



ORKUSTOFNUN  
Jarðhitadeild

**Athugun á búnaði til mælinga á  
gufustreymi úr gufuaugum**

Samstarfsverkefni Hitaveitu Reykjavíkur og Orkustofnunar  
um umhverfisáhrif jarðhitánýtingar

Gestur Gíslason (HR)  
Magnús Á. Sigurgeirsson (OS)

OS-96050/JHD-31 B

September 1996



ORKUSTOFNUN

Hitaveita Reykjavíkur

Verknr. 760 124

**Athugun á búnaði til mælinga á  
gufustreymi úr gufuaugum**

Samstarfsverkefni Hitaveitu Reykjavíkur og Orkustofnunar  
um umhverfisáhrif jarðhitanýtingar

Gestur Gíslason (HR)

Magnús Á. Sigurgeirsson (OS)

OS-96050/JHD-31 B

September 1996

## EFNISYFIRLIT

Inngangur	1
Tækni	1
Mælingar	2
Niðurstöður	3
Vangaveltur og tillögur	3
Viðauki I: Lýsing á pítot-röri	4
Viðauki II: Stöðlun þrýstimælis	8

## TÖFLUR

1. Samband mælinga með rellu og pítot-röri	2
--	---

## MYNDIR

1. Breytingar á gufuhraða með aukinni fjarlægð frá stút	2
2. Samband milli mælinga og rellu og pítot-röri	2

## Inngangur

Mæling á gufustreymi frá gufuaugum hefur reynst erfiðleikum bundin, sérstaklega úr þeim öflugustu. Fram til þessa hafa sérfræðingar Orkustofnunar og Hitaveitu Reykjavíkur metið gufustreymið sjónrænt. Sú aðferð er bundin verulegri óvissu, er mjög persónubundin og erfitt er að samræma hana milli mælingamanna. Þá hafa minni gufuaugu verið mæld með því að þetta gufuna, og einnig hefur varmastreymi um hitaskellur verið mælt með ísmæli (sjá t.d. skýrslu Öнна Lísu Guðmundsdóttur: Náttúrulegt varmastreymi til yfirborðs á jarðhitasvæðum í landi Nesjavalla. Hitaveita Reykjavíkur 1988). Þegar skilgreindir voru forgangsverkbættir í átaksverkefni um "Umhverfisáhrif jarðhitanýtingar" 1991-1992 voru mælingar á gufustreymi úr gufuaugum einn þeirra þátta, sem ákveðið var að vinna að. Eftirfarandi skýrsla greinir frá vinnu við þann verkþátt umhverfisverkefnisins.

Jarðfræðistofnun Bandaríkjanna hefur um árabíl notað búnað til mælinga á gufustreymi úr gufuaugum, sem byggir annars vegar á lofthraðamælingum með lítilli vindrellu og hins vegar á mælingum á þrýstimun með "pítot-rörum". Lítið er til skrifað um mæliaðferðirnar, en samkvæmt munnlegum upplýsingum hefur þessi aðferð gefist nokkuð vel þótt nákvæmni sé ekki mjög mikil eða um 20-30%. Þar sem þetta var talin nokkuð handhæg aðferð og a.m.k. áreiðanlegri en þær aðferðir sem áður hafa verið reyndar hérlendis var ákveðið að prófa hana. Árið 1993 var keyptur svipaður búnaður og notaður er á Jarðfræðistofnun Bandaríkjanna og er hér greint frá fyrstu prófunum á honum.

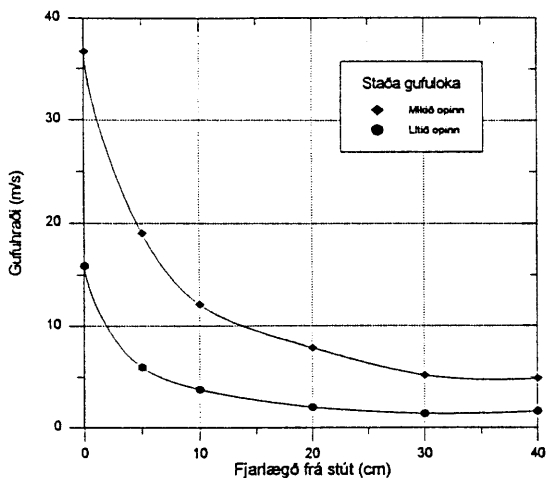
## Tæki

### *Lofthraðamælir*

Notað var fjölnota mælitæki (multifunctional environmental instrument) af gerðinni Solomat MPM 500e. Með tækinu er hægt að mæla hitastig, raka, lofthraða og þrýsting. Til mælinga á gufustreymi var notuð rella (Vane Prope). Rellan er um 1,2 cm í þvermál og er í rás fremst á 26 cm löngu skafti sem draga má í sundur þannig að það verði allt að 85 cm langt. Rellan tengist mælitækinu með snúru og er aflestur í m/sek. Hægt er að mæla hraða allt að 60 m/sek. Ráðlagt hitastig við mælingar er á bilinu -10 til +70°C (mælingar má þó framkvæma í stuttan tíma við allt að +120°C). Rellan er næm fyrir stefnu flæðis og þarf að taka tillit til þess við mælingar. Lágmarks byrjunarhraði er gefinn upp 0,75 m/sek. Möguleiki er á að taka meðaltal af mælingum og ennfremur að fá hámarks- og lágmarksgildi.

