

Teemu Kinnunen

Insinööriytyö

Vastuskertoimen määrittäminen

Alkulause

Tämä insinööriyö tehtiin Metropolia Ammattikorkeakoulu Oy:lle. Haluan erityisesti kiittää työn ohjaajaa laboratorioinsinööri Tomi Hämäläistä työn aikana antamistaan neuvoista ja ideoista. Haluan myös kiittää laboratorioassistentti Tuomas Teräsvuorta voima-anturin kiinnityksen tekemisestä. Haluan myös kiittää Apollonia Brandstackia tuesta ja avusta työn tekemisen aikana.

Helsingissä 5.5.2011

Teemu Kinnunen

Tekijä Otsikko	Teemu Kinnunen Vastuskertoimen määrittäminen
Sivumäärä Aika	48 sivua + 5 liitettä 5.5.2011
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Kone- ja tuotantotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Energia- ja ympäristötekniikka
Ohjaaja	laboratorioinsinööri Tomi Hämäläinen
<p>Tämän insinööriyön tarkoituksena oli luoda katsaus virtauksessa olevaan kappaleeseen kohdistuvan vastusvoiman vastuskertoimen määrittämiseen. Vastusvoiman suuruus riippuu kappaleen pinta-alasta, dynaamisesta paineesta ja vastuskertoimesta. Vastuskerroin riippuu virtauksen luonteesta, kappaleen pinnankarheudesta ja kappaleen muodosta.</p> <p>Insinööriyön teoriaosuudessa perehdyttiin pääasiassa Frank M. Whiten ja Yunus A. Çengel'in teoksiin vastuskertoimen teoriasta, kooten niistä yhtenäisen suomenkielinen tiivistelmä.</p> <p>Mittausosuus aloitettiin kappaleiden muotojen valinnalla. Kappaleiden muodoiksi valittiin levyistä valmistettu ympyrä, tasasivuinen kolmio ja neliö. Tutkittavat kappaleet valmistettiin kahdessa eri paksuudessa ja kolmessa eri leveydessä. Tuulitunnelimitoituksissa mitattiin vastusvoiman suuruutta, josta ratkaistiin vastuskertoimen suuruus.</p> <p>Tulosten vertailuosuudessa verrattiin kirjallisuudesta löytyviä vastuskertoimen arvoja mitattuihin arvoihin.</p> <p>Tutkimuksissa mitattujen vastusvoimien arvojen perusteella laskettujen vastuskertoimien arvot poikkesivat kirjallisuuden vastaavista arvoista maksimissaan 7,8 %, kun eri kirjallisuuslähteistä löytyvät arvot poikkeavat noin 7 % verran toisistaan.</p>	
Avainsanat	vastuskerroin, vastusvoima, tuulitunneli, rajakerros

Author Title	Teemu Kinnunen Quantification of drag coefficient
Number of Pages Date	48 pages + 5 appendices 5 May 2010
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Mechanical Engineering
Specialisation option	Energy and Environmental Engineering
Instructor	Tomi Hämäläinen, Laboratory Engineer
<p>The purpose of this thesis was to create an overview to the quantification of the drag coefficient and drag force of an object in the flow. The magnitude of the drag force depends on the area of an object, the dynamic pressure and the drag coefficient. The drag coefficient depends on the type of the flow, the surface roughness and the shape of an object.</p> <p>The theory part of the thesis summarizes the determination of the drag coefficient from literature mainly written by Frank M. White and Yunus A. Çengel.</p> <p>The examinational part began by selecting the objects shapes. The selected shapes are flat circle, square and equilateral triangle. The objects were manufactured in two thicknesses and three sizes. The wind tunnel tests measured the drag force quantity from which the magnitude of the drag coefficient was solved.</p> <p>The result part compares the measured values of the drag coefficient to the values from the literature.</p> <p>The measured values of the drag coefficient differ from the values of the literature at a maximum of 7.8 %. The values in White's and Çengel's books differ 7 % from each other.</p>	
Keywords	drag coefficient, drag force, wind tunnel, boundary layer

Sisällys

Symboliluettelo

1	Johdanto	1
2	Peruskäsitteitä	2
2.1	Vastusvoima	2
2.2	Virtauksen luonne	3
2.2.1	Stokesin virtaus	3
2.2.2	Laminaarinen virtaus	3
2.2.3	Turbulenttinen virtaus	3
2.2.4	Siirtymä-alue	4
2.3	Reynoldsin luku	4
3	Rajakerroksen määrittäminen	6
3.1	Rajakerros	6
3.2	Rajakerroksen syrjäyttämä massavirta	7
3.2.1	Laminaarinen virtaus	7
3.2.2	Turbulenttinen virtaus	8
3.3	Rajakerroksen liikemäärän tiheys	8
3.3.1	Laminaarinen virtaus	9
3.3.2	Turbulenttinen virtaus	10
4	Kitkavastusvoima	11
4.1	Kitkavastusvoiman perusteet	11
4.2	Vastusvoiman teoriaa	12
4.3	Kitkavastuskerroin laminaarisessa virtauksessa	12
4.4	Kitkavastuskerroin turbulenttisessa virtauksessa	14
5	Painevastusvoima	16
5.1	Perusteet	16
5.2	Virtauksen irtoaminen kappaleen pinnasta	17
5.3	Laminaarinen integraaliteoria	20
6	Kokonaisvastusvoima	22
7	Kirjallisuuden vastuskertoimen arvoja	24

8	Mittaukset	25
8.1	Mittausjärjestelyt	25
8.2	Mitattavat kappaleet	25
8.3	Tuulitunneli	26
8.4	Voima-anturi	30
8.4.1	Venymäliuska	31
8.4.2	Futek LSB200 JR S-series	32
8.5	Virtausnopeuden mittaus	33
8.6	Lämpötilan mittaus	34
9	Tulokset	36
9.1	Tulosten kirjaus	36
9.2	Leveyden vaikutus vastuskertoimeen	36
9.2.1	Neliöt	37
9.2.2	Ympyrät	39
9.2.3	Tasasivuiset kolmiot	41
9.2.4	Analyysi	43
9.3	Paksuuden vaikutus vastuskertoimen arvoon	43
9.3.1	Tasasivuinen kolmio ja neliö	44
9.3.2	Ympyrä	46
9.4	Tulosten vertaaminen	46
10	Yhteenveto	47
	Lähteet	48
	Liitteet	
	Liite 1. Kappaleiden mitat	
	Liite 2. Tekniset tiedot futek LSB 200	
	Liite 3. Taulukko A–9	
	Liite 4. Mittauspöytäkirjat	
	Liite 5. Vastuskertoimien yhdistäminen	

SYMBOLILUETTELO

A	pinta-ala
b	leveys
C_{kitka}	paikallinen kitkakerroin
C_V	vastuserroin
$C_{V,kitka}$	kitkavastuserroin
$C_{V,paine}$	painevastuserroin
D_h	hydraulinen halkaisija
E	kimmokerroin
$E_{jännite}$	sillan jännite
e_0	sillan ulos antama jännite
F	voima
F_V	vastusvoima
$F_{V,kitka}$	kitkavastusvoima
$F_{V,paine}$	painevastusvoima
H	muotokerroin
h	paksuus
k_s	anturikerroin
L	pituus
P	poikkileikkauksen märkäpiiripituus
Re	Reynoldsin luku
Re_L	Reynoldsin luku pituuden mukaan
$Re_{siirtymäalue}$	siirtymäalueen Reynoldsin luku
Re_x	Reynoldsin luku suuntaan x
s	sivun pituus
U	vapaan virtauksen virtausnopeus
u	virtausnopeus rajakerroksessa
$\left(\frac{u}{U}\right)_{turb}$	$\frac{u}{U}$ suhde turbulentsissa virtauksessa
V_s	virtausnopeus
v	nopeus
x	etäisyys, suuntaan x
y	etäisyys, suuntaan y
δ	rajakerroksen paksuus

δ^*	rajakerroksen syrjäyttämä massavirta
ε_0	suhteellinen venymä
ϵ	pinnankarheus
θ	liikemäärän tiheys
μ	viskositeetti
ν	kinemaattinen viskositeetti
ρ	tiheys
τ	leikkausjännitys
$\tau_{seinä}$	leikkausjännitys seinässä
$\tau_{seinä,turb}$	leikkausjännitys seinässä, turbulenttisessa virtauksessa

1 Johdanto

Insinööriyön tavoitteena on virtauksessa olevaan kappaleeseen kohdistuvan vastusvoiman vastuskertoimen määrittäminen. Valitsin kyseessä olevan aiheen, koska kirjallisuudesta löytyvissä arvoissa on keskenään eroavaisuuksia. Tässä insinööriyössä paneudutaan levymäisten kappaleiden vastuskertoimien määrittämiseen eri virtausnopeuksilla.

Työ toteutetaan kolmessa osassa. Ensimmäisessä osassa eli teoriaosuudessa paneudutaan kirjallisuudesta löytyviin teorioihin vastuskertoimesta ja sen määrittämisestä. Toisessa osassa tehdään mittauksia erimuotoisilla ja -kokoisilla kappaleilla energiatekniikan laboratorion tuulitunnelissa, jossa vastuskerroin määritetään kokeellisesti vastusvoiman kautta. Kolmannessa osassa eli tulosten vertausosassa verrataan keskenään kirjallisuudesta löytyviä arvoja mitattuihin arvoihin.

2 Peruskäsitteitä

2.1 Vastusvoima

Väliaine kohdistaa kappaleeseen voiman, joka vastustaa kappaleen liikettä väliaineessa, tapahtui tämä liike sitten kappaletta vastaan kappaleen ollessa paikoillaan ja väliaineen virratessa kappaletta vastaan tai kappaleen liikuessa ja väliaineen ollessa paikallaan. Usein arkikielessä kutsumme tätä liikettä vastustavaa voimaa ilmanvastukseksi. Samainen liikettä vastustava voima ilmenee myös kappaleen ollessa esimerkiksi vedessä tai muussa väliaineessa. Näin ollen termin ilmanvastuksen sijasta käytetään termiä vastusvoima.

Väliaineen tuottama kokonaisvastusvoima koostuu kahdesta eri vastusvoimasta. Ensimmäinen vastusvoimista on kitkan aiheuttama vastusvoima, joka aiheutuu, kun väliaine liikkuu kappaleen pintaa pitkin. Toinen vastusvoimista on paineen aiheuttama vastusvoima, joka perustuu paine-eroon kappaleen etu- ja takapuolella.

Vastusvoiman suuruus riippuu kappaleen pinta-alasta, dynaamisesta paineesta ja vastuskertoimesta (kaava 1) [1, s. 101]. Vastuskerroin riippuu virtauksen luonteesta, kappaleen pinnankarheudesta ja kappaleen muodosta.

$$F_V = C_V \cdot A \cdot \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (1)$$

F_V on vastusvoima

C_V on vastuskerroin

A on kappaleen virtausta kohtisuorassa oleva pinta-ala

$\frac{1}{2} \rho v^2$ on väliaineen dynaaminen paine

ρ on väliaineen tiheys

v on väliaineen virtausnopeus

2.2 Virtauksen luonne

Virtauksen luonne vaihtelee virtaavan aineen ja virtausnopeuden mukaan. Näitä virtaustapoja on neljä erilaista: Stokesin virtaus, laminaarinen virtaus, siirtymäalue ja turbulenttinen virtaus – laminaarisen ja turbulenttisen virtauksen ollessa edellä mainituista tärkeimpiä. Reynoldsin luvun avulla voidaan karkeasti määrittää, minkä tyyppinen virtaus on kulloinkin kyseessä.

2.2.1 Stokesin virtaus

Stokesin virtaus on virtauksen luonne, jota esiintyy suuren viskositeetin omaavilla nesteillä pienissä nopeuksissa ja pienillä virtauksen poikkipinta-aloilla. Jähmeän hunajan valuttaminen teehen on hyvä esimerkki Stokesin virtauksesta. Stokesin virtauksen Reynoldsin luku on pienempi kuin yksi. [2, s. 476.] Stokesin virtauksen pienestä Reynoldsin luvusta johtuen, ilman ollessa väliaineena, tulee virtausnopeuden olla hyvin pieni.

2.2.2 Laminaarinen virtaus

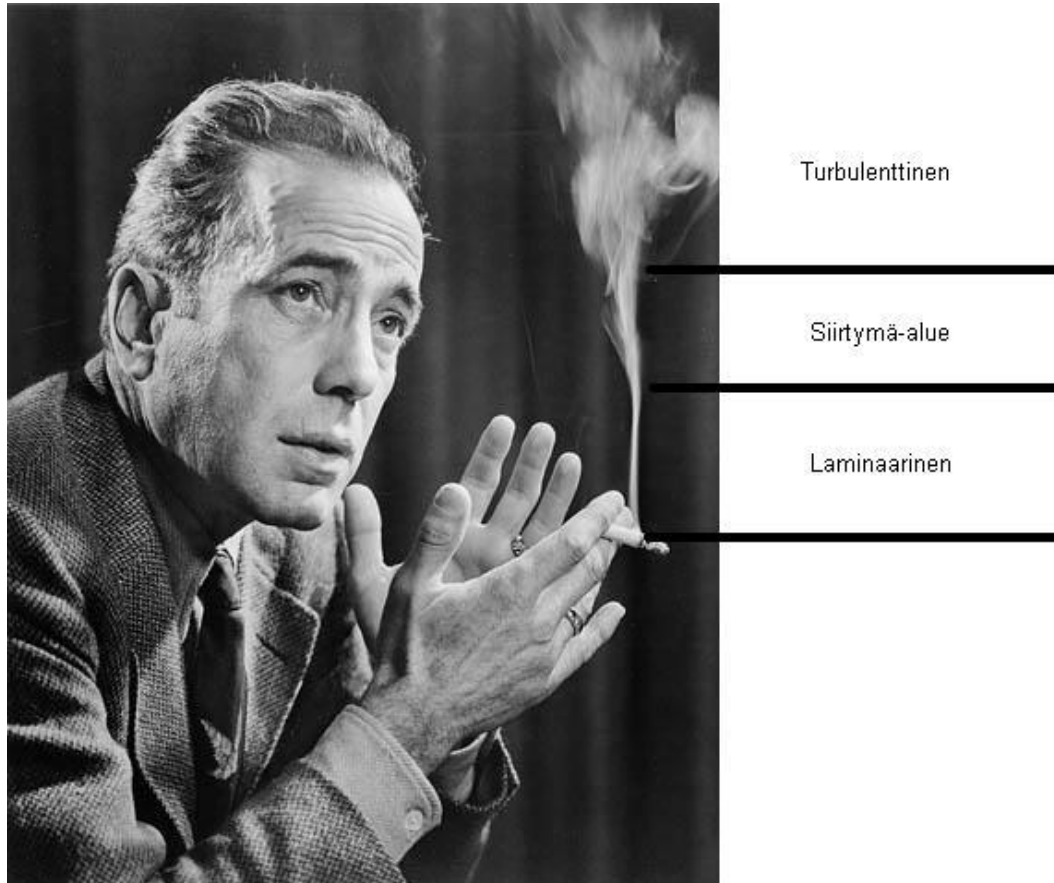
Laminaarisella virtauksella tarkoitetaan virtausta, jonka virtausviivat menevät laminaarisissa kerroksissa virtauksen suuntaisesti eivätkä sekoitu keskenään [3, s. 355]. Hyvän kuvan laminaarisesta virtauksesta saa, kun ajattelee kuinka tupakansavu lähtee tupakasta (kuva 1).

2.2.3 Turbulenttinen virtaus

Turbulenttisessa virtauksessa virtauksen virtausviivat menevät ristiin ja sekoittuvat keskenään. Laminaarinen virtaus muuttuu turbulenttiseksi virtaukseksi, kun aineen viskoosivoimat eivät jaksakaan pitää sitä koossa. [4, s. 22–32.] Tupakansavu muuttuu laminaarisesta turbulenttiseksi, kun se on virrannut kauemmaksi tupakasta (kuva 1).

2.2.4 Siirtymä-alue

Kuvasta 1 on nähtävissä laminaarisen ja turbulenttisen virtauksen välissä oleva niin sanottu siirtymä-alue, jossa virtauksessa on kummankin edellä mainitun virtaustyyppin piirteitä [2, s. 323].



Kuva 1. Humphrey Bogartin tupakansavu lähtee laminaarisena ja muuttuu turbulenttiseksi [5].

2.3 Reynoldsin luku

Reynoldsin luku on dimensioton suure, jolla kuvataan virtauksen luonnetta. Newtonilaisilla nesteillä virtauksen luonne on vahvasti riippuvainen Reynoldsin luvusta. Reynoldsin luku saadaan, kun jaetaan virtauksen hitausvoimat viskositeettivoimilla. Toisin sanoen jaetaan virtausta hajottavat voimat virtausta yhdessä pitävillä voimilla. Reynoldsin luvun ollessa pieni virtaus pysyy koossa ja näin ollen virtaus on laminaarista. Reynoldsin luvun kasvaessa virtausta hajottavat voimat suurenevat ja virtaus muuttuu turbulenttiseksi.[6, s. 25; 7, s. 85.]

Reynoldsin luvun yleinen esitysmuoto on

$$Re = \frac{V_s L \rho}{\mu} = \frac{V_s L}{\nu} \quad (2)$$

V_s on virtausnopeus

L on virtausta kuvaava pituus, (jokin kappaleen karakteristinen mitta)

ρ on virtaavan väliaineen tiheys

μ on virtaavan väliaineen dynaaminen viskositeetti

ν on virtaavan väliaineen kinemaattinen viskositeetti.

Putkessa olevalle virtaukselle kaava saadaan muotoon

$$Re = \frac{V_s D_h \rho}{\mu} = \frac{V_s D_h}{\nu} \quad (3)$$

D_h on hydraulinen halkaisija, joka määritetään kaavalla 4.

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad (4)$$

A on poikkileikkauksen pinta-ala

P on poikkileikkauksen märkäpiirin pituus

Pyöreässä putkessa oleva virtaus on laminaarista kun $Re \leq 2300$, virtaus on siirtymäalueella kun $2300 \leq Re \leq 4000$ ja virtaus on turbulenttista kun $Re \geq 4000$ [2, s. 324].

Reynoldsin luku virtauksen suuntaista levyä pitkin

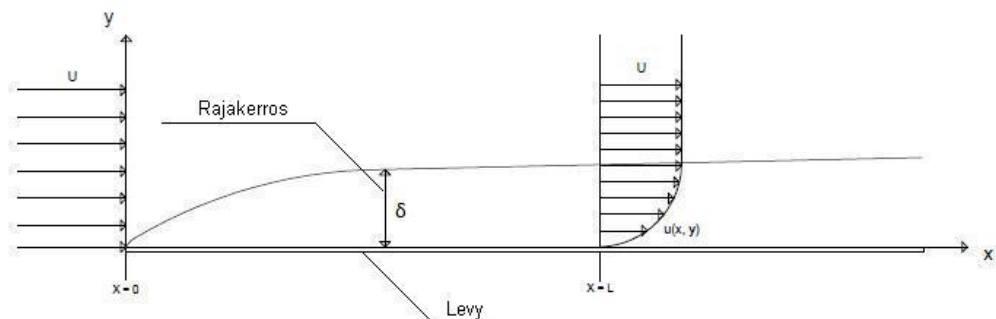
$$Re_x = \frac{\rho V_s x}{\mu} = \frac{V_s x}{\nu} \quad (5)$$

x on matka levyn alusta pisteeseen x levyssä [2, s. 580].

3 Rajakerroksen määrittäminen

3.1 Rajakerros

Rajakerros on virtauksessa esiintyvä kerros kappaleen pinnan läheisyydessä, jossa virtausnopeus poikkeaa muusta virtauksesta. Aivan kappaleen pinnalla virtauksen nopeus on yhtä suuri ja samansuuntainen kuin kappaleella, mutta etäisyydellä δ virtauksen nopeus ja suunta ovat samat kuin muulla virtauksella. Näiden pisteiden välistä etäisyyttä kutsutaan rajakerrokseksi (kuva 2). Kuvassa vapaan virtauksen virtausnopeus on U , virtausnopeus rajakerroksessa etäisyydellä y kappaleen pinnasta on u ja rajakerroksen paksuus on δ . [6, s. 455; 7, s. 89–144.]



Kuva 2. Rajakerros.

Rajakerroksen yhtälöt (kaavat 6 ja 7) ensimmäisenä esitti Prandtl vuonna 1904 [2, s. 519].

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = U \frac{dU}{dx} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (7)$$

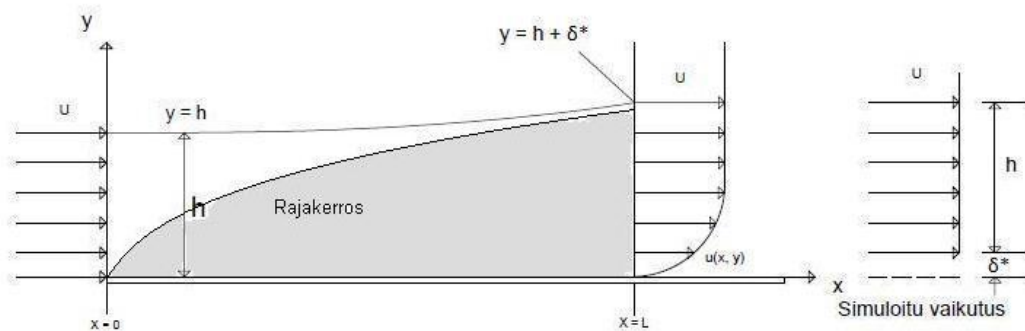
Rajakerroksen paksuus voidaan laskea kaavalla 8.

$$\frac{\delta}{x} \approx \begin{cases} \frac{5,0}{Re_x^{1/2}} & \text{laminaarinen } 10^3 < Re_x < 10^6 \\ \frac{0,16}{Re_x^{1/7}} & \text{turbulenttinen } 10^6 < Re_x \end{cases} \quad (8)$$

Laminaarisen virtauksen rajakerroksen paksuuden kaava esitti Blasius ja turbulenttisen virtauksen rajakerroksen paksuuden kaavan esitti Prandtl [6, s. 452].

3.2 Rajakerroksen syrjäyttämä massavirta

Rajakerroksen syrjäyttämällä massavirralla (displacement thickness) tarkoitetaan sitä matkaa, minkä juuri rajakerroksen ulkopuolinen virtausviiva siirtyy kappaleen luota rajakerroksen takia. Koska massavirrat alussa (ennen kappaletta x on 0) ja pitkin kappaletta (x on L) ovat samat, tulee virtausviivojen siirtyä suunnassa y . Tätä y -suuntaista siirtymää merkitään symbolilla δ^* (kuva 3). [2, s. 524–525.]



Kuva 3. Rajakerroksen syrjäyttämä massavirta.

3.2.1 Laminaarinen virtaus

Integraalifunktio *rajakerroksen syrjäyttämälle massavirralle* [6, s. 457]:

$$\delta^* = \int_0^{\delta} \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy \quad (9)$$

Blasius esitti, että kaavasta 9 saadaan laminaarisessa virtauksessa *rajakerroksen syrjäyttämän massavirran* numeeriset kaavat [6, s. 457–462].

$$\frac{\delta^*}{x} = \frac{1.721}{\sqrt{Re_x}} \quad (10)$$

$$\delta^* = 0,344\delta \quad (11)$$

3.2.2 Turbulenttinen virtaus

Turbulenttiselle virtaukselle asia ei ole yhtä yksiselitteinen kuin laminaariselle virtaukselle. Kokeellisten tutkimusten avulla on saatu yleistys *rajakerroksen syrjäyttämälle massavirralle 'yksi seitsemäsosa potenssiin'* -lain (one-seventh-power law) mukaan. [6, s. 465–467.]

Integraalifunktio *rajakerroksen syrjäyttämälle massavirralla turbulenttisessä virtauksessa* [6, s. 465–467]:

$$\delta^* \approx \int_0^\delta \left[1 - \left(\frac{y}{\delta} \right)^{1/7} \right] dy = \frac{1}{8} \delta \quad (12)$$

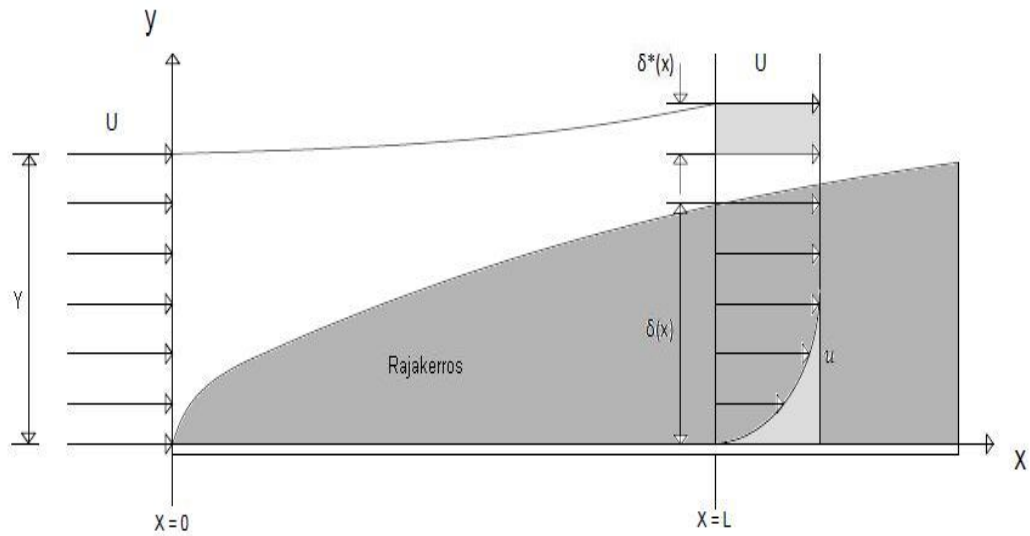
Yksi seitsemäsosa potenssiin -laki Prandtlin mukaan [6, s. 465–467]

$$\frac{u}{U} \cong \left(\frac{y}{\delta} \right)^{1/7} \text{ kun } y \leq \delta, \quad \rightarrow \quad \frac{u}{U} \cong 1 \text{ kun } y > \delta \quad (13)$$

3.3 Rajakerroksen liikemäärän tiheys

Toinen tapa mitata rajakerroksen paksuutta on mitata sen *liikemäärän tiheyttä* (momentum thickness). *Liikemäärän tiheydestä* käytetään symbolia θ . Rajakerroksessa massavirta vähenee, joten muualla sen täytyy kasvaa, jotta säilytettäisiin tasapaino. Helpoiten asian ymmärtää kuvasta 4. Tarkastellaan vaaleammalla harmaalla merkattuja alueita. Kun alempana rajakerroksessa olevan alueen massavirta pienenee, korvautuu massavirta *syrjäytetyssä massavirrassa* δ^* . Kaava 14 todistaa, että näiden kahden eri alueen pinta-alat ovat yhtä suuret. [2, s. 527–528.]

$$\int_0^Y (U - u) dy = U \delta^* \quad (14)$$



Kuva 4. Rajakerroksen liikemäärän tiheys.

