

E 407

Bibliotheek Hoofdkantoor TNO
's-Gravenhage - 8 MEI 1968

Publ. no 274 h.g.

NEDERLANDSE TECHNISCHE VERENIGING VOOR VERWARMING EN LUCHTBEHANDELING

PUBLICATIE 8-R
november 1967

RESULTATEN VAN ENIGE ONDERZOEKINGEN BETREFFENDE DE TOEVOER VAN GEKOELDE LUCHT IN EEN PROEFKAMER

DEEL I: TOEVOER VANUIT DE GANGWAND

ALGEMEEN SECRETARIAAT T.V.V.L.: SURINAMESTRAAT 24, 'S-GRAVENHAGE, TELEFOON (070) 11.61.35

TNO
11081

Het researchproject 63/4 „Zomerconditionering” kwam onder auspiciën van de TVVL tot stand in samenwerking tussen TNO enerzijds en de TVVL en een aantal deelnemers uit het bedrijfsleven anderzijds. Het programma werd uitgevoerd door de Afdeling Binnenklimaat van het Instituut voor Gezondheidstechniek TNO onder leiding van Ir. E. van Gunst.

De begeleiding vond plaats door een Commissie van Overleg, bestaande uit vertegenwoordigers uit de kring van de deelnemers, van TNO en van de TVVL, te weten

Ir. A. F. Bunge	namens TVVL
Prof. Ir. W. Draijer	namens TVVL
Ir W. van Ekeren	
P. J. Erkelens	namens TNO
Ir. E. van Gunst	namens TNO
Ir. G. G. Halmos	
Ir. W. H. Knoll	
H. van Schaik	
Ir. D. van Zuilen (voorzitter)	namens TNO
A. Zwaal (secretaris)	namens TVVL

Samenstelling van het rapport door I.G.-TNO: Ir. E. van Gunst, P. J. Erkelens, W. J. P. Coenders en W. R. van den Berg. (Publicatie no. 274 van het Instituut voor Gezondheidstechniek TNO).

Prijs van deze uitgave: f 5,—

Eerder verschenen publicaties:

—	Thermische eigenschappen van bouwmaterialen (in samenwerking met Ratiobouw en TNO) (juli 1964)	f 4,25
2—WG	Regelen ter behartiging bij het voorkomen van corrosie van de met rookgas in contact komende delen van ketelinstallaties (december 1964)	f 2,—
3—WG	Aanbevelingen ter voorkoming van corrosie aan de waterzijde van warmwaterverwarmingsinstallaties (april 1965)	f 2,—
4—WG	Berekeningsmethoden voor de bepaling van de capaciteit van klimatiseringsinstallaties in niet-stationaire gevallen (augustus 1965)	f 5,—
5—WG	De berekening van behaaglijkheidscondities (april 1966)	f 4,50
6—WG	„Meteorologische gegevens I”: buitentemperatuur en zonneshijnduur (april 1966) (Deze publicatie wordt alléén ter beschikking gesteld van T.V.V.L.-leden).	f 10,—
7—WG	„Meteorologische gegevens II”: droge en natte boltemperatuur en relatieve vochtigheid (mei 1967) (Deze publicatie wordt alléén ter beschikking gesteld van T.V.V.L.-leden).	f 10,—

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotocopie, microfilm of op welke andere wijze ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de T.V.V.L.

No part of this book (issue) may be reproduced in any form by print, photoprint, microfilm or any other means without written permission from the T.V.V.L.

1. Inleiding

Onder auspiciën van de Nederlandse Technische Vereniging voor Verwarming en Luchtbehandeling (TVVL) werd bij het Instituut voor Gezondheidstechniek TNO in de proefkamer van de Afdeling Binnenklimaat een speurwerkprogramma uitgevoerd.

Het onderzoek was gepland met een duur van ca 2 jaar en had tot doel, na te gaan welke temperatuur- en snelheidsverdelingen in een (kantoor) vertrek optreden wanneer gekoelde lucht wordt ingeblazen om warmtebelastingen, zoals die zich b.v. onder zomerse omstandigheden kunnen voordoen, af te voeren.

In principe zijn drie verschillende methoden van luchttoevoer bestudeerd en wel:

- toevoer van gekoelde lucht in de kamer vanuit de gangwand, dus de wand tegenover de buitenwand
- toevoer van gekoelde lucht vanuit inductie-units onder de vensters
- toevoer van gekoelde lucht vanuit het plafond

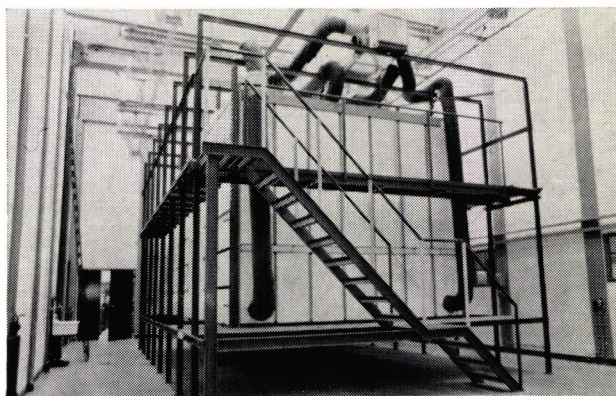
De kosten voor de uitvoering van dit programma werden geput uit een fonds dat voor de helft werd gevormd uit bijdragen van TVVL en van een aantal geïnteresseerde deelnemers uit de industrie en voor de helft door TNO. Het programma van dit onderzoek, alsmede de opeenvolgende tussentijdse resultaten werden besproken in een Commissie van Overleg, voor dit project gevormd uit vertegenwoordigers van TVVL, van de industriële deelnemers en van het Instituut voor Gezondheidstechniek TNO.

In deze publicatie worden de resultaten gegeven van het eerste gedeelte van dit onderzoek, nl. van de proeven uitgevoerd met luchttoevoer vanuit de gangwand. Tengevolge van de opzet en uitvoering van dit project konden voor deze wijze van luchttoevoer aan een vertrek richtlijnen worden afgeleid bruikbaar voor het ontwerp van installaties en werd tevens een inzicht verkregen in enkele meer fundamentele verschijnselen die van belang zijn bij het totstandkomen van bepaalde stromingsvormen van lucht in een vertrek.

2. Overzicht van de verrichte proeven

De proefkamer is een vertrek met afmetingen van 3,85 m breedte, 5 m diepte en 3,15 m hoogte, met één (geïmiteerde) buitenwand waarin zich een venster bevindt over de gehele breedte en 2,07 m hoog, met daaronder een borstwering.

Bij de verrichte proeven werd uitgegaan van een gemiddelde warmtebelasting van ca 75 kcal/h · m² vloeroppervlak, hetgeen voor de proefkamer een warmtetoevoer van ca 1500 kcal/h betekende, die,



1

zoals gezegd, alle door de buitenwand werden toegevoerd.

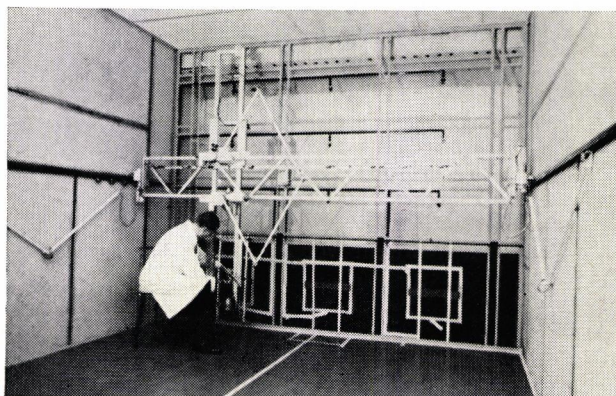
Een dergelijke belasting zal b.v. voorkomen bij een gebouw met vensters, over ca 50 % van de gevel, uitgevoerd met dubbel glas en venetian blinds aan de binnen zijde, met daarbij een verlichtingsniveau van ca 500 lux.

De figuren 1 en 2 geven een uitwendige en een inwendige indruk van de proefkamer. Fig. 2 toont daarbij het zg. meetrek dat beweegbaar is en waarop de meetinstrumenten bevestigd zijn ter bepaling van luchttemperatuur en -snelheid.

Met behulp van een programma wordt het rek gestopt op een zeer groot aantal plaatsen in de kamer en worden de meetresultaten, die op deze plaatsen worden verkregen, vastgelegd in een ponsband. Door een computer worden deze meetresultaten afgedrukt waarmee de situatie in een aantal doorsneden van de kamer wordt vastgelegd. Voor iedere doorsnede, die op deze wijze wordt bewerkt, kunnen de temperatuur- en snelheidspatronen worden uitgewerkt en geanalyseerd als aangegeven in de figuren 8 en 9.

Om de warmtebelasting van ca 1500 kcal/h af te voeren werden ventilatie-vouden toegepast vanaf 3 tot ongeveer 10, waarbij overeenkomstig de inblaastemperaturen varieerden van 7,0—15,6 °C. De inblaas-

2



3

snelheid van de lucht respectievelijk het vrije roosteroppervlak werden gekozen naar aanleiding van de aard van de luchttoevoer.

Bij het toevoeren van gekoelde lucht uit de gangwand, werd het merendeel van de proeven uitgevoerd met toepassing van 3 geperforeerde strippen als roosters, voorzien van ronde gaatjes $\varnothing$ 9,4 mm. De strippen bevinden zich op een horizontale lijn op een hartlijnafstand van 22,5 cm onder het plafond en op onderlinge afstand hart op hart van 1.30 m (zie tabel 3, schema). Aangezien het aantal mogelijk toe te passen lucht-uitblaasarmaturen welhaast ongelimiteerd is, werd als voornaamste doel van het onderhavige onderzoek (dat zowel in duur als in budget tamelijk beperkt was) meer gezien het verkrijgen van inzicht in de fundamentele verschijnselen die de stromingspatronen in de kamer bepalen, dan het verzamelen van gegevens over deze armaturen als zodanig.

3. Luchtbeweging in een geklimatiseerd vertrek

Het uiteindelijke resultaat bij het koelen van vertrekken met behulp van lucht moet zodanig zijn, dat althans in de leefzone geen tochtklachten ontstaan doordat men de luchtbeweging op enige plaats als hinderlijk (meestal hinderlijk koud) ondervindt.

Het is daarom zaak om reeds bij het ontwerp een duidelijk beeld te hebben hoe de luchtbeweging voor wat betreft de optredende temperatuur en snelheden zich zal gaan voltrekken.

Dit is geen eenvoudige opgave, aangezien een groot aantal factoren daarbij gezamenlijk de toestand bepalen.

In diverse handboeken en publicaties is beschreven hoe de *snelheidsafname in een straal* plaatsvindt, afhankelijk van de vorm en aard van de inblaasopening en van de inblaassnelheid. In het merendeel van de gevallen hebben de formules echter alleen betrekking op de zgn. „vrije straal”. Wel wordt bij sommige auteurs aangegeven welke veranderingen optreden, indien de uitblaasopening zich bevindt juist aan de rand van een langslappend vlak, zodat van een „aanliggende straal” gesproken kan worden — voor roosters die op enige afstand van een langsliggend vak zijn gesitueerd (zoals in de proefkamer en in de praktijk) wordt vrijwel niets opgemerkt.

Een belangrijke invloed op de snelheidsafname in een straal kan ook verwacht worden van naastgelegen stralen, een omstandigheid die zich in de praktijk veelvuldig voordoet en ook bij de proeven aanwezig was. In beide laatstgenoemde gevallen zal het aanzuigen van omgevingslucht naar de straal bemoeilijkt kunnen

worden, als gevolg waarvan de snelheidsafname zich langzamer zal voltrekken.

Een veelvuldig gehanteerde grootheid is de „worplengte” van de ingeblazen luchtstraal.

Na het rooster verlaten te hebben, zal de ingeblazen lucht uit zijn directe omgeving lucht aanzuigen die in beweging wordt gebracht en meegenomen. Hierbij neemt de hoeveelheid lucht die in beweging is dus toe, hetgeen ten koste gaat van de snelheid die de lucht oorspronkelijk had. Daarbij dient opgemerkt te worden, dat de snelheid in de ingeblazen straal in de kern het grootst is en naar de zijanten afneemt en dat dus dit gehele snelheidspatroon naar een steeds lager niveau zal zakken.

Op een bepaalde afstand uit de opening zal de snelheid in de kern van de straal zijn gedaald tot ca 50 cm per seconde. Deze afstand wordt aangeduid als „worplengte” en zal sterk afhankelijk zijn van de inblaassnelheid, van de aard van de opening en van de omgevingscondities van de luchtstraal, zoals bijvoorbeeld eventueel naastgelegen stralen, een wand die zich mogelijk dicht naast de straal bevindt.

Om de lucht niet te sterk tegen tegenoverliggende wanden te laten botsen, is een veelvuldig toegepaste regel dat de worplengte van een straal niet meer mag bedragen dan $\frac{3}{4}$ van de afstand van de inblaasopening tot de tegenoverliggende wand. Het zal duidelijk zijn, dat — eventueel ook op andere wijze toegepast — het begrip worplengte mede een hulpmiddel is bij het ontwerpen van de inblaasverhoudingen.

Bij een luchtstraal die een hogere of een lagere temperatuur heeft dan zijn omgeving, zal naast de snelheidsafname ook een **afname optreden van het oorspronkelijke temperatuurverschil**. Ook hiervoor levert de literatuur bepaalde gegevens en voor de praktijk toe te passen formules, wederom voornamelijk voor vrije stralen.

Rydberg was een der eersten die bepaalde regels — gebaseerd op de luchtstroming — ontwerpen van de toevoer van gekoelde lucht aan vertrekken en hij gaf zekere grenzen ten aanzien van toelaatbare koelbelastingen, steunend op beschouwingen over het te verwachten risico van tochtklachten.

Hij baseerde deze beschouwingen op de stelling dat de condities in de straal te veel zouden mogen afwijken van de omringende — rustigere omgeving, één en ander uitgedrukt in de effectieve temperatuur. Een belangrijke aanname werd hierbij gemaakt en wel, dat de snelheid en de „onder”-temperatuur in de kern van een straal op een indientieke wijze afnemen.

