

Ville Hämäläinen

ILMANVAIHTOKANAVIEN KITKAPAINEHÄVIÖT

Rakennustekniikan koulutusohjelma

2013

ILMANVAIHTOKANAVIEN KITKAPAINEHÄVIÖT

HämäläinenVille
Satakunnan ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikan koulutusohjelma
Toukokuu 2013
Ohjaaja: Sandberg Esa
Sivumäärä: 40
Liitteitä: 10

Asiasanat: ilmanvaihto, sisäilma, kanava, kitkapainehäviö.

Opinnäytetyön aiheena oli tutkia ilmanvaihtokanavien kitkapainehäviöiden muodostumista. Tehtävänä oli mitata Fläkt Woods Oy:n Suomessa valmistamia erikokoisia pyöreitä ilmanvaihtokanavia, ja saada niistä aikaan ajantasaiset painehäviökäyrästöt tapauksessa, että kanavissa on käytetty jatkoliittimiä kolmen metrin välein. Olemassa olevat painehäviökäyrästöt on laadittu ilman jatkoliittimiä, joita käytännössä kuitenkin tarvitaan asennuksissa, joten siksi kyseinen työ oli ajankohtainen.

Kanavien painehäviömittaukset suoritettiin mittaamalla staattinen paine neljän pisteen keskiarvona kanavan kehältä neljästä kohdasta kanavaa kolmen metrin välein. Mittauksissa käytettiin kuuden kymmenen sekunnin keskiarvon keskiarvoa. Virtaus suunnassa viimeisen kolmen metrin matkalla saatuja keskiarvoja käytettiin laskennassa, jossa selvitettiin kanavien painehäviö metriä kohden, sekä laadittiin painehäviökäyrästöt.

Mittausten tarkastelussa huomattiin sileiden kanavien painehäviöiden olevan sitä suurempia mitä pienempi putkikoko on kyseessä, verrattuna nykyiseen painehäviökäyrästöön. Suuremmilla profiloituilla kanavakoilla painehäviöt olivat hieman pienempiä kuin nykyisestä käyrästöstä voidaan todeta.

FRictionAL PRESSURE DROP IN VENTILATION DUCTS

Hämäläinen Ville

Satakunnan ammattikorkeakoulu, Satakunta University of Applied Sciences

Degree Programme in Construction Engineering

May 2013

Supervisor: Sandberg Esa

Number of pages: 40

Appendices: 10

Keywords: Ventilation, Indoor air, Air duct, Frictional pressure drop

The purpose of this thesis was to measure and examine frictional pressure drops in round ventilation ducts manufactured by Fläkt Woods Group Finland. The main aim of this project was to draw up new pressure drop charts based on the measurements, where the joint parts were used and see if the current pressure drop charts are still usable for the ducts made at the present time.

Pressure drops were defined by measuring the static pressure in the duct at four distances of three meters using a four measurement point average from the circle of the duct. The averages average of six ten seconds period of time were used in the measurements. The measured values were used to define pressure drop in the duct per meter. New pressure drop charts were formulated from those values.

The results indicated that the pressure drop of the smooth (non-profiled) ducts were higher in the smaller duct sizes and the pressure drop of the profiled ducts were, slightly lower than the existing charts display.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	5
2	VIRTAUSTEKNISET PERUSTEET	6
2.1	Virtaustyytit, Reynoldsin luku	6
2.2	Kitkavastukset.....	7
2.3	Kertavastukset.....	10
2.4	Tiheyden vaikutus vastuksiin.....	11
2.4.1	Tiheyden laskeminen.....	12
2.4.2	Tiheyskorjauksen määrittäminen mittauksissa.....	13
3	JULKAISTUT PAINEHÄVIÖKÄYRÄSTÖT	15
3.1	Painehäviökäyrästöt kirjoista	15
3.2	Kanavavalmistajat.....	16
3.3	Painehäviökäyrästöjen tarkastelu.....	19
4	MITTAUSJÄRJESTELY.....	20
4.1	Mitatut kanavakoot	20
4.2	Kanavien ja oheislaitteiden asennustapa.....	21
4.3	Mittauslaitteet	25
5	MITTAUSTULOKSET.....	28
5.1	Mitatut painehäviöt	28
5.2	Yhdistetyt mittaustulokset ja nykyiset käyrästöt	31
6.	PAINEHÄVIÖKÄYRÄSTÖN MALLINNUS.....	35
6.1	Mallinnusperiaate ja mallinnettu käyrästö	35
6.2	Mallinnetun ja julkaistun Fläkt Woodsin käyrästön vertailu	37
6.2	Mallinnetun ja julkaistun Lindabin käyrästön vertailu.....	39
7.	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET.....	40

1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö tehtiin Satakunnan ammattikorkeakoululle, jolta Fläkt Woods Oy oli tilannut työn. Työn aiheena oli mitatapyöreiden kierresaumakanavien kitkapainehäviöitä, laatia painehäviöille laskentamallit ja käyrästöt saaduista tuloksista, sekä verrata saatuja tuloksia nykyisiin käyrästöihin. Nykyisistä saatavilla olevista käyrästöistä, joita löytyy niin kanavavalmistajilta kuin oppikirjoistakin, ei ole täyttä varmuutta niiden ajantasaisuudesta. Työssä haluttiin selvittää etenkin jatkoliittimien ja profiloinnin vaikutus painehäviöön. Työ suoritettiin siten, että opinnäytetyön tekijä suoritti mittaukset ja mallinnuksen laati pääosin työn ohjaaja Esa Sandberg. Kaikki tulokset koottiin kuitenkin tähän samaan raporttiin.

Itse fyysinen mittaustyö suoritettiin Satakunnan ammattikorkeakoulun LVI-laboratoriossa, jonne kanavat rakennettiin. Kanavien rakentamiseen tarvittavia jatkoliittimiä ja nittejä ei ole erikseen huomioitu painehäviötarkastelussa, vaan ne ovat kiinteästi mukana saaduissa tuloksissa.

Mitattuja kanavakokoja oli yhteensä kahdeksan, joista viisi oli profiloimattomia eli ns. sileitä kanavia, koot 100–250 mm ja loput kolme profiloituja, koot 315–500 mm. Jatkoliittimiä kanavissa oli 3 m välein.

Aikaisemminkin vastaavien kanavien kitkapainehäviöitä on mitattu SAMKissa, mutta mittausepävarmuus oli silloin liian suuri. Tästä syystä mittausmenetelmään ja mitaustarkkuuteen kiinnitettiin erityistä huomiota, jotta mahdollisilta häiriötekijöiltä vältyttäisiin.

2 VIRTAUSTEKNISET PERUSTEET

Tässä luvussa tarkastellaan virtausteknisiä perusteita ja siihen liittyviä kaavoja, joita on tarvittu tämän työn tekemiseen.

Kanaviston kokonaispainehäviö syntyy monen eri tekijän summasta. Kanavan materiaali ja sen pinnankarheus vaikuttavat ilmavirran ja kanavaseinän väliseen kitkaan. Kanavaosista syntyy kertavastuksia ja ilma pyörteilee muoto-osissa aiheuttaen täten painehäviöitä. Ilmavirtauksen tyyppi vaikuttaa myös osaltaan syntyvään painehäviöön.

2.1 Virtaustyyppit, Reynoldsin luku

Putkivirtauksissa esiintyy kahta eri virtaustyyppiä, jotka ovat laminaarinen ja turbulenta virtaus. Reynoldsin lukua käytetään määrittämään mihin kategoriaan virtaus kuuluu. Reynoldsin luku saadaan kertomalla nopeus ja karakteristinen pituus ja jakamalla tämä kinemaattisella viskositeetilla, joka on esitetty kaavassa 1.

(Bohl 1988,87)

$$Re = \frac{vD_h}{\nu} \quad (1)$$

Re on Reynoldsin luku

v	Virtaavan aineen virtausnopeus, m/s
D_h	Virtausputken hydraulinen halkaisija, m
ν	Kinemaattinen viskositeetti, m^2/s

Laminaarisessa eli pyörteettömässä virtauksessa ainesosat kulkevat pitkin virtaviivoja, jotka ovat putken pituusakselin suuntaisia. Osat eivät sekoitu keskenään. Kanavien pinnan karheus ei vaikuta tässä virtausmuodossa kitkapainehäviöön.

Pyöreissä kanavissa ja putkissa virtaus on laminaarista aina, jos Reynoldsin luku on alle sen kriittisen rajan eli $Re_{krit} = 2320$.

Turbulenttisessa eli pyörteellisessä virtauksessa ainesosat liikkuvat myös poikittain virtaussuuntaan nähden, jolloin se johtaa virtausosasten jatkuvaan sekoittumiseen. Näin ollen kerrostunutta virtausta ei pääse syntymään. Tässä virtaustyyppissä kanavan seinämän karheudella on jo merkitystä kitkapainehäviössä. Turbulenttista virtausmuotoa esiintyy Reynoldsin luvun ylittäessä kriittisen arvon joka on 2320.

Täytyy kuitenkin muistaa, että virtauksen muuttuminen laminaarisesta turbulentiksi ei tapahdu heti Reynoldsin luvun kriittisen arvon ylittyessä, vaan välillä 2320–4000 löytyy siirtymisvyöhyke. Tässä siirtymisvyöhykkeessä oleva virtaus on epämääräistä. (Seppänen 1996, 95)

2.2 Kitkavastukset

Kitkahäviöt syntyvät kanavistossa ilman sisäisestä kitkasta eli viskositeetista sekä kanavan sisäpuolisen seinämän ja virtaavan aineen välisestä kitkasta. Kitkapainehäviö liittyy suoriin putkijohtoihin. Kitkavastukset ovat suoraan verrannollisia putken pituuteen, turbulenttisessa virtauksessa dynaamiseen paineeseen ja laminaarisessa virtauksessa virtausnopeuteen, sekä sisähalkaisijaan. Yleisin tapa laskea suoran kanavan kitkavastusten aiheuttama painehäviö löytyy kaavasta 2. (Seppänen 1996, 95)

$$\Delta p_{\lambda} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \quad (2)$$

Δp_{λ} on suoran putkijohdon kitkavastusten aiheuttama painehäviö, Pa

λ	Kanavan kitkavastuskerroin
l	Kanavan pituus, m
d	Kanavan sisähalkaisija, m
ρ	Virtaavan aineen tiheys, kg/m ³
v	Virtausnopeus, m/s

Kitkavastuskerroin on riippuvainen kanavan sisäpinnan karheudesta tai epätasaisuudesta, virtaavasta aineesta sekä virtauksen luonteesta.

Laminaarisessa virtauksessa kitkavastuskerroin on ainoastaan riippuvainen virtauksen Reynoldsin luvusta, koska kanavan sisäpinnan rosoisuus ei vaikuta kitkakertoimeen. Tällöin kitkavastuskerroin määritetään kaavalla 3.

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (3)$$

Turbulenttisessa virtauksessa kitkavastuskertoimen määrittäminen ei ole yhtä helppoa kuin laminaarisessa, vaan ne perustuvat teoreettisiin tarkasteluihin ja kokeellisiin tutkimuksiin. Ne pätevätkin useimmiten vain tietyllä Reynoldsin luvun alueella ja vain tietyillä suhteellisilla karheuksilla k/d . Ilmanvaihtokanavissa virtaus on tavanomaisilla virtausnopeuksilla lähes aina turbulენტtista.

Pyöreitä ilmanvaihtokanavia on rakenteeltaan

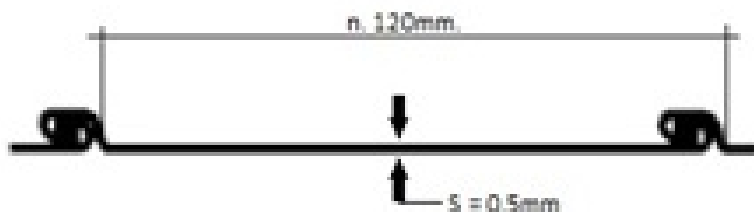
- sileitä (esim. muovikanavat ja hitsatut teräskanavat)
- pellistä valmistettuja sileitä ja profiloituja, joissa on kumitiivisteliitokset, kuten tässätyössä. Tämä on yleisin käytössä oleva kanavatyyppi.
- pellistä valmistettuja sileitä ja profiloituja ilman kumitiivisteitä nk. ”naku-kanavia”
- sileitä ja profiloituja kanavia, joissa on laippaliitokset (harvinaisia).

Tässä työssä mitattujen sileiden ja profiloitujen kanavien mitat ja valmistustoleranssit on esitetty kuvassa 1.1. Pienemmissä kanavissa, koot 100–250 mm, sisäliittimen sisähalkaisija noin 5 mm pienempi kuin kanavan sisähalkaisija ja isommissa noin 7 mm. Liittimien pituudet vaihtelevat kanavakoon mukaan välillä 75–115mm.

Työn aikana tutkittiin Fläkt Woodsin Suomessa sekä Ruotsissa valmistamia kanavia ja perehdyttiin niiden teknisten mittojen eroavaisuuksiin. Tarkastelussa huomattiin niissä olevan pieniä eroavaisuuksia. Kanavien malli sekä valmistusperiaate ovat kuitenkin identtisiä.

Kanavien profiilit

Koot 006 - 025



Koot 031 - 125



Kuva 1.1 Havainnekuva ilmanvaihtokanavien saumoista sekä profiloinneista (Fläkt Woods www- sivut 2013).

Yleisin LVI-tekniikassa käytetty turbulenttisen virtauksen kitkavastuskertoimen määrittämiseksi johdettu yhtälö on esitetty kaavassa 4.

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg^* \left(\frac{2.51}{Re \sqrt{\lambda}} + \frac{k/d}{3.71} \right) \quad (4)$$

λ	Putkijohdon kitkavastuskerroin
Re	Virtauksen Reynoldsin luku
k/d	Kanavan suhteellinen karheus

Peltikanavien karheudelle k käytetään yleisesti arvoa 0,015 mm ja kitkapainehäviölle on johdettu likikaava 5 (Seppänen 1996, 96).

$$\Delta p_{\lambda} = 0,0072 + 0,61/Re^{0,35} \quad (5)$$

2.3 Kertavastukset

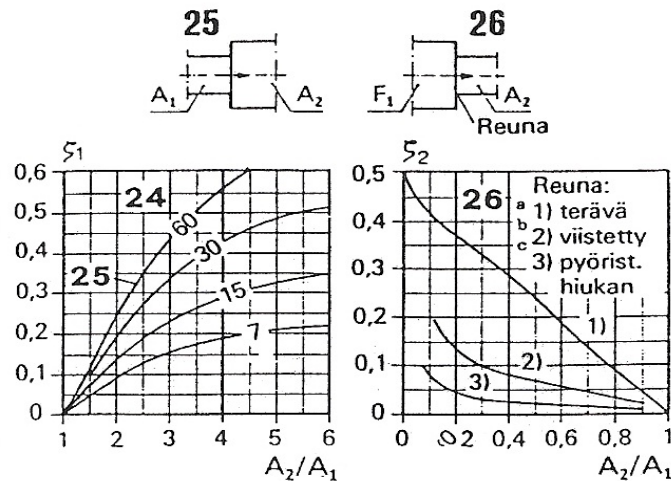
Erilaisista kanavaosista syntyy pyörteilyä virtaukseen, mikä taas aiheuttaa energiahäviöitä. Näitä osien aiheuttamia painehäviöitä kutsutaan kertavastuksiksi. Yleisesti voidaan todeta painehäviön olevan sitä suurempi, mitä enemmän osassa pyörteilyä tapahtuu. Painehäviö on suoraan verrannollinen virtauksen dynaamiseen paineeseen turbulentsissa virtauksessa. Kertavastuskerroin määräytyy turbulentsissa virtauksessa lähes kokonaan kanavan geometriasta.