### *Pítot rör (Pitot Static Tube)*

Mæling lofthraða með pítot-röri byggist á að mæla þrýstimun milli raunþrýstings á mælistað og þeirrar þrýstingshækkunar sem skapast af straumhraða loftsins. Mismunarþrýstingurinn eykst



Mynd 1. Breytingar á gufuhraða með aukinni fjarlægð frá stút

## Mælingar

Byrjað var á að gera athugun á tækjabúnaði, í fyrsta lagi að sjá hvernig rellan hentaði í mettaðri og heitri vatnsgufu, og í öðru lagi að kanna hvort að svörun fengist með pítot-rörinu. Athugunin var gerð í tilraunastöðinni á Nesjavöllum, þar sem gufa við inntak á varmaskipti var notuð við prófunina, en þrýstingur gufunnar þar er 1,8 bar og hitastigið er 131°C. Gufunni var hleypt út um 1/2" loka á gufulögninni.

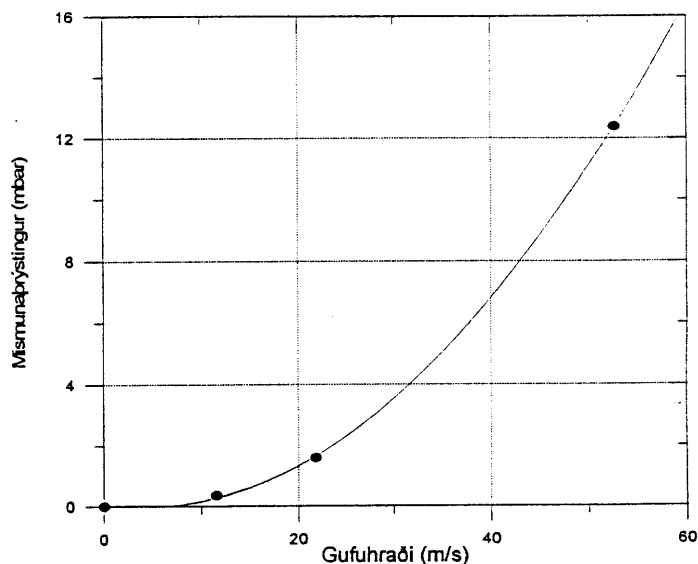
Enginn útbúnaður er til að mæla raunverulegt gufustreymi, og eru allar mælingarnar því afstæðar. Í upphafi var

Rella (m/s)	Pítot-rör	
	Aflestur (mA)	Þrýstingur (mbar)
0	4,06	0
11,5	4,15	0.35
21,8	4,46	1.59
52,6	7,15	12.39

Tafla 1. Samband mælinga með rellu og pítot-röri

eftir því sem lofthraðinn er meiri. Í viðauka I er nánari skýring á hönnun pítot-röra og fræðilegum bakgrunni.

Mismunaprýstingurinn í pítot-röri er lítill, og verður því að nota mjög nákvæman þrýstimæli. Við þá athugun sem hér er greint frá, var notaður mismunaprýstimæli frá Siemens (TELEPERM Transmitter K 7MF 130). Mælisvið tækisins er 0 til 64 mbar (4 - 20 mA). Tækið gengur fyrir 24 V jafnstraumi, og er nokkuð þungt í vöfum fyrir feltvinnu (7,4 kg). Tækið var staðlað á verkstæði Hitaveitu Reykjavíkur, og er vottorðið í viðauka II.



Mynd 2. Samband milli mælinga með rellu (m/s) og pítot-röri (mbar)

athugað hvernig rellan svaraði gufustreymi með því að halda henni í gufustróknum í mismunandi fjarlægð frá lokanum. Þessi athugun var gerð í tvígang, með gufulokann mismikið opinn. Niðurstöður eru sýndar á mynd 1. Þegar gufunni er hleypt út í andrúmsloftið er hún þurr við stútinn (0 cm á mynd 1), en strax á fyrsta sentimetranum hefst þétting og einnig þenst strókurinn út. Hitastig gufunnar var kominn niður fyrir 85°C 8 cm yfir stútnum.

Þá var athugað hvernig mælingar með pítot-röri svöruðu mismunandi gufustreymi. Mælingarnar voru bornar saman við mælingar með rellunni, og mælingum hagað þannig að fremra opið á röriinu (sjá viðauka I) og rellan voru höfð í sömu fjarlægð frá stútnum. Mælt var við mismunandi gufuhraða og eru niðurstöður sýndar í töflu 1. Á mynd 2 er sýnt sambandið milli gufuhraða mældum með rellunni og mismunaprýstings pítot-rörsins.

Þegar ljóst var orðið að unnt var að mæla gufuhraða með báðum tækjunum var ákveðið að fá hugmynd um hver væri gufuhraði í náttúrulegum gufuaugum. Við þessa prófun var rellan eingöngu notað, enda er útbúnaðurinn sem notaður var við pítot-rörið vart nothæfur til útivinnu. Mælt var á nokkrum stöðum á Nesjavallasvæðinu; nærri holu NG-6, í Köldulaugagili og í Nesjlaugagili. Þetta var gert 10. júlí 1995, en var veður þann dag var óhagstætt vegna mikillar rigningar.