In het werk van *Regenscheit* wordt aangenomen dat het verloop van de kerntemperatuur en de kernsnelheid verschillend is en daarbij houdt deze auteur er rekening mede, dat een koude straal naar beneden zal afbuigen.

Beide studies zijn overigens gebaseerd op de vrije straal en de aanliggende straal.

Naast snelheids- en temperatuuruitwisseling vertonen stralen die een afwijkende temperatuur hebben echter nog een bepaald gedrag dat evenwel niet zo eenvoudig in een getalwaarde is uit te drukken.

Een warmere straal is lichter dan zijn omgeving, een koude daarentegen zwaarder. Een vrije straal zal daardoor de neiging hebben zich hetzij opwaarts (warm), hetzij neerwaarts (koud) te bewegen. Over dit gedrag zijn diverse onderzoeken bekend.

Over stralen die in vertrekken worden uitgeblazen is evenwel veel minder bekend. Een koude straal, die op enkele decimeters afstand onder een plafond wordt uitgeblazen, zal tengevolge van zijn temperatuur de neiging vertonen naar beneden af te buigen. Tengevolge van het bovenliggende plafond zal de straal aan die zijde weinig lucht kunnen aanzuigen, waardoor de kans bestaat dat zich een kleine onderdruk vormt tengevolge waarvan zich een aanliggend effect op de straal manifesteert. Dit laatste zal dus het vallen van de straal enigermate tegenwerken.

Tenslotte is er in een vertrek de warmtebelasting: de reden dat de gekoelde lucht wordt ingeblazen.

Tengevolge van deze warmtebelasting zullen plaatselijke verhoogde temperaturen optreden, als gevolg waarvan zich convectieverschijnselen zullen voordoen. Plaatselijk zullen zich warmere luchtmassa's vormen, die een eigen beweging zullen willen ontwikkelen. De ingeblazen luchtstraal zal deze bewegingen ergens ontmoeten en mede hierdoor wordt de weg bepaald, die deze lucht zal volgen.

Bij de drie methoden van inblazen van gekoelde lucht zullen deze de convectie-invloeden in het gemeen op drie verschillende wijzen ontmoeten.

Bij toevoer vanuit de gangwand en met de warmtebelasting voornamelijk door de buitenwand, zullen de straal en de opstijgende convectie vanaf de ruit, zich min of meer frontaal treffen aan het plafond min of meer nabij de buitenwand.

Linke en zijn medewerkers behoren tot de eersten die met behulp van onderzoeken aan verkleinde modellen stromingspatronen van dit principe zichtbaar maakten.

De resultaten van de hier beschreven proeven tonen duidelijk aan dat het gecombineerd bestuderen van de verschijnselen in de straal (energie- en warmte-

uitwisseling) met die welke optreden in wisselwerking van straal en convectie zal leiden tot het verkrijgen van een beter inzicht in het proces binnenklimaat.

4. Snelheids- en temperatuurverloop in de kern van een vrije straal

In een aantal vooraanstaande handboeken en publicaties is nagegaan welke vergelijkingen worden gegeven voor de snelheid- en temperatuurafname in de hartlijn van een uitgeblazen vrije straal voor het gebruik bij het maken van ontwerpen.

Op Tabel 1 is één en ander samengevat voor ronde openingen, lange smalle spleten en geperforeerde stroken.

Het volgende kan hierbij nog worden toegevoegd.

In principe kunnen bij een luchtstraal drie zônes worden onderscheiden.

In de eerste zône blijft de snelheid in de kern van een straal onaangetast. De menging van de lucht en de daarmee gepaard gaande afnamen van de snelheid vinden slechts plaats aan de rand van de straal.

In de tweede zône is dit proces tot in de kern doorgedrongen en vindt ook hier een turbulente uitwisseling plaats. De snelheidsafname in de gehele doorsnede gaat hier in omgekeerde evenredigheid met de wortel uit de afstand.

In de derde zône gaat het uitwisselingsproces door en vindt een afname plaats van alle snelheden omgekeerd evenredig met de afstand. Deze zônes wordt wel aangeduid als „established turbulent flow”.

Voor de ronde opening vormt de zône 3 het voornaamste deel.

Bij het geperforeerde rooster treedt vlak na de uittrede een plotselinge snelheidsverlaging op, die na ca 1 m overgaat in een geleidelijke verdere afname, die vrijwel identiek ligt met die van de ronde opening t.g.v. de geometrische verhoudingen.

In vrijwel alle formules zoals die vermeld worden voor de snelheids- en temperatuurafnamen in vrije stralen komt naast uitblaassnelheid en dimensies van de opening een coëfficiënt voor, die bepalend is voor de mate van de snelheidsafname met de afstand. Deze coëfficiënt wordt in alle gevallen in verband gebracht met de karakteristiek van de uitblaasopening en wel voornamelijk met de mate van turbulentie die deze in de straal opwekt. De getalwaarden ervan berusten in alle gevallen op empirische waarnemingen en slechts bij een enkele auteur (*Regenscheit*) vindt men een rechtstreekse koppeling met turbulentieverschijnselen.

De diverse formules voor een zelfde opening geven aanleiding tot een zeker verschil in het voorspelde verloop van de hartlijnsnelheid; bij een principieel indientieke opbouw der formules is dit te wijten aan de verschijnselen K' -waarden.

Om de gewenste aansluiting te verkrijgen met het onderzoek in de Proefkamer zijn in het laboratorium van de Afdeling Binnenklimaat bij enkele snelheden metingen verricht aan vrije stralen uit een ronde opening en een geperforeerd rooster zoals die zijn toegepast in de Proefkamer.

Het blijkt dat deze meetresultaten bijzonder goed aansluiten bij de gegeven voorspelde verlopen.

Fig. 3 geeft het vergelijk tussen de gemeten waarden en de diverse formules zoals aangegeven in Tabel 1 voor de ronde opening en fig 4 voor de geperforeerde strips.

5. Snelheidsverloop van Isotherm in de proefkamer ingeblazen stralen

Aansluitend aan de vergelijkingen voor de vrije straal geven de diverse handboeken en auteurs aanwijzingen voor de zgn. „aanliggende” straal. Deze bestaan doorgaans eenvoudig uit de opmerking, dat men deze stralen als halve vrije stralen mag opvatten en dat dus invulling in de formules van de dubbele hoogte van de opening de gewenste snelheids- en temperatuursverlopen oplevert. Slechts één auteur (Farquharson) vermeldt zijn onderzoekresultaten van proeven aan openingen, die op enige afstand zijn aangebracht van een aanliggende wand. Hij geeft hiervoor gecorrigeerde waarden van de coëfficiënt K' (zie tabel 1).

In de Proefkamer is een situatie aanwezig, waarbij men de neiging heeft te gaan spreken over „aanliggende” stralen, gezien de geringe afstand waarop de inblaasopeningen vanaf het plafond zijn aangebracht. Bij het uitvoeren van metingen aan een isotherme stromingstoestand zou men zich dus een indruk kunnen vormen of het voornaamste effect van de langslopende wand — d.i. een snelheidsverhoging t.o.v. de vrije straal tengevolge van de verminderde inductie — zich manifesteert.

Niet uit het oog moet daarbij worden verloren, dat bij een „gewone” isotherme proef zich tevens het effect van de naastgelegen stralen zal doen gevoelen — dat overigens een versterking van het genoemde effect van verminderde inductie zou doen verwachten.

Metingen zijn verricht aan de isotherme stromingstoestand in de kamer bij toepassing van drie ronde openingen en van drie geperforeerde roosters.

De resultaten hiervan zijn tevens ingetekend in de

figuren 5 en 6 en deze zijn vergelijkbaar met de gegevens uit de literatuur voor de aanliggende stralen.

In tegenstelling tot de verwachtingen van een geringere afname van het hartlijn-snelheidsverloop trad bij de **ronde** openingen juist een sterkere afname op. Welke hiervan de oorzaak is kan niet worden opgegeven. Wel moet bedacht worden, dat tengevolge van de circulatie in een vertrek de toevoer van lucht naar de instroomplaats versterkt wordt — een omstandigheid die bij de vrije straal ontbreekt en die mogelijk de inductie van omgevingslucht naar de straal versterkt hetgeen de versterkte snelheidsafname zou kunnen bewerkstelligen.

Voor de **geperforeerde strip**, werd over het eerste traject een sterke snelheidsafname geconstateerd; vanaf het punt waar een „nieuwe” totaalstraal wordt gevormd (zie Huesmann), komt de afname overeen met die van de vrije straal. Dit verschijnsel speelt zich echter op een grotere afstand af van de opening.

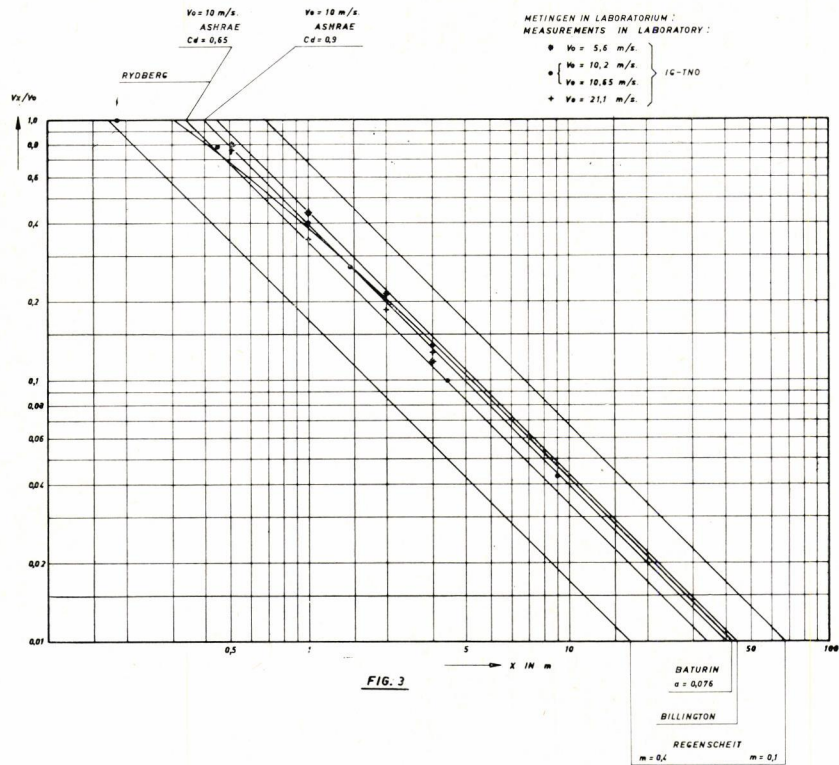
Bovendien trad bij deze isotherme proeven in de kamer nog een ander verschijnsel aan het licht. Bereikten de stralen de tegenoverliggende wand, dan traden bij het volgen van de hoeken aan het plafond en later aan de vloer hartlijn-snelheidsverlagingen, gevolgd door -verhogingen op. Waarschijnlijk vindt een bepaalde straalcontractie, althans verandering van het straalprofiel, plaats. Het gevolg van dit verschijnsel kan voor het binnenklimaat van betekenis zijn, omdat daardoor plaatselijk grotere snelheden kunnen voorkomen dan in de lijn der verwachtingen ligt en tochtverschijnselen kunnen optreden.

6. Patroon van luchtbeweging bij niet-isotherme stroming in de proefkamer

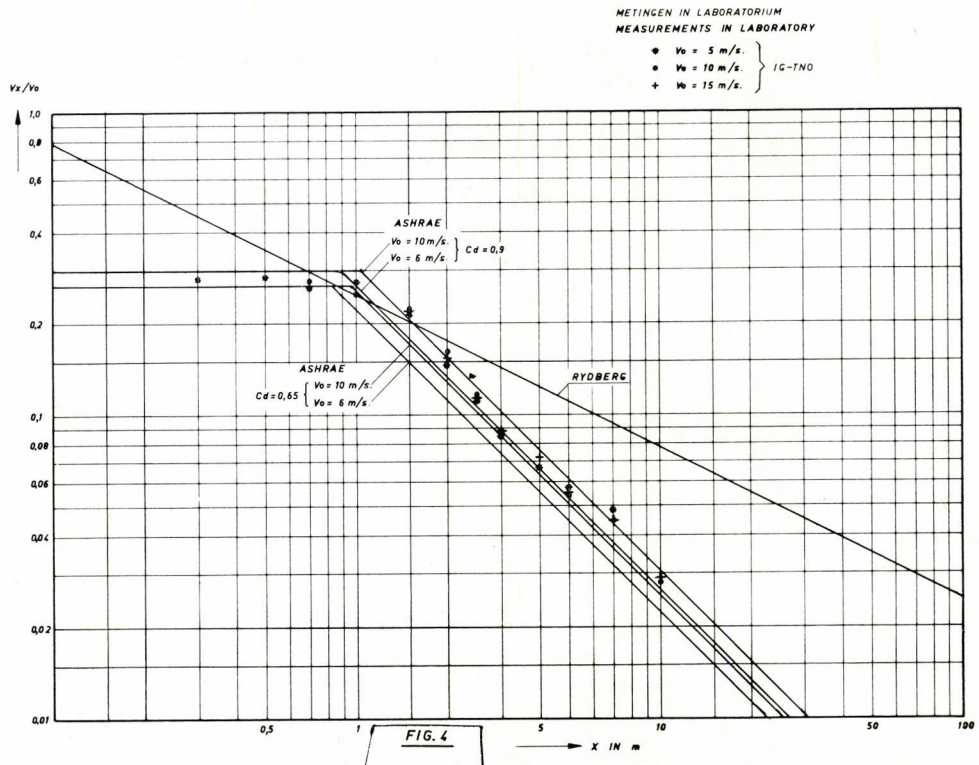
Alvorens verder in te gaan op het snelheidsverloop in de diverse straaltvormen bij een optredende zomerbelasting in de Proefkamer, vraagt eerst de vorm van de baan die de luchtstraal volgt, het stromingspatroon, de aandacht.

