

TECHNISCHE HOGESCHOOL DELFT  
VLIEGTUIGBOUWKUNDE

Memorandum

M-168

Meting van de specifieke vochtigheid van de  
lucht in het voorraadvat van de ST15 super-  
sone windtunnel.

door

C. Nebbeling en W.J. Bannink

Delft Nederland

november 1969

Samenvatting.

4645

De specifieke vochtigheid van de lucht in het voorraadvat van de ST15 supersone windtunnel is bepaald door een gemeten hoeveelheid lucht door een sterk gekoelde spiraal te laten stromen en daarna de hoeveelheid gecondenseerde waterdamp te bepalen. De specifieke vochtigheid blijkt zo laag te zijn dat geen ontoelaatbare fouten bij het meten van de stromingsgrootheden worden geïntroduceerd.

## Inleiding

In de luchtvoorraad van een "blow-down" windtunnel zal altijd een zekere hoeveelheid waterdamp aanwezig zijn. Door de versnelling van de lucht in het tunnelkanaal tot hoge snelheden, wordt het mengsel van lucht en waterdamp gekoeld tot waarden waarbij de waterdamp kan condenseren. De expansie van de lucht is dan niet meer isentroop, waardoor de stromingsparameters in de meetplaats van de windtunnel afwijken van hun ontwerpwaarden.

Om de invloed van de condensatie kwantitatief te kunnen bepalen, is het noodzakelijk de vochtigheid van de lucht te kennen. Een kenmerkende grootheid die betrekkelijk eenvoudig kan worden gemeten is de specifieke vochtigheid van de lucht (gewicht van de waterdamp per eenheid van gewicht droge lucht). Met behulp van de specifieke vochtigheid kan het dauwpunt (de temperatuur waarbij condensatie van de waterdamp voor het eerst optreedt) als functie van de druk bepaald worden.

Het verloop van het condensatieproces blijkt afhankelijk te zijn van de tijdsduur waarbinnen de expansie plaats vindt. De condensatie treedt plotseling op, waardoor een discontinuïteit in de stroming ontstaat, die schokgolven kan introduceren. Een goede beschrijving van de theorie en het mechanisme van het condensatieproces is gegeven in lit. 1. Indien de snelheid waarmee de expansie plaats vindt hoog is, kan de lucht in hoge mate oververzadigd zijn voordat de waterdamp condenseert (onderkoeling).

Lit. 2 vermeldt, dat de onderkoeling in verschillende windtunnels bij uiteenlopende tunnelcondities ongeveer  $45^{\circ}\text{C}$  bedraagt. Dit houdt in dat het voor een suskamertemperatuur van  $35^{\circ}\text{C}$  mogelijk is bij getallen van Mach lager dan 2 volledig condensatievrije stroming te verkrijgen (lit. 3). Voor getallen van Mach hoger dan 2 wordt het steeds moeilijker condensatie van de waterdamp volledige te vermijden. Het toegestane verschil tussen het gemeten getal van Mach en het werkelijke getal van Mach zal bij een bepaalde suskamertemperatuur maatgevend zijn voor de specifieke vochtigheid van de luchtvoorraad.

In dit memorandum is de bepaling van de specifieke vochtigheid van de lucht voor de ST 15 supersone windtunnel beschreven <sup>\*)</sup>. Bovendien is een berekening gegeven betreffende de invloed van de gemeten specifieke vochtigheid op de bepaling van het getal van Mach uit pitotdruk en suskamerdruk.

\*) Deze meting is uitgevoerd als controleop een in januari 1957 gemeten waarde van de spec. vochtigheid van 0.00052 kg/kg.

### Beschrijving van de metingen.

Een schets van de meetopstelling voor het bepalen van de specifieke vochtigheid van de lucht in het voorraadvat van de ST15 supersone windtunnel is gegeven in fig. 1.