Í litlu gufuauga (2 cm í þvermál) rétt vestan við planið á holu NG-6 mældist straumhraði 11 m/s, 2 cm yfir auganu, og 7 m/s 8, cm yfir því.

Í Köldulaugagili, neðan við göngustíginn, er mikill yfirborðshiti á svæði sem er um 30x20 m að stærð. Mikið er af bullandi vatnspyttum þarna, sá stærsti um 1 m í þvermál. Ekki reyndist gufuhraðinn í þeim nægur til að snúa með rellunni. Þá fundust nokkur lítil gufuaugu, og mældist gufuhraði í einu þeirra 6,5 m/s. Þvermál þess var um 10 cm.

Í Nesjlaugagili er mikill yfirborðshiti, og eru þrjú gufuaugu stærst, 10-20 cm í þvermál. Í þeim mældist straumhraði allt að 22 m/s. Gufustreymi var víða mikið á svæðinu, en ekki var unnt að mæla það vegna erfiðrar aðkomu eða þá að rellan snerist ekki. Þegar gufan er mettuð setjast dropar á relluna, og þyngja hana. Lágmarksgufuhraða sem þarf til að koma rellunni af stað við þannig skilyrði er a.m.k. 5 m/s..

## Niðurstöður

Þessar fyrstu niðurstöður sýna að báðar mæliaðferðirnar gefa nokkra svörun við gufustreymi, en ekki er þó enn ljóst hvort eða hvernig hægt er að beita búnaðinum til að meta náttúrulegt gufustreymi.

Tilraunin hefur leitt í ljós nokkur tæknileg vandamál. Í fyrsta lagi virðist sem að rellan nái ekki að mæla streymi á blautri vatnsgufu þegar hraðinn er undir 5 - 6 m/s, en mikið að þeim gufuaugum sem reynt var að mæla er undir þeim mörkum. Í öðru lagi kom í ljós að erfitt er að mæla mismunaprýstinginn í pítot-rörinu. Gufuhraðinn í þeim gufuaugum sem mæld voru með rellunni reyndist á bilinu 0 - 25 m/s, en samkvæmt mynd 2 er mismunaprýstingurinn í pítot-rörinu á því sviði 0 - 2 mbar. Mælisvið nákvæmasta mælisins sem handbær var til tilraunarinnar er 0 - 64 mbar og gefur því hámarksgufustreymi einvörðungu 3% útslag. Í pöntun er næmari mælir hjá Hitaveitu Reykjavíkur (0 - 20 mbar), og stendur til að reyna hann. Þétting í augum pítot-rörsins veldur einnig erfiðleikum við mælingu sem og þrýstítap í röri og slöngum.

Af lokum má benda á þann vanda sem skapast af því að gufuaugu í náttúrunni eru af öllum stærðum og gerðum, þannig að oft getur reynst erfitt að koma búnaðinum að þar sem mæla skal. Af sömu ástæðum er þess að vænta að straumhraði sé breytilegur í gufurasinni, sem leiðir til þess að mæla þarf sem víðast í sama gufuauganu til þess að fá marktækar upplýsingar.

## Vangaveltur og tillögur

Varmainnihald mettaðrar vatnsgufu er vel þekkt ef hitastig hennar er þekkt, en um leið og þétting hefst eykst margfalt öll óvissa í reikningum, Á mynd 1 sjást áhrif þéttingar, þar sem hraði gufunnar minnkar um 50 % á fyrstu 5 cm. Við þessar aðstæður er varmainnihald óþekkt þar sem gufa/þéttivatnshlutfallið er óvissst. Það er því ljóst að til þess að draga sem mest úr óvissuþáttum verður að mæla gufustreymi í gufuaugum áður en þétting hefst. Þetta leiðir til þess að erfitt er að koma við einhverjum búnaði yfir gufuauganu til að auðvelda mælingu því það kann að leiða til þéttingar gufunnar.

Það er ljóst að lokinni fyrstur tilraun á búnaðinum að enn þarf að bæta hann áður er ljóst er hvort hann dugar. Fyrstu skrefin í þá átt eru að prófa pítot-rörið með næmari mismunaprýstimæli, og að þróa búnað til að auðvelda mælingu á gufuaugum.

## **Viðauki I: Lýsing á pítot-röri**

**(The pitot static tube)**

## THE PITOT STATIC TUBE - INSTRUCTIONS FOR USE

### Description

Developed between 1952 and 1954 by the National Physical Laboratory and manufactured since 1955 by Airflow Developments Limited the modified ellipsoidal nose Pitot Static tube is now the only form of Pitot tube recommended in BS1042 (Part 2A) for measuring the flow of air in ducts by the traverse method.

When inserted into a duct with the tip facing directly into the flow it will enable air velocity at that point to be determined by connecting the Static Pressure and Total Pressure tappings (see diagram 1) to opposite sides of a sensitive manometer. The manometer will show the difference between the two pressures. This is the Velocity Pressure, from which the air velocity can be calculated.

