

Tiia Monto
tiia.monto@jyu.fi
04075218560

Työ tehty: 23.11.09

Putkistovirtausmittauksia

Assistentti:

Arvostellaan:

Abstract

Työssä tutkittiin kuristuslaippaa, venturiputkea sekä pitot-putkea putkistovirtausmittauslaitteistolla. Kuristuslaipalle ja venturiputkelle mitattiin ja laskettiin mitattuja paineeroja vastaavat teoreettiset tilavuusvirrat. Kummassakin tapauksessa mitatut ja teoreettiset tulokset vastasivat toisiaan mainiosti. Sen sijaan Pitot-putki ei toiminut yhtä hyvänä mittausvälineenä, sillä mitatut virtausnopeudet olivat systemaattisesti teoreettisia pienemmät ja nopeusprofiili ei ollut realistinen.

Sisältö

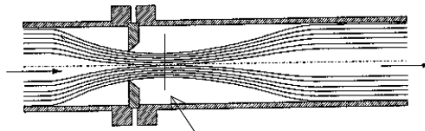
1	Johdanto	1
2	Teoreettiset lähtökohdat	1
2.1	Kuristuslaippa	1
2.1.1	Paine-ero	1
2.1.2	Tilavuusvirta	1
2.1.3	Reynoldsin luku ja häviökerroin	2
2.2	Venturiputki	2
2.3	Pitot-putki	3
3	Mittauslaitteisto ja kokeelliset menetelmät	3
3.1	Alkuvalmistelut	4
3.2	Mittaukset	5
3.2.1	Venturiputki	5
3.2.2	Kuristuslaippa	5
3.2.3	Pitot-putki	5
4	Havainnot ja laskut	6
4.1	Kuristuslaippa	6
4.1.1	Laskettu tilavuusvirta	6
4.1.2	Reynoldsin luku	9
4.1.3	Häviökorkeus ja häviökerroin	9
4.2	Venturiputki	11
4.3	Pitot-putki	14
4.3.1	Maksimaaliset virtausnopeudet	14
4.3.2	Nopeusprofiili	14
5	Johtopäätökset	16

1 Johdanto

Yksi tapa tutkia putkivirtauksia on käyttää sitä varten rakennettua putkivirtauslaitteistoa, jossa voidaan valita sitä kiertävälle nesteelle eri virtausnopeuksia erikokoisissa putkissa. Laitteistoon voidaan asentaa erilaisia välineitä virtauksen ominaisuuksien mittaamiseen. Virtaavan fluidin paikallisen nopeuden mittaamiseen voidaan käyttää esimerkiksi pitot-putkea, venturiputkea ja mittauslaippaa.[1, s. 404]

2 Teoreettiset lähtökohdat

2.1 Kuristuslaippa



Kuva 1: Virtaus kuristuslaipan läpi

2.1.1 Paine-ero

Kurstuslaippa (kuva 1) on virtausputkeen asennettu laippa, joka ”kuristaa” sen läpi kulkevaa nestettä siten, että nesteen paine laipan kohdalla nousee. Nesteen ohitettua laippaa sen paine alkaa laskea. Kuristuslaipan avulla voidaan laskea virtauksen nopeus Bernoullin yhtälöllä, joka on muotoa

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g z_1 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g z_2,$$

missä p_1 on paine, v_1 nopeus ja z_1 korkeus virtaviivan pisteessä ylävirran puolella ennen kuin neste on kohdannut laipan. Vastaavasti p_2 on paine, v_2 nopeus ja z_2 korkeus samalla virtaviivalla, mutta pisteessä, joka on kuristuslaipan kohalla. Nyt oletetaan, että $z_1 = z_2$, niin saadaan paine-erotus yhtälöllä

$$p_1 - p_2 = \Delta p = \frac{1}{2}\rho(v_2^2 - v_1^2). \quad (1)$$

2.1.2 Tilavuusvirta

Tiedetään, että kokoonpuristumattoman nesteen tilavuusvirta Q laipan läpi on oltava yhtä suuri kuin missä tahansa muualla putken kohdassa. Siispä

$$\begin{aligned} Q &= \frac{\pi}{4} D_1^2 v_1 = \frac{\pi}{4} D_2^2 v_2 & (2) \\ \Rightarrow v_1 &= \frac{D_2^2}{D_1^2} v_2 \Rightarrow v_1^2 = \frac{D_2^4}{D_1^4} v_2^2. \end{aligned}$$

Kun sijoitetaan yllä saatu ns. vapaan virtauksen nopeuden neliö yhtälöön 1, niin saadaan

$$\Delta p = \frac{1}{2}\rho(v_2^2(1 - \frac{D_2^4}{D_1^4})). \quad (3)$$

Ylläolevasta saadaan tilavuusvirran ja laipan kohdalla määriteltävän virtauspinta-alan A_2 suhde, eli virtausnopeus laipan aukon kohdalla

$$\frac{Q}{A_2} = v_2 \approx \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho(1 - \frac{D_2^4}{D_1^4})}}, \quad (4)$$

joka ei kuitenkaan ole vielä tarkka tulos, sillä ei huomioitu kitkaa. Lisäämme siis yllä olevaan yhtälöön kuristuskertoimen C_d ja siirrämme virtauspinta-alan yhtälön toiselle puolelle saaden tilavuusvirran[1, s. 416]

$$Q = A_2 C_d \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho(1 - \frac{D_2^4}{D_1^4})}}. \quad (5)$$

2.1.3 Reynoldsin luku ja häviökerroin

Laippa aiheuttaa virtaan energiahäviötä, joka voidaan ilmoittaa häviökorkeutena h_m . Häviön vaikutus paineeseen merkitään Δp_m , joka voidaan laskea häviöttömän virtauksen paineen ja laipan jälkeen häviöllisen virtauksen paineen erotuksena.

Reynoldsinluku Re saadaan yhtälöllä

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{4\rho Q}{\mu \pi D} \quad (6)$$

ja häviökerroin lasketaan yhtälöstä

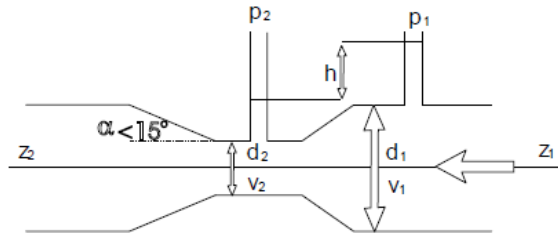
$$K = \frac{h_m}{v^2/2g} = \frac{\Delta p_m}{\frac{1}{2}\rho v^2}, \quad (7)$$

missä $\rho = 998 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ veden tiheys lämpötilassa 20°C , v veden keskimääräinen nopeus putkessa, D putken halkaisija, $\mu = 0,001 \frac{\text{kg}}{\text{ms}}$ viskositeetti, Q tilavuusvirta, $g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ gravitaatiokiihtyvyyys ja Δp_m paine-eron laipan vaikutusalueen yli.