In de belastingtoestand van de kamer, waarbij de buitenwand een aanzienlijk verhoogde temperatuur heeft tengevolge van de warmtebelasting, zal de straal van deze laatste een bepaalde invloed ondervinden. Het warme wandoppervlak zal het verschijnsel van natuurlijke convectie teweegbrengen. De lucht aan de binnenzijde zal worden opgewarmd en zal daardoor de neiging tot opstijging vertonen. Dit zal een kracht uitoefenen op de (koude) luchtstraal die vanuit de gangwand wordt ingeblazen. Het zal afhangen van de onderlinge verhouding tussen de te ontwikkelen

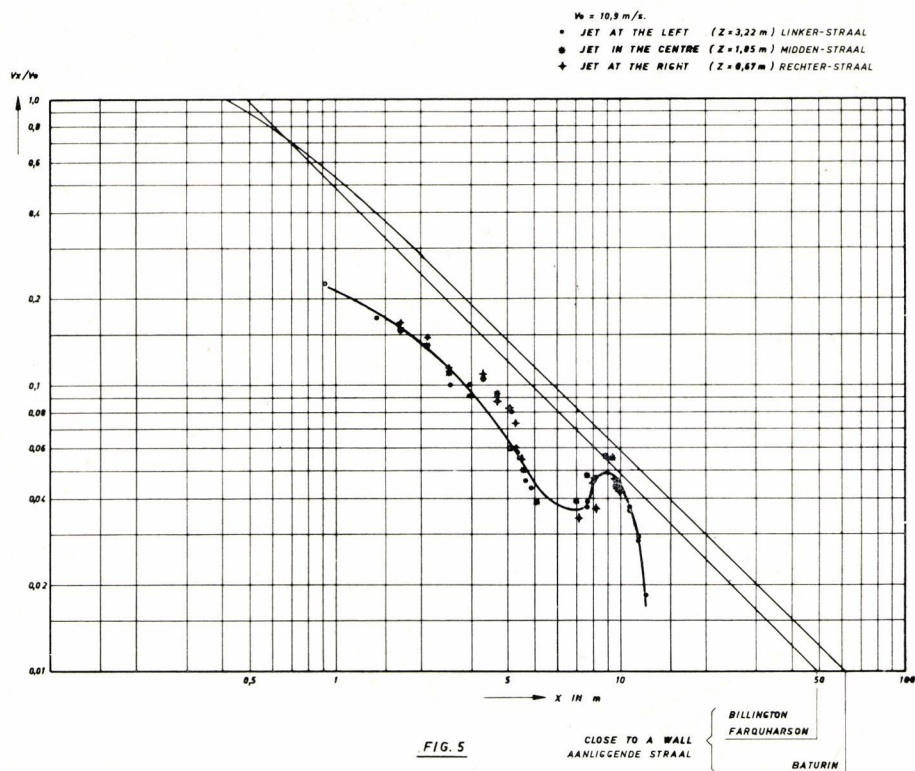
CENTERLINE VELOCITY OF FREE CIRCULAR JET
 OUTLET $\varnothing 68 \text{ mm}$
 HARTLUNSNEIHEID VAN VRIJE RONDE STRAAL MET
 UITLAATOPENING $\varnothing 68 \text{ mm}$



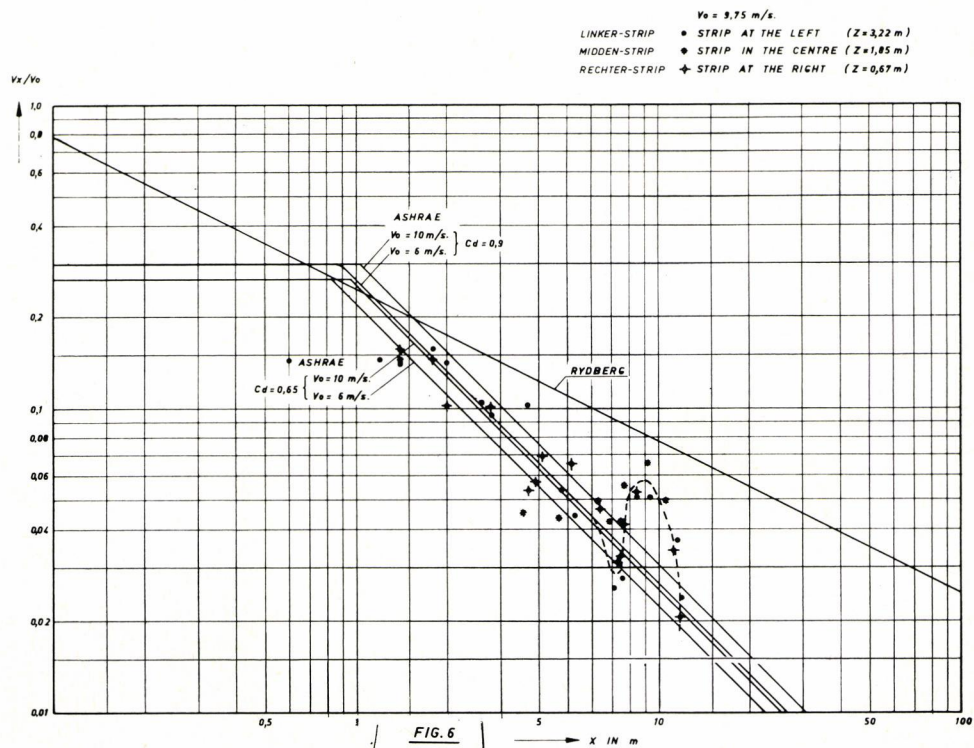
CENTERLINE VELOCITY OF FREE JET FROM PERFORATED STRIP
 150 x 500 mm, 80 HOLES OF $\varnothing 9.4 \text{ mm}$
 HARTLUNSNEIHEID VAN VRIJE STRAAL UIT STRIP MET GAATJES
 150 x 500 mm, 80 GAATJES IEDER $\varnothing 9.4 \text{ mm}$



CENTERLINE VELOCITY OF CIRCULAR, ISOTHERMAL JETS IN CLIMATE ROOM
(3 OUTLETS AT $\varnothing$ DISTANCES OF 1,30 m, $\varnothing$ 68 mm)
HARTLUNSNELHEID VAN RONDE ISOTHERME STRALEN IN DE PROEFKAMER
(3 OPENINGEN VAN $\varnothing$ 68 mm - h.o.h. 1,30 m)



CENTERLINE VELOCITY OF ISOTHERMAL JETS IN CLIMATE ROOM FROM PERFORATED STRIPS,
150 x 500 mm, 80 HOLES OF $\varnothing$ 9,4 mm, $\varnothing$ DISTANCES 1,30 m.
HARTLUNSSELHEID VAN ISOTHERME STRALEN IN DE PROEFKAMER UIT STRIPPEN MET GAATJES,
(3 STRIPPEN VAN 150x500mm MET IEDER 80 GAATJES $\varnothing$ 9,4 mm, h.o.h. 1,30 m)



convectieve krachten en de sterkte van de luchtstraal tot welk eindresultaat dit leidt.

De ervaring leert dat onder bepaalde verhoudingen de straalbaan indentiek kan zijn aan die in het isotherme geval, waarbij de buitenwand volledig wordt bereikt en de lucht hierlangs naar beneden stroomt — bij een relatief sterkere mate van convectie zal de straal echter op enige afstand van de buitenwand reeds naar beneden afbuigen.

In fig. 7 zijn voor de drie langdoorsneden over de roosters in de kamer de straalbanen ingetekend, zoals die optreden bij de diverse ventilatievouden, rooster-vormen en uitblaassnelheden. Als straalbaan is hier aangegeven de hartlijn zoals die kon worden afgeleid uit de meetresultaten van de snelheidsverdeling in de betreffende doorsnede. In tabel 3 zijn de condities van de betreffende proeven aangegeven.

Als eerste belangrijke **conclusie** kan hieruit worden vastgesteld dat de banen in de drie doorsneden van het vertrek niet identiek zijn.

De ingeblazen lucht beweegt zich kennelijk bij een aantal proeven schuins door de kamer. Dit verschijnsel is waarschijnlijk inhaerent aan de heersende verhoudingen. De mogelijkheid van verschillen in druk op de drie uitblaasroosters werd nauwkeurig nagegaan en uitgeschakeld. Dit stromingspatroon wordt geïllustreerd in de fig. 8 en 9.

Nadere beschouwing van de fig. 7 leert als tweede conclusie, dat het **ventilatievoud** een zeer sterke indicatie vormt voor het eerder of later naar beneden afbuigen van de luchtstroom: de banen vallen in dit opzicht (en dit geldt in grote lijn voor elk der drie doorsneden!) te onderscheiden in drie groepen, overeenkomend met de ventilatievouden. Dit is geheel in overeenstemming met de uitkomsten van onderzoekingen die zijn verricht door *Mülleians* bij *prof. Linke* te Aken en die zijn beschreven in zijn dissertatie.

Om de verhouding tussen de convectieve krachten en de sterkte van de luchtstraal aan te geven, kan ge-

bruikt worden het getal van Archimedes: $\frac{Gr}{Re^2}$.

Bij het sterker worden van de relatieve invloed van de convectie zal de waarde van dit getal toenemen. Tot aan een zekere grens zal de vorm van de baan nagenoeg gelijk blijven aan die van het isotherme geval; bij overschrijding zal de straal eerder gaan afbuigen en het is zelfs mogelijk gebleken een stromings-toestand te bewerkstelligen, waarbij de convectie zodanig sterk overheerst, dat de uitgeblazen lucht meteen naar beneden wordt gedrukt en de gehele circulatie in de kamer opwaarts langs de buitenwand plaats vindt.

Als grenswaarde waarbij de stroming gaat afwijken van die in het isotherme geval geeft *Mülleians* op: $Ar = 10^4$.

De sterkte van de straal wordt in dit geval aangeduid o.m. met behulp van een snelheid. Hiervoor gebruikt *Mülleians* in eerste instantie niet de uitblaassnelheid van de straal, doch een fictieve waarde nl. de inblaas-hoeveelheid gedeeld door het oppervlak van de dwarsdoorsnede van het vertrek loodrecht op de inblaas-richting. (In getalwaarde dus te berekenen als ventilatievoud vermenigvuldigd met de diepte van het vertrek.)

De werkelijke inblaassnelheid v_0 en de vorm en eigenschappen van de roosters komen derhalve in deze Ar -waarden niet tot uitdrukking. Opgemerkt moet daarbij worden dat *Mülleians* zijn proeven verrichtte bij slechts twee vormen van uitblaasopening, nl. rechthoekig, slechts een gedeelte van de breedte van de wand beslaande en spleetvormig over de gehele breedte van de wand. De proeven werden overigens uitgevoerd bij drie verschillende schaalgrootten van het vertrek, waardoor bij zeer verschillende waarden van de diverse kentallen werd gewerkt. Wenst men de uitblaassnelheid eventueel ook in de beschouwing te betrekken dan is het mogelijk, o.a. zoals *Mülleians* aangeeft, door te werken met een gecorrigeerd getal van Archimedes. Als correctiefactor stelt hij de waarde: bh/x_0^2 voor,

waarin betekenen:

x_0 : hydraulische diameter van de vertrekdoorsnede loodrecht op de stromingsrichting

b, h : breedte resp. hoogte van de inblaasopening

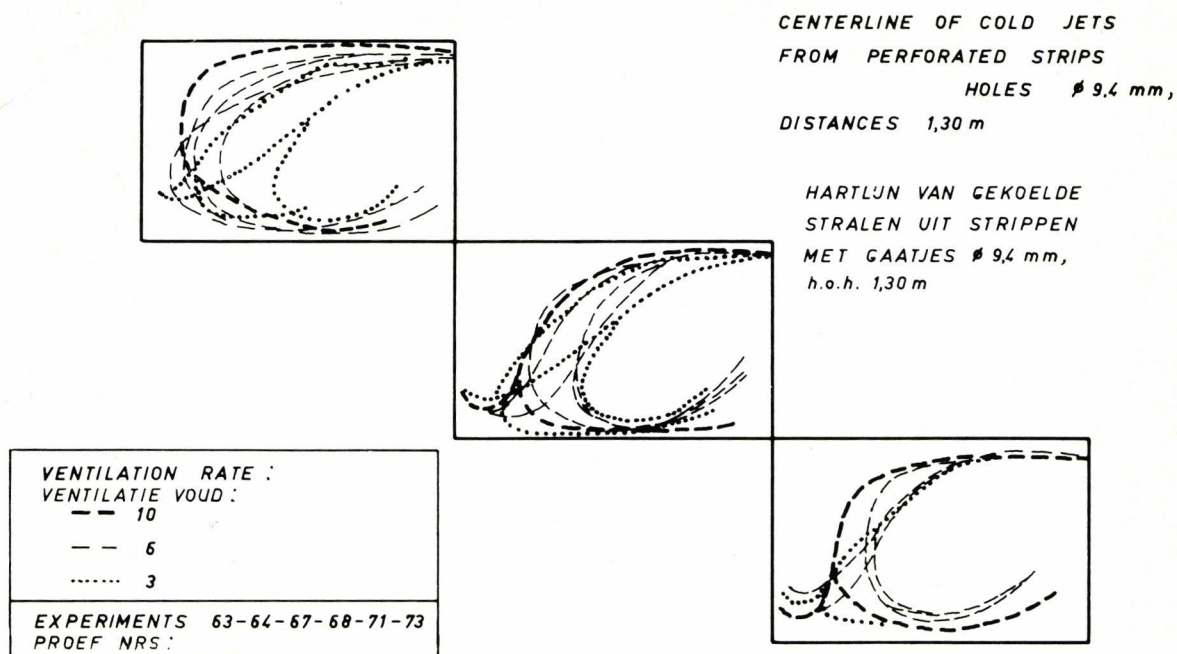
In plaats van $b \times h$ zal voor diverse roosteruitvoeringen beter A_{eff} gebruikt kunnen worden.

Gezien het scheeftrekken van de stroming in de kamer en de principiële gelijkvormigheid der doorsneden zal voor een getalmatige nadere beschouwing van de diverse resultaten gewerkt worden aan de hand van de doorsnede $z = 3,22$ m, d.w.z. de dwarsdoorsnede van de kamer loodrecht op het hart van één van de zijroosters. Vanuit dit rooster verloopt de straal n.l. recht vooruit.

In de reeds genoemde figuur 7 zijn in de afbeelding (boven-links) de baankrommen in deze doorsnede weergegeven in afhankelijkheid van het ventilatievoud.