Liikemäärän tiheyden integraalifunktio on [2, s. 528]

$$\theta = \int_0^{\delta} \frac{u}{U} \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy \quad (15)$$

3.3.1 Laminaarinen virtaus

Kaavasta 15 saadaan Blasiuksen ratkaisu virtauksen suuntaiselle levyllä laminaarisessa virtauksessa [2, s. 528].

$$\frac{\theta}{x} = \frac{0,644}{\sqrt{Re_x}} \quad (16)$$

3.3.2 Turbulenttinen virtaus

Liikemäärän tiheyden yhtälö turbulenttiselle virtaukselle saadaan niin ikään kokeellisten tapojen avulla ja yhdistämällä se *yksi seitsemäsosa potenssiin -lain* mukaan. Näin ollen yhtälöksi tulee [6, s. 466]

$$\theta \approx \int_0^\delta \left(\frac{y}{\delta}\right)^{1/7} \left[1 - \left(\frac{y}{\delta}\right)^{1/7}\right] dy = \frac{7}{72} \delta \quad (17)$$

Yksi seitsemäsosa potenssiin -laki [6, s. 466]:

$$\left(\frac{u}{U}\right)_{turb} \approx \left(\frac{y}{\delta}\right)^{1/7} \quad (18)$$

4 Kitkavastusvoima

4.1 Kitkavastusvoiman perusteet

Kun kappale on virtauksen suuntainen, siihen vaikuttaa voima $F_{V,kitka}$. Kitkavastusvoima on kitkan aiheuttamien voimien leikkausjännitysten summa kappaleessa. Tämä voima syntyy, kun virtauksen nopeus muuttuu rajakerroksessa äkisti mentäessä lähemmäksi kappaleen pintaa. $F_{V,kitka}$ on suurimmillaan, kun kappale on virtauksen suuntainen ja nolla, kun kappale on kohtisuoraan virtausta vastaan. [2, s.567; 7, s. 146.]

Leikkausjännitys [1, s. 140; 2, s. 47]

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (19)$$

Leikkausvoima [1, s. 140; 2, s. 47]

$$F = \tau A = \mu A \frac{du}{dy} \quad (20)$$

Kitkavastusvoiman kaava virtauksen suuntaiselle levyllä on seuraavanlainen:

$$F_{V,kitka} = C_{V,kitka} \cdot A \cdot \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (21)$$

A on kappaleen virtauksen suuntainen pinta-ala

ρ on väliaineen tiheys

v^2 on virtauksen nopeuden neliö

$C_{V,kitka}$ on kitkavastuskerroin. [2, s. 567.]

4.2 Vastusvoiman teoriaa

Virtauksen suuntaisen levyn vastusvoima saadaan ulostulotason poikittaisesta liikemäärän integraalista (kaava 22)

$$F(x) = \rho b \int_0^{\delta(x)} u(U - u) dy \quad (22)$$

jossa b on levyn leveys [6, s. 455].

Vuonna 1921 Theodore von Kármán derivoi funktion 22 ja muotoili sen liikemäärän tiheyden muotoon [6, s. 455]:

$$F(x) = \rho b U^2 \theta \quad \theta = \int_0^{\delta} \frac{u}{U} \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy \quad (23)$$

Von Kármán huomasi, että vastusvoima saadaan myös levyn suuntaisesta leikkausjännityksen integraalista [6, s. 455]:

$$F(x) = b \int_0^x \tau_{seinä}(x) dx \quad (24)$$

tai

$$\frac{dF}{dx} = b \tau_{seinä} \quad (25)$$

4.3 Kitkavastuskerroin laminaarisessa virtauksessa

Käyttääksemme kaavaa 21 tulee kitkavastuskerroin ($C_{V,kitka}$) määrittää. Tähän määrittäykseen tarvitaan vastusvoiman liikemäärän integraalia (kaava 22). Von Kármán osoitti, että kitkavastuskerroin voidaan laskea yhtälöstä 22, jolloin C_V :lle saadaan dimensioton integraaliyhtälö [6, s. 462.]

$$C_V = \frac{2}{L} \int_0^{\delta} \frac{u}{U} \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy \quad (26)$$

Tämä voidaan uudelleen kirjoittaa jättöreunan liikemääräntiheyden termeillä. jolloin saadaan [6, s. 463]

$$C_V = \frac{2\theta(L)}{L} \quad (27)$$

Koska δ on vaikea ja epämääräinen määrittää ja θ :lle on tarkka-arvo, voidaan *rajakerroksen syrjäyttämälle massavirralle* ja *rajakerroksen liikemäärän tiheydelle* määrittää suhde, jota kutsutaan *muotokertoimeksi* (shape factor). *Muotokerroin* on hyödyksi, kun tutkitaan virtauksen irtoamista kappaleen pinnasta. *Muotokertoimen* kaava virtauksen suuntaiselle levyille laminaarisessa virtauksessa on seuraavanlainen [6, s. 463.]:

$$H = \frac{\delta^*}{\theta} = \frac{1,721}{0,664} = 2,59 \quad (28)$$

Laminaarisen virtauksen kitkavastuskerroin saadaan myös leikkausjännityksen kautta, kun yhdistetään leikkausjännityksen integraaliin (kaava 24) paikallisen kitkakertoimen kaava (kaava 29) [6, s. 462].

$$C_{kitka} = \frac{2\tau_{seinä}}{\rho U^2} = \frac{0,664}{Re_x^{1/2}} \quad (29)$$

Näin ollen leikkausjännitykseksi saadaan [6, s. 462]

$$\tau_{seinä}(x) = \frac{0,332\rho^{1/2}\mu^{1/2}U^{1,5}}{x^{1/2}} \quad (30)$$

Kun leikkausjännitys (kaava 30) sijoitetaan kaavaan 24, saadaan kitkavastusvoimaksi [6, s. 462]

$$F(x) = b \int_0^x \tau_w(x) dx = 0,664b\rho^{1/2}\mu^{1/2}U^{3/2}x^{1/2} \quad (31)$$

Kaavasta 31 saadaan kitkavastuskertoimelle dimensioton kaava

$$C_{V,kitka} = \frac{2F(L)}{\rho U^2 bL} = \frac{1,328}{Re_L^{1/2}} = 2C_{kitka}(L) \quad (32)$$

Tästä huomaamme, että kitkavastuskerroin on kaksi kertaa paikallisen kitkakertoimen suuruinen, joka on kitkavastuskerroin levyn yhdellä puolella. [6, s. 462.]

4.4 Kitkavastuskerroin turbulentsisessa virtauksessa

Turbulentsiselle virtaukselle ei ole olemassa yksiselitteistä kaavaa, kun rajakerroksen paksuus peittää kokonaan pinnan epätasaisuudet puhutaan, hydraulisesti sileästä rajakerroksesta. Näin ollen kitkavastuskertoimen perusyhtälö turbulentsiselle virtaukselle saadaan leikkausjännityksen ja paikallisen kitkakertoimen kautta. [6, s. 465–467; 7, s. 147.]

$$C_{kitka} \approx \frac{0,027}{Re_x^{1/7}} \quad (33)$$

Tästä seuraa [6, s. 467]

$$\tau_{seinä,turb} = \frac{0,0135\mu^{1/7}\rho^{6/7}U^{13/7}}{x^{1/7}} \quad (34)$$

Näin ollen kitkavastuskertoimeksi saadaan [6, s. 467]

$$C_{V,kitka} = \frac{0,031}{Re_L^{1/7}} = \frac{7}{6}C_{kitka}(L) \quad (35)$$

Muotokertoimen kaava virtauksen suuntaiselle levyllä turbulentsisessa virtauksessa, kun rajakerros on hydraulisesti sileä, saadaan *liikemäärän tiheyden ja syrjäytetyn massavirran* avulla [6, s. 467].

$$\theta \approx \int_0^\delta \left(\frac{y}{\delta}\right)^{1/7} \left[1 - \left(\frac{y}{\delta}\right)^{1/7}\right] dy = \frac{7}{72}\delta \quad (36)$$

$$\delta^* \approx \int_0^\delta \left[1 - \left(\frac{y}{\delta} \right)^{1/7} \right] dy = \frac{1}{8} \delta \quad (37)$$

$$H = \frac{\delta^*}{\theta} = \frac{\frac{1}{8}}{\frac{7}{72}} = 1,3 \quad (38)$$

Rajakerroksen alkuosan ollessa laminaarinen vastuskertoimen kaavaksi tulee [6, s. 468]

$$C_{V,kitka} = \begin{cases} \frac{0,031}{Re_L^{1/7}} - \frac{1440}{Re_L} & Re_{siirtymä-alue} = 5 \times 10^5 \\ \frac{0,031}{Re_L^{1/7}} - \frac{8700}{Re_L} & Re_{siirtymä-alue} = 3 \times 10^6 \end{cases} \quad (39)$$

Kun rajakerroksen paksuus ei riitä peittämään pinnankarheutta, puhutaan hydraulisesti karheasta rajakerroksesta. Näin ollen kitkavastuskerroin on riippumaton Reynoldsin luvusta. [6, s. 147.]

$$C_{V,kitka} \approx \left(1,89 + 1,62 \log \frac{L}{\epsilon} \right)^{-2,5} \quad (40)$$

ϵ on pinnan karheus:

kiillotettu pinta: $\epsilon \approx 0,001\text{mm}$

vedetty pinta: $\epsilon \approx 0,01\text{mm}$

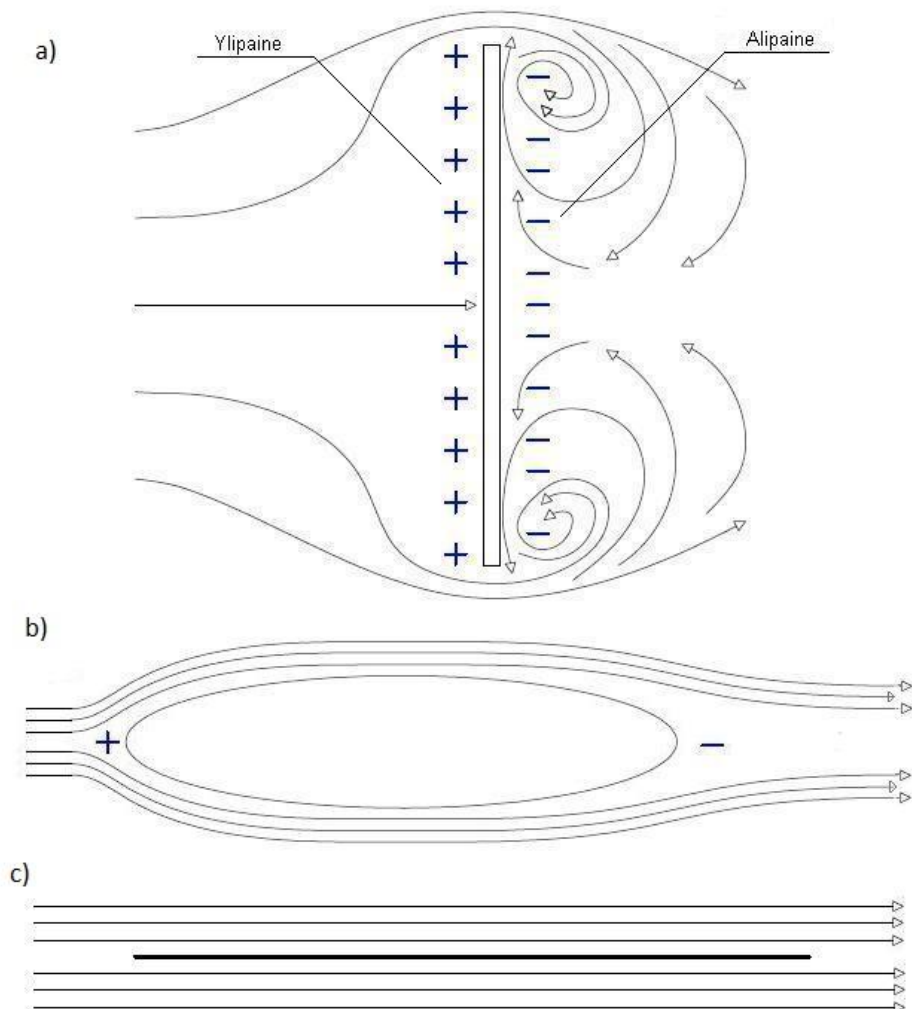
jiyrsitty pinta: $\epsilon \approx 0,02\text{mm}$

valettu pinta: $\epsilon > 0,05\text{mm}$

5 Painevastusvoima

5.1 Perusteet

Toinen kappaleeseen vaikuttava vastusvoima on paineen aiheuttama vastus. Tämän vastusvoiman aiheuttaa kappaleen etu- ja takapuolen välinen paine-ero. Paine-ero syntyy, kun väliaineen nopeus on niin suuri, että väliaine ei pysty enää seuraamaan kappaleen muotoa vaan irtoaa kappaleesta. Näin irtoamiskohtaan syntyy alipaineinen alue. Painevastusvoima on suuri tylpillä kappaleilla, pieni virtaviivaisilla kappaleilla ja nolla ohuella levyllä, joka on virtauksen suuntainen (ks. kuva 5). [2, s. 567–568; 7, s. 150.]



Kuva 5. Painevastus, a) tylppä kappale b) virtaviivainen kappale ja c) ohut levy.

Painevastusvoima lasketaan kaavalla

$$F_{V,paine} = C_{V,paine} \cdot A \cdot \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (41)$$

A on kappaleen virtausta kohtisuorassa oleva pinta-ala

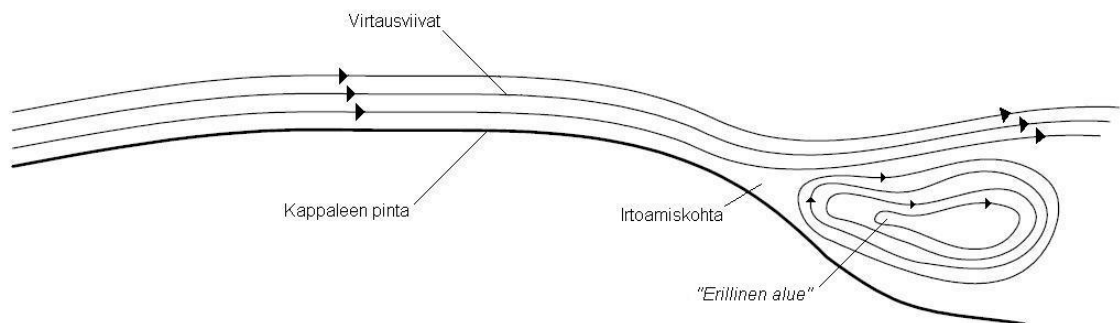
ρ on väliaineen tiheys

v^2 on virtausnopeuden neliö

$C_{V,paine}$ on kappaleen painevastuskerroin [2, s. 567].

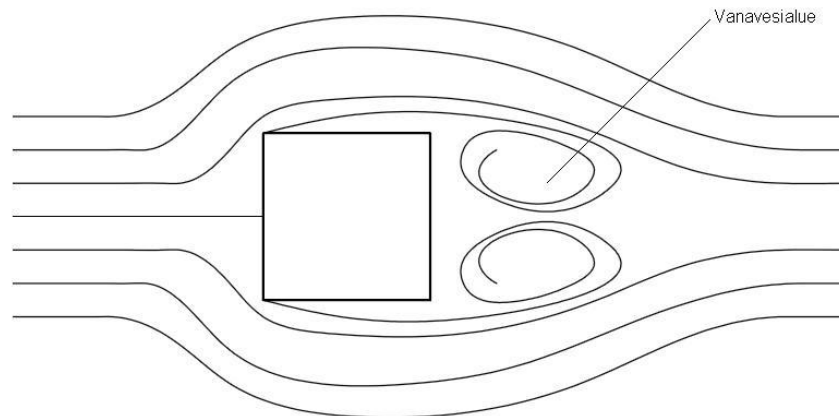
5.2 Virtauksen irtoaminen kappaleen pinnasta

Virtauksen irtoaminen kappaleen pinnasta syntyy väliaineen virratessa nopeasti kurvikkaan kappaleen pintaa pitkin. Jossain kohtaa kappaleen pintaa kuljettaessa väliaineen virtausviivat eivät kykene enää noudattamaan kappaleen pinnan muotoa vaan irtoavat tästä. Tätä ilmiötä kutsutaan *virtauksen irtoamiseksi* (flow separation). Irtoamiskohtan jälkeen kappaleen pinnan ja vapaan virtauksen väliin muodostuu ns. *virtauksesta erillinen alue* (ks. kuva 6). Mitä suurempi tämä *erillinen alue* on, sitä suurempi on paineen aiheuttama vastusvoima. [2, s. 569–570.]



Kuva 6. Virtauksen irtoaminen.

Paksut kappaleet kuten auto, pallo, laatikko ja ihminen muodostuvat taakseen virtauksessa ns. *vanavesialueen*. Kun kaksi virtausviiva yhtyy kappaleen takana jättäen väliin sä virtauksesta *erillisen alueen*, tätä aluetta kutsutaan *vanavesialueeksi* tai lyhyemmin pelkästään *vanavedeksi* (ks. kuva 7). [2, s. 570; 7, s. 144.]



Kuva 7. Vanavesialue.

Virtauksen irtoaminen kappaleen pinnasta voidaan selittää liikemäärän yhtälöstä (kaava 42) geometrisin perustein, nopeuden u toisella derivaatalla. Kun $u = v = 0$ $\{u(x, y)$ ja $v(x, y)\}$, [6, s. 460–470]

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \approx U \frac{dU}{dx} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau}{\partial y} \quad (42)$$

huomaamme

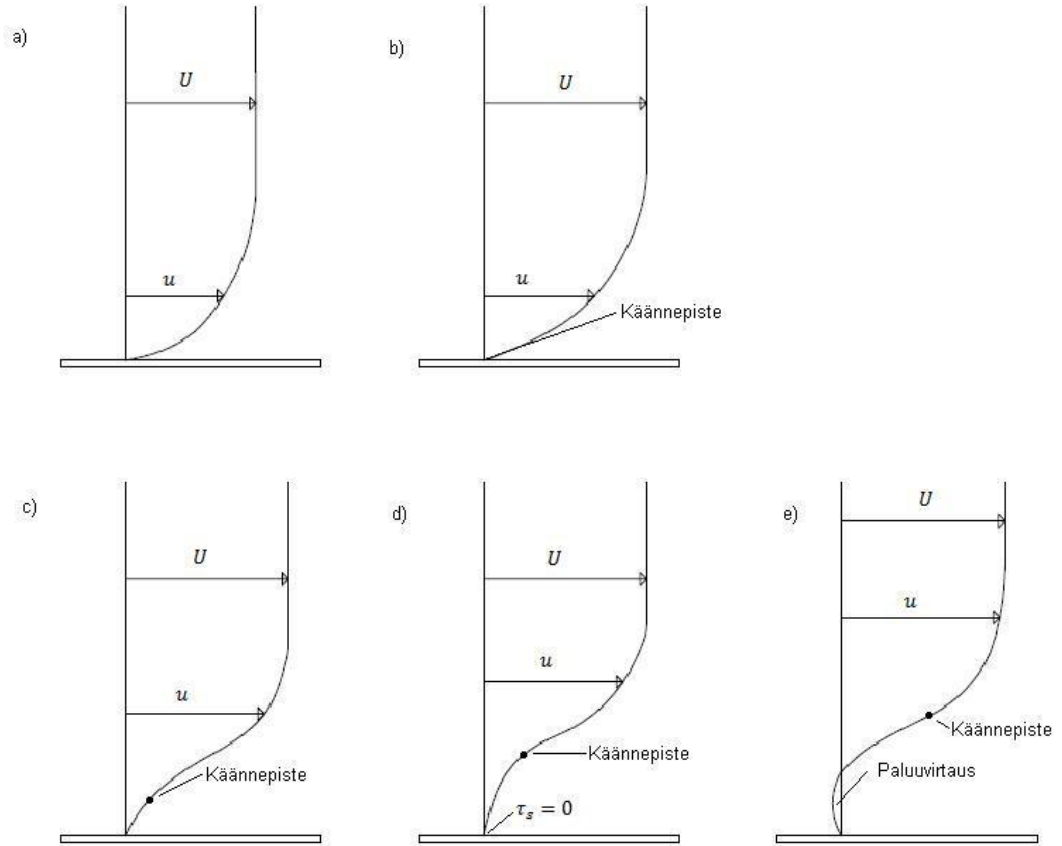
$$\left. \frac{\partial \tau}{\partial y} \right|_{\text{seinä}} = \mu \left. \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right|_{\text{seinä}} = -\rho U \frac{dU}{dx} = \frac{dp}{dx} \quad (43)$$

tai

$$\left. \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right|_{\text{seinä}} = \frac{1}{\mu} \frac{dp}{dx} \quad (44)$$

Nämä kaavat pätevät sekä laminaariselle että turbulenttiselle virtaukselle. Koska vastaisen gradientin nopeuden toinen derivaatta kappaleen seinäpinnassa on positiivinen, tulee vastaisen gradientin olla negatiivinen ulompana rajakerroksessa ($y = \delta$) yhtyäk-

seen tasaisesti päävirtaukseen $U(x)$. Tästä johtuen käännepisteen tulee sijaita jossain kohtaa rajakerrosta (kuva 8). [2, s. 536; 6, s. 470.]



Kuva 8. Paluuvirtaus.

Kuvan 8 a) kohta *suotuisa gradientti*: virtaus ei irtoa kappaleen pinnasta. Käännepiste on seinän sisällä [2, s. 536; 6, s. 470].

$$\frac{dU}{dx} > 0$$

$$\frac{dp}{dx} < 0$$

Kuvan 8 b) kohta *nolla gradientti*: virtaus ei irtoa kappaleen pinnasta. Käänne piste on kappaleen pinnassa [2, s. 536; 6, s. 470].

$$\frac{dU}{dx} = 0$$

$$\frac{dp}{dx} = 0$$

Kuvan 8 c) kohta *heikko vastainen gradientti*: virtaus ei irtoa kappaleen pinnasta. Käänne piste virtauksessa [2, s. 536; 6, s. 470].

$$\frac{dU}{dx} < 0$$

$$\frac{dp}{dx} > 0$$

Kuvan 8 d) kohta *kriittinen vastainen gradientti*: virtaus irtoaa kappaleen pinnasta, kulmakerroin on nolla. Käänne piste on virtauksessa [2, s. 536; 6, s. 470].

Kuvan 8 e) kohta *suuri vastainen gradientti*: virtaus on irti kappaleen pinnasta. Paluuvirtaus esiintyy kappaleen pinnassa [2, s. 536; 6, s. 470].

5.3 Laminaarinen integraaliteoria

Sekä laminaarinen että turbulenttinen teoria voidaan johtaa von *Kármánin yleisestä kaksidimensioisesta rajakerroksen integraalisuhteesta* (Kármán's general two-dimensional boundary layer integral relation), jolloin saadaan [6, s. 472]:

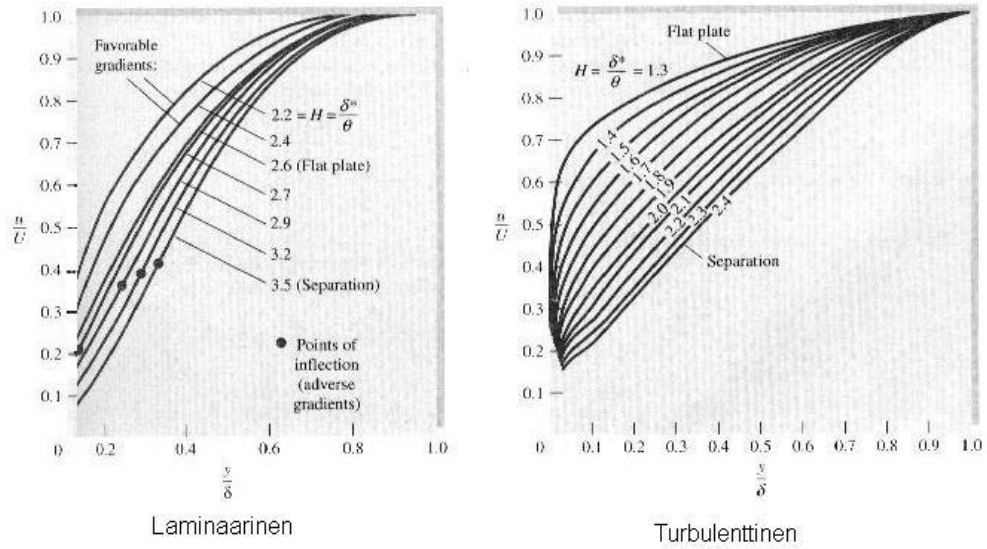
$$\frac{\tau_{seinä}}{\rho U^2} = \frac{1}{2} C_{kitka} = \frac{d\theta}{dx} + (2 + H) \frac{\theta}{U} \frac{dU}{dx} \quad (45)$$

Aiemmin mainittiin *muotokertoimen* hyödyllisyydestä virtauksen irtoamisen tutkimisessa. Kuvassa 9 on muotokertoimen kuvaajat laminaariselle ja turbulenttiselle virtaukselle. Kuvassa x-akseli on suhde y/δ ja y-akseli on u/U . Kuvaajista huomaa, että mitä suurempi H , sitä suurempi vastainen gradientti on. Virtauksen irtoaminen tapahtuu $H:n$ ollessa likimain [6, s. 473]

$$H \approx \begin{cases} 3,5 \\ 2,4 \end{cases}$$

Laminaarinen virtaus
Turbulenttinen virtaus

(46)



Kuva 9. Muotokertoimet [6, s. 470].

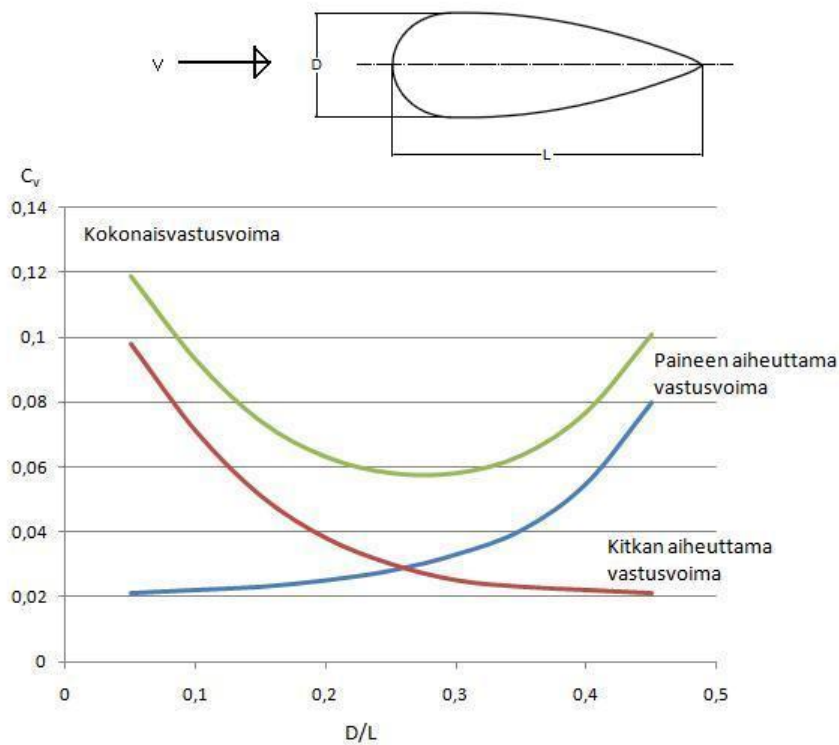
6 Kokonaisvastusvoima

Useimmiten virtauksessa olevaan kappaleeseen kohdistuva vastusvoima on niin sanottu kokonaisvastusvoima, joka on kitkavastusvoiman ja painevastusvoiman yhteisvaikutus (ks. kaava 47). Niin ikään kokonaisvastuskerroin on kitkavastuskertoimen ja painevastuskertoimen summa (ks. kaava 48). [2, s. 567; 7, s. 150.]

$$F_V = F_{V,kitka} + F_{V,paine} \quad (47)$$

$$C_V = C_{V,kitka} + C_{V,paine} \quad (48)$$

Kappaleen muoto määrää suhteen kitkavastusvoiman ja painevastusvoiman välille. Kappaleen ollessa paksu painevastusvoima on dominoiva ja päinvastoin kappaleen ollessa kapea kitkavastusvoima on suurempi. Kuvassa 10 on esitetty virtaviivaisen kappaleen pituuden ja paksuuden suhde kokonaisvastuskertoimen jakautumiseen kitkavastusvoiman ja painevastusvoiman välille.



