden is en ook een duidelijke toename van  $\alpha$  met de calorische belasting, n.l.  $\alpha = c Q^n$ . De dampdrukken bij deze proeven waren  $\leq 1$  atm. en bij het berekenen van  $\alpha$  ging Kirschbaum anders te werk als bij de Haag-buis is geschied. Hij berekende n.l. een schijnbare  $\alpha$  door het temp.verschil tusschen den buiswand en den damp in rekening te brengen, terwijl bij de Haagbuis de ware  $\alpha$  berekend is (temp.verschil tusschen wand en vloeistof). Kirschbaum vond bij  $Q = 30.000$  kcal/m<sup>2</sup>,h een  $\alpha$ -waarde van rond

5000 kcal/m<sup>2</sup>,h,°C. De damptemp. bedroeg hierbij slechts 100 °C, de dampdruk derhalve 1 ata.

### Condensatie.

#### a. *Vergelijking met de proeven van Herz.*

Uit den gemeten keteldruk en den gemeten druk in één van zijn transmissiebuizen (waardoor de temperaturen bekend zijn) was Herz ook bij het A.O. in staat een k-waarde op te geven voor den overgang van condenseerenden waterdamp via den ijzeren Herz-buiswand op het ketelwater. Bij die proeven, welke niet wegens oververhitting moesten worden gestaakt, vond hij doorgaans waarden voor k omstreeks 2800 <sup>1)</sup>).

Deze gemiddelde waarde laat zich vergelijken met de bij de Haag-buis gevonden getallen. Immers k stelt zich samen uit de componenten  $a_2$ , ijzerweerstand en  $a_3$ . Door toepassing van (2) en (4) volgt voor een cilindrischen wand:

$$\frac{1}{k r} = \frac{1}{a_2 r_i} + \frac{e \log \frac{r_u}{r_i}}{\lambda} + \frac{1}{a_3 r_u}.$$

Bij proefno. 9 was b.v.:  $a_2 = 9800$ ,  $\lambda = 51,0$  en  $a_3 = 5120$ , waaruit volgt  $k = 2490$ ;  $Q_h$  was 30.000 kcal/m<sup>2</sup>,h en de dampdruk bedroeg 2,50 ata.

Bij de beschouwde proeven van Herz was de dampdruk 5,0 tot 7,7 ata bij een stoomproductie van gemiddeld 44 kg/m<sup>2</sup>,h, overeenkomende met  $Q = 28000$  kcal/m<sup>2</sup>,h, keteldruk 2,5 — 5,4 atü. De getallen 2490 en 2800 leveren een goede overeenstemming op, in aanmerking nemende, dat zowel  $a_2$  als  $a_3$  bij hogere temp. gunstiger worden.

Voor zoover uit de publicatie is na te gaan, zijn de wanddikten bij het Herz-apparaat en de Haag-buis nagenoeg gelijkwaardig.

#### b. *Vergelijking met de theorie van Nusselt.*

Voor den warmteovergang in het geval van condenseerenden

<sup>1)</sup> Als k gedefinieerd wordt per vlakke-eenheid, d.w.z.  $Q_h = k O (t_1 - t_2)$  of voor een buis:  $Q_h = k 2 \pi r l (t_1 - t_2)$ .

waterdamp heeft Nusselt (Lit. XVI) langs theoretischen weg een formule afgeleid.

Bij het opbouwen van zijn theorie voor condenseerenden verzadigden waterdamp gaat hij uit van de veronderstelling, dat de geheele gekoelde oppervlakte bedekt wordt met een laagje condenswater, dat aan de wandzijde de temp. van den wand en aan de dampzijde de temp. van den verzadigden damp bezit. Het warmtetransport transversaal door dit vloeistoflaagje is bekend als men de dikte van het laagje kent. Deze laagdikte zal van boven naar onderen toenemen, omdat de vloeistof onder invloed van de zwaartekracht naar beneden zal trachten af te vloeien, welke beweging echter door de viscositeit en — voor het geval van tegenstroom — tevens door den dampstroom zal worden belemmerd. Het warmtetransport en daarmee de  $\alpha$  zal dus ook plaatselijk verschillend zijn. Door de laagdikte te berekenen komt Nusselt voor z.g.n. stilstaanden damp en voor het geval van een verticalen wand, hoogte  $h$  meter, gemiddeld over het geheele opp. tot de formule:

$$\alpha_m = 3395 \sqrt[4]{\frac{\rho \gamma^2 \lambda^3}{\eta h (t_d - t_w)}} \text{ kcal/m}^2\text{,h,}^\circ\text{C,}$$

waarin :

- $\rho$  = verdampingswarmte bij de verz. temp.,
- $\gamma$  = s.g. van het condensaat [ $\text{kg/m}^3$ ],
- $\lambda$  = warmtegeleidingscoëfficiënt van het condensaat [ $\text{kcal/sec.m,}^\circ\text{C}$ ],
- $\eta$  = viscositeit van het condensaat [ $\text{kg,sec/m}^2$ ],
- $t_d$  = damptemp.,
- $t_w$  = wandtemp.

In het geval van de Haag-buis is de onderstelling van een samenhangende condenswaterfilm gewettigd. Eenerzijds zal het ruwe ijzeropp. het ontstaan van een samenhangende condenswaterhuid bevorderen <sup>1)</sup>, anderzijds is de zeer gelijkmatige temp.verdeeling van het A.O., zooals die uit de tabellen blijkt een aanwijzing, dat vermoedelijk filmcondensatie

<sup>1)</sup> Proeven van Schmidt, Schürig en Sellschopp (Lit. XXI) en Erich Gnam (Lit. XXII).



en geen druppelcondensatie optreedt. Dit laatste geval gaat doorgaans gepaard met sterke plaatselijke temp.verschillen en plaatselijk zeer hoge  $\alpha$ 's (in een vert. buis 52000 — 127000; Lit. XXII). Ook de onderstelling „stilstaande damp” is voor een Haag-buis zeker aanvaardbaar. Weliswaar is de dampsnelheid in de buis niet nauwkeurig te berekenen, omdat men niet weet welk gedeelte van de overgedragen warmte door bespoeling wordt overgebracht, doch uit het totale warmtetransport kan men wel een schatting maken, n.l. door de maximumwaarde van de gemiddelde dampsnelheid te berekenen. Door aan te nemen, dat uitsluitend warmte aan het A.O. wordt afgestaan door condenseerenden verzadigden damp <sup>1)</sup>, volgt voor de dampsnelheid in de gebruikte proefbuis per 1000 kcal/h werkelijke V.O.-belasting:

bij een dampdruk van 1 ata:	$v = 0,74$ m/sec,
„ „ „ „ 5 ata:	$v = 0,18$ m/sec,
„ „ „ „ 10 ata:	$v = 0,10$ m/sec.

Bij de besproken proeven was de grootste werkelijke V.O.-belasting 6270 kcal/h, dus  $v < 5$  m/sec, wat met het oog op de theorie van Nusselt als practisch stilstaande damp kan worden beschouwd, omdat bij zulke kleine snelheden de schuifspanning aan de oppervlakte van de waterfilm te verwaarloozen is.

In onderstaande tabel zijn de uit de proeven (tabellen I t/m V) gevonden waarden van  $\alpha_2$  weergegeven naast de waarden, berekend volgens de formule van Nusselt. Hiertoe is voor de proeven bij middelbare en kleine vulling uit elke tabel een gemiddelde opgemaakt en wel: van de damptemp. in de A.O.-ruimte (kolom 1 van onderstaande tabel); van  $t_d - t_w$  (id. kolom 2); van de gemeten  $\alpha_2$ -waarden (id. kolom 4). Kolom 3 vermeldt de waarden van  $\alpha$ , berekend volgens Nusselt (dus uit de gegevens van de kolommen 1 en 2). In kolom 5 is nog weergegeven de factor, waarmee de waarde van Nusselt moet worden vermenigvuldigd om de gemeten  $\alpha_2$  te krijgen.

<sup>1)</sup> Met deze onderstelling volgt voor de condenswaterhoeveelheid, die naar beneden stroomt:

50 cm <sup>3</sup> per minuut bij de proeven met spec. V.O.-bel.	10.700 kcal/m <sup>2</sup> ,h,
150 cm <sup>3</sup> „ „ „ „ „ „ „ „ „	30.000 kcal/m <sup>2</sup> ,h.

	1	2	3	4	5
tabel	damptemp.	$t_d - t_w$	$\alpha_2$ berekend volgens Nusselt	gemiddelde waarde van $\alpha_2$ uit de proeven	$\alpha_2/a_{nu}$
I	125,5	7,12	7510	9895	1,32
II	178,8	5,58	8330	12420	1,49
III	109,7	2,37	9690	10165	1,05
IV	132,5	1,90	10600	12815	1,21
V	139,8	1,79	10800	13350	1,24

Bij vergelijking van de waarden uit de kolommen 3 en 4 valt allereerst op, dat de gemeten waarden allen grooter zijn, dan de volgens Nusselt berekende waarden. Afgezien echter van de absolute waarden, geeft de formule van Nusselt het verloop van  $\alpha$  met de temp. en de calorische belasting in den juisten zin weer; eenerzijds de stijging van  $\alpha$  met de temp. bij dezelfde belasting (overgang I  $\rightarrow$  II, overgang III  $\rightarrow$  IV  $\rightarrow$  V), anderzijds de afname van  $\alpha$  bij dezelfde temp. en toenemende calorische belasting (IV  $\rightarrow$  I).

De theorie van Nusselt verklaart verder zeer goed het temp.verloop van het A.O. over de hoogte.

Volgens zijn theorie zal de condenswaterfilm aan de bovenzijde van het A.O. dunner zijn dan aan de onderzijde. Rekent men in eerste benadering  $\alpha_3$  over de hoogte constant, dan volgt hieruit, dat aan de bovenzijde de warmtestroom en daarmee de temp.sprong ijzer  $\rightarrow$  kokend water (in B) grooter zal zijn, d.w.z. dat de ijzertemp. daar hoger is dan onderaan het A.O.

Inderdaad neemt bij alle proeven (middelbare en kleine vulling) uit de besproken tabellen de temp. met de hoogte duidelijk toe  $(\frac{9 + 12}{2} < \frac{10 + 13}{2} < \frac{11 + 14}{2})$ .

## HOOFDSTUK IV.

### DE BUIS MET CIRCULATIEBUIS IN VERTICALEN STAND.

#### § 27. Gebruikte circulatiebuizen.

Op analoge wijze als in Hfdst. III is beschreven, zijn proeven genomen met de Haag-buis, voorzien van een ijzeren circulatiepijp.

Onderzocht zijn twee verschillende circulatiebuizen van het in de praktijk reeds toegepaste model, een korte (hieronder aangeduid met K Cb) en een lange (aangeduid door L Cb), lengten resp. 120 en 145 cm. De K Cb reikt dus juist tot aan de grens van V.O. en A.O.; de L Cb zet zich nog 25 cm in de A.O.-ruimte voort. Beide buizen hebben een uitwendigen diameter van 25 mm, een inwendigen van 23 mm, zoodat tusschen de circulatiebuis en den binnenwand van de Haag-buis een ringvormige ruimte van 7 mm overblijft. Ter centreering zijn beide buizen voorzien van twee groepen van drie steunstrippen, elk 7 mm breed en 6 cm lang, waardoor de circulatiebuizen tevens klemmend in de Haag-buis passen. Voorts zijn beide aan de bovenzijde voorzien van een ijzeren lus om het inbrengen en uitlichten te vergemakkelijken. Als communicatie tusschen ringvormige ruimte en inwendige van de circulatiebuis zijn bij de K Cb aan de onderzijde twee 40 mm hooge poortvormige openingen uitgespaard en zijn tevens aan de boven-

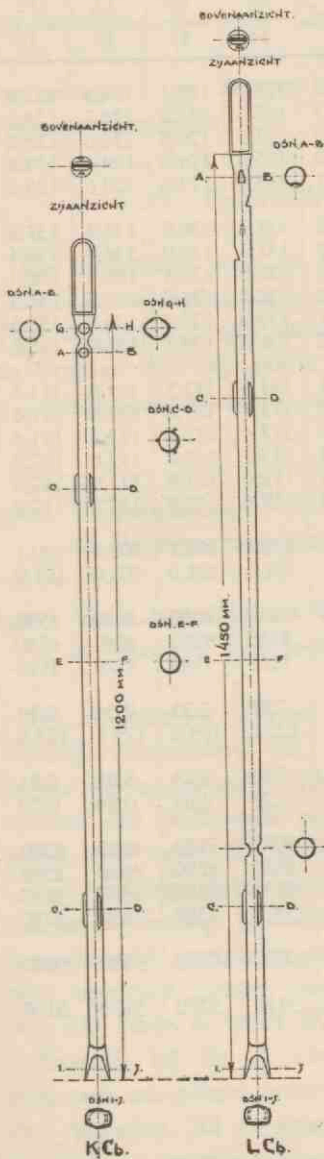


Fig. 15. Circulatiebuizen.



TABEL VII.

Proef-no.	L Cb.		Spec. uitw. V.O.-belasting 30.000 kcal/m <sup>2</sup> .h.								
	Verticaal.		64	65	66	67	68	69	70	71	72
Vulhoogte			140	113	93	80	65	55	45	25	16
1			136,9	134,7	127,5	127,5	126,2	125,7	125,1	124,9	125,9
2			138,5	134,7	127,5	127,6	126,3	125,8	125,0	124,7	124,7
3			138,4	134,4	127,3	127,2	125,9	125,5	124,8	124,6	124,8
4			137,7	133,4	126,5	126,4	125,0	125,0	124,6	124,6	124,8
5			111,0	114,7	123,6	126,4	125,1	124,9	124,6	124,6	124,8
6			150,0	145,8	138,8	139,4	137,8	137,3	136,6	136,4	157,5
16			150,2	145,7	138,6	139,6	137,8	137,3	137,0	136,9	139,4
7			148,8	145,2	138,4	138,9	137,2	136,9	135,4	136,4	136,3
17			149,2	145,2	138,5	139,0	137,1	136,8	136,0	137,0	136,9
8			148,8	144,8	138,2	137,8	136,2	135,9	135,3	136,6	135,5
18			149,0	145,8	138,8	137,9	136,2	136,0	135,7	136,0	135,8
9			114,1	113,3	112,0	112,3	111,8	111,6	111,5	111,6	111,5
12			113,9	112,7	111,5	112,0	111,8	111,7	111,6	111,6	111,6
10			112,3	112,5	111,9	112,6	112,0	112,4	111,7	111,5	111,6
13			113,3	113,3	111,8	111,9	111,8	112,5	111,6	112,0	112,0
11			110,5	111,1	111,6	111,9	111,9	112,0	111,9	111,9	112,0
14			109,2	110,5	111,7	111,9	112,3	112,4	112,0	112,0	112,0
15			100,4	100,2	100,2	100,1	100,0	100,1	100,1	100,0	100,1
mantel			101,0	101,0	101,0	101,1	101,1	101,1	101,0	101,0	101,0
input			4680	4650	4650	4700	4650	4650	4650	4590	4590
Q <sub>1</sub>			4330	4285	4255	4340	4280	4285	4295	4240	4240
Q <sub>2</sub>			4215	4170	4135	4220	4160	4165	4180	4120	4120
ata			3,43	3,06	2,47	2,48	2,39	2,37	2,33	2,34	2,34
verz. temp.			137,5	133,6	126,4	126,5	125,3	125,0	124,5	124,6	124,6
10 <sup>3</sup> W			8,68	7,85	6,39	6,23	5,95	5,82	5,73	5,93	6,81
10 <sup>4</sup> R			31,2	23,9	5,05	1,80	1,87	1,28	0,65	0,24	0,59
a <sub>1</sub>			5000	5150	4940	4930	5070	5070	5160	4610	3300
a <sub>6-16</sub>			4460	5190	5030	4740	4880	4880	4790	4610	1960
a <sub>7-17</sub>			5690	5510	5130	4950	5170	5110	5380	4530	4640
a <sub>8-18</sub>			5450	4960	4780	5280	5420	5470	5380	4690	5240
a <sub>2</sub>			11500	11800	9250	8500	9610	10000	10100	9890	9620
a <sub>3</sub>			5060	5000	5200	5180	5190	5110	5270	5170	5160

zijde een 6-tal gaten aangebracht. Bij de L Cb eveneens twee poortvormige openingen en voorts een 4-tal openingen aan de bovenzijde en een 2-tal gaten op 35 cm boven den bodem. Een en ander is in fig. 15 verduidelijkt. Als een Cb ingeplaatst is bevinden de meetplaatsen 2, 3 en 4 zich juist nog vrij in de ringvormige ruimte (zie fig. 5); de meetplaats 1 zit dan in het onderste deel van de Cb nabij de poortvormige openingen.

### § 28. Overzicht der overeenkomstige tabellen.

De resultaten van de proeven met de Haagbuis, voorzien van een Cb en in verticalen stand zijn samengevat in de tabellen VII t/m XIII. Ter vergelijking zijn hieronder de overeenkomstige tabelnummers met en zonder Cb bij gelijke spec. V. O.-belasting naast elkaar geplaatst.

	Z Cb	L Cb	K Cb
spec. V.O.-belasting 30.000 kcal/m <sup>2</sup> ,h id. Proeven met loodmantel	I	VII	VIII
	II	IX	X
spec. V. O.-belasting 10.700 kcal/m <sup>2</sup> ,h id. Proeven met loodmantel	III	XI	—
	IV	XII	XIII

Bij de tabellen VII en VIII is de vulling in bedrijfstoestand succesievelijk verminderd tot zich oververhitting bij één der meetplaatsen begon te openbaren. Deze treedt in beide gevallen onderin de buis op bij een vulhoogte van 16 cm (proeven nos. 72 en 77). In het geval van tabel IX is de vulling verminderd tot 20 cm (proefno. 83). Oververhitting deed zich toen nog niet voor. Daarna werd de elektrische verhitting gedurende 10 minuten gestaakt en daarna wederom ingeschakeld, zoodat de inmiddels tot ca. 100 °C (manteltemp.) afgekoelde buis opnieuw moest aanlopen. Ter illustratie is deze aanloopproef (no. 84) mede in tabel IX opgenomen.

Evenals bij de Z Cb-proeven reeds geconstateerd werd, stelt de buis zich nu geheel anders in dan even tevoren, hetgeen bij vergelijking van proefno. 83 en proefno. 84 overduidelijk blijkt. Terwijl proefno. 83 nergens oververhitting vertoonde, doet proefno. 84 dit bij de meetplaatsen 16, 7 en 17 (en 4), waardoor dus ook de *a*'s op deze plaatsen

TABEL VIII.

K Cb. Verticaal. Spec. uitw. V.O.-belasting 30.000 kcal/m<sup>2</sup>.h.