2.2 Venturiputki

Venturiputken rakenteeseen kuuluu tulosylinteri, kartiomainen supistus ja sylinterimäinen kurkku, kuten kuvassa 2 näkyy.

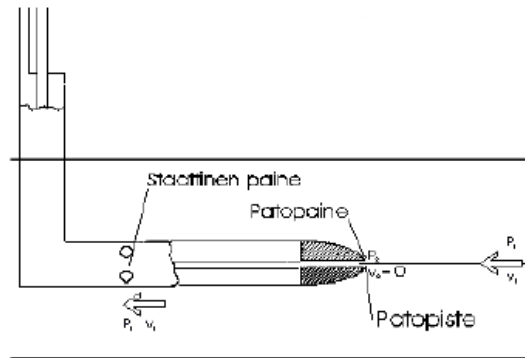
Kuten kuristuslaipalle, voidaan myös venturiputkelle käyttää Bernoullin yhtälöä päästen samaan tulokseen kuin laipan tapauksessa yhtälö 1. Venturiputkelle paine-ero Δp tarkoittaa tulosylinterin ja kurkun välistä paine-eroa. Venturiputkellekin voidaan käyttää tilavuusvirransäilymistä, eli yhtälöä 2 ja päädytään yhtälöön 5, josta saadaan laskettua tilavuusvirta venturiputkelle.



Kuva 2: Venturiputki

2.3 Pitot-putki

Pitot-putken toinen pää on suunnattu virran suuntaisesti kuvan 3 mukaisesti ja se koostuu kahdesta sisäkkäisestä putkesta. Neste virtaa vasten putken päätä aiheuttaen putken päätykohtaan stagnaatiopaineen p_2 ja nollanopeuden $v_2 = 0$. Uloimpaan putken porattujen reikien myötä välittyy staattinen paine.



Kuva 3: Pitot-putki

Kun tarkastellaan pitot-putken läpi kulkevaa virtaviivaa kahdessa eri pisteessä: häiriöttömässä virtauksessa (paine p_1) ja pitot-putken kohdalla (paine p_2), niin voidaan Bernoullin yhtälöstä saada

$$p_2 = p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2$$

$$\Rightarrow v_1 = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}, \quad (8)$$

missä siis v_1 on nopeus häiriöttömässä putken kohdassa ja $\rho = 998 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ tiheys.

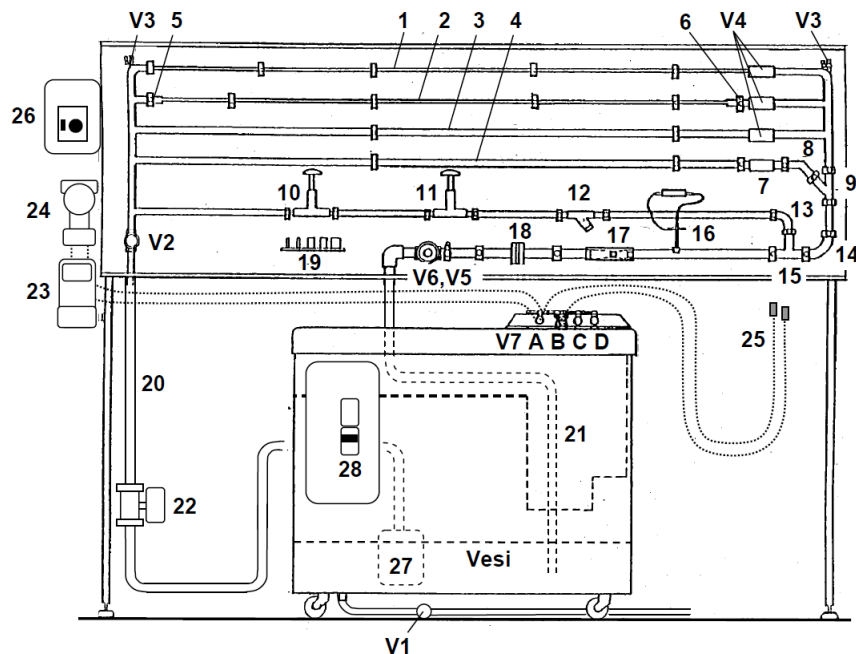
3 Mittauslaitteisto ja kokeelliset menetelmät

Työssä käytettävä laitteisto oli kuvan 4 kaltainen ja siihen oli lisätty sähköiset tilavuusvirta- ja paineanturit, joiden mittauslukemat näkyivät niiden näytöistä (kuvassa putkivirtauslaitteiston vasemmalla puolella). Laitteessa oli myös säätönappi pumpun kierrosluvun muuttamiselle, sillä siis voi säätää tilavuusvirtaa.



Kuva 4: Armfield-putkivirtauslaitteisto

3.1 Alkuvalmistelut



Kuva 5: Armfield-putkivirtauslaitteiston kaaviokuva

Ennen mittauksia lisäsimme laitteen säiliöön vettä ja käynnistimme pumpun sekä mittalaitteet.

Esivalmisteluihimme kuului myös putkiston ilmaus, eli ilman poisto putkista. Ilmaus aloitettiin avaamalla kuvan 5 venttiilit V4 ja palloventtiili 7. Tämän jälkeen säädettiin pumpun pumppaamaan suurimmalla kierrosluvulla ja kuristettiin venttiiliä V6. Sitten avasimme venttiilit 10 ja 11 sekä suljimme aiemmin avaavamme venttiilit V4 ja 7 veden päästessä kulkemaan linjaa pitkin säiliöön. Tämän jälkeen avasimme venttiilin 7 ja suljimme venttiilit 10 ja 11, mikä saa veden kulkemaan 4-putkessa poistaen sieltä ilman. Samoin poitimme ilman myös putkista 3, 2 ja 1. Venttiileiden pesään jääneen ilman pois saamiseksi avasimme ja suljimme nopeasti venttiilejä V4 ja 7. Lopuksi suljimme venttiilit V4 ja avasimme vasemman venttiilin V3, kunnes letkussa ei enää kulkenut ilmakuplia ja avasimme taas venttiilit V4 toistaen samann oikeanpuoleiselle venttiilille V3. Pumpun kierrosluku

säädettiin nollaan ja suljettiin kaikki venttiilit V2-venttiiliä lukuunottamatta.