Kertavastuksen aiheuttama painehäviö esitetään yleisimmin kaavalla 6.

$$\Delta p_{\zeta} = \zeta \cdot p_{\text{dyn}} = \zeta \cdot \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (6)$$

Δp_{ζ}	Kertavastuksen aiheuttama painehäviö, Pa
ζ	Kyseisen osan kertavastuskerroin
p_{dyn}	Dynaaminen paine kanavassa, Pa
ρ	Virtaavan aineen tiheys, kg/m ³
v	Virtausnopeus kanavassa, m/s

Teoreettinen kumiliitoksella varustetun liittimen kertavastus voidaan arvioida käyttämällä kertavastuskäyrästä, kuva 1.2 (Sandberg 2008). Liittimen kohdalla on virtaussuunnassa ensin supistus ja sitten laajennus.



Kuva 1.2 Liittimien kertavastukset

Kuvan käyrästä perusteella molemmat kertavastukset yhteen laskemalla saadaan jatkoliittimille kertavastusluvut arvioitua taulukon 1.1 mukaisesti. Kanavan ja liittimen halkaisijoiden ero on 5-7 mm.

Taulukko 1.1 Kanaviston painehäviölaskenta

Kanava mm	Liitin mm	A kanava / A liitin	A liitin / A kanava	ζ supistus	ζ laajennus	ζ yhteensä
100	95	1,11	0,90	0,03	0,03	0,056
125	120	1,09	0,92	0,02	0,02	0,045
160	155	1,07	0,94	0,02	0,02	0,035
200	195	1,05	0,95	0,01	0,01	0,028
250	245	1,04	0,96	0,01	0,01	0,022
315	309	1,04	0,96	0,01	0,01	0,021
400	394	1,03	0,97	0,01	0,01	0,017
500	494	1,02	0,98	0,01	0,01	0,013

2.4 Tiheyden vaikutus vastuksiin

Ilman tiheys vaikuttaa osaltaan myös kanavistossa syntyviin painehäviöihin. Tämä selviää tarkastelemalla kaavaa 2, josta huomataan, että painehäviö on suoraan verrannollinen virtaavan aineen tiheyteen.

2.4.1 Tiheyden laskeminen

Ilman tiheys lasketaan kaavalla 7. (Valvira 2009)

$$\rho = \frac{1+x}{0,622+x} * \frac{p_{kok}}{R_h * T_{abs}} \quad (7)$$

ρ	Virtaavan aineen tiheys, kg/m ³
x	Ilman absoluuttinen kosteus, kg/m ³ (vesi)/kg/m ³ (ilma)
p_{kok}	Ilman kokonaispaine, ilmanpaine, Pa
R_h	vesihöyryn kaasuvakio (vakio), 461,5 J/kg K
T_{abs}	Absoluuttinen lämpötila (273,15 + t), K

Absoluuttisen kosteuden määrittämiseen käytetään kaavaa 8.(Valvira 2009)

$$x = 0,622 * \frac{p_h}{p_{kok} - p_h} = \frac{p_h}{p_i} \quad (8)$$

x	Ilman absoluuttinen kosteus, kg/m ³ (vesi)/kg/m ³ (ilma)
p_h	Vesihöyryn osapaine, Pa
p_{kok}	Ilman kokonaispaine, Pa
p_i	Kuivan ilman paine, Pa

Vesihöyryn osapaine p_h (kaava 10) saadaan laskettua kylläisen vesihöyryn osapaineen p_{hs} (kaava 9)avulla.

$$p_{hs} = \frac{e^{77,345 + 0,0057 * T - 7235/T}}{T^{8,2}} \quad (9)$$

$$p_h = \frac{\varphi * p_{hs}}{100} \quad (10)$$

p_{hs}	Kylläisen vesihöyryn osapaine, Pa
----------	-----------------------------------

p_h	Vesihöyryn osapaine, Pa
φ	Suhteellinen kosteus % RH

Tämän työn mittauspöytäkirjoissa tiheyden määrittämiseen käytettiin em. kaavoja ja lyhenteitä. Mittausten aikainen ilman tiheys määritettiin mittaamalla laboratoriotilan suhteellinen kosteus, ilman lämpötila sekä vallitseva ilmanpaine, joka saatiin SAM-Kin sääasemalta. Nämä tiedot syötettiin Excel- laskentapohjaan, johon tehtiin tarvittavat kaavat tiheyden määrittämiseksi (Taulukko 1.2). Vihreällä merkityt arvot ovat mitattuja ja muut laskettuja.

Taulukko 1.2 Mittausten aikaisen tiheyden määrittäminen

T ilma	19,1	°C
p ilma	102570	Pa
φ	9,0	%RH
p hs	2204	Pa
p h	198	Pa
x	0,00121	kg/kg
ρ	1,222	kg/m ³
Kanava	100	
	(k=4)	

2.4.2 Tiheyskorjauksen määrittäminen mittauksissa

Mittaustuloksien taulukon vasemmassa yläkulmassa löytyy tiheyden laskemiseen tarvittavat tiedot.

Ilmavirran tiheyden vaikutus mittaustulokseen tarvitaan, koska mittauslaipan k-arvo on määritetty ilman tiheydelle 1,2 kg/m³. Koska painehäviö on suoraan verrannollinen ilman tiheyteen ja ilmavirran neliöön, ilmavirran arvo q_{vkorj} saatiin kaavalla 11, jossa alaindeksi mit tarkoittaa mitattua ilmavirtaa.

$$q_{vkorj} = \sqrt{\frac{\rho_{1,2}}{\rho_{mit}}} * q_{mit} \quad (11)$$

Painehäviön korjaus vastaavasti tarvitaan, jotta mittausolosuhteissa saatu kitka-painehäviö saadaan muutettua vastaamaan ilman tiheyttä $1,2 \text{ kg/m}^3$.

$$\Delta p_{\text{korj}} = \frac{\rho_{1,2}}{\rho_{\text{mit}}} * \Delta p_{\text{mit}} \quad (12)$$

Taulukko 1.3. Painehäviöiden ja tiheyden määrittämiseen käytetty laskentapohja.

Laskentapohjassa tiheys on laskettu kaavalla 7.

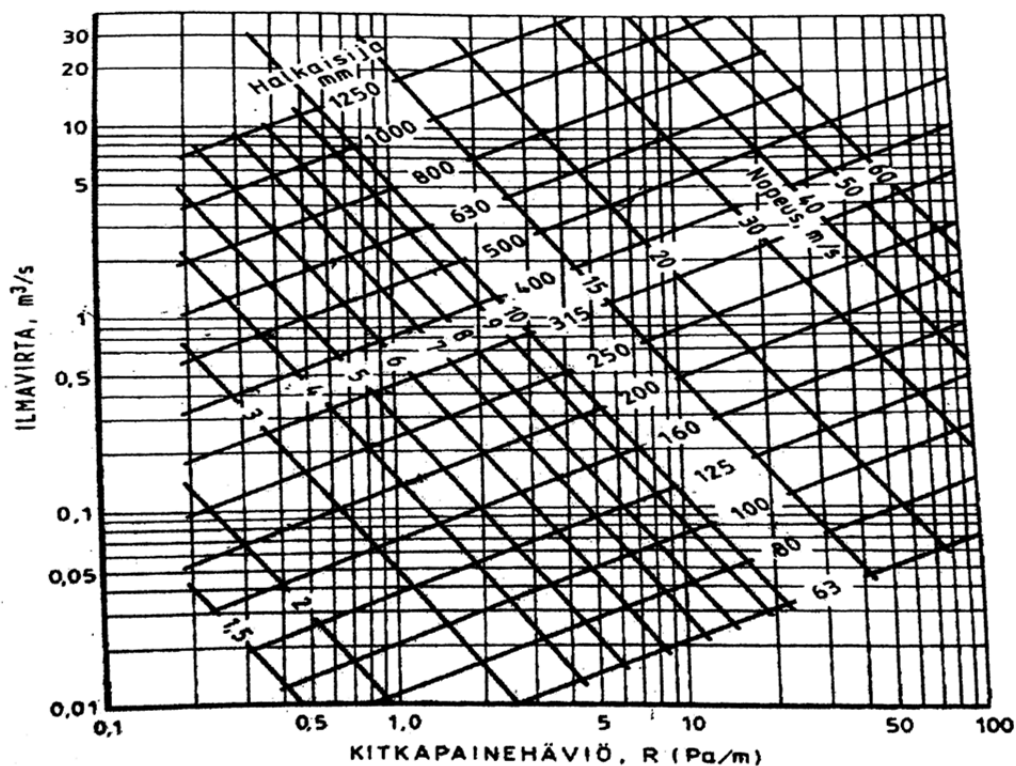
T ilma	19,1	°C	Mitatut arvot vihreällä taustalla																
p ilma	102570	Pa																	
φ	9,0	%RH																	
p hs	2204	Pa																	
p h	198	Pa																	
x	0,0012	kg/kg																	
ρ	1,224	kg/m ³																	
Kanava	100																		
	(k=4)		Kanavaosan pituus [m] ja mitattu painehäviö Δp									Kanavaosan mitattu painehäviö Δp / m						Käytetty	
			2,4	3	6	9	3	6	3		0->1	1->2	1->3	1->4	2->3	2->4	3->4	Δp	Δp korj
Δp mit	qv kal	qv korj	v korj	0->1	1->2	1->3	1->4	2->3	2->4	3->4	0->1	1->2	1->3	1->4	2->3	2->4	3->4	Pa / m	Pa / m
Pa	l/s	l/s	m/s	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa		
7,54	10,2	10,1	1,29		1,28	2,57	3,66		2,40	1,10	0,00	0,43	0,43	0,41	0,00	0,40	0,37	0,37	0,36
20,2	18,5	18,3	2,33		2,98	6,07	8,62		5,73	2,61	0,00	0,99	1,01	0,96	0,00	0,96	0,87	0,87	0,85
72,6	33,2	32,9	4,19		8,96	18,20	26,20		17,40	8,03	0,00	2,99	3,03	2,91	0,00	2,90	2,68	2,68	2,62
99,1	38,8	38,4	4,89		12,10	23,90	34,60		22,80	10,80	0,00	4,03	3,98	3,84	0,00	3,80	3,60	3,60	3,53
201	55,3	54,7	6,97		21,80	44,30	64,50		42,80	20,30	0,00	7,27	7,38	7,17	0,00	7,13	6,77	6,77	6,63
7,62	10,3	10,2	1,29				3,71	1,36	2,45	1,11	0,00	0,00	0,00	0,41	0,45	0,41	0,37	0,37	0,36
10,9	12,6	12,4	1,58				5,07	1,81	3,32	1,53	0,00	0,00	0,00	0,56	0,60	0,55	0,51	0,51	0,50
15,7	15,7	15,5	1,97				6,97	2,46	4,60	2,13	0,00	0,00	0,00	0,77	0,82	0,77	0,71	0,71	0,70
20,2	18,5	18,3	2,33				8,67	3,03	5,64	2,65	0,00	0,00	0,00	0,96	1,01	0,94	0,88	0,88	0,87
25,9	22,0	21,8	2,77				10,60	3,71	6,99	3,31	0,00	0,00	0,00	1,18	1,24	1,17	1,10	1,10	1,08
77	34,2	33,9	4,31				27,60	9,74	18,50	8,61	0,00	0,00	0,00	3,07	3,25	3,08	2,87	2,87	2,81
93,2	37,7	37,3	4,75				32,70	11,50	21,40	10,30	0,00	0,00	0,00	3,63	3,83	3,57	3,43	3,43	3,37
133	45,0	44,5	5,67				44,70	16,00	29,30	13,60	0,00	0,00	0,00	4,97	5,33	4,88	4,53	4,53	4,44
252	61,9	61,3	7,80				78,50	28,60	51,90	24,80	0,00	0,00	0,00	8,72	9,53	8,65	8,27	8,27	8,10

3 JULKAISTUT PAINEHÄVIÖKÄYRÄSTÖT

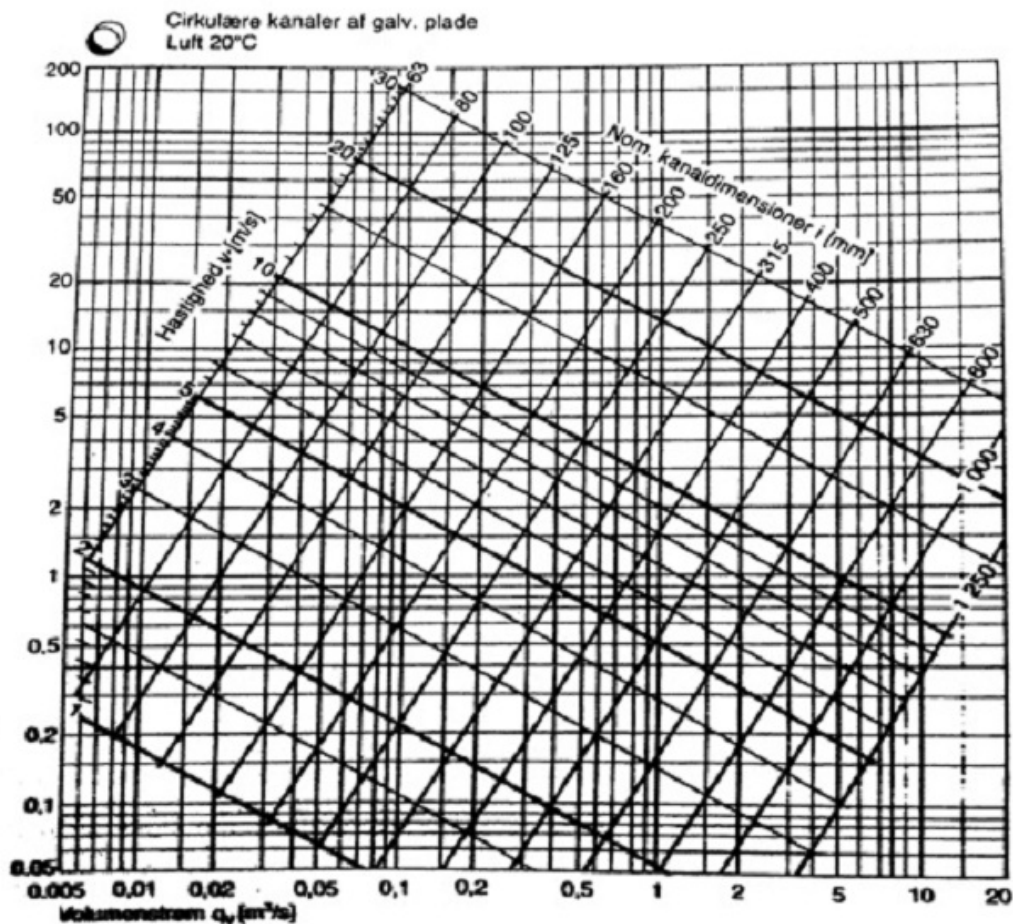
Painehäviökäyrästäjä on saatavilla monenlaisia. Niitä löytyy alan julkaisuista ja kanavien valmistajilta. Suurin osa käyrästäjästä on laadittu samaan muotoon, mutta eroa saattaa olla, ettei suurempien kanavakokojen jäykisteprofilointia ole otettu huomioon painehäviökäyrästäjässä.