Kuva 10. Virtaviivaisen kappaleen kokonaisvastusvoima V on virtausnopeus, L on kappaleen pituus ja D on kappaleen halkaisija.

Kun tiedetään kappaleen kokonaisvastuskerroin, voidaan kaavan 1 avulla laskea kappaleeseen kohdistuva kokonaisvastusvoima. Tuulitunnelikokeilla voidaan myös saman kaavan kautta määrittää kokonaisvastusvoiman avulla kokonaisvastuskerroin kappaleelle.

7 Kirjallisuuden vastuskertoimen arvoja

Kirjallisuudesta löytyy useita vastuskertoimen arvoja erimuotoisille kappaleille, joista mm. Çengel, White ja Bohl ovat kirjoittaneet. Nämä arvot kuitenkin poikkeavat paikoin toisistaan, kuten taulukoista 1–3 ilmenee.

Taulukko 1. Ympyrälevy [2, s. 574; 6, s. 485; 7, s. 260].

Kirjan tekijä	Teos	Vastuskerroin
Yunus A. Çengel	Fluid Mechanics : Fundamentals and applications	1,1 kun $Re > 10^4$
Frank M. White	Fluid Mechanics, Fifth edition	1,17 kun $Re > 10^4$
Willi Bohl	Teknillinen virtausoppi	1,17

Taulukko 2. Neliölevy [2, s. 574; 6, s. 485; 7, s. 260].

Kirjan tekijä	Teos	Vastuskerroin
Yunus A. Çengel	Fluid Mechanics : Fundamentals and applications	Ei arvoa
Frank M. White	Fluid Mechanics, Fifth edition	1,18 kun $Re > 10^4$
Willi Bohl	Teknillinen virtausoppi	1,1

Taulukko 3. Kuutio, sivu virtausta vastaan [2, s. 574; 6, s. 485; 7, s. 260].

Kirjan tekijä	Teos	Vastuskerroin
Yunus A. Çengel	Fluid Mechanics : Fundamentals and applications	1,05 kun $Re > 10^4$
Frank M. White	Fluid Mechanics, Fifth edition	1,07 kun $Re > 10^4$
Willi Bohl	Teknillinen virtausoppi	1,05

Çengel, White ja Bohl eivät ole määrittäneet tasasivuiselle kolmiolle vastuskerrointa.

8 Mittaukset

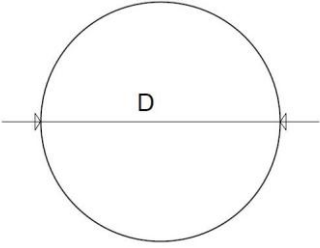
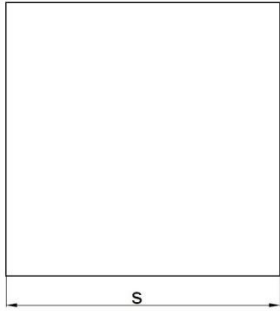
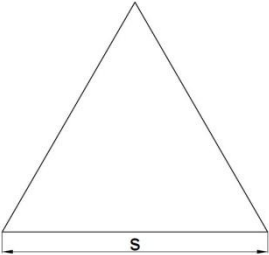
8.1 Mittausjärjestelyt

Mittaukset suoritettiin tuulitunnelissa Metropolia Ammattikorkeakoulu Oy:n energiatekniikan laboratoriossa. Tutkimukset suoritettiin yksi kappale kerrallaan, jokainen kappale mitattiin kaksi kertaa, lukuun ottamatta 3 mm paksuista pienintä tasasivuista kolmiota, jolle tehtiin kolmas varmistava mittaussarja. Virtausnopeuden minimiarvoksi valittiin 0 m/s ja maksimiarvoksi valittiin noin 42 m/s, paitsi suurimmalla neliöllä ja ympyrällä, joiden maksimivirtausnopeudet olivat noin 37 m/s ja 41 m/s. Näin meneteltiin, koska voima-anturin maksimikuormaa ei haluttu ylittää. Virtausnopeutta muutettiin minimiarvosta maksimiarvoon 1 m/s porrastuksella. Jokaisen virtausnopeuden muutoksen jälkeen odotettiin 10 sekuntia, jotta virtausnopeus ehtisi tasaantua, tämän jälkeen odotettiin 20 sekuntia vastusvoiman tasaantumista.

8.2 Mitattavat kappaleet

Mitattavien kappaleiden valmistusmateriaaliksi valittiin alumiini sen keveyden takia. Kappaleiden muodoiksi valikoituivat tasasivuinen kolmio, neliö ja ympyrä. Mitattavat kappaleet valmistettiin kahtena eri paksuutena ja kolmessa eri koossa. Kaiken kaikkiaan mitattavia kappaleita oli 18. Kappaleiden suunnitellut mitat on esitetty taulukossa 4, tarkemmat kappalekohtaiset mitat löytyvät liitteestä 1.

Taulukko 4. Mitattavien kappaleiden mitat.

Kappale	Mitta	Ala	Paksuus
	D=10,00 cm	78,54 cm ²	3 mm ja 10 mm
	D=12,50 cm	122,72 cm ²	3 mm ja 10 mm
	D=15,00 cm	176,71 cm ²	3 mm ja 10 mm
	s=10,00 cm	100,00 cm ²	3 mm ja 10 mm
	s=12,50 cm	156,25 cm ²	3 mm ja 10 mm
	s=15,00 cm	225,00 cm ²	3 mm ja 10 mm
	s=10,00 cm	43,30 cm ²	3 mm ja 10 mm
	s=12,50 cm	67,66 cm ²	3 mm ja 10 mm
	s=15,00 cm	97,43 cm ²	3 mm ja 10 mm

8.3 Tuulitunneli

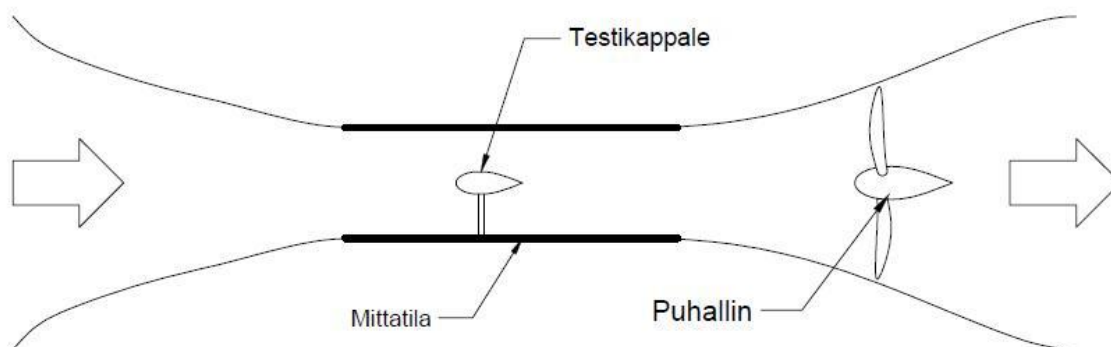
Tuulitunneli on laite, jolla tuotetaan tasainen virtaussuihku mitattavaan kohteeseen. Tuulitunnelin tuottaman virtausnopeuden perusteella tunnelit voidaan jaotella viiteen nopeusryhmään:

- piennopeustuulitunnelit
- alisoonisit tunnelit
- lähisoonisit tunnelit
- ylisooniset tunnelit
- hypersooniset tunnelit. [8, s. 6.]

Piennopeustuulitunnelien maksimivirtausnopeudet ovat 50 m/s ja 100 m/s väliltä, näin virtausta voidaan pitää kokoon puristumattomana. Viime kädessä raja sille, onko virtaus kokoon puristuvaa, riippuu siitä, kuinka suuri muutos ilman tiheydelle sallitaan. Piennopeustuulitunnelit voidaan vielä jaotella toimintaperiaatteensa mukaan kahteen eri ryhmään:

- avoimen piirin tunnelit
- suljetun piirin tunnelit. [8, s. 6.]

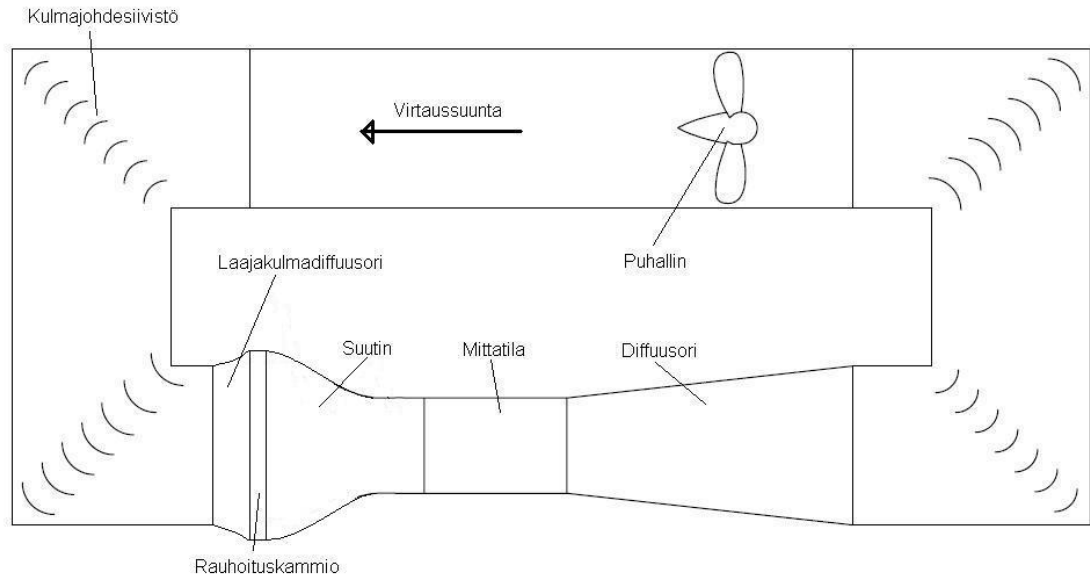
Avoimen piirin tunnelissa kuvan 11 mukaisesti korvausilma otetaan tunnelin ulkopuolelta ja mittaustilan jälkeen ilma puhalletaan ulos tunnelista.



Kuva 11. Avoimen piirin tuulitunneli.

Suljetun piirin tunnelissa virtaus kiertää tunnelin sisällä suljetussa kehässä, jossa virtauksen suunta käännetään tavallisesti 90°:n käännöksin. Käännöksistä johtuvaa painehäviötä minimoidaan kulmajohdesiivistön avulla. Painehäviöiden minimointi on tarpeellista, koska ilman liikuttamiseen tuotu energia muuttuu painehäviöinä lämmöksi. Lämpötilan nousu muuttaa ilman tiheyttä ja näin johtaa mittaolosuhteiden muuttumiseen. Painehäviöiden ollessa vähäisiä syntynyt lämpöenergia siirtyy konvektiolla ympäristöön ja tunnelissa virtaavan ilman lämpötila ei oleellisesti nouse. Tuulitunnelin ollessa huonosti suunniteltu, syntyy liikaa painehäviötä ja konvektiojäähdytys ei enää riitä, vaan tunneli on varustettava erillisellä jäähdyttimellä. [8, s. 6.]

Energiatekniikan laboratorion piennopeustuulitunneli on tyypillinen suljetun piirin tunneli. Kuvasta 12 on nähtävissä kyseisen tunnelin toimintaperiaate sekä tärkeimmät komponentit.



Kuva 12. Suljetun piirin tuulitunneli.

Diffuusori on kanava, jolla muutetaan osa virtauksen liike-energiasta staattiseksi paineeksi hidastamalla virtausnopeutta. Virtausnopeuden muutos tehdään muuttamalla diffusorin poikkipinta-alaa virtauksen suunnassa. Tämä on tarpeen, koska tuulitunnelin tehohäviöt kasvavat nopeuden kolmannessa potenssissa. Diffusorin aiheuttaman painehäviön suuruus on riippuvainen virtauksen pysymisestä diffusorin seinämissä. Painehäviö kasvaa, kun virtaus irtoaa diffusorin seinämistä. Virtaus saadaan pysymään seinämissä, kun diffusorin huippukulma on pienempi kuin 5 astetta. Virtausta ei voida hidastaa kuitenkaan loputtomiin, sillä diffusorin ulos- ja sisäänvirtauspoikkipinta-alojen suhde saa olla korkeintaan 2,5. [8, s. 8.]

Kulmajohdesiivistöä tarvitaan 90 asteen kulmissa pienentämään painehäviötä. 90 asteen käynnöksen painehäviökerroin ilman siivistöä on noin 1, käyttämällä kulmajohdesiivistöä saadaan painehäviökerroin laskettua välille 0,15–0,25, riippuen siivistön geometriasta. Kulmajohdesiivistön avulla pyritään säilyttämään myös nopeusjakauma mahdollisimman tasaisena läpi käynnöksen. [8, s. 8.]

Energiatekniikan laboratorion tuulitunnelin puhallin on malliltaan aksiaalipuhallin, joka antaa suuren tilavuusvirran ja pienen ominaispaineen. Tästä syystä aksiaalipuhallin sopii hyvin tuulitunnelin kaltaisiin sovelluksiin. Aksiaalipuhallinta pyörittää kolmivaiheinen oikosulkumoottori. Virtausnopeuden säätö tapahtuu muuttamalla puhaltimen siipikulmaa sekä säätämällä moottorin pyörimisnopeutta, joka tapahtuu taajuusmuuttajalla. [8, s. 8.]

Laajakulmadiffuusorin poikkipinta-ala kasvaa virtauksen suunnassa yli 10 asteen huipukulmalla. Virtauksen irtoamisen estämiseksi seinämistä tulee laajakulmadiffuusorin sisälle asentaa tiheä verkko. Verkon tulee olla niin tiheä, että sen silmien muodostama aukko on 40–70 % koko poikkileikkauksen pinta-alasta. Laajakulmadiffuusoria käytetään tilanpuutteen vuoksi hidastamaan virtausnopeutta ennen rauhoituskammiota. [8, s. 8–9.]

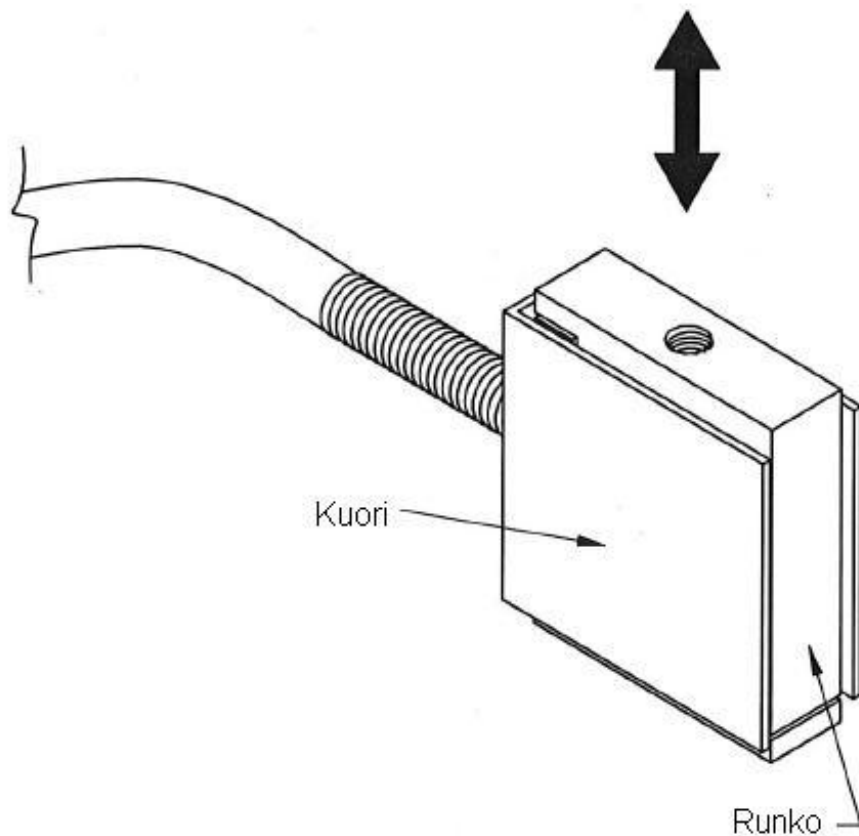
Jotta virtauksessa ei esiintyisi turbulenssia ja virtauksen nopeusjakauma olisi mahdollisimman tasainen, varustetaan tuulitunneli rauhoituskammioilla. Rauhoituskammio koostuu tiheistä verkoista, joiden on oltava niin tiheitä, että häviökertoimen suuruus olisi noin 1. Verkkojen suuren häviökertoimen vuoksi, virtausnopeus rauhoituskammiossa pyritään saamaan mahdollisimman pieneksi. Näin mittatilan ja rauhoituskammion poikkipintojen suhde on välillä 5–15. Verkkojen lankojen paksuuden on oltava välillä 0,1–0,3 mm, koska paksummat langat aiheuttaisivat jo kokonsa vuoksi turbulenssia. Virtauksen suuntaus tapahtuu rauhoituskammioon asennetun virtauksen *tasasuuntaajalla* (honey comb). [8, s. 9.]

Ennen virtauksen tuloa mittatilaan tulee virtausnopeus kiihdyttää suuttimella. Tuulitunnelin suutin pyritään muotoilemaan siten, että virtauksen nopeusjakauma olisi mahdollisimman tasainen mittatilaan tullessa. [8, s. 9.]

Mittatilassa virtaukselle asetettujen laatuvaatimusten tulee toteutua, koska juuri mittatilassa tapahtuu tutkittavien kappaleiden analysointi. Virtauksen nopeus on suurimmillaan mittatilassa, ja tämän vuoksi sillä on merkittävä vaikutus tuulitunnelin painehäviöihin. [8, s. 9.]

8.4 Voima-anturi

Voima-anturi on mittalaite, jolla voidaan mitata virtauksen kappaleeseen aiheuttaman vastusvoiman suuruutta. Voima-anturin toimintaperiaate perustuu venymäliuskan resistanssin muutoksen mittaamiseen. Vastusvoimasta johtuen kuvassa 13 olevan anturin runko painuu kasaan kuoren sisällä taivuttaen samalla rungossa kiinni olevia venymäliuskoja. Venymäliuskojen taipuminen aiheuttaa resistanssin muutoksen, josta voidaan laskea vastusvoiman suuruus.



Kuva 13. Voima-anturi

8.4.1 Venymäliuska

Venymäliuskalla mitataan voiman aiheuttamaa venytystä materiaalissa. Venymäliuska perustuu anturin sisäisen metallijohteen muodonmuutokseen venytyksessä. Venytyksen aiheuttaman muodonmuutoksen johdosta myös venymäliuskan resistanssi muuttuu. Venymäliuskat asennetaan yleensä siltakytkentänä (taulukko 5), resistanssin muutoksen ollessa pieni suhteessa anturin kokonaisresistanssiin. Resistanssin muutoksesta johtuen sillan ulostulojännite muuttuu. Täyssillan suhteellinen venymä saadaan kaavasta 49. [9.]

$$e_0 = K_s \cdot E_{jännite} \cdot \varepsilon_0 \rightarrow \varepsilon_0 = \frac{e_0}{K_s \cdot E} \quad (49)$$

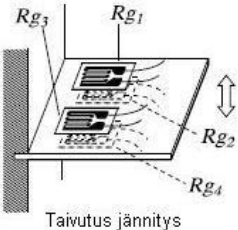
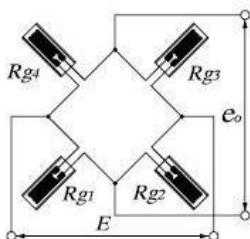
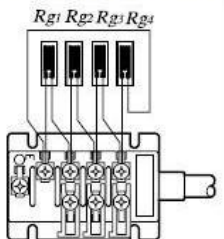
e_0 on sillan ulos antama jännite

K_s on *anturikerroin* (gage factor)

$E_{jännite}$ on sillan jännite

ε_0 on suhteellinen venymä [9].

Taulukko 5. Neljän anturin täyssiltakytkentä [8].

Nimi	Esimerkki asennus	Virtapiiri	Bridge Box DB-120A/350A
Neljän anturin täyssiltakytkentä (taivutusmittaus)			

Suhteellisen venymän kautta voidaan laskea vastusvoima kaavalla 50, kun voima aiheuttaa taivutusta tankoon [9].

$$\varepsilon_0 = \frac{6FL}{Ebh^2} \quad (50)$$

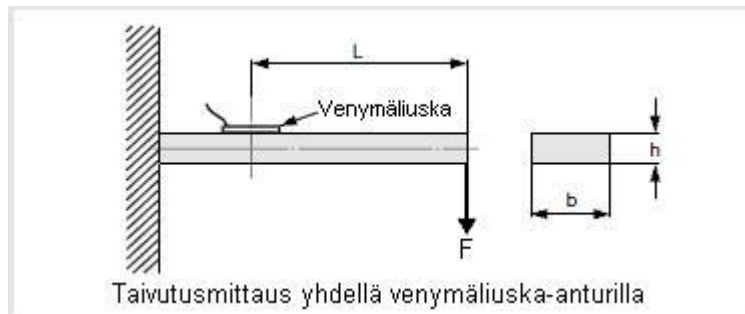
L on etäisyys kuormituskohdasta venymäliuskan keskikohtaan

F on vastusvoima

E on materiaalin kimmokerroin

b on taivutettavan tangon leveys

h on taivutettavan tangon paksuus vastusvoiman suunnassa (kuva 14) [9].



Kuva 14. Taivutusmittaus yhdellä venymäliuska-anturilla.

8.4.2 Futek LSB200 JR S-series

Tuulitunnelikokeissa vastusvoiman suuruus mitattiin käyttämällä Futek LSB200 JR S-sarjan voima-anturia. Voima-anturin tekniset tiedot ja kalibrointitodistukset ovat liitteessä 2. LSB200-anturin maksimikuorma saa olla 5 paunaa, joka vastaa noin 22,25 N:n voimaa. Kokeissa vastusvoimaa mitattaessa anturin herkkyys oli 0,001 N.

Tuulitunnelissa mitattavat kappaleet kiinnitettiin kappaleiden takapuolelta voima-anturiin (kuva 15), näin itse voima-anturi aiheutti mahdollisimman vähän häiriötä virtaukseen. Mahdolliset häiriöt virtauksessa ilmenivät ainoastaan kappaleiden takapuolella *vanavesialueella*, jääden häviävän pieniksi.



Kuva 15. Kappaleiden kiinnitys voima-anturiin.

8.5 Virtausnopeuden mittaus

Virtausnopeuden mittauksen oli tarkoitus tapahtua laser-doppler-anemometrillä, joka on erittäin luotettava virtausnopeuden mittaustapa. Laser-doppler-mittauksesta jouduttiin kumminkin luopumaan mittaustavan hitauden takia. Näin mittaukset suoritettiin

tuulitunnelin ohjausohjelmiston virtausnopeuden säädöllä, joka oli kalibroitu tyhjällä tuulitunnelilla Testo 445 -mittalaitteella (kuva 16).

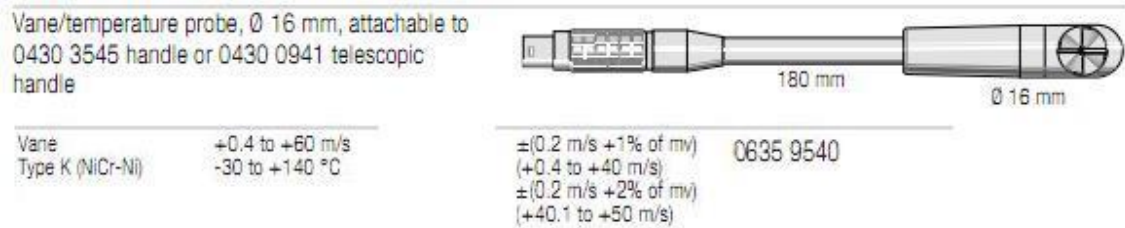
Testo 445 on monitoiminen mittalaite, jolla käsitellään laitteeseen liitettävien antureiden mittaamia arvoja. Laitteella voidaan mitata anturista riippuen suhteellista kosteutta, lämpötilaa, painetta sekä virtausnopeutta. Tuulitunnelin virtausnopeutta mitattiin anturilla numero 0635 9540. Anturilla suoritettavaa virtauksen mittausta ei voitu tehdä samanaikaisesti tutkittavan kappaleen ollessa tuulitunnelissa, koska kappale aiheutti turbulenssia virtaukseen eikä tarkkaa lukemaa virtausnopeudelle tällä mittaustavalla saatu. Tuulitunnelin ohjausohjelmiston virtausnopeuden mittauksen todettiin näyttävän samoja virtausnopeuden arvoja tyhjälle tuulitunnelille kuin Testo 445. Näitä arvoja käytettiin mittauksissa virtausnopeuden arvoina.



Kuva 16. Testo 445 [10].

8.6 Lämpötilan mittaus

Lämpötilan mittaus tehtiin tuulitunnelin ohjausohjelmistoon kytketyllä termoparilla, joka kalibroitiin Testo 445:een asennetun anturin 0635 9540 (kuva 17) avulla. Näin tuulitunnelissa ei ollut muuta ylimääräistä häiritsemässä virtausta kuin kappaleen takana oleva voima-anturi.



Kuva 17. Anturi 0635 9540 [10].

Termoparianturit ovat laajalti käytettyjä lämpötila-antureita, johtuen niiden halvasta hinnasta ja suuresta mittauslämpötila-alueesta. Termoparianturien rakenne on yksinkertainen ja niitä on helppo rakentaa pieninä antureina. Termoparianturi perustuu Seebeckin ilmiöön, jonka keksi virolainen fyysikko Thomas Seebeck vuonna 1822. Ilmiössä kahden eri metallin liitoksessa syntyy jännite, joka on riippuvainen lämpötilasta. Termoparissa mitataan lämpötilaeroa kahden eri mittapisteen välillä. Termopareista toinen on niin sanottu "kylmä liitos", johon verrataan mitattavan kohteen lämpötilaa. Lämpötilaero aiheuttaa kahden termoparin välille jännite-eron, joka muutetaan lämpötilaeroksi. Kun tähän lämpötilaeroon lisätään termoparin kylmän liitoksen lämpötila, saadaan lämpötila mitattavassa kohteessa. Termoparianturia pidetään jonkin verran epäluotettava, mutta hyvällä suunnittelulla päästään 0,5 °C:n tarkkuuteen. [11.]