Paineen mittauksessa käytetään impulssiletkuja, jotka ovat kuvassa 5 letkut 25. Ne on kiinnitetty putken kohtaan, josta painetta halutaan mitata sekä venttiileihin V7 A ja V7 B ja ne jatkuvat paine-eroanturille. Ennen käyttöä letkut oli kiinnitettävä haluttuun kohtaan putkessa siten, että A-letku liitettiin korkeamman ja B-letku matalamman paineen venttiiliin. Mittauksia ennen ne ilmattiin, letkujen ollessa paikallaan säädettiin pumpun kierrosluku puolet maksimista ja ohjattiin virtaus kulkemaan mittauskohteen lävitse. Sitten kuristettiin venttiiliä V6 saaden aikaan ylipaine ja avattiin V7-venttiilit puoleen väliin asti saaden virtaus kulkemaan impulssiletkun läpi. Siellä kulki näkyviä ilmakuplia ja tehostimme niiden liikettä letkujen koputtelulla. Tämän jälkeen ilmasimme impulssiletkujen V7-venttiilien ja paine-eroanturin välillä oleva osa säätäen venttiilit V7 kokonaan auki. Käytimme erillistä mittakuppia, johon otimme veden paine-eroanturin ilmausventtiileistä, kunnes letkuissa ei näkynyt ilmakuplia.

3.2 Mittaukset

3.2.1 Venturiputki

Ensimmäiset mittaukset teimme venturiputkella, joka on kaaviokuvassa 5 osa 17 vesisäiliön oikealla yläpuolella. Impulssiputket oli siis tässä mittauksessa asetettu venturiputken kohdalle, jolloin laitteen näyttämä paine-eron arvo on venturiputken tulositylinterin ja kurkun paine-ero.

Käynnistimme pumpun ja avasimme kaikki putkissa olevat venttiilit paitsi venttiilit V3 ja V5. Säädimme pumpun kierrosluvun korkealle. Otimme ylös 10 eri tilavuusvirran ja paine-eron arvoa laitteen näytöistä lähtien korkeasta kierrosluvusta säätäen mittauksen jälkeen sitä aina pienemmäksi. Pienimmillä arvoilla emme säätäneet kierroslukua, vaan venttiiliä V6.

Tämän jälkeen mittasimme häviöstä aiheutuvan paine-eron, eli paineen ennen venturiputkea ylävirrassa ja venturiputken jälkeen alavirrassa. Siirsimme toisen alavirran impulssiputken kauemmaksi venturiputkesta ja teimme vastaavat mittaukset kuin edellä ottaen ylös 10 paine-ero-tilavuusvirta -arvoparia.

3.2.2 Kuristuslaippa

Venturiputkimittausten jälkeen siirsimme impulssiletkut kuristuslaipan kohdalle (kuvassa 5 osa 18) eikä ollut tarvetta ilmata niitä. Kuristuslaipalle teimme aivan samat mittaukset kuin venturiputkelle. Kuristuslaipankin tapauksessa otimme kummassakin mittaussarjassa ylös 10 paine-ero-tilavuusvirta -arvoparia.

3.2.3 Pitot-putki

Viimeinen mittaus suoritettiin pitot-putkella (kuvassa 5 osa 16), siirsimme siis impulssiletkus pitot-putken kohdalle mittaamaan stagnaatio- ja staattisen kohdan paine-eroa.

Löysäsimme pitot-putkea pitelevää ruuvia, että pystyimme liikutella sitä ja siirsimme sitä niin, että se olisi mahdollisimman lähellä putken keskilinjaa. Se ei kuitenkaan kovinkaan tarkasti sillä kohdalla pysynyt, mutta aloitimme mittaukset. Kuten edellisissä mittauksissa, säädimme pumpun tehon ensin korkealle ja sitten laskimme sitä pikkuhiljaa ottaen ylös tilavuusvirran ja niitä vastaavia paine-eron arvoja.

Seuraavassa mittauksessa siirsimme pitot-putkea ja kirjasimme ylös sen etäisyyden putken yläreunasta. Suoritimme mittauksia viidellä eri korkeuden arvolla ottaen kullakin korkeudella kolme tilavuusvirran ja paine-eron arvoa ylös pumpun eri kierrosnopeuksilla.

Pitot-putken takana, alavirran puoleisessa osassa näkyi liehuva musta karva ja putken etupuolella venttiilin kohdalla oli ilmakupla, joka ei tuntunut irtoavan edes mittausten yhteydessä. Lieneekö aiheuttaneet mittausvirheitä.

4 Havainnot ja laskut

Kaikissa laskuissa käytin vakioarvoina alla olevan listan arvoja:

- $\rho = 998 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, veden tiheys
- $D_1 = 0.024 \pm 0.00005$ m, putken halkaisija
- $g = \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$, gravitaatiokiihtyvyys
- $\mu = 0.001 \frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}}$, viskositeetti
- $\delta Q_M = 0,001 \frac{1}{\text{s}}$, anturilla mitatun tilavuusvirran arvioitu virhe
- $\delta \Delta p = \delta \Delta p_m = 10$ Pa, mitatun paineen arvioitu virhe

4.1 Kuristuslaippa

Kuristuslaippaa koskevissa laskuissa käytän alla olevan listan mukaisia arvoja vakioarvoina:

- $D_2 = 0,010$ m, laipan aukon halkaisija
- $C_d = 0,62$, laipan kuristuskerroin

4.1.1 Laskettu tilavuusvirta

Tilavuusvirta Q_L lasketaan yhtälöllä 5

$$Q_L = C_d \cdot \pi \left(\frac{1}{2}d_2\right)^2 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho \left(1 - \left(\frac{D_2^4}{D_1^4}\right)\right)}} \cdot 1000, \quad (9)$$

johon sijoittamalla paine-eron Δp arvot saadaan lopullinen tilavuusvirran arvo. Yllä oleva yhtälö on kerrottu luvulla 1000, jotta saataisiin yksiköiksi litraa per sekunti. Laskin tilavuusvirran Q_L arvot Mathematica 6 -ohjelmalla ja saadut arvot mitattua paine-eroa kohden ovat taulukossa 1. Plottasin Origin Pro -ohjelmalla mitatut ja lasketut tilavuusvirran arvot kuvaan 6.