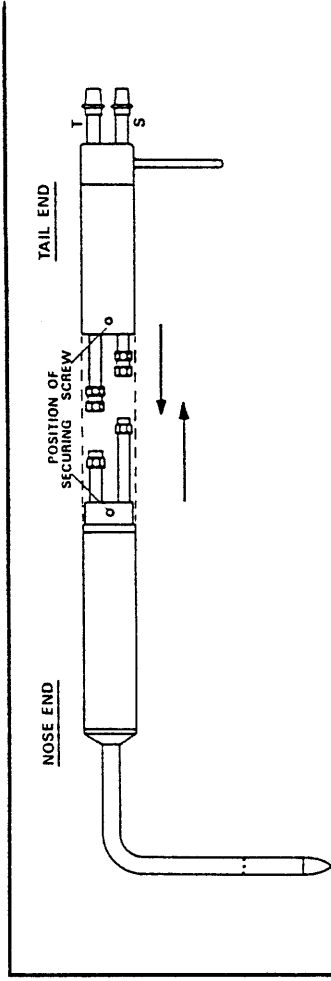
At its head the Pitot tube features a modified ellipsoidal nose with a single forward facing hole for sensing Total Pressure, and a ring of side holes for sensing Static Pressure. Both these inlets are individually connected by concentric tubes leading to tapping outlets at the tail of the tube (see diagram). The heel of the tube is rounded to facilitate entry through the duct wall and the tail fitting is provided with a direction pointer so that the Pitot tube can be aligned accurately within the duct.

Constructed entirely in stainless steel to BS3605-321S18 with welded joints, the tube can be safely exposed to temperatures up to 680°C (1256°F) and for short periods up to 800°C (1472°F). Exceptions to this are the 2.3mm and 4 mm diameter tubes which have silver brazed joints. These are only suitable for temperatures up to 550°C (1022°F). Sliding spring clip markers are fitted to the 4 mm, 8 mm and 9.5 mm diameter Pitot tube stems (not on glanded Pitots) to indicate depth of insertion and can be used at temperatures up to 276°C (529°F).

### Jointed Pitot Tubes

Pitot tubes are available for larger ducts, in sizes up to 4.26m (14ft). These larger tubes are manufactured in jointed form consisting of two parts, a Nose assembly and a Tail assembly, each being enclosed in a tubular casing. The Tail end casing slides over a spigot on the Nose casing and is secured by a countersunk screw.

The Static and Total pressure tubes within the nose end casing pass through the spigot to protrude 19mm (3/4in) (Total) and 70mm (2 3/4in) (Static), each tube end being fitted with pipe couplings. These couplings are marked "T" and "S" for easy identification and the Tail end pressure tubes are similarly marked. The Tail end outer casing slides freely over the pressure tubes. The method of assembly is clearly shown in diagram 2.



JOINTED PITOT STATIC TUBE ASSEMBLY

Diagram 2

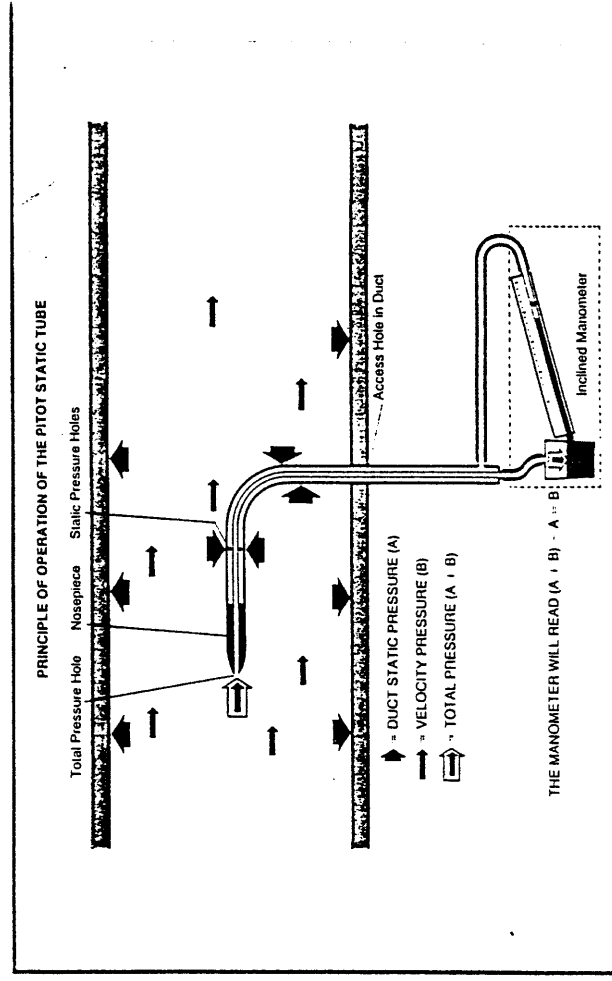
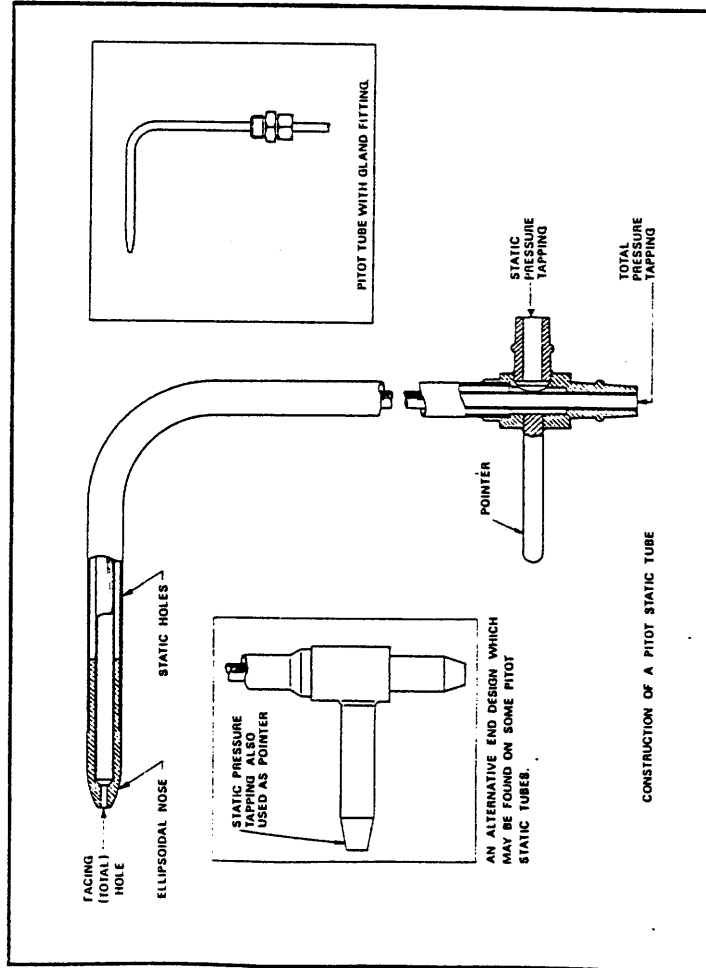