9 Tulokset

9.1 Tulosten kirjaus

Tuulitunnelikokeissa mitattujen vastusvoimien arvot merkittiin Excel-taulukkoon, samalla merkattiin ylös virtausnopeus ja sen hetkinen virtaavan ilman lämpötila. Lämpötilan perusteella valittiin Yunus A. Çengelin kirjan *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications* sivun 894 taulukon A-9 (liite 3), atm olosuhteita vastaavat ilmantiheyden arvot. Vastusvoiman, ilmantiheyden ja virtausnopeuden perusteella ratkaistiin vastuskerroin kaavasta 1.

Mittausarjoja tehtiin useampia, jotta mahdolliset häiriöt saatiin poistettua ja mittaustuloksista näin ollen luotettavampia. Tuloksissa käsiteltävät vastuskertoimet ovat näiden mittausarjojen välinen keskiarvo. Mittausten välisten vastuskertoimien arvot poikkesivat hyvin vähän toisistaan. Suurimmat poikkeamat vastuskertoimien arvoissa ilmenivät virtausnopeuden ollessa alle 5 m/s, jolloin suhteellinen mittaustarkkuus oli huonoin. Voima-anturin mittaustarkkuutena käytettiin aiemmin mainittua 0,001 N. Virtausnopeuden ollessa alle 5 m/s vastusvoiman suuruus pienimmillä kappaleilla oli 0,001–0,1 N, joten vähäinenkin muutos vastusvoimassa aiheutti suuren muutoksen vastuskertoimen arvoon. Useammilla mittauskerroilla olisi vastuskertoimen hajontaa saatu pienennettyä, mutta siihen ei ollut tarvetta, koska virtausnopeuden kasvettua 5 metrissä sekunnissa 42 metriin sekunnissa hajonta pieneni ja mittaustuloksia voidaan pitää tarkkoina ja mittauksia toistettavina.

9.2 Leveyden vaikutus vastuskertoimeen

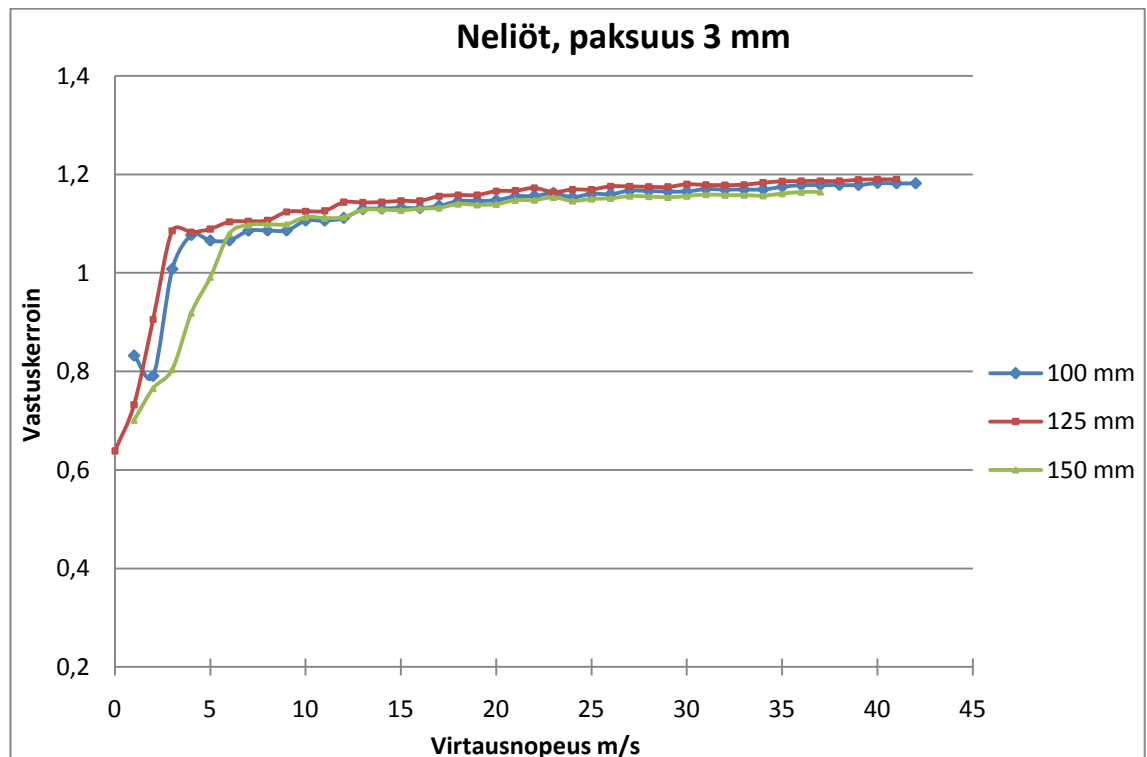
Kuvissa 18–23 ilmoitetaan kappalekohtaiset vastusvoimien keskiarvot virtausnopeuden suhteen, eikä Reynoldsin luvun suhteen. Tällä tavalla ilmoitettuna on helpompi havaita epätarkempi alue, kun virtausnopeus on 0–5 m/s. Kuvissa on myös yhdistetty samaan kuvaan samanmuotoiset ja -paksuiset kappaleet, jotta vertailu halkaisijoiden välillä olisi helpompaa. Varsinaiset mittauspöytäkirjat ja lasketut vastuskertoimen arvot löytyvät liitteestä 4.

9.2.1 Neliöt

Paksuus 3 mm

Kuvassa 18 esitetään 3 mm paksujen neliökappaleiden vastuskertoimet virtausnopeuden suhteen. Kuvaajista ylimpänä on sivun pituudeltaan keskikokoisen kappaleen kuvaaja. Suurimman kappaleen kuvaaja kulkee osan matkaa alimpana ja osan matkaa keskimmäisenä. Pienemmän kappaleen kuvaaja kulkee osan matkasta alimmaisena sivuten suurimman kappaleen kuvaajaa ja nousten tämän jälkeen keskimmäiseksi.

Kuvaajissa on selvästi havaittavissa yhtenäinen trendi. Virtausnopeuden noustessa 0–7 m/s vastuskertoimien arvot nousevat rajusti, tämän jälkeen nousu taittuu selvästi kasvun silti ollessa huomattavaa virtausnopeuden muuttuessa 13 m/s. 13–26 m/s kuvaajien nousu on hidastunut huomattavasti. Virtausnopeuden ollessa 26–35 m/s kasvua ei juurikaan ole. Virtausnopeuden ollessa 35–42 m/s kasvu on pysähtynyt, vastuskertoimien saavutettua noin 1.18 arvon.

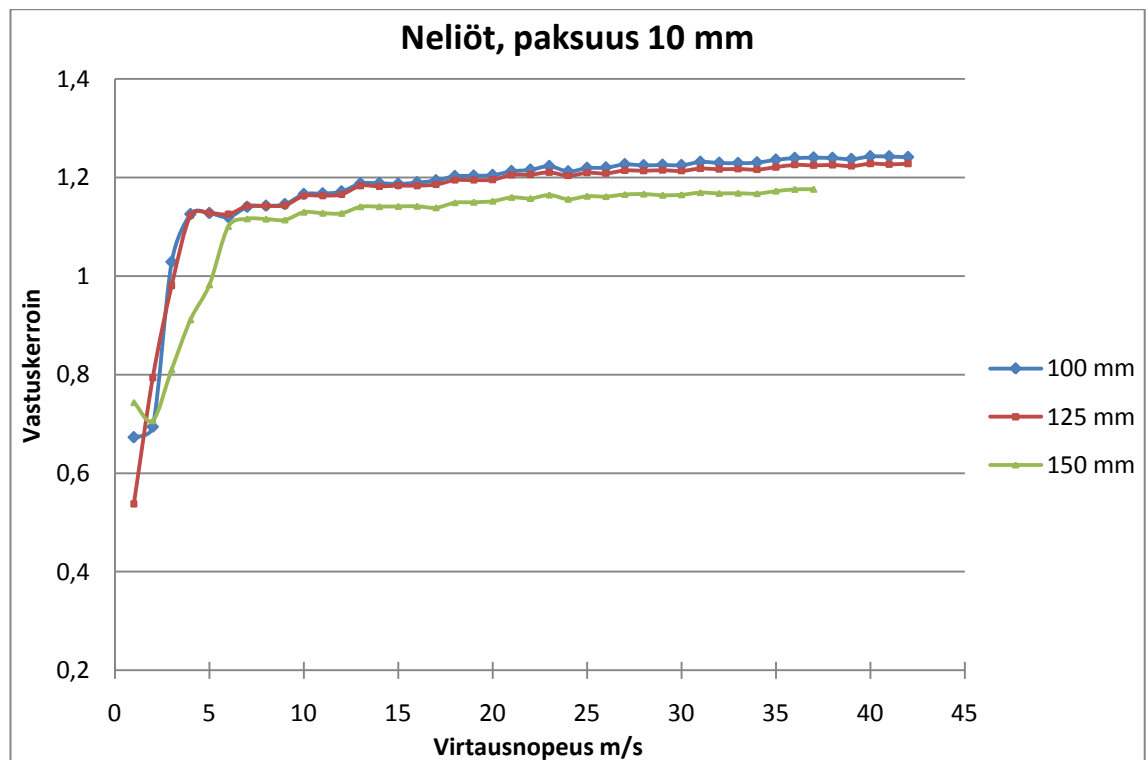


Kuva 18. Vastuskertoimet neliö, paksuus 3 mm.

Paksuus 10 mm

Kuvasta 19 huomaamme kuvaajien noudattavan samankaltaista trendiä kuin kuvassa 18 sillä poikkeuksella, että kuvan 19 vastusvoiman arvot ovat korkeammilla virtausnopeuksilla hieman suuremmat. Tarkemmin siihen, miksi nämä arvot ovat suuremmat, palataan myöhemmin kappaleessa 9.3, kun tarkastellaan paksuuden vaikutusta vastuskertoimeen.

Sivunpituudeltaan suurimman kappaleen kuvaaja asettuu alemmaksi kuin kahden muun kappaleen kuvaajat, mutta muuten varsinainen trendi on samanlainen. Pienimmän kappaleen kuvaaja sivuaa osan matkaa keskikokoisen kappaleen kuvaajaa nousten virtausnopeuden ollessa 42 m/s arvoon 1,24. Sivunpituudeltaan keskikokoisen kappaleen kuvaaja jää näiden kahden edellä mainitun kuvaajan väliin ollen lähempänä pienemmän kappaleen kuvaajaa.



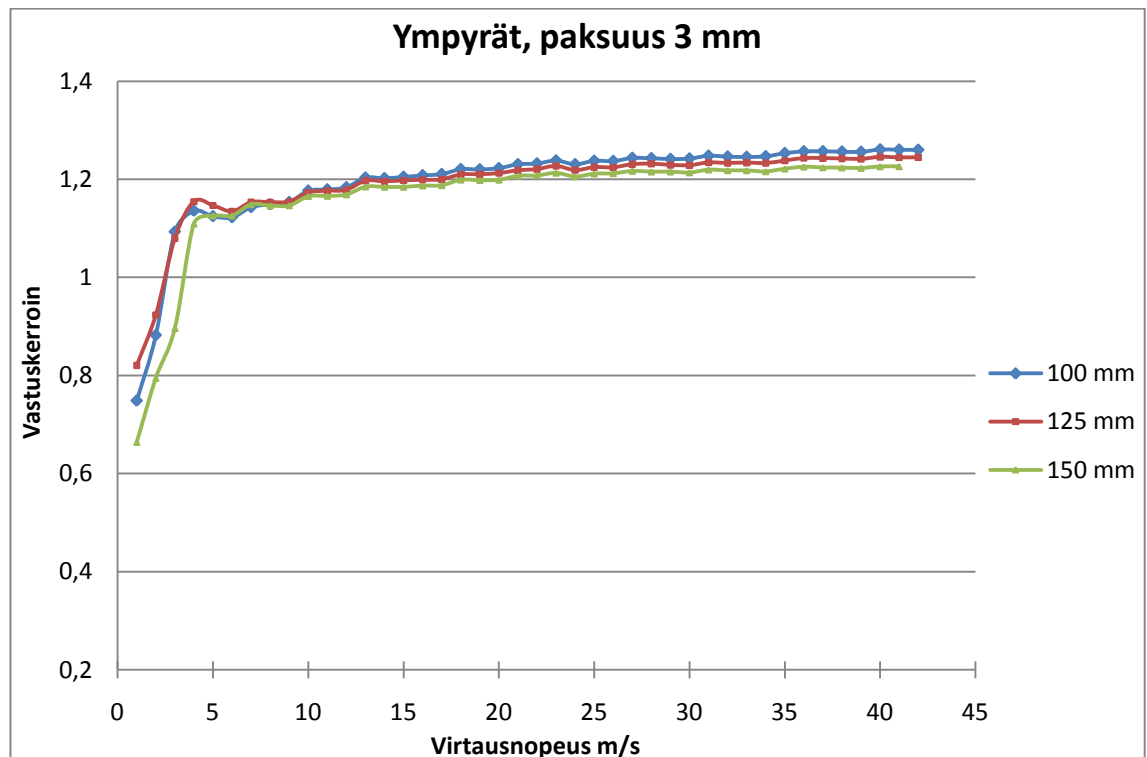
Kuva 19. Vastuskertoimet neliö, paksuus 10 mm.

9.2.2 Ympyrät

Paksuus 3 mm

Kolmen millimetrin paksuisten ympyrän muotoisten kappaleiden kuvaajat on esitetty kuvassa 20. Kuvasta nähdään kuvaajien noudattavan keskenään samankaltaista trendiä, eikä suurta hajontaa vastuskertoimien välillä ilmene.

Virtausnopeuden muuttuessa 4–6 m/s tapahtui vastuskertoimen arvossa kaikissa kuvaajissa pieni notkahdus. Kasvu vastuskertoimen arvossa alun jälkeen oli suurimmillaan virtausnopeuden muuttuessa 6–13 m/s, jonka jälkeen kasvu hidastui tasaisesti. Virtausnopeuden saavutettua 35 m/s vastuskertoimen arvot tasaantuivat suurimmalla ja keskikokoisella kappaleella, mutta pienimmän kappaleen vastuskerroin kohosi vielä hieman. Virtausnopeuden ollessa 6–12 m/s kuvaajat ovat lähestulkoon päällekkäin, tämän jälkeen kuvaajat erkanevat hieman toisistaan asettuen koon mukaiseen järjestykseen pienimmän kappaleen kuvaajan ollessa ylimmäisenä.



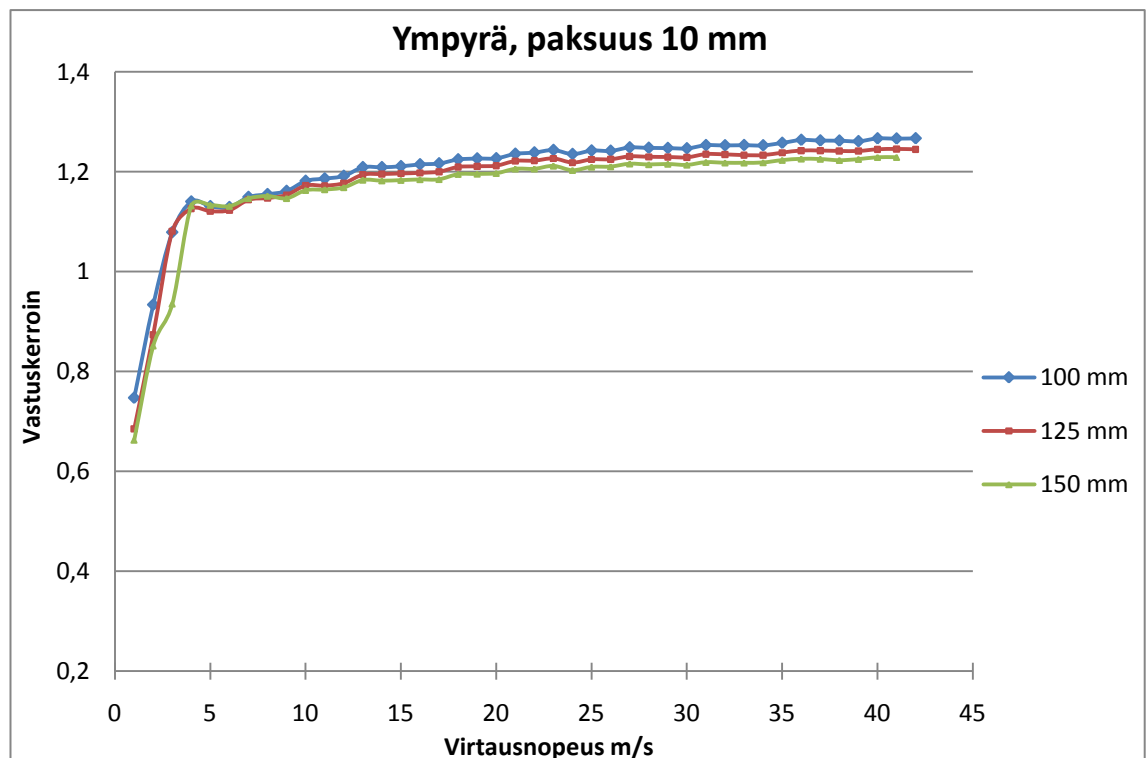
Kuva 20. Vastuskertoimet ympyrä, paksuus 3 mm.

Paksuus 10 mm

Kuvassa 21 on esitetty kymmenen millimetrin paksuisten ympyräkappaleiden vastuskertoimen kuvaajat virtausnopeuden suhteen. Kuvaajista huomaamme niiden noudattavan yhteistä kehityssuuntaa keskenään.

Virtausnopeuden ollessa välillä 0–9 m/s kuvaajat ovat suurimman osan matkasta päällekkäin, minkä jälkeen erkanevat vähän. Virtausnopeuden muuttuessa 9–35 m/s vastuskertoimen arvo kasvaa, kasvunopeuden hidastuen koko ajan. Virtausnopeuden saavutettua 35 m/s vastuskertoimen arvoa voidaan pitää lähestulkoon tasaisena.

Halkaisijaltaan pienimmän kappaleen kuvaaja asettuu ylimmäiseksi ja suurimman kappaleen kuvaaja jää alimmaiseksi. Keskikokoisen kappaleen kuvaaja on keskimäisenä, ollen lähestulkoon kahden muun kuvaajan puolivälissä.



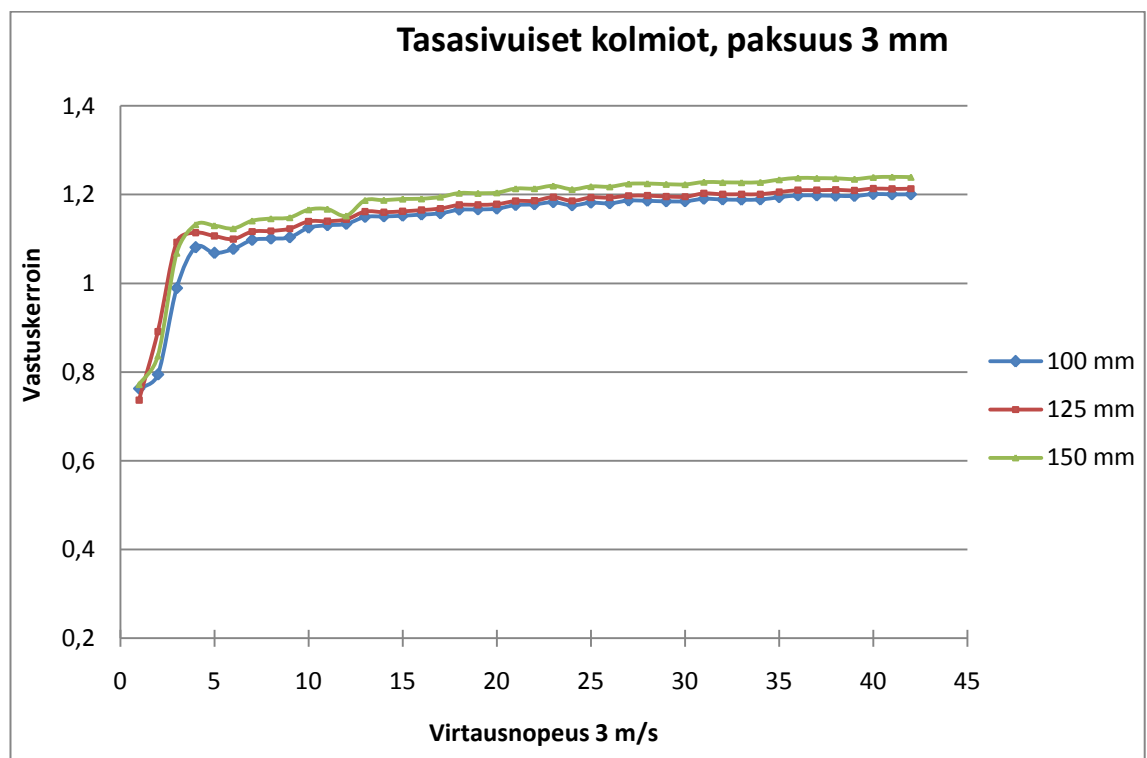
Kuva 21. Vastuskertoimet ympyrä, paksuus 10 mm.

9.2.3 Tasasivuiset kolmiot

Paksuus 3 mm

Virtausnopeuden ollessa alle 5 m/s on vastuskertoimen arvoissa suurempi hajonta kuin virtausnopeuden ollessa yli 5 m/s. Tämä johtune aiemmin mainitusta mittaustarkkuudesta, jonka epätarkkuudet korostuivat pienillä voimilla ja virtausnopeuksilla. Vaikkakin vastuskertoimen arvoissa on hajontaa kappaleiden halkaisijoiden välillä, on kuvaajissa selvästi havaittavissa yhtenäinen trendi. Virtausnopeuden muuttuessa 4–6 m/s on kuvaajissa pieni lasku, jonka jälkeen kuvaajat nousevat jyrkemmin virtausnopeuden noustessa 12 m/s. Virtausnopeuden saavuttaessa 23 m/s on kasvu selvästi hidastunut ja 23–42 m/s kasvua ei juuri ole.

Kuvasta 22 huomataan, että halkaisijaltaan pienimmän kappaleen kuvaaja on alimmaisena, keskikokoinen kappale sijoittuu keskelle ja halkaisijaltaan suurimman kappaleen kuvaaja on ylimmäisenä.



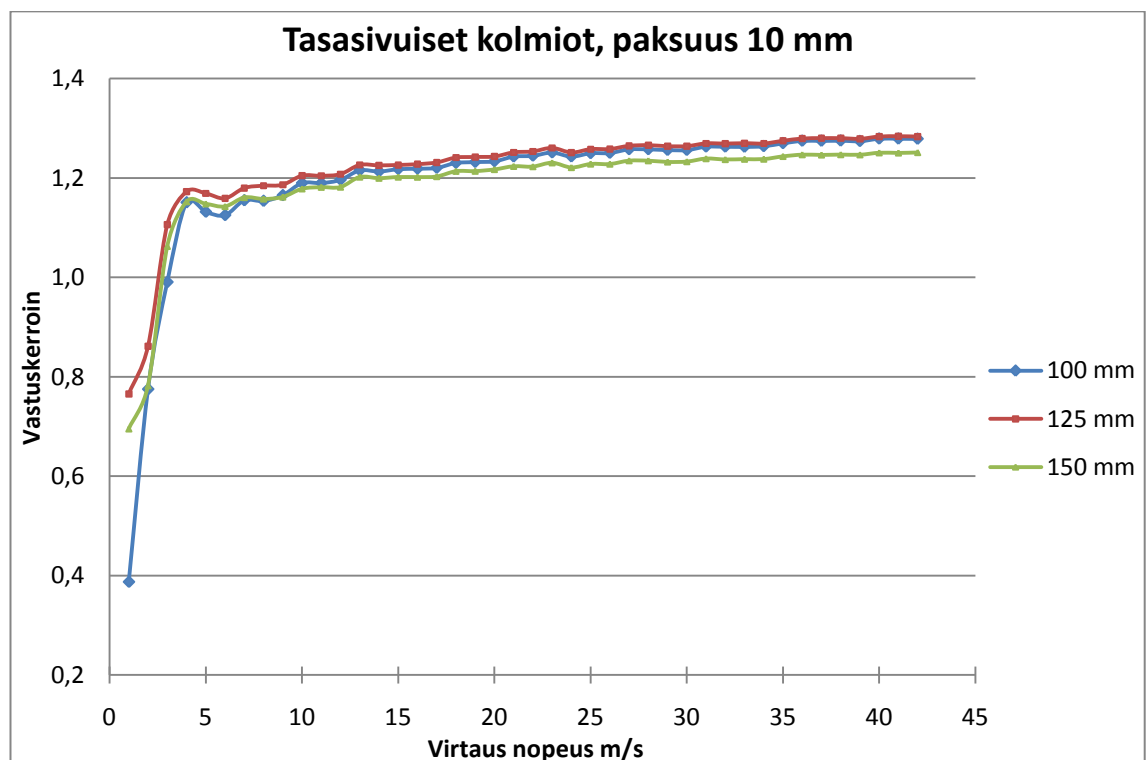
Kuva 22. Vastuskertoimet tasasivuiset kolmiot, paksuus 3 mm.

Paksuus 10 mm

Kuvassa 23 on selvästi havaittavissa hajonta vastuskertoimen arvoissa virtausnopeuden ollessa alle 5 m/s. Hajonta johtuu pienestä vastusvoimasta, suuruusluokan ollessa 0,001–0,005 N, joka vastaa painoksi muutettuna gramman kymmenyksiä.

Kuvassa 23 verrattaessa kuvaan 22 huomataan, että halkaisijaltaan suuremman kappaleen kuvaaja on alempana kuin kahden muun kappaleen kuvaajat. Keskikokoisen kappaleen kuvaaja on tässä ylimmäisenä ja pienimmän kappaleen kuvaaja keskimmäisenä, tosin se sivuaa lähestulkoon koko matkan halkaisijaltaan keskikokoisen kappaleen kuvaajaa.