Het voornaamste onderdeel van de opstelling is een Dewervat gevuld met vloeibare stikstof, waarin een glazen spiraal met verzamelreservoir is geplaatst. De lucht uit het voorraadvat wordt via twee reduceerventielen en doorstroommeter I door de glazen spiraal gevoerd. Een tweede doorstroommeter is aangesloten op de uitstroomzijde van de glazen spiraal.

De druk van de lucht wordt met het reduceerventiel I verlaagd van  $\pm 150 \text{ kg/cm}^2$  tot ongeveer  $3 \text{ kg/cm}^2$ . Met behulp van reduceerventiel II wordt het gewenste transport ingesteld. Het luchttransport wordt gemeten met doorstroommeter I. De druk en de temperatuur, nodig voor het bepalen van het gewichttransport, worden gemeten met een U-buis en een kwikthermometer.

Het luchttransport wordt zo ingesteld dat doorstroommeter II steeds een positief transport aangeeft. Bij een laag transport kan zoveel lucht in de spiraal condenseren dat er een onderdruk in de spiraal ontstaat en lucht vanuit de omgeving wordt aangezogen (cryo-pumping). Ook mag het luchttransport niet zo laag zijn dat door een te geringe warmtetoevoer het verzamelreservoir onderaan de glazen spiraal volledig gevuld wordt met vloeibare lucht, waardoor het luchttransport stagneert. De bovengrens van het luchttransport wordt bepaald door de eis dat het dauwpunt van de lucht welke de spiraal verlaat niet veel verschilt van de temperatuur in het Dewervat. Dit betekent dat er geen ijsafzetting mag optreden in het uitstroomegedeelte van de glazen spiraal. De ijsafzetting in het instroomegedeelte van de spiraal was zeer duidelijk waarneembaar.

De glazen spiraal, welke volledig is ondergedompeld in vloeibare stikstof (temp.  $-196^\circ\text{C}$ ) heeft een totale lengte van 50 cm en een inwendige diameter van 3,3 mm. Het luchttransport werd ingesteld op ongeveer 7 gram per minuut. Voor een nauwkeurige bepaling van het gewichttransport is gedurende 2,5 uur gemeten. De aflezing van doorstroommeter I is gebeurd met intervallen van 3 minuten, gelijktijdig met de druk en de temperatuur. Bij het beëindigen van de meting is er zorg voor gedragen dat door "cryo-pumping" geen omgevingslucht zou worden aangezogen. De spiraal werd aan beide zijden afgesloten en aan de buitenkant zorgvuldig gereinigd en gedroogd. Vervolgens is de gewichtshoeveelheid water in de spiraal met een analytische balans bepaald (nauwkeurigheid  $0,1 \text{ mg}$ ).

Resultaten.

Het luchttransport door de glazenspiraal in 2,5 uur bedroeg 1048,95 g, de hoeveelheid water in de spiraal 90,2 mg. De gemeten specifieke vochtigheid van de lucht in het voorraadvat wordt dan 0,00086 kg water per kg lucht.

Voor de bepaling van het getal van Mach uit de pitotdruk en de suskamerdruk wordt gebruik gemaakt van isentrope betrekkingen. Deze werkwijze introduceert fouten indien deze wordt toegepast op een stroming waarin condensatieverschijnselen optreden. Voor de berekening van de fout in de ST15 supersone windtunnel wordt gebruik gemaakt van lit. 4. Hierin wordt uitgegaan van een één-dimensionale stroming, tevens wordt verondersteld dat in een doorsnede 1 van het tunnelkanaal, stroomopwaarts van de meetplaats, de temperatuur zo laag wordt dat door condensatie van de waterdamp plotseling een hoeveelheid warmte vrijkomt. Lit. 4 geeft dan de betrekking voor het getal van Mach:

$$\frac{M_c}{M} = 1 - \frac{1}{2} \frac{(1 + \gamma M_1^2) (1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2)}{M^2 - 1} Q \quad (1)$$