3.1 Painehäviökäyrästäjä kirjoista

Painetuista oppikirjoista ja muista teknisistä lähteistä löytyy erilaisia painehäviökäyrästäjäjä. Nämä käyrästäjästä ovat usein varsin yleistävää mallia, joten ne on laadittu pelkästään sileille kanaville. Kuvissa 3.1 ja 3.2 esitetään kahdessa eri teoksessa esitetyt painehäviökäyrästäjästä, joissa ei ole otettu huomioon profiloinnin vaikutusta.



Kuva 3.1. Pyöreiden kanavien painehäviökäyrästäjä. (Seppänen 1996)

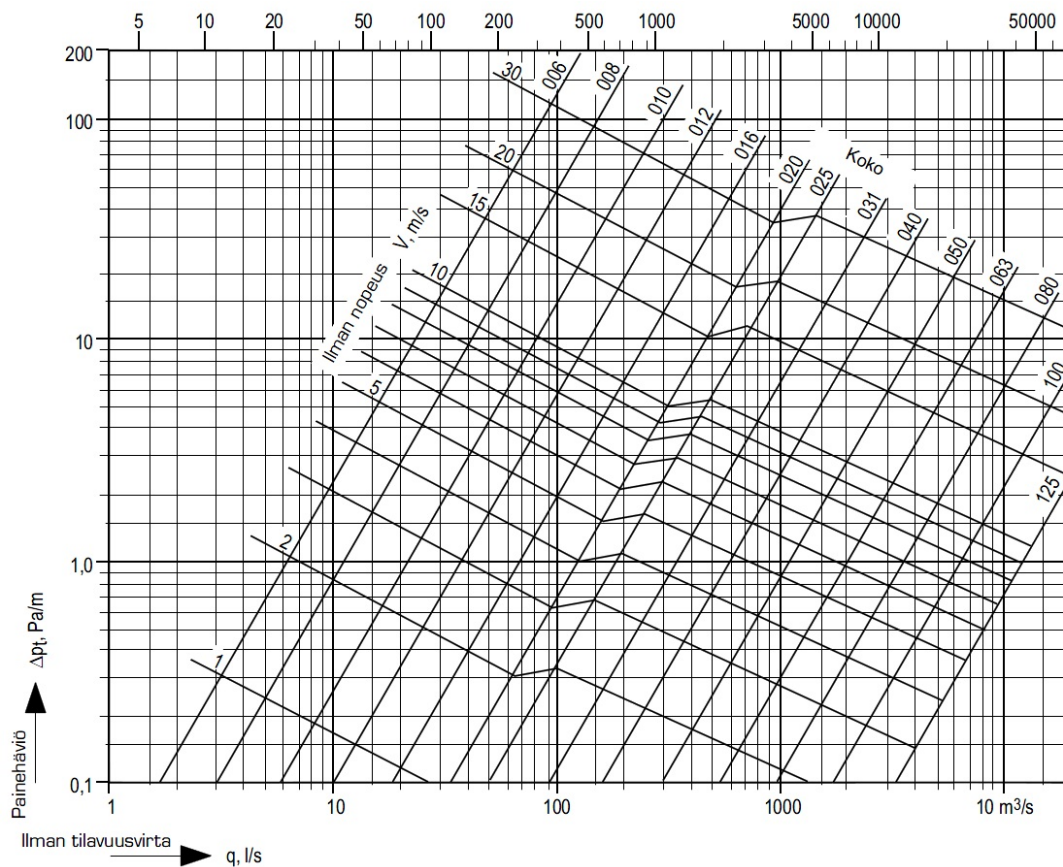


Kuva 3.2. Pyöreiden kanavien painehäviökäyrästä. (Sorensen 2001)

3.2 Kanavavalmistajat

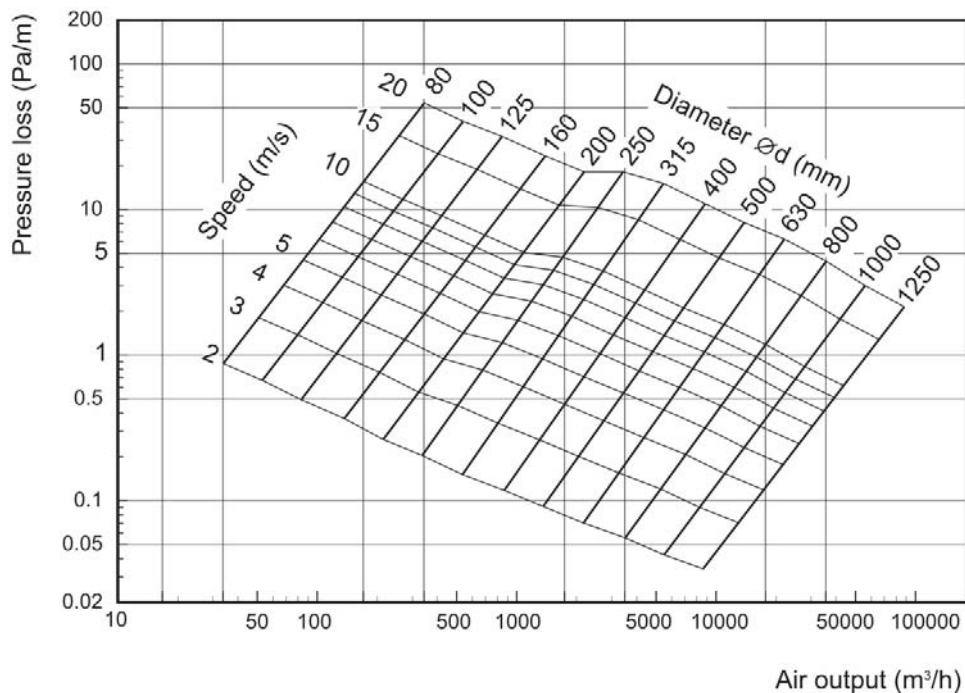
Tässä kappaleessa on esitelty muutaman suuren ilmanvaihtokanavien valmistajan julkaisemia painehäviökäyrästäjä pyöreistä kanavistaan. Käyrästä on laadittu hyvin samankaltaisiksi, joten niitä on helppo lukea ja vertailla keskenään. Valmistajien käyrästäissä on huomioitu profiloinnin vaikutus painehäviöön.

Fläkt Woods Oy:n valmistamissa pyöreissä ilmanvaihtokanavissa jäykisteprofilointia käytetään suuremmissa kanavakoissa. Tämä kyseinen profiloinnin vaikutus on huomioitu painehäviökäyrästäön, kuten voidaan todeta kuvasta 3.3.. Siinä kanavakoosta 250 mm lähtien on jäykisteprofilointi, joka pätee Ruotsissa valmistettuihin kanaviin.



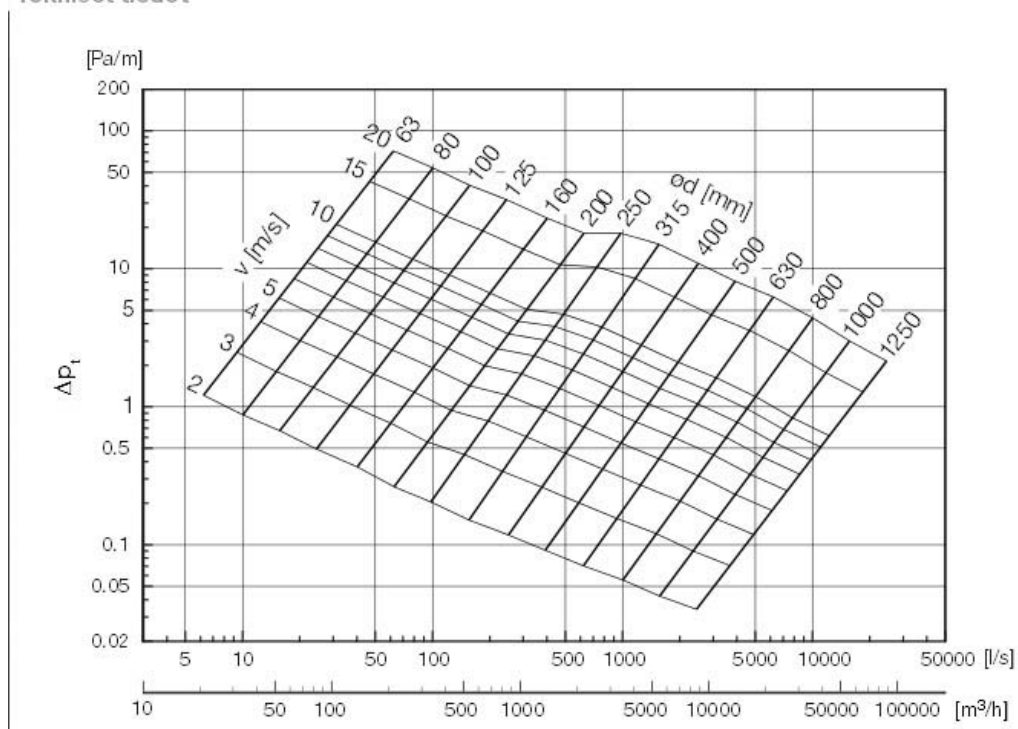
Kuva 3.3. Fläkt Woods Oy:n pyöreiden kanavien painehäviökäyrästä.(Fläkt Woods www- sivut 2013.)

Vertailun vuoksi työhön otettiin kahden kanavavalmistajan painehäviökäyrästä. Molemmissa käyrästäissä on huomioitu profiloinnin vaikutus (kuvat 3.4 ja 3.5.)



Kuva 3.4. Vents Companyn pyöreiden kanavien painehäviökäyrästä.(Vents Companyn www- sivut 2013.)

Tekniset tiedot

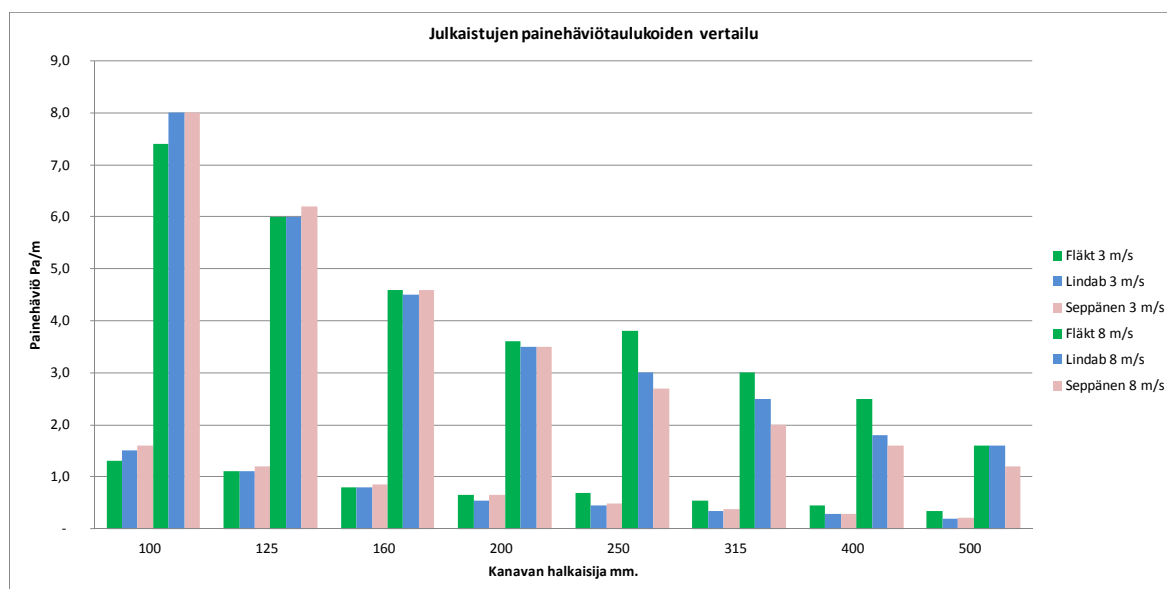


Kuva 3.5. Lindabin pyöreiden kanavien painehäviökäyrästä.(Lindabin www-sivut 2013.)

3.3 Painehäviökäyrästöjen tarkastelu

Kuten käyrästöjä silmäilemällä voi todeta, on niiden ulkomuoto ja esitystapa hyvinkin samanlainen pääperiaatteeltaan. Toisissa käyrästöissä voi huomata, ettei profiilointia ole otettu huomioon määritettäessä käyrästöä. Tällöin viivat kulkevat lineaarisesti tekemättä minkäänlaisia ”hyppyjä” käyrästöllä. Kuvista 3.3, 3.4 ja 3.5 voidaan huomata, kuinka profiilointi vaikuttaa painehäviökäyrästöön. Kanavakoosta 200mm siirryttäessä 250mm kanavaan käyrästöissä näkyy selvä poikkeama viivastossa.

Kuvassa 3.6. on poimittu kolmen valmistajan käyrästöistä nopeuksia 3 m/s ja 8 m/s vastaavat painehäviöt. Taulukossa esiintyvät Seppäsen ”pylväät” edustavat kanavassa teoreettisesti laskettua painehäviötä metriä kohden (Seppänen 1996). Nopeudella 3 m/s voidaan huomata pienemmissä kanavakoissa 200mm saakka painehäviöiden olevan pienempiä, kuin mitä teoreettinen painehäviö näyttäisi olevan. Lindabin osalta kyseisellä nopeudella painehäviöt pysyvät pienempinä, kuin teoreettinen painehäviö aina 500mm kanavakokoon saakka. Poikkeuksena on 400mm kanavakoko, jossa painehäviöt ovat samanarvoiset. Fläkt Woodsin kanavissa pienemmällä nopeudella ero teoreettisen painehäviön kanssa tasoittuu jo 200mm kanavan kohdalla ja on tätä suurempi aina 500mm:n kanavakokoon saakka. Nopeudella 8 m/s molemmilla kanava-valmistajilla on teoreettista suuremmat painehäviöt koosta 250mm lähtien. Fläkt Woodsin painehäviöt ovat keskimääräisesti suurempia, kuin Lindabin ja Seppäsen arvot.



Kuva 3.6. Julkaistujen painehäviökäyrästöjen vertailu.

4 MITTAUSJÄRJESTELY

Tämän työn mittaukset suoritettiin Satakunnan Ammattikorkeakoulun LVI- laboratoriossa talvella 2012 ja keväällä 2013. Kanavistot rakennettiin valmistajan ohjeiden mukaan hyvää asennustapaa noudattaen mahdollisimman huolellisesti. Laboratorion rakenteelliset mitat olivat 15x11 metriä. Kulku laboratorioon ulkokautta oli estetty, jottei mittausvirheitä syntyisi laboratorion lämpötilan muuttuessa.

Fyysinen mittaus tapahtui ottamalla tietyllä puhallinnopeudella ilmavirran mittauslaitteen mittausnipoista paine-ero, josta saatiin laskettua ilman nopeus kanavassa. Mahdollista taajuusmuuttajan huojuntaa varten, ilman nopeutta selvitetäessä, mitattiin viiden minuutin mittaisena jaksona 10 sekunnin pituisten jaksojen keskiarvo. Tällä tavoin toimittaessa pystyttiin vähentämään mahdollisia mittausvirheitä. Paineerot kanaviston eri mittauspisteiltä mitattiin minuutin mittaisena jaksona 10 sekunnin pituisten jaksojen keskiarvona. Työn alussa oikeaa mittaustapaa määritettäessä koitettiin myös pidempiä mittaussarjoja, mutta niillä ei ollut vaikutusta mittaustuloksiin.