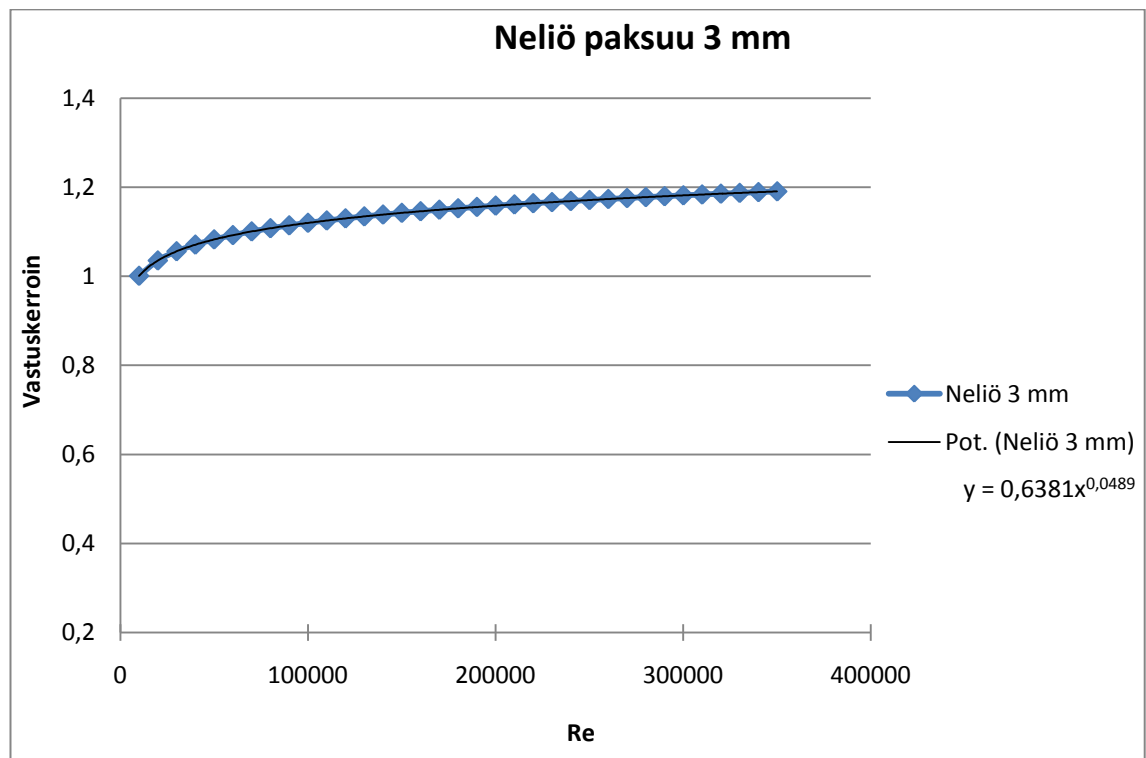
Vastusvoiman pienestä hajonnasta riippumatta on kuvaajissa selvä yhtenäinen trendi, joka noudattelee lähestulkoon samaa rataa kuin kuvan 22 trendi, joskin kuvan 23 kuvaajat nousevat ylempiä. Tähän palataan myöhemmin, kun tutkitaan paksuuden vaikutusta kappaleen vastuskertoimen arvoon.



Kuva 23. Vastuskertoimet tasisivuiset kolmiot, paksuus 10 mm.

9.2.4 Analyysi

Kuvien 18–23 kuvaajat eivät näyttäneet leveyden selvästi vaikuttavan vastuskertoimen arvoon. Kuvaajat olivat toki kerroksittain, mutta keskinäinen järjestys vaihteli kuvasta riippuen. Voidaan siis todeta, ettei kappaleen halkaisijan tai sivun pituus merkittävästi vaikuta vastuskertoimen arvoon, ja tästä johtuen kuvaajat voidaan siltä osin yhdistää. Kuvaajat yhdistettiin liitteessä 5 olevien trendiviivojen yhtälöiden avulla, kun $Re > 10^4$. Yhtälöistä ratkaistiin y :n arvot hetkellä $x = Re$, kun $10^4 < Re < 35 \cdot 10^4$. Tämän jälkeen y :n arvoista laskettiin keskiarvo. Kuvassa 24 esitetään 3 mm paksun neliön vastuskertoimen kuvaaja, kun $Re > 10^4$. Muiden kappaleiden yhdistetyt kuvaajat löytyvät liitteestä 5.



Kuva 24. Vastuskerroin neliölle, paksuus 3 mm.

9.3 Paksuuden vaikutus vastuskertoimen arvoon

Edellä olevassa kohdassa todettiin, ettei kappaleen virtauksen poikkisuuntainen leveys vaikuta vastuskertoimen arvoon. Seuraavaksi tarkastelemme kappaleen virtauksen-suuntaisen paksuuden vaikutusta vastuskertoimen arvoon. Kaavassa 48 osoitetaan

kappaleen kokonaisvastuskertoimen olevan painevastuskertoimen ja kitkavastuskertoimen summa.

9.3.1 Tasasivuinen kolmio ja neliö

Kuvissa 25–27 vertaamme paksuuden muutoksen vaikutusta vastuskertoimen arvoon Reynoldsin luvun suhteen, kun $Re > 10^4$.

Kuvasta 25 ja 26 huomataan, että paksumpien kappaleiden kuvaajat ovat selvästi ylempänä kuin ohuempien kappaleiden kuvaajat. Huomion arvoista tässä kumminkin on se, että kuvaajat noudattavat muuten keskenään muotokohtaista trendiä. Kuvaajien välinen ero johtuu paksumpien kappaleiden sivupintojen suuremmasta pinnankarheudesta. Neliön ja kolmion muotoiset 3 mm:n paksuiset kappaleet valmistettiin levyleikkurilla, näin valmistettuna kappaleelle ei tullut terävää särmää, vaan kappaleiden reunassa oli pyöristys. 10 mm:n paksuiset kappaleet valmistettiin vannesahalla, minkä vuoksi kappaleen sivupinnasta tuli rosoinen.

Kuvien 25 ja 26 kolmen millimetrin paksuisten kappaleiden kokonaisvastuskerroin on lähes kokonaan painevastuskertoimen aiheuttama vastuskerroin.

$$C_V \approx C_{V,paine} \quad (51)$$

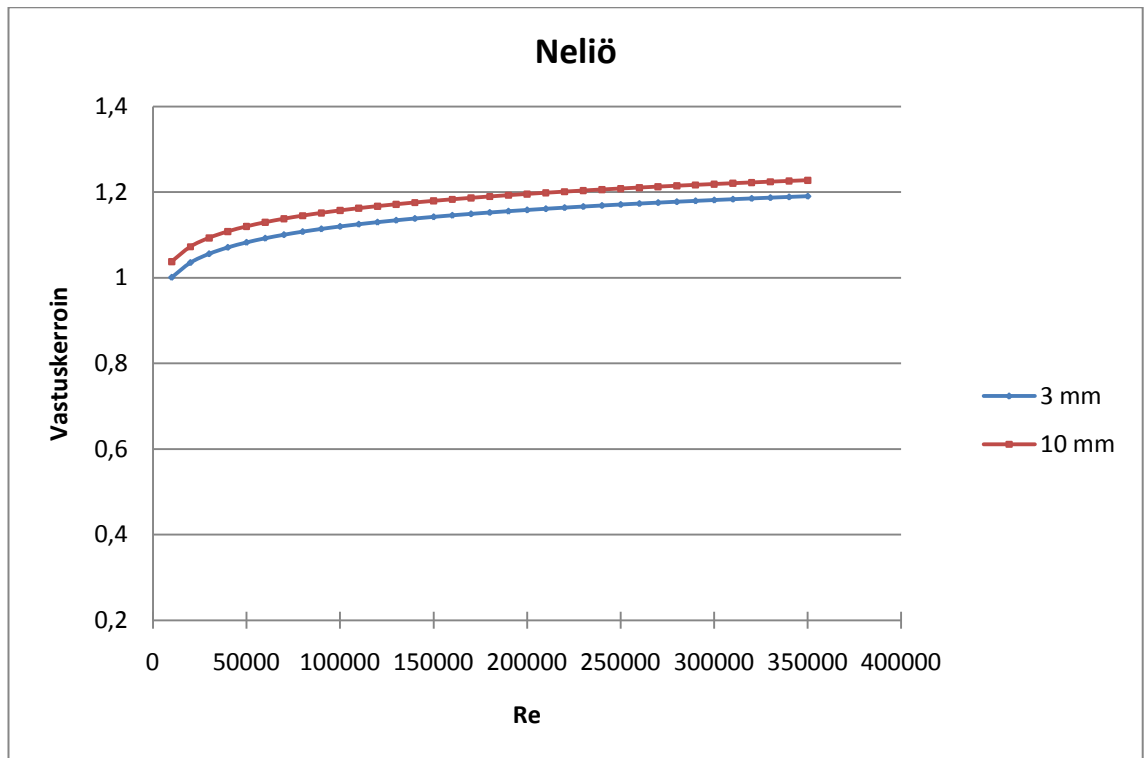
Paksumpien kappaleiden kokonaisvastuskerroin muodostuu kaavan 48 perusteella, jossa kitkavastuskerroin lasketaan kaavalla 40.

$$C_V = C_{V,kitka} + C_{V,paine} \quad (48)$$

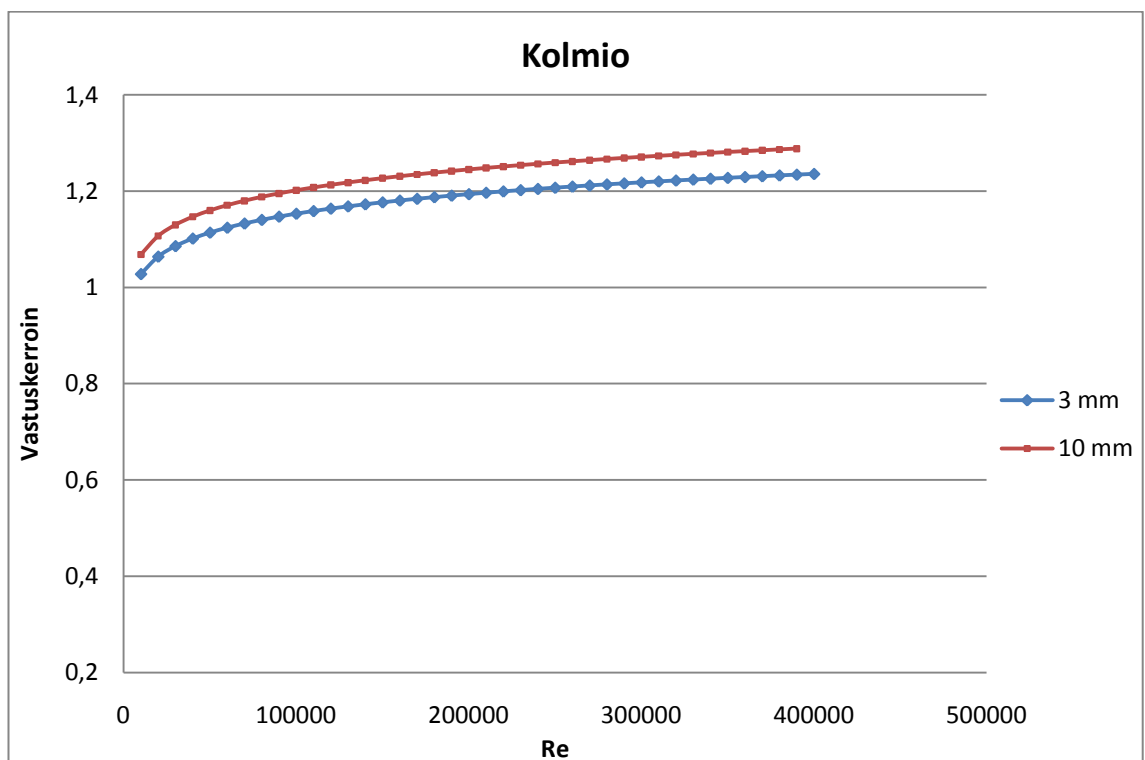
$$C_{V,kitka} \approx (1,89 + 1,62 \log \frac{L}{\epsilon})^{-2,5} \quad (40)$$

Tällöin paksumpien kappaleiden kokonaisvastuskertoimen kaavaksi saadaan:

$$C_V \approx C_{V,paine} + (1,89 + 1,62 \log \frac{L}{\epsilon})^{-2,5} \quad (52)$$



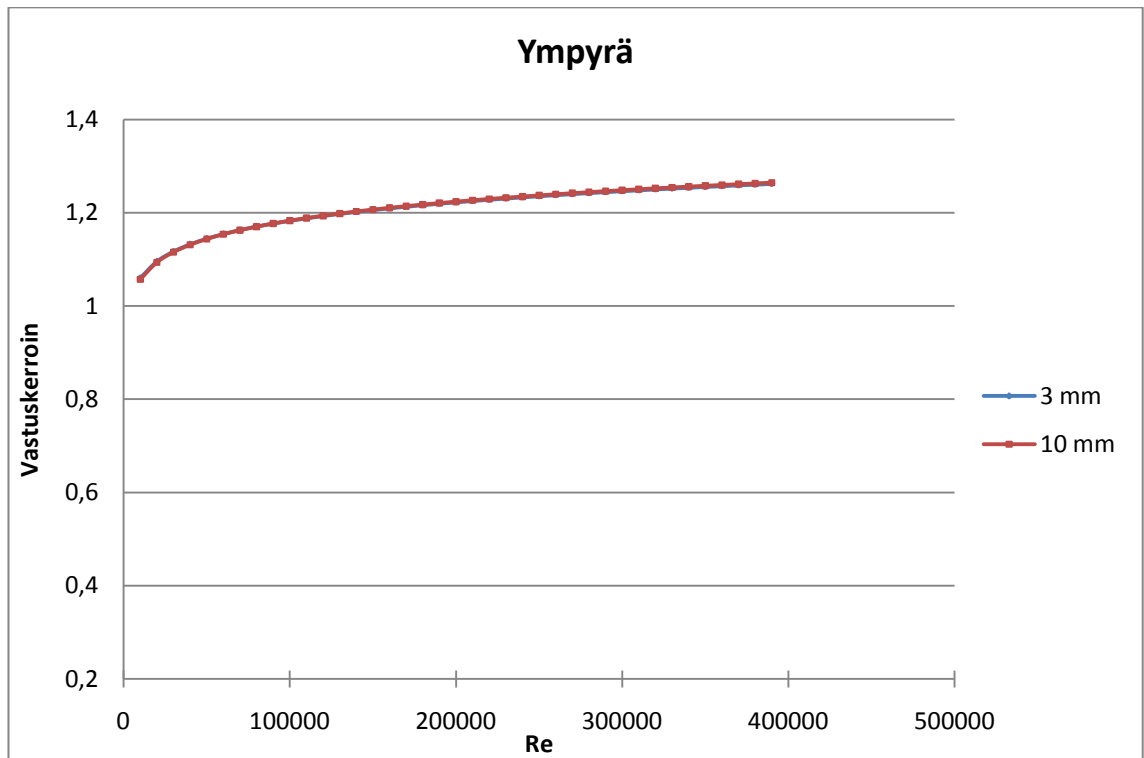
Kuva 25. Vastuskerroin neliöt 3 ja 10 mm.



Kuva 26. Vastuskerroin tasasivuinen kolmio 3 ja 10 mm.

9.3.2 Ympyrä

Kuvasta 27 huomataan, ettei ympyrän muotoisten kappaleiden kuvaajien välillä ole eroa. Tämä johtuu siitä, että kaikki ympyrän muotoiset kappaleet valmistettiin sorvilla, joten niiden pinnankarheus oli hyvin pieni. Pienestä pinnankarheudesta johtuen pak-suuden kasvaessa 3–10 mm ei mainittavaa eroa vastuskertoimen arvossa tapahtunut.



Kuva 27. Vastuskerroin ympyrät 3 ja 10 mm.

9.4 Tulosten vertaaminen

Tutkimuksissa saadut mittaustulokset poikkeavat vähän taulukoiden 1–3 vastaavista arvoista, joskin taulukkoarvoissa on keskenään eroa yli 7 %. Neliömuotoisen kappaleen mitatun vastuskertoimen arvo on nähtävissä kuvassa 25, taulukkoarvo löytyy taulukosta 2. Ympyränmuotoisen kappaleen taulukkoarvo on taulukossa 1 ja mitattu arvo kuvassa 27. Tasasivuisen kolmion mitattu vastuskertoimen arvo esitetään kuvassa 26. Tasasivuiselle kolmiolle ei ole lähdeaineistossa määritelty taulukkoarvoa.

10 Yhteenveto

Insinööriyössä tutkittiin virtauksessa olevaan kappaleeseen kohdistuvan vastusvoiman vastuskerrointa. Vastuskertoimen määrittäminen tapahtui tutkimalla muodon, leveyden ja paksuuden vaikutusta vastuskertoimen suuruuteen.

Tutkimuksissa tehtyjä mittauksia varten valmistettiin 18 erilaista levymäistä kappaletta, joille tehtiin kaksi mittaussarjaa, virtausnopeuden vaihtuessa 0–42 m/s, 1 m/s porrastuksella. Mittaukset suoritettiin yksi kappale kerrallaan energiatekniikan laboratoriossa. Kappaleeseen kohdistuneen vastusvoiman kautta laskettiin vastuskertoimen arvo. Vastuskertoimien arvot syötettiin Excel-taulukko-ohjelmaan, jolla laskettiin kappalekohtaiset vastuskertoimen keskiarvot.

Tutkimuksissa huomattiin, ettei virtauksen poikkisuuntainen leveys vaikuta kappaleen vastuskertoimen arvoon. Paksuuden muuttuessa 3–10 mm neliön ja kolmion muotoisten kappaleiden vastuskertoimien arvot kasvoivat. Tämä johtui paksumpien kappaleiden sivupintojen suuremmasta pinnankarheudesta. Ympyrän muotoisten kappaleiden vastuskertoimet eivät kasvaneet paksuuden kasvaessa 3–10 mm. Tämä johtui ympyrän muotoisten kappaleiden sivupintojen pienestä pinnankarheudesta, tästä syystä kitkavastusvoima ei oleellisesti kasvanut.

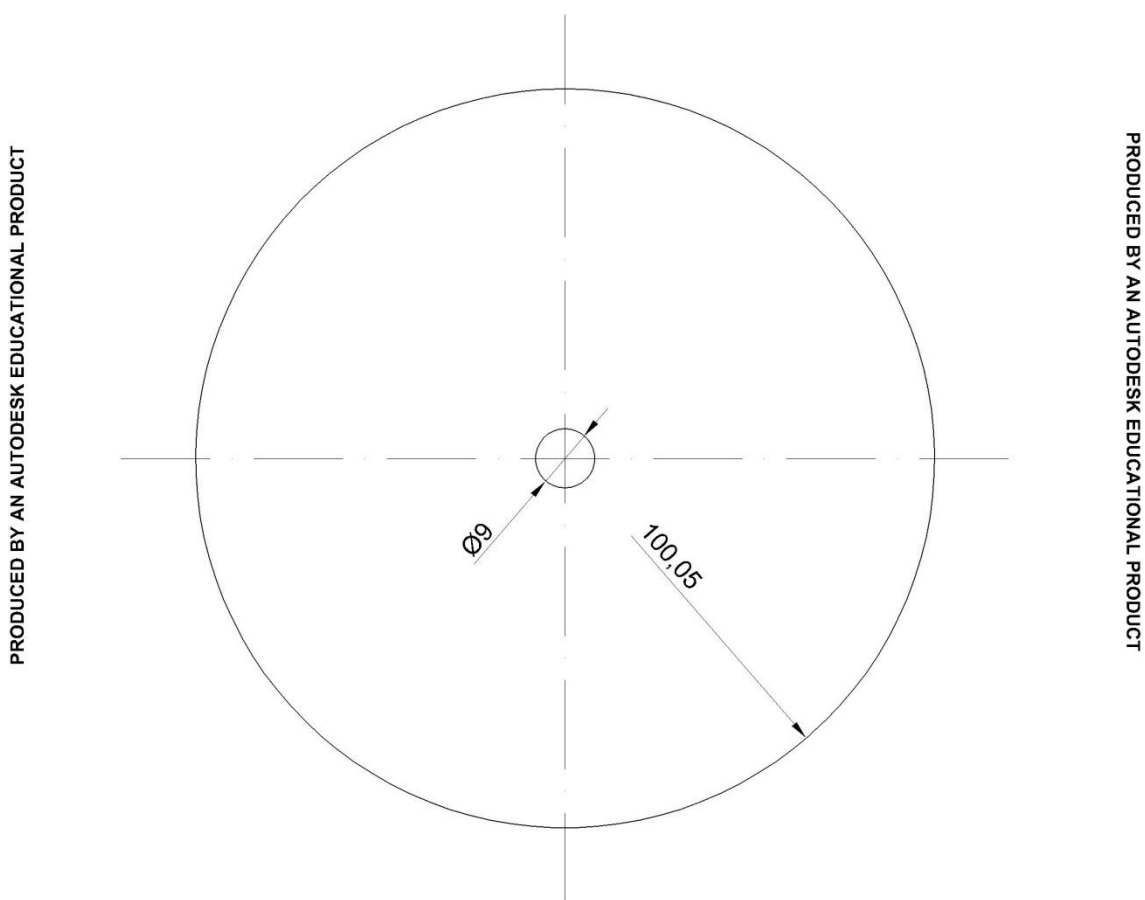
Tuulitunnelissa suoritettujen mittausten perusteella laskettujen vastusvoimien arvot poikkesivat maksimissaan 7,8 % verrattaessa kirjallisuudesta löytyviin arvoihin. Kirjallisuudesta löytyvät arvot poikkeavat keskenään toisistaan noin 7 % verran. Tästä johtuen tutkimuksia voidaan pitää onnistuneena ja mittaustuloksia toistettavina.

Lähteet

- [1] Mäkelä, Mikko – Soininen, Lauri – Tuomola, Seppo – Öistämö, Juhani. 2005. Tekniikan kaavasto. Tampere: Amk-Kustannus Oy Tammertekniikka
- [2] Çengel, Yunus A. – Cimbala John M. 2006. Fluid Mechanics and Applications. New York: The McGraw-Hill Companies, Inc.
- [3] Suvanto, Kari. 2003. Tekniikan fysiikka. Helsinki: Edita Publishing Oy
- [4] Laine, Seppo – Hoffren, Jaakko – Renko, Kari. 2006. Lentokoneen Aerodynamiikka ja Lentomekaniikka. Helsinki: WSOY Oppimateriaalit Oy.
- [5] Turbulenssi. 2010. Verkkodokumentti. Wikipedia. <<http://fi.wikipedia.org/wiki/Turbulenssi>> 27.11.2010. Luettu 16.2.2011.
- [6] White, Frank M. 2003. Fluid Mechanics, Fifth Edition. New York: The McGraw-Hill Companies, Inc.
- [7] Bohl, Willi 1984. Teknillinen virtausoppi. Jyväskylä: Gummerus Oy
- [8] Koskinen, Jani – Penttinen, Sami. 2003. Insinööriyö: Ohjaussiivet virtauskanavassa. Helsinki: Helsingin ammattikorkeakoulu.
- [9] How strain gage work. Valmistajan verkkodokumentti. Kyowa Electronic Instruments Co., Ltd. <<http://www.kyowa-ei.co.jp/english/products/gages/pdf/howsgw.pdf>>. Luettu 14.3.2011.
- [10] How strain gage work. Valmistajan verkkodokumentti. Kyowa Electronic Instruments Co., Ltd. <<http://www.kyowa-ei.co.jp/english/products/gages/pdf/bridge.pdf>>. Luettu 14.3.2011.
- [11] Testo 445. Valmistajan verkkodokumentti. <[http://www.testo.de/online/abaxx-?%\\$part=PORTAL.INT.ContentDesk&\\$event=show-from-menu&categoryid=1215683](http://www.testo.de/online/abaxx-?%$part=PORTAL.INT.ContentDesk&$event=show-from-menu&categoryid=1215683)>. Luettu 20.4.2011.
- [12] Termopari lämpötila-anturina. 2009. Verkkodokumentti. Pietiko Oy. <<http://www.pietiko.fi/mittarikirjallisuus/Termopari.pdf>>. Luettu 22.4.2011

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

Mitat millimetreinä paksuus 3 mm

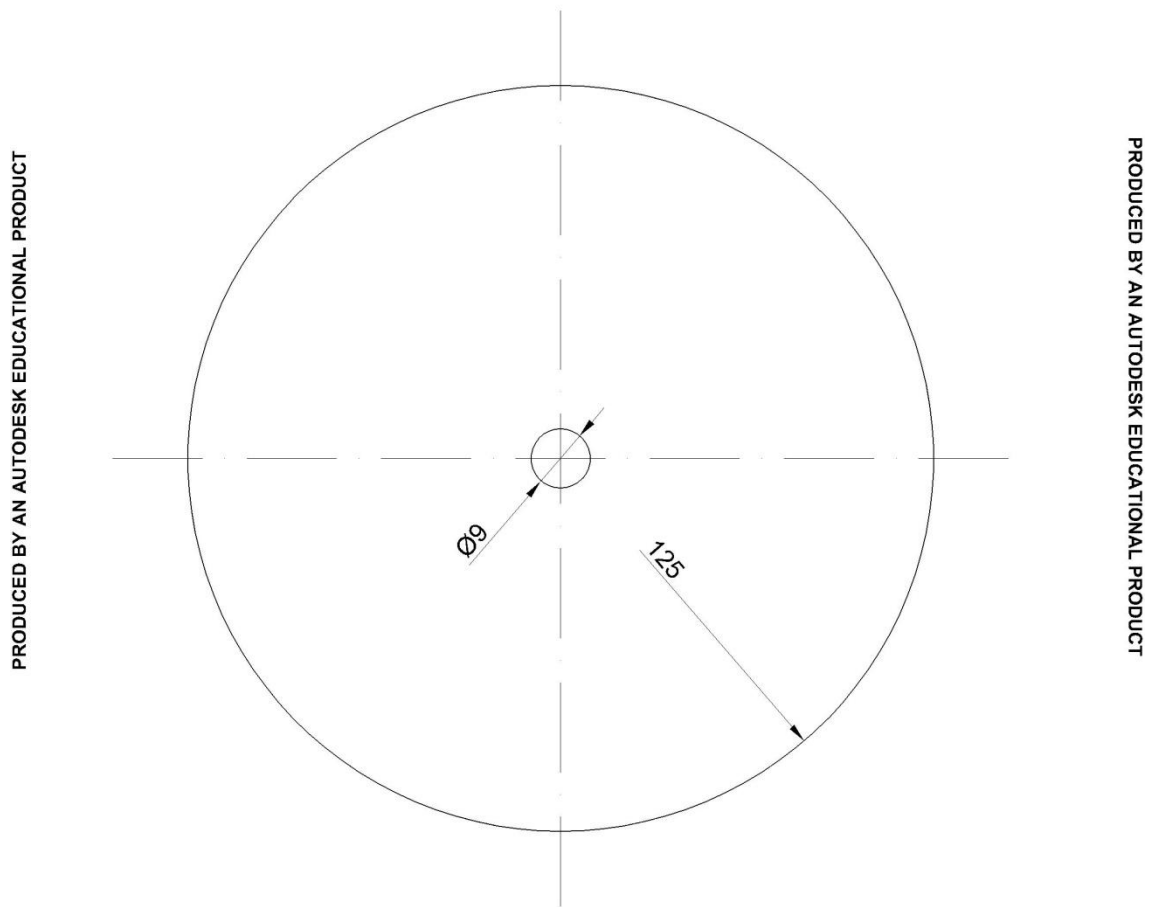


PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

Kuva 1. Ympyrä 100 mm * 3 mm.