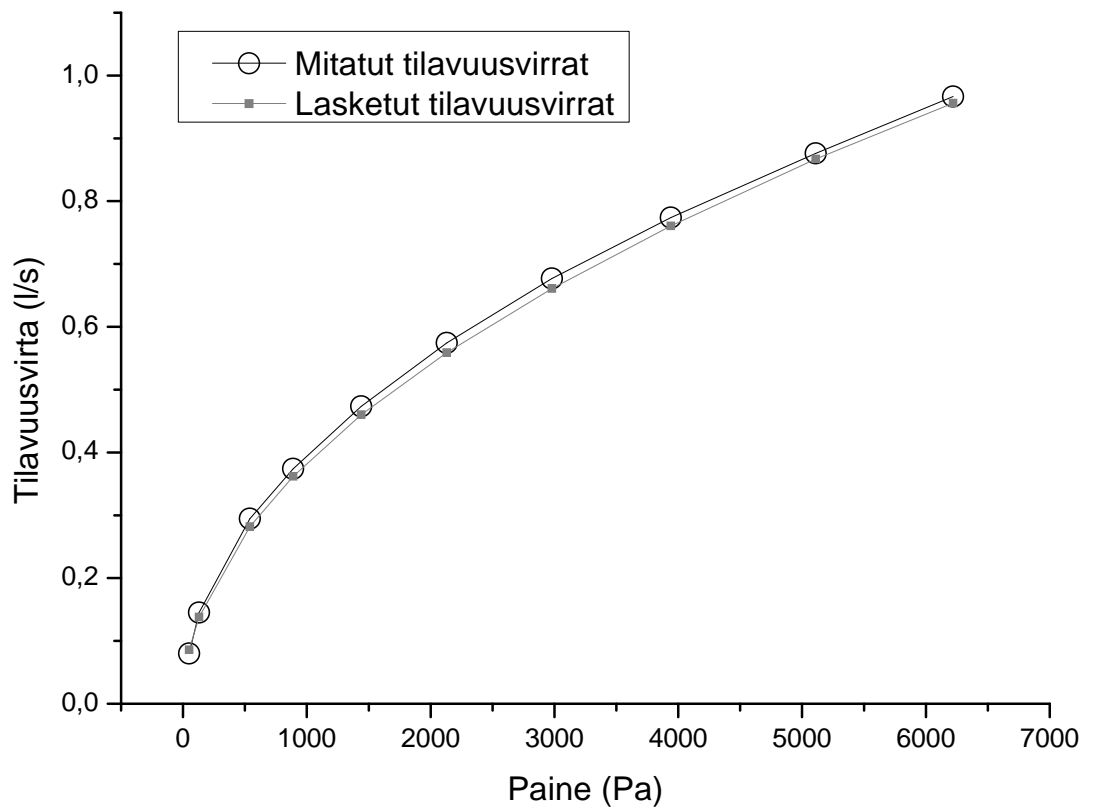
Virhe tilavuusvirralle lasketaan yleisestä virheenetenemiskaavasta

$$\begin{aligned} \delta Q_L &= \sqrt{\left(\frac{\partial Q_L}{\partial \Delta p} \delta \Delta p\right)^2 + \left(\frac{\partial Q_L}{\partial D_1} \delta D_1\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{1}{8} \pi C_d D_2^2 \sqrt{\frac{2}{\rho \Delta p \left(1 - \frac{D_2^4}{D_1^4}\right)}} \delta \Delta p\right)^2 + \left(C_d \pi \frac{D_2^6}{D_1^5} \sqrt{\frac{\Delta p}{2\rho \left(1 - \frac{D_2^4}{D_1^4}\right)^3}} \delta D_1\right)^2}. \end{aligned} \quad (10)$$

Laskin yhtälön 10 arvot eri paine-eroarvoilla Mathematicalla. Kuristuslaippaa koskevat laskut ovat liitteessä 2 ja tulokset ovat taulukossa 1.

Taulukko 1: Kuristuslaipalla saadut paine-erot Δp sekä mitatut Q_M ja lasketut Q_L tilavuusvirrat

Δp (Pa)	Q_M (l/s)	$Q_L \pm \delta Q_L$ (l/s)
6220	0.96650	0.956 \pm 0.004
5110	0.87620	0.866 \pm 0.004
3940	0.7740	0.761 \pm 0.004
2980	0.6770	0.662 \pm 0.003
2130	0.57430	0.559 \pm 0.003
1440	0.47330	0.460 \pm 0.003
890	0.37400	0.362 \pm 0.003
540	0.29460	0.282 \pm 0.003
130	0.14500	0.138 \pm 0.006
50	0.0801	0.086 \pm 0.009



Kuva 6: Plotatut taulukon 1 magneettisella mittarilla mitatut Q_M ja lasketut Q_L tilavuusvirran arvot paine-eron Δp funktiona

4.1.2 Reynoldsin luku

Reynoldsin luvun lasken yhtälöllä 11 käyttäen tilavuusvirran arvona anturilla mitattua tilavuusvirtaa Q_M (taulukko 2) :

$$Re = \frac{4\rho Q_M}{1000\mu\pi D_1}, \quad (11)$$

johon sijoitettuna tilavuusvirran mitattuja arvoja Q_M saadaan laskettua yhtälön arvo. Tilavuusvirta Q_M on mitattu yksikössä litra per sekunti, joten vasemman puolen yhtälön osoittajaan oli lisättävä kerroin 1000, jotta tilavuusvirta vastaisi yksikköä metri per sekunti.

Myös Reynoldsin luvun virhe lasketaan yleisellä virheen etenemiskaavalla

$$\begin{aligned} \delta Re &= \sqrt{\left(\frac{\partial Re}{\partial D_1}\delta D_1\right)^2 + \left(\frac{\partial Re}{\partial Q_M}\delta Q_M\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{-4\rho Q_M}{1000\mu\pi D_1^2}\delta D_1\right)^2 + \left(\frac{4\rho}{1000\mu\pi D_1}\delta Q_M\right)^2}, \end{aligned} \quad (12)$$

johon sijoittamalla saadut tilavuusvirran arvot Q_M saadaan laskettua virheet. Mathematicalla laskemani Reynoldsin luvut ja niiden virheet ovat liitteessä 2 ja tulokset taulukossa 2.