Proef-no.	73	74	75	76	77	78
Vulhoogte	136	112	83	60	38	16
1	162,0	136,0	127,1	126,1	124,9	124,5
2	162,2	135,8	126,9	125,7	124,1	132,3
3	162,2	135,6	126,7	125,4	123,8	123,4
4	160,6	134,8	126,1	124,8	123,6	123,4
5	109,0	112,5	124,5	124,9	123,6	123,4
6	172,6	146,9	138,5	137,4	136,3	184,3
16	172,9	146,8	138,4	137,5	136,5	192,0
7	172,4	146,6	138,4	137,2	135,4	135,3
17	172,0	146,7	138,3	137,2	135,2	134,2
8	170,8	145,2	137,0	135,9	134,9	134,9
18	171,3	145,6	137,2	136,4	135,4	135,2
9	115,9	112,0	111,2	111,7	110,8	110,8
12	115,1	111,9	111,2	111,8	110,7	111,0
10	109,2	111,4	111,3	111,6	111,1	111,2
13	106,7	112,4	112,0	111,4	111,2	111,2
11	109,9	109,8	111,5	111,7	111,1	110,9
14	108,5	108,5	111,3	111,3	111,1	110,8
15	99,9	99,7	99,4	99,3	99,0	99,0
mantel	100,1	100,1	100,1	100,2	100,0	100,0
input	4610	4610	4720	4720	4620	4620
Q <sub>1</sub>	4220	4255	4370	4350	4240	4250
Q <sub>2</sub>	4110	4140	4250	4230	4120	4130
ata	6,60	3,19	2,45	2,36	2,26	2,25
verz. temp.	161,8	135,0	126,1	124,9	123,5	123,3
10 <sup>3</sup> W	14,67	8,41	6,16	5,91	5,89	9,95
10 <sup>4</sup> R	63,9	28,0	3,20	1,49	1,18	5,88
a <sub>1</sub>	5700	5350	5170	5040	4800	1660
a <sub>6,16</sub>	5370	5210	5060	4960	4580	690
a <sub>7,17</sub>	5910	5210	5000	4920	4930	11600
a <sub>8,18</sub>	6360	5880	5600	5290	4840	4750
a <sub>2</sub>	3730	10200	9060	9690	10200	10600
a <sub>3</sub>	5150	5130	5050	5000	5050	5070



een scherpe wijziging ondergaan. Bekijkt men b.v. in tabel IX de waarden van  $\alpha_{7,17}$ , dan vertoonen deze bij verminderende vulling een voortdurende afname van 7310 tot 6190; bij de aanloopproef echter is  $\alpha_{7,17}$  plotseling veel kleiner, n.l. 2270 (constant).

### § 29. Invloed van de circulatiebuis op de inwendige temperatuurverdeling.

Vergelijkt men de inwendige temperaturen (1 t/m 5) uit de tabellen VII en VIII met de overeenkomstige Z Cb-waarden uit tabel I, dan valt allereerst het gewijzigd gedrag bij hooge vulling op. Terwijl bij Z Cb en K Cb de temperaturen in het V.O. en de dampdruk bij hooge vulling abnormaal sterk oploopen, resp. tot 7,2 en 6,6 kg/cm<sup>2</sup>, is dit bij L Cb niet meer het geval. De druktoename is hier veel geringer en de druk bereikt bij 140 cm vulhoogte slechts de waarde 3,43 kg/cm<sup>2</sup>. In overeenstemming daarmee is het temp.verval in de buis veel kleiner. Blijkbaar bevordert de lange Cb inderdaad de *vloeistofcirculatie*, terwijl de korte Cb hiertoe niet in staat is.

Bij de proeven met loodmantel (tab. IX en X) is het verschil tusschen L Cb en K Cb minder sprekend; vergelijkt men met tabel II, dan valt echter ook hier de verbetering op, die de Cb bewerkstelligt.

Het gedrag van de meetplaats 1 t.o.v. 2 is voorts een aanwijzing voor het bestaan van een vloeistofcirculatie bij hooge vulling. Bij de Z Cb-proeven is steeds  $1 > 2$ , terwijl bij de proeven met Cb (vooral met L Cb) de temp. van 1 belangrijk lager is dan die van 2. Dit zou te verklaren zijn uit een kouderen vloeistofstroom, die onder uit de Cb treedt en langs het V.O. weer opstijgt, terwijl bij afwezigheid van een Cb zich onderin de buis een hoeveelheid water verzamelt, die moeilijk circuleeren kan. Zekerheid hieromtrent heeft men niet, want het kouder aanwijzen van 1 kan ook het gevolg zijn van een afschermen van meetplaats 1 door de Cb (die immers meetplaats 1 gedeeltelijk omgeeft en slechts twee poortjes vrij laat).

Bij normale en kleine vulling is de invloed van de Cb op de inwendige temp.verdeeling gering. Ook hier bestaat doorgaans een soortgelijk verschil in gedrag van 1 t.o.v. 2 tusschen de proeven zonder Cb en met Cb, hetgeen op een circulatie zou kunnen wijzen; waartegen echter weer dezelfde bedenking geldt als hierboven reeds werd genoemd.

Het gedrag bij zeer geringe vulling pleit tegen het bestaan van een regelmatige circulatie door het inwendige van de Cb. Zoals reeds

TABEL IX.

L Cb. Verticaal. Loodmantelproeven. Spec. uitw. V.O.-belasting 30.000 kcal/m<sup>2</sup>,h.

Proef-no.	79	80	81	82	83	84
Vulhoogte	140	110	80	50	20	20 A
1	195,3	186,5	184,6	181,8	181,5	182,2
2	196,1	186,4	184,5	181,8	181,3	182,2
3	195,9	186,3	184,4	181,7	181,4	182,2
4	195,4	185,6	183,7	181,8	181,5	184,2
5	162,7	185,4	183,8	181,8	181,4	182,5
6	205,7	196,3	194,3	191,9	191,4	192,9
16	205,7	196,4	194,3	192,4	192,6	199,5
7	205,4	196,4	194,2	191,8	191,7	210,3
17	205,3	196,0	194,6	191,9	191,8	196,8
8	205,0	195,9	193,7	191,5	190,7	192,0
18	205,2	195,9	193,9	191,6	190,8	191,9
9	179,5	172,8	171,4	169,4	169,3	170,4
12	179,7	172,9	171,2	170,2	169,8	171,1
10	173,3	170,5	170,6	169,8	169,3	170,1
13	171,3	169,7	171,2	169,9	169,4	170,1
11	149,3	165,7	169,4	170,4	170,1	171,8
14	149,8	165,8	169,6	169,8	169,2	170,7
15	100,4	100,2	100,2	99,9	100,1	100,0
mantel	100,8	100,8	100,8	100,8	100,8	100,8
input	4900	4900	4900	4880	4880	4880
Q <sub>1</sub>	4490	4500	4465	4500	4485	4485
Q <sub>2</sub>	4350	4345	4310	4345	4335	4335
ata	14,25	11,64	11,17	10,64	10,52	10,80
verz. temp.	195,0	185,7	183,9	181,7	181,2	182,4
10 <sup>3</sup> W	8,65	6,01	5,38	4,96	4,98	6,02
10 <sup>4</sup> R	37,0	1,56	1,23	0	0	—
$\alpha_1$	6880	6620	6630	6480	6460	3790
$\alpha_{6-16}$	6550	6720	6810	6200	5970	3980
$\alpha_{7-17}$	7310	6780	6590	6500	6190	2270
$\alpha_{8-18}$	7250	6670	6810	6820	7430	8170
$\alpha_2$	13000	7520	10400	13200	12900	11400

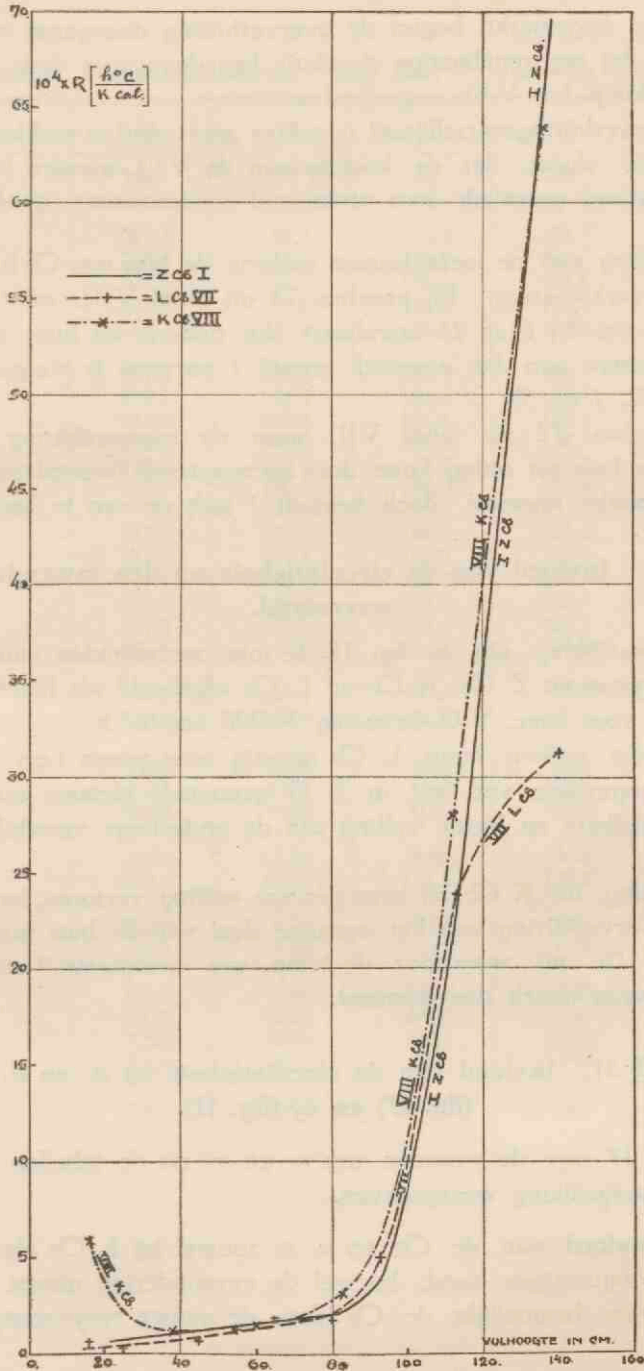


Fig. 16. Grafische voorstelling van den invloed van de Cb op R (verticaal).



in § 28 is opgemerkt, begint de oververhitting doorgaans onderin de buis, wat bij een regelmatige circulatie benedenwaarts door de Cb en opwaarts langs het V.O. ongerijmd is.

Dit oververhittingsverschijnsel is echter zeer goed te verklaren, indien aangenomen wordt, dat de koeling van de V.O.-wanden (althans bij geringe vulling) geschiedt door afvloeiend condenswater (zie Hfdst. V).

Het gedrag van de meetplaatsen onderin de buis met Cb is overigens ook zeer merkwaardig. Bij proefno. 78 uit tabel VIII, waar de oververhitting zich bij 6 en 16 openbaart, dus onderin de buis, wijst 2 een hogere temp. aan dan normaal, terwijl 1 normaal is (vergeleken met proefno. 77, 1 en 3).

Bij proefno. 72 uit tabel VII, waar de oververhitting eveneens onderin de buis tot uiting komt, doch asymmetrisch (meetplaats 6 alleen), is 2 volmaakt normaal, doch bevindt 1 zich op een te hoog niveau.

### § 30. Invloed van de circulatiebuis op den inwendigen weerstand.

Ter vergelijking zijn in fig. 16 de inw. weerstanden van overeenkomstige proeven Z Cb, K Cb en L Cb afgebeeld als functie van de vulhoogte voor spec. V.O.-belasting 30.000 kcal/m<sup>2</sup>,h.

Bij groote vulling komt L Cb gunstig naar voren t.o.v. Z Cb en K Cb, tengevolge van het in § 29 genoemde kleinere temp.verval.

Bij middelbare en kleine vulling zijn de onderlinge verschillen onbeduidend.

De stijging, die K Cb bij zeer geringe vulling vertoont, hangt samen met de oververhitting van het onderste deel van de buis (proefno. 78, vulhoogte 16 cm), waardoor de temp. van meetplaats 2 zich op een hoger niveau instelt dan normaal.

### § 31. Invloed van de circulatiebuis op $a_1$ en $a_2$ (fig. 17) en $a_3$ (fig. 11).

In fig. 17 zijn de waarden van  $a_1$  en  $a_2$  uit de tabellen I, VII en VIII ter vergelijking weergegeven.

$a_1$ . De invloed van de Cb op  $a_1$  is zoowel bij L Cb als bij K Cb van ongunstigen aard, hoewel de vermindering uiterst gering is. Blijkbaar bemoeilijkt de Cb (door de nauwe ringvormige ruimte)

TABEL X.

K Cb. Verticaal. Loodmantelproeven. Spec. uitw. V.O.-belasting 30.000 kcal/m<sup>2</sup>,h.

Proef-no.	85	86	87	88	89
Vulhoogte	140	110	88	77	55
1	203,3	187,2	176,4	178,5	179,5
2	203,4	187,2	176,7	178,7	179,3
3	203,4	187,2	176,6	178,6	179,2
4	202,7	186,6	176,2	178,0	179,1
5	159,2	181,0	176,1	178,0	178,8
6	213,2	197,2	186,1	188,7	189,5
16	213,2	197,3	186,3	188,9	189,5
7	212,9	197,2	186,1	188,9	189,6
17	212,8	197,0	186,3	188,7	189,1
8	212,6	196,7	185,7	188,0	188,8
18	212,9	196,9	186,0	187,9	188,7
9	182,0	173,1	164,0	165,2	166,5
12	182,2	171,8	163,7	165,0	166,7
10	171,1	170,2	164,1	165,5	166,8
13	170,0	170,4	164,3	165,7	166,7
11	141,2	165,9	164,5	166,1	167,0
14	143,6	166,0	164,4	166,0	167,0
15	100,5	100,4	100,0	99,8	99,8
mantel	100,8	100,8	100,5	100,5	100,5
input	4960	4960	4650	4880	4880
Q <sub>1</sub>	4510	4575	4260	4435	4475
Q <sub>2</sub>	4370	4430	4110	4280	4325
ata	16,74	11,86	9,46	9,82	10,03
verz. temp.	202,6	186,6	176,6	178,2	179,1
10 <sup>3</sup> W	17,91	6,10	5,24	5,26	5,10
10 <sup>4</sup> R	49,3	7,10	0,77	1,01	0,74
a <sub>1</sub>	6910	6750	6420	6340	6590
a <sub>6-16</sub>	6830	6700	6410	6220	6400
a <sub>7-17</sub>	7250	6870	6520	6310	6450
a <sub>8-18</sub>	7000	6870	6570	6790	7010
a <sub>2</sub>	7550	9500	11400	11600	12200

de vloeistofbeweging in de grenslaag in meerdere mate, dan dat deze Cb een mogelijk aanwezige grove vloeistofcirculatie bevordert. De condities voor de vloeistofbeweging zijn plaatselijk verschillend, wat ook duidelijk uit het verloop der plaatselijke  $a$ 's blijkt (zie hiervoor § 33 en fig. 19).

Bij geringe vulling duidt de afname van  $a_1$  weer op plaatsen in het V.O. met sterk verminderde warmteoverdracht (oververhitte plaatsen).

$a_2$ . Bij middelbare en geringe vulling zijn de waarden van  $a_2$  vrijwel onafhankelijk van het al of niet aanwezig zijn van een Cb. Dit

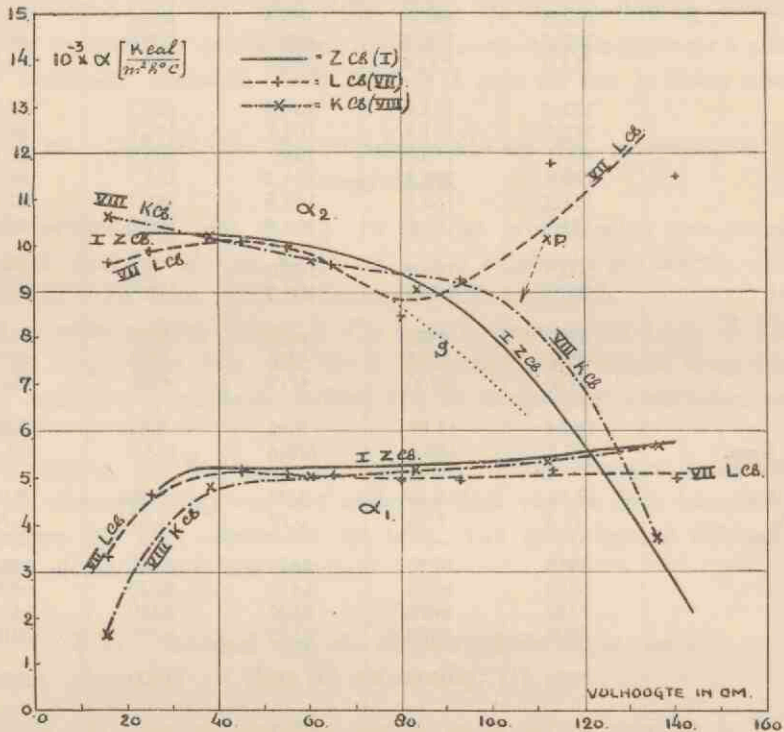


Fig. 17. Grafische voorstelling van den invloed van de Cb op  $a_1$  en  $a_2$  (verticaal).

is begrijpelijk, want de condensatie tegen den A.O.-wand zal weinig invloed ondervinden van een Cb, zoolang de dampnelheid in de ringvormige ruimte niet van zoodanige grootte is, dat zich



TABEL XI.

L Cb. Verticaal. Spec. uitw. V.O.-belasting 10.700 kcal/m<sup>2</sup>.h.

Proef-no.	90	91	92	93	94	95	96	97
Vulhoogte	135	116	95	80	65	60	39	30
1	113,2	112,7	112,2	112,1	111,7	111,7	111,6	111,3
2	112,4	112,1	110,7	110,7	110,3	110,3	110,4	110,1
3	112,2	111,6	110,5	110,4	110,1	110,1	110,0	109,9
4	111,8	111,2	110,2	110,3	109,9	110,1	110,1	109,9
5	108,7	109,7	108,9	108,7	108,8	108,6	108,7	108,5
6	119,5	118,2	116,3	115,9	115,7	115,5	115,4	115,1
16	120,0	118,7	116,2	115,9	115,5	115,3	115,3	115,0
7	117,3	116,5	115,2	115,1	114,5	114,6	114,9	127,5
17	117,1	116,5	115,1	115,0	114,6	114,5	114,7	122,4
8	116,6	116,0	115,1	114,9	114,7	114,7	116,8	116,3
18	116,8	116,2	115,1	115,0	114,6	114,9	116,5	116,4
9	104,9	104,7	105,0	105,0	105,1	104,7	104,8	104,9
12	105,1	105,0	104,8	104,9	104,9	104,8	104,9	104,9
10	105,2	104,8	104,9	104,9	105,3	105,0	105,0	105,2
13	104,5	104,3	104,3	104,6	104,9	105,0	105,1	105,4
11	105,0	105,0	105,3	105,3	105,6	105,1	105,3	105,0
14	104,5	104,9	105,5	105,6	105,4	105,0	105,0	105,4
15	99,6	99,9	99,5	99,7	99,5	99,5	99,5	99,5
mantel	100,2	100,3	100,4	100,4	100,4	100,3	100,3	100,3
input	1670	1670	1650	1620	1610	1620	1630	1640
Q <sub>1</sub>	1550	1530	1510	1500	1500	1495	1495	1535
Q <sub>2</sub>	1480	1465	1440	1435	1430	1430	1425	1465
ata	1,49	1,48	1,46	1,48	1,45	1,47	1,47	1,47
verz. temp.	110,5	110,4	110,0	110,4	109,8	110,1	110,1	110,1
10 <sup>3</sup> W	8,59	8,17	7,14	6,98	6,64	6,83	7,25	9,10
10 <sup>4</sup> R	13,87	9,48	8,94	9,20	7,67	8,03	7,56	7,17
a <sub>1</sub>	3340	3610	4090	4280	4270	4330	3520	1930
a <sub>6-16</sub>	2480	2910	3920	4170	4050	4290	4340	4510
a <sub>7-17</sub>	3870	4170	4150	4240	4370	4360	4010	1020
a <sub>8-18</sub>	4100	4050	3970	4110	3990	3920	2550	2690
a <sub>2</sub>	7420	6690	9360	9990	11200	9830	10200	12500
a <sub>3</sub>	4240	4380	4220	4130	3970	4130	4030	4050

een merkbare schuifspanning op de afvloeiende condensaatfilm doet gelden.