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

Mitat millimetreinä paksuus 3 mm

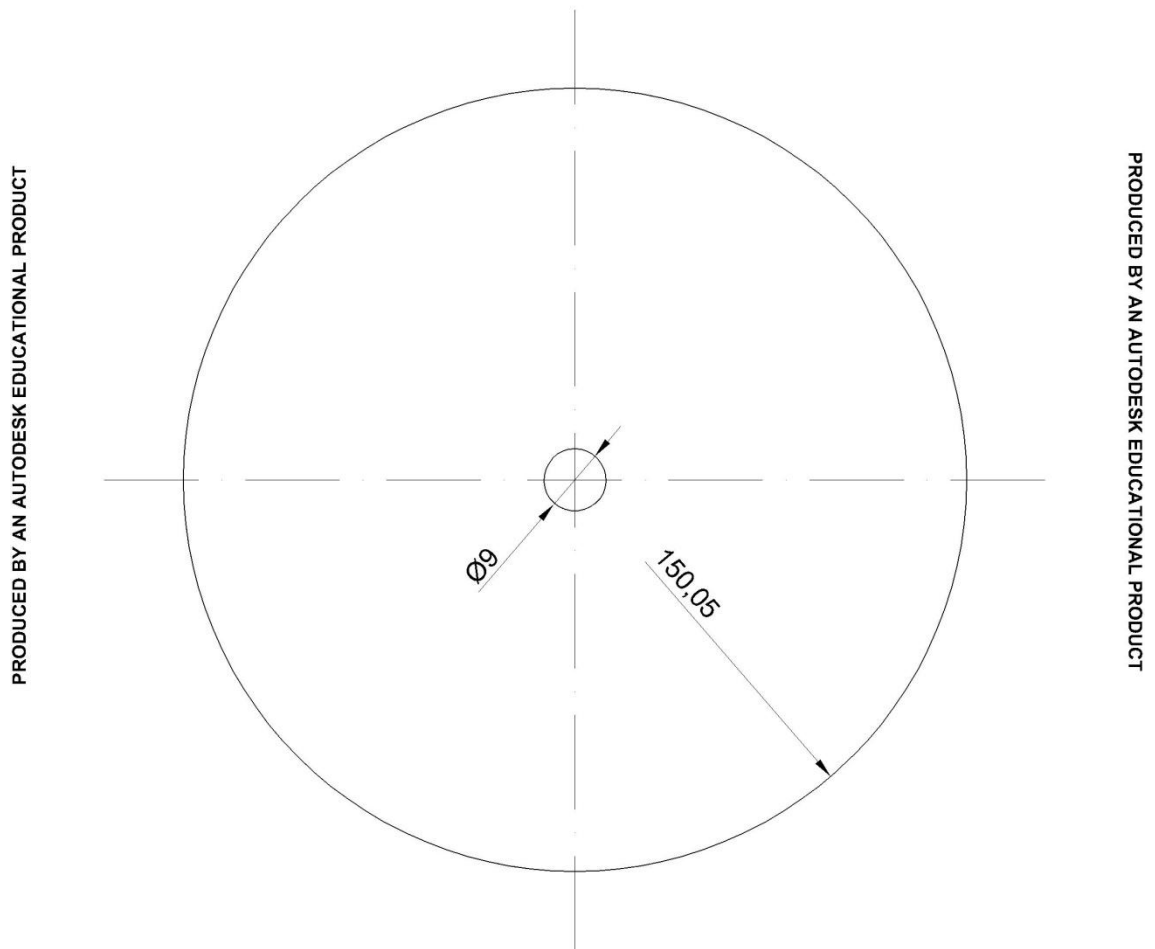


Kuva 2. Ympyrä 125 mm * 3 mm.

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

Mitat millimetreinä paksuus 3 mm



PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

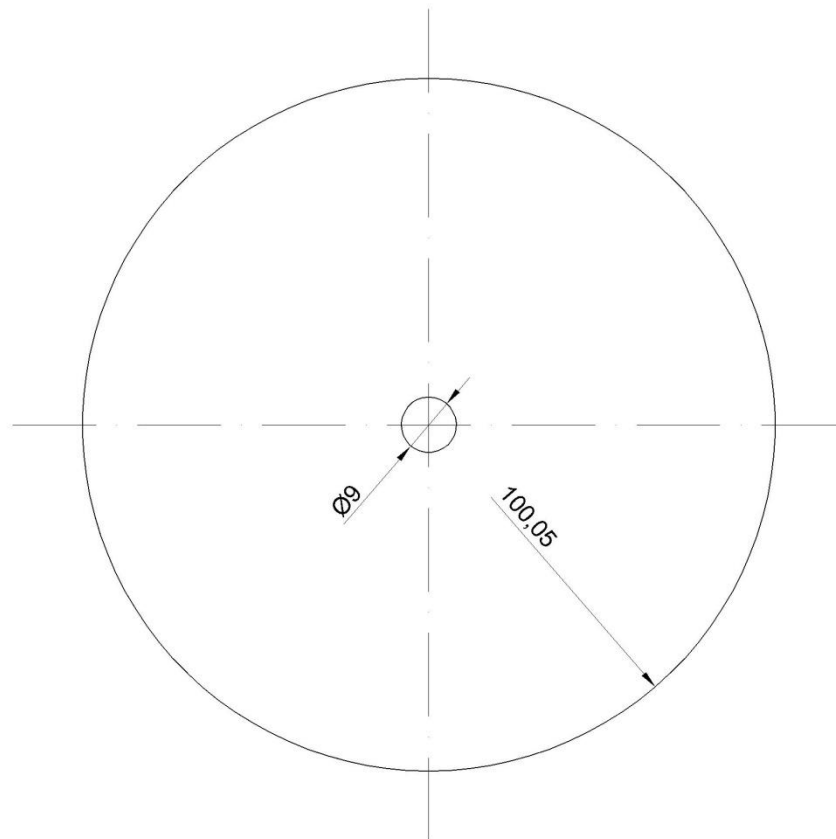
Kuva 3. Ympyrä 150 mm * 3 mm.

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

Mitat millimetreinä paksuus 10 mm

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

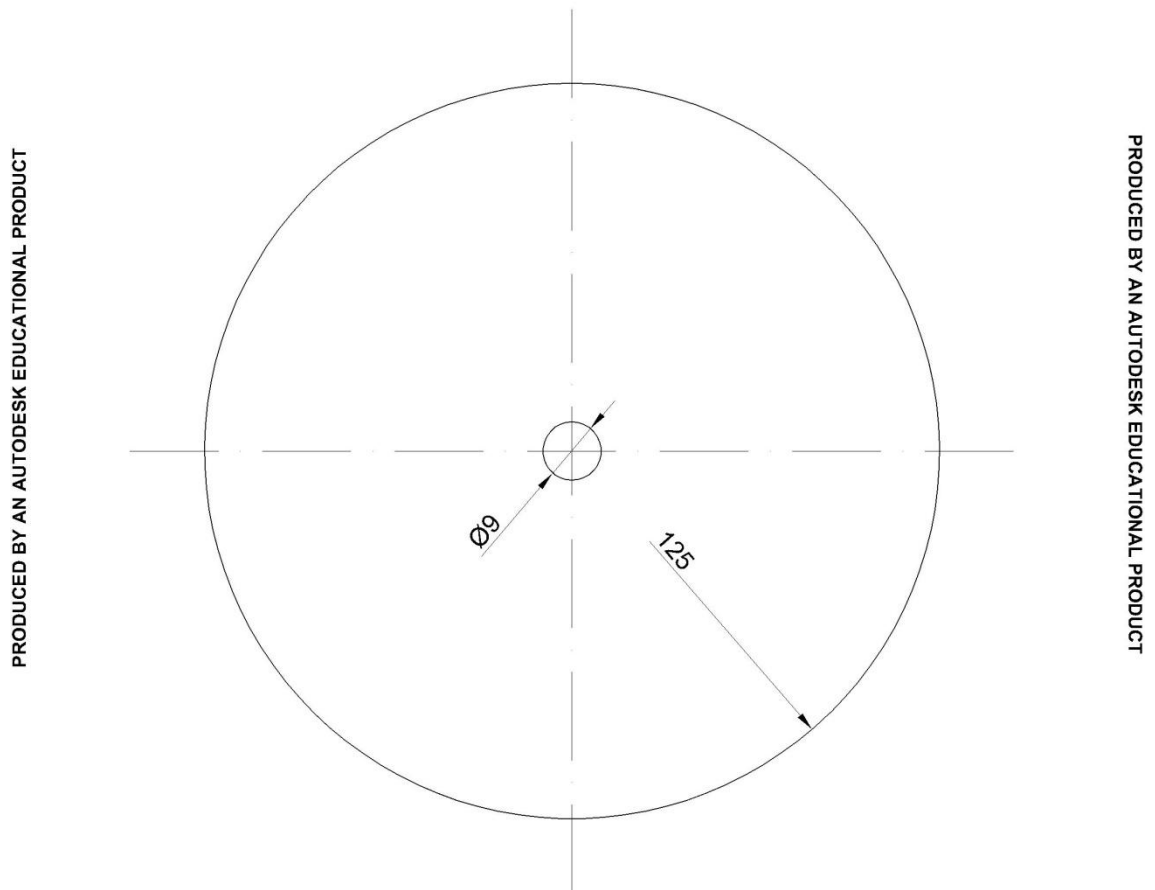


PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

Kuva 4. Ympyrä 100 mm * 10 mm.

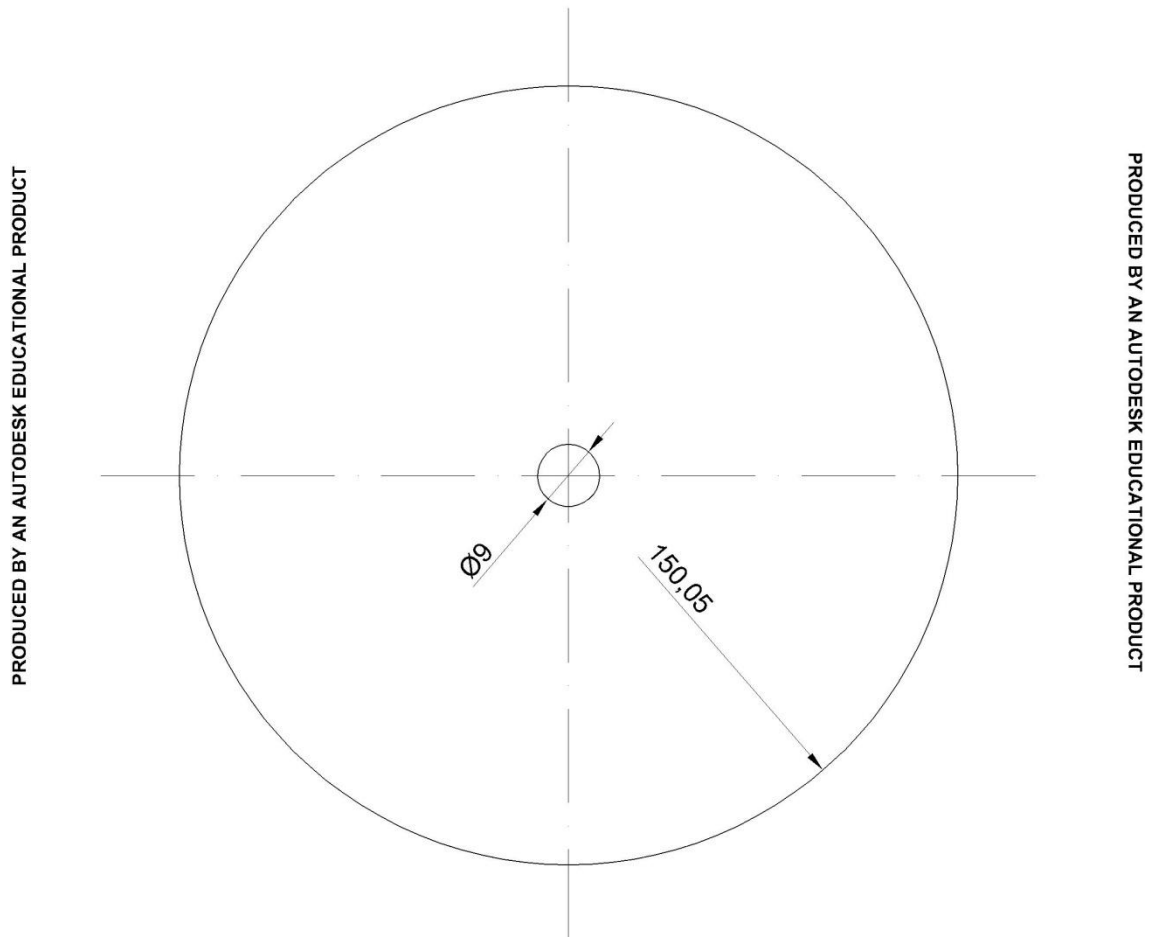
PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

Mitat millimetreinä paksuus 10 mm



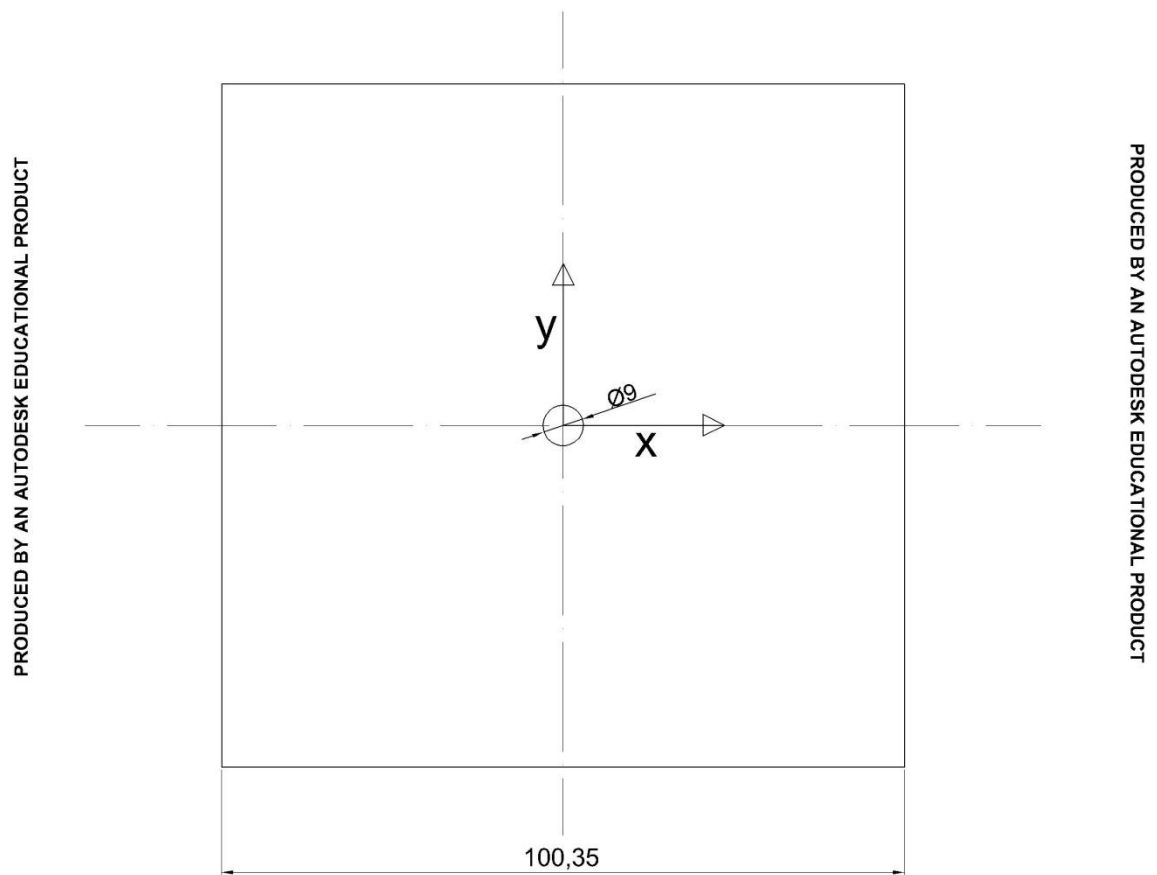
Kuva 5. Ympyrä 125 mm * 10 mm.

Mitat millimetreinä paksuus 10 mm



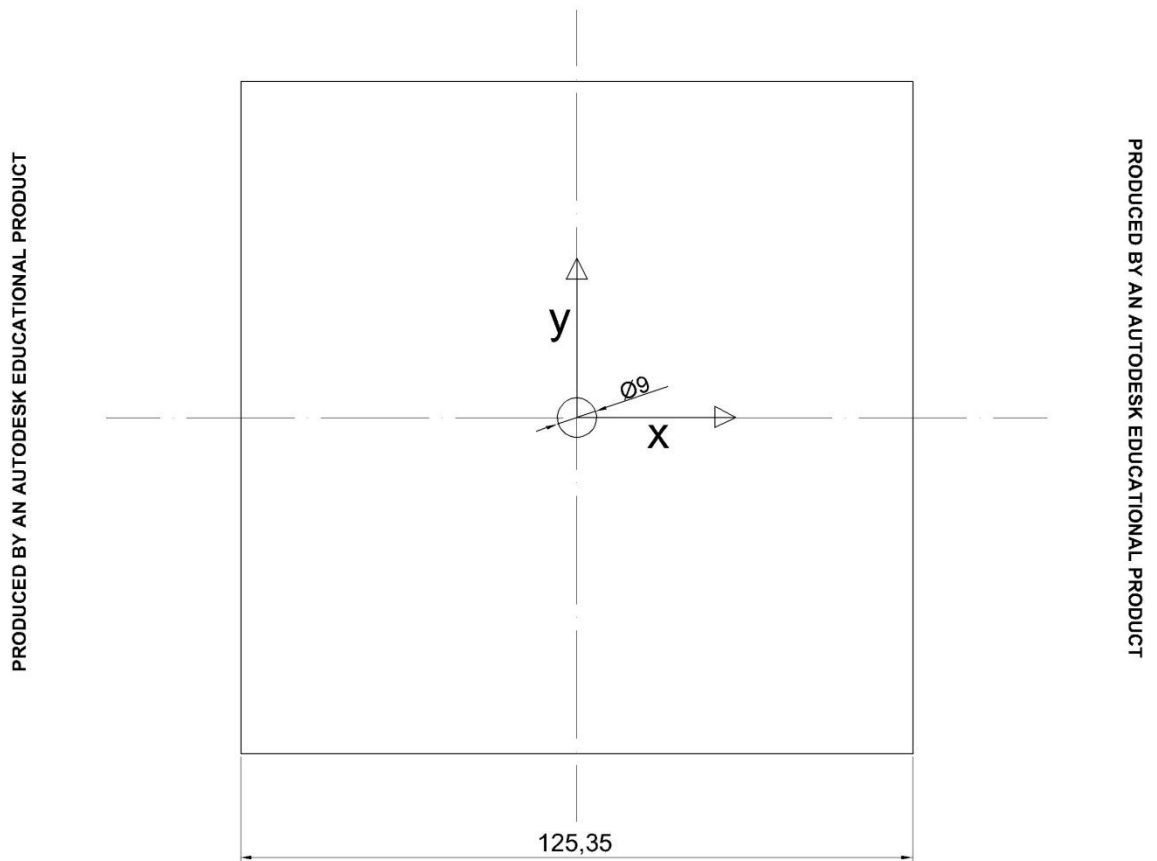
Kuva 6. Ympyrä 150 mm * 10 mm.

Mitat millimetreinä paksuus 3 mm



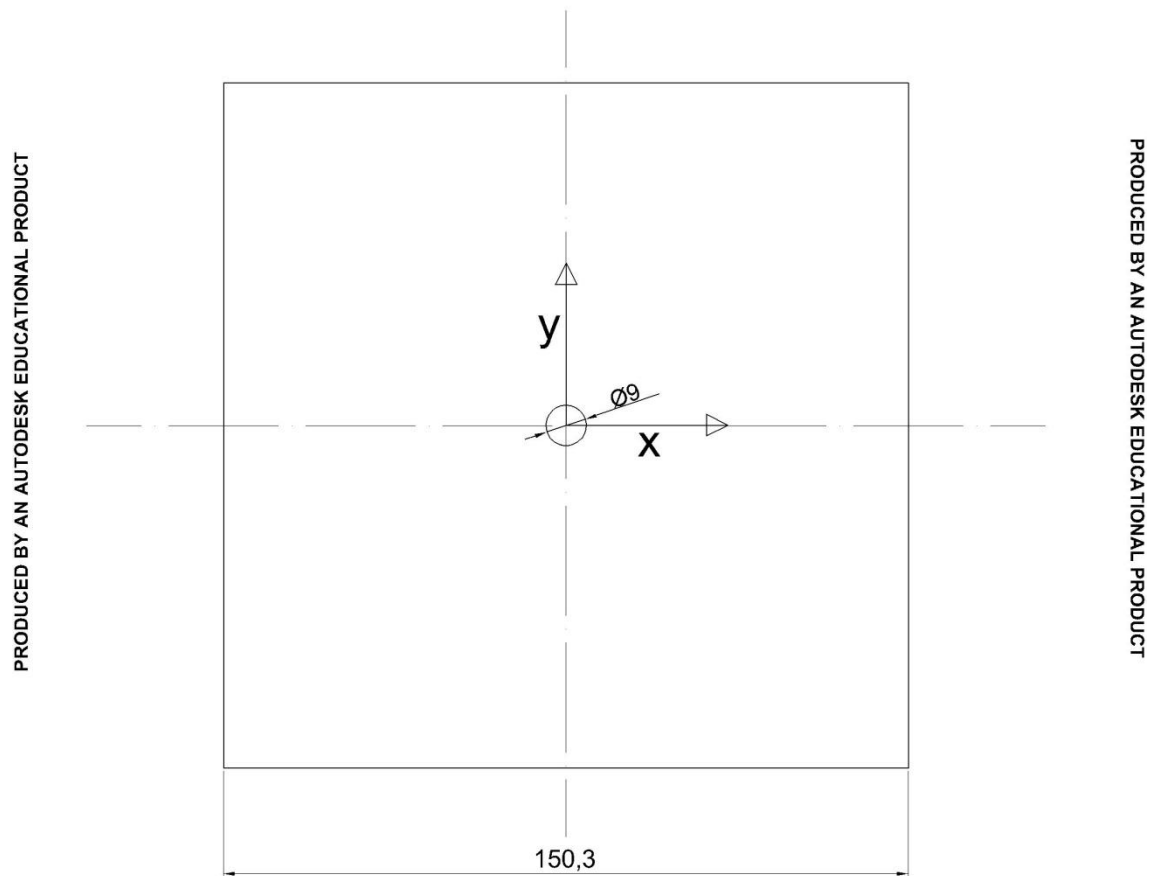
Kuva 7. Neliö 100 mm * 3 mm.

Mitat millimetreinä paksuus 3 mm



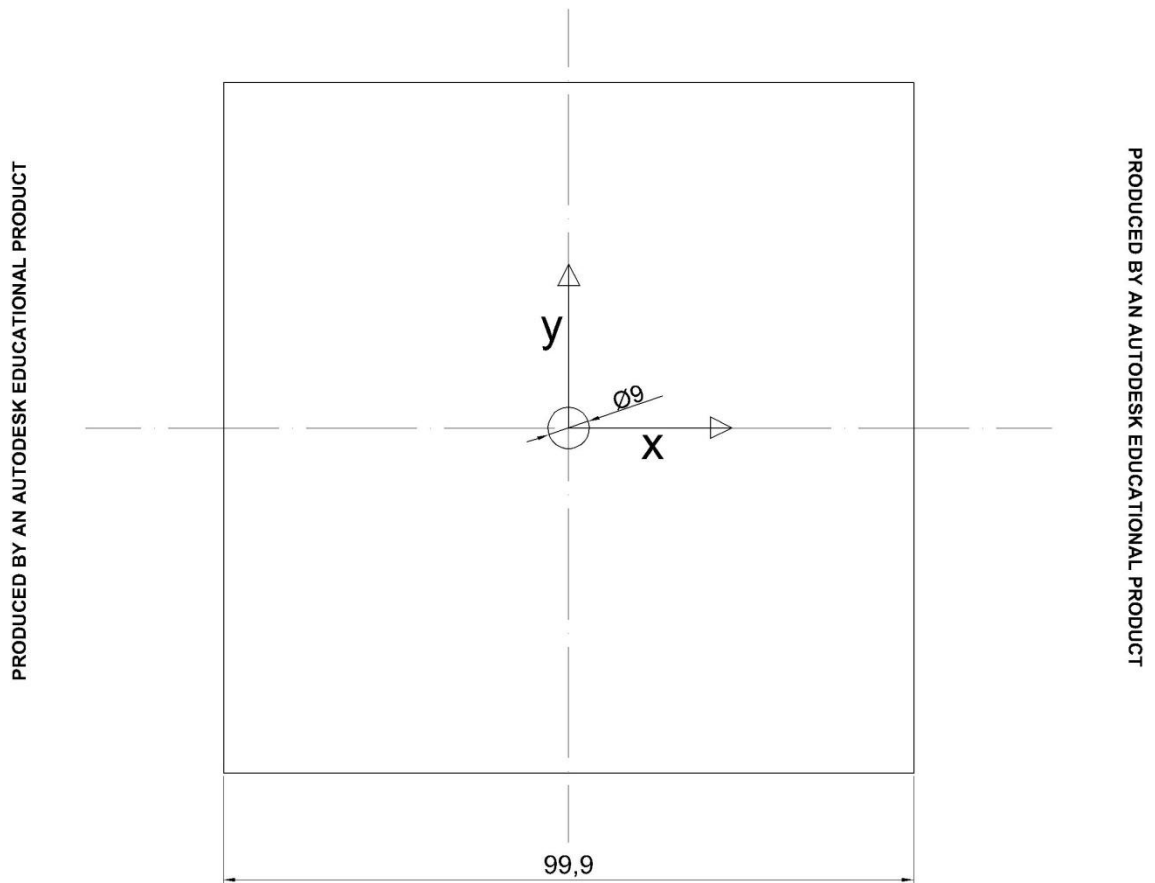
Kuva 8. Neliö 125 mm * 3 mm.

Mitat millimetreinä paksuus 3 mm



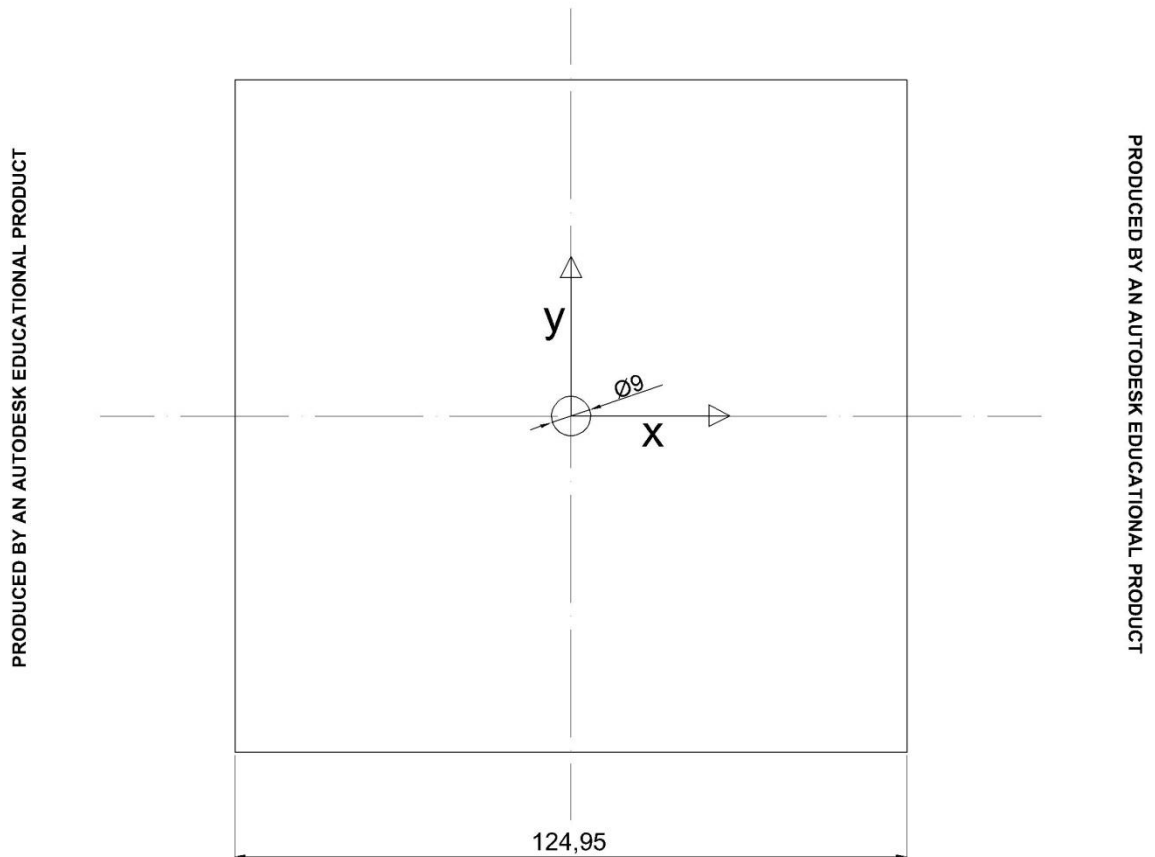
Kuva 9. Neliö 150 mm * 3 mm.