De proeven in de proefkamer zijn verricht bij drie groepen van Ar -getallen, samenhangend met de ventilatievouden 3, 6 en 10 en wel:

CROSS SECTION : $Z = 3^{22} \text{ m}$. — — — — — $Z = 1^{85} \text{ m}$ — — — — — $Z = 0^{67} \text{ m}$
DOORSNEDE :



CROSS SECTION : $Z = 3^{22} \text{ m}$.
DOORSNEDE :

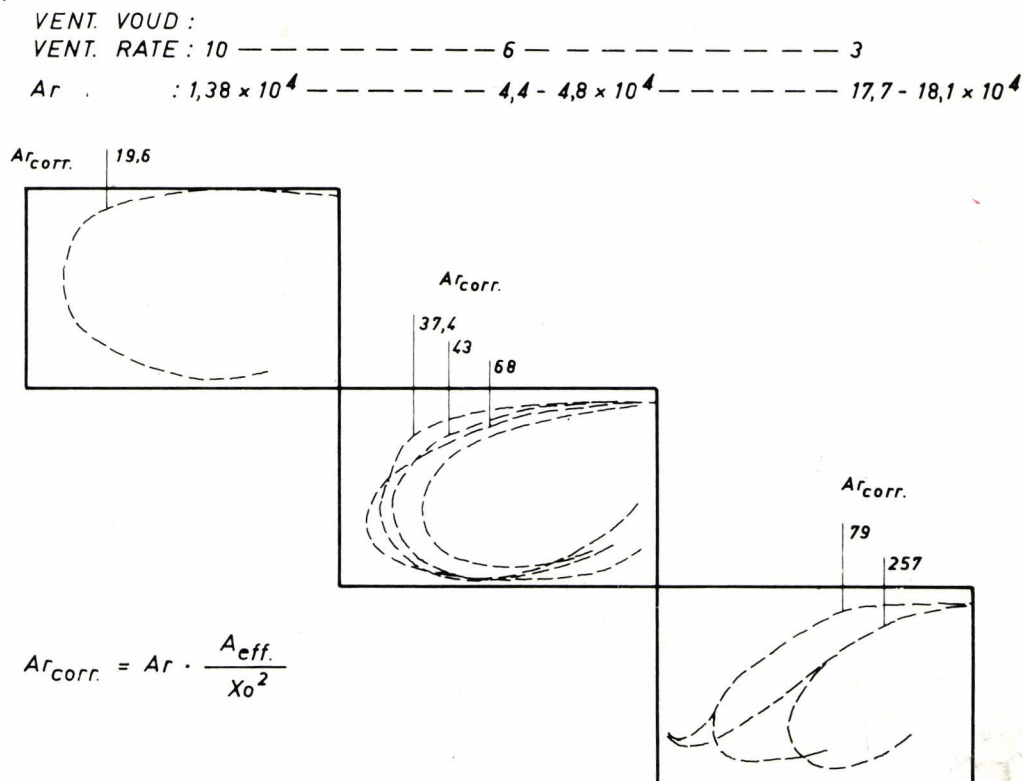
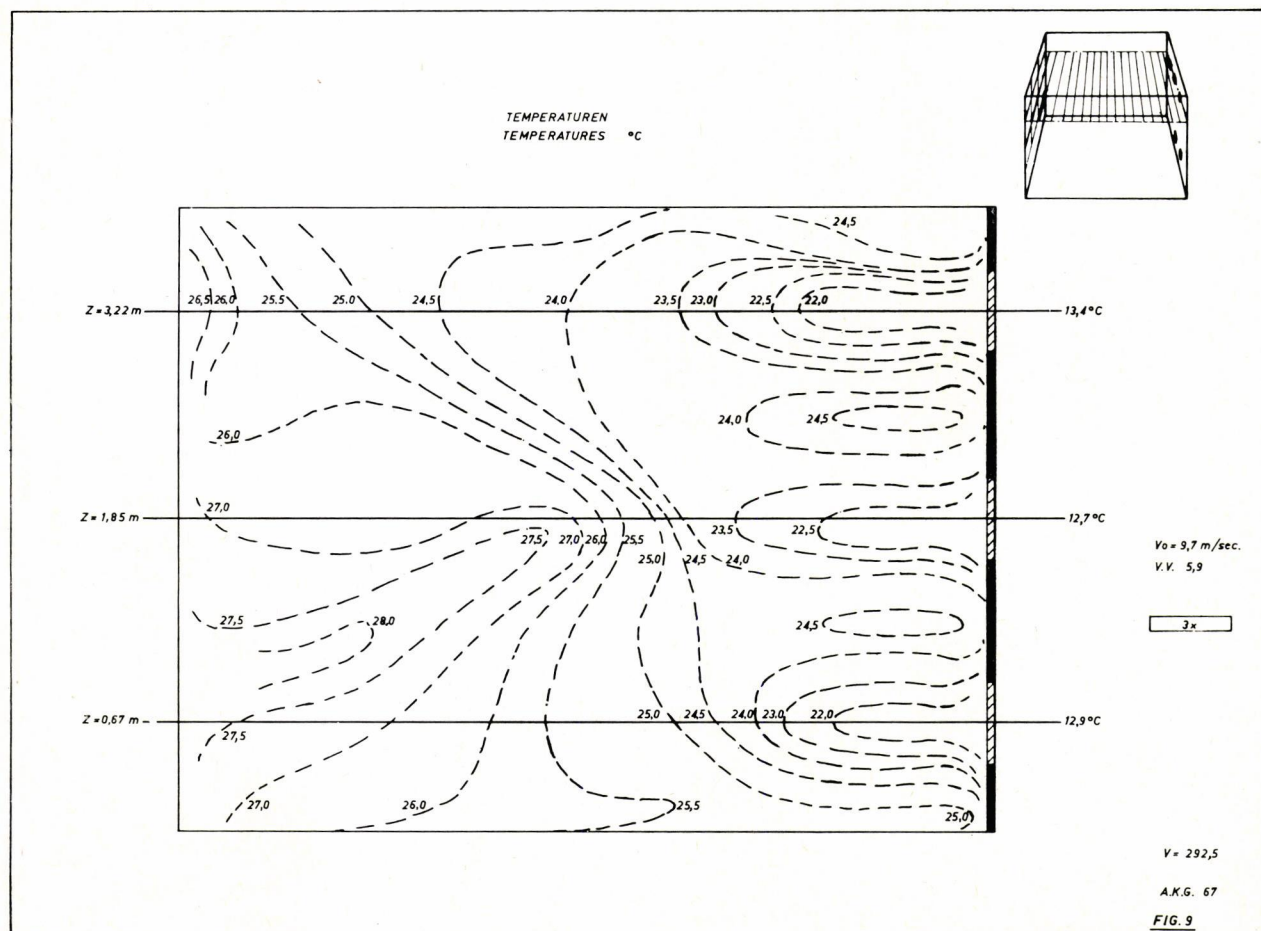
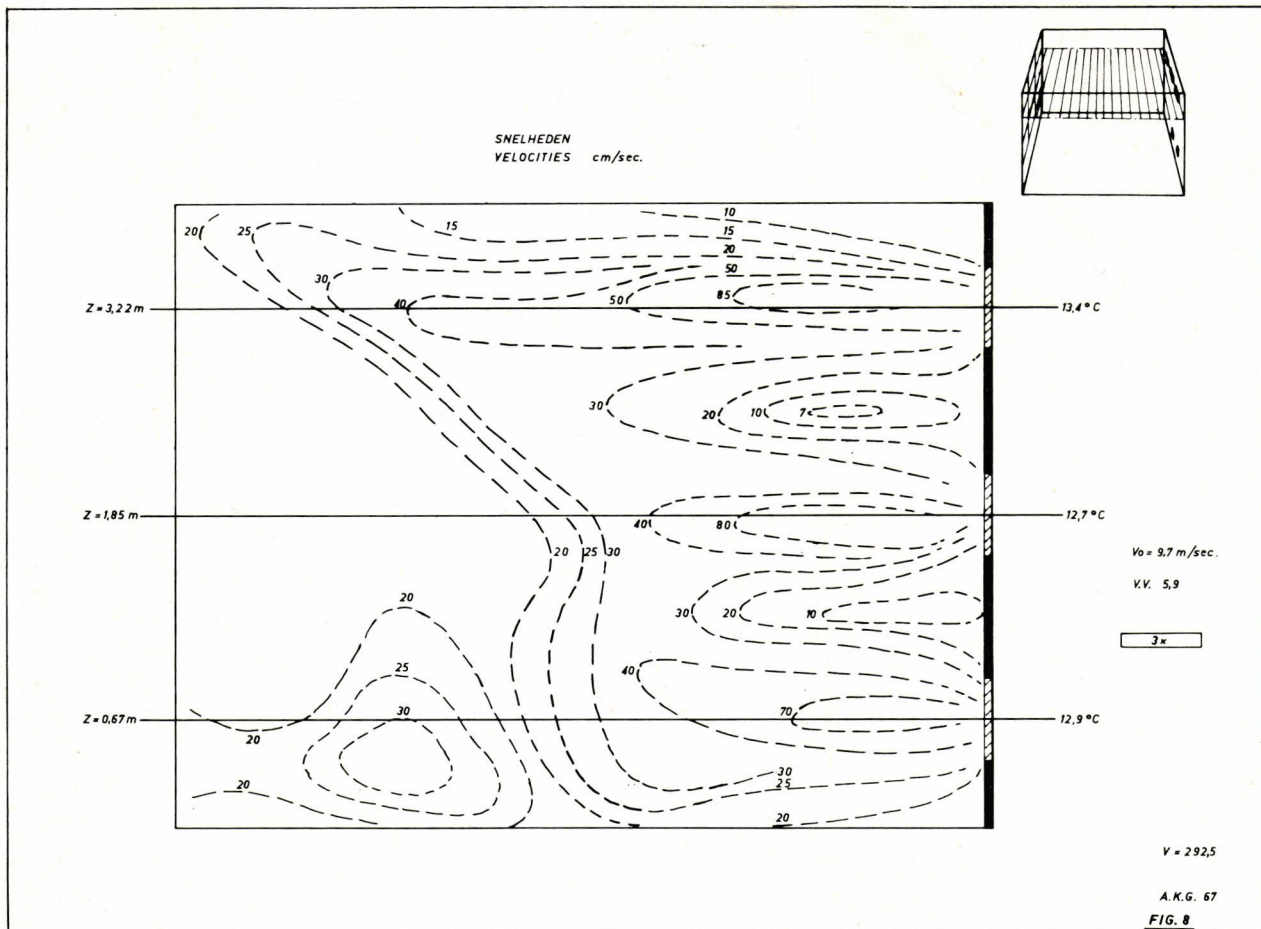
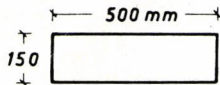
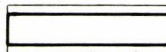
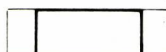


FIG. 7

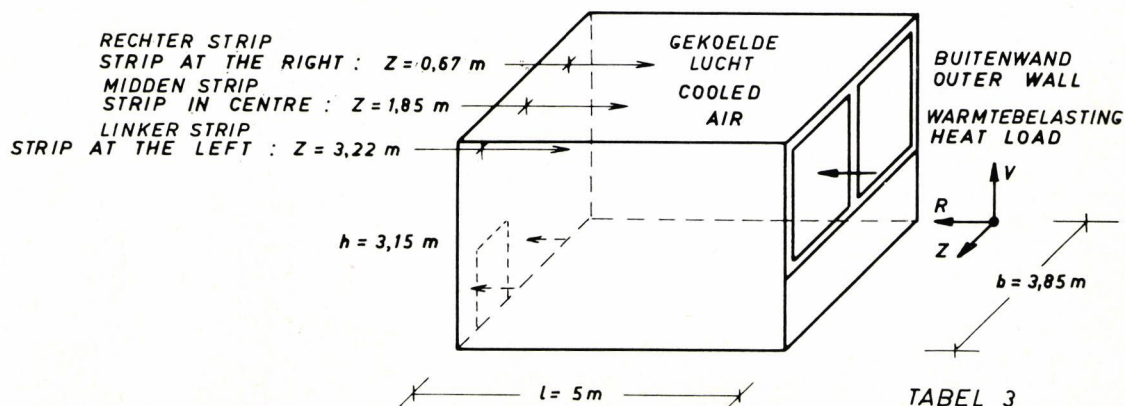


WARMTEBELASTING : HEAT LOAD : 1500 kcal/h, VLOER OPP. 75 kcal/h, m ² FLOOR AREA		
VENTILATION RATE VENTILATIEVOUD		
10	6	3
63  3 strippen, 80 gaatjes ieder van 3 Strips, 80 holes each, $\varnothing$ 9,4 mm vout Vent. rate : 9,9 Vo : 9,7 m/s. to : 15,6 °C tr : 24,0 °C	67  3 strippen, 48 gaatjes ieder van 3 Strips, 48 holes each, $\varnothing$ 9,4 mm vout Vent. rate : 5,9 to : 13,0 °C Vo : 9,7 m/s. tr : 24,6 °C 68  3 strippen, 50 gaatjes ieder van 3 Strips, 50 holes each, $\varnothing$ 9,4 mm vout Vent. rate : 5,7 to : 12,9 °C Vo : 9,0 m/s. tr : 24,4 °C	71  3 strippen, 25 gaatjes ieder van 3 Strips, 25 holes each, $\varnothing$ 9,4 mm vout Vent. rate : 3,2 Vo : 10,0 m/s. to : 7,3 °C tr : 24,0 °C
	64  3 strippen, 80 gaatjes ieder van 3 Strips, 80 holes each, $\varnothing$ 9,4 mm (I) (II) vout Vent. rate : 6,0 5,9 Vo : 5,9 5,8 m/s. to : 10,0 9,0 °C tr : 22,4 22,3 °C	
		73  3 strippen, 80 gaatjes ieder van 3 Strips, 80 holes each, $\varnothing$ 9,4 mm vout Vent. rate : 3,1 Vo : 3,0 m/s. to : 23,5 °C tr : 15,5 °C

10 m/s.