Bij hooge vulling valt het afwijkend gedrag van  $a_2$  bij L Cb op. Aanvankelijk heeft de  $a_2$ -curve hier de neiging de stippellijn S te volgen, naar analogie van de krommen I en VIII, maar buigt dan plotseling naar boven. Dat dit geen toevalligheid is, maar een verschijnsel, dat typisch door de circulatiebuis veroorzaakt wordt, blijkt uit het verloop van  $a_2$  bij de overeenkomstige serie proeven met loodmantel (tabel IX). Hier vertoont  $a_2$  een soortgelijk verschijnsel; bij stijgende vulling een afname tot 7520 en daarna weer een stijging tot 13000. Een verandering in de inwendige circulatie, veroorzaakt door de Cb boven een zekere vullingsgrens moet hier de oorzaak zijn. Men vergelijk ook de afwijkende ligging van het bij kromme VIII behorende punt P.

- $a_3$ . Zoals reeds in § 22 is opgemerkt, zijn de waarden van  $a_3$  bij normale vullingen onafhankelijk van het al of niet aanwezig zijn van een Cb, omdat de warmteoverdracht van ijzer A.O. op het kokende water in den mantel met de Cb weinig uitstaande heeft.

### § 32. Invloed van de circulatiebuis op W (fig. 18).

Het gedrag van den totalen buisweerstand volgt reeds uit hetgeen in de paragrafen 30 en 31 over de componenten van W is gezegd.

In het gebied der middelbare vullingen, dus het voor de normale Haag-buispraktijk in aanmerking komende gebied, zijn de verschillen practisch van geen belang.

Voor hoogge vulde buizen heeft het aanbrengen van een L Cb een duidelijk gunstig effect. Het aanbrengen van een K Cb heeft weinig zin. Dit laatste volgt zoo mogelijk nog duidelijker uit het overzicht, gegeven in tabel VI (Hoofdstuk III), waar de uitkomsten van een aantal overeenkomstige proeven Z Cb en K Cb bij gevarieerde gelijkstroombelasting zijn weergegeven. Uit de bijbehorende figuren 12 t/m 14 blijkt overduidelijk, dat het aanbrengen van een K Cb in het onderzochte gebied geen noemenswaardige verandering geeft. Volledigheidshalve dient echter opgemerkt te worden, dat gevallen van een abnormale circulatie als bij Z Cb-proefno. 14 (dus bij reeds weinig minder dan middelbare vulling) zich bij proeven met Cb nimmer hebben

TABEL XII.

L Cb. Verticaal. Loodmantelproeven. Spec. uitw. V.O.-belasting 10.700 kcal/m<sup>2</sup>.h.

Proef-no.	98	99	100	101	102
Vulhoogte	142	114	80	50	23
1	138,6	136,9	136,4	136,2	136,7
2	139,0	137,1	136,4	136,2	135,5
3	139,0	137,1	136,0	135,7	135,6
4	138,8	136,9	135,4	135,8	135,7
5	133,1	135,4	135,7	135,7	135,6
6	143,8	141,9	140,8	140,7	140,1
16	143,7	141,7	140,8	140,7	140,1
7	143,5	141,5	140,6	140,4	139,9
17	143,5	141,5	140,7	140,3	139,8
8	143,4	141,8	140,2	140,2	140,1
18	143,4	141,3	140,2	139,9	140,1
9	133,4	131,9	131,0	131,5	131,5
12	133,7	131,9	131,4	131,5	131,4
10	131,7	130,9	131,5	131,4	131,4
13	131,6	130,9	131,5	131,5	131,5
11	127,8	131,5	131,9	131,8	131,7
14	128,2	131,5	131,8	131,7	131,7
15	100,1	100,1	100,2	100,3	100,2
mantel	100,2	100,2	100,4	100,4	100,4
input	1690	1690	1690	1720	1720
Q <sub>1</sub>	1565	1560	1540	1570	1580
Q <sub>2</sub>	1490	1485	1465	1495	1505
ata	3,49	3,31	3,26	3,25	3,25
verz. temp.	138,1	136,3	135,8	135,7	135,7
10 <sup>3</sup> W	8,17	6,69	6,01	5,74	5,50
10 <sup>4</sup> R	18,53	5,45	3,25	1,46	1,46
a <sub>1</sub>	4170	4250	4340	4620	5060
a <sub>6-16</sub>	3890	4030	4470	4460	5330
a <sub>7-17</sub>	4430	4550	4410	4680	4870
a <sub>8-18</sub>	4430	4340	4340	4840	4640
a <sub>2</sub>	8930	9400	12500	12100	12600



voorgedaan. Oververhitting werd hier uitsluitend geconstateerd bij zeer geringe vullingen.

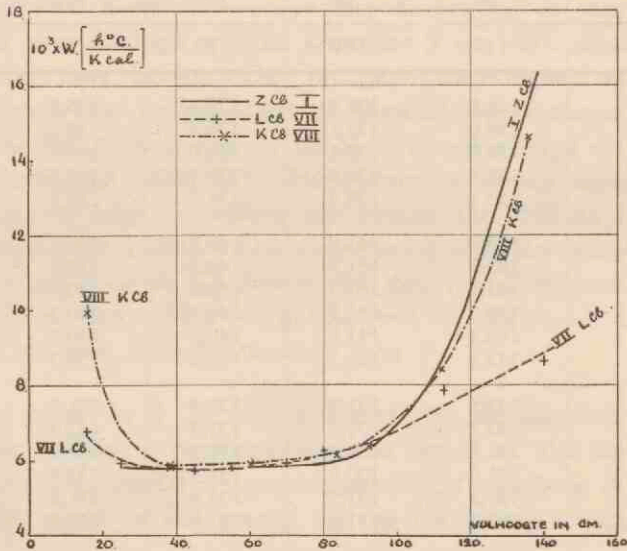


Fig. 18. Grafische voorstelling van den invloed van de Cb op W (verticaal).

### § 33. Invloed van de circulatiebuis op de plaatselijke overgangscoefficienten.

Door het inplaatsen van een Cb zal uiteraard de vloeistof-dampstrooming, die in de V. O.-ruimte tengevolge van het koken ontstaat, een wijziging ondergaan. Om den invloed hiervan op de plaatselijke overgangscoefficienten  $\alpha_{6,16}$ ,  $\alpha_{7,17}$  en  $\alpha_{8,18}$  te onderzoeken, is in fig. 19 een overzicht gegeven van het verloop van deze grootheden.

Als voorbeeld zijn hier genomen de proeven met loodmantel Z Cb, L Cb en K Cb bij spec. V. O.-belasting  $30.000 \text{ kcal/m}^2\text{h}$ , derhalve de waarden uit de tabellen II, IX en X.

Bij de Z Cb-krommen ziet men, dat bij hooge vulling  $\alpha_{6,16}$  en  $\alpha_{7,17}$  een sterk accres vertoonen tengevolge van de hoogere temp., die onderin de buis bij hooge vulling heerscht (§ 19).

Bij de L Cb- en K Cb-krommen is dit accres veel geringer, omdat hier bij hooge vulling de temp. in de V.O.-ruimte veel minder sterk oploopt; de coëfficiënt  $\alpha_{6,16}$  blijkt in dit geval de kleinste te zijn. Blijkbaar

TABEL XIII.

K Cb. Verticaal. Loodmantelproeven. Spec. uitw. V.O.-belasting 10.700 kcal/m<sup>2</sup>.h.

Proef-no.	103	104	105	106	107	108
Vulhoogte	152	127	104	86	64	50
1	153,0	136,9	135,5	134,6	132,7	132,8
2	153,4	137,4	136,0	134,9	132,9	131,8
3	153,3	137,2	135,8	134,7	132,7	131,6
4	152,6	136,8	135,4	134,4	132,4	131,4
5	120,9	133,3	133,3	132,8	132,0	131,2
6	156,9	141,9	140,4	139,2	137,1	136,2
16	157,6	141,9	140,5	139,3	137,2	136,1
7	157,4	141,7	140,3	139,1	137,0	135,9
17	157,6	141,7	140,3	139,0	137,0	135,9
8	157,2	141,7	140,1	138,9	136,9	135,9
18	157,3	141,5	140,1	138,9	136,9	135,6
9	141,3	131,0	130,1	129,3	127,9	127,5
12	140,8	131,0	130,0	129,4	128,3	127,8
10	128,6	129,5	129,5	129,6	128,2	127,8
13	127,4	129,2	129,6	129,8	128,1	127,4
11	112,9	127,2	129,8	128,8	128,6	127,8
14	113,3	126,6	129,3	128,9	128,3	127,7
15	100,0	99,9	99,9	99,8	100,0	99,9
mantel	100,2	100,2	100,2	100,2	100,3	100,3
input	1670	1670	1680	1640	1640	1640
Q <sub>1</sub>	1555	1535	1555	1510	1495	1490
Q <sub>2</sub>	1485	1455	1475	1430	1415	1410
ata	5,20	3,33	3,22	3,15	2,95	2,88
verz. temp.	152,5	136,5	135,3	134,6	132,3	131,5
10 <sup>3</sup> W	19,70	8,53	6,97	6,65	6,04	5,70
10 <sup>4</sup> R	105,0	13,22	8,55	6,95	3,21	4,03
a <sub>1</sub>	4780	4120	4260	4310	4360	4840
a <sub>6,16</sub>	5130	4070	4190	4270	4350	5170
a <sub>7,17</sub>	5040	4490	4530	4550	4570	4560
a <sub>8,18</sub>	4780	4190	4380	4480	4420	4480
a <sub>2</sub>	3360	6160	9630	10700	12400	14900

hindert de Cb de vloeistofbeweging in het onderste deel van de buis.  $a_{8,18}$  gedraagt zich hier evenals  $a_{7,17}$ , terwijl in het geval Z Cb bij

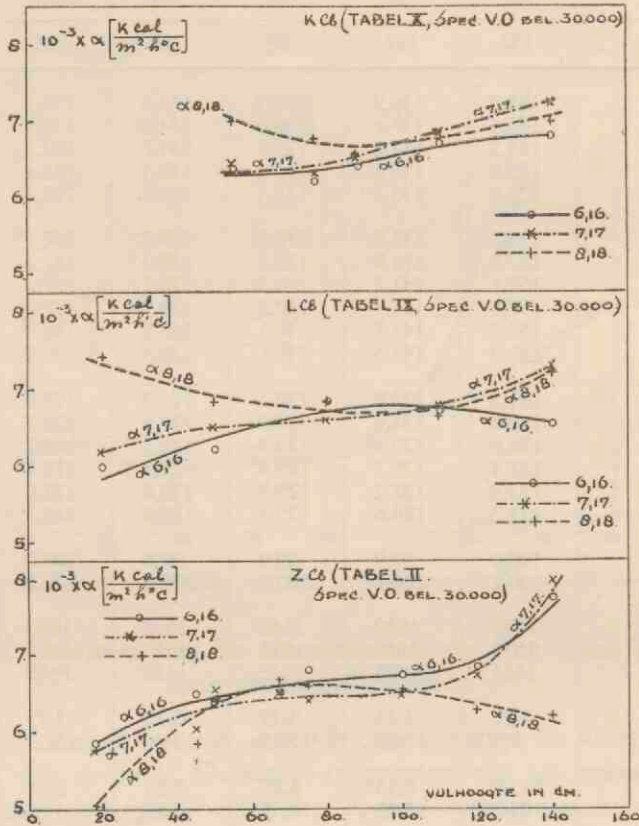


Fig. 19. Grafische voorstelling van den invloed van de Cb op de plaatselijke  $a$ 's van het V.O. (verticaal).

hooge vulling  $a_{8,18}$  juist afneemt. De vloeistofbeweging in deze bovenste zone van het V.O., die bij Z Cb sterk belemmerd wordt, ondergaat klaarblijkelijk door het inplaatsen van een Cb een belangrijke verbetering. Dit verschijnsel werd reeds uit anderen hoofde geconstateerd in § 29.

In het gebied der middelbare vullingen ontkoopen de plaatselijke  $a$ 's elkaar zeer weinig.

Bij geringe vulling worden de onderlinge verschillen weer grooter. Bij de proeven met Cb komt  $a_{8,18}$  hier sterker naar voren, terwijl de



koeling van het onderste deel van de buis blijkbaar minder goed wordt, waarschijnlijk doordat het afvloeiend condenswater dit deel niet goed meer bereiken kan.

Bij het geval Z Cb nemen alle  $a$ 's bij kleine vulling af.

Het verloop van de plaatselijke  $a$ 's bij de proeven zonder loodmantel, spec. V. O.-belasting 30.000 kcal/m<sup>2</sup>,h (tabellen I, VII en VIII) is in hoofdzaak volkomen analoog.

Bij kleinere belasting (spec. V.O.-bel. 10.700 kcal/m<sup>2</sup>,h; tabellen III, IV, XI, XII en XIII) treden eenige afwijkingen van het verloop in fig. 19 op. Bij deze belasting belemmert het aanbrenge van een circulatiebuis, vooral onderin, de overdracht, getuige het lage niveau van  $a_{6,16}$  (zie  $a_{6,16}$  in de tabellen XI, XII en XIII).

### § 34. Conclusie.

In het gebied der onderzochte calorische belastingen heeft het aanbrenge van een circulatiebuis alleen een gunstig effect bij hoogge vulde buizen, mits de circulatiebuis tot in het A. O. reikt.

Voor de practisch in aanmerking komende vullingen (middelbare vullingen) blijkt het aanbrenge van een circulatiebuis geen voordeelen te bezitten wat de warmteoverdracht betreft.

Oververhitting doet zich bij de buis met circulatiebuis alleen voor bij zeer geringe vullingen.

## HOOFDSTUK V.

### DE HAAG-BUIS IN HELLENDEN STAND.

#### § 35. Algemeene beschouwing.

Dezelfde Haag-buis is ook in hellenden stand onderzocht voor de spec. V.O.-belastingen  $30.000 \text{ kcal/m}^2\text{,h}$  en  $10.700 \text{ kcal/m}^2\text{,h}$ ; in beide gevallen onder hoeken van  $60^\circ$  en  $30^\circ$  met den horizon, zoowel zonder circulatiebuis als met L Cb en K Cb. Voorts zijn evenals bij verticale stand een aantal proeven met loodmantel genomen.

Op overeenkomstige wijze als voor de verticale buis zijn de inwendige weerstand  $R$ , de totale weerstand  $W$  en de warmteovergangscoefficienten  $a_1$ ,  $a_2$  en  $a_3$  berekend.

Zooals uit de tabellen XIV t/m XX blijkt, zijn de temperaturen in het ijzer van V.O. en A.O. aan de boven- en onderzijde niet gelijk. Om deze reden zijn dan ook voor het V.O. niet zooals bij de verticale buis  $a_{6,16}$ ,  $a_{7,17}$  en  $a_{8,18}$  berekend, doch zijn de bovenzijde en de onderzijde van de buis afzonderlijk beschouwd door op te maken  $a_{6,7,8}$  en  $a_{16,17,18}$ . Ter verduidelijking zij verwezen naar fig. 20, waar voor hellenden stand de plaatsing der thermo-elementen nog eens is afgebeeld; 6, 7 en 8 bevinden zich aan de bovenzijde, 16, 17 en 18 aan de onderzijde van de buis. Daar de buis electrisch verhit wordt, mag worden ondersteld, dat ten naaste bij de helft van het door het V.O. opgenomen aantal kcal door de linker- (dus boven-) zijde van de buis, de andere helft door de rechter- (dus onder-) zijde van de buis gepasseerd zal zijn (fig. 20).

Op grond van deze onderstelling is de berekening van  $a_{6,7,8}$  als volgt geschied: het gem. temp.verschil tusschen linkerhelft ijzeren V.O.-wand en de inwendige V.O.-ruimte =

$$\frac{6 + 7 + 8}{3} - \frac{1 + 2 + 3 + 4}{4};$$

hiervan af te trekken het temp.verval  $\Delta t$  in den ijzeren wand (zie § 18) en dit verschil te deelen door het gepasseerde aantal kcal/h. Idem voor  $a_{16,17,18}$ . De berekening van  $a_{6,7,8}$  en  $a_{16,17,18}$  voor den halven

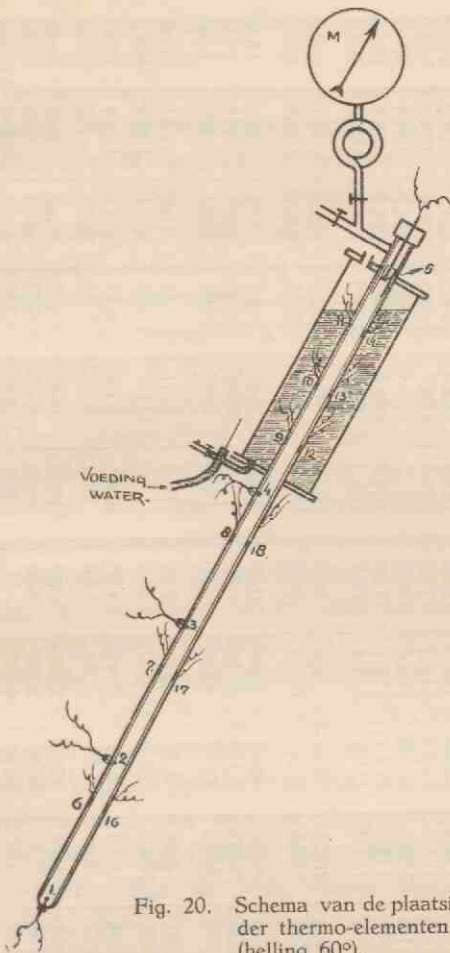


Fig. 20. Schema van de plaatsing der thermo-elementen (helling 60°).

buiswand is dus op volkomen analoge wijze geschied als van  $a_1$  voor den vollen omtrek.

De proeven in hellenden stand kunnen verdeeld worden in twee groepen :

- a. zonder circulatiebuis (tabellen XIV A en B, XV A en B, XVI A en B).
- b. met circulatiebuis (tabellen XVII A en B, XVIII A en B, XIX A en B, XX A en B).

In de betreffende tabellen zijn telkens samengevat de overeenkomstige proeven bij spec. V.O.-belasting 30.000 kcal/m<sup>2</sup>,h en 10.700 kcal/m<sup>2</sup>,h, resp. genoemd A en B.

a. *Zonder circulatiebuis.*

### § 36. Temperatuurverdeling en oververhitting.

Bij beschouwing van de temperaturen van het V.O. blijkt allereerst (voor de niet-oververhitte meetplaatsen) dat de temp. aan de onderzijde altijd hooger is dan die op de diametraal daartegenover gelegen meetplaats aan de bovenzijde. Zoo is altijd  $16 > 6$ ,  $17 > 7$ ,  $18 > 8$ . Het temp.verschil tusschen bovenzijde V.O. en inwendige V.O.-ruimte is dus steeds kleiner dan dat tusschen onderzijde V.O. en inw. V.O.-ruimte <sup>1)</sup>. Blijkbaar heerscht aan de bovenzijde van de hellende buis

<sup>1)</sup> Hierbij dient echter opgemerkt te worden, dat de inw. temperaturen 1 t/m 4 uitsluitend aan de bovenzijde gemeten zijn.