Mitat millimetreinä paksuus 9,9 mm



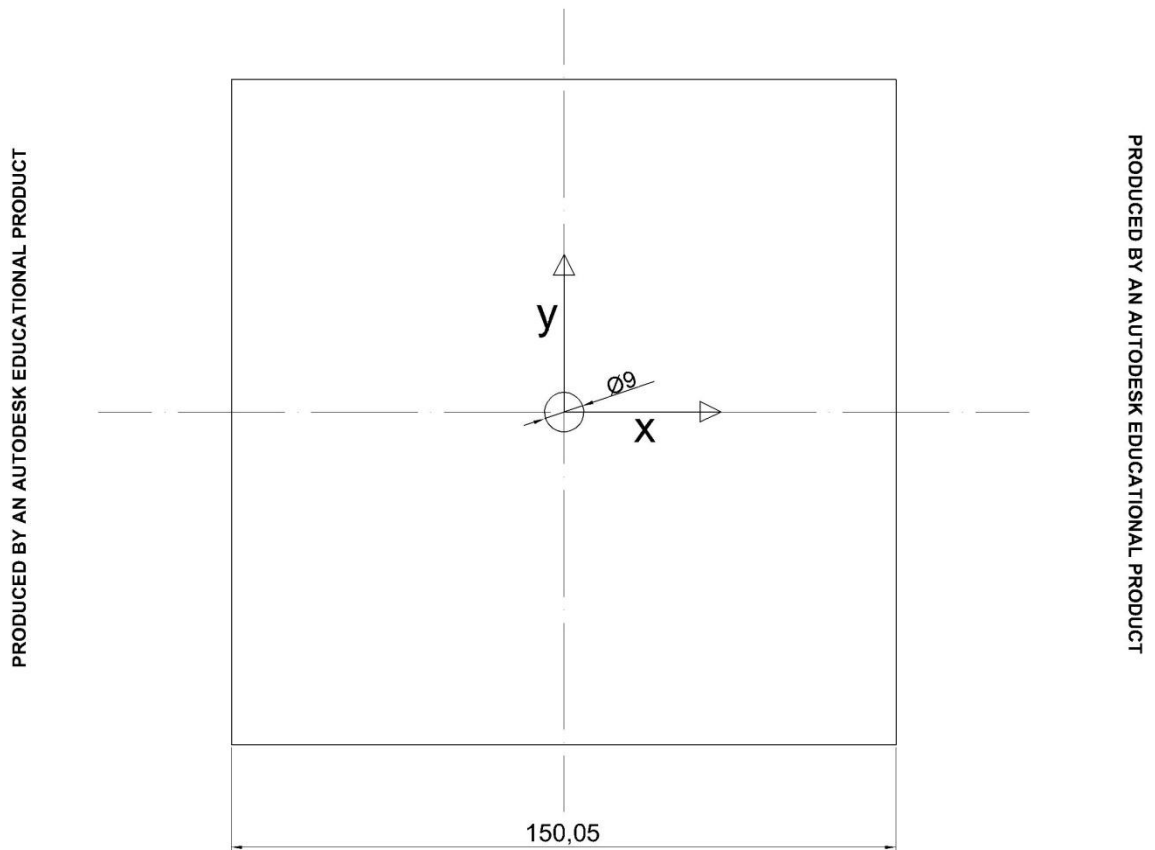
Kuva 10. Neliö 100 mm * 10 mm.

Mitat millimetreinä paksuus 9,9 mm



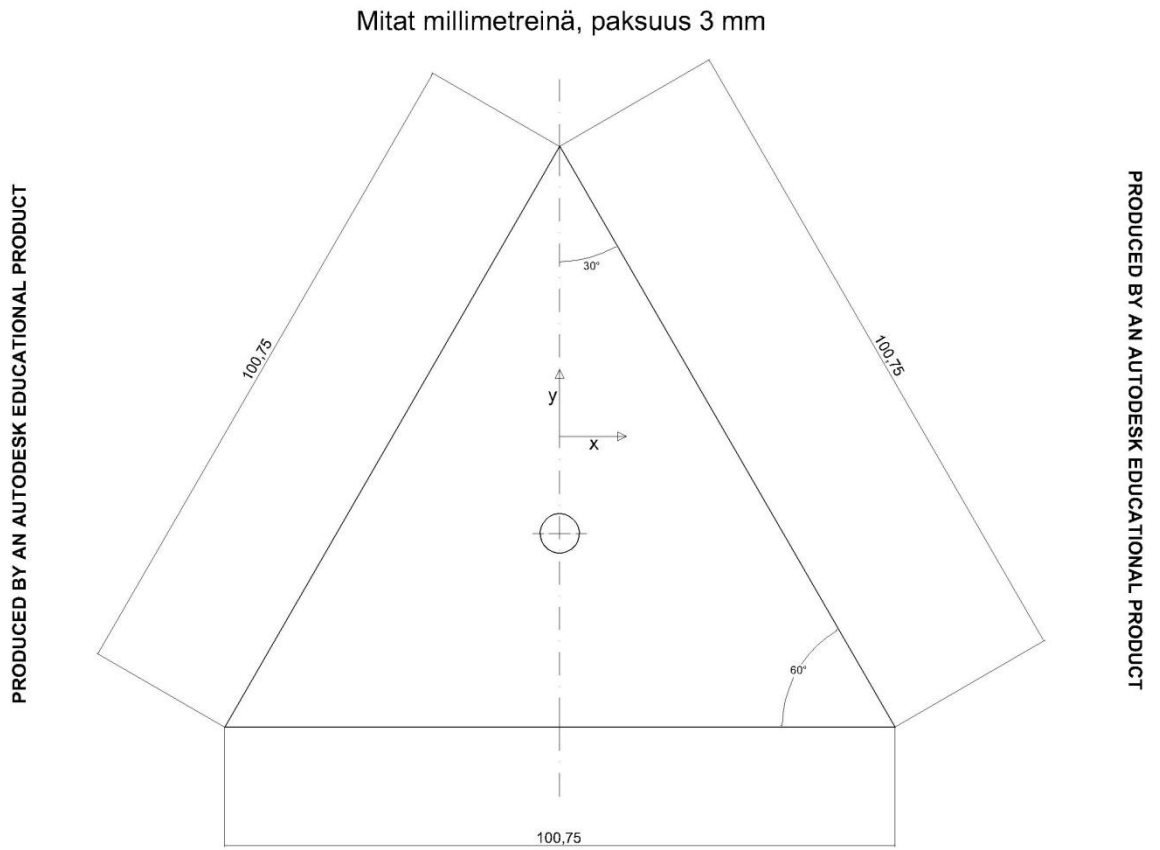
Kuva 11. Neliö 125 mm * 10 mm.

Mitat millimetreinä paksuus 9,9 mm



Kuva 12. Neliö 150 mm * 10 mm.

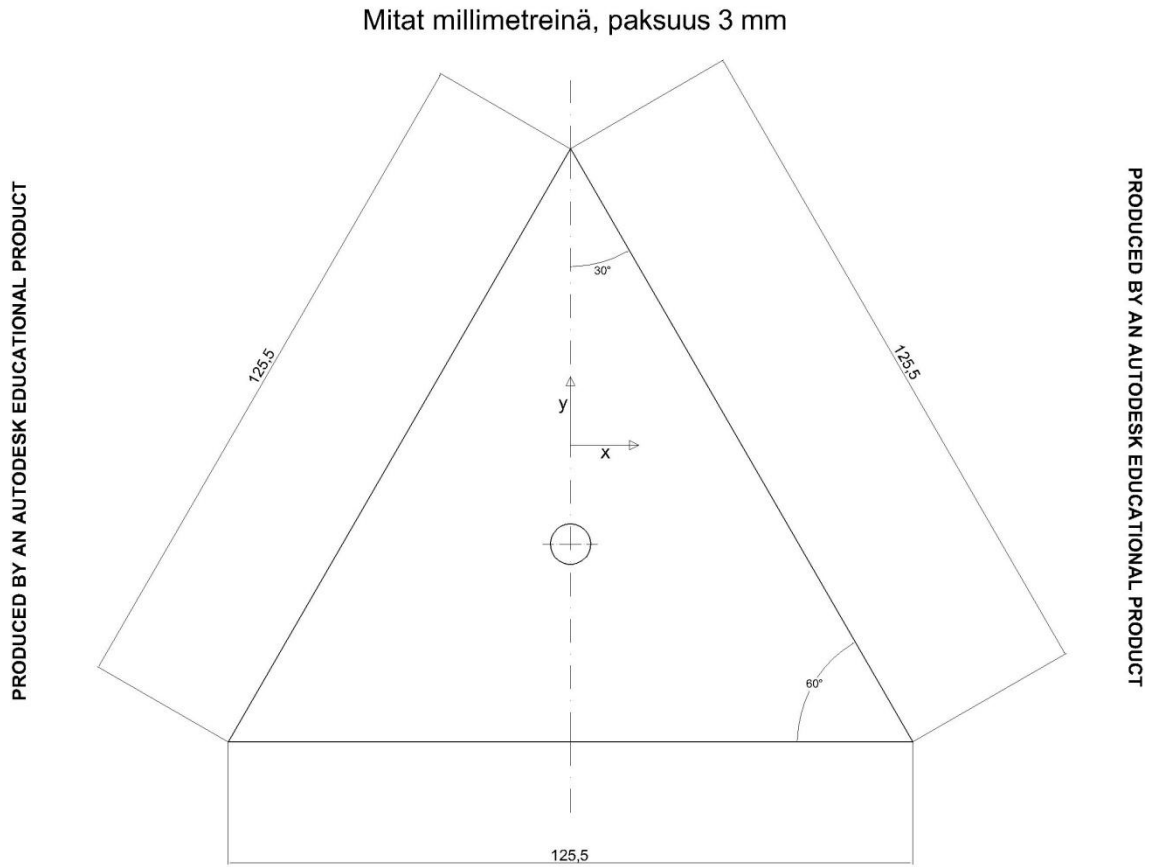
PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT



PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

Kuva 13. Tasasivuinen kolmio 100 mm * 3 mm.

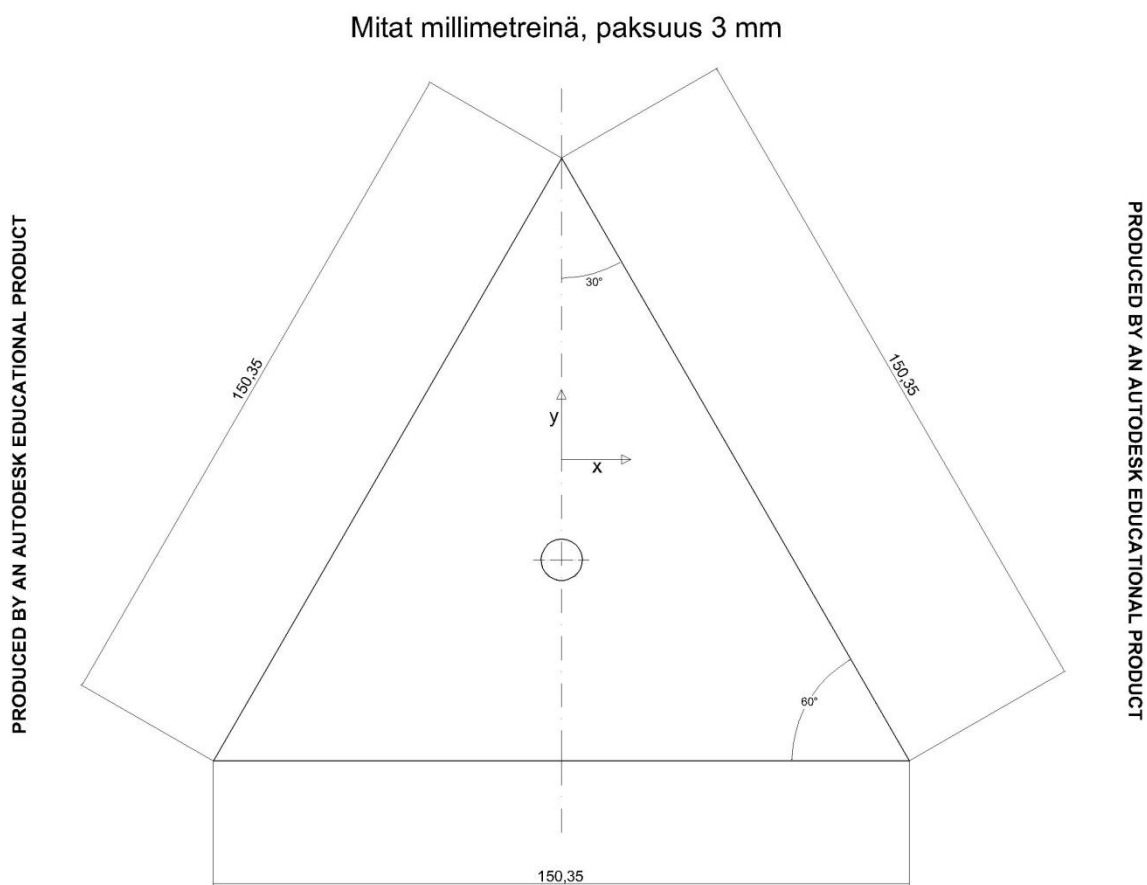
PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT



PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

Kuva 14. Tasasivuinen kolmio 125 mm * 3 mm.

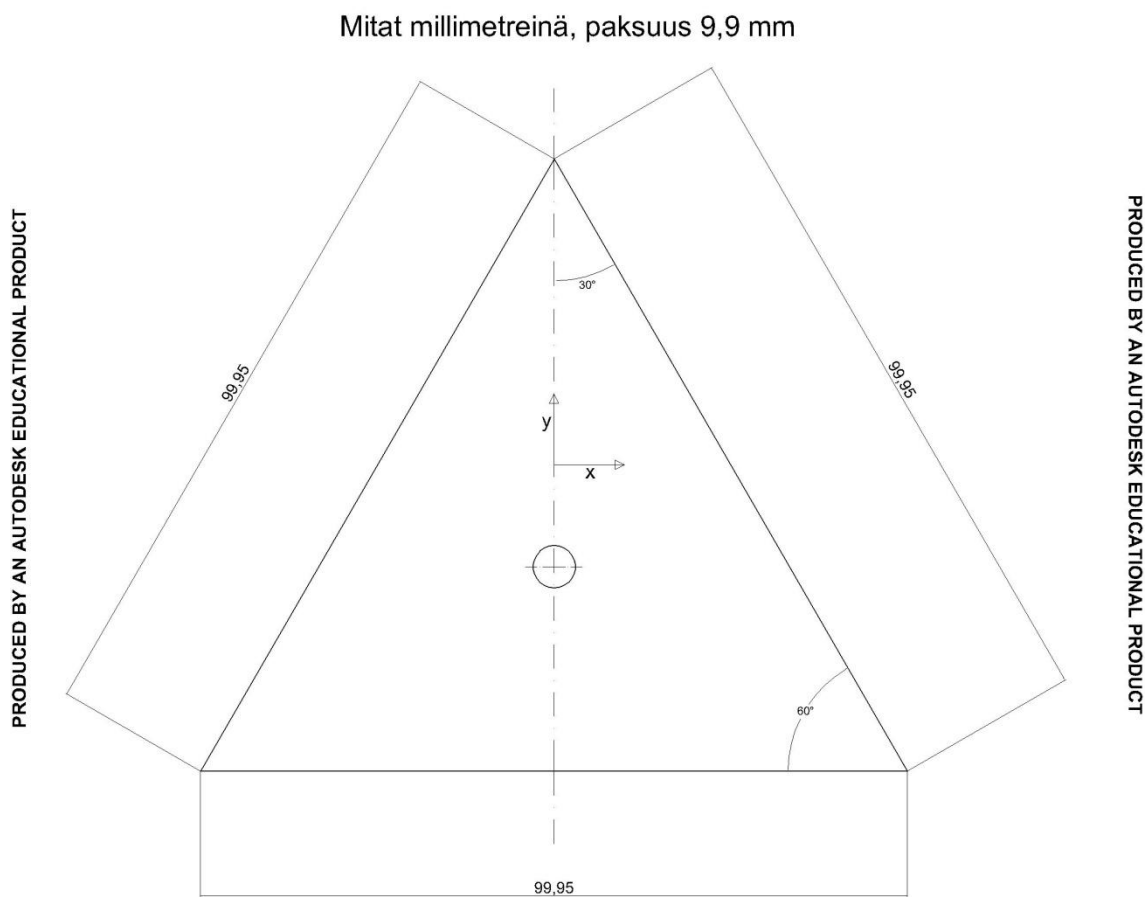
PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT



PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

Kuva 15. Tasasivuinen kolmio 150 mm * 3 mm.

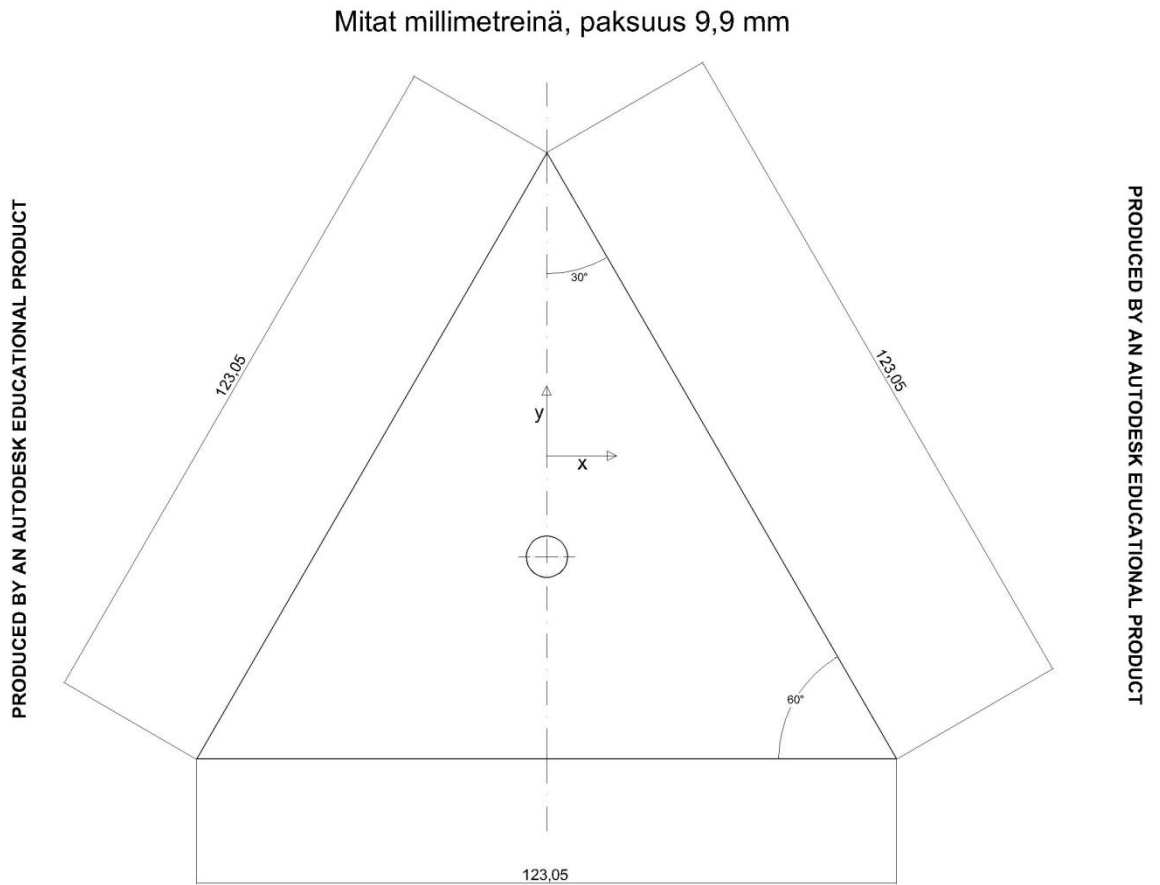
PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT



PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

Kuva 16. Tasasivuinen kolmio 100 mm * 10 mm.

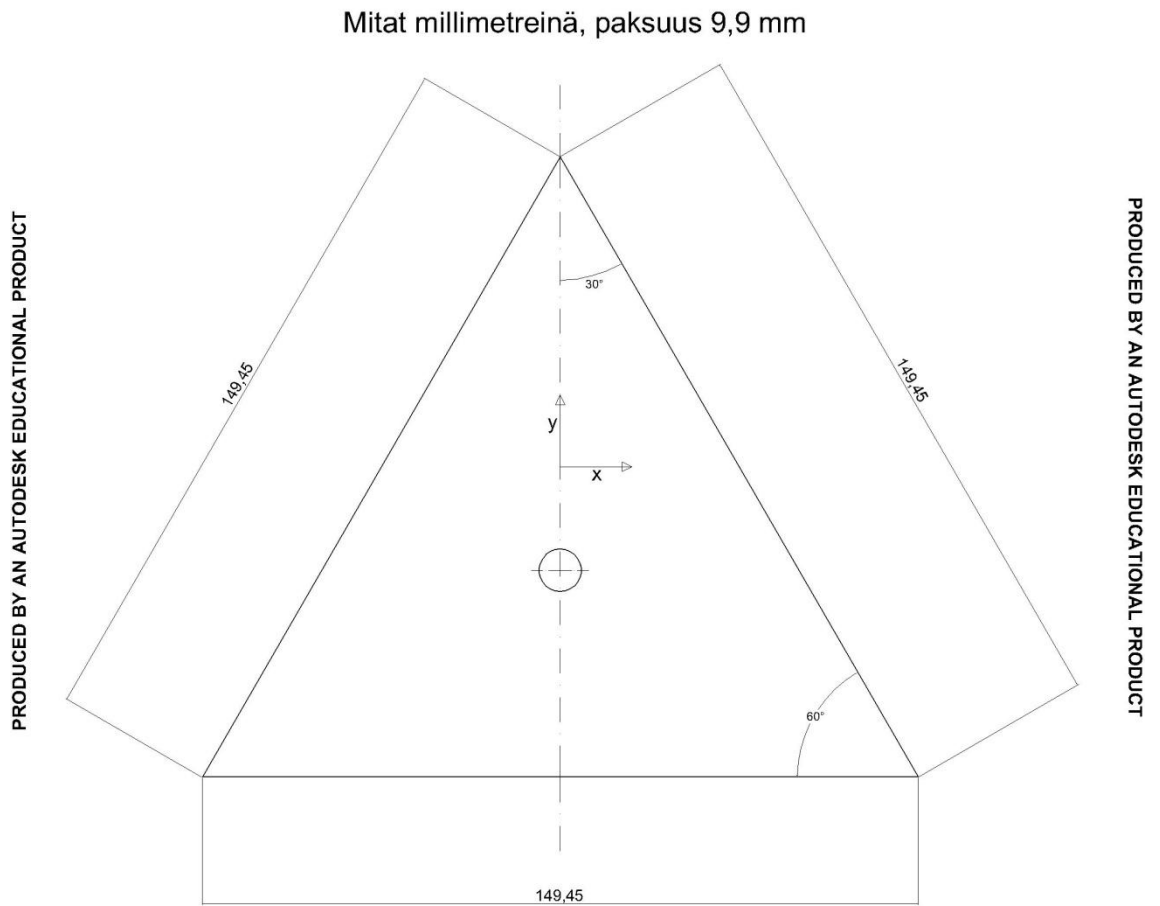
PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT



PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

Kuva 17. Tasasivuinen kolmio 125 mm * 10 mm.

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT



PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

Kuva 18. Tasasivuinen kolmio 150 mm * 10 mm.

Tekniset tiedot Futek LSB 200

FUTEK MODEL LSB200 (L2357)

Drawing Number: FI1041-C

INCH [mm] | R.O.= Rated Output

WIRING CODE (WC1)

+Excitation	-Excitation	+Signal	-Signal
RED	BLACK	GREEN	WHITE
Shield			
FLOATING			

S-BEAM JUNIOR LOAD CELL

DESIGNED FOR INLINE LOADING IN TENSION & COMPRESSION

AVAILABLE IN #4-40 AND M3x0.5 METRIC THREADS

SPECIFICATIONS:

RATED OUTPUT	SEE CHART
SAFE OVERLOAD	1000% of R.O.
ZERO BALANCE**	200% of R.O. Tension Only (50-100 lb)*
EXCITATION (VDC OR VAC)	±3% of R.O., ±5% of R.O. (10-20g)
BRIDGE RESISTANCE	10 Max
NONLINEARITY	SEE CHART
HYSTERESIS	±0.1% of R.O.
NONREPEATABILITY	±0.1% of R.O.
TEMP. SHIFT ZERO	±0.05% of R.O.
TEMP. SHIFT SPAN	±0.01% of R.O./°F [0.018% of R.O./°C]
COMPENSATED TEMP.	±0.02% of LOAD/°F [0.036% of LOAD/°C]
OPERATING TEMP.	-60 to 200°F [-50 to 93°C]
MATERIAL	ALUMINUM (10g-10lb), STAINLESS STEEL (25-100lb)
WEIGHT	0.3 oz [9 g]
DEFLECTION	0.003-0.005 [0.07-0.13]
CABLE:	#29 AWG, 4 Conductor, Spiral Shielded Silicone Cable, 5 ft [1.5 m] Long
ACCESSORIES AND RELATED INSTRUMENTS AVAILABLE	
CALIBRATION (STD)	5 pt TENSION; SEE CHART FOR SHUNT CAL VALUE.
CALIBRATION (AVAILABLE)	COMPRESSION
CALIBRATION TEST EXCITATION	5 VDC
*SENSOR STRUCTURE CAN HANDLE HIGH OVERLOADS BUT #4-40 and M3x0.5	
THREADS MAY LIMIT OVERLOAD AT HIGHER CAPACITY	
** ZERO BALANCE IS BASED ON LAYING SENSOR ON ITS SIDE (THREADS HORIZONTAL)	

Stock #	Capacity lb (N)	Thread Size	R.O. (nom.)	BRIDGE RESISTANCE	SHUNT CAL. VALUE
FSH02534	10g	#4-40	0.5 mV/V	301K Ω	
FSH02319	(0.1)	M3x0.5	1 mV/V		
FSH02666	20g	#4-40		1000 Ω nom.	150K Ω
FSH02667	(0.2)	M3x0.5			
FSH02535	50g	#4-40	2 mV/V	350 Ω nom.	60.4K Ω
FSH02663	(0.5)	M3x0.5			
FSH02536	100g	#4-40			
FSH02664	(1.0)	M3x0.5			
FSH02602	250g	#4-40			
FSH02665	(2.5)	M3x0.5			
FSH00091	1	#4-40			
FSH00101	(4.5)	M3x0.5			
FSH00092	2	#4-40			
FSH00102	(8.9)	M3x0.5			
FSH00093	5	#4-40			
FSH00103	(22.2)	M3x0.5			
FSH00095	10	#4-40			
FSH00104	(44.5)	M3x0.5			
FSH00096	25	#4-40			
FSH00105	(111)	M3x0.5			
FSH00097	50	#4-40			
FSH00106	(222)	M3x0.5			
FSH00098	100	#4-40			
FSH00107	(445)	M3x0.5			

FUTEK

ADVANCED SENSOR TECHNOLOGY, INC.