OUTLET VELOCITY
UITBLAASSNELHEID
6 m/s.

3 m/s.



$$1,38 \times 10^4 - 4,4/4,8 \times 10^4 - 17,7/18,1 \times 10^4$$

voor de geperforeerde roosters. Voor de berekening wordt verwezen naar Tabel 2.

In het onderste gedeelte van fig. 7 zijn voor de doorsnede $z = 3,22$ m de banen gesplitst in deze drie groepen. Daarbij zijn bovendien aangegeven de getallen voor de gecorrigeerde Ar-waarde: $Ar \cdot A_{\text{eff}}/x_0^2$.

Beschouwing van de figuren leert, dat ook bij deze proeven het stromingspatroon bij de waarde van het getal van Archimedes in de orde grootte van 10^4 nog vrijwel overeenkomt met het isotherme stromingspatroon en dat bij de hogere waarde van Ar de straal niet meer de buitenwand bereikt, doch reeds eerder naar beneden zal ombuigen. De plaats van dit ombuigen kan in eerste benadering redelijk worden geschat aan de hand van de Ar-waarde, c.q. het ventilatievoud, e.e.a. aan de hand van fig. 7.

Als de resultaten worden uitgewerkt aan de hand van de gecorrigeerde Ar-waarden door toepassing van de factor A_{eff}/x_0^2 dan blijkt dat rangschikking van de diverse baankrommen precies parallel loopt met de berekende $(Ar)_{\text{corr}}$ -waarden, alles voor de stralen uit de geperforeerde strips. Met andere woorden, voor dit type uitblaasopening is het mogelijk een redelijke schatting te maken van de te verwachten baankromme aan de hand van het $(Ar)_{\text{corr}}$ -getal.

Wordt voor de praktische toepassing van het in fig. 7 gegeven verband gebruik gemaakt, dan kan dit tevens voor andere belastingen geschieden dan de bij de proeven toegepaste, aangezien dit in het getal van Archimedes tot uitdrukking wordt gebracht d.m.v. de in te vullen wandoppervlaktemperatuur. Wel dient men daarbij dus te beschikken over een schatting van deze temperatuur, zoals die bij de diverse belastingen zal optreden.

7. Warmte-overdracht bij niet-isotherme stroming in de proefkamer

Bij het verrichte onderzoek aan de niet-isotherme toestanden in de kamer kan men verschillende warmtehoeveelheden onderscheiden.

Uit de meetresultaten valt af te leiden welke warmtehoeveelheid door het buitenplenum aan de kamer, door de buitenwand, is afgestaan.

Daarnaast valt een hoeveelheid te berekenen die door de kamer is afgegeven aan het ventilatieplenum, grenzend aan de gangwand. Deze laatste hoeveelheid is opgebouwd uit de met de koellucht afgevoerde calorien en uit een hoeveelheid die als transmissie door de gangwand vanuit de kamer wordt overgedragen. Twee verschijnselen komen hierbij duidelijk aan het licht.

— Een exacte warmtebelasting is niet dwingend op te leggen.

Het zal mede van de interne stromingstoestand in de kamer afhangen hoeveel warmte van het buitenplenum naar binnen komt en welke dus precies de warmte belasting in het onderhavige geval zal zijn. Men kan slechts zorgen voor een voldoende aanbod aan de buitenzijde.

Afhankelijk hiervan en van de binnentoestand, zal tenslotte de binnenoppervlaktetemperatuur van de buitenwand tot stand komen die een maat is voor de situatie.

— Van de warmte die de kamer binnenkomt zal slechts een gedeelte overgenomen worden in de koellucht en met deze worden afgevoerd.

Door de natuurlijke convectie aan de buitenwand zal een zone ontstaan met een warmteoverdrachtstechnisch gesproken eigen bestaan, van waaruit ook warmte rechtstreeks kan worden afgevoerd via voor deze zone bereikbare wanddelen.

Zetten we naast elkaar uit de warmtehoeveelheden die door de buitenwand naar binnen kwamen (feitelijke warmtebelasting) en die met de koellucht werden afgevoerd (te berekenen uit de luchthoeveelheid en het temperatuurverschil tussen aan- en afvoer), dan ontstaat tabel:

Proefno.	Aan kamer toegevoerd	Met koellucht afgevoerd
63	1530 kcal/h	1400 kcal/h
64	1500 "	1265 "
64 II	1624 "	1320 "
67	1370 "	1180 "
68	1500 "	1130 "
69	1440 "	1290 "
71	1310 "	910 "
71 II	1336 "	980 "
73	1495 "	825 "
73 II	1450 "	920 "

Om de warmtebelasting na te bootsen gaf Mülleijans de diverse wanden van zijn modellen (schaal 1 : 1 – 1 : 3 – 1 : 9) beurtelings bepaalde oppervlaktemperaturen en hij stelde vast welke de warmtehoeveelheden waren die met de ingeblazen gekoelde lucht onder de verschillende condities werden afgevoerd.

Uit deze warmtehoeveelheden berekende hij een (fictieve) α -waarde met behulp van de grootte van het verwarmde oppervlak en het temperatuurverschil tussen dit oppervlak en de inblaaslucht. Hieruit leidde hij af een (fictief) Nu -getal met behulp van de waar-

BILLAG 2

[illegible]

R_2 : getal van Reynolds
 Ar : getal van Archimedes
 Gr : getal van Grashof
 f_{Mj} : $(Re)_{10(Gr)}^{0.1} \cdot \left(\frac{X}{A_{eff}} \right)^{0.08}$

- to : inblaasende van de lucht
- ta : afzuigende van de lucht
- ty : s.g. van de lucht (gen. bij air-o)
- γ : kinematische viscositeit van de lucht
- λ : warmtegeleiding van de lucht
- tw : ggm. oppervlaktetemperatuur van de buitenwand : $\frac{t_{\text{binnen}} + t_{\text{buiten}}}{2}$

de : met de lucht afgevoerde warmte.
 α : af te lezen fictieve overdrachts
 Coëfficiënt van de buitenwand
 voor de warmte Φ .
 Nu : met α te berekenen getal van Nusselt.

Δz : effectief roosteropbevalak.
 V_0 : homovalent koolzuur.
 W : ventilatievloed.
 u_v : veldstromensnelheid.
 X_0 : hydraulische diameter van de vertrektoesnede loodrecht op de stromingsrichting.
 $X_0 = \frac{4x \cdot (b + h_0)}{2x \cdot (b + h)}$
 Voor profkammer: $X_0 = 3,47 \text{ m}$.

u_1 : $\frac{\text{lucht hoeveelheid per sec}}{\text{veetrek doorende loodr. op stroming}}$
 u_2 : $\frac{12 \times \text{veetrek diepte}}{3600}$
 Voor praefkamer: $u_1 = \frac{\pi}{720}$

de van de hydraulische diameter van de vertrekdoor-sneede loodrecht op de stromingsrichting (in dit geval indentiek aan het verwarmde oppervlak) en dit geval ontwierp hij aan een analyse tegenover de diverse inblaasverhoudingen.

In de situatie overeenkomend met die voor de in de Proefkamer verrichte onderzoeken — het inblazen van lucht tegenover de warme buitenwand — kon hij voor zijn proefresultaten het volgende verband afleiden:

$$\bar{Nu} = 0,013 \cdot (Re)^1 \cdot (Gr)^{0,1} \cdot \left(\frac{x_0^2}{bh} \right)^{0,08} = f_{Mj}$$

Hieruit blijkt dat de warmteoverdracht van de warme wand op de lucht sterk afhankelijk is van de hoeveelheid koellucht uitgedrukt in het getal van Re berekend met behulp van de transportsnelheid u_0 door de doorsneede loodrecht op de stromingsrichting — hoe zij wordt beïnvloed door de natuurlijke convectie aan de buitenwand uitgedrukt in het getal Gr — de inblaasverhoudingen uitgedrukt in bh/x_0^2 .

Mülleijans deelt voorts mede dat hij er niet in was geslaagd een verband vast te stellen tussen het getal van $\bar{Nu}$ en het gecorrigeerde Ar-getal, t.w. $Ar \cdot bh/x_0^2$. Voor de in de Proefkamer verrichte proeven zijn de overeenkomstige getalwaarden berekend en weergegeven in de Tabel 2. Daarbij moet worden opgemerkt dat zij in verhouding tot het onderzoek van Mülleijans slechts een beperkt aantal punten leveren en voor één schaalgrootte.

In fig. 10 is uitgezet het verband tussen de $\bar{Nu}$ -waar-

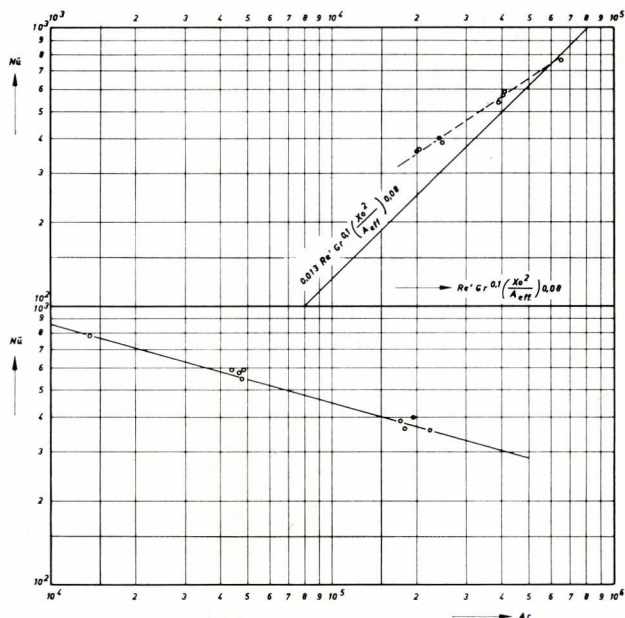


FIG. 10

den en die van de functie van Mülleijans, f_{Mj} . De fig. 5a toont, dat de verkregen uitkomsten niet hetzelfde resultaat leveren: de overeenkomst bij de laagste Ar-waarden (hoogste waarden van het ventilatievoud en van $\bar{Nu}$) is voortreffelijk — bij de hogere waarden van Ar treden steeds grotere afwijkingen op. De warmteoverdracht bij de proefkameronderzoeken schijnt beter te zijn dan uit de voorspellingen van Mülleijans zou volgen, of met andere woorden, de invloed van de natuurlijke convectie op de warmteoverdracht op de koellucht schijnt geringer. Zou hier mogelijk van invloed kunnen zijn de omstandigheid, dat de buitenwand niet de in de formules toegepaste homogene temperatuur heeft (zoals bij Mülleijans), doch dat deze het gewogen gemiddelde is van twee homogene temperaturen nl. die van het venstergedeelte (hoogste temperatuur bovenste gedeelte van de wand) en die van de borstwering (laagste temperatuur, benedenste gedeelte)?

Bij de hier beschreven metingen is eveneens het verband van $\bar{Nu}$ en $Ar \cdot A_{eff} x_0^2$ niet treffend tengevolge van optredende spreiding tussen de punten.

Het logaritmisch verband $\bar{Nu}$ -Ar vertoont een veel regelmatig beeld.

Voor praktische toepassing kan een redelijke schatting gemaakt worden van de warmte-opname door de koellucht op basis van het Ar-getal. Deze hoeveelheid warmte kan echter min of meer aanzienlijk afwijken van de warmte die het vertrek binnentreedt. Het verschil zal kleiner worden — het effect van de ingeblazen koellucht dus groter — naarmate de luchtstralen dichter doordringen tot de buitenwand, hetgeen gekenmerkt wordt door Ar-waarden die kleiner zijn dan 10^4 .

Bij het ontwerpen van deze stromingsvorm dient men er voor zorg te dragen, dat in de raamzone geen tochtverschijnselen optreden. Hiervoor dient men te beschikken over een inzicht in het snelheidsverloop van de ingeblazen lucht en rekening te houden met mogelijke snelheidsverhogingen die kunnen optreden na het passeren van hoeken.

Ook bij andere belastingen dan aanwezig waren bij de hier beschreven proeven kunnen de schattingen voor de warmte-opname gemaakt worden, aangezien deze belastingen in de Ar-waarden tot uitdrukking komen door de in te voeren wandoppervlaktetemperatuur.

8. Afname van de snelheid en het temperatuurverschil van de ingeblazen straal bij niet-isotherme stroming in de proefkamer

Keren wij thans terug tot een nadere beschouwing

van het verloop van de hartlijnsnelheden bij de diverse proeven.

In de fig. 11 zijn (naast de snelheidsverlopen in de isotherme omstandigheden) ingetekend die, welke konden worden afgeleid bij de niet-isotherme gevallen voor de **ronde** uitblaasopeningen. Zij zijn gegeven in relatie tot de in de literatuur gevonden snelheidsverlopen voor aanliggende stralen.

Zoals reeds eerder werd opgemerkt bleken de isotherme verlopen af te wijken van de verwachtingen t.a.v. aanliggende stralen, een verschijnsel waarvoor geen zekere oorzaak kon worden opgegeven; voor de ronde uitblaasvorm blijkt dat de snelheidsverlopen voor de niet-isotherme gevallen weinig afwijken van die voor de isotherme omstandigheden.

Bij de ronde opening treden bij een overeenkomstige uitblaassnelheid iets lagere hartlijnsnelheden op.

Men dient er daarbij wel bijzonder op te letten, dat bij het bereiken van de tegenoverliggende wand en bij het passeren van de hoeken daaraan, plaatselijk verhoogde snelheden zullen gaan optreden, die in getalwaarde ca $1,5 \times$ de snelheid voor de hoek kunnen bedragen. In de raamzone zal hiermede rekening dienen te worden gehouden.

Het merendeel der proeven is verricht met de zgn. **geperforeerde roosters**. De hiermede verkregen resultaten maken het mogelijk een nadere indruk te vormen over mogelijke verschillen bij de diverse toegepaste ventilatievouden, uitblaassnelheden en temperaturen (zie tabel 2 en 3).

In verband met de neiging van sommige stralen om zich schuin door de kamer te gaan bewegen bij de diverse proeven (zie fig. 8 en 9) zal het volgende steeds betrekking hebben op de resultaten verkregen in de doorsnede $z = 3,22$ m in de kamer.