TABEL XIV.

Z. Cb.

Helling 60°.

Proef-no.	A: Spec. uitw. V.O.-bel. 30.000 kcal/m <sup>2</sup> .h.					B: Spec. uitw. V.O.-bel. 10.700 kcal/m <sup>2</sup> .h.						
	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120
Vulhoogte	134	114	92	70	50	35	135	114	92	71	51	42
1	152,8	132,6	128,5	125,9	124,9	124,5	116,0	113,5	112,6	111,4	110,8	110,6
2	151,3	131,4	127,5	124,5	123,5	123,2	114,9	112,1	111,2	110,0	109,3	109,1
3	151,1	131,2	127,2	124,3	123,3	166,2	114,7	112,0	110,8	109,6	108,9	128,8
4	149,2	130,6	126,5	123,8	123,2	147,5	113,9	111,3	110,2	109,3	115,4	118,0
5	117,8	121,1	125,5	123,9	123,1	122,9	108,2	110,2	110,0	109,2	109,0	110,3
6	162,4	142,4	138,5	135,9	135,0	134,5	119,8	117,1	116,1	115,0	114,4	114,1
16	164,1	143,8	139,8	137,4	136,4	136,5	120,2	117,6	116,6	115,2	114,6	114,4
7	160,3	140,9	137,2	134,8	133,9	182,4	119,0	116,3	115,3	114,0	113,4	123,6
17	160,4	141,1	137,2	135,0	134,0	135,3	119,1	116,4	115,4	114,1	113,6	113,8
8	160,7	141,2	137,4	134,6	134,6	299,2	118,4	115,8	114,7	113,8	188,3	190,0
18	160,8	142,1	138,8	136,6	137,7	145,1	118,5	116,1	115,4	114,6	127,6	128,0
9	113,7	112,7	112,9	112,1	112,5	112,5	104,8	104,6	105,1	105,3	105,3	105,2
12	117,4	112,1	111,8	109,3	107,9	108,1	104,4	104,4	104,5	104,1	104,2	103,9
10	112,3	112,4	113,3	112,3	112,2	112,3	104,8	104,7	105,2	105,4	105,5	105,3
13	108,9	111,3	112,4	110,0	109,7	109,5	103,7	104,5	104,7	104,7	104,4	104,0
11	108,9	109,5	112,6	112,1	112,1	112,4	104,5	104,8	105,7	105,6	105,6	105,5
14	103,3	108,5	111,2	110,2	105,4	105,7	103,2	104,8	105,5	105,2	105,0	105,1
15	100,9	100,4	100,5	99,8	99,8	99,9	99,9	99,7	100,1	100,1	100,1	100,0
mantel	101,0	100,8	100,8	100,3	100,3	100,3	100,0	100,0	100,3	100,3	100,4	100,3
Input	4630	4630	4630	4660	4660	4660	1640	1640	1680	1670	1670	1670
Q <sub>1</sub>	4215	4235	4255	4310	4320	4295	1515	1520	1560	1555	1535	1530
Q <sub>2</sub>	4095	4120	4135	4190	4200	4180	1450	1455	1490	1490	1470	1460
ata	4,94	2,81	2,48	2,27	2,24	2,22	1,64	1,51	1,46	1,42	1,41	1,40
verz. temp.	150,7	130,7	126,5	123,6	123,2	122,9	113,5	111,0	110,0	109,1	108,9	108,7
10 <sup>3</sup> W	12,20	7,38	6,15	5,82	7,40	14,65	10,07	8,05	6,89	6,17	15,74	17,27
10 <sup>4</sup> R	41,8	13,22	3,36	1,81	1,34	12,0	25,3	9,87	7,05	5,34	-7,2	16,2
a <sub>1</sub>	5590	5520	5370	5200	2760	1380	4520	4540	4570	4580	860	1090
a <sub>6,7,8</sub>	5870	5880	5720	5660	2000	640	4680	4770	4900	4860	530	560
a <sub>16-17,18</sub>	5340	5220	5050	4810	4490	—	4380	4330	4270	4330	2240	16500
a <sub>2</sub>	3980	7650	8900	10100	9670	3580	4990	5800	8590	11800	4760	3290
a <sub>3</sub>	5730	5440	4800	5300	5920	5820	4610	4260	4160	4190	4270	4310

Grensvulling: 56 cm

Grensvulling: 58 cm

een gunstiger vloeistofbeweging en daardoor gunstiger coëfficiënt dan aan de onderzijde.

Bij het A.O. is het juist andersom. Daar is de onderzijde steeds kouder dan de bovenzijde, vgl.  $9 > 12$ ,  $10 > 13$ ,  $11 > 14$ .

Het opvallendste bij de hellende proeven is echter het optreden van een grensvulling<sup>1)</sup>. In tegenstelling met de verticale proeven, waar een zoodanige vulling niet is aan te geven, hoogstens een waarbeneden het bedrijf met het oog op oververhitting riskant wordt, is hier zeer nauwkeurig één vulling aan te wijzen, waarbeneden altijd oververhitting optreedt en waarboven dit nooit geschiedt. Die vulling blijkt vrijwel onafhankelijk te zijn van de grootte van de helling uit den loodrechten stand en is gelegen bij ca. 58 cm vulhoogte<sup>2)</sup>.

Deze grensvulling werd als volgt bepaald. Verminder in bedrijfs-toestand eerst sprongsgewijze de vulling tot 70 à 65 cm; de buis gedraagt zich dan volkomen normaal, hetgeen uit de tabellen blijkt. Verminder dan de vulling met kleinere stapjes tot zich oververhitting demonstreert. Hiertoe behoeft uitsluitend op het gedrag van *meetplaats 8* gelet te worden, *waar zich in hellenden stand de oververhitting altijd het eerst vertoont*.

Bij de grensvullingbepaling is het dus voldoende de meetapparatuur op *meetplaats 8* ingeschakeld te houden. Boven 60 cm vulhoogte staat de galvanometer volkomen rustig; in de buurt van de grensvulling echter begint het lichtbeeldje onrustig te worden; het begint eerst zachtjes heen en weer te slingeren en krijgt neiging van de schaal af te loopen, doch keert telkens weer ongeveer op de oude plaats terug. Blijkbaar krijgt de V.O.-wand ter plaatse *8* gebrek aan voldoende koeling, doch wordt af en toe getroffen door een watergolf van opkookend water (of misschien van condenswater?), waardoor de temp. weer even tot de normale waarde daalt. Wordt de vulling nog een weinig verder verminderd, dan loopt plotseling het lichtbeeldje van de schaal af. Dit is het oogenblik waarop de *meetplaats 8* blijvend een abnormale temp. gaat aanwijzen (die overigens bij dezelfde vulling gedurende langen tijd nagenoeg constant blijft). De koeling is nu blijkbaar onvoldoende geworden.

Rekening houdende met de ligging van *8* in het V.O., n.l. aan het

1) Onder grensvulling wordt verstaan de vulling, waarboven geen en waarbeneden wél oververhitting optreedt.

2) Bij één serie (tab. XV A) werd 54 cm gevonden.



uiterste bovineinde ervan, ligt hier de verklaring voor de hand, dat althans voor kleine vullingen de koeling van de V.O.-wanden in hoofdzaak geschiedt door afvloeiend condenswater. Zoodra de buis niet meer in verticalen stand staat, doch hellend geplaatst is, vloeit dit in het A.O. ontstane condenswater onder invloed van de zwaartekracht naar beneden, daarbij een soort gootje vormend aan den benedenwand, zoodat meetplaats 8 van de koelende werking geen profijt kan trekken <sup>1)</sup>).

Bij een vulling, grooter dan de grensvulling moet dan worden aangenomen, dat het opkoken van den V.O.-inhoud voor voldoende koeling zorg draagt.

Meetplaats 18 vertoont bij de grensvulling geen spoor van oververhitting (tab. XIV A, XV A en XVI A), wat met bovenstaande beschouwing in overeenstemming is, immers, deze wordt door het condenswatergootje voldoende gekoeld.

Bij kleine spec. V.O.-belasting is de condenswaterhoeveelheid voor laatstgenoemde werking blijkbaar niet meer geheel voldoende en gaat ook 18 iets hooger aanwijzen (zie tab. XIV B, proefnos. 119 en 120), waarschijnlijk tengevolge van geleiding vanaf de bovenkant.

Vermindert men de vulling nog verder, dan verergert de oververhitting van 8 en krijgt tenslotte ook 7 gebrek aan koeling (zie tab. XIV A, proefno. 114), terwijl 17 nog volkomen normaal blijft en zelfs 18 nog maar zeer weinig hooger dan normaal aanwijst, hoewel 8 reeds bijna 300 °C heet is. De koeling aan de onderzijde is dus nog voldoende (gootje); het iets hooger aanwijzen van 18 moet vermoedelijk weer aan geleiding vanaf de niet gekoelde bovenkant worden toegeschreven.

Het gedrag van de inwendige meetplaatsen 3 en 4 is in overeenstemming met deze verklaring. Zoodra 8 een flinke oververhitting heeft, begint ook 4, die zich in de buurt van 8 bevindt, hetzelfde verschijnsel te vertoonen, zie b.v. tabel XIV B proefno. 119, tabel XV B proefno. 130, tabel XVI A proefno. 135, tabel XVI B proefno. 140. Deze meetplaats 4, die zich inwendig, aan de bovenzijde bevindt, krijgt door geleiding veel warmte van den oververhitten V. O.-wand toegevoerd, wordt daarentegen onvoldoende gekoeld, waarschijnlijk alleen maar door damp.

<sup>1)</sup> Ook opkokend water koelt bij hellenden stand voornamelijk de onderzijde, dus het gootje.



Bij nog verder verminderde vulling, wanneer ook 7 oververhit raakt, vertoont 3 hetzelfde verschijnsel als boven voor 4 beschreven is en vaak in nog erger mate, zie b.v. tabel XIV A proefno. 114.

Meetplaats 5 in den kop van de buis wijst in sommige gevallen (proefnos. 120, 140) ook een weinig hoger aan dan normaal verwacht zou worden. Blijkbaar

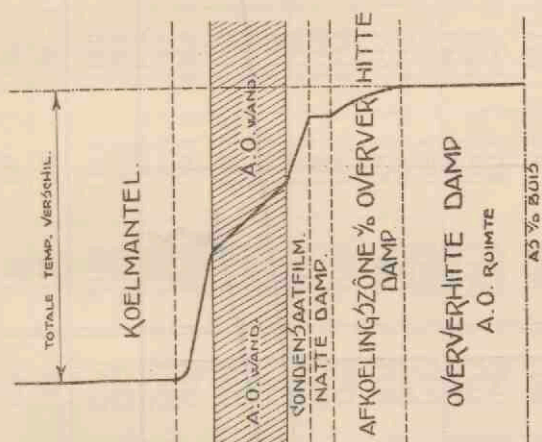


Fig. 21. Schematische voorstelling van het temperatuurverloop bij oververhitten damp in de A.O.-ruimte. (Doorsnede door de as van de buis).

en geleiding plaats vindt. Een en ander is verduidelijkt in fig. 21, waar het temp.verloop bij oververhitten damp in de A.O.-ruimte schematisch is voorgesteld.

### § 37. Inwendige weerstand.

In fig. 22 is het verloop van den inwendigen weerstand geteekend voor een spec. V.O.-belasting  $30.000 \text{ kcal/m}^2\text{,h}$  voor  $60^\circ$  en  $30^\circ$  helling met den horizon; ter vergelijking is tevens de overeenkomstige kromme voor verticalen stand in de figuur geteekend (getrokken kromme I).

Voor de hooggevulde buis is de hellende stand klaarblijkelijk gunstiger, want de inwendige weerstand is steeds geringer dan voor de overeenkomstige vulling bij verticalen stand. Ook de dampdruk loopt aanzienlijk minder op dan in verticalen stand. Bij vergelijking van de tabellen II en XVI A blijkt, dat voor de proeven met loodmantel het

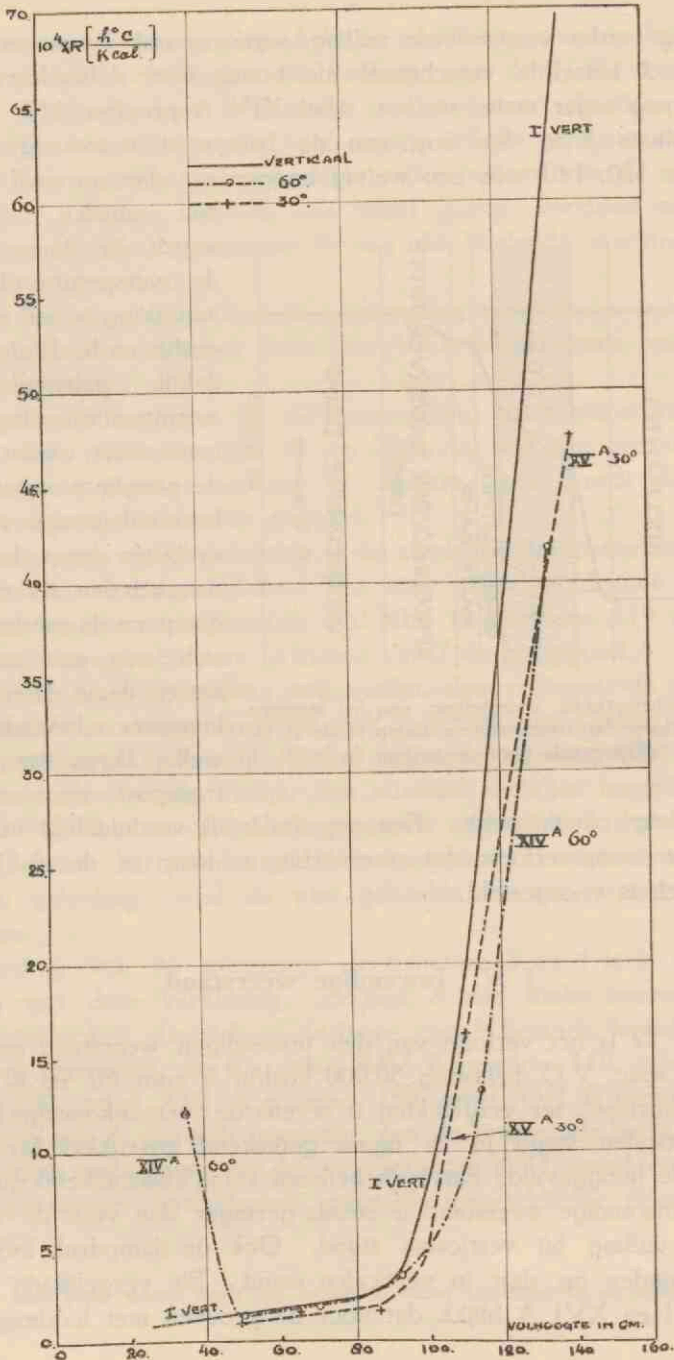


Fig. 22. Grafische voorstelling van den invloed van de helling op R (Z.Cb).

TABEL XV.

Z Cb.

Helling 30°.

Proef-no.	A: Spec. uitw. V.O.-bel. 30.000 kcal/m <sup>2</sup> .h.					B: Spec. uitw. V.O.-bel. 10.700 kcal/m <sup>2</sup> .h.				
	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130
Vulhoogte	140	110	86	65	50	137	108	83	65	58
1	156,7	132,8	126,2	124,6	123,0	117,4	112,6	111,2	110,3	110,5
2	156,1	132,2	125,4	123,2	121,6	116,8	111,2	109,8	109,0	109,1
3	156,0	131,8	125,3	123,0	121,5	116,6	110,9	110,2	108,8	108,8
4	153,4	131,2	124,8	122,8	121,7	116,0	110,5	109,2	108,6	114,2
5	118,0	119,2	124,8	122,8	121,5	106,0	109,9	108,9	108,6	108,5
6	166,8	142,8	136,9	134,5	133,0	121,3	116,1	114,6	114,0	113,8
7	169,7	145,5	139,0	137,3	135,4	122,2	116,8	115,4	114,7	114,7
8	165,8	141,9	135,7	133,7	132,2	120,9	113,8	113,2	113,2	113,1
9	165,8	142,1	136,1	134,6	133,1	121,4	115,8	114,3	113,7	113,6
10	165,2	141,7	135,7	133,1	131,7	120,3	114,7	113,5	113,1	139,7
11	162,3	141,0	136,0	133,5	132,3	119,9	115,0	113,8	113,9	114,9
12	116,4	113,1	112,4	112,2	112,8	106,1	104,8	104,7	105,0	104,9
13	110,9	108,1	110,1	108,4	107,3	105,0	104,2	104,0	103,6	103,9
14	112,2	112,9	112,8	112,4	112,2	105,3	104,8	105,0	104,8	105,1
15	106,0	110,2	110,3	108,8	108,1	104,8	104,1	104,1	103,9	103,5
16	108,0	110,3	113,0	112,2	111,6	104,2	104,9	105,4	105,4	105,4
17	106,6	108,9	110,1	109,2	109,0	103,5	103,9	104,7	104,5	103,6
18	100,4	100,4	100,4	100,1	100,2	100,1	99,8	99,7	99,7	99,7
19	100,6	100,6	100,6	100,6	100,4	100,3	100,0	100,0	100,1	100,0
mantel										
input	4600	4600	4600	4600	4600	1640	1620	1620	1670	1620
Q <sub>1</sub>	4165	4170	4235	4180	4175	1525	1500	1485	1535	1495
Q <sub>2</sub>	4050	4055	4115	4060	4055	1460	1435	1415	1465	1425
ata	5,69	2,88	2,36	2,22	2,13	1,79	1,47	1,41	1,42	1,39
verz. temp.	156,0	131,5	124,9	122,9	121,6	116,0	110,1	108,9	109,1	108,5
10 <sup>3</sup> W	13,58	7,76	6,02	5,81	7,84	10,77	7,53	6,54	6,10	9,44
10 <sup>4</sup> R	47,7	16,31	1,49	1,51	0,84	37,4	7,33	7,07	3,78	-4,7
α <sub>1</sub>	5560	5370	5030	4980	2220	4540	4450	4640	4190	2110
α <sub>6,7,8</sub>	5660	5670	5360	5460	1460	4810	4880	5090	4660	1310
α <sub>16,17,18</sub>	5470	5110	4750	4570	4630	4300	4090	4240	3810	5370
α <sub>2</sub>	3330	7610	9160	10500	12100	5880	6510	9750	12500	4750
α <sub>3</sub>	5880	5520	5030	5560	5660	4320	4320	4070	4440	4350

Grensvulling: 59 cm

Grensvulling: 54 cm



verschijnsel analoog is; bij de proeven 17 en 131 b.v. is  $R$  resp. 63,5 en 24,8 en de dampdruk resp. 20,4 en 13,4 kg/cm<sup>2</sup>.

Bij kleinere belasting (tabellen XIV B, XV B en XVI B) is het effect veel geringer.

Voor middelbare vullingen ontloopen de inwendige weerstanden elkaar zeer weinig, doch ook hier is hellende stand iets gunstiger.

Zoodra de grensvulling gepasseerd is en ook 4 en 3 oververhitting gaan vertoonen, loopt de inwendige weerstand abnormaal hoog op (kromme XIV A, 60°. zie bij vulling 35 cm), omdat uiteraard het temp.verschil in den teller bij de berekening van den weerstand abnormaal groot wordt.