4.1.3 Häviökorkeus ja häviökerroin

Yhtälöstä 7 voidaan määritellä häviökorkeuden yhtälö

$$h_m = \frac{\Delta p_m}{g \cdot \rho}. \quad (13)$$

Kun lasketaan yllä oleva yhtälö saaduilla paine-eron Δp_m arvoilla, saadaan arvot häviökorkeudelle. Virhe lasketaan yleisellä virheen etenemiskaavalla

$$\delta h_m = \sqrt{\left(\frac{\partial h_m}{\partial \Delta p_m}\delta \Delta p_m\right)^2} = \frac{\delta \Delta p_m}{g \cdot \rho}. \quad (14)$$

Kertahäviökerroin lasketaan yhtälöllä 7 käyttäen nopeuden arvona keskimääräistä virtausnopeutta $v = \frac{4Q_M}{\pi D_1^2}$

$$\begin{aligned} K &= \frac{\Delta p_m}{\frac{1}{2}\rho\left(\frac{4Q_M}{\pi D_1^2}\right)^2} \\ &= \frac{2 \cdot \Delta p_m \cdot \pi^2 \cdot D_1^4}{16 \cdot \rho \cdot \left(\frac{Q_M}{1000}\right)^2}, \end{aligned} \quad (15)$$

johon sijoittamalla mitatut paine-eron Δp_m arvot häviökertoimen arvot.

Häviökertoimen virhe lasketaan yleisellä virheenetenemiskaavalla:

$$\begin{aligned}\delta K &= \sqrt{\left(\frac{\partial K}{\partial \Delta p_m} \delta \Delta p_m\right)^2 + \left(\frac{\partial K}{\partial \frac{Q_M}{1000}} \frac{\delta Q_M}{1000}\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{\pi^2 \cdot D_1^4}{8 \cdot \rho \cdot Q_M^2} \delta \Delta p_m\right)^2 + \left(\frac{\Delta p_m \cdot \pi^2 \cdot D_1^4}{4 \cdot \rho \left(\frac{Q_M}{1000}\right)^3} \delta \left(\frac{Q_M}{1000}\right)\right)^2},\end{aligned}\quad (16)$$

missä siis tilavuusvirran termit ovat yksikössä litraa per sekunti ja ne on jaettu luvulla 1000, jotta ne voidaan lausua yksikössä kuutiometriä per sekunti. Häviökertoimen virhe lasketaan jokaiselle taulukon 2 paine-ero-tilavuusvirta -arvoparille. Häviökorkeuden ja -kertoimen laskut ovat liitteessä 2 ja arvot taulukossa 2.

Taulukko 2: Kuristuslaipalla saadut häviöstä aiheutuneet paine-erot Δp_m , tilavuusvirrat Q_M , häviökorkeus h_m , häviökerroin K ja Reynoldsin luku Re

Δp_m (Pa)	Q_M (l/s)	$h_m \pm \delta h_m$	$K \pm \delta K$	$Re \pm \delta Re$
3210	0.95850	0.3279 \pm 0,0011	1.433 \pm 0.006	51170 \pm 120
2690	0.8770	0.2748 \pm 0,0011	1.434 \pm 0.007	46430 \pm 120
2090	0.77940	0.2135 \pm 0,0011	1.411 \pm 0.008	41270 \pm 110
1510	0.67220	0.1542 \pm 0,0011	1.37 \pm 0.01	35600 \pm 100
1100	0.57050	0.1124 \pm 0,0011	1.39 \pm 0.14	30210 \pm 90
760	0.47330	0.0776 \pm 0,0011	1.39 \pm 0.02	25060 \pm 80
500	0.39030	0.0511 \pm 0,0011	1.35 \pm 0.03	20670 \pm 70
260	0.29140	0.0266 \pm 0,0011	1.26 \pm 0.05	15430 \pm 70
90	0.13690	0.0092 \pm 0,0011	1.97 \pm 0.03	7250 \pm 60
50	0.08100	0.0051 \pm 0,0011	3.13 \pm 0.07	4290 \pm 60

4.2 Venturiputki

Venturiputkea koskevissa laskuissa huomioon listassa olevat arvot vakioiksi:

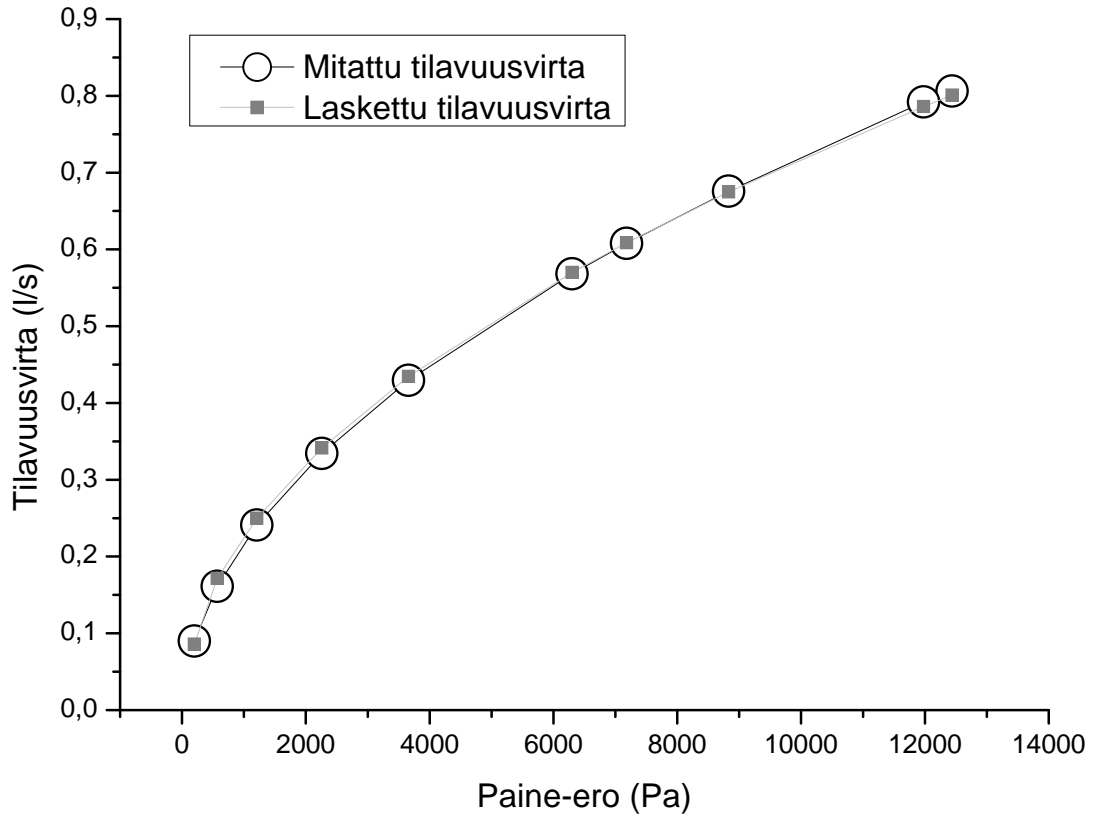
- $C_d = 0,98$, venturiputken kuristuskerroin
- $d_2 = 0,014$ m, venturiputken halkaisija