Om een indruk te verkrijgen in de reproduceerbaarheid van de resultaten van dit soort onderzoek in een proefkamer die onderworpen is aan een warmtebelasting, zijn gezamenlijk uitgezet in fig. 12 de gevonden waarden van de kernsnelheden van proef 64 en van een proef 64 II, die enige maanden later werd uitgevoerd.

Deze snelheidswaarden moesten ontleend worden aan het verband dat uit de meetresultaten verkregen werd. Hierbij bleek dat de hartlijnsnelheid op afstanden kleiner dan 1 m uit het rooster zeer moeilijk uit de waarnemingen is af te leiden indien niet op zeer kleine afstanden is gemeten. De in de figuren gegeven krommen kunnen dan ook slechts vanaf 1 m beschouwd worden.

De uitkomsten leren dat een zekere spreiding tussen de punten van één kromme aanwezig is. De twee

krommen liggen dermate dicht bijeen dat ze mede op grond hiervan geen duidelijk onderscheid leveren en derhalve als één totaal gezien moeten worden met zekere grenzen die zijn aangegeven. Bovendien is het duidelijk dat de punten wijzen op een afname van de kernsnelheid onder een (logaritmische) helling van de waarde 1.

In de eerste plaats zijn vergeleken de resultaten van de proeven 63, 64 en 73, die zijn uitgevoerd met hetzelfde roosteroppervlak, en wel met verschillende ventilatievouden en dus bij verschillende uitblaassnelheden en -temperaturen.

Bij deze proeven trad derhalve een aanzienlijke variatie op in het getal van Ar nl. van 1,38 tot $18,1 \times 10^4$. De snelheidsafnamen zijn uitgezet in fig. 8a, de temperatuurafname in fig. 13.

De krommen — of beter puntenverzamelingen — van deze drie proeven vallen zodanig samen dat geen significant verschil kan worden opgemerkt. Zij kunnen worden beschouwd als één veld met een logaritmische helling van de waarde 1. Bovendien blijken de grenzen van het gebied samen te vallen met die van de duplo-proef 64.

Brengt men dit „veld” over op de door de handboeken gegeven lijnen dan blijkt dit zich voortreffelijk aan te sluiten aan de voorspellingen t.a.v. de vrije straal. Een zekere vermindering van snelheidswaarde in vergelijking met de vrije straal komt naar voren, zie fig. 14.

De conclusie lijkt gewettigd, dat het snelheidsverloop onafhankelijk van de waarde van Ar mag worden opgevat en kan worden geschat uit het aangegeven veld in fig. 14.

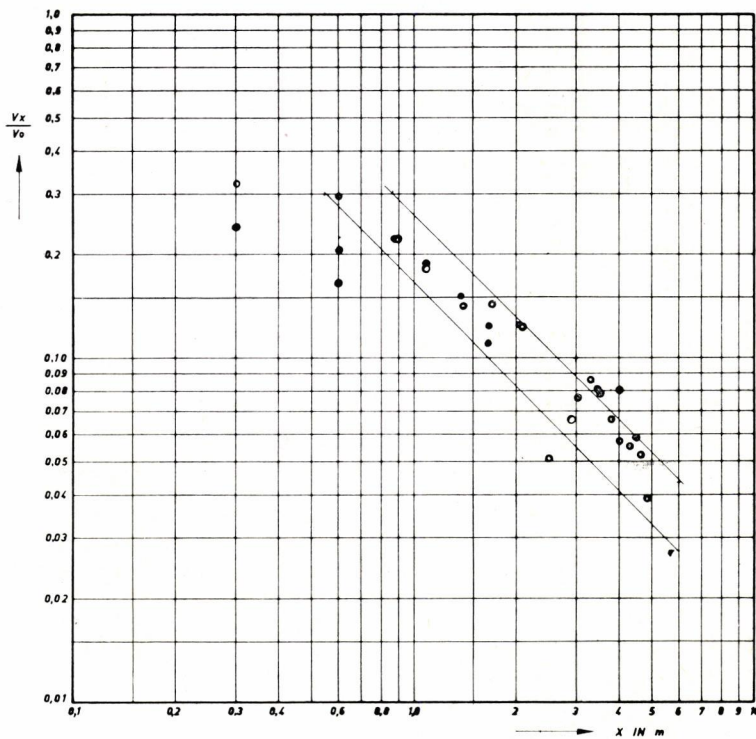
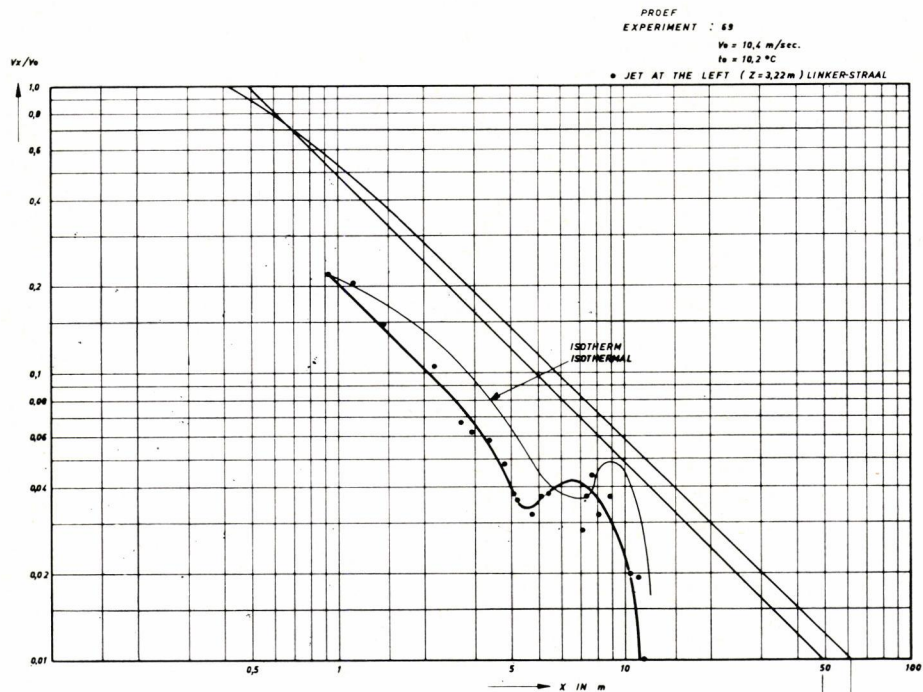
In dit gebied, begrensd door twee logaritmische rechten, zijn nu vervolgens de verkregen hartlijnsnelheidsverlopen uit de andere experimenten ingetekend.

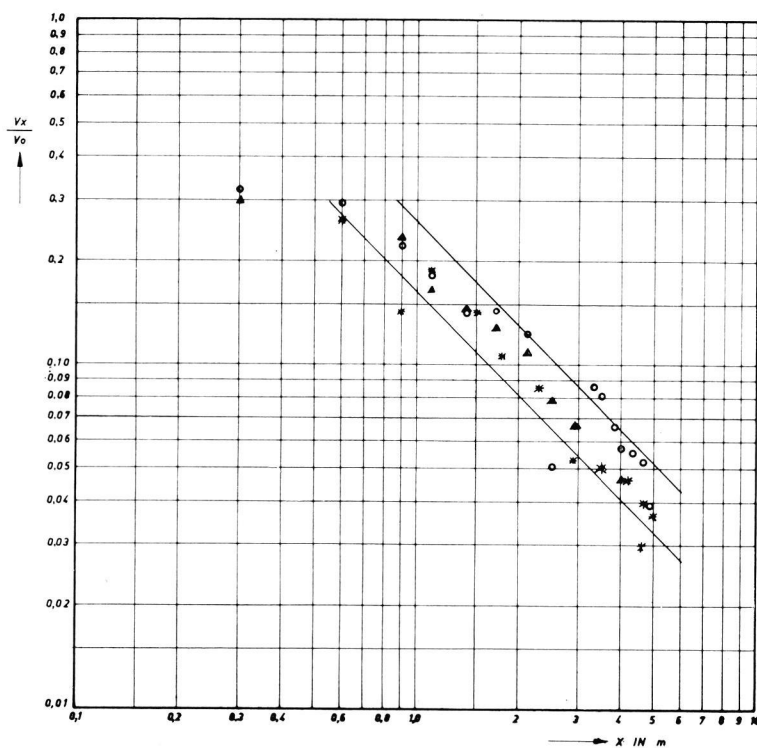
In fig. 15 is dit uitgevoerd voor de proeven 67 en 68, die zijn verricht met een ventilatievoud van 6 en een verminderd roosteroppervlak met de bedoeling een uitblaassnelheid van 10 m/sec te verkrijgen. Alhoewel de waarden gelegen zijn in de onderste helft van het gebied, is het mogelijk ze als „in” aan te duiden.

Wanneer het roosteroppervlak nog verder verkleind wordt, zoals geschiedde bij de proef 71 wordt een snelheidsverloop verkregen dat aanzienlijk lager ligt (zie fig. 16) en volledig buiten de geïndiceerde zone. Het schijnt dat door het verkleinen van het roosteroppervlak de inductie van lucht in de straal wordt geïntensiveerd op zodanige wijze dat dit een sterkere snelheidsafname bewerkstelligt op de hartlijn.

Het verloop van de temperatuur op de hartlijn is op identieke wijze behandeld.

CENTERLINE VELOCITY OF CIRCULAR JETS IN CLIMATE ROOM
(3 OUTLETS AT DISTANCES OF 1,30 m, $\phi 68$ mm)
HARTLUNSNEIJD VAN RONDE STRALEN IN DE PROEFKAMER
(3 OPENINGEN VAN $\phi 68$ mm, h.o.h. 1,30 m)





CENTERLINE VELOCITY OF
JETS FROM PERFORATED
STRIPS IN CLIMATE ROOM

HARTLUNSNEIHEID VAN STRALEN
IN DE PROEFKAMER UIT
STRIPPEN MET GAATJES

PROEF :
EXPERIMENT :

▲ 63 } Zie tabel 3
○ 64 } See table 3
* 73 }

LINKER STRIP
STRIP AT THE LEFT
($Z = 3,22$ m)

FIG. 13

CENTERLINE VELOCITY AND TEMPERATURE OF JETS IN CLIMATE ROOM
FROM PERFORATED STRIPS
HARTLUNSNEIHEID VAN STRALEN IN DE PROEFKAMER UIT STRIPPEN MET GAATJES

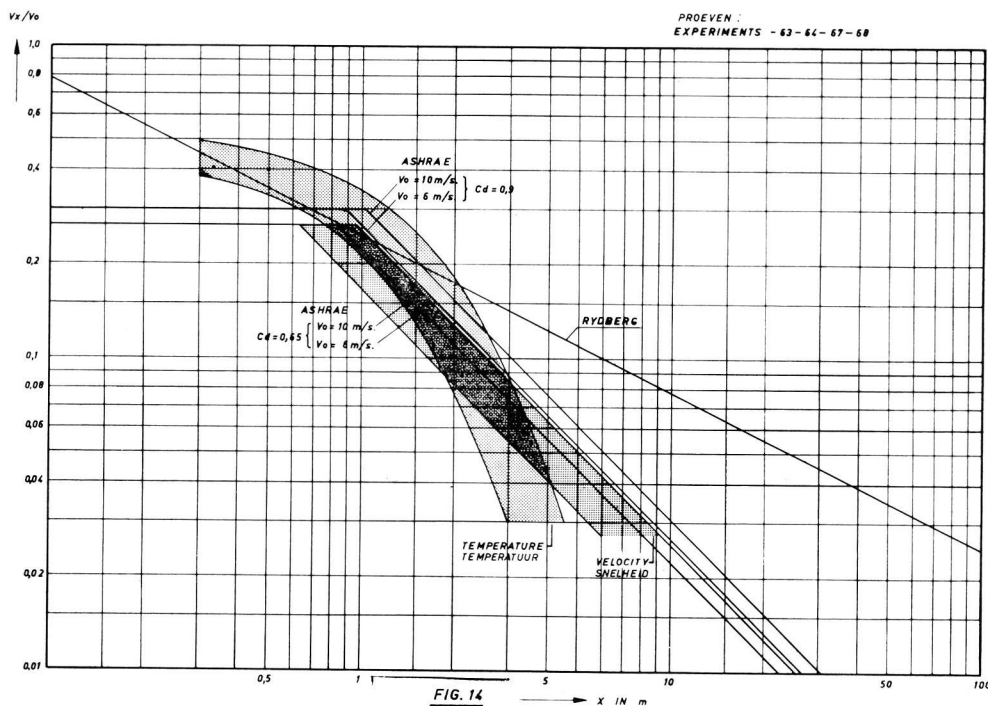
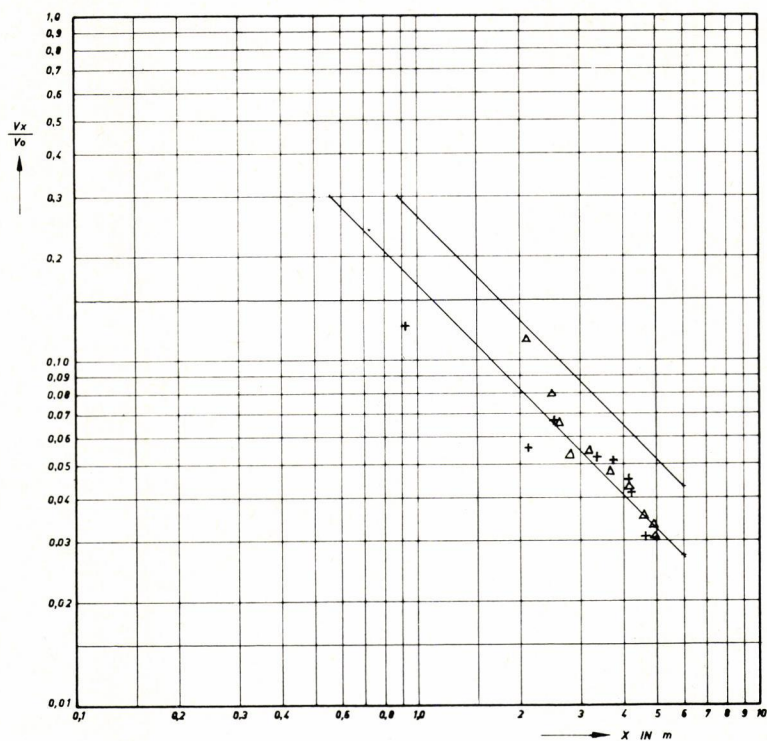