### § 38. De coëfficiënten $a_1$ en $a_2$ (fig. 23) en de $a$ 's van onder- en bovenkant (fig. 23 en 24).

Ook weer voor spec. V.O.-belasting 30.000 kcal/m<sup>2</sup>.h is in fig. 23 de invloed van de helling op  $a_1$  grafisch voorgesteld. Voor hooge en middelbare vulling is het verloop vrijwel analoog aan dat bij de buis in verticalen stand (kromme I), met dien verstande, dat de hellende buis een weinig ongunstiger is.

Over de geheele buis gerekend moet dus worden aangenomen, dat de vloeistofbeweging langs de V.O.-vlakken een weinig gehinderd wordt, vergeleken bij den verticalen stand, aangezien de omstandigheden overigens gelijkwaardig zijn.

Bij geringe vulling is het verloop geheel anders dan voor de verticale buis. Na het passeeren van de grensvulling daalt de overgangscoefficiënt plotseling zeer snel. Het verloop van de krommen in de buurt van de grensvulling is voor sommige series ietwat onzeker, omdat niet altijd metingen in de buurt van dit punt zijn verricht. De grensvulhoogte zelf is echter steeds bepaald en de gemeten waarden zijn bij de tabellen vermeld. Bij het teekenen van de curven is met deze waarden rekening gehouden.

Zooals reeds in § 36 is aangestipt, is ter nadere bestudeering van  $a_1$  de overgangscoefficiënt voor de bovenzijde ( $a_{6,7,8}$ ) en de onderzijde ( $a_{16,17,18}$ ) afzonderlijk berekend. Het resultaat is voor een aantal gevallen grafisch voorgesteld in fig. 24. Duidelijk blijkt hier, dat in alle gevallen de bovenkant van de buis gunstiger naar voren komt dan

de onderzijde; steeds ligt  $a_B = a_{6,7,8}$  boven  $a_1$ , terwijl  $a_0 = a_{16,17,18}$  steeds daaronder gelegen is <sup>1)</sup>.

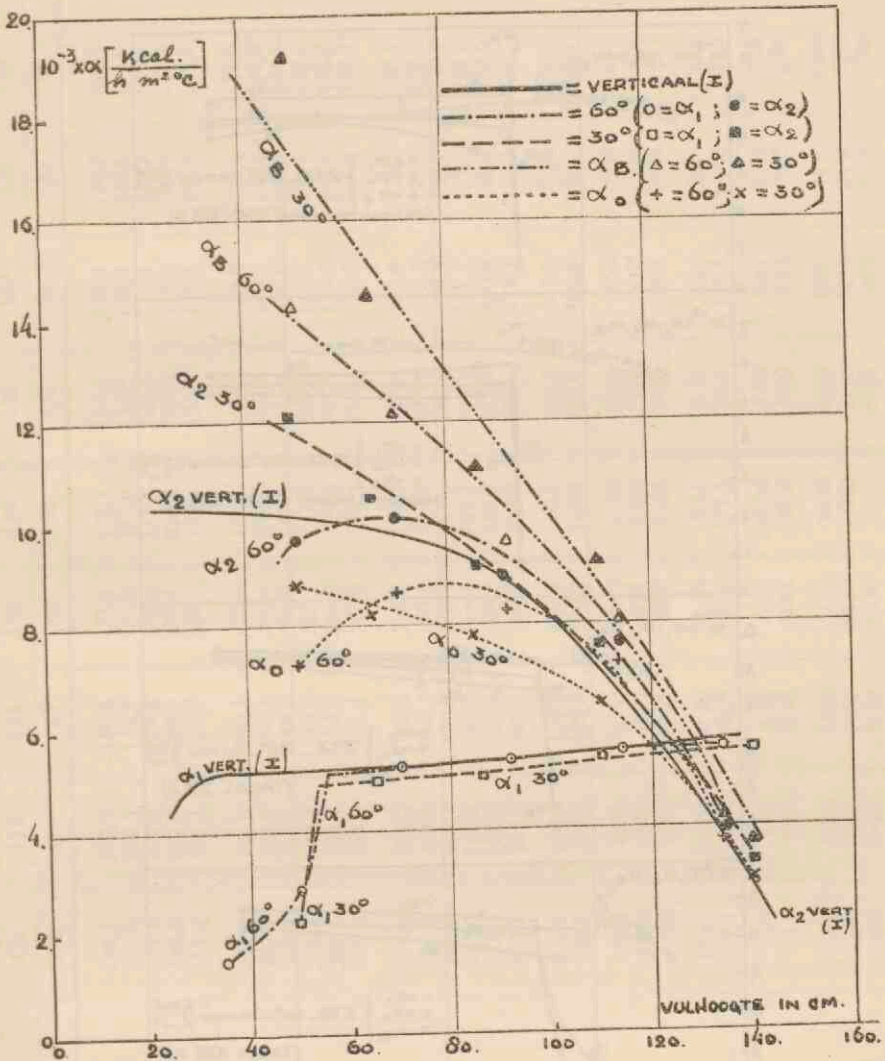


Fig. 23. Grafische voorstelling van den invloed van de helling op  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_0$  en  $\alpha_B$  (Z Ch).

Alleen beneden de grensvulling valt  $\alpha_B$  snel af, wegens de over-

<sup>1)</sup>  $\alpha_B = \alpha$  van de bovenkant;  $\alpha_0 = \alpha$  van de onderkant.

verhitting van  $\delta$ , terwijl de curve  $\alpha_0$  aanvankelijk gewoon doorloopt. Zoodra echter ook  $\delta$  oververhitting gaat vertoonen, gaat  $\alpha_0$  stijgen.

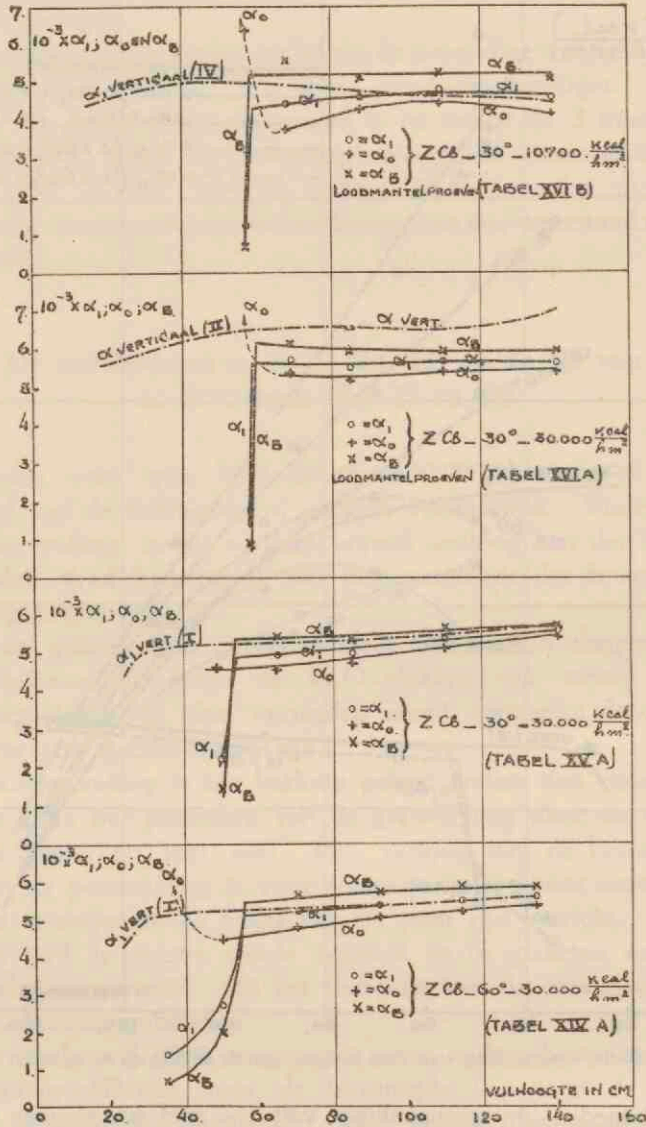


Fig. 24. Grafische voorstelling van het verschil tusschen de  $\alpha$ 's van onderkant en bovenkant van het V.O. bij hellende buis (Z. Cb).



TABEL XVI.

Z Ch. Helling 30°.

Loodmantelproeven.

Proef.no.	A : Spec. uitw. V.O.-bel. 30,000 kcal/m <sup>2</sup> .h.					B : Spec. uitw. V.O.-bel. 10,700 kcal/m <sup>2</sup> .h.				
	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140
Vulhoogte	140	110	85	69	58	139	109	88	68	57
1	192,1	182,9	180,2	177,4	178,1	138,3	136,6	134,7	134,5	134,9
2	191,6	182,5	179,7	177,0	177,6	137,4	135,5	133,8	133,6	133,9
3	191,7	182,5	179,8	177,1	177,6	137,3	135,4	133,7	133,4	133,8
4	190,5	182,0	179,5	177,1	210,1	136,6	135,0	133,4	133,3	146,2
5	171,4	182,4	179,7	177,1	177,6	132,7	134,8	133,5	133,2	134,7
6	201,9	192,9	190,1	187,8	188,6	141,7	139,8	138,1	137,9	138,4
16	203,4	194,5	192,1	189,4	190,0	142,5	140,5	138,8	137,0	139,2
7	200,9	192,2	189,7	186,9	187,6	141,4	139,6	137,7	137,0	138,3
17	201,3	192,2	189,9	187,3	187,9	142,2	140,1	138,5	138,7	139,0
8	201,8	193,0	190,3	186,2	319,8	141,0	139,3	137,6	136,7	199,7
18	201,8	193,4	191,1	187,0	189,4	141,2	139,5	137,9	138,3	144,0
9	173,8	171,2	168,4	168,8	169,3	131,5	130,4	129,7	130,1	130,9
12	169,3	168,6	166,1	163,8	164,3	129,8	129,4	128,5	129,0	129,5
10	168,5	169,7	170,8	168,7	169,3	130,3	129,9	130,2	130,1	131,1
13	162,0	166,0	165,8	164,1	164,7	128,1	128,7	129,2	129,0	129,0
11	158,9	170,0	170,6	168,2	168,9	127,3	130,8	130,0	130,0	130,2
14	152,5	163,9	165,4	163,7	164,2	126,0	128,2	128,2	128,7	128,8
15	100,6	100,5	100,5	100,5	100,6	100,5	100,5	100,6	100,5	100,4
mantel	100,8	100,7	100,8	100,9	100,9	100,6	100,6	100,7	100,7	100,6
input	4660	4690	4690	4650	4650	1660	1660	1660	1650	1680
Q <sub>1</sub>	4240	4320	4305	4230	4260	1525	1540	1500	1520	1560
Q <sub>2</sub>	4090	4165	4155	4080	4105	1450	1460	1425	1445	1485
ata	13,41	11,04	10,35	9,46	9,66	3,36	3,20	3,06	3,04	3,09
verz. temp.	192,1	183,3	180,5	176,6	177,5	136,8	135,1	133,6	133,3	133,9
10 <sup>3</sup> W	9,05	5,84	5,36	5,10	10,46	8,63	6,82	6,02	5,78	13,03
10 <sup>4</sup> R	24,8	0,65	0,46	0,12	-18,8	18,0	4,74	3,00	2,96	-20,8
a <sub>1</sub>	5660	5660	5490	5710	1830	4600	4830	4610	4460	1260
a <sub>6,7,8</sub>	5940	5940	5910	6130	910	5110	5250	5130	5570	700
a <sub>16/17/18</sub>	5400	5400	5130	5340	-	4190	4470	4190	3720	6320
a <sub>2</sub>	6220	8780	12200	13900	3190	6360	7540	11200	14000	2880

Grensvulling : 59 cm

Grensvulling : 58 cm

Dit is echter onwezenlijk en uitsluitend een gevolg van de rekenwijze, immers, voor de berekening moet noodzakelijk van de temp., aangewezen door 4, worden gebruik gemaakt; 4 ligt aan de bovenzijde en is dus feitelijk geen goede maatstaf voor het temp.verschil tusschen onderzijde V.O.-wand en inwendige vloeistoftemp. daar ter plaatse. Voor een nauwkeurig onderzoek zou zeker een tweede stel inwendige meetplaatsen, aangebracht aan de onderzijde, noodig zijn. Ditzelfde bezwaar kan ook tegen de berekening van  $a_{16,17,18}$  in het algemeen worden ingebracht en ook tegen de berekening van  $a_1$  (bij hellenden stand).

Het gedrag van  $a_2$  is eveneens in fig. 23 voorgesteld. Bij beschouwing van de krommen  $a_2$ -vert.,  $a_2-60^\circ$  en  $a_2-30^\circ$  blijkt duidelijk, dat hellende stand den overgangscoefficiënt begunstigt <sup>1)</sup>, hetgeen met behulp van de theorie van Nusselt ook direct verklaarbaar is. Deze theorie immers bindt den warmtedoorgang éénduidig aan de dikte van de condensaatfilm. Bij hellende buis zal deze condensaatfilm aan de bovenzijde dun zijn en aan de onderzijde dik, omdat het condensaat aan de bovenzijde zal afvloeien <sup>2)</sup> en zich aan de onderzijde zal vereenigen tot een gootje. Vergeleken met de verticale buis is de huiddikte, afgezien van het smalle gootje, gemiddeld geringer en de overdracht dus gunstiger.

Aan de bovenkant zal de  $Q$  dientengevolge grooter zijn dan aan de onderkant. Een  $a_B$  en een  $a_0$  (als bij het V.O.) is bij gebrek aan een nauwkeurige kennis van  $Q_B$  en  $Q_0$  <sup>3)</sup> feitelijk niet te berekenen.

Ter illustratie zijn, met verwaarloozing van het verschil tusschen  $Q_B$  en  $Q_0$ , voor een aantal gevallen toch  $a_B$  en  $a_0$  berekend en voor de tabellen XIV A en XIV B mede in fig. 23 afgebeeld. Steeds blijkt  $a_B$  aanmerkelijk boven  $a_2$  te liggen en  $a_0$  aanmerkelijk daaronder. Dit effect is in overeenstemming met boven aangehaalde theorie van de waterhuid ook inderdaad te verwachten. Verder blijkt, dat bij grootere helling  $a_B$  steeds gunstiger,  $a_0$  daarentegen steeds ongunstiger wordt, wat ook weer met deze theorie klopt.

In werkelijkheid zal  $Q_B > Q_0$  zijn (zie boven), dus zal  $a_B$  nóg grooter en  $a_0$  nóg kleiner zijn; dientengevolge zal het beschreven effect dus in nóg sterker mate aanwezig zijn dan in fig. 23 afgebeeld is.

1) Voor een nauwkeurige bepaling van  $a_2$  bij hellenden stand van de Haag-buis zijn de gebruikte 6 meetplaatsen in het A.O. onvoldoende, omdat zij uiteraard geen gemiddelde opleveren over den geheelen omtrek. Ditzelfde bezwaar geldt ook bij de bepaling van  $a_1$ .

2) De afvloeisnelheid zal over den omtrek gerekend plaatselijk verschillend zijn.

3)  $Q_B = Q$  van de bovenkant;  $Q_0 = Q$  van de onderkant.

Bij de overige tabellen doet zich het verschijnsel op volmaakt overeenkomstige wijze voor.

### § 39. Totale buisweerstand.

Het resulteerend effect van de invloeden van de helling op de in de paragrafen 36, 37 en 38 besproken componenten wordt vertegenwoordigd door de krommen van fig. 25, waar de totale buisweerstand is voorgesteld voor verticalen stand ( $90^\circ$ ) en hellingen van  $60^\circ$  en  $30^\circ$ .

Voor hooge vulling is de hellende stand merkbaar gunstiger; voor middelbare vulling praktisch gelijkwaardig. Beneden de grensvulling neemt de totale buisweerstand snel toe. Dit laatste effect wordt uitsluitend ver-

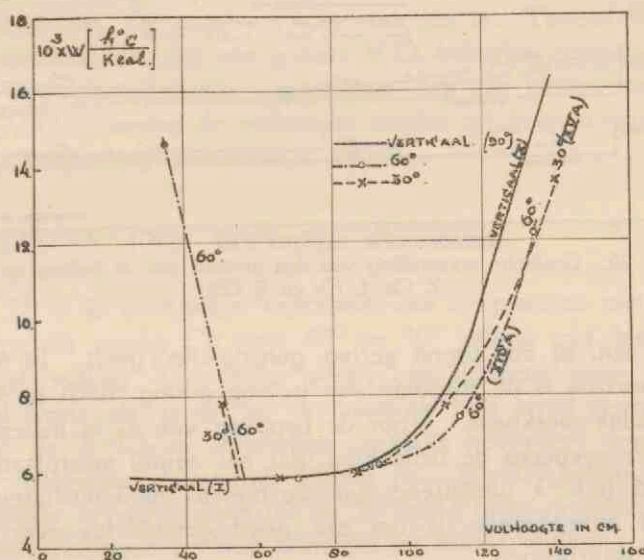


Fig. 25. Grafische voorstelling van den invloed van de helling op  $W$  (Z Cb).

orzaakt door de hogere aanwijzing van de V.O.-meetplaatsen (en niet door die van de inwendige meetplaatsen 3 en 4), omdat  $W$  uitsluitend afhangt van het temp.verschil tusschen V.O. en A.O. en de werkelijke calorische belasting. De inwendige temperaturen blijven hierbij dus geheel buiten beschouwing.

Voor de andere tabellen is het gedrag van  $W$  analoog; bij kleine V.O.-belasting is de hellende stand ook bij middelbare vulling doorgaans



gunstiger (vgl. ook fig. 31); bij hooge vulling daarentegen is het verschil geringer dan bij groote V.O.-belasting.

#### § 40. De overgangscoefficiënt $\alpha_3$ .

Voor de proeven zonder loodmantel is  $\alpha_3$  ook voor hellenden stand berekend.

Evenals in fig. 11 zijn de resultaten gecombineerd met die van de proeven met circulatiebuis (tabellen XVII en XVIII) en in fig. 26 samengevat. Ter vergelijking met den verticalen stand zijn de krommen B en C uit fig. 11 mede weergegeven. Duidelijk blijkt, dat de helling

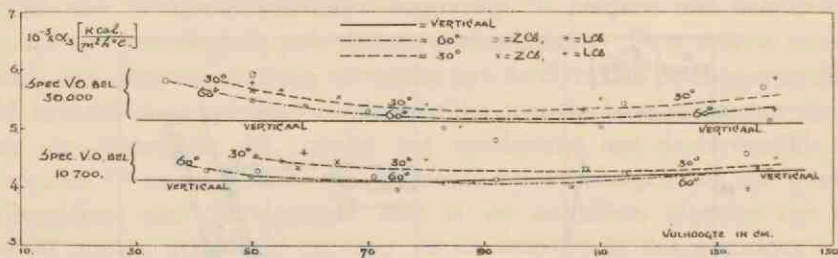


Fig. 26. Grafische voorstelling van den invloed van de helling op  $\alpha_3$ . (Z Cb, L Cb en K Cb).

inderdaad een, zij het uiterst gering, gunstig effect geeft. Bij  $60^\circ$  helling met den horizon is de toename van  $\alpha_3$  nog gering, doch bij  $30^\circ$  helling reeds duidelijk merkbaar. Voor de bepaling van  $\alpha_3$  in hellenden stand geldt echter eveneens de bedenking, dat het aantal meetplaatsen in den A.O.-wand (n.l. 3 uitsluitend aan de boven- en 3 uitsluitend aan de onderzijde) onvoldoende is om een goed gemiddelde over den buis-omtrek te waarborgen.