Diagram 3



CONSTRUCTION OF A PITOT STATIC TUBE



## Measurement

To determine the flow of air in a ducted system it is necessary to carry out what is called a "Traverse" with the Pitot Static tube at a plane in a section of the duct, and at right angles to its walls. If possible the section should be chosen to be at least 6 duct diameters or widths downstream of any bend or obstruction in the system. Holes are drilled at the appropriate points in the wall of the duct to enable the Pitot static tube to be inserted and moved successively to the various positions shown in diagram 5 for circular airways and diagram 6 for rectangular airways.

The Pitot tube is connected up to a sensitive manometer (usually an Airflow type 4 or type 5 portable test set) to read Velocity Pressure as indicated in diagram 7. Wherever possible the PVC tubing used for connection should rise a few inches vertically from the end of the manometer tube to prevent loss of fluid if the pressure applied should momentarily exceed the manometer range.

To measure Total or Static pressure only, connect the applicable tapping at the tail of the Pitot tube to the appropriate end of the manometer leaving the other end of the manometer open to atmosphere.

When using a test set with two manometer limbs, the Static Pressure in the duct and the Velocity Pressure can be displayed at the same time by connecting a "T" piece into the Static Pressure line from the Pitot tube and feeding off to one end of the second manometer limb, leaving its opposite end open to atmosphere (see diagram 8).

When inserting the Pitot tube into the duct, make sure that the head enters quickly and completely, pinching the PVC tubing together while making the insertion to avoid any blow back of manometer fluid. Alternatively, a manometer balancing valve may be used.

Care must always be taken to ensure that the head of the Pitot tube is held parallel to the walls of the duct. This can be checked by reference to the direction pointer on the tail of the Pitot tube.

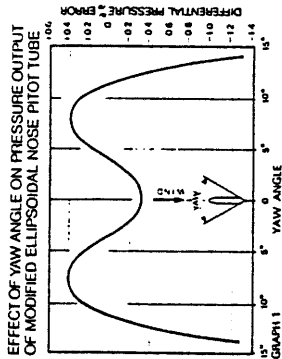
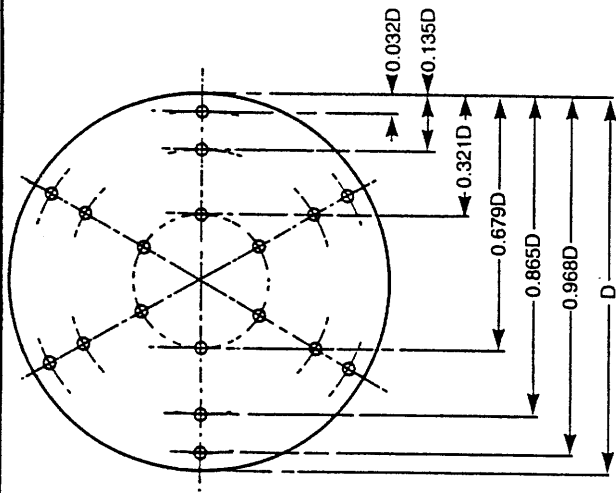


Diagram 4

Reliable results will only be obtained if the bulk of the flow in the duct is substantially parallel to its walls. If swirl or cross-flow is suspected this can be checked by inserting the Pitot tube in several positions and turning the head in both pitch and yaw to find the angle at which maximum Velocity Pressure reading is obtained. If this is not more than about 15° from the position parallel to the duct walls no great error will occur in the results. Pronounced swirl is often present in circular ducts, particularly downstream of such items as cyclone dust separators, axial fans, etc.