FIG. 14



CENTERLINE VELOCITY OF
JETS FROM PERFORATED
STRIPS IN CLIMATE ROOM

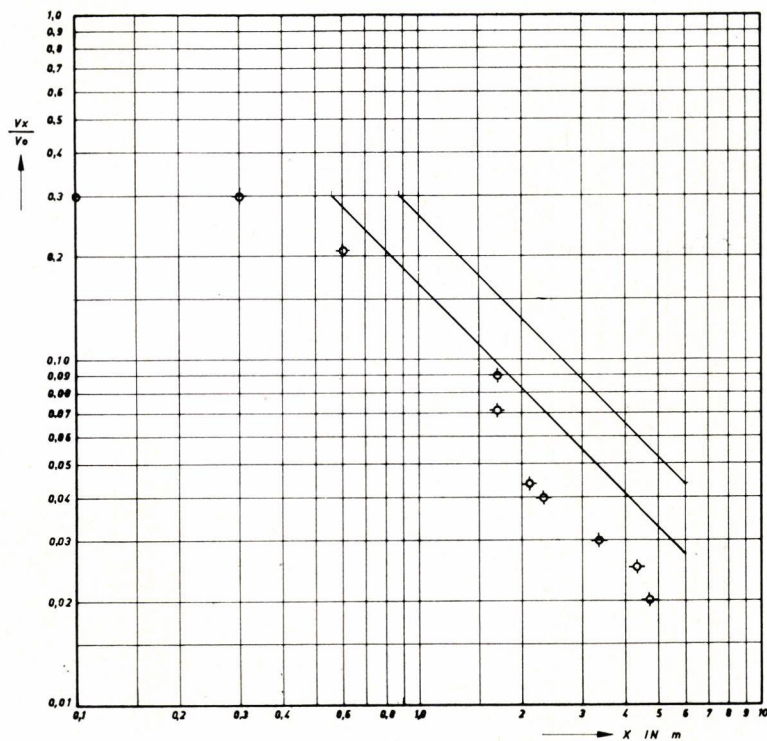
HARTLUNSNEIHEID VAN STRALEN
IN DE PROEFKAMER UIT
STRIPPEN MET GAATJES

PROEF:
EXPERIMENT:

+ 67 } Zie tabel 3
Δ 68 } See table 3

LINKER STRIP
STRIP AT THE LEFT
($Z=3.22$ m)

FIG. 15



CENTERLINE VELOCITY OF
JETS FROM PERFORATED
STRIPS IN CLIMATE ROOM

HARTLUNSNEIHEID VAN STRALEN
IN DE PROEFKAMER UIT
STRIPPEN MET GAATJES

PROEF:
EXPERIMENT:

◇ 71 } Zie tabel 3
See table 3

LINKER STRIP
STRIP AT THE LEFT
($Z=3.22$ m)

FIG. 16

Fig. 17 toont het resultaat van de duplo-proef 64. In tegenstelling tot bij het snelheidsverloop, krijgt men hier de indruk dat de temperatuur bij 64 II sneller afneemt dan bij proef 64. Indien de resultaten gecombineerd worden, vormen de begrenzingen kennelijk geen logarithmische rechten met helling 1, doch twee krommen als aangegeven in fig. 17.

Worden de resultaten van de andere proeven ingetekend, dan blijken die van 63-64-67-68 in het betreffende gebied te vallen, volgens fig. 18. Die van 71 en 73 vertonen een snellere afname in temperatuurverloop, fig. 19. Bij deze laatste twee proeven kwam het laagste ventilatievoud voor, dwz. de laagste Ar-waarde en de laagste uitblaastemperatuur.

Fig. 14 vertoont de zônes zowel voor het verloop van de snelheid als voor het verloop van de temperatuur op de hartlijn van de straal, zoals deze voor het merendeel der proeven werd gevonden.

Buiten de zônes vallen:

- 1) proef 71, met de kleinste roosteropening, voor wat betreft het verloop van de hartlijnsnelheid
- 2) de proeven 71 en 73, met de laagste waarden van het ventilatievoud en dus met de laagste waarde van de inblaastemperatuur, voor wat betreft het verloop van de hartlijntemperatuur.

Als inderdaad geen Ar-afhankelijkheid van de snelheidsafnamen valt te constateren, dan betekent dit, dat ook belastingsveranderingen geen ander beeld te voorschijn zullen roepen.

De relatie die voor een straal bestaat tussen de hartlijnsnelheden op de diverse afstanden uit de opening, schijnt voornamelijk bepaald te worden door de mate, waarin inductielucht tot de straal kan toetreden en niet door de optredende natuurlijke convectie van de warmtebelasting. Deze schijnt de straal slechts „weg te duwen”.

Een nauwkeurige analyse van de juiste invloed van de roostervorm staat de analyse van deze proeven o.i. maar op zeer beperkte wijze toe.

Er zijn duidelijke aanwijzingen voor een invloed van een versterkte toevoer van omgevingslucht naar de straal door kleinere roosteroppervlakken en door de luchtcirculatie in het vertrek die de lucht aanvoert in de nabijheid van de uitblaasroosters.

Tengevolge van de inductie zal de in beweging zijnde luchtmassa vele malen de ingeblazen luchthoeveelheid overtreffen. Deze luchtmassa is tengevolge van de configuratie warmtebelasting/luchtoevoer in een zodanige circulatie dat automatisch steeds lucht wordt aangevoerd naar de uitblaasplaats van de luchtstralen.

De mate waarin de „ondertemperatuur” in een straal wordt genivelleerd zal mede afhangen van de temperatuur van de omgevingslucht die plaatselijk de inductie vormt: dichter bij de warmtebelasting zal de temperatuur van de inducerende lucht hoger zijn. Aangezien het gebruikelijk is de „ondertemperatuur” te definiëren t.o.v. de retourlucht en niet t.o.v. de plaatselijke omgevingstemperatuur, kan hierin wellicht de oorzaak gevonden worden voor de versterkte nivellering op de grotere afstanden en voor de grotere spreiding in de gevonden waarden voor de individuele proeven.

9. Binnenklimaat bij de diverse verrichte onderzoeken

Tot hier zijn de verkregen resultaten voornamelijk getalmatig op hun fysische aspecten beschouwd.

Hoe de binnenklimaatssituatie er daarbij afkwam, werd in het voorgaande niet nader onder de loupe genomen. Daarbij komt, dat de proeven werden uitgevoerd onder een aantal zeer uiteenlopende randcondities, die, zoals in de inleidende beschouwing werd naar voren gebracht, noodzakelijk waren om een redelijk groot gebied te bestrijken voor het vinden van de nodige begrenzingen.

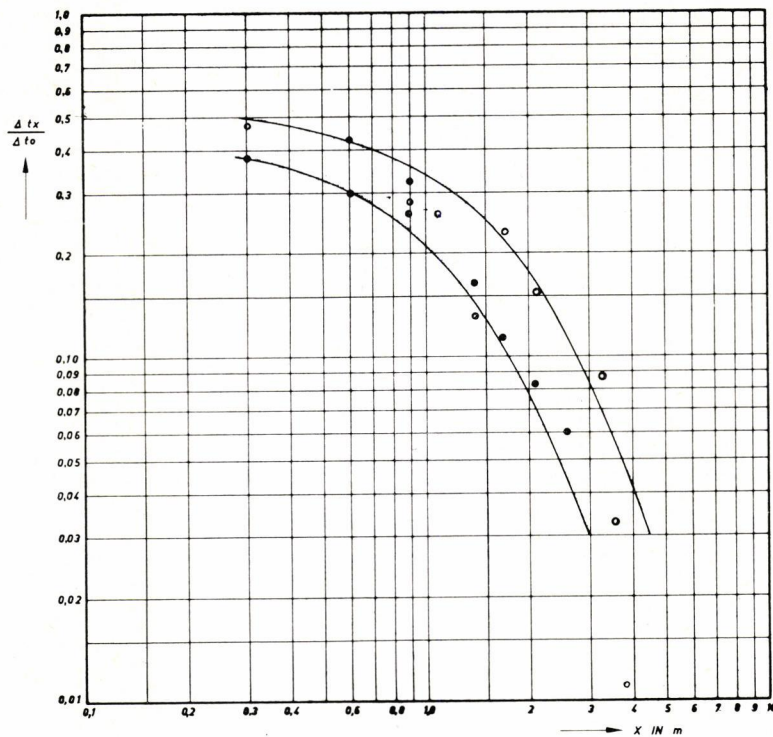
Uit de getalmatige beschouwingen kwam naar voren, dat bij de grotere ventilatiehoeveelheden de isotherme stroming benaderd wordt, d.w.z. dat onder deze condities de luchtstroom geneigd is, ver tot de buitenwand door te dringen. De transportsnelheid van de koellucht over de kamerdoorsnede is relatief groot t.o.v. de convectie.

De relatieve afname van de inblaassnelheid is voor alle onderzochte uitvoeringen van één type opening vrijwel gelijk.

Kiest men dus bij een grote ventilatie een hoge uitblaassnelheid, dan zullen bij het bereiken van de raamwand nog grote snelheden bestaan. Bij het passeren van hoeken zullen daarbij plaatselijk nog snelheidsverhogingen kunnen optreden.

Tochtklachten in de raamzône zullen het gevolg kunnen zijn en wel op tafelniveau en op vloerniveau.

Bij kleinere ventilatievouden zal de straal eerder naar beneden afbuigen. De relatieve afname van de snelheid zal daarbij vrijwel ongewijzigd verlopen met die van de doorgaande stralen. Bij hogere uitblaassnelheden zullen bij deze kleine luchttransporten de hogere snelheden verderop meer of minder in het midden van het vertrek van bovenaf voelbaar worden. De tochtklachten zullen zich dan niet voordoen in de raamzône maar in meer naar de gangwand gelegen



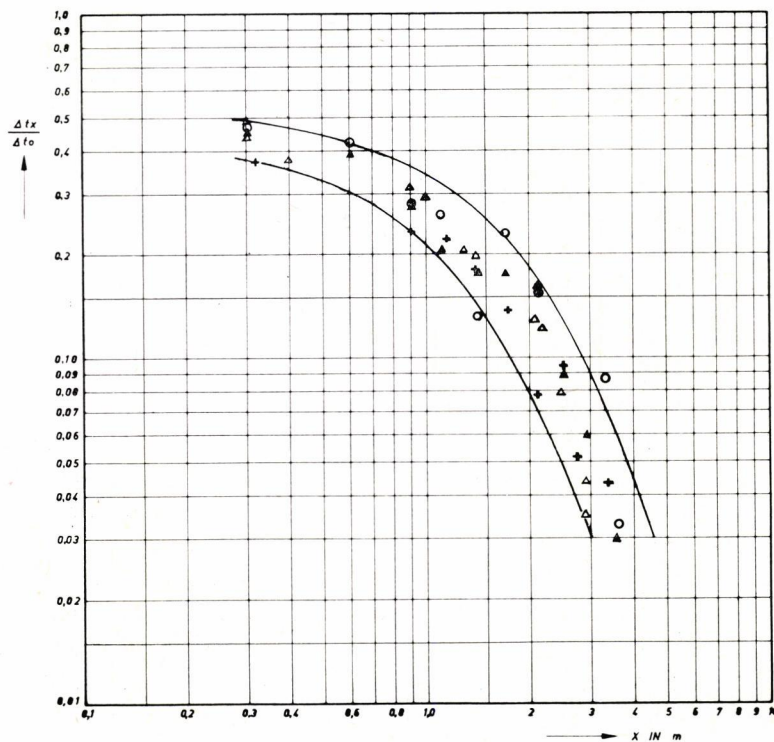
CENTERLINE TEMPERATURE
OF JETS FROM PERFORATED
STRIPS IN CLIMATE ROOM

HARTLUNTEMPERATUUR VAN
STRALEN IN DE PROEFKAMER
UIT STRIPPEN MET GAATJES

PROEF :
EXPERIMENT :

○ 64 } ZIE TABEL 3
● 64 II } SEE TABLE 3
LINKER STRIP
STRIP AT THE LEFT
(Z = 3,22 m)

FIG. 17



CENTERLINE TEMPERATURE
OF JETS FROM PERFORATED
STRIPS IN CLIMATE ROOM

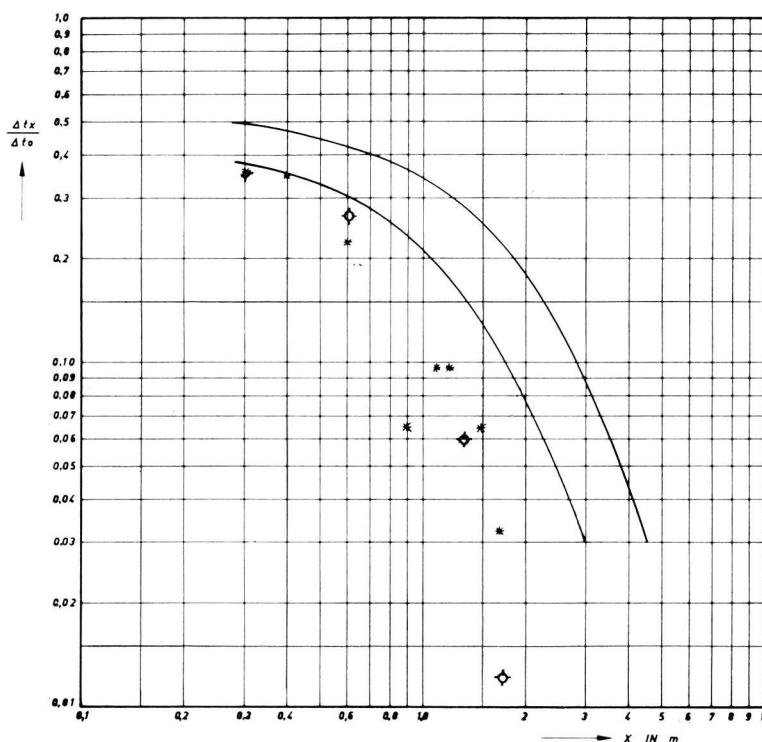
HARTLUNTEMPERATUUR VAN
STRALEN IN DE PROEFKAMER
UIT STRIPPEN MET GAATJES

PROEF :
EXPERIMENT :

▲ 62 } ZIE TABEL 3
○ 64 } SEE TABLE 3
+ 67 }
△ 68 }

LINKER STRIP
STRIP AT THE LEFT
(Z = 3,22 m)

FIG. 18



CENTERLINE TEMPERATURE
OF JETS FROM PERFORATED
STRIPS IN CLIMATE ROOM

HARTLUNTEMPERATUUR VAN
STRALEN IN DE PROEFKAMER
UIT STRIPPEN MET GAATJES

PROEF:
EXPERIMENT:

◇ 71 } ZIE TABEL 3
* 73 } SEE TABLE 3

LINKER STRIP
STRIP AT THE LEFT
($Z=3,22$ m)

FIG. 19

zônes, naar plaats afhankelijk van de grootte van het ventilatievoud.