#### b. Met circulatiebuis.

#### § 41. Grensvulling en oververhitting.

Ook bij aanwezigheid van een Cb treedt in hellenden stand een kritische vulling op, waarbeneden altijd en waarboven nimmer oververhitting voorkomt. Deze grensvulling ligt echter merkbaar lager. Zoals uit de betreffende tabellen blijkt, is bij groote spec. V.O.-

belasting (30.000 kcal/m<sup>2</sup>,h) steeds de vulling 51 cm de grens, terwijl bij de kleine spec. V.O.-belasting (10.700 kcal/m<sup>2</sup>,h) de grensvulling bij circa 54 cm is gelegen.

Voortbouwende op de in § 36 ontwikkelde beschouwing, laat dit effect zich eenvoudig verklaren. Laat men de vulhoogte van de buis verminderen, dan zal eens het oogenblik komen, dat het opkokend water niet meer in staat is de V.O.-wanden te koelen en moet deze taak worden overgenomen door het condenswater. Bij een Haag-buis, voorzien van een Cb, zal dat tijdstip zeker later aanbreken, omdat opgestuwde vloeistof in de ringvormige ruimte gemakkelijker den geheelen omtrek zal koelen dan in een buis zonder Cb. De kritische vulling zal dus bij een Haag-buis zonder circulatiebuis eerder bereikt zijn dan bij een Haag-buis, die daar wel van voorzien is. Tevens volgt voor dit geval onmiddellijk, dat een groote V.O.-belasting wegens de meer intensieve beweging gunstiger moet zijn dan een kleine, zoodat men bij groote V.O.-belasting de vulhoogte verder zal kunnen verminderen, alvorens de bespoeling onvoldoende wordt.

#### § 42. Inwendige weerstand.

In fig. 27 is de inwendige weerstand van de proeven met Cb vergeleken met die zonder Cb voor 60° en 30° helling met den horizon.

Bij hooge vulling doet zich, hoewel in mindere mate, hetzelfde verschijnsel voor als reeds bij de verticale buis werd gevonden, n.l. dat vooral de L Cb de inwendige circulatie bevordert, waardoor de inwendige weerstand belangrijk kleiner is. Bij 60° helling zijn geen K Cb-metingen verricht, doch uit de 30°-serie blijkt duidelijk, dat ook deze Cb een gunstigen invloed uitoefent bij hooge vulling.

Bij middelbare vulling zijn de verschillen bij al of niet aanwezigheid van een Cb gering (zie verder § 45 en fig. 31).

Het met stijgenden inwendigen weerstand parallel loopende effect, n.l. het abnormale stijgen van den druk bij hooge vulling, is ook bij de hellende Haag-buis aanwezig. Evenals in het geval van den verticalen stand vermindert de aanwezigheid van een Cb het oploopen van den druk (vgl. b.v. tabel XV A, proefno. 121 met tabel XVIII A, proefno. 151).

Bleek het aanbrengen van een K Cb bij verticale buis de druktoename slechts weinig te beïnvloeden, in hellenden stand heeft deze K Cb,

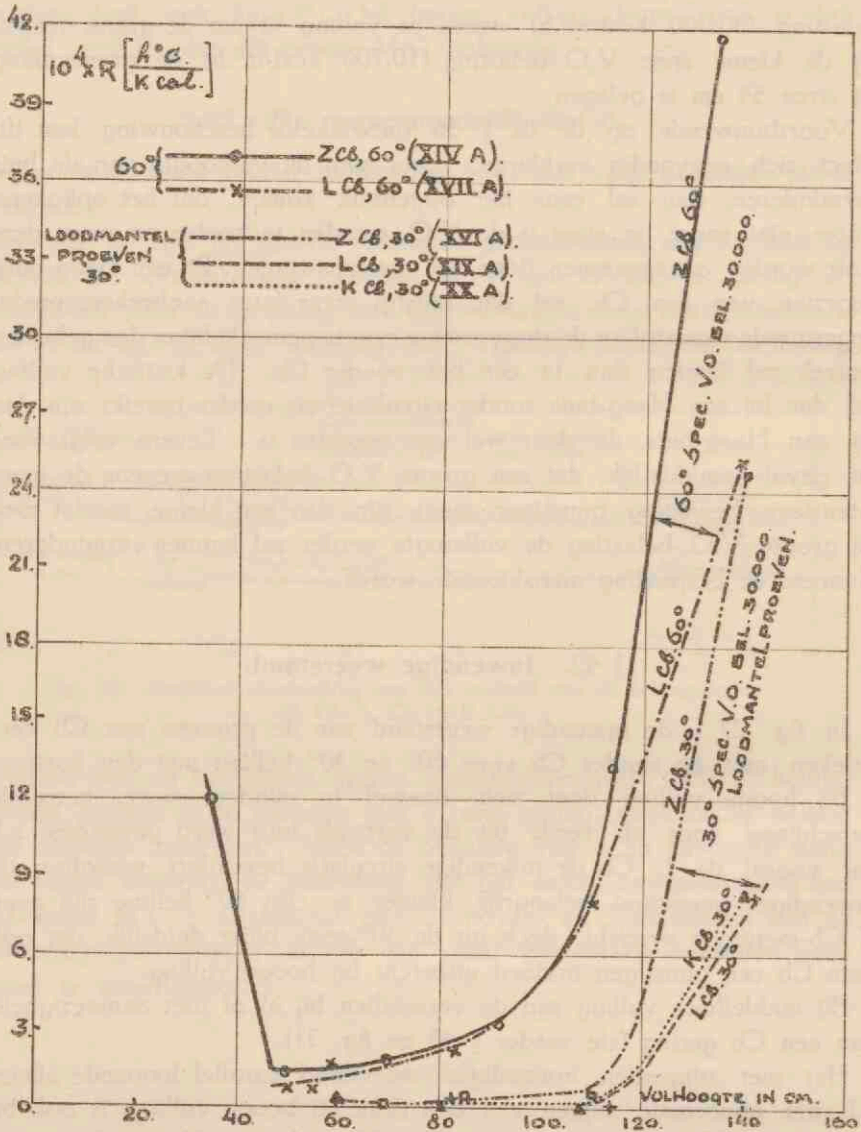


Fig. 27. Grafische voorstelling van den invloed van de Cb op R bij hellenden stand.

zoals ook reeds uit den inwendigen weerstand volgde, wel degelijk een gunstig effect (vgl. bv. tabel XX A proefno. 171, tabel XIX A proefno. 162 en tabel XVI A proefno. 131).



TABEL XVII.

L. Cb. Helling 60°.

Proef-no. Vulhoogte	A: Spec. uitw. V.O.-bel. 30.000 kcal/m <sup>2</sup> .h.					B: Spec. uitw. V.O.-bel. 10.700 kcal/m <sup>2</sup> .h.				
	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150
1	135,1	128,4	126,1	124,6	123,7	123,6	110,9	110,1	110,3	109,6
2	136,2	128,3	125,9	124,5	123,6	123,5	111,8	110,9	110,2	109,5
3	136,0	127,9	125,6	124,2	123,3	123,2	111,5	110,5	110,1	109,0
4	135,6	127,5	125,2	123,9	123,1	123,0	111,1	110,1	109,4	110,6
5	113,9	121,8	124,3	123,2	123,2	123,1	108,8	108,9	108,8	108,3
6	147,5	139,5	137,3	135,7	135,1	135,1	116,8	115,7	115,0	114,2
16	149,3	140,2	138,0	136,6	136,4	136,3	118,7	117,3	115,1	114,5
7	145,9	138,4	136,1	134,5	134,2	134,2	116,2	115,1	114,2	113,6
17	147,0	138,5	136,2	134,9	134,1	134,1	116,7	115,4	114,4	113,6
8	146,3	138,6	136,2	135,0	133,9	133,9	115,9	114,6	114,0	113,8
18	148,8	139,3	137,1	136,8	134,9	135,7	116,6	115,3	114,4	121,9
9	114,8	112,9	112,8	112,9	113,4	113,8	105,1	104,9	104,9	104,9
12	116,1	111,5	110,7	108,6	107,9	108,2	105,2	104,8	104,1	104,0
10	115,3	113,0	112,7	112,6	111,5	111,4	105,1	104,8	105,4	105,1
13	112,2	111,6	111,1	109,5	108,9	109,3	104,7	104,1	104,1	103,9
11	108,6	111,6	112,4	112,3	111,9	113,1	104,7	105,3	105,2	105,1
14	103,9	109,4	110,7	109,8	109,5	109,0	104,5	104,3	104,8	104,2
15	100,5	100,2	99,8	99,9	99,8	99,9	99,6	99,5	99,4	99,4
mantel	100,7	100,6	100,6	100,6	100,7	100,7	99,9	99,9	99,9	99,9
input	4720	4640	4640	4640	4570	4570	1690	1640	1640	1640
Q <sub>1</sub>	4360	4240	4245	4215	4225	4185	1565	1515	1510	1520
Q <sub>2</sub>	4245	4120	4125	4095	4105	4065	1495	1450	1440	1455
ata	3,22	2,53	2,37	2,28	2,23	2,23	1,47	1,44	1,43	1,41
verz. temp.	135,3	127,2	125,0	123,8	123,0	123,0	110,1	109,5	109,3	108,9
10 <sup>3</sup> W	8,28	6,56	5,95	5,93	5,81	7,93	7,80	7,33	6,62	14,38
10 <sup>4</sup> R	25,2	7,98	2,24	1,78	0,66	0,67	8,82	5,94	5,96	1,51
a <sub>1</sub>	4880	5110	5060	4910	4910	2140	3380	3510	4180	920
a <sub>6,7,8</sub>	5490	5280	5270	5250	5170	1410	3860	3950	4340	570
a <sub>16,17,18</sub>	4400	4940	4880	4600	4670	4440	3010	3160	4050	2420
a <sub>2</sub>	10300	9610	9580	10100	10000	10500	8350	8860	10500	8380
a <sub>3</sub>	5150	5020	4990	5370	5690	5470	4000	4030	3960	4200

Grensvulling: 51 cm

Grensvulling: 54 cm

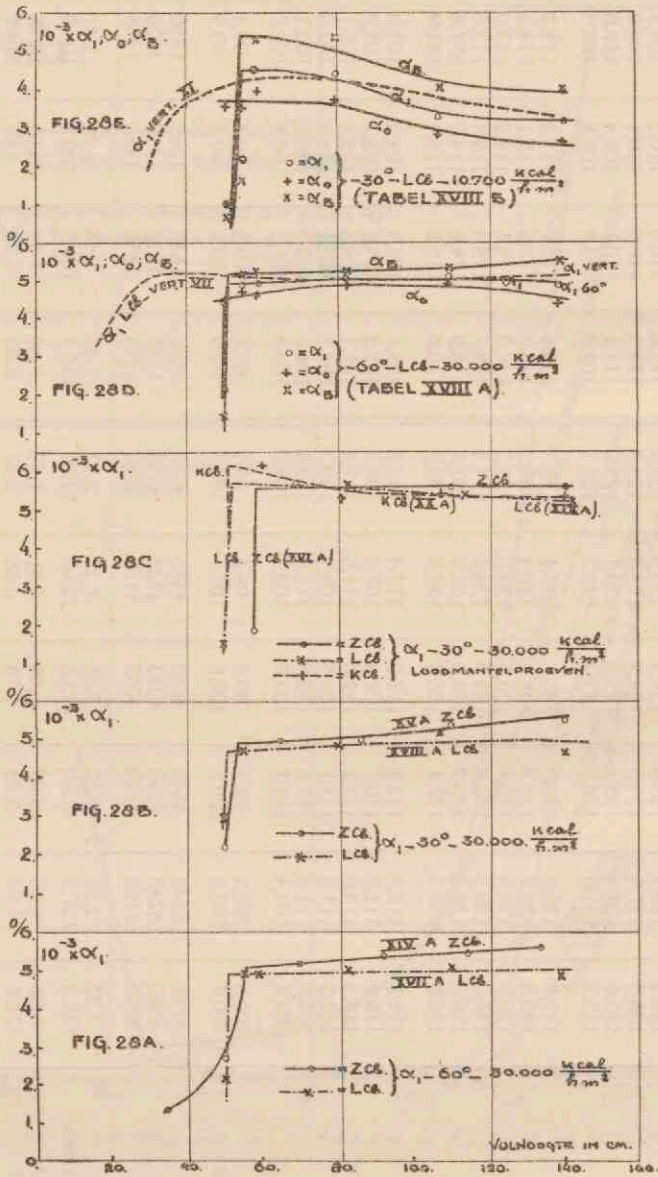


Fig. 28. A, B en C. Grafische voorstellingen van den invloed van de Cb op  $\alpha_1$  bij hellenden stand.

Fig. 28. D en E. Grafische voorstellingen van het verschil tusschen de  $\alpha$ 's van onderkant en bovenkant van het V.O. bij hellenden stand (L.Cb).

## § 43. Overgangscoefficienten.

$a_1$ . Het verloop van  $a_1$ ,  $a_0$  en  $a_B$  is voor een aantal gevallen in fig. 28 afgebeeld.

In fig. 28 A is voor  $60^\circ$  helling en de groote spec. V.O.-belasting het verloop van  $a_1$  geteekend voor Z Cb en L Cb.

Evenals bij verticalen stand blijkt ook hier de circulatiebuis een ongunstigen invloed op  $a_1$  uit te oefenen. Het verschil in grensvulling tusschen de Z Cb- en de L Cb-proeven is in de curven aangegeven. Beneden de grensvulling (hier resp. 56 en 51 cm) is de helling van de curve zeer steil als gevolg van de oververhitting van meetplaats 8.

Fig. 28 B voor  $30^\circ$  helling geeft een analoog beeld.

Fig. 28 C voor de proeven met loodmantel bij  $30^\circ$  helling laat het verschijnsel zien voor de L Cb- en de K Cb-proeven in vergelijking met de Z Cb-proeven. De K Cb-kromme toont hier bijzonder sterk het gunstiger worden van  $a$  in de buurt van de grensvulling. Dit verschijnsel is echter niet specifiek voor de K Cb-serie; het is van algemeenen aard, doch komt hier toevallig sterk naar voren. De oorzaak blijkt bij beschouwing van het gedrag der meetplaatsen (vooral 8) in de buurt van de grensvulling. Berekent men n.l. de plaatselijke temp.verschillen voor elk der uitwendige V.O.-meetplaatsen afzonderlijk (dus  $6 - \frac{1+2}{2}$ ,  $7 - \frac{2+3}{2}$  enz. naar analogie van § 18-berekening  $a$ 's V. O.), dan vindt men b.v. voor de series met loodmantel Z Cb, L Cb en K Cb bij  $30^\circ$  helling uit de tabellen XVI A, XIX A en XX A resp. de volgende waarden:

Z Cb. vulhoogte	6	7	8	16	17	18
140	10,0	9,2	10,7	11,5	9,6	10,7
110	10,2	9,7	10,7	11,8	9,7	11,1
85	10,1	9,9	10,6	12,1	10,1	11,4
69	10,6	9,8	9,1	12,2	10,2	9,9
58(O)	10,7	10,0	125,9	12,1	10,3	-4,5



L Cb.	vulhoogte	6	7	8	16	17	18
	142	12,4	10,8	10,4	12,2	11,2	11,2
	114	11,9	10,9	10,1	12,7	11,0	11,4
	83	11,0	10,5	9,2	12,0	11,0	11,0
	50(O)	10,7	10,5	<b>140,0</b>	11,4	10,4	<b>6,4</b>

K Cb.	vulhoogte	6	7	8	16	17	18
	140	11,0	9,6	10,2	12,8	10,2	11,6
	108	11,3	10,1	10,2	12,8	10,2	11,3
	81	11,0	10,2	9,1	13,0	10,6	10,1
	60	9,9	9,7	8,5	10,4	9,5	9,3

Beschouwt men de meetplaats 8 (zie kolom 4) dan valt het in elk der tabellen op, dat het plaatselijk temp.verschil steeds kleiner wordt tot de grensvulling bereikt is en plotseling oververhitting optreedt. Blijkbaar worden de overdrachtscondities ter plaatse 8 bij afnemende vulling voortdurend beter, wat waarschijnlijk moet worden toegeschreven aan een steeds dunner wordende vloeistoflaag ter plaatse <sup>1)</sup>. Hoe dichter de grensvulling genaderd wordt, des te minder water bereikt door bespoeling de meetplaats 8. Dit water verdampt snel en brengt het dunne vloeistofhuidje in sterke beweging. Bij het bereiken van de grensvulling is de aanvoer onvoldoende geworden, waardoor periodiek droge plekken ontstaan en meetplaats 8 door onvoldoende koeling oververhitting gaat vertoonen. (Het verschijnsel is niet alleen beperkt tot de hellende buis, zoals uit fig. 19, vert. stand blijkt; de K Cb- en de L Cb-krommen vertoonen eveneens het oplopen van  $a_{8,18}$  bij kleiner wordende vulling).

De overige kolommen demonstreeren elk voor zich het verschil tusschen het al of niet aanwezig zijn van een Cb door hun verloop met de vulhoogte en door de absolute waarden <sup>2)</sup>. Zoo blijkt b.v., dat meetplaats 16, de onderste meetplaats van het V.O., de grootste

- <sup>1)</sup> Voor een horizontale plaat vonden Jacob u. Linke eveneens een belangrijke toename van  $a$  bij geringer wordende vloeistoflaagdikte (4 tot 1 mm; Lit. XXIII).  
<sup>2)</sup> Geringe verschillen, tengevolge van de niet bij alle proeven precies gelijke Q, buiten beschouwing gelaten.

TABEL XVIII.

L. Cb. Helling 30°.

Proef-no.	A: Spec. uitw. V.O.-bel. 30.000 kcal/m <sup>2</sup> .h.					B: Spec. uitw. V.O.-bel. 10.700 kcal/m <sup>2</sup> .h.					
	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161
Vulhoogte	140	107	80	55	50	140	107	80	59	55	51
1	131,1	128,3	124,8	123,1	122,7	111,4	110,5	110,3	110,3	109,2	110,3
2	132,5	128,1	124,4	122,8	122,5	112,3	111,3	110,2	109,0	109,0	109,0
3	132,4	127,9	124,1	122,7	122,2	112,2	111,2	109,9	108,9	108,9	108,8
4	132,0	127,4	123,8	122,5	122,1	112,0	111,0	109,6	108,7	108,7	113,4
5	114,3	123,4	123,8	122,5	122,1	108,8	109,1	109,5	108,7	108,7	108,7
6	143,8	139,3	135,6	134,0	133,6	117,3	116,1	114,9	113,7	113,5	113,7
16	145,2	140,5	137,7	136,2	136,2	120,7	118,7	115,8	114,5	114,0	114,6
7	142,9	138,8	134,9	133,4	133,0	116,6	115,6	112,7	111,6	111,6	113,3
17	144,3	139,2	135,9	134,5	134,3	117,6	116,5	113,6	112,6	113,6	113,7
8	143,1	138,3	134,2	133,0	159,9	116,3	115,4	113,8	112,5	131,6	171,1
18	145,3	138,9	135,3	134,9	135,8	117,4	116,3	114,3	113,9	114,9	118,2
9	114,5	113,3	112,3	112,7	112,6	105,5	105,5	105,5	105,6	105,5	105,6
12	113,3	111,1	110,5	108,6	109,0	105,5	105,3	104,8	104,6	104,5	104,5
10	113,5	113,0	111,9	112,6	112,2	105,4	105,3	105,4	105,4	105,4	105,4
13	112,5	111,1	110,2	109,0	108,4	104,4	104,5	104,5	104,8	104,5	104,9
11	110,4	112,7	112,4	112,7	112,6	105,4	106,0	105,8	105,6	105,7	105,5
14	108,0	110,6	109,9	109,6	109,1	104,8	104,9	105,3	105,1	104,9	105,3
15	100,9	100,8	100,5	100,3	100,3	100,3	100,3	100,3	100,5	100,2	100,3
mantel	101,3	101,2	101,0	101,1	100,9	100,8	100,8	100,9	100,9	100,7	100,9
input	4740	4740	4570	4570	4570	1650	1650	1640	1640	1650	1640
Q <sub>1</sub>	4350	4365	4205	4185	4245	1530	1525	1505	1535	1525	1520
Q <sub>2</sub>	4235	4245	4080	4065	4125	1465	1460	1440	1465	1455	1450
ata	2,94	2,56	2,27	2,17	2,14	1,53	1,50	1,44	1,40	1,40	1,41
verz. temp.	132,2	127,6	123,6	122,1	121,7	111,4	110,8	109,5	108,7	108,7	108,9
10 <sup>3</sup> W	7,47	6,32	5,89	5,69	6,73	8,26	7,42	6,13	5,53	7,62	12,66
10 + R	20,3	5,80	1,14	0,67	0,66	10,33	6,23	2,99	3,45	1,64	-4,4
a <sub>1</sub>	4650	5200	4860	4700	2980	3160	3320	4390	4530	2190	1110
a <sub>6,7,8</sub>	5150	5460	5340	5260	2370	3990	4020	5330	5280	1590	660
a <sub>16,17,18</sub>	4230	4960	4470	4240	4040	2610	2820	3730	3980	3490	3570
a <sub>2</sub>	13900	9600	10100	11700	12500	7750	8810	10400	17400	16000	6280
a <sub>3</sub>	5330	5320	5430	5670	5770	4490	4390	4470	4600	4460	4540

Grensvulling: 51 cm

Grensvulling: 55 cm

temperatuurverschillen oplevert met het inwendige en dat dus daar ter plaatse de warmteovergangscondities het ongunstigst zijn.