met 
$$Q = \frac{q}{c_p T_{t_1}} \quad (2)$$

en 
$$T_{t_1} = T_1 (1 + \frac{\gamma-1}{2} M_1^2) \quad (3)$$

en voor de pitotdruk:

$$\frac{P_{p_c}}{P_p} = 1 + \frac{1}{2} Q \left[ \frac{M^2 - 1}{M^2 + \frac{\gamma-1}{2}} (1 + \gamma M_1^2) - \gamma M_1^2 \right] \quad (4)$$

waarin  $M$  = getal van Mach in de meetplaats, zonder condensatie;

$q$  = warmtetoevoer per eenheid van massa gas;

$P_p$  = druk gemeten n.b.v. een pitotbuis;

index 1 duidt op de toestand in de doorsnede 1;

index c duidt op de toestand in de meetplaats indien condensatie optreedt.

Verondersteld wordt dat de waterdamp niet opnieuw verdampt in de schokgolf voor de pitotbuis. Als het getal van Mach wordt bepaald uit  $\frac{P_{p_c}}{P_p}$ , dan volgt een gemeten getal van Mach,  $M_1$ , waardoor geldt:

$$\frac{M_1}{M} = 1 - \frac{(P_{p_c}/P_p - 1) (1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2) (M^2 - \frac{\gamma-1}{2\gamma})}{(M^2 - 1)^2} \quad (5)$$

De fout in het getal van Mach gemeten met een pitotbuis wordt nu gevonden uit  $\frac{M_1}{M_c}$ . Met verg. (1), (4) en (5) volgt:

$$\frac{M_1}{M_c} = \frac{1 - \frac{Q}{2(M^2-1)^2} \left[ \frac{M^2-1}{M^2 - \frac{\gamma-1}{2\gamma}} (1 + \gamma M_1^2) - \gamma M_1^2 \right] \left( 1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right) \left( M^2 - \frac{\gamma-1}{2\gamma} \right)}{1 - \frac{Q}{2(M^2-1)} (1 + \gamma M_1^2) \left( 1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right)} \quad (6)$$

Voor  $M = 3$  gaat verg. (6) over in

$$\frac{M_1}{M_c} - 1 = \frac{0,27125 Q M_1^2}{1 - 0,1750 Q (1 + \gamma M_1^2)} \quad (7)$$

Voor de bepaling van  $M_1$  wordt uitgegaan van de volgende veronderstellingen:

- a) de suskamer temperatuur is  $260^\circ\text{K}$ ;
- b) de suskamerdruk is  $6,75 \text{ kg/cm}^2$ ;
- c) de onderkoeling bedraagt  $45^\circ\text{C}$ .

In Appendix A, is  $M_1$  het getal van Mach waarbij condensatie optreedt, berekend:

$M_1 = 1,278$ . De waarde van  $Q$  is berekend: in Appendix B.

Uit verg. (7) volgt nu de afwijking van het gemeten getal van Mach t.o.v. het werkelijke getal van Mach:

$$\frac{M_1}{M_c} - 1 = 0,00038 \quad (8)$$

Het is interessant om met behulp van verg. (4) de betrekking tussen de werkelijk gemeten pitotdruk  $P_{p_c}$  en de pitotdruk in het geval zonder condensatie van waterdamp te berekenen. Er volgt dan

$$\frac{P_{p_c}}{P_p} = 1,00033 \quad (9)$$

In de bepaling van het getal van Mach uit de pitotdruk en de suskamerdruk treedt bij  $M = 3$  een meetonnauwkeurigheid op van  $0,003$  abs. De extra fout t.g.v. condensatie van waterdamp bedraagt volgens verg. (8)  $0,0011$  abs. bij  $M = 3$ .