With the combination of Pitot tube, flexible connecting tubing and adjustable manometer contained in an Airflow Test Set a dwell of between 10 and 20 seconds at each point will usually be sufficient to obtain a reading. Where fairly wide velocity variations are present between individual readings, it may take somewhat longer for the manometer to steady in a mean position.

The duct area in the test plane must be measured with care and the volume flow rate is determined by calculating the average velocity in the manner which follows and multiplying it by the measured duct area.



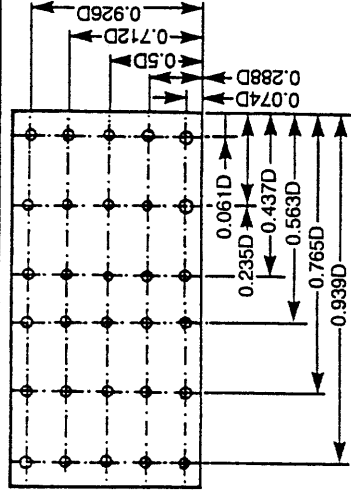
Log Linear rule for traverse points on 3 diameters in a circular duct

Note: Should difficulty in access make it impossible to traverse on more than two diameters; these should be mutually at right angles and the number of points on each line must be increased to 10.

The spacing should be as follows:

0.019D 0.077D 0.153D 0.217D 0.361D  
0.639D 0.783D 0.847D 0.923D 0.981D

Diagram 5

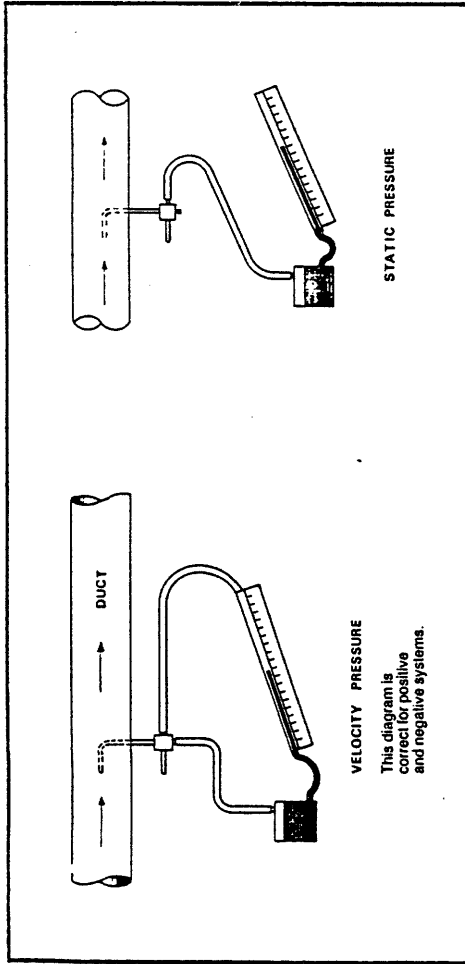


Position of alternative measuring points and traverse lines relative to side lengths for rectangular ducts

No. of points or traverse lines	Position relative to inner wall
5	0.074, 0.288, 0.5, 0.712, 0.926,
6	0.061, 0.235, 0.437, 0.563, 0.765, 0.939,
7	0.053, 0.203, 0.366, 0.5, 0.634, 0.797, 0.949,

Log Tchebycheff Rule for Rectangular Ducts

Distance between measuring stations should not exceed 200mm.



**Air Velocity Calculations Using S.I. Scales.**  
 The Standard formula for calculating velocity from velocity pressure is  $V = 1.291 \sqrt{P_v}$ . This is only correct for standard air density at 16°C and 1000 mbar atmospheric pressure.

For non-standard air conditions this equation becomes:

$$V = 1.291 \sqrt{\frac{1000}{B} \times \frac{T}{289} \times \frac{100000}{100000 + P_s}} \times P_v$$

- V = velocity m/s
- B = barometric pressure mbar
- T = absolute temperature °K (= °C + 273 where t is airstream temperature)
- P<sub>s</sub> = static pressure Pa
- P<sub>v</sub> = velocity pressure Pa

The expression  $\frac{100000}{100000 + P_s}$  is a correction

for the static pressure in the duct and may normally be ignored if P<sub>s</sub> is less than 2500 Pa.

When calculating average velocity in a duct, the square roots of the velocity pressures should be averaged. In practice however, no great error will be introduced by taking the square root of the average of velocity pressures when the majority of the readings do not vary by more than about ±25% from a mean figure.

The expression  $\frac{408}{408 + P_s}$  is a correction for the static pressure in the duct and may normally be ignored if P<sub>s</sub> is less than 10 ins wg.

When calculating average velocity in a duct, the square roots of the velocity pressures should be averaged. In practice however, no great error will be introduced by taking the square root of the average of velocity pressures when the majority of the readings do not vary by more than about ±25% from a mean figure.

**Air Velocity Calculations Using Metric Scales.**

The standard formula for calculating velocity from velocity pressure is  $V = 4.05 \sqrt{P_v}$ .

This is only correct for standard air density at 20°C and 760 mm Hg atmospheric pressure.