Fig. 28 D laat het verschil tusschen onder- en bovenkant van de buis zien bij  $60^\circ$  helling. Ter vergelijking is mede de overeenkomstige kromme voor verticalen stand geteekend. Het verloop is in hoofdzaak als bij Z Cb. Het verschil met den verticalen stand is gering in het gebied der hooge en middelbare vullingen. Bij geringe vulling is het verloop echter geheel anders, tengevolge van het optreden van een grensvulling bij hellende buis, waardoor de  $\alpha_B$  steil daalt (meetplaats  $\delta$ ) en daarmee natuurlijk ook  $\alpha_1$ , terwijl  $\alpha_0$  hiervan vanzelfsprekend aanvankelijk geen hinder ondervindt.

Voor kleine belasting zijn de verschillen tusschen onderkant en bovenkant aanzienlijker, zooals uit fig. 28 E blijkt.

$\alpha_2$ . Het gedrag van  $\alpha_2$  is in hoofdzaak als reeds bij de hellende Z Cb-proeven besproken is. Ook hier een sterk verschil tusschen onder- en bovenkant, van dezelfde orde als in fig. 23.

Zooals reeds bij de verticale Haag-buis werd betoogd, zal de aanwezigheid van een Cb voor  $\alpha_2$  van weinig belang zijn, behalve misschien bij hooggevlude buis, omdat dan het karakter van vrije condensatie verloren gaat.

Uit fig. 29 A en fig. 29 B blijkt dan ook, dat de  $\alpha_2$ -waarden van de Z Cb-, L Cb- en K Cb-series ten naaste bij gelijk zijn; vooral de K Cb- en de L Cb-waarden ontloopen elkaar zeer weinig; de Z Cb-waarden zijn over het algemeen genomen echter iets ongunstiger.

Bij groote V.O.-belasting (fig. 29 A) treedt bij hooge vulling een duidelijk verschil op tusschen Z Cb, K Cb en L Cb, waarbij zooals gewoonlijk de L Cb het gunstigst is; bij kleine V.O.-belasting (fig. 29 B) is dit echter niet het geval.

Zeer sprekend evenwel komt in de figuren 29 A en 29 B het verschil tusschen verticalen en hellenden stand naar voren. Is bij hooge vulling weinig verschil tusschen beide standen te bemerken, bij kleinere vulling is dit anders. Zoodra de vulhoogte zoover verminderd wordt, dat meer en meer sprake is van zuivere condensatie tegen de A.O.-wanden, treedt het in § 38 reeds besproken en met de theorie van Nusselt verklaarbare verschijnsel



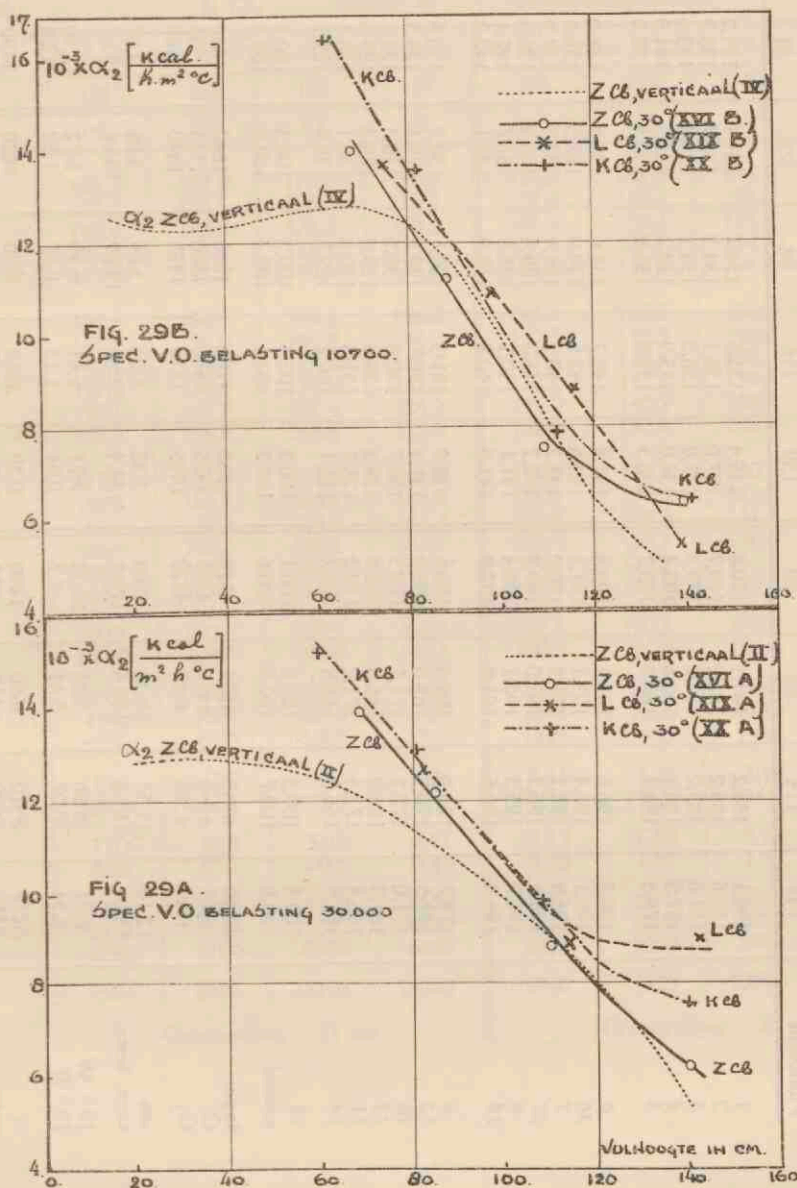


Fig. 29. Grafische voorstelling van den invloed van de Cb op  $\alpha_2$  bij hellenden stand.

TABEL XIX.

L Cb. Helling 30°. Loodmantelproeven.

Proef-no.	A: Spec. uitw. V.O.-bel. 30.000 kcal/m <sup>2</sup> .h.			B: Spec. uitw. V.O.-bel. 10.700 kcal/m <sup>2</sup> .h.			
	162	163	164	166	167	168	
Vulhoogte	142	114	83	139	116	98	75
							170
1	186,1	184,2	181,1	136,4	135,5	134,1	134,1
2	187,6	185,2	181,0	137,0	136,1	134,2	133,7
3	187,6	185,2	181,0	137,0	136,0	134,2	133,6
4	187,5	185,1	180,8	137,0	135,9	134,2	141,5
5	179,4	184,7	180,8	136,5	135,5	133,9	133,8
6	199,3	196,6	192,1	141,8	140,7	138,6	138,0
16	199,1	197,4	193,1	143,6	142,6	139,9	138,8
7	198,4	196,1	191,5	141,2	140,2	138,4	137,9
17	198,8	196,2	192,0	142,2	141,2	139,4	138,5
8	198,0	195,3	190,1	141,1	140,1	138,4	137,1
18	198,8	196,6	191,9	141,5	140,7	138,9	142,2
9	174,7	173,0	169,5	132,0	131,3	130,1	130,8
12	172,5	170,9	168,0	131,4	130,7	129,5	129,5
10	171,0	170,2	171,7	130,7	130,6	130,5	131,1
13	167,3	168,0	166,5	129,5	129,8	129,2	129,5
11	166,4	172,5	171,2	128,7	131,5	130,6	130,1
14	162,5	166,8	166,8	128,1	130,2	129,3	129,2
15	100,5	100,3	100,0	100,3	100,4	100,3	100,4
mantel	100,8	100,7	100,5	100,3	100,4	100,4	100,5
input	4940	4940	4820	1730	1730	1640	1650
Q <sub>1</sub>	4495	4540	4415	1575	1590	1500	1535
Q <sub>2</sub>	4340	4385	4260	1495	1510	1425	1460
ata	12,10	11,53	10,38	3,32	3,24	3,09	3,07
verz. temp.	187,4	185,3	180,6	136,4	135,6	133,9	133,7
10 <sup>3</sup> W	6,71	5,86	5,26	7,71	6,61	6,19	5,72
10 <sup>4</sup> R	8,34	0,07	0,41	0,64	1,13	0,87	1,52
α <sub>1</sub>	5270	5410	5650	3820	3880	3890	4420
α <sub>6/7/8</sub>	5380	5690	6110	4450	4600	4480	4770
α <sub>16/17/18</sub>	5150	5170	5240	3350	3350	3430	4110
α <sub>2</sub>	8940	8840	12700	5410	8870	10900	13700
			5720				4330

Grensvulling: 51 cm

Grensvulling: 54 cm

TABEL XX.

K Cb. Helling 30°.

Loodmantelproeven.

Proef-no.	A: Spec. uitw. V.O.-bel. 30.000 kcal/m <sup>2</sup> ,h.				B: Spec. uitw. V.O.-bel. 10.700 kcal/m <sup>2</sup> ,h.			
	171	172	173	174	175	176	177	178
Vulhoogte	140	108	81	60	141	112	82	62
1	186,3	182,9	178,0	176,4	137,3	136,0	134,4	134,9
2	187,2	183,5	178,3	175,7	137,6	136,2	134,6	134,1
3	187,0	183,5	178,3	175,7	137,6	136,3	134,5	134,0
4	186,8	183,4	178,2	175,7	137,4	136,1	134,3	134,0
5	179,6	183,3	178,3	175,7	134,8	135,6	134,2	133,9
6	197,8	194,5	189,2	186,0	141,9	140,6	138,8	138,5
16	199,6	196,0	191,2	186,5	143,7	142,3	140,0	139,1
7	196,7	193,6	188,5	185,4	141,6	140,4	138,5	138,1
17	197,3	193,7	188,9	185,2	142,7	141,2	139,3	138,7
8	197,1	193,7	187,4	184,2	141,6	140,3	138,4	137,8
18	198,5	194,8	188,4	185,0	142,0	140,6	138,9	138,7
9	172,6	171,6	167,8	167,5	132,3	131,2	130,8	130,8
12	169,2	168,8	165,7	164,8	131,1	130,3	129,7	130,1
10	170,2	170,4	169,8	167,4	131,4	130,9	131,1	130,8
13	166,5	168,0	165,2	163,1	129,9	130,1	130,0	129,7
11	166,2	174,1	169,5	167,3	129,1	132,1	131,0	130,8
14	162,7	167,3	165,1	162,9	128,3	130,0	130,0	129,7
15	100,7	100,8	100,4	100,3	100,8	100,8	100,8	100,5
mantel	100,9	100,9	100,8	100,8	100,9	101,0	101,0	100,8
input	4760	4760	4590	4590	1660	1660	1660	1690
Q <sub>1</sub>	4340	4385	4215	4120	1500	1525	1520	1565
Q <sub>2</sub>	4190	4230	4065	3970	1425	1445	1445	1485
ata	11,97	11,26	9,83	9,26	3,41	3,29	3,14	3,11
verz. temp.	187,0	184,2	178,2	175,7	137,3	136,1	134,4	134,1
10 <sup>3</sup> W	7,02	5,65	5,25	4,91	8,13	6,82	5,77	5,35
10 <sup>4</sup> R	8,36	0	-0,1	0,44	9,20	1,97	1,32	1,92
α <sub>1</sub>	5360	5400	5320	6180	3870	3970	4220	4840
α <sub>6-7-8</sub>	5870	5750	5770	6380	4580	4590	4820	5500
α <sub>16-17-18</sub>	4930	5100	4930	6000	3350	3500	3740	4320
α <sub>2</sub>	7560	9800	13100	15200	6380	7890	13600	16400

Grensvulling: 51 cm

Grensvulling: 53 cm



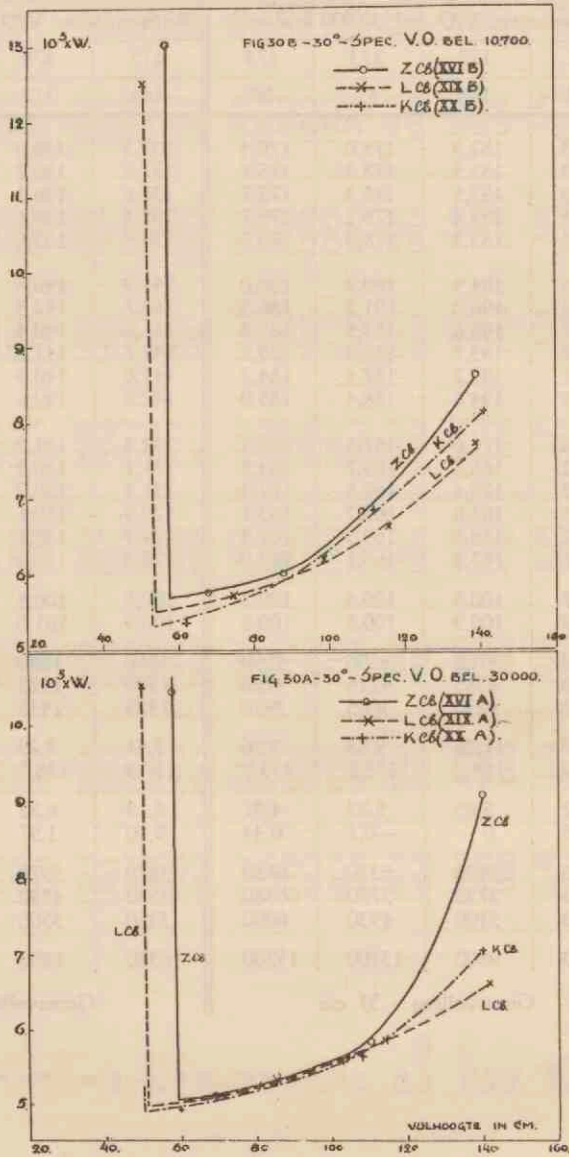


Fig. 30. Grafische voorstelling van den invloed van de Cb op W bij hellenden stand.

op, n.l. het gunstiger worden van  $a_2$  bij hellenden stand, tengevolge van het afvloeien van condenswater aan de bovenzijde van de buis.

- $a_3$ . De waarden van  $a_3$  (zie § 40) zijn, gecombineerd met die, gevonden bij de hellende Haag-buis zonder circulatiebuis, in fig. 26 weergegeven (zie ook § 45 en fig. 31).

#### § 44. De totale weerstand.

In de figuren 30 A en 30 B is de totale weerstand  $W$  van de Haag-buis bij een helling van  $30^\circ$  met den horizon grafisch voorgesteld voor de proeven met loodmantel Z Cb, L Cb en K Cb bij de groote en de kleine spec. V. O.-belasting. Bij middelbare vulling zijn de onderlinge verschillen tusschen de Z Cb-serie, de L Cb- en de K Cb-serie gering, zooals uit de reeds besproken componenten van  $W$  ook te verwachten is. Bij hooge vulling is de L Cb aanzienlijk gunstiger, een resultaat, dat ook bij de verticale buis werd gevonden. De K Cb-serie bevindt zich juist tusschen de beide uitersten Z Cb en L Cb in.

In de buurt van de grensvulling is bij beide belastingen de K Cb het gunstigst (zie § 43); echter is het verloop van de krommen hier onzeker bij gebrek aan voldoende metingen. Zooals in alle grafische voorstellingen, betrekking hebbende op de hellende Haag-buis, zijn ook hier de krommen geëxtrapoleerd tot aan de gemeten grensvulhoogte, omdat steeds gebleken is, dat zich geen bijzonderheden voordoen tot aan de grensvulling toe.

Na het passeeren van de grensvulling treedt onmiddellijk oververhitting op, waardoor de totale weerstand snel toeneemt. Metingen bij hellende buis, dieper in het oververhitte gebied, zijn niet verricht, omdat de oververhitting hier direct dusdanige vormen aanneemt, dat beschadiging van het apparaat niet achterwege kan blijven.