Verkleining van het roosteroppervlak (door het toepassen van een groter aantal kleinere openingen) zal in deze gevallen de snelheidsafname sneller doen verlopen.

Een straal die de buitenwand bereikt is meer effectief in het opnemen van de warmtebelasting vanuit deze wand. Bij een eerder neervallende straal zal de warmte die van de warme buitenwand afkomt op een minder effectieve wijze worden afgevoerd.

Een ondertemperatuur in de straal zal eerder uitgewerkt zijn dan de snelheden. De warmtemenging voltrekt zich duidelijk sneller dan de snelheidsuitwisseling. De keuze van de inblaastemperatuur zal derhalve voor het binnenklimaat van minder belang zijn dan de inblaassnelheid.

Bij het bereiken van de leefzone zal de ondertemperatuur als zodanig tot een verwaarloosbaar klein verschil zijn teruggebracht.

Bij de uitgevoerde proeven bleken er tenslotte drie te zijn waarbij in de leefzone (d.i. beneden 1,75 m hoogte) geen snelheden voorkwamen van meer dan 20 cm/sec. Zij zijn weergegeven in de fig. 20.

De figuur toont de gebieden waarin de luchtsnelheden boven 20 cm/sec voorkwamen, alsmede de gebieden waarin temperaturen beneden 24 °C of boven 25 °C voorkwamen. Het effect van het afbuigen van de straal op de temperaturen in de raamzone is duidelijk zichtbaar.

10. Conclusies

1. Het doel van het beschreven onderzoek was het verkrijgen van een inzicht in de snelheids- en temperatuurpatronen zoals die ontstaan in een vertrek dat met lucht gekoeld wordt vanuit de gangwand, terwijl het een warmtebelasting ontvangt door de buitenwand.
2. Deze patronen zullen ontstaan als gevolg van het samenspel van convectieverschijnselen die worden opgewekt door de warmtebelasting en de in straalvorm ingeblazen lucht voor de koeling. Onder bepaalde omstandigheden zullen deze patronen niet optreden symmetrisch t.o.v. de middendoorsnede van het vertrek loodrecht op de buitenwand. In plaats van een samentreffen van de convectie-stroming en de stralen kon bij de

DOORSNEDE
CROSS SECTION

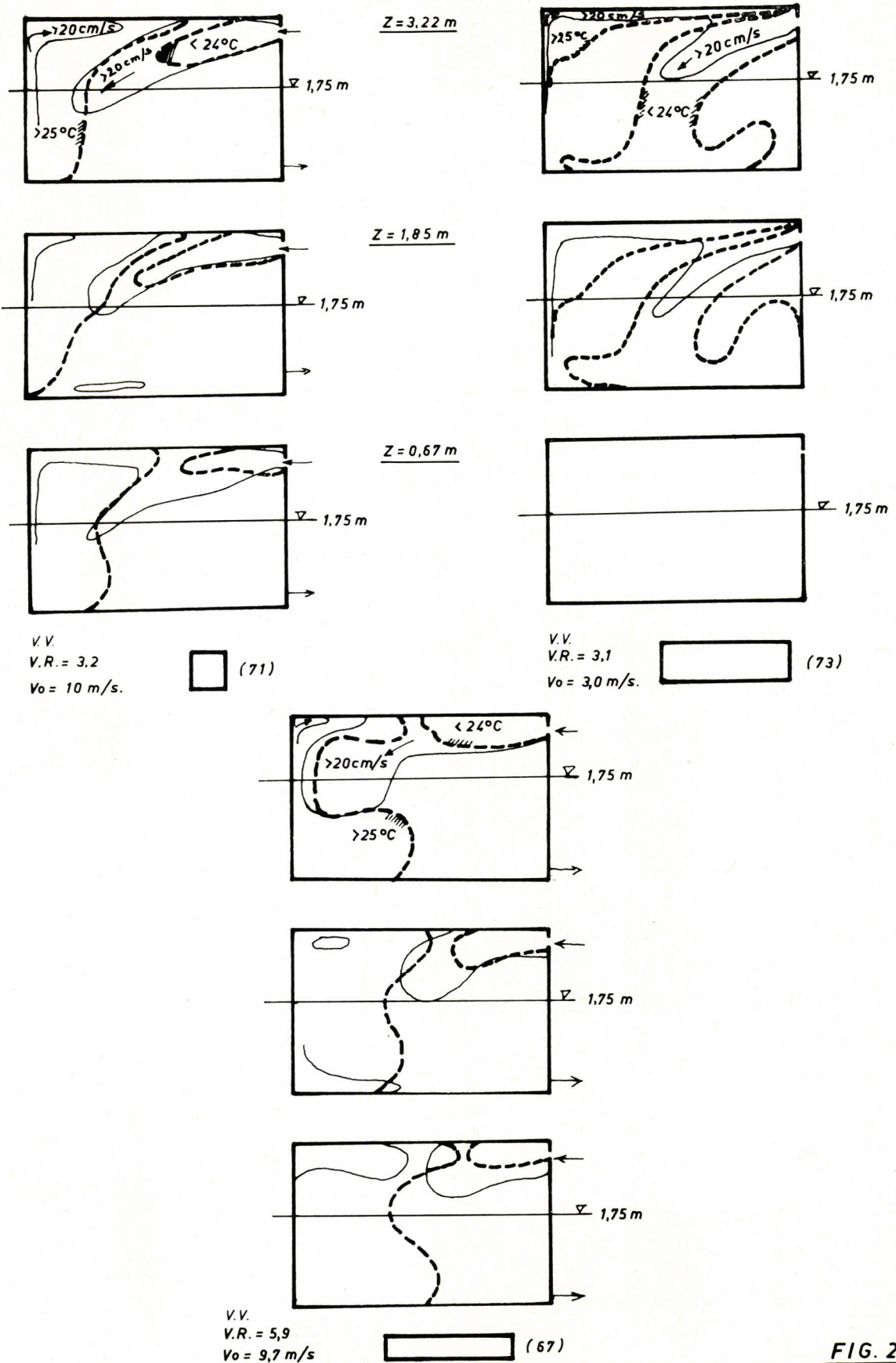


FIG. 20

verrichte proeven een min of meer langs elkaar heenwerken van deze beide verschijnselen worden geconstateerd.

3. Wanneer de toegevoerde lucht uit die roosters waarbij ze het best in een vlak loodrecht werd uitgeblazen, nader werd beschouwd, bleek dat de vorm van de baan in dit vlak redelijk wel kon worden beschreven aan de hand van de waarde van het getal van Archimedes.

Het getal van Archimedes berekend uit de hoeveelheid toegevoerde lucht, de inblaastemperatuur en de temperatuur van het binnenoppervlak van de buitenwand.

Bij waarden van $Ar = 10^4$ of lager was het stromingspatroon overeenkomstig het isotherme geval (en onafhankelijk van het getal van Reynolds), bij hogere waarden viel de straal naar beneden op een plaats vóór de buitenwand tengevolge van een relatief sterkere invloed van de convectie.

4. De hoeveelheid warmte die vanuit de warmtebelasting (in dit geval de warme buitenwand) overgaat in de koellucht, zal sterk afhangen van de vorm van de baankromme en zal daarmee afhangen van de voorkomende waarde van Ar . Naarmate de waarde van Ar groter werd, (de invloed eerder na het verlaten van het rooster viel) werd minder warmte door de straal opgenomen. De warmte-overdracht heeft een z.g. gemengd convectief karakter.
5. De aard van de afname van de hartlijnsnelheid van de straal vertoonde sterke overeenkomst met die, gevonden voor de isotherme vrije straal of de isotherme straal in de proefkamer. Er kon evenwel worden vastgesteld, dat de afname sneller plaatsvond hetgeen waarschijnlijk veroorzaakt werd door de extra luchttoevoer naar het begin van de straal als gevolg van de circulatie in de kamer. Deze sterkere afname was des te meer uitgesproken naarmate het roosteroppervlak kleiner werd.
6. Een enigszins verschillend beeld vertoonde het verloop van de hartlijntemperatuur. In vergelijking met het hartlijnsnelheidsverloop was de afname van de temperatuur in het begin van de straal namelijk minder sterk, maar aan het einde sterker.

Het is duidelijk dat het nivelleren van de ondertemperatuur (gedefinieerd t.o.v. de temperatuur van de retourlucht) in de straal nauw samen-

hangt met de temperatuur van de in de straal geïnduceerde lucht.

Een verlaging van de luchttoevoertemperatuur schijnt een relatief sterkere nivellering mede te brengen.

7. Beschouwing van de hartlijnsnelheden leerde, dat snelheidsverhogingen optraden wanneer de straal een hoek passeerde.

8. Verdergaand onderzoek met betrekking tot enkele van de bovengenoemde punten zal essentieel zijn, bv:

- voor de vaststelling van het effect van vorm en aard van het uitblaasrooster;
- voor het vaststellen van de verschijnselen die zich voordoen bij het passeren van hoeken;
- voor het nagaan van het effect van de vertrekafmetingen op de vorm van de baan van de lucht en op de warmte-uitwisseling.

9. Vanuit het standpunt van praktijktoepassing kwam naar voren, dat de door Rydberg gegeven maximaal toelaatbare waarde van de koelbelasting van $25 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h m}^2$ vloeroppervlak voor deze vorm van luchttoevoer vanuit de gangwand, wel erg aan de lage kant is.

Het bleek mogelijk om aanvullende informatie te verschaffen op de door hem voorgestelde berekeningsprincipes.

10. Bij het ontwerpen van voorzieningen voor de toevoer van gekoelde lucht vanuit de gangwand zou kunnen worden uitgegaan van het volgende schema:

- I. Vastgesteld dient te worden van welk stromingspatroon van de lucht men wenst uit te gaan: het volledig bereiken van de buitenwand of een reeds eerder ombuigen van de straal naar beneden. Het bereiken van de buitenwand heeft het voordeel van een meer effectieve warmte-opname door de koellucht in de raamzone. Zij heeft het nadeel van mogelijke tochtgevaars in deze zone — bij het passeren van hoeken aan deze wand kunnen zich plaatselijke snelheidsverhogingen voordoen. De gewenste baan leidt tot een keuze van een zekere waarde van het Ar -getal.

- II. Met behulp van de gekozen waarde van het Ar -

getal kan de combinatie worden afgeleid van een gewenst ventilatievoud en de daarbij behorende inblaastemperatuur wanneer een schatting aanwezig is van de oppervlaktemperatuur van de buitenwand, zoals die aanwezig zal zijn bij de warmtebelasting, waarvan bij het ontwerp wordt uitgegaan.

- III. Op de hartlijn van de ontworpen stromingsbaan van de lucht dient men een punt aan te geven waar men de snelheid en het temperatuurverschil met de omgeving tot een bepaalde waarde afgenomen wenst te zien. Doorgaans zal men daar voor een vallende straal het punt voor kiezen, waar deze de leefzone binnentreedt (hoogte 1,75 m) — voor een tot de buitenwand doorgaande straal zal men daar doorgaans een punt voor kiezen vlak voor deze wand. Er is af te leiden welke inblaassnelheid en roosteroppervlakkvorm in combinatie dit resultaat zullen leveren. Gecontroleerd dient te worden of de in II gekozen uitblaastemperatuur tot een voldoende afname leidt.

Het zal hierbij zo zijn, dat de snelheid een meer kritische rol zal spelen dan de inblaastemperatuur.

- IV. De door de koellucht op te nemen warmte is af te leiden. Het is mogelijk dat dit bedrag lager is dan het uitgangsgegeven van de warmtebelasting. In dat geval zal in de raamzone een verhoogd temperatuurniveau optreden.

LITERATUUR

- 1) ASHRAE Guide and Data Book 1963, Chapter 11.
- 2) W. W. Baturin:
Lüftungsanlagen für Industriebauten.
- 3) I. M. C. Farquharson:
The ventilating air jet.
Journ. of the Inst. of Heating and Ventilating Engrs, Jan. 1952.
- 4) D. H. Frean and N. S. Billington:
The ventilating air jet.
Journ. of the Inst. of Heating and Ventilating Engrs, Dec. 1955.
- 5) J. Rydberg:
Luftinblasung durch perforierte Decken.
Gesundheits-Ingenieur, Vol. 84, 1963.
- 6) J. Rydberg:
Maximale Kühlleistungen und Luftmengen bei verschiedenen Einblaseinrichtungen.
Gesundheits-Ingenieur, Vol. 84, 1963.
- 7) B. Regenscheit:
Die Luftbewegung in klimatisierten Räumen.
Kältetechnik, Vol. 11, 1959.
- 8) M. Mülleijans:
Über die Ähnlichkeit der nicht-isothermen Strömung und den Wärmeübergang in Räumen mit Strahl Lüftung.
Tag der mündlichen Prüfung: 20. Juli 1963, Aachen.
- 9) K. Huesmann:
Eigenschaften turbulenter Strahlenbündel.
Chemie-Ing.-Tech., Vol. 38, 1966.
- 10) W. Linke:
Eigenschaften der Strahl Lüftung.
Kältetechnik-Klimatisierung, Vol. 18, 1966.