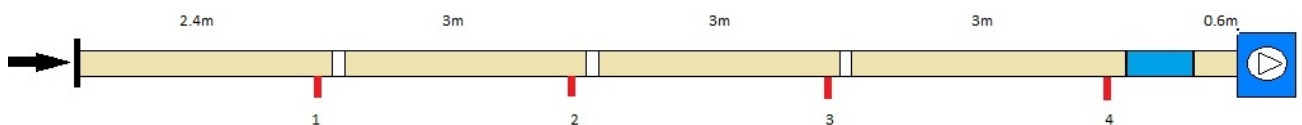
4.1 Mitatut kanavakoot

Mitattuja kanavakokoja oli yhteensä kahdeksan kappaletta. Kanavat olivat tyypiltään Fläkt Woods Oy:n Suomessa valmistamia Veloduct- kierresaumakanavia. Koot olivat 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400 ja 500mm. Näistä 315- 500mm kanavat olivat profiloituja ja muut sileitä kanavia. Kanavat tulivat laboratorioon marraskuun lopulla ja ensimmäinen mittaus päästiin suorittamaan joulukuun alussa. Kanavat olivat kolmen metrin pätkissä ja kasattavan koko kanaviston pituus oli suunniteltu 12 metriin, jotta suurimmilta virtaushäiriöiltä ja liiallisilta ilman pyörteilyltä kanavassa vältyttäisiin. Kanavahalkaisijoiden mittoja ei erikseen tarkistettu.

4.2 Kanavien ja oheislaitteiden asennustapa

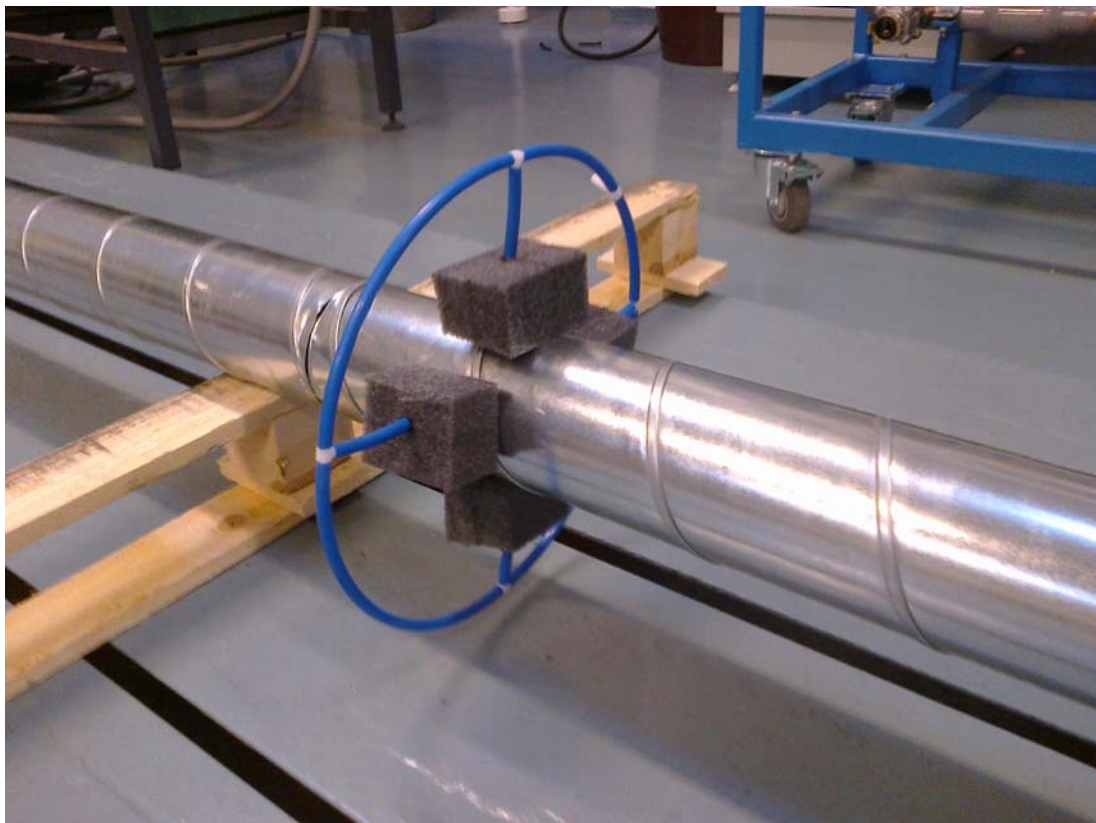
Kanavat asennettiin toisiinsa valmistajan ohjeiden mukaisesti. Kanavat koostuivat neljästä kolmen metrin pätkästä ja ne liitettiin toisiinsa Fläkt Woodsin kumitiivisteellisillä BDEN- sisäliittimiä. Kanavien toisiinsa kiinnittämiseen käytettiin paineen kestäviä vetoniittejä.

Mittauspisteitä 12 metrin kanavissa oli neljä kappaletta. Kuvassa 4.1 näkyy kanavien pääperiaate. Kanavan imuaukkoon asennettiin Fläkt Woodsin suoran pinnan sivuliitin BDEA, joka toimi eräänlaisena imukartiona tasoittaen pyörteilyä imuaukon tuntu-
massa. Ensimmäinen kanavaosuus oli 2,4 m pitkä, seuraavat 3 m ja ilmavirran mittauslaite ML oli asennettu 0,6 m ennen puhallinta. Mittauspisteet on merkitty kuvaan punaisella ja numeroitu siinä järjestyksessä, kuin niitä on käytetty mittauksissa.



Kuva 4.1. Kanavien asennuseriaate.

Kussakin mittauspisteessä oli neljä mittausnippaa. Mittausnipvoja varten porattiin 8mm metalliterällä reikä neljään vastakkaiseen kohtaan kanavan kehällä, johon mittausnipat asennettiin. Mittausnipat yhdistettiin toisiinsa nylon pneumaattikaputkella, jolloin saatiin yksi mittauspiste, joka näyttää keskiarvoisen painehäviön kyseisessä kohtaa kanavaa. Mittausnipat tuettiin solukumilevystä leikatuilla paloilla, jotka estivät nippojen taittumisen mittausten aikana. Kuva 4.2. havainnollistaa kyseisen asennuksen.



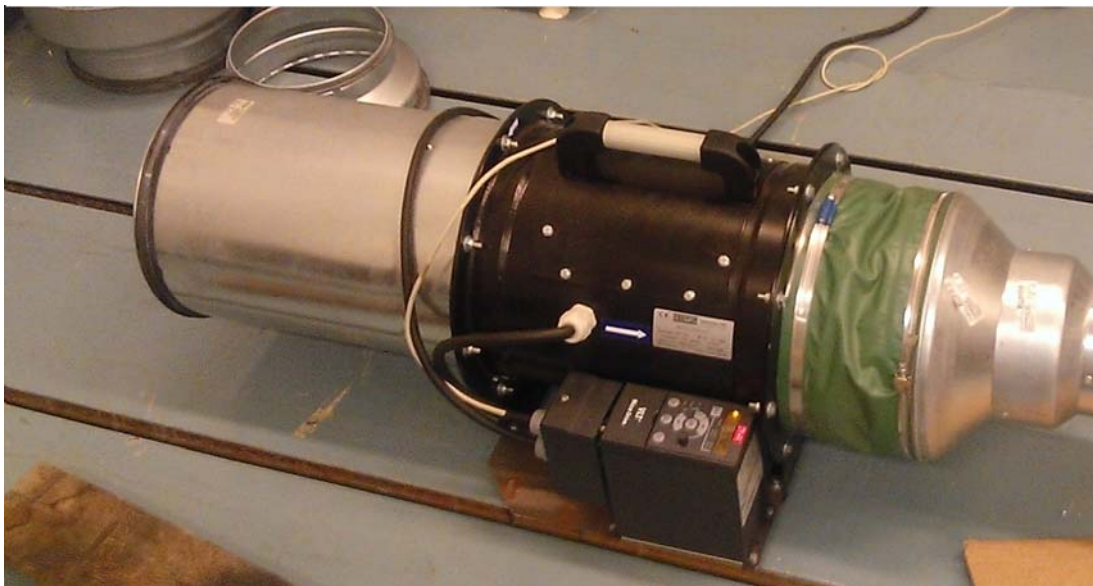
Kuva 4.2. Mittauspisteen asennusperiaate

Taulukossa 4.1. on laskettu mittauspisteiden etäisyys imuaukosta halkaisijan kertalukuina. Mittauspisteiden etäisyys häiriölähteestä on siis erittäin pitkä etenkin viimeisten pisteiden osalta. Välin 3–4 mittaustulosta käytettiin painehäviön määrittämiseen.

Taulukko 4.1. Etäisyys imuaukosta halkaisijan kertalukuina, esim. kanavakoko 125 mm, etäisyys 43 x D.

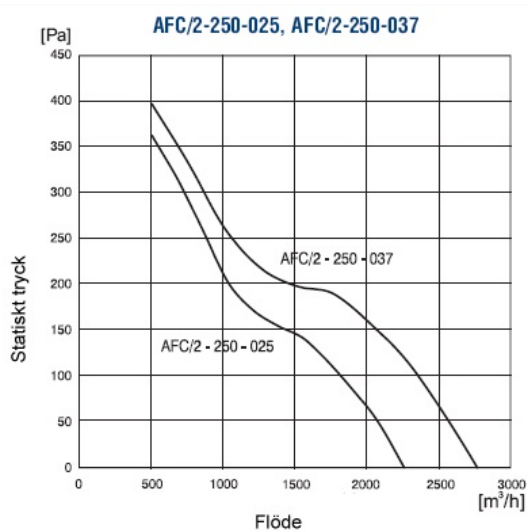
	Piste 0	Piste 1	Piste 2	Piste 3	Piste 4	
D	0	2,4	5,4	8,4	11,4	m
100	0	24	54	84	114	x D
125	0	19	43	67	91	x D
160	0	15	34	53	71	x D
200	0	12	27	42	57	x D
250	0	10	22	34	46	x D
315	0	8	17	27	36	x D
400	0	6	14	21	29	x D
500	0	5	11	17	23	x D

Paineentuottoon käytettiin kahta eri puhallinta, jotka löytyivät koulun varastosta. Pienemmissä kanavakoissa 100mm – 160mm käytettiin Ventur tekniska AB:n AFC/2-250-037T kanavapuhallinta, jossa oli integroitu taajuusmuunnin. Kuva 4.3.



Kuva 4.3. Ventur tekniska AB:n AFC/2-250-037T kanavapuhallin.

Puhaltimen moottorin teho oli 0.37 kW ja maksimi ilmavirran tuotto 720 l/s eli noin 2600 m³/h. Puhaltimen tuottokäyrä on esitelty kuvassa 4.4.

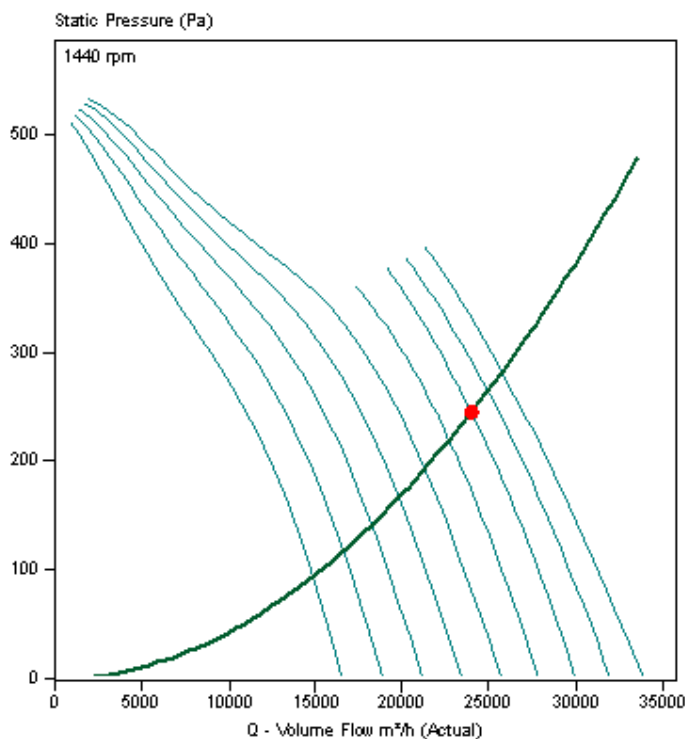


Kuva 4.4. Ventur AFC- kanavapuhaltimen paineentuottokäyrästä. (Ventur Finland Oy Ab:n www-sivut 2013.)

Suuremmissa kanavissa paineentuottajana käytettiin 800mm 80JM/20/4/6 aksiaalipuhallinta, jonka valmistaja oli Woods Air Movement Ltd. Puhaltimen teho oli 4.4 kW ja suurin pyörimisnopeus 1440 rpm. Kuvassa 4.5. on kyseinen puhallin esiteltyinä ja kuvassa 4.6. puhaltimen tuottokäyrä.



Kuva 4.5. Woods 80JM/20/4/6 Aksiaalipuhallin.(Fläkt Woods www- sivut. 2013.)



Kuva 4.6. Woods 80JM/20/4/6 Aksiaalipuhaltimen tuottokäyrä.(Fläkt Woods www- sivut 2013.)

Molempien puhaltimien kanavistoon kiinnittämiseen käytettiin Fläkt Woodsin BDED – muuntoliittimiä. Aksiaalipuhaltimen kierrosluvun säätöön valittiin ABB:n valmistama ACS 600 – kolmivaihemootorin taajuusmuunnin. Kuva 4.7.



Kuva 4.7. ABB:n ACS 600 – kolmivaihetajuusmuunnin

4.3 Mittauslaitteet

Tässä työssä käytettiin kolmea erilaista mittaria paine-erojen mittaamiseen. Paine-eroa kanavistossa mitattiin Teknocalor Oy:n TSI DP- CALC 8710 – paine-ero mittareilla. Toista näistä mittareista käytettiin mittaamaan paine-eroa mittalaitteelta, jolla selvitettiin kanavassa virtaavan ilman nopeus. Toisella mittarilla mitattiin eri mittapisteiden välistä painehäviötä.

Mittarit oli kalibroitu juuri ennen mittausten aloittamista maahantuojan toimesta, joten niiden näyttämät tulokset olivat yhtenevät. Kalibroitipöytäkirjat ovat liitteinä 1

ja 2. Mittarien lukemat tarkastettiin keskenään vielä koulun laboratoriossa ennen ensimmäistä mittausta.

Molemmilla mittareilla otettiin 30 minuutin keskiarvoinen painehäviö samasta mittauspisteestä ja samalla virtaamalla. Saatujen tulosten perusteella voitiin todeta mittareiden olevan yhtenevät. Valmistajan mukaan mittareiden mittaustarkkuus on luokkaa $\pm 0,25$ Pa tai ± 2 % lukemasta, resoluutio $0,001$ Pa ± 3 % lukemasta ($0,04$ m/s). Mittarilla on jatkuva nollakohdan automaattinen tarkistus. Kuva 4.8.



Kuva 4.8. TSI- DP- CALC 8710 – paine-eromittari (Teknocalor www-sivut 2013).

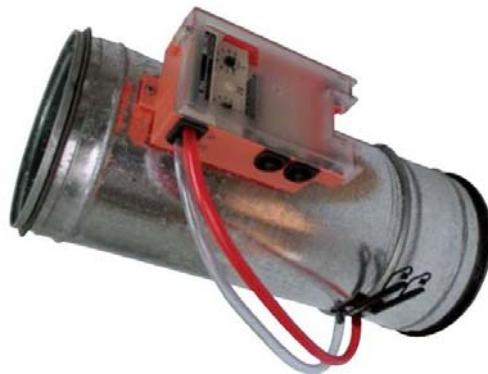
Toinen mittarityyppi, jota käytettiin tässä työssä, oli Teknocalor Oy:n VelociCalc Plus 8386 – monitoimimittari. Mittaria käytettiin selvittämään laboratoriotilan lämpötila sekä suhteellinen kosteus. Tulokset otettiin kanaviston imuaukon lähetyviltä, jotta saatiin selvitettyä kanavistoon menevän ilman tiheys. Tiheyden laskemiseen tarvittiin seuraavia tietoja: suhteellinen kosteus, ilman lämpötila sekä koulun fysiikan laboratorion sääasemalta selvitetty mittausten aikainen ilmanpaine. Mittaukset suoritettiin sekä ennen että jälkeen paine-eromittauksia, jotta voitiin olla varmoja siitä, ettei ilman tiheys ole muuttunut ratkaisevasti mittausten aikana.