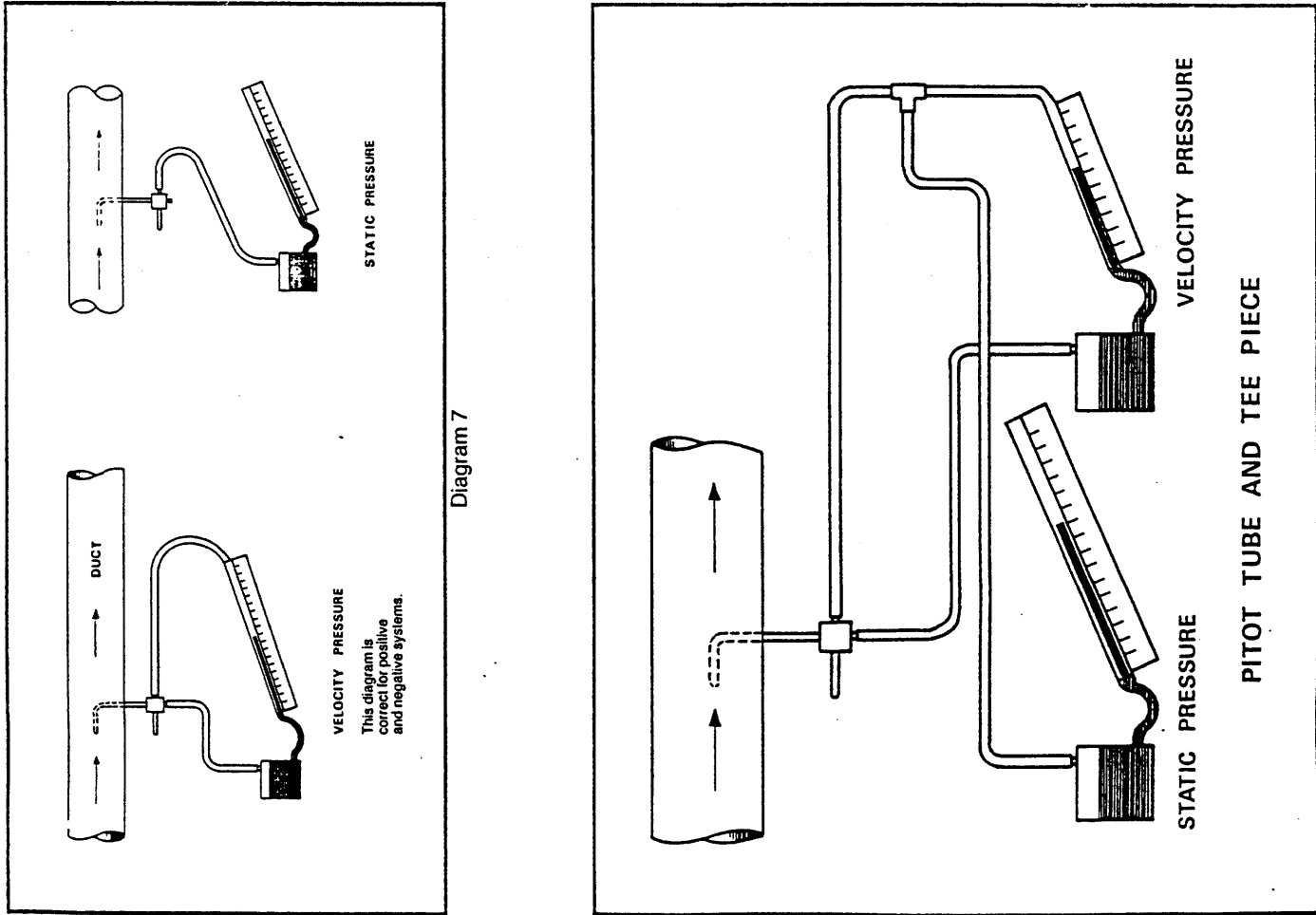
For non-standard air conditions this equation becomes:

$$V = 4.05 \sqrt{\frac{760}{B} \times \frac{T}{293} \times \frac{10350}{10350 + P_s}} \times P_v$$

- V = velocity m/s
- B = barometric pressure mm Hg
- T = absolute temperature °K (= °C + 273 where t is airstream temperature)
- P<sub>s</sub> = static pressure mm H<sub>2</sub>O
- P<sub>v</sub> = velocity pressure mm H<sub>2</sub>O

The expression  $\frac{10350}{10350 + P_s}$  is a correction for the static pressure in the duct and may normally be ignored if P<sub>s</sub> is less than 250mm H<sub>2</sub>O.

When calculating average velocity in a duct, the square roots of the velocity pressures should be averaged. In practice however, no great error will be introduced by taking the square root of the average of velocity pressures when the majority of the readings do not vary by more than about ±25% from a mean figure.



**Air Velocity Calculations Using Imperial Scales.**  
 The standard formula for calculating velocity from velocity pressure is  $V = 4000 \sqrt{P_v}$ . This is only correct for standard air density at 68°F and 30 ins Hg atmospheric pressure.