Kuten kuristuslaipan tapauksessa, myös venturiputken tapauksessa lasketaan tilavuusvirta yhtälöllä 9 ja sen virhe yhtälöllä 10. Lasketut tilavuusvirran arvot ovat taulukossa 3, kuten paine-eron ja mitatun tilavuusvirran arvotkin. Plottasin taulukon 3 mitatut ja lasketut tilavuusvirran arvot kuvaan 7.

Reynoldsin luku lasketaan yhtälöllä 11 ja sen virhe yhtälöllä 12. Samoin myös häviökorkeus yhtälöllä 13, sen virhe yhtälöllä 14 ja häviökerroin 15 sekä sen virhe yhtälöllä 16. Laskut ovat liitteessä 3 ja tulokset taulukossa 4. Kuvaan 8 on plotattu sekä kuristuslaipan että venturiputken häviökertoimien arvot tilavuusvirran suhteen.

Taulukko 3: Venturiputkella saadut paine-erot sekä mitatut ja lasketut tilavuusvirrat

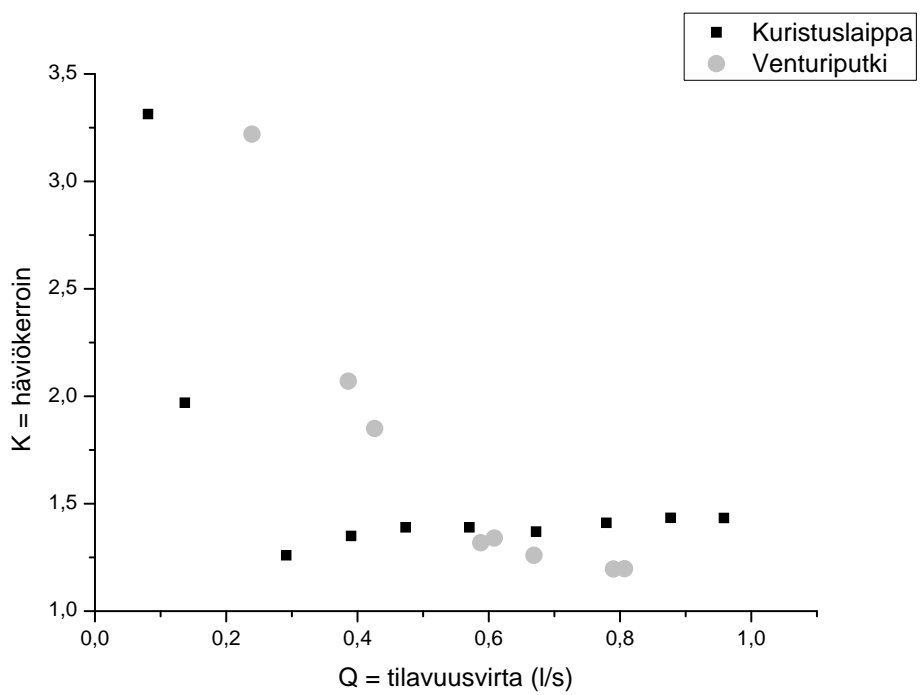
Δp (Pa)	Q_M (l/s)	$Q_L \pm \delta Q_L$ (l/s)
12440	0.80630	0.8010 ± 0.0006
11980	0.79200	0.7861 ± 0.0006
8830	0.67600	0.6749 ± 0.0006
7180	0.6079	0.6086 ± 0.0006
6300	0.56820	0.5701 ± 0.0006
3660	0.42960	0.4345 ± 0.0007
2260	0.3343	0.3414 ± 0.0008
1210	0.2411	0.2498 ± 0.0011
570	0.1613	0.171 ± 0.002
200	0.08990	0.102 ± 0.003



Kuva 7: Venturiputki, plotatut taulukon 3 magneettisella mittarilla mitatut Q_M ja lasketut Q_L tilavuusvirran arvot paine-eron Δp funktiona

Taulukko 4: Venturiputkella saadut häviöstä aiheutuneet paine-erot Δp_m , tilavuusvirrat Q_M , häviökorkeus h_m , häviökerroin K ja Reynoldsin luku Re

Δp_m (Pa)	Q_M (l/s)	$h_m \pm \delta h_m$	$K \pm \delta K$	$Re \pm \delta Re$
1900	0.80700	$0.1941 \pm 0,0011$	1.197 ± 0.007	42730 ± 110
1820	0.79010	$0.1859 \pm 0,0011$	1.196 ± 0.008	41830 ± 110
1380	0.6690	$0.1410 \pm 0,0011$	1.26 ± 0.01	35400 ± 100
1210	0.60860	$0.1236 \pm 0,0011$	1.34 ± 0.012	32220 ± 90
1110	0.58780	$0.1134 \pm 0,0011$	1.318 ± 0.013	31120 ± 90
820	0.42610	$0.0838 \pm 0,0011$	1.85 ± 0.03	22560 ± 80
750	0.38590	$0.0766 \pm 0,0011$	2.07 ± 0.03	20430 ± 70
450	0.23930	$0.0460 \pm 0,0011$	3.22 ± 0.08	12670 ± 60
260	0.16200	$0.0266 \pm 0,0011$	4.1 ± 0.2	8580 ± 60
110	0.08300	$0.0112 \pm 0,0011$	6.5 ± 0.7	4390 ± 60



Kuva 8: Kuristuslaipan ja venturiputken häviökertoimen arvot tilavuusvirran suhteen