Valmistajan ilmoittama mittaustarkkuus mittarille on $\pm 0,25$ Pa tai ± 2 % lukemasta. Resoluutio on $0,001$ Pa ± 3 % lukemasta ($0,004$ m/s). Kuva 4.9.



Kuva 4.9. TSI- VelociCalc Plus 8386 – monitoimimittari (TSI www-sivut 2013).

Mittauksissa käytettiin Fläkt Woodsin EMSF – mittalaitteita, joita käytettiin määrittämään kanavassa kulkevan ilman tilavuusvirta sekä nopeus. Mittausosana laitteessa on mittalaippa. Kyseinen mittalaite kuvassa 4.10



Kuva 4.10 Fläkt Woodsin EMSF – mittalaite

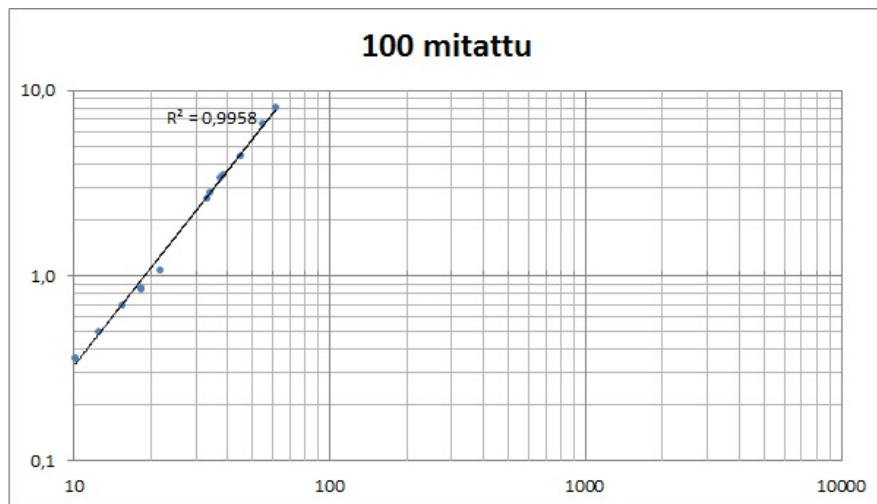
Fläkt Woodsin EMSF – mittalaitteet lähetettiin valmistajalle kalibroitavaksi mittaus-ten jälkeen, jotta voitiin olla varmoja k-arvon paikkansa pitävyydestä. K- arvolle määritettiin korjauskerroin, jolla saatiin laskettua kalibroitu tilavuusvirta.

5 MITTAUSTULOKSET

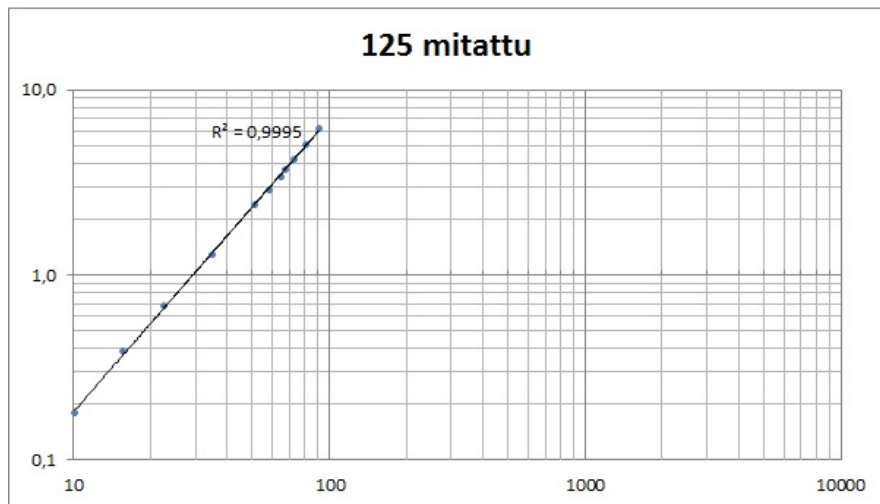
Kaikki mittauspöytäkirjat ja -tulokset Excel-taulukkomuodossa on esitetty liitteissä 3-11. Tässä osiossa on esitetty mittauksista laaditut painehäviökäyrät. Käyrästä x- akselilla on tilavuusvirta (l/s) ja y- akselilla puolestaan painehäviö metriä kohden (Pa/m). Käyrästä on määritetty R- korrelaatiokerroin, joka kertoo mittaustulosten hajonnan. Tarkasteltaessa korrelaatiokerrointa huomataan mittaustulosten hajonnan olevan hyvin vähäistä. Häiriöetäisyyksiä tarkasteltiin luvussa 4 ja huomattiin, että ne ovat olleet riittäviä.

5.1 Mitatut painehäviöt

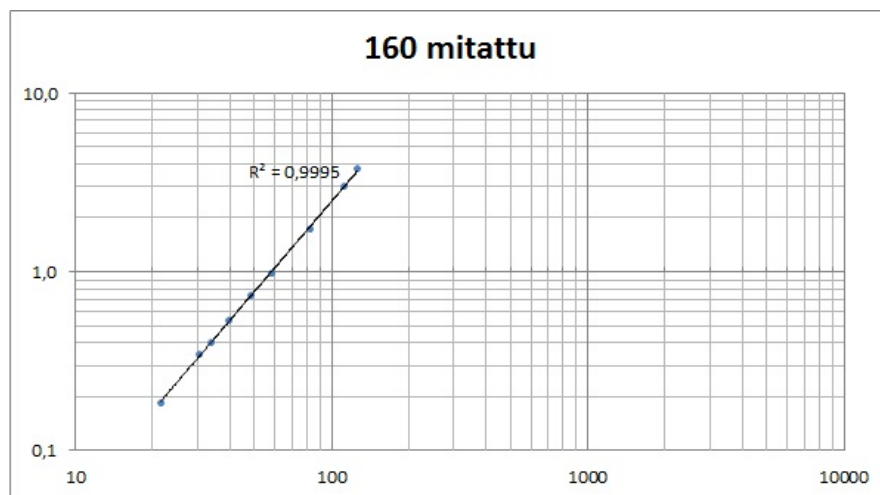
Kuvissa 5.1.–5.8 on esitetty mittaustulokset mittauspisteineen ja niiden perusteella piirretyt trendikäyrät.