For non-standard air conditions this equation becomes:

$$V = 4000 \sqrt{\frac{30}{B} \times \frac{T}{528} \times \frac{408}{408 + P_s}} \times P_v$$

- V = velocity ft/min
- B = barometric pressure ins Hg
- T = absolute temperature °R (= °F + 460 where t is airstream temperature)
- P<sub>s</sub> = static pressure ins wg
- P<sub>v</sub> = velocity pressure ins wg

The expression  $\frac{408}{408 + P_s}$  is a correction

for the static pressure in the duct and may normally be ignored if P<sub>s</sub> is less than 2500 Pa.

When calculating average velocity in a duct, the square roots of the velocity pressures should be averaged. In practice however, no great error will be introduced by taking the square root of the average of velocity pressures when the majority of the readings do not vary by more than about ±25% from a mean figure.

**Air Velocity Calculations Using Imperial Scales.**

The standard formula for calculating velocity from velocity pressure is  $V = 4000 \sqrt{P_v}$ . This is only correct for standard air density at 68°F and 30 ins Hg atmospheric pressure.

For non-standard air conditions this equation becomes:

$$V = 4000 \sqrt{\frac{30}{B} \times \frac{T}{528} \times \frac{408}{408 + P_s}} \times P_v$$

- V = velocity ft/min
- B = barometric pressure ins Hg
- T = absolute temperature °R (= °F + 460 where t is airstream temperature)
- P<sub>s</sub> = static pressure ins wg
- P<sub>v</sub> = velocity pressure ins wg

## **Viðauki II: Stöðlun þrýstimælis**

# CALIBRATION CERTIFICATE

**HITAVEITA REYKJAVIKUR**

TAG IDENTIFIER: S.12-347  
 LOOP NAME .....  
 PROCESS .....  
 UNIT OF PLANT : LA-GÊ  
 REMARK A .....  
 NEXT CALIBRATION: 11.09.1996

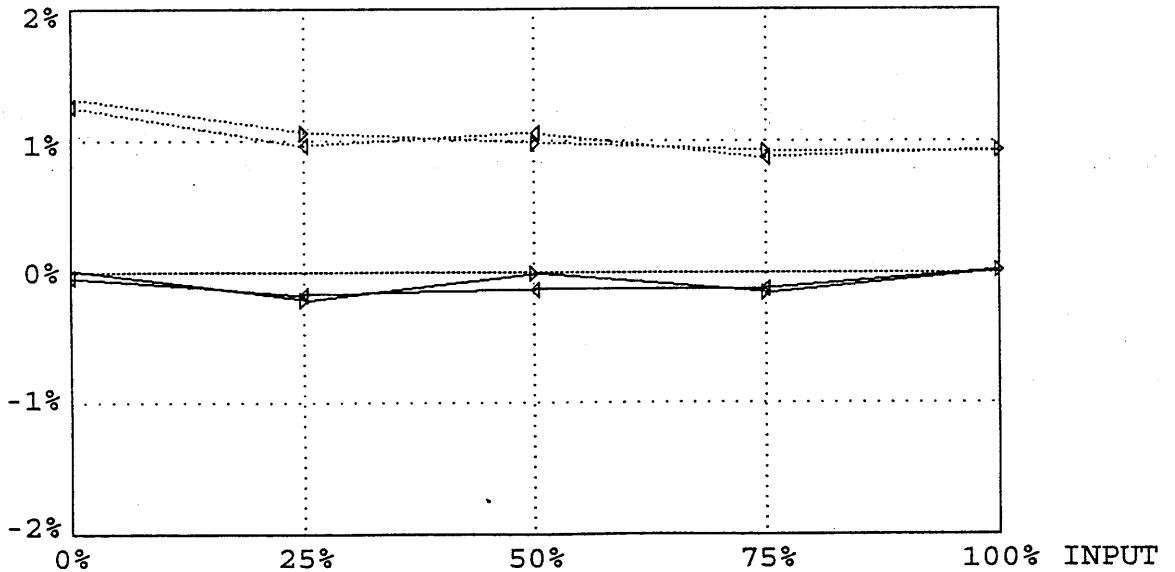
INSTRUMENT S/N: N5G787T  
 MANUFACTURER .. SIEM  
 MODEL .....: 7MF 1303-1CD41-1BD4  
 REMARK B .....: S.12-SIEM  
 CALIBRATOR ....: PC106 S/N 00563  
 P-MODULE .....: MC S/N 10591

PRESSURE TRANSMITTER (Linear)  
 IN: 0 to 64 mbar (g)  
 OUT: 4 to 20 mA  
 INPUT METHOD : MEASD  
 ACCURACY CLASS: 1.0 %  
 STRATEGY CLASS: b

**NEW RESULTS**

INPUT VALUE mbar (G)	OUTPUT VALUE mA	OUTPUT ERROR mA	OUTPUT ERROR % OF SPAN
0.00	4.0005	0.00050	0.0031
16.00	7.965	-0.0350	-0.2188
32.00	11.998	-0.0020	-0.0125
48.00	15.975	-0.0250	-0.1562
64.0	20.003	0.0030	0.0188
48.00	15.979	-0.0210	-0.1312
32.10	12.003	-0.0220	-0.1375
16.00	7.971	-0.0290	-0.1813
0.00	3.9935	-0.00650	-0.0406

ERROR % of span: Max error old (.....): 1.3156 % new (\_\_\_): -0.2188 %



COMMENT: \_\_\_\_\_

CALIBRATED: 12.09.1995

  
 BY: KRISTINN RAFNSSON