Conclusies

1. De gemeten specifieke vochtigheid bedraagt 0,00086 gram water per gram lucht.
2. Bij een specifieke vochtigheid van 0,00086 is de fout van het gemeten getal van Mach  $M_1$  t.o.v. het werkelijke getal van Mach  $M_c$  bij  $M=3$ : 0,0011 abs.
3. Vergeleken bij de meetonnauwkeurigheid van 0,003 abs. is de fout t.g.v. condensatie van waterdamp acceptabel.

Appendix A

Bepaling van het dauwpunt  $T_1$  en het getal van Mach  $M_1$  waar  $T_1$  bereikt wordt.

Fig IV-1 van lit. 2 geeft  $\Omega p$  als functie van het dauwpunt. In het gebied waar het voor deze metingen verwachte dauwpunt ligt, is de kromme benaderd door

$$\log \Omega p_1 = 0,0528 T_1 - 14,03 \quad (A1)$$

waarbij rekening gehouden is met een onderkoeling van  $45^\circ\text{C}$ ;  $p_1$  is de druk in atm waarbij condensatie optreedt,  $T_1$  het dauwpunt in  $^\circ\text{K}$  en  $\Omega$  de specifieke vochtigheid. Aangenomen wordt dat de condensatie van de waterdamp stroomopwaarts van de meetplaats plaatsvindt. De betrekking tussen  $p_1$  en  $T_1$  wordt dan gegeven door de vergelijking van Poisson:

$$\frac{p_1}{p_t} = \left(\frac{T_1}{T_t}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (A2)$$

Hierin is  $p_t$  de suskamerdruk en  $T_t$  de suskamertemperatuur,  $p_t = 6,75 \text{ kg/cm}^2$ ,  $T_t = 260^\circ\text{K}$ .

Met de gemeten waarde voor de specifieke vochtigheid  $\Omega = 0,000086$  levert de combinatie van (A1) en (A2)

$$\log T_1 = 0,01509 T_1 - 0,668 \quad (A3)$$

waaruit volgt  $T_1 = 196^\circ\text{K}$ .

Het getal van Mach  $M_1$  waar  $T_1$  bereikt wordt blijkt dan 1,278 te zijn.



Appendix B

Bepaling van  $Q = \frac{q}{C_p T_{t_1}}$

---

In de betrekking (2)

$$Q = \frac{q}{C_p T_{t_1}} \quad ,$$

is

$$q = h n \Omega \quad (B1)$$

waarin

$h$  = verdampingswarmte ,  
 $\Omega$  = specifieke vochtigheid ,  
 $n$  = factor tussen 0 en 1

Er volgt dan

$$Q = \frac{hn \Omega}{C_p T_{t_1}} \quad (B2)$$

In navolging van lit. 4 wordt  $n = 1$  genomen, terwijl  $T_{t_1} = T_t = 260^\circ\text{K}$ . Verder is  $C_p = 0,242 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$  en  $h = 628 \text{ cal/g}$  en de gemeten specifieke vochtigheid bedraagt  $\Omega = 0,000086$ , zodat

$$Q = 0,00086$$

Literatuur

1. Lukasiewicz, J. Humidity effects in supersonic flow of air,  
R and M 2563, July 1947.
2. Hill, J.A.F., Baron, J.R., Mach number measurements in high-speed wind  
Schindel, L.H. and tunnels,  
Markhan, J.R. AGARDograph 22, October 1956,
3. Raney, D.J. and Criteria for condensation free flow in the  
Beastall, D. RAE No. 18 (9 in x 9 in) supersonic tunnel,  
ARC CP 164 June 1953.
4. Monaghan, M.A. Tests of humidity effects on flow in a wind  
tunnel at Mach numbers between 2.48 and 4,  
ARC CP No. 247, 1956.