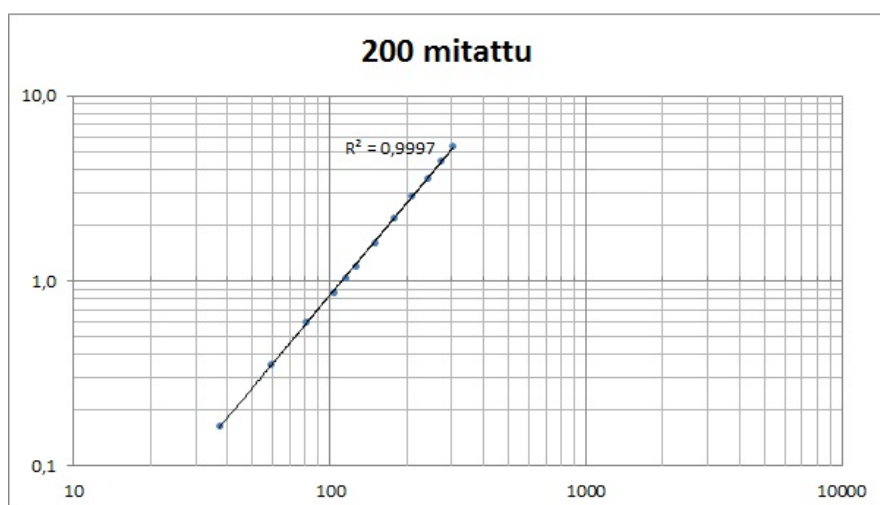
Kuva 5.1. Mittaustulokset, koko 100 mm



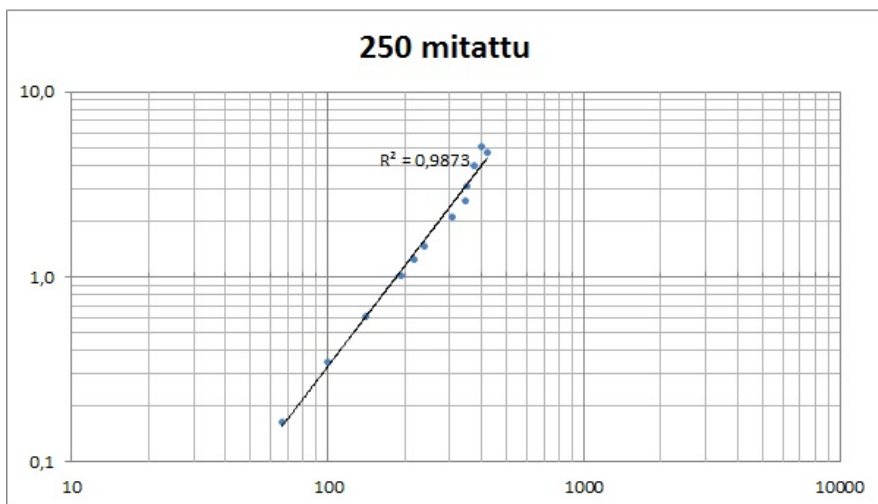
Kuva 5.2. Mittaustulokset, koko 125 mm



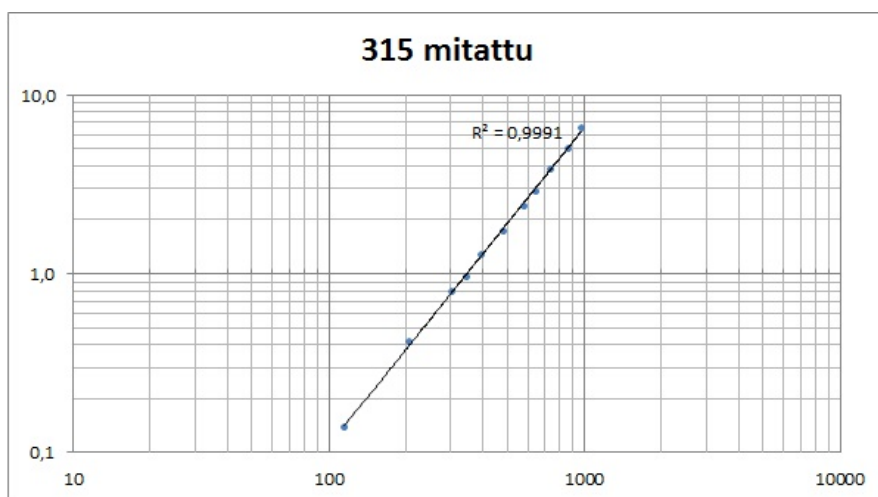
Kuva 5.3. Mittaustulokset, koko 160 mm



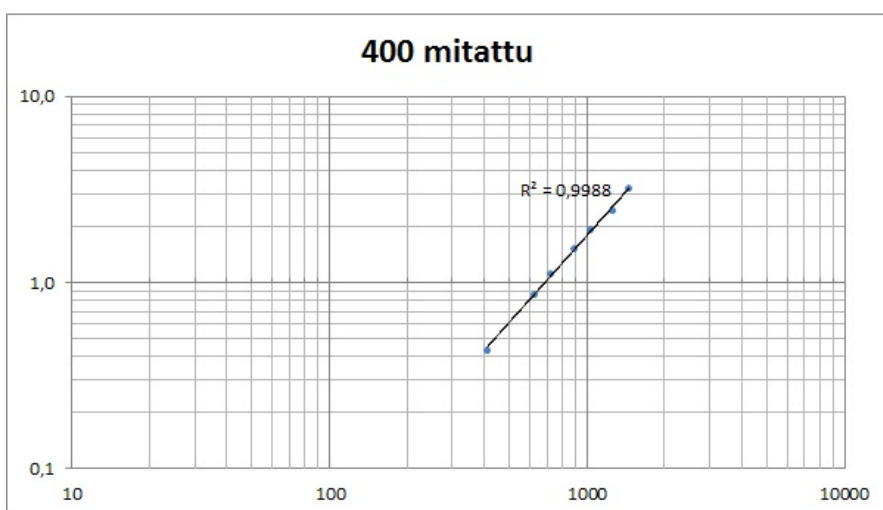
Kuva 5.4. Mittaustulokset, koko 200 mm



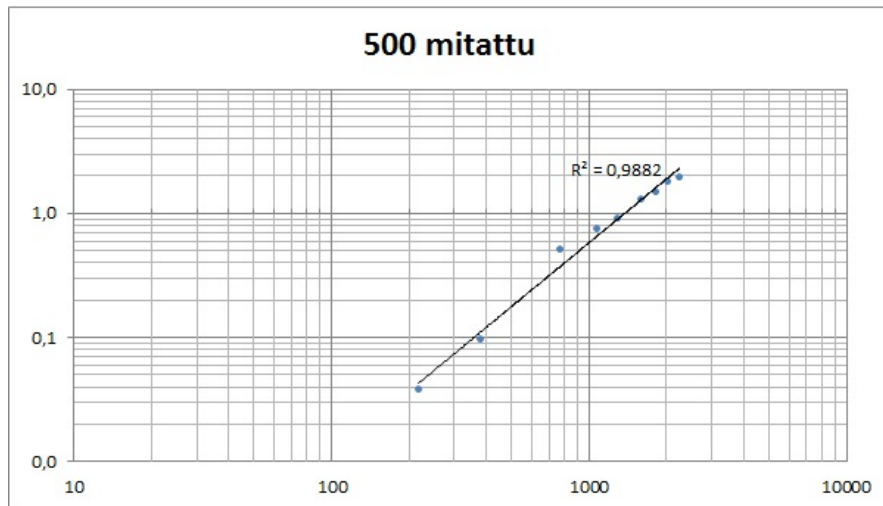
Kuva 5.5. Mittaustulokset, koko 250 mm



Kuva 5.6. Mittaustulokset, koko 315 mm



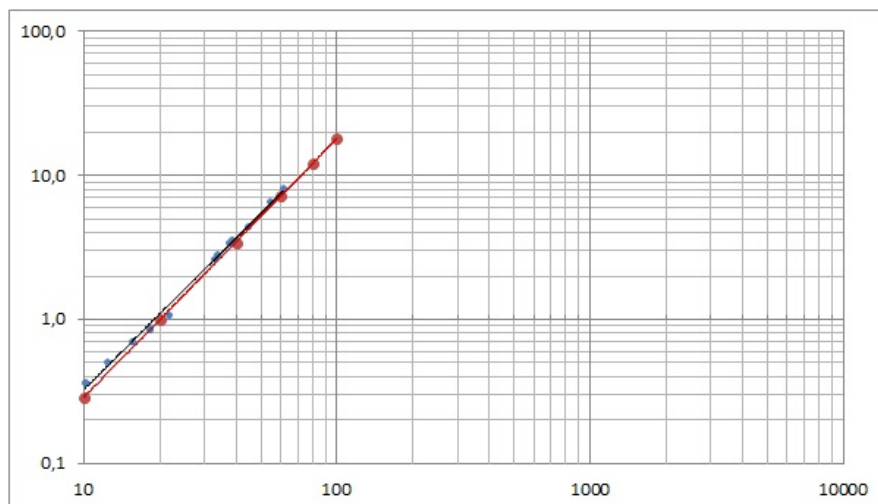
Kuva 5.7. Mittaustulokset, koko 400 mm



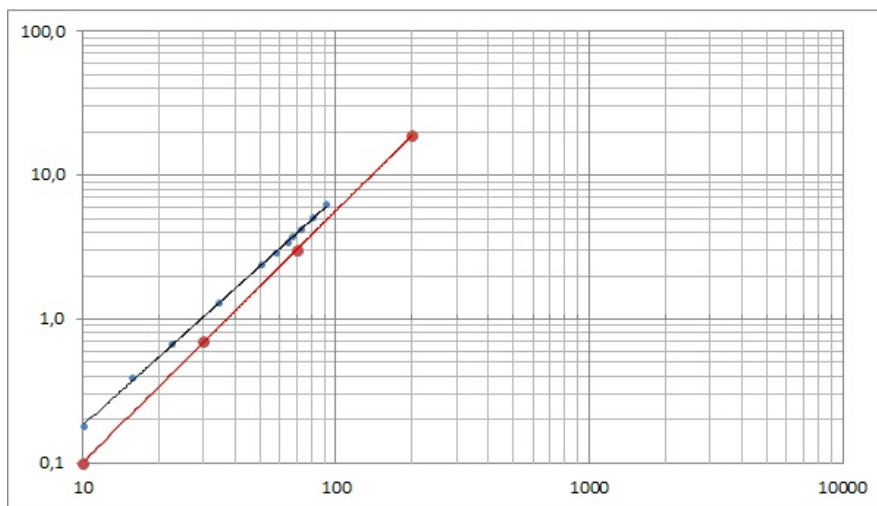
Kuva 5.1. Mittaustulokset, koko 500 mm

5.2 Yhdistetyt mittaustulokset ja nykyiset käyrästöt

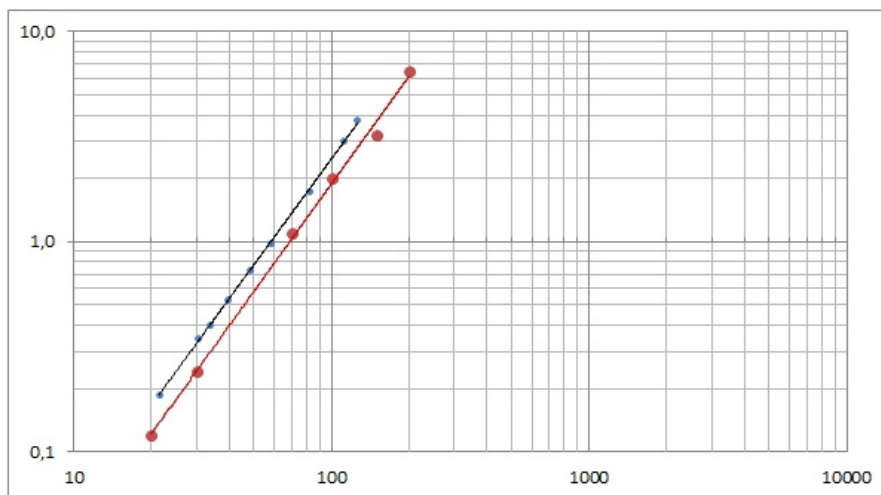
Kuvissa 5.9.–5.16 on esitetty mittaustulokset mittauspisteineen ja niiden perusteella piirretyt trendikäyrät (sininen merkintä) sekä nykyisten käyrästöjen painehäviökäyrät (punainen merkintä).



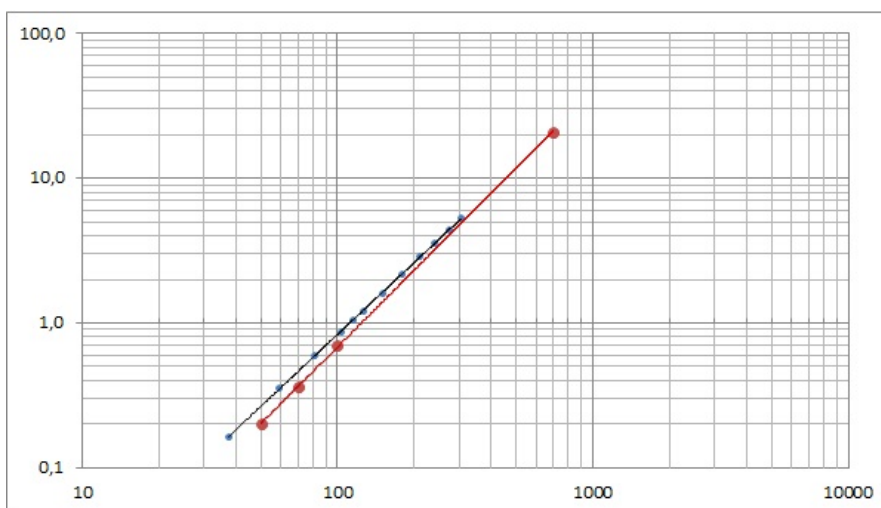
Kuva 5.9. Mittaustulokset ja nykyinen julkaistu käyrä, koko 100 mm



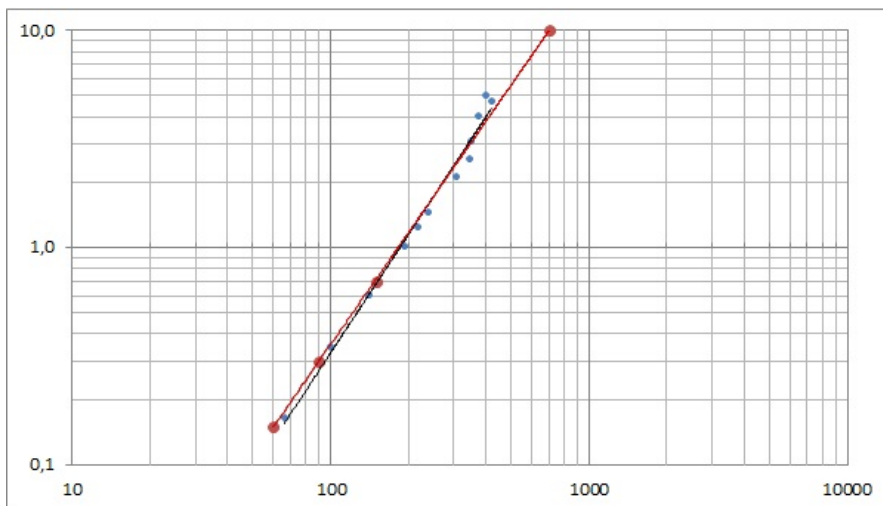
Kuva 5.10. Mittaustulokset ja nykyinen julkaistu käyrä, koko 125 mm



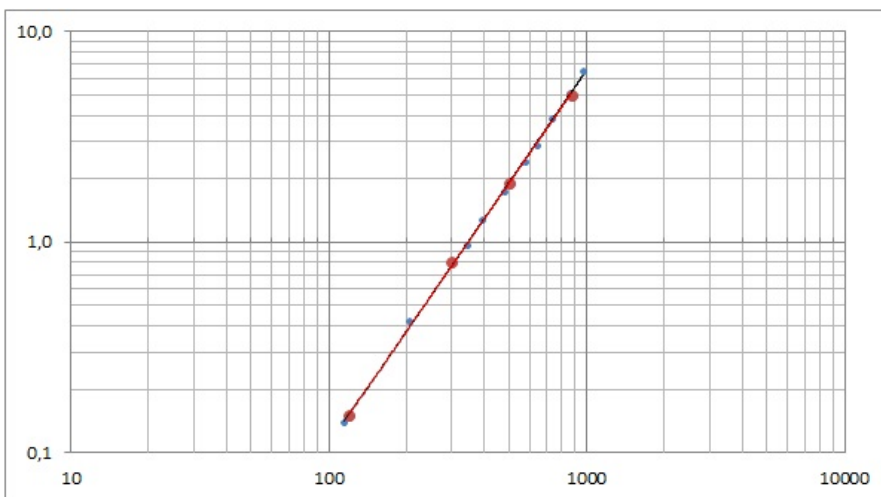
Kuva 5.11. Mittaustulokset ja nykyinen julkaistu käyrä, koko 160 mm



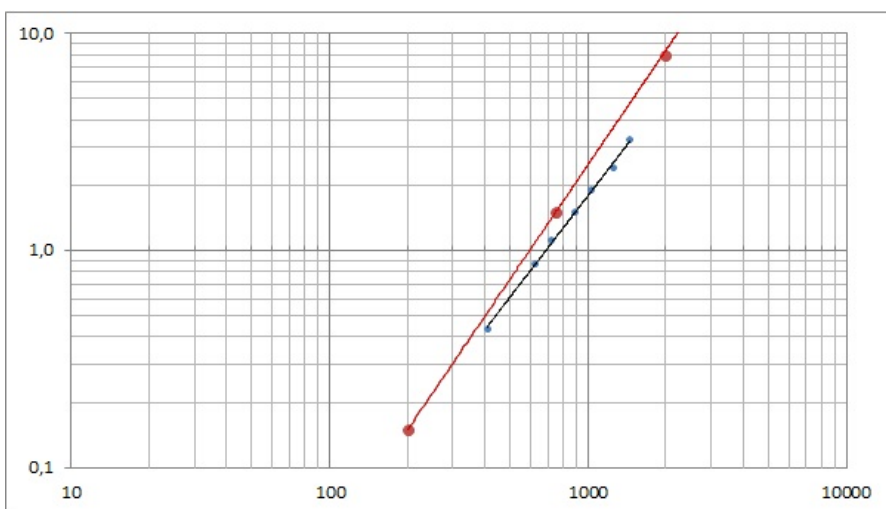
Kuva 5.12. Mittaustulokset ja nykyinen julkaistu käyrä, koko 200 mm



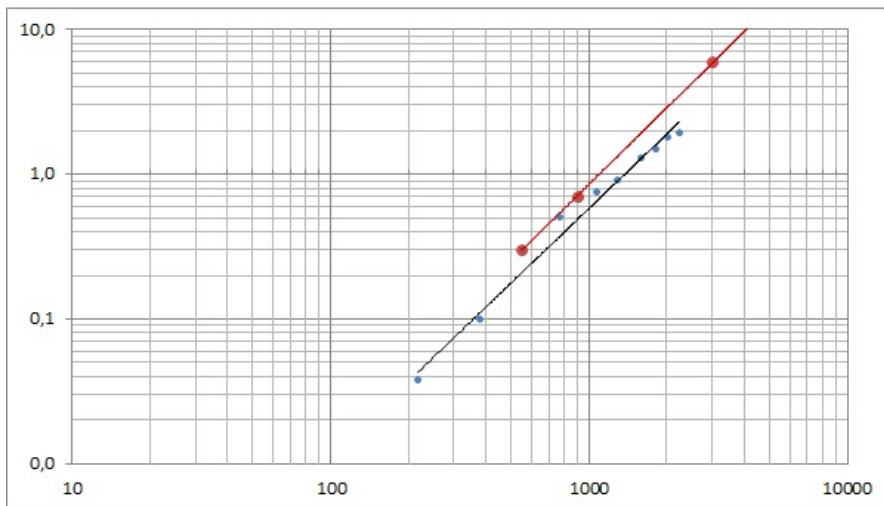
Kuva 5.13. Mittaustulokset ja nykyinen julkaistu käyrä, koko 250 mm



Kuva 5.14. Mittaustulokset ja nykyinen julkaistu käyrä, koko 315 mm



Kuva 5.15. Mittaustulokset ja nykyinen julkaistu käyrä, koko 400 mm



Kuva 5.16. Mittaustulokset ja nykyinen julkaistu käyrä, koko 500 mm

Käyrästä tarkasteltaessa voidaan huomata pienempien kanavien osalta, että painehäviöt ovat hieman suurempia, kuin nykyisistä käyrästä voidaan todeta.

Koossa 315 käytetään Suomessa valmistetuissa kanavissa jäykisteprofilointia. Tässä koossa mitattu ja nykyinen käyrä ovat yhtenevät. Suuremmilla putkikoilla näyttäisi painehäviöt olevan hieman nykyisiä käyrästä pienempiä. Painehäviökäyrästä on käsitelty tarkemmin mallinnusosiossa.

6. PAINEHÄVIÖKÄYRÄSTÖN MALLINNUS

6.1 Mallinnusperiaate ja mallinnettu käyrästä

Painehäviökäyrästä mallinnettiin siten, eri kanavakokojen painehäviöt on laadittu fysikaalisesti samalla periaatteella. Erikseen ei mallinnettu kanavan kitkavastusta ja liittimen kertavastusta, vaan ne yhdistettiin siten, että saatiin niiden yhteisen karheuden kitkavastuskerroin. Mittaustulosten perusteella laskettiin kutakin mittauspistettä vastaava kitkavastuskerroin λ , jotka havainnollistettiin Colebrookin käyrästä vastaavaan kaavioon. Kanavakokoja 100 mm – 250 mm varten haettiin oma ja kanavakokoja 315 mm – 500 mm oma kitkavastuskertoimen kaava. Tämän jälkeen saatiin piirrettyä käyrät samaan muotoon.

Mittaustulosten perusteella laskettiin mitattu kitkakertoimen arvo kaavasta 2 johtamalla, jolloin saatiin kaava 8. Lisäksi laskettiin kutakin mittauspistettä vastaava Reynoldsin luku Re .

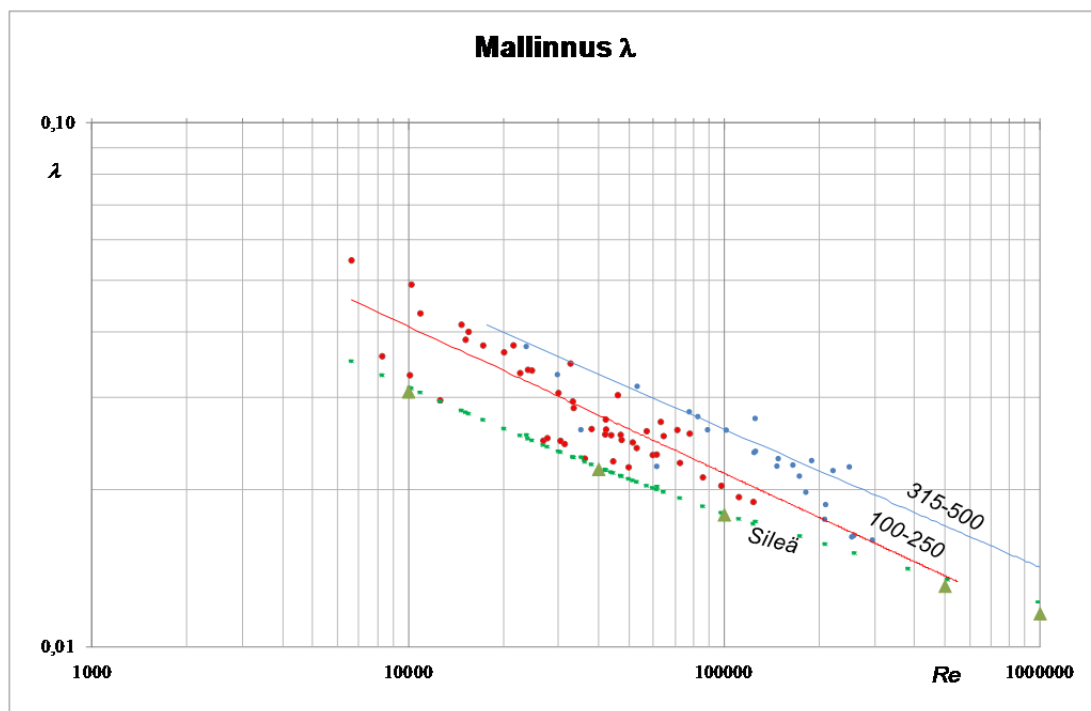
$$\lambda = \frac{2 * \Delta p_{\lambda} * D}{\rho * v^2} \quad (8)$$

Kaavasta laskettujen mitattujen kitkavastuskertoimien pisteet sijoitettiin kaavioon, jossa vaaka-akselilla on Reynoldsin luku ja pystyakselilla kitkavastuskerroin (Kuva 6.1.). Samaan kaavioon laskettiin myös mittauspisteitä vastaavat sileän kanavan ja kaavalla 5 peltikanavan kitkavastuskertoimet, jotta voitiin verrata niitä keskenään.