#### § 45. Slotbeschouwing.

Ten einde een goed overzicht te verkrijgen van den invloed van de helling op den totalen weerstand van de Haag-buis en op de samenstellende componenten daarvan, is in fig. 31 op sterk vergrootte schaal een samenvatting gegeven van het verloop dezer grootheden met de

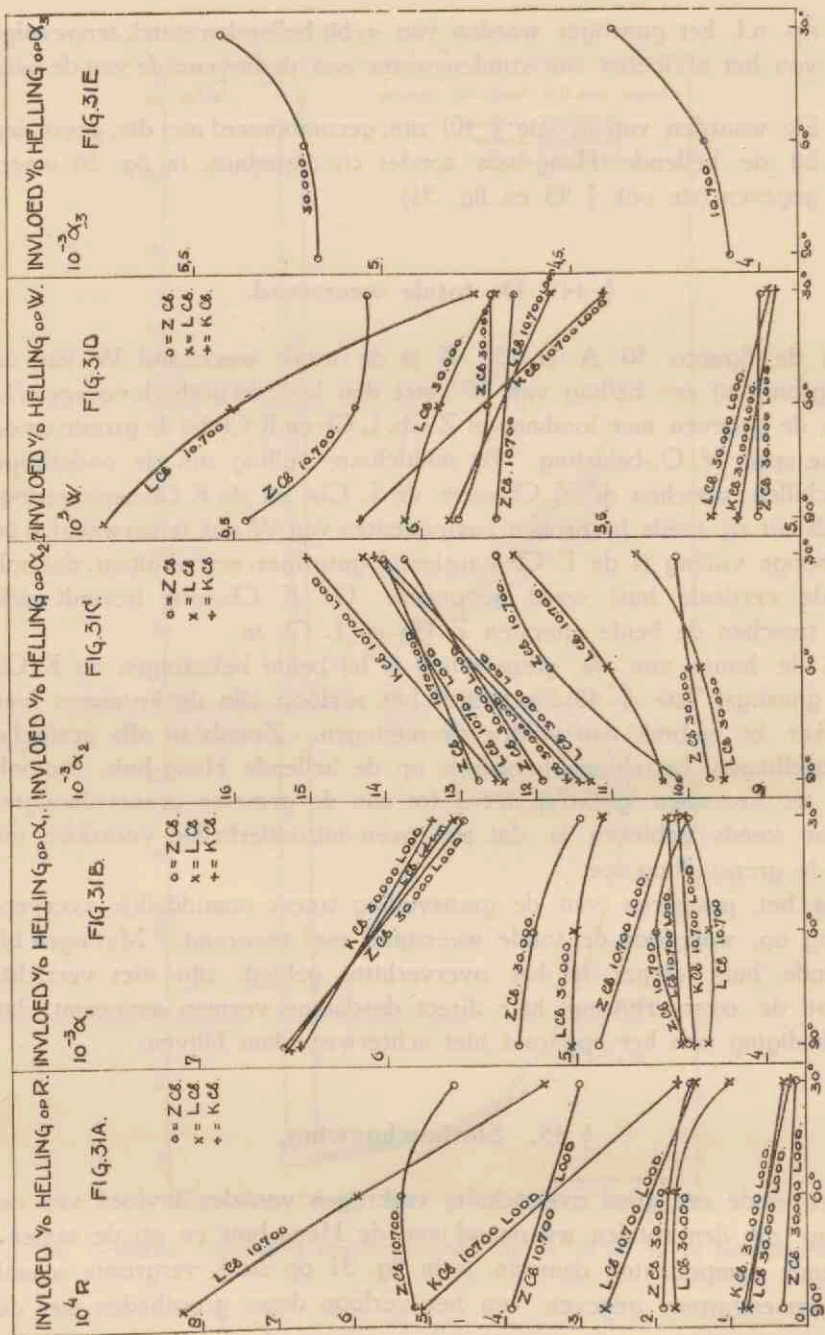


Fig. 31. Algemeen overzicht van het gedrag van de proefbuis bij 70 cm vuilhoogte.



helling, bij de vulhoogte, die voor de onderzochte proefbuis practisch het meest in aanmerking komt, n.l. de vulhoogte 70 cm ( $\frac{1}{3}$ ).

Daartoe zijn met behulp van de grafische voorstellingen, die van de grootheden uit elke tabel afzonderlijk gemaakt zijn, de waarden bepaald bij de vulhoogte 70 cm. Deze waarden zijn overgebracht naar de figuren 31 A t/m E. Op de abcis is steeds de hoek met den horizon afgezet; op de ordinaat de betreffende grootheid. Duidelijkheidshalve is hierbij de schaal van de ordinaat aanzienlijk grooter gekozen dan in de vroegere figuren.

Voor die reeksen, waarbij ook metingen bij een helling van  $60^\circ$  zijn verricht, staan voor elke kromme 3 punten ter beschikking, n.l. bij  $90^\circ$ ,  $60^\circ$  en  $30^\circ$  met den horizon. Bij de overige slechts 2, welke door een rechte lijn zijn verbonden. Mogen de krommen, elk op zich zelf beschouwd, derhalve geen aanspraak maken op groote nauwkeurigheid, het verloop van alle krommen te zamen geeft een goed beeld van den gang van het verschijnsel bij helling van de Haag-buis uit den loodrechten stand.

Zoo blijkt uit fig. 31 A, dat de inwendige weerstand van de Haag-buis onder alle omstandigheden kleiner wordt bij hellende buis en bovendien, dat de L Cb hierbij den grootsten vooruitgang boekt.

Eveneens blijkt uit fig. 31 B, dat hellende stand in het algemeen voor  $a_1$  ongunstig is; slechts bij de kleine belasting is in de gevallen L Cb en K Cb een kleine vooruitgang te bespeuren.

Fig. 31 C toont aan, dat  $a_2$  steeds een belangrijke stijging ondergaat met de helling uit den loodrechten stand. Dit verschijnsel is reeds in § 38 verklaard.

Fig. 31 D geeft een goed beeld van het verloop van den totalen buisweerstand. Deze neemt bij toenemende helling uit het lood zeer duidelijk af, zoodat alle factoren bijeen genomen, per slot van rekening veroorzaken, dat de hellende Haag-buis als geheel beschouwd, gunstiger is dan de verticale. Het ongunstiger worden van  $a_1$  bij hellenden stand wordt dus in ruime mate gecompenseerd door de verbetering die Rinw en  $a_2$  ondergaan. Vooral de buis met Cb trekt in het bijzonder van den hellenden stand profijt.

Tenslotte geeft fig. 31 E den invloed van de helling op  $a_3$  weer. De waarden Z Cb, L Cb en K Cb zijn wederom voor elk der onderzochte belastingen samengevoegd, omdat zij elkaar toch nagenoeg dekken.  $a_3$  neemt aanvankelijk langzaam, later sneller toe met de helling.

De figuren 31 A t/m E geven behalve een beeld van het verloop der grootheden als functie van de helling, ook een samenvattend overzicht van het gedrag van de Haag-buis onder diverse omstandigheden (voor vulhoogte  $\frac{1}{3}$ ).

Zoo demonstreert fig. 31 A op duidelijke wijze de afname van den inwendigen weerstand, ten eerste bij grootere spec. V.O.-belasting en ten tweede bij verhooging van de werktemperatuur (proeven met loodmantel). Voorts toont zij den invloed van de Cb op den inwendigen weerstand.

Fig. 31 B demonstreert behalve de afname bij helling tevens de sterke toename van  $a_1$  met de werktemperatuur en met de spec. V.O.-belasting en laat ook den doorgaans ongunstigen invloed van de circulatiebuis op  $a_1$  zien.

Fig. 31 C toont behalve de stijging van  $a_2$  met de helling uit het lood tevens aan, dat de aanwezigheid van een circulatiebuis voor  $a_2$  van weinig belang is. In de overeenkomstige gevallen spreiden de krommen slechts weinig. Voorts toont deze figuur nog aan, dat de warmteovergangscoefficiënt bij condensatie gunstiger wordt bij hogere werktemperatuur, daarentegen ongunstiger bij grootere belasting (verklaring, zie § 26).

Ten slotte blijkt uit fig. 31 D duidelijk, dat de totale buisweerstand aanzienlijk afneemt bij grootere V.O.-belasting en bij hogere werktemperatuur (zie verschil gewone proeven met proeven met loodmantel bij gelijke belasting). Voorts, dat het aanbrenge van een Cb vooral in verticalen stand ongunstig is voor zoover alleen gelet wordt op den warmteweerstand, die de Haag-buis als geheel beschouwd, als indirect verwarmingselement, bezit. Fig. 31 D immers toont (bij  $90^\circ$ ) duidelijk, dat de Z Cb-krommen steeds gelegen zijn onder de overeenkomstige L Cb- en K Cb-krommen.

Zoals reeds in de paragrafen 38 en 40 werd betoogd, is de nauwkeurigheid der metingen bij verticalen stand grooter dan die bij hellenden stand, tengevolge van de plaatsing der thermo-elementen. De resultaten der metingen in het laatste geval zijn echter ruimschoots voldoende te achten voor het trekken van conclusies aangaande de bruikbaarheids-grenzen voor de praktische toepassing der Haag-elementen, vooral wat betreft de gevaren van oververhitting bij hellenden stand.



## ZUSAMMENFASSUNG.

---

Es wird eine umfangreiche Zahl von Messungen an einem indirekten Heizelement für Dampfkessel, Speisewasservorwärmer, Lufterhitzer u.s.w. (nach dem Erfinder „Haag“-rohr genannt) beschrieben (Prinzip, siehe Abb. 2). Im Abschnitt II wird die Konstruktion des Probeapparates (Abb. 4) angegeben. Die Heizung ist elektrisch, die Kühlung mittels siedenden Wassers. Die übertragene Wärme wird mittels des Dampfes dieses Wassers gemessen, der in einen Oberflächenkondensator E (Abb. 3) gesammelt wird. Die Temperaturen im Innern des Rohres werden mit Konstantan-Eisen-Thermoelementen (Abb. 5) gemessen; die in der Rohrwand von Heiz- und Kühlflächen ebenfalls mit Konstantan-Eisen-Thermoelementen, in eingefrästen Nuten eingebettet.

Der Gesamtwärmeübergangswiderstand ( $W$ ) des Rohres und dessen Komponente, Wärmeübergangszahl Eisen  $\rightarrow$  siedendes Wasser ( $\alpha_1$ ), innerer Widerstand ( $R$ ) des Rohres und Wärmeübergangszahl kondensierenden Dampfes ( $\alpha_2$ ) sind unter verschiedenen Umständen untersucht worden.

Die Resultate der Messungen am senkrechten Haagrohr ohne Zirkulationsrohr sind im Abschnitt III beschrieben worden, die am senkrechten Rohre mit Zirkulationsrohre im Abschnitt IV, während die Messungen am schrägen Haagrohr im Abschnitt V wiedergegeben sind.

Um unter übrigens gleichen Umständen den Einfluss der Arbeitstemperatur prüfen zu können, ist bei einer Anzahl von Versuchsreihen die Kühlfläche von einem Bleimantel umgeben worden (in den Abbildungen mit „Lood“ bezeichnet).

Die Ergebnisse können kurz etwa so zusammengefasst werden:

### 1. *Wasserfüllung und Überhitzung.*

Im allgemeinen ist eine mittlere Füllung, etwa ein Drittel (ungefähr 70 cm Füllhöhe) des Rohrvolumens die günstigste. Große Füllung hemmt die innere Zirkulation der Flüssigkeit und die Kondensation des Dampfes gegen die Kühlfläche. Kleine Füllung gibt beim senkrechten Rohre die Gefahr der Überhitzung der Heizfläche.



Obwohl es öfters gelingt die Füllung bis  $10 \text{ cm}^3$  zu verringern, ohne Überhitzungserscheinungen, geschah es beim Rohre ohne Zirkulationsrohr aber auch, dass bereits bei  $55 \text{ cm}^3$  Überhitzung auftrat. Beim schrägen Rohre ist eine kleine Füllung nicht zu verwenden. Unter der Grenzfüllung (51 bis 59 cm) tritt immer Überhitzung auf an Stelle 8 (Abb. 21).

2.  $a_1$ .

Wie zu erwarten ist, steigt  $a_1$  stark mit der Arbeitstemperatur und mit der Heizflächenbelastung.

Im mittleren Füllungsgebiete ist der Einfluss eines eingesetzten Zirkulationsrohres gering und erhöht die Übertragung nicht.

Das schräge Rohr ist etwas ungünstiger als das senkrechte. Besonders die obere Seite ist ungünstiger.

3. *Innerer Widerstand R.*

Hier ist das schräge Rohr günstiger als das senkrechte. Erhöhung der Arbeitstemperatur und Erhöhung der Heizflächenbelastung geben beide eine starke Erniedrigung des innern Widerstandes, was früher bereits auch am gläsernen Haagrohre gefunden worden ist.

Ein Zirkulationsrohr, besonders ein langes, bis in den Kühlraum reichendes Rohr, erniedrigt den innern Widerstand nur wirklich beim hochgefüllten Rohre.

4.  $a_2$ .

Wie  $a_1$  nimmt  $a_2$  beträchtlich zu mit der Arbeitstemperatur des Rohres, aber nimmt in Gegensatz mit  $a_1$  ab mit zunehmender Heizflächenbelastung. Diese Ergebnisse sind im völligen Einklang mit der Nusseltschen Wasserhauttheorie. Nur sind die Absolutwerte durchschnittlich um etwa ein Viertel grösser als die mittels der Nusseltschen Formel berechneten. Beim schrägen Rohre ist  $a_2$  auch bedeutend grösser als beim senkrechten; besonders die obere Seite zeigt sich recht günstig, was auch mit der Nusseltschen Theorie erklärt werden kann.

5. *Der Gesamtwiderstand W.*

Die Einflüsse auf die unter 2, 3 und 4 genannten Einzelwiderstände liefern, richtig zusammengesetzt, den Einfluss auf den Gesamtwiderstand  $W$ , wobei auch die Temperaturabhängigkeit des Eisenwiderstandes zu beachten ist.

Der Gesamtwiderstand nimmt beträchtlich ab mit zunehmender Heizflächenbelastung und zunehmender Arbeitstemperatur des Rohres, während der Einfluss des Zirkulationsrohres im mittlern Füllungsgebiet gering ist, und beim senkrechten Rohre bestimmt ungünstig, besonders bei kleiner Heizflächenbelastung.

Das schräge Rohr ist stets günstiger als das senkrechte.

Weil für die praktische Anwendung des Rohres die mittleren Füllungen fast nur ausschliesslich in Betracht kommen werden, ist in Abb. 31 eine Übersicht gegeben von dem Einfluss der Neigung der Rohres auf die Übergangszahlen und Widerstände für Füllhöhe 70 cm. Der angegebene Winkel ist im Bezug auf eine waagerechte Fläche (senkrecht ist also  $90^\circ$ ) genommen worden.

Auch der Einfluss der übrigen Umstände, wie Heizflächenbelastung, Zirkulationsrohr, Arbeitstemperatur sind für diese technisch wichtigste Füllung auf einfache Weise aus dieser Abbildung abzulesen.

## LITERATUUROVERZICHT.

### *Algemeene Literatuur:*

- I. H. Gröber: Einführung in die Lehre von der Wärmeübertragung. Springer 1926.
- II. M. ten Bosch: Die Wärmeübertragung. Dritte Aufl. Springer 1936.

### *Bijzondere Literatuur:*

- III. E. Herz: Anlage zum Verdampfen von Flüssigkeiten durch Übertragen von Wärme in geschlossenen Transmissionsröhren. D. R. Patentschrift Nr. 76633 - Kl. 13.
- IV. E. Herz: Neues Wärmetransmissions-Verfahren. Zeitschrift des Oesterreichischen Ingenieur- und Architekten-Vereines, Nr. 25, 22 Juni 1894, 46e Jaargang.
- V. E. Herz: Rohrelement für Einrichtungen zur mittelbaren Erzeugung von Dampf durch in Rohrelement selbst erzeugten Dampf. D. R. Patentschrift Nr. 28443 - Kl. 13g - Gr. 3.
- VI. B. Röber: Neuerungen an geschlossenen Röhren zur Übertragung von Wärme. Zusatzpatent zu Nr. 14552 - 1880. D. R. Patentschrift Nr. 18412 - Kl. 13.
- VII. C. A. Campagne: Über ein neuartiges indirektes Heizelement für Hochleistungsdampfkessel. Forschung (Techn. Mech. u. Thermodynamik), Bd. 1, Nr 12 (1930).
- VIII. C. A. Campagne: Onderzoekingen aan Haagbuizen. Warmte-Techniek 1930, Nrs. 4, 5; 1931, Nr. 1.
- IX. F. C. Huygen en C. A. Campagne: Warmteovergang en Stroomingsweerstand. Warmte-Techniek 1936, Nr. 1.
- X. H. Reiher: Wärmeübergang von strömender Luft an Röhre und Röhrenbündel im Kreuzstrom. Forsch.-Heft 1925. VDI-Verl.
- XI. F. K. Th. van Iterson: De warmteovergang van vas te lichamen op turbulent stroomende vloeistoffen. De Ingenieur 1926, Nr. 17.
- XII. W. Nusselt: Die Kühlung eines Zylinders durch einen senkrecht zur Achse strömenden Luftstrom. Gesundh. - Ing. Bd. 45 (1922).
- XIII. A. J. ter Linden: Stroomingsweerstand van Bundels Pijpen. Warmte-Techniek 1935, Nrs. 9, 11.
- XIV. E. Kirschbaum, B. Kranz u. D. Stark: Wärmeübergang am senkrechten Verdampferrohr. Forsch.-Heft 1935, Nr. 375.
- XV. E. Kirschbaum: Arbeiten des Institutes für Apparatebau a/d Techn. Hochschule, Karlsruhe. Forschung Bd. 3 (1936).
- XVI. W. Nusselt: Die Oberflächenkondensation des Wasserdampfes. Z. VDI Bd. 60 (1916).
- XVII. Knoblauch, Raisch, Hausen, Koch: Tabellen und Diagramme für Wasserdampf, berechnet aus der spezifischen Wärme. 1932.
- XVIII. H. W. van Tijen: De Yarrow-ketel ter Zee en te Land. De Ingenieur 1930, Nr. 26.
- XIX. K. Cleve: Modellversuche über den Wasserumlauf in Steil- und Schrägrohrkesseln. Forsch.-Heft 1929.
- XX. Fehrmann: Über den Wärmedurchgang an Heizkörpern von Dampfmaschinen. Z. VDI Bd. 63 (1919).
- XXI. Schmidt, Schürig u. Sellschopp: Versuche über die Kondensation von Wasserdampf in Film- und Tropfenform. Forschung Bd. 1 (1930).
- XXII. E. Gnam: Tropfenkondensation von Wasserdampf. Forsch.-Heft 382 (1937).
- XXIII. M. Jacob u. W. Linke: Der Wärmeübergang von einer waagerechten Platte an siedendes Wasser. Forschung Bd. 4 (1933).
- XXIV. M. Lang: Heisdampfkondensation als Schwingungsproblem. Forschung Bd. 5 (1934).



# STELLINGEN

---

## I.

Wegens de niet-omkeerbaarheid van het warmtetransport in een Haag-buis, moet deze buis bij uitstek geschikt geacht worden voor het opnemen van warmte uit sterk fluctueerende warmtebronnen.

## II.

Voor het berekenen van de juiste dimensies van een vuurhaard is het noodzakelijk de verbrandingssnelheid der vlamgassen te kennen.

Het moet zeer wenschelijk worden geacht systematische onderzoeken te verrichten over den verbrandingstijd der gassen als functie van hun snelheid, hun temperatuur en de luchtvermaat.

## III.

Het moet als een tekort beschouwd worden, dat tot op heden geen afdoende experimenteele methoden bekend zijn om de dikte en de temperatuur van de zoogenaamde grenslaag bij warmtegeleidingsverschijnselen nauwkeurig te meten.

## IV.

De identiteit tusschen de vergelijkingen van de wrijving van vloeistoffen en van de warmteoverdracht dier vloeistoffen is gevaarlijk voor het trekken van conclusies met het oog op praktische berekeningen.

## V.

De door E. Herz met behulp van de formule van Regnault uitgevoerde dampnelheidsberekening is fout.

## VI.

De wijze waarop H. Teichmann op blz. 19 de begrippen  $E = m c^2$  en  $E = \frac{1}{2} m v^2$  invoert om de materie-golfbeweging (de Broglie) te kunnen inleiden, is zeer verwarrend.

H. Teichmann. Einführung in die Quantenphysik.  
(Math.-Phys. Bibl. Nr. 13; Teubner)

## VII.

Het is voor twijfel vatbaar, dat de door H. J. de Boer ontwikkelde formules ter afronding van de ervaringswaarden in de praktijk algemeen zullen voldoen.

H. J. de Boer. Over het gladstrijken van krommen.  
Diss. Phil. Groningen, 1936.

## VIII.

Het is een fictie te meenen, dat het invoeren van differentiaal- en integraalrekening op de middelbare scholen het wiskundig inzicht van den doorsnee-leerling verbetert.

## IX.

Het nieuwe leerplan voor Natuurkunde biedt door zijn twee-ronden-systeem vele voordeelen; het leidt in de lagere klassen echter tot oppervlakkigheid.

K.B. 27 Mei 1937; St.bl. No. 363.

---