4.3 Pitot-putki

4.3.1 Maksimaaliset virtausnopeudet

Ensimmäisessä Pitot-putkimittauksessa mittasimme keskilinjalta virtauksen maksimaalisia tilavuusvirtoja ja niitä vastaavia paine-eroja. Mitatusta tilavuusvirrasta määriteltävä nopeus lasketaan yhtälöllä

$$v_0 = \frac{Q}{1000 \cdot A} = \frac{4Q}{1000\pi D_1^2}, \quad (17)$$

missä siis A on putken halkaisija. Yhtälössä on jakajan kertojana 1000, jotta saataisiin tilavuusvirran yksiköksi kuutiometriä per sekuntia ja sitä myötä nopeuden yksiköksi metriä per sekunti. Virhe tälle määrätään virheenetenemisyhtälöstä

$$\delta v_0 = \sqrt{\left(\frac{-8Q}{1000\pi D_1^3} \delta D_1\right)^2 + \left(\frac{4}{1000\pi D_1^2} \delta Q\right)^2}. \quad (18)$$

Pitotputken teoreettinen maksiminopeus lasketaan yhtälöllä 8 ja käyttäen mitattuja paineeron arvoja. Ja sille virhe saadaan yleisestä virheenetenemislaita

$$\delta v_1 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2}{\rho \Delta p}} \delta \Delta p. \quad (19)$$

Pitot-putkea koskevat laskut ovat liitteessä 4 ja tulokset taulukossa 5

Taulukko 5: Pitotputkella mitatut paine-erot Δp_m , mitatut tilavuusvirrat Q_M , mitatut maksimaaliset virtausnopeudet v_0 ja paine-erosta lasketut maksimaaliset nopeudet v_1

Δp_m (Pa)	Q_M (l/s)	$v_0 \pm \delta v_0$ (m/s)	$v_1 \pm \delta v_1$ (m/s)
2690	0.90870	2.009 \pm 0,009	2.3218 \pm 0.0014
2170	0.80780	1.786 \pm 0,008	2.085 \pm 0.002
1650	0.70160	1.551 \pm 0,007	1.818 \pm 0.002
1270	0.60530	1.338 \pm 0,006	1.595 \pm 0.002
890	0.50140	1.108 \pm 0,006	1.336 \pm 0.003
530	0.38350	0.848 \pm 0,005	1.031 \pm 0.004
260	0.26160	0.578 \pm 0,004	0.722 \pm 0.005
80	0.12750	0.282 \pm 0,003	0.400 \pm 0.008
40	0.07765	0.172 \pm 0,003	0.283 \pm 0.012

4.3.2 Nopeusprofiili

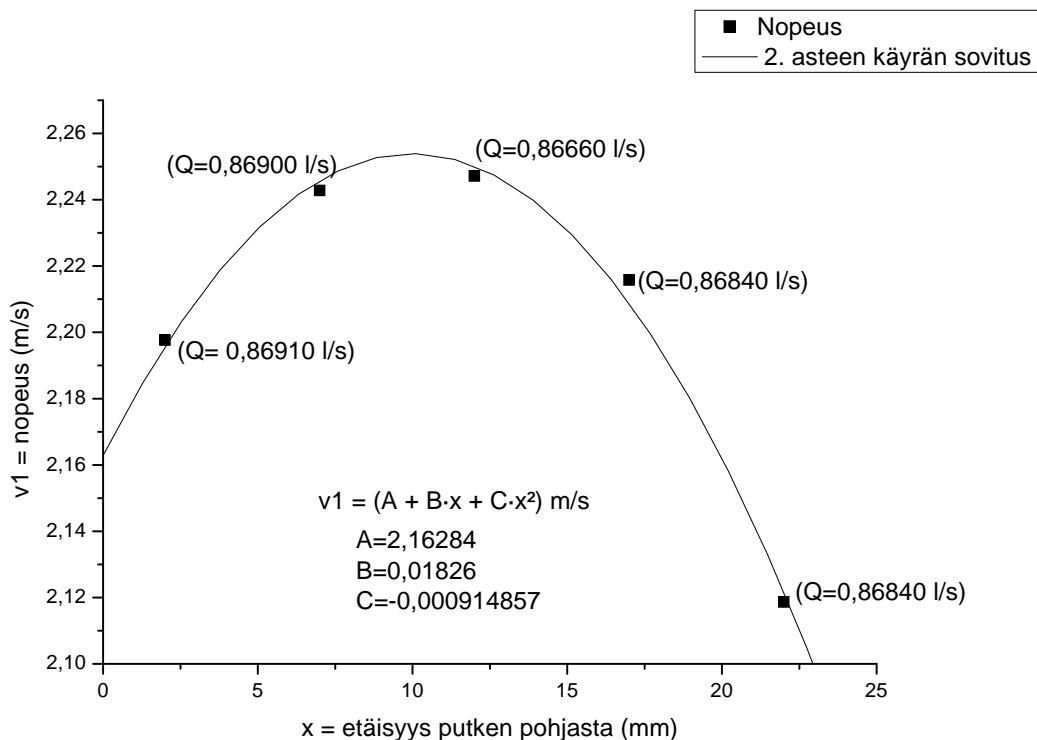
Viimeisimmässä mittauksessa olisi pitänyt säätää tilavuusvirta maksimaaliseksi ja pitää se vakiona mitaten pitot-putken ollessa eri korkeuksilla paine-eroja. Tämän sijaan me asetimme pitot-putken eri korkeuksille ja mittasimme jokaiselta korkeudelta kolmella eri tilavuusvirran arvolla paine-eroja, jotka löytyvät liitteestä 1, kohdasta ”Koe3, Pitotputki” taulukosta ”Nopeusprofiili”.

Huomioin nyt kutakin mitattua korkeutta kohden suurimman tilavuusvirtauden ja sitä vastaavan paine-eron. Jokaista korkeutta vastaavan virtausnopeuden lasken yhtälöllä 8 mitattujen paine-erojen avulla. Mitatut pitot-putken korkeudet, sitä vastaavat mitatut suurimmat tilavuusvirrat, paine-erot ja siitä lasketut virtausnopeudet ovat taulukossa 6.