Mittauspisteitä mahdollisimman hyvin vastaaville kitkavastuskertoimien malleille saatiin kaavat 9 kanaville 100 – 250 mm ja kaava 10 kanaville 315 – 500 mm. Kyseessä ei siis ole trendiviiva, vaan visuaalisesti haettu käyrä. Hajontaa aiheuttivat lähinnä 100 mm, 400 mm ja 500 mm kanavien tulokset, mutta muuten tulokset olivat hyvin yhteneväiset.

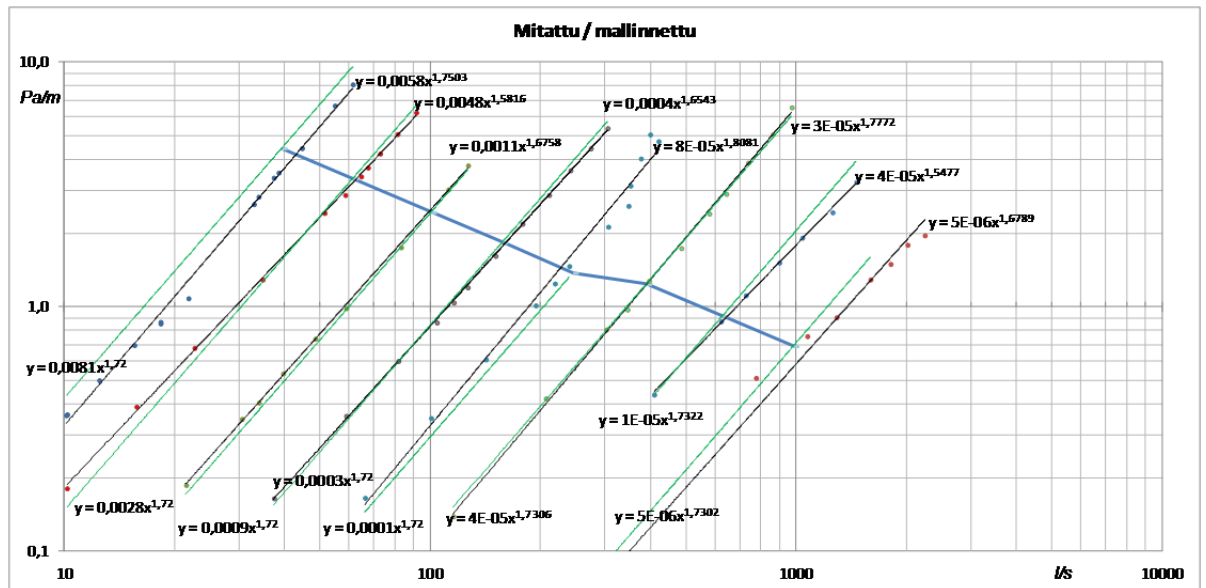
$$\lambda = \frac{0,54}{Re^{0,28}} \quad (9)$$

$$\lambda = \frac{0,63}{Re^{0,28}} + 0,001 \quad (10)$$



Kuva 6.1. Mitatut kitkavastuskertoimet, pienet kanavat on piirretty punaisilla pisteillä ja isot kanavat sinisillä pisteillä. Mallinnetun kitkakertoimen suorat on piirretty vastaavilla väreillä. Sileän kanavan kertoimet on piirretty vihreillä kolmioilla ja pel-tikanavan kertoimet vihreillä pisteillä.

Määritettyjen mallien avulla piirrettiin mallinnetut painehäviökäyrät, jotka kuvassa 6.2 on esitetty samassa kaaviossa mitattujen pisteiden ja niiden trendikäyrien kanssa. Trendikäyrien kaavat näkyvät myös kaaviossa, mitatut ovat ylempiä ja mallinnetut alempia. Mallinnetuissa kaavan eksponentti on noin 1,72 tai 1,73, mitatuissa eksponentin vaihtelu on aika suurta.

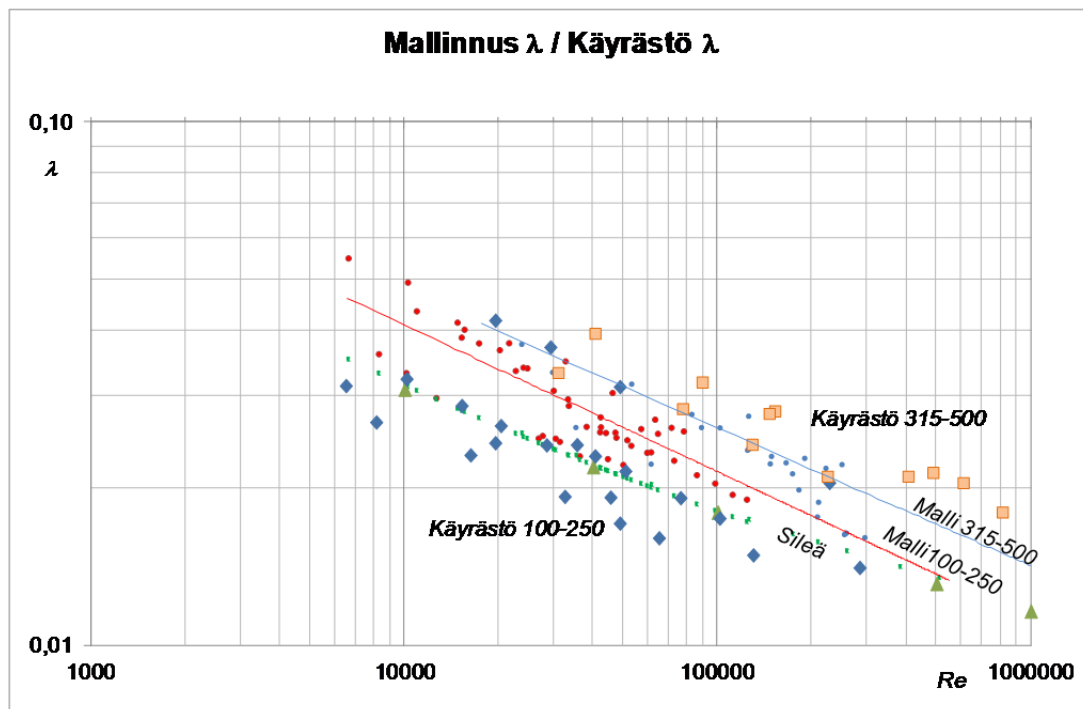


Kuva 6.2. Mitattujen ja mallinnettujen käyrien trendiviivat, ylempänä mitattujen kaavat. Sininen vaakaviiva esittää vakionopeutta 5 m/s.

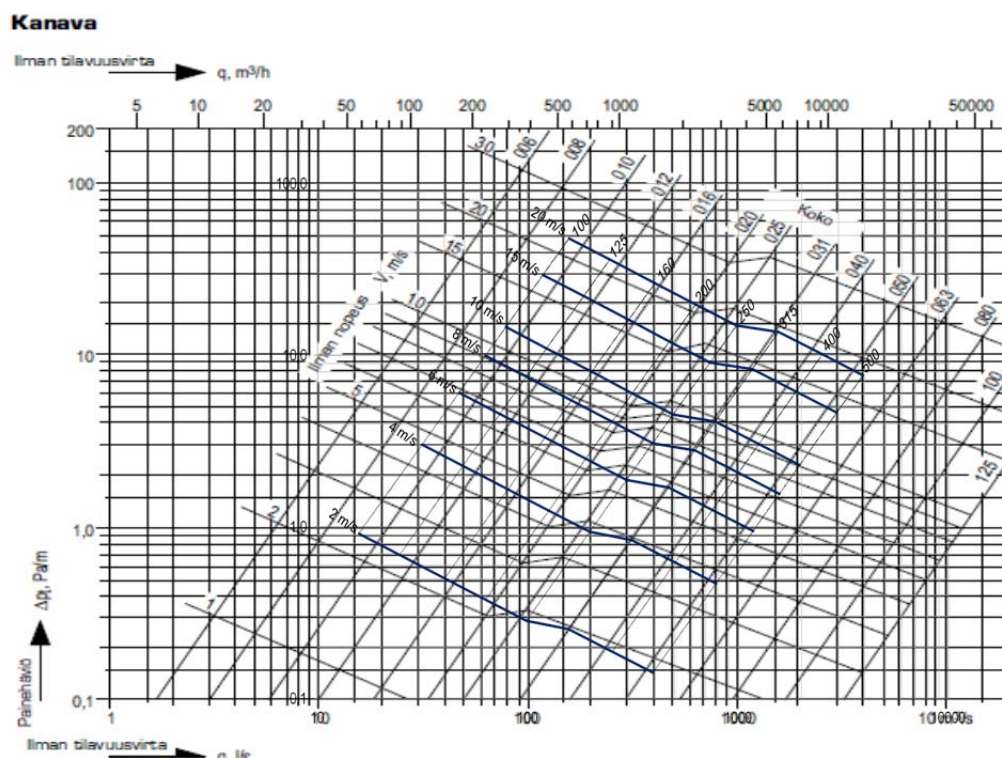
6.2 Mallinnetun ja julkaistun Fläkt Woodsin käyrästäön vertailu

Kuvassa 6.3. on esitetty kitkakertoimen mallinnus kuvasta 6.1. sekä samalla periaatteella lasketut Fläkt Woodsin julkaistun käyrästäön kitkakertoimet. Julkaistun käyrästäön pisteet sijoittuvat pienillä kanavilla osittain alle teoreettisen sileän kanavan kitkakertoimien ja hajonta on melko suurta verrattuna mittaustuloksiin. Profiloitujen kanavien osalta hajonta on vähäisempää.

Kuvassa 6.4. on yhdistetty mallinnettu ja Fläkt Woodsin julkaistu käyrästäön. Sileillä kanavilla painehäviö on mallinnuksen mukaan suurempi, mitä pienempi kanava sitä suurempi ero. Koko 250 mm poikkeaa siksi, että julkaistussa käyrästäössä on profiloituneen kanavan käyrä. Suomessa tämä koko on vielä sileä. Profiloituilla kanavilla koko 315 on hyvin samanlainen, mutta sitä suuremmilla mallinnettu painehäviö on pienempi. Koolla 315 mm mittaustuloksissa ei ollut hajontaakaan ja painehäviö pysyi samanlaisena pidemmällä matkalla. Kokojen 400 mm – 500 mm mittaustulokset antoivat vieläkin pienempiä painehäviöitä, mutta hajonta oli suurta.



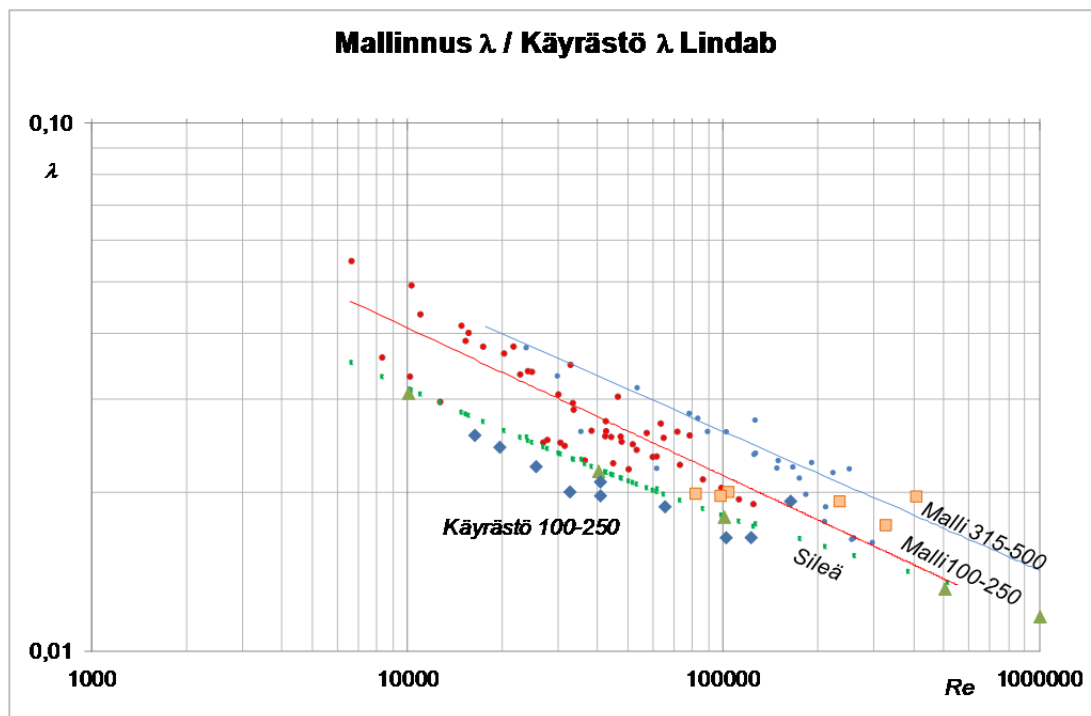
Kuva 6.3. Mallinnuksen ja Fläkt Woodsin julkaistun käyrästöön kitkakertoimet. Sinisellä vinoneliöllä koot 100 mm - 250 mm ja oranssilla neliöllä koot 315 – 500 mm.



Kuva 6.4. Mallinnettu ja Fläkt Woodsin julkaistu käyrästö.

6.2 Mallinnetun ja julkaistun Lindabin käyrästön vertailu

Kuvassa 6.5. on esitetty kitkakertoimen mallinnus kuvasta 6.1. sekä samalla periaatteella lasketut Lindabin julkaistun käyrästön kitkakertoimet. Pienillä kanavilla kitkakerroin on yhtä pistettä lukuun ottamatta alle teoreettisen sileän kanavan kitkakerroimien. Profiloituilla kanavilla hajonta on suurempaa ja kitkakerroin lähes vakio.



Kuva 6.5. Mallinnuksen ja Lindabin julkaistun käyrästön kitkakertoimet. Sinisellä vinoneliöllä koot 100 mm - 250 mm ja oranssilla neliöllä koot 315 – 500 mm.

7. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli mitata Fläkt Woodsin pyöreiden kanavien painehäviöitä ja samalla laatia niille uudet käyrästöt, kun käytetään kumiliitososia 3 m välein. Lisäksi työhön kuului painehäviöiden mallinnus jokaiselle putkikoolle erikseen. Tällaista mallinnettua painehäviökäyrästöä ei ollut saatavilla valmistajan toimesta.