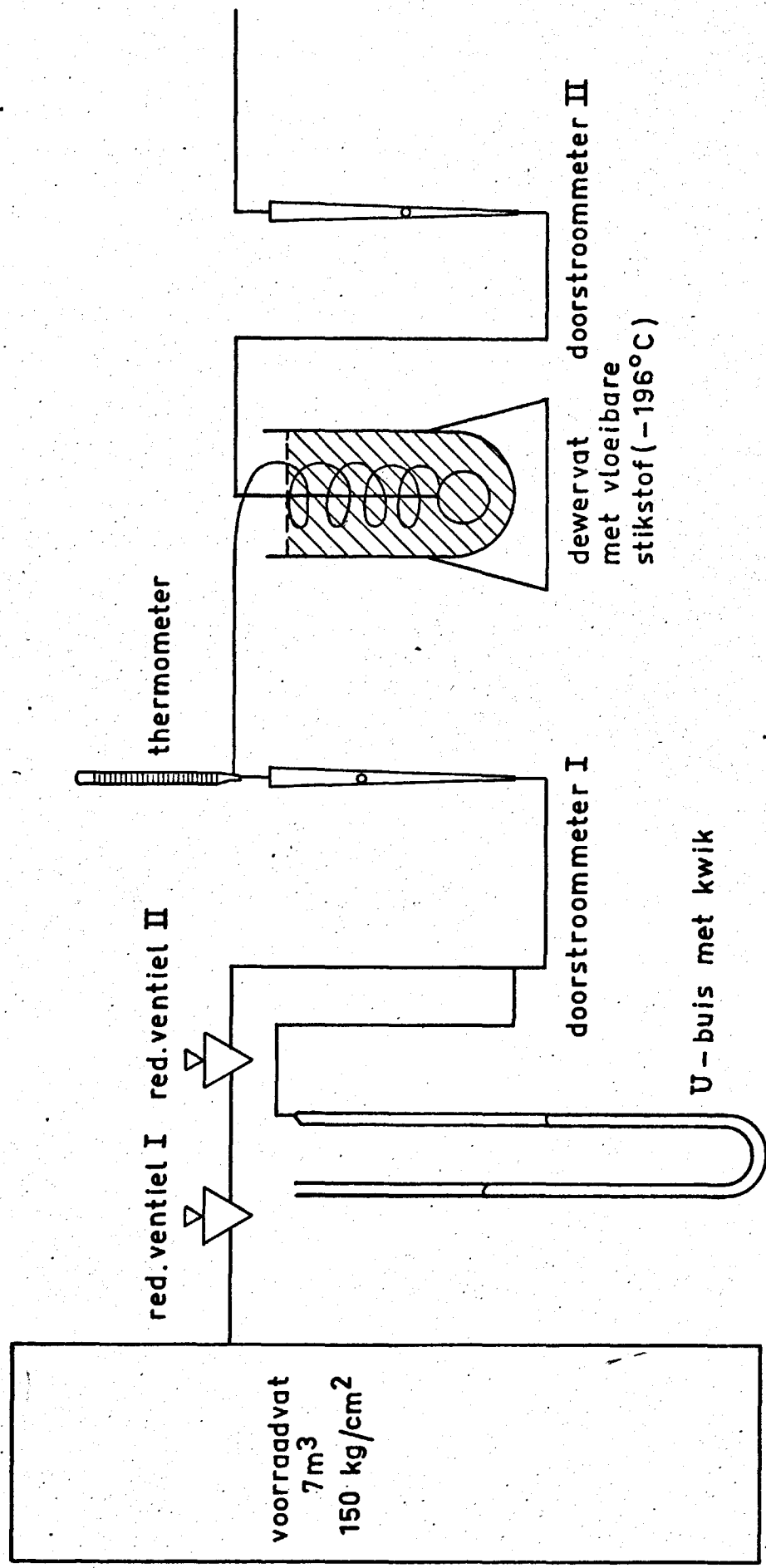


FIG.1 . MEETOPSTELLING VOOR DE BEPALING VAN DE SPECIFIEKE VOCHTIGHEID.