Taulukko 6: Pitotputkella mitatut korkeudet l , mitatut tilavuusvirrat Q_M , paine-erot Δp ja paine-erosta lasketut virtausnopeudet v_1

l (mm)	Q_M (l/s)	Δp_m (Pa)	v_1 (m/s)
2	0,86910	2410	2.1977 ± 0.0015
7	0,86900	2510	2.2428 ± 0.0015
12	0,86660	2520	2.2472 ± 0.0015
17	0,86840	2450	2.2158 ± 0.0015
22	0,86840	2240	2.1187 ± 0.0015

Plottasin Origin Pro:lla taulukon 6 korkeuden l ja nopeuden v_1 arvot kuvaajaan 9 sekä sovitin pisteisiin 2. asteen käyrän. Kuvassa hahmoteltu nopeusprofiili on vain suuntaa-antava, sillä eri korkeuksia vastaa hieman eri tilavuusvirran arvo, ne ovat kuitenkin välillä $0,86660(1/s) < Q < 0,86910(1/s)$.



Kuva 9: Pitot-putken nopeusprofiili on hahmoteltu viidellä eri korkeutta vastaavalla paine-erosta lasketulla virtausnopeuden arvolla korkeuden funktiona ja niihin sovitetulla 2. asteen kuvaajalla. Suluissa kussakin tapauksessa anturilla mitattu tilavuusvirtaus.

5 Johtopäätökset

Työssä mitattiin putkivirtausmittauslaitteistolla anturien avulla tilavuusvirtoja ja paine-eroja käyttäen kuristuslaippaa, venturiputkea sekä pitot-putkea. Taulukossa 1 olevat kuristuslaipan mitatut ja lasketut tilavuusvirran arvot eroavat toisistaan vain hieman. Silmämääräisestikin voidaan kuvaajasta 6 todeta, että mitattu tilavuusvirran arvo on jokaista mitattua paine-eron arvoa kohden hiukan laskettua tilavuusvirran arvoa suurempi. Voidaan myös arvioida, että niiden ero $Q_M - Q_L$ ei ylitä sadasosa litraa per sekunti.

Myös venturiputken tapauksessa mitatut ja lasketut tilavuusvirran arvot ovat hyvin lähellä toisiaan, kuten kuvasta 7 voidaan päätellä. Silmämääräisesti katsottuna voidaan kuitenkin arvioida, että pienemmillä tilavuusvirran arvoilla mitatut tilavuusvirran arvot ovat hieman laskettuja arvoja pienempiä ja suurilla tilavuusvirran arvoilla mitatut arvot ovat hiukan suurempia kuin lasketut. Näillä tilavuusvirtojen avulla käytetyllä putkivirtausmittauslaitteistolla voitaisiin yleistää, että käytetty teoreettinen yhtälö tilavuusvirralle vastaa mainiosti mitattuja arvoja sekä kuristuslaipan että venturiputken tapauksessa.

Kuvaajassa 8 on esitetty lasketut häviökertoimen arvot tilavuusvirran suhteen sekä kuristuslaipan että venturiputken tapauksessa. Alle puoli litraa sekunnissa nopeudella kulkevalle virtaukselle näyttäisi häviökerroin olevan kuristuslaipalle pienempi kuin venturiputkelle. Kun tilavuusvirta on suurempi kuin puoli litraa sekunnissa, on kuristuslaipan häviökerroin suurempi. Kuristuslaipalle häviökerroin näyttäisi laskevan jyrkästi pienillä tilavuusvirran arvoilla noin 0,2-0,3 litra per sekunti -alueelle asti, sen jälkeen häviökerroin lähtee nousemaan hitaasti. Sitä vastoin venturiputkelle häviökerroin laskee aina tilavuusvirran suurenessa, joskin lasku on jyrkempää pienillä tilavuusvirroilla ja loivenee tilavuusvirran kasvaessa. Jos halutaan mitata virtauksen nopeutta aiheuttaen mahdollisimman pieni häviö, näyttäisi olevan kannattavampaa käyttää kuristuslaippaa pienillä tilavuusvirroilla ja suurilla tilavuusvirroilla kannattaisi ottaa käyttöön venturiputki.

Pitot-putken tapauksessa määrittelin ensin maksimaalisen virtausnopeuden, eli nopeuden putken keskikohdalta, mitatusta tilavuusvirtauksen arvoista saaden virtausnopeudeksi v_0 . Sitten laskin virtausnopeuden mitatuista paine-eron arvoista saaden nopeudeksi v_1 . Sekä mitatut että lasketut nopeudet ovat taulukossa 5, josta voidaan huomata, että lasketut nopeudet olivat aina suurempia kuin mitatut, eli $v_0 < v_1$. Tämä virhe voi johtua siitä, että pitot-putki ei ollut täsmälleen keskellä putkea tai että se ei ollut täsmälleen putken suuntainen, jolloin tieteenkin putkeen kohdistuva paine on pienempi kuin keskellä putkea olevan pitot-putken stagnaatiopaine olisi. Lisäksi pitot-putken tyvessä ollut karva ja ilmakupla ovat saattaneet aiheuttaa häiriötä virtauksessa. On myös mahdollista, ettei virtaus ole täydellisesti kehittynyt pitot-putken kohdalle, sillä putkivirtausmittauslaitteistossa oli putken mutka silmämääräisesti arvioituna noin 30 cm päässä pitot-putkesta. Jotta pitot-putkella voisi mitata häiriötöntä virtausta, pitäisi nesteen virrata suoraa putkea myöten ainakin välimatka, joka on 20-kertainen putken halkaisijan suhteen, eli tässä tapauksessa $20 * 2,4\text{cm} = 48\text{cm}$.

Pitot-putken nopeusprofiili on hahmoteltu kuvaan 9. Huolimatta siitä, että eri korkeuksilla mitatut tilavuusvirtausnopeudet hieman erosivat toisistaan, osuivat nopeusarvot silti kutakuinkin samalle paraabelille, kuten voi nopeusprofiilin olettaakin olevan. Mutta kuvaajan mukaan virtauksen nopeus putken alaosassa olisi jopa noin $2,16\frac{\text{m}}{\text{s}}$, mikä tuskin pitää paikkaansa. Tästä voitaisiin päätellä, ettei pitot-putki ole luotettava väline virtausnopeuden mittaamiseen ainakaan lähellä seinämää.

Liitteet

Liite 1. Mittauspöytäkirja

Liite 2. Kuristuslaippalaskut Mathematicalla

Liite 3. Venturiputkilaskut Mathematicalla

Liite 4. Pitot-putkilaskut Mathematicalla

Viitteet

[1] F. M. White. *Fluid Mechanics*. McGraw-Hill, 5. edition, 2008. ISBN 0-07-240217-2.