Ensimmäiset mittaukset päästiin suorittamaan joulukuussa 2012 ja loput mittaukset valmistuivat maaliskuun 2013 aikana. Mittaukset pyrittiin suorittamaan mahdollisimman virheettömästi kunnollisten tulosten aikaansaamiseksi. Mitattuja kanavakojoja oli yhteensä kahdeksan kappaletta. Mittaukset aloitettiin pienimmästä kanavakoosta 100mm alkaen, koska tästä kyseisestä koosta oli saatavilla SAMKissa 2006 mitattu vertailuun käytetty painehäviökäyrästö. Mittauksissa hajonta oli yhdellä kanavakoolla hyvin vähäistä, mutta kanavakoot keskenään poikkesivat jonkin verran toisistaan.

Tässä työssä esiteltyt painehäviömallinnukset laati työn ohjaaja Esa Sandberg. Mallinuksissa todettiin, että mallinnetut ja nykyiset painehäviökäyrät eroavat toisistaan. Sileillä kanavilla painehäviö on suurempi, mitä pienempi kanavan koko on. 315 mm koossa käyrät ovat hyvin samankaltaiset. Suuremmissa kanavakoissa 400 - 500 mm mitatut painehäviöt näyttäisivät olevan pienempiä, kuin mitä valmistaja ilmoittaa.

Kanavakoot 630 - 1250 mm jätettiin tässä työssä mittaamatta yhden opiskelijan suuren työmäärän vuoksi. Koot 630 - 800 mm olisi syytä mitata tulevaisuudessa, jotta laadittu mallinnus saataisiin kattamaan kaikki valmistajan kanavakoot. Kanaviston pituuden tulisi tällöin olla huomattavasti pidempi, jotta häiriöetäisyydet olisivat riittävät. 12 metrin kanaviston pituus, jota käytettiin tässä työssä alkoi olla liian lyhyt 500 mm kanavalle, koska hajonta oli melko suurta mittauspisteiden välillä.

LÄHTEET

Bohl, W. 1988. Teknillinen virtausoppi. Toinen painos. Oy Sonator AB.

Fläkt Woods Oy:n www- sivut. 2013. Viitattu 18.4.2013.

<http://www.flaktwoods.fi/e265175a-cd30-47c2-bbe5-14e9d1cb5f37>

Fläkt Woods Oy:n www- sivut 2013. Viitattu 23.4.2013.

<http://vsecatalogue.flaktwoods.com/p-5549-jm-aerofoil-80jm2046.aspx>

Fläkt Woods Oy:n www- sivut 2013. Viitattu 20.5.2013. Veloduct, Ekoduct, Veloflex tekninen esite 2008 04 (FIN) Pdf.

Henning, Horup, Sorensen. 2001. Toinen painos. Ventilationstäbi. Nyt tekniskforlag.

Laiho, E-M. 1991. Putkijohtojen virtausteknisen mitoituksen perusteet. Mikkelin Teknillinen Oppilaitos.

Lindabin www- sivut 2013. Viitattu 22.4.2013.

<http://www.lindab.com/fi/pro/products/Pages/SR.aspx?refpageid=2147aba0-9e4e-4df4-a5d3-de996a1ccc4a>.Pdf- esite sr-kanavista.

Sandberg, Esa. 2013. Opetusmoniste opintojaksosta Ilmastointilaitoksen mitoitus.

Seppänen, Olli. 1996. Ilmastointitekniikka ja sisäilmasto. Kirjapaino Kiitorata Oy Helsinki 1996.

Teknocolor www- sivut 2013. Viitattu

5.5.2013. <http://www.teknocalor.fi/fi/mittauslaitteet/tuotteet/ilmastointi/paine-eromittarit/tarkkuuspaine-eromittari-tsi-dp-calc-8710>

Valvira. Kylpylöiden ilmanvaihdon laskuesimerkkejä. 30.09.2009.

Pdf-julkaisu Dnro 6097/11.02.02.02/2009.

Vents Companyn www- sivut. 2013. Viitattu 18.4.2013. http://www.ventilation-system.com/images/cat/316_1374_cat_file_lang.pdf

LIITTEET

Liitteet 1-2 Teknocalor paine- eromittareiden kalibrointitodistukset

Liitteet 3-10 Mittauspöytäkirjat



KALIBROINTITODISTUS

CERTIFICATE OF CALIBRATION

Mittalaite: Mikromanometri
 Tyyppi: TSI Dp-Calc 8710
 Sarjanumero: 90439028

Tutkittavan mittarin lukemat referenssipaineilla

Referenssi Pa	DP-CALC Pa	Poikkeama % lukemasta
-1000,0	-1007	0,7
-100,00	-101,0	1,0
-10,00	-10,00	0,0 Pa
0,00	0	0
10,00	10,11	0,11 Pa
20,00	20,2	0,2 Pa
100,00	100,7	0,7
200,00	201	0,5
1000,0	1008	0,8
2000,0	2009	0,4

Kalibroinnissa käytetyt referenssit ja niiden mittausepävarmuus:

Paine-ero: - Furness Controls PPC-500 s/n: 0506001
 - Epävarmuus:
 alueella 20...2000 Pa, 0,1% lukemasta + 0,1 Pa
 alueella 1...19 Pa, 0,21 Pa

Kalibrointiolosuhteet:

Lämpötila 21,9 °C
 Suhteellinen kosteus 36,7 % s.k.
 Ilmanpaine 1018 mbar

Kalibroinnin päivämäärä: 14.11.2012 Seuraava kalibrointi: 14.11.2013

Kalibroinnin suorittaja: Mikko Laakkonen

Referenssien jäljitettävyys-, kalibrointi- ja analyysitodistukset näytetään pyydettyessä laboratoriossamme.

OY TEKNOCALOR AB · KALIBROINTI- JA HUOLTOLABORATORIO
 SINIKELLONKUJA 4 · 01300 VANTAA · PUH 010 820 1100 · FAKSI 010 820 1103





KALIBROINTITODISTUS

CERTIFICATE OF CALIBRATION

Mittalaite: Mikromanometri
 Tyyppi: TSI Dp-Calc 8710
 Sarjanumero: 90435009

Tutkittavan mittarin lukemat referenssipaineilla

Referenssi Pa	DP-CALC Pa	Poikkeama % lukemasta
-1000,0	-1007	0,7
-100,00	-100,8	0,8
-10,00	-10,14	0,14 Pa
0,00	0	0
10,00	10,02	0,02 Pa
20,00	20,1	0,10 Pa
100,00	101	1
200,00	201	0,5
1000,0	1007	0,7
2000,0	2014	0,7

Kalibroinnissa käytetyt referenssit ja niiden mittausepävarmuus:

Paine-ero: - Furness Controls PPC-500 s/n: 0506001
 - Epävarmuus:
 alueella 20...2000 Pa, 0,1% lukemasta + 0,1 Pa
 alueella 1...19 Pa, 0,21 Pa

Kalibrointiolosuhteet:

Lämpötila 21,9 °C
 Suhteellinen kosteus 36,7 % s.k.
 Ilmanpaine 1018 mbar

Kalibroinnin päivämäärä: 14.11.2012 Seuraava kalibrointi: 14.11.2013

Kalibroinnin suorittaja: Mikko Laakkonen 

Referenssien jäljitettävyys-, kalibrointi- ja analyysitodistukset näytetään pyydettyessä laboratoriossamme.

OY TEKNOCALOR AB · KALIBROINTI- JA HUOLTOLABORATORIO
 SINIKELLONKUJA 4 · 01300 VANTAA · PUH 010 820 1100 · FAKSI 010 820 1103



LIITE 5

T ilma	21,4 °C		Mitatut arvot vihreällä taustalla												Käytetty							
	qv kal	qv korj	v korj	Kanavaosan pituus [m] ja mitattu painehäviö Δp			Kanavaosan mitattu painehäviö Δp / m			Kanavaosan mitattu painehäviö Δp / m			Δp	Δp korj								
p ilma	100330 Pa	27,6 %RH		0->1	1->2	1->3	1->4	2->3	2->4	3->4	0->1	1->2	1->3	1->4	2->3	2->4	3->4	Pa / m	Pa / m	Pa / m		
φ	2541 Pa	701 Pa																				
p hs	0,00438 kg/kg	1,183 kg/m ³																				
p h	160	(k=10)																				
x																						
ρ																						
Kanava																						
Δp mit	6,16 Pa	21,4 l/s	21,5 l/s	0,58 Pa	1,00 Pa	1,33 Pa	1,73 Pa	2,29 Pa	3,17 Pa	5,53 Pa	9,40 Pa	11,60 Pa	0,55 Pa	1,06 Pa	1,96 Pa	2,41 Pa	3,05 Pa	4,37 Pa	5,67 Pa	7,26 Pa	9,49 Pa	11,20 Pa
	12,1 Pa	30,3 l/s	30,6 l/s	0,95 Pa	1,03 Pa	1,19 Pa	1,53 Pa	2,17 Pa	2,76 Pa	4,94 Pa	8,73 Pa	10,70 Pa	0,95 Pa	1,03 Pa	1,19 Pa	1,53 Pa	2,17 Pa	2,76 Pa	3,57 Pa	4,58 Pa	5,88 Pa	7,44 Pa
	14,8 Pa	33,7 l/s	34,0 l/s	1,19 Pa	1,20 Pa	1,33 Pa	1,73 Pa	2,29 Pa	3,17 Pa	5,53 Pa	9,40 Pa	11,60 Pa	1,19 Pa	1,20 Pa	1,33 Pa	1,73 Pa	2,29 Pa	2,76 Pa	3,57 Pa	4,58 Pa	5,88 Pa	7,44 Pa
	19,7 Pa	39,3 l/s	39,6 l/s	1,53 Pa	1,58 Pa	1,73 Pa	2,29 Pa	3,17 Pa	4,94 Pa	8,73 Pa	10,70 Pa	11,60 Pa	1,53 Pa	1,58 Pa	1,73 Pa	2,29 Pa	2,76 Pa	3,57 Pa	4,58 Pa	5,88 Pa	7,44 Pa	9,49 Pa
	28,7 Pa	48,2 l/s	48,5 l/s	2,17 Pa	2,19 Pa	2,29 Pa	3,17 Pa	4,94 Pa	7,26 Pa	10,70 Pa	14,60 Pa	18,50 Pa	2,17 Pa	2,19 Pa	2,29 Pa	3,17 Pa	4,94 Pa	7,26 Pa	10,70 Pa	14,60 Pa	18,50 Pa	22,40 Pa
	40,9 Pa	58,4 l/s	58,8 l/s	2,76 Pa	2,92 Pa	3,17 Pa	4,94 Pa	7,26 Pa	10,70 Pa	14,60 Pa	18,50 Pa	22,40 Pa	2,76 Pa	2,92 Pa	3,17 Pa	4,94 Pa	7,26 Pa	10,70 Pa	14,60 Pa	18,50 Pa	22,40 Pa	26,30 Pa
	78,7 Pa	82,5 l/s	83,1 l/s	4,94 Pa	5,18 Pa	5,53 Pa	8,73 Pa	11,60 Pa	15,53 Pa	20,47 Pa	25,41 Pa	30,35 Pa	4,94 Pa	5,18 Pa	5,53 Pa	8,73 Pa	11,60 Pa	15,53 Pa	20,47 Pa	25,41 Pa	30,35 Pa	35,29 Pa
	143 Pa	111,2 l/s	112,0 l/s	8,73 Pa	8,94 Pa	9,40 Pa	14,60 Pa	19,49 Pa	25,38 Pa	32,27 Pa	39,16 Pa	46,05 Pa	8,73 Pa	8,94 Pa	9,40 Pa	14,60 Pa	19,49 Pa	25,38 Pa	32,27 Pa	39,16 Pa	46,05 Pa	52,94 Pa
	183 Pa	125,8 l/s	126,7 l/s	11,60 Pa	11,20 Pa	11,60 Pa	18,50 Pa	24,39 Pa	31,28 Pa	38,17 Pa	45,06 Pa	51,95 Pa	11,60 Pa	11,20 Pa	11,60 Pa	18,50 Pa	24,39 Pa	31,28 Pa	38,17 Pa	45,06 Pa	51,95 Pa	58,84 Pa

LIITE 6

		Mitatut arvot vihreällä taustalla						Kanavaosan mitattu painehäviö Δp / m												Käytetty					
T ilma	21,3							Kanavaosan pituus [m] ja mitattu painehäviö Δp				Kanavaosan mitattu painehäviö Δp / m													
	°C	2,4	3	6	9	3	6	3	0->1	1->2	1->3	1->4	2->3	2->4	3->4	0->1	1->2	1->3	1->4		2->3	2->4	3->4	Δp	Δp korj
p ilma	102100	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa / m	Pa / m
ϕ	17,8	%RH																							
p hs	2526	Pa																							
p h	450	Pa																							
x	0,00275	kg/kg																							
ρ	1,206	kg/m ³																							
Kanava	200																								
		(k=16)																							
Δp mit	Pa	l/s	qv kal	l/s	qv korj	v korj	m/s		Pa		Pa		Pa		Pa		Pa		Pa		Pa		Δp	Δp korj	
7,48	37,5	37,4	1,19	0,50	0,53	1,03	0,50	0,50	0,50	0,50	1,03	0,50	0,50	0,50	1,03	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	1,03	0,50	0,50	0,16	
18	59,0	58,9	1,87	1,17	1,22	2,31	1,08	1,08	1,08	1,08	2,31	1,08	1,08	1,08	2,31	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	2,31	1,08	1,08	0,36	
33,5	81,9	81,7	2,60	1,90	2,16	3,94	1,81	1,81	1,81	1,81	3,94	1,81	1,81	1,81	3,94	1,81	1,81	1,81	1,81	1,81	3,94	1,81	1,81	0,60	
52,8	104,4	104,1	3,31	2,73	3,26	5,94	2,60	2,60	2,60	2,60	5,94	2,60	2,60	2,60	5,94	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60	5,94	2,60	2,60	0,86	
61,5	116,1	115,8	3,69	3,00	3,73	6,77	3,14	3,14	3,14	3,14	6,77	3,14	3,14	3,14	6,77	3,14	3,14	3,14	3,14	3,14	6,77	3,14	3,14	1,04	
73,3	126,7	126,4	4,02	3,39	4,37	8,06	3,62	3,62	3,62	3,62	8,06	3,62	3,62	3,62	8,06	3,62	3,62	3,62	3,62	3,62	8,06	3,62	3,62	1,20	
104	150,9	150,6	4,79	4,55	6,03	10,90	4,87	4,87	4,87	4,87	10,90	4,87	4,87	4,87	10,90	4,87	4,87	4,87	4,87	4,87	10,90	4,87	4,87	1,62	
146	178,8	178,4	5,68	6,04	8,27	14,80	6,59	6,59	6,59	6,59	14,80	6,59	6,59	6,59	14,80	6,59	6,59	6,59	6,59	6,59	14,80	6,59	6,59	2,19	
204	211,4	210,9	6,71	7,71	11,40	19,90	8,64	8,64	8,64	8,64	19,90	8,64	8,64	8,64	19,90	8,64	8,64	8,64	8,64	8,64	19,90	8,64	8,64	2,87	
267	241,8	241,2	7,68	9,99	15,00	25,90	10,90	10,90	10,90	10,90	25,90	10,90	10,90	10,90	25,90	10,90	10,90	10,90	10,90	10,90	25,90	10,90	10,90	3,62	
345	274,9	274,2	8,73	12,90	19,10	32,40	13,40	13,40	13,40	13,40	32,40	13,40	13,40	13,40	32,40	13,40	13,40	13,40	13,40	13,40	32,40	13,40	13,40	4,44	
426	305,5	304,7	9,70	15,20	22,30	38,40	16,20	16,20	16,20	16,20	38,40	16,20	16,20	16,20	38,40	16,20	16,20	16,20	16,20	16,20	38,40	16,20	16,20	5,37	