This drawing is submitted solely for the information and exclusive use of the original addressee. It is not to be divulged in whole or in part, by any firm or individual without written permission from FUTEK

10 THOMAS
IRVINE, CA 92618 USA
1-800-23-FUTEK (38835)

INTERNET:
<http://www.futek.com>

Kuva 1. Futek LSB 200 tekniset tiedot.

LITHO IN U.S.A.

Certificate Number **1103220029**

FUTEK
ADVANCED SENSOR TECHNOLOGY, INC.

Single Channel Item

<u>CALIBRATION DATA</u>	
Test Temp ... 72.3 °F (22.4 °C)	Relative Humidity ... 47.5 %
Input Resistance 351 Ω	Output Resistance 352 Ω
Excitation 4.99 Vdc	Zero Balance -0.0155 mV/V

Tension

Load (lb)	Output (mV/V)	Non-Lin. Error (% R.O.)
0	0.0000	0.000
1	0.3918	0.037
2	0.7835	0.069
3	1.1747	0.075
4	1.5659	0.081
5	1.9554	0.000
0	-0.0012	

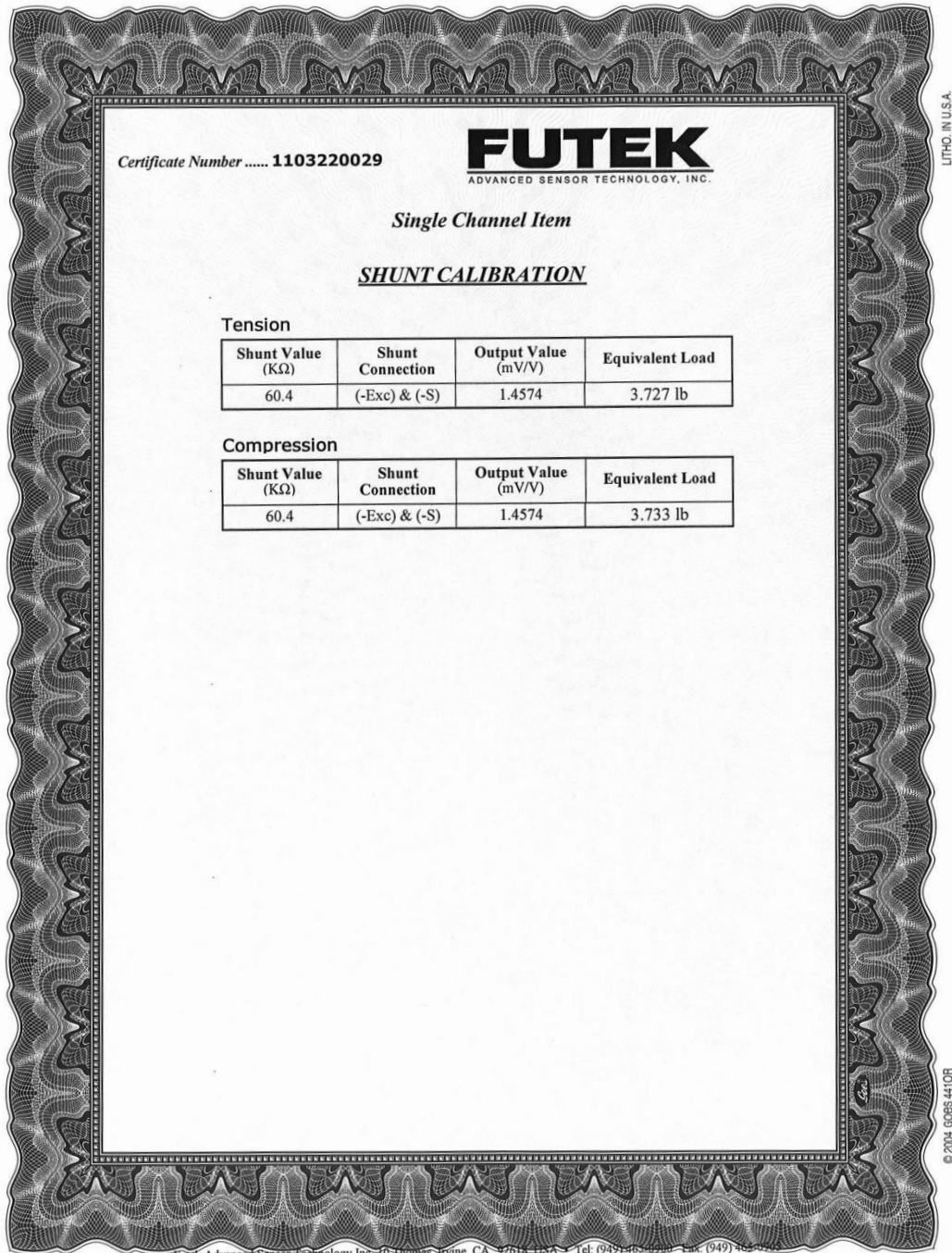
Compression

Load (lb)	Output (mV/V)	Non-Lin. Error (% R.O.)
0	0.0000	0.000
1	-0.3909	0.027
2	-0.7816	0.043
3	-1.1717	0.029
4	-1.5621	0.030
5	-1.9519	0.000
0	0.0005	

© 2004 0068 4410R

Futek Advanced Sensor Technology Inc 10 Thomas Irvine CA 92618 USA Tel: (949) 465-0900 Fax: (949) 465-0905
www.futek.com

Kuva 2. Futek LSB 200 kalibroititiedot.



Kuva 3. Futek LSB 200 kalibrinti.

TABLE A-9

Properties of air at 1 atm pressure

Temp. $T, ^\circ\text{C}$	Density $\rho, \text{kg/m}^3$	Specific Heat c_p $\text{J/kg} \cdot \text{K}$	Thermal Conductivity $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$	Thermal Diffusivity $\alpha, \text{m}^2/\text{s}$	Dynamic Viscosity $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	Kinematic Viscosity $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Prandtl Number Pr
-150	2.866	983	0.01171	4.158×10^{-6}	8.636×10^{-6}	3.013×10^{-6}	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	8.036×10^{-6}	1.189×10^{-5}	5.837×10^{-6}	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	1.252×10^{-5}	1.474×10^{-5}	9.319×10^{-6}	0.7440
-40	1.514	1002	0.02057	1.356×10^{-5}	1.527×10^{-5}	1.008×10^{-5}	0.7436
-30	1.451	1004	0.02134	1.465×10^{-5}	1.579×10^{-5}	1.087×10^{-5}	0.7425
-20	1.394	1005	0.02211	1.578×10^{-5}	1.630×10^{-5}	1.169×10^{-5}	0.7408
-10	1.341	1006	0.02288	1.696×10^{-5}	1.680×10^{-5}	1.252×10^{-5}	0.7387
0	1.292	1006	0.02364	1.818×10^{-5}	1.729×10^{-5}	1.338×10^{-5}	0.7362
5	1.269	1006	0.02401	1.880×10^{-5}	1.754×10^{-5}	1.382×10^{-5}	0.7350
10	1.246	1006	0.02439	1.944×10^{-5}	1.778×10^{-5}	1.426×10^{-5}	0.7336
15	1.225	1007	0.02476	2.009×10^{-5}	1.802×10^{-5}	1.470×10^{-5}	0.7323
20	1.204	1007	0.02514	2.074×10^{-5}	1.825×10^{-5}	1.516×10^{-5}	0.7309
25	1.184	1007	0.02551	2.141×10^{-5}	1.849×10^{-5}	1.562×10^{-5}	0.7296
30	1.164	1007	0.02588	2.208×10^{-5}	1.872×10^{-5}	1.608×10^{-5}	0.7282
35	1.145	1007	0.02625	2.277×10^{-5}	1.895×10^{-5}	1.655×10^{-5}	0.7268
40	1.127	1007	0.02662	2.346×10^{-5}	1.918×10^{-5}	1.702×10^{-5}	0.7255
45	1.109	1007	0.02699	2.416×10^{-5}	1.941×10^{-5}	1.750×10^{-5}	0.7241
50	1.092	1007	0.02735	2.487×10^{-5}	1.963×10^{-5}	1.798×10^{-5}	0.7228
60	1.059	1007	0.02808	2.632×10^{-5}	2.008×10^{-5}	1.896×10^{-5}	0.7202
70	1.028	1007	0.02881	2.780×10^{-5}	2.052×10^{-5}	1.995×10^{-5}	0.7177
80	0.9994	1008	0.02953	2.931×10^{-5}	2.096×10^{-5}	2.097×10^{-5}	0.7154
90	0.9718	1008	0.03024	3.086×10^{-5}	2.139×10^{-5}	2.201×10^{-5}	0.7132
100	0.9458	1009	0.03095	3.243×10^{-5}	2.181×10^{-5}	2.306×10^{-5}	0.7111
120	0.8977	1011	0.03235	3.565×10^{-5}	2.264×10^{-5}	2.522×10^{-5}	0.7073
140	0.8542	1013	0.03374	3.898×10^{-5}	2.345×10^{-5}	2.745×10^{-5}	0.7041

Mittaus pöytäkirjat

Pöytäkirja 1. Muoto: Neliö										
Leveys	Paksuus	Mitt. nro.	Päivä	Klo		Mitt. nro.	Päivä	Klo		
150 mm	3 mm	1.	KE 6.4.11	10.20		2.	KE 6.4.11	14.00		KA
v [m/s]	Hz	T [°C]	F [N]	C _v	Re	T [°C]	F [N]	C _v	Re	C _v
0	0	21,1	0	0,000	0	21,2	0	0,000	0	0,000
1	1	21,1	0,011	0,812	9849	21,3	0,008	0,591	9837	0,701
2	1,8	21,1	0,044	0,812	19699	21,4	0,039	0,720	19663	0,766
3	2,4	21,1	0,102	0,836	29548	21,6	0,094	0,772	29459	0,804
4	3,2	21,1	0,205	0,945	39397	21,7	0,193	0,892	39255	0,919
5	4	21,1	0,349	1,030	49247	21,8	0,322	0,953	49040	0,991
6	4,6	21,1	0,534	1,095	59096	21,8	0,518	1,064	58848	1,079
7	5,3	21,1	0,735	1,107	68945	21,8	0,72	1,087	68656	1,097
8	6	21,1	0,962	1,109	78795	21,8	0,941	1,087	78463	1,098
9	6,7	21,1	1,218	1,110	88644	21,8	1,191	1,088	88271	1,099
10	7,5	21,2	1,518	1,121	98434	21,8	1,495	1,106	98079	1,113
11	8,1	21,2	1,835	1,119	108277	21,8	1,804	1,103	107887	1,111
12	8,9	21,2	2,183	1,119	118121	21,8	2,155	1,107	117695	1,113
13	9,5	21,3	2,596	1,134	127887	21,8	2,562	1,121	127503	1,128
14	10,3	21,3	3,009	1,134	137724	21,8	2,976	1,123	137311	1,128
15	10,9	21,4	3,445	1,131	147473	21,9	3,416	1,123	147031	1,127
16	11,6	21,5	3,929	1,134	157210	21,9	3,897	1,126	156833	1,130
17	12,2	21,5	4,44	1,135	167036	21,9	4,409	1,129	166635	1,132
18	13,1	21,6	5,006	1,142	176755	22	4,979	1,137	176331	1,140
19	23,8	21,6	5,58	1,142	186575	22	5,529	1,134	186127	1,138
20	14,4	21,6	6,175	1,141	196395	22,1	6,145	1,137	195806	1,139
21	15,1	21,7	6,863	1,151	206090	22,1	6,815	1,144	205596	1,147
22	15,9	21,7	7,529	1,150	215904	22,2	7,484	1,145	215258	1,148
23	16,5	21,8	8,267	1,156	225583	22,3	8,216	1,151	224907	1,153
24	17,1	21,9	8,952	1,150	235249	22,4	8,877	1,142	234546	1,146
25	17,9	22	9,728	1,152	244904	22,5	9,677	1,148	244172	1,150
26	18,7	22,2	10,535	1,154	254395	22,5	10,47	1,148	253939	1,151
27	19,3	22,3	11,398	1,158	264022	22,6	11,338	1,153	263549	1,156
28	20	22,4	12,244	1,157	273637	22,8	12,176	1,153	272983	1,155
29	20,7	22,5	13,105	1,155	283240	22,9	13,044	1,151	282564	1,153
30	21,5	22,7	14,047	1,158	292657	23	13,982	1,154	292134	1,156
31	22,1	22,9	15,027	1,161	302051	23,1	14,971	1,157	301692	1,159
32	22,8	23,1	15,992	1,160	311424	23,2	15,919	1,155	311238	1,158
33	23,4	23,2	17,002	1,160	320964	23,4	16,921	1,155	320583	1,158
34	24,2	23,4	17,999	1,158	330297	23,5	17,954	1,155	330101	1,157
35	25	23,5	19,142	1,162	339810	23,9	19,065	1,159	339004	1,161
36	25,6	23,7	20,272	1,164	349104	24,1	20,229	1,163	348277	1,164
37	26,4	24	21,442	1,167	358163	24,3	21,325	1,162	357528	1,164

Pöytäkirja 2. Muoto: Kolmio										
Leveys	Paksuus	Mitt. nro.	Päivä	Klo		Mitt. nro.	Päivä	Klo		
150 mm	3 mm	3.	Ke 6.4. 11	15.00		4.	Ke 6.4. 11	17.00		KA
v [m/s]	Hz	T [°C]	F [N]	C _v	Re	T [°C]	F [N]	C _v	Re	C _v
0	0	22,4	0	0,000	0	22,2	0	0,000	0	0,000
1	1	22,5	0,004	0,688	9769	22,5	0,005	0,860	9769	0,774
2	1,8	22,6	0,021	0,903	19527	22,8	0,018	0,774	19504	0,839
3	2,4	22,6	0,058	1,108	29290	22,9	0,054	1,033	29238	1,071
4	3,2	22,6	0,105	1,129	39054	23	0,106	1,141	38961	1,135
5	4	22,7	0,164	1,129	48788	23	0,165	1,137	48701	1,133
6	4,6	22,8	0,235	1,123	58511	22,9	0,236	1,129	58476	1,126
7	5,4	22,8	0,323	1,134	68263	22,9	0,328	1,152	68222	1,143
8	5,9	22,8	0,425	1,143	78015	22,9	0,429	1,154	77968	1,148
9	6,7	22,8	0,538	1,143	87767	22,9	0,545	1,158	87714	1,151
10	7,5	22,8	0,675	1,162	97518	22,8	0,683	1,175	97518	1,169
11	8,1	22,8	0,817	1,162	107270	22,8	0,828	1,178	107270	1,170
12	8,9	22,8	0,944	1,128	117022	22,9	0,988	1,181	116952	1,155
13	9,5	22,8	1,16	1,181	126774	22,9	1,176	1,198	126698	1,190
14	10,3	22,8	1,347	1,183	136526	22,9	1,363	1,197	136444	1,190
15	10,9	22,8	1,548	1,184	146278	22,9	1,57	1,201	146190	1,193
16	11,7	22,8	1,763	1,185	156029	22,9	1,786	1,201	155936	1,193
17	12,3	22,8	1,997	1,189	165781	22,9	2,023	1,205	165682	1,197
18	13	22,8	2,254	1,197	175533	22,9	2,286	1,215	175428	1,206
19	13,8	22,8	2,509	1,196	185285	22,9	2,548	1,215	185175	1,206
20	14,4	22,9	2,784	1,198	194921	22,9	2,824	1,215	194921	1,207
21	15,2	22,9	3,091	1,207	204667	23	3,138	1,225	204545	1,216
22	16	22,9	3,392	1,207	214413	23	3,445	1,226	214285	1,216
23	16,6	23	3,725	1,213	224025	23,1	3,783	1,232	223892	1,222
24	17,2	23,1	4,027	1,204	233626	23,1	4,094	1,224	233626	1,214
25	17,9	23,1	4,393	1,211	243360	23,2	4,464	1,231	243216	1,221
26	18,7	23,2	4,751	1,211	252944	23,2	4,823	1,230	252944	1,220
27	19,3	23,3	5,151	1,218	262516	23,3	5,225	1,236	262516	1,227
28	20,1	23,4	5,541	1,219	272077	23,4	5,62	1,236	272077	1,227
29	20,7	23,5	5,938	1,218	281627	23,5	6,016	1,234	281627	1,226
30	21,5	23,6	6,348	1,217	291165	23,6	6,435	1,234	291165	1,225
31	22	23,7	6,799	1,221	300692	23,7	6,905	1,240	300692	1,231
32	22,8	23,8	7,239	1,221	310208	23,8	7,351	1,240	310208	1,230
33	23,4	23,9	7,694	1,220	319712	23,9	7,812	1,239	319712	1,230
34	24,2	24	8,17	1,221	329205	24	8,293	1,240	329205	1,230
35	25	24,2	8,69	1,227	338487	24,1	8,83	1,246	338687	1,236
36	25,6	24,4	9,222	1,231	347746	24,2	9,363	1,249	348158	1,240
37	26,4	24,5	9,739	1,231	357195	24,3	9,877	1,248	357617	1,240
38	27	24,6	10,261	1,230	366632	24,5	10,411	1,248	366849	1,239
39	27,8	24,8	10,776	1,228	375836	24,7	10,955	1,247	376058	1,238
40	28,5	25	11,381	1,233	385019	24,8	11,544	1,250	385473	1,242
41	29,1	25,2	11,952	1,234	394180	25,2	12,125	1,251	394180	1,242
42	30	25,5	12,521	1,233	403083	25,4	12,713	1,251	403320	1,242

Pöytäkirja 3. Muoto: Neliö										
Leveys	Paksuus	Mitt. nro.	Päivä	Klo		Mitt. nro.	Päivä	Klo		
125 mm	3 mm	5	KE 6.4.11	18.25		6	T0 7.4.11	09.45		KA
v [m/s]	Hz	T [°C]	F [N]	C _v	Re	T [°C]	F [N]	C _v	Re	C _v
0	0	22,7	0	0,000	0	20,8	0	0,000	0	0,000
1	1	23,1	0,006	0,641	8114	20,8	0,006	0,636	8227	0,639
2	1,8	23,3	0,028	0,749	16209	20,9	0,027	0,716	16444	0,732
3	2,4	23,4	0,077	0,915	24299	20,9	0,076	0,896	24666	0,905
4	3,2	23,4	0,165	1,103	32399	21	0,161	1,068	32868	1,085
5	4	23,4	0,258	1,104	40498	21	0,25	1,061	41085	1,083
6	4,6	23,4	0,372	1,105	48598	21	0,364	1,073	49302	1,089
7	5,4	23,4	0,512	1,118	56698	21,1	0,503	1,090	57484	1,104
8	5,9	23,4	0,669	1,118	64798	21,1	0,658	1,091	65696	1,105
9	6,7	23,4	0,848	1,120	72897	21,1	0,834	1,093	73908	1,106
10	7,5	23,4	1,062	1,136	80997	21,1	1,047	1,111	82120	1,124
11	8,1	23,4	1,289	1,140	89097	21,1	1,266	1,111	90332	1,125
12	8,9	23,4	1,534	1,140	97196	21,1	1,509	1,112	98544	1,126
13	9,5	23,4	1,826	1,156	105296	21,1	1,801	1,131	106756	1,143
14	10,3	23,4	2,119	1,156	113396	21,2	2,085	1,130	114899	1,143
15	10,9	23,4	2,431	1,156	121495	21,2	2,398	1,132	123106	1,144
16	11,7	23,5	2,775	1,160	129518	21,2	2,731	1,133	131313	1,146
17	12,3	23,5	3,127	1,158	137613	21,3	3,087	1,135	139436	1,146
18	13	23,5	3,538	1,168	145708	21,3	3,486	1,143	147638	1,156
19	13,8	23,5	3,947	1,170	153803	21,4	3,893	1,146	155746	1,158
20	14,4	23,6	4,373	1,170	161802	21,5	4,313	1,146	163845	1,158
21	15,2	23,6	4,856	1,179	169892	21,5	4,785	1,153	172037	1,166
22	15,8	23,7	5,329	1,179	177876	21,7	5,255	1,155	180013	1,167
23	16,6	23,7	5,856	1,185	185961	21,7	5,768	1,160	188195	1,173
24	17,1	23,8	6,325	1,176	193932	21,7	6,239	1,152	196378	1,164
25	17,9	23,9	6,897	1,182	201892	21,8	6,791	1,156	204437	1,169
26	18,7	24	7,459	1,183	209844	21,9	7,342	1,156	212487	1,169
27	19,3	24	8,084	1,189	217914	22	7,963	1,163	220528	1,176
28	20,1	24,1	8,687	1,188	225852	22,1	8,564	1,163	228558	1,176
29	20,7	24,2	9,307	1,187	233779	22,2	9,175	1,162	236579	1,175
30	21,5	24,3	9,962	1,188	241698	22,3	9,809	1,162	244591	1,175
31	22	24,4	10,669	1,192	249606	22,5	10,526	1,168	252442	1,180
32	22,8	24,5	11,365	1,192	257506	22,6	11,187	1,165	260429	1,179
33	23,4	24,6	12,071	1,191	265396	22,8	11,894	1,166	268247	1,178
34	24,2	24,9	12,814	1,192	272955	22,9	12,626	1,166	276211	1,179
35	25	25,1	13,608	1,195	280653	23,1	13,426	1,171	283996	1,183
36	25,6	25,2	14,429	1,198	288501	23,2	14,229	1,174	291936	1,186
37	26,4	25,4	15,236	1,199	296167	23,4	15,029	1,174	299689	1,186
38	27	25,6	16,059	1,198	303814	23,5	15,857	1,175	307606	1,187
39	27,8	25,8	16,892	1,198	311444	23,7	16,689	1,175	315326	1,186
40	28,5	26	17,791	1,200	319055	24	17,59	1,178	322836	1,189
41	29,1	26,2	18,693	1,201	326649	24,3	18,472	1,179	330320	1,190
42	30	26,4	19,608	1,201	334225	24,5	19,369	1,179	337977	1,190

Pöytäkirja 4. Muoto: Kolmio										
Leveys	Paksuus	Mitt. nro.	Päivä	Klo		Mitt. nro.	Päivä	Klo		
125 mm	3 mm	7.	To 7.4. 11	11.10		8.	To 7.4. 11	12.20		KA
v [m/s]	Hz	T [°C]	F [N]	C _v	Re	T [°C]	F [N]	C _v	Re	C _v
0	0	22	0	0,000	0	22,4	0	0,000	0	0,000
1	1	22,1	0,002	0,491	8174	22,7	0,004	0,983	8145	0,737
2	1,8	22,5	0,015	0,921	16309	23	0,014	0,861	16261	0,891
3	2,4	22,6	0,04	1,092	24449	23,1	0,04	1,094	24377	1,093
4	3,2	22,6	0,074	1,136	32599	23,1	0,071	1,092	32502	1,114
5	4	22,6	0,115	1,130	40749	23,2	0,11	1,083	40603	1,107
6	4,6	22,6	0,163	1,112	48899	23,1	0,159	1,087	48753	1,100
7	5,4	22,6	0,226	1,133	57048	23,1	0,219	1,100	56879	1,117
8	5,9	22,6	0,296	1,136	65198	23,1	0,286	1,100	65004	1,118
9	6,7	22,6	0,376	1,140	73348	23,1	0,364	1,106	73130	1,123
10	7,5	22,6	0,471	1,157	81498	23,1	0,456	1,122	81255	1,140
11	8,1	22,6	0,571	1,159	89648	23,1	0,551	1,121	89381	1,140
12	8,9	22,6	0,68	1,160	97797	23,1	0,66	1,128	97506	1,144
13	9,5	22,6	0,81	1,178	105947	23,1	0,787	1,146	105632	1,162
14	10,3	22,6	0,94	1,178	114097	23,1	0,91	1,143	113757	1,160
15	10,8	22,6	1,08	1,179	122247	23,1	1,047	1,145	121883	1,162
16	11,6	22,6	1,232	1,182	130396	23,1	1,194	1,148	130008	1,165
17	12,2	22,6	1,394	1,185	138546	23,1	1,353	1,152	138134	1,169
18	13	22,6	1,574	1,194	146696	23,1	1,527	1,160	146259	1,177
19	13,8	22,6	1,752	1,192	154846	23,1	1,704	1,162	154385	1,177
20	14,4	22,7	1,943	1,194	162898	23,1	1,89	1,163	162510	1,178
21	15,1	22,7	2,157	1,202	171043	23,2	2,094	1,169	170534	1,186
22	15,8	22,8	2,368	1,203	179081	23,2	2,299	1,169	178655	1,186
23	16,6	22,9	2,603	1,210	187109	23,2	2,532	1,178	186775	1,194
24	17,1	22,9	2,815	1,202	195245	23,3	2,736	1,170	194780	1,186
25	17,9	23	3,073	1,210	203259	23,4	2,988	1,178	202775	1,194
26	18,7	23	3,321	1,209	211389	23,4	3,232	1,178	210886	1,193
27	19,3	23,1	3,596	1,214	219389	23,4	3,495	1,181	218997	1,198
28	20,1	23,1	3,866	1,214	227514	23,5	3,76	1,182	226973	1,198
29	20,7	23,2	4,138	1,211	235499	23,6	4,026	1,180	234940	1,196
30	21,5	23,3	4,427	1,211	243475	23,6	4,305	1,179	243041	1,195
31	22	23,4	4,754	1,219	251441	23,7	4,624	1,187	250994	1,203
32	22,8	23,4	5,056	1,216	259552	23,8	4,92	1,185	258936	1,201
33	23,4	23,5	5,375	1,216	267504	23,8	5,233	1,185	267028	1,201
34	24,2	23,6	5,704	1,216	275447	24	5,551	1,185	274794	1,201
35	25	23,8	6,063	1,221	283212	24,1	5,906	1,190	282709	1,206
36	25,6	23,9	6,435	1,225	291131	24,2	6,268	1,195	290614	1,210
37	26,4	24	6,802	1,226	299040	24,3	6,611	1,193	298510	1,210
38	27	24,1	7,173	1,227	306941	24,5	6,977	1,195	306215	1,211
39	27,7	24,3	7,542	1,225	314646	24,6	7,341	1,194	314088	1,210
40	28,5	24,4	7,956	1,229	322523	24,7	7,747	1,198	321952	1,214
41	29,1	24,6	8,348	1,228	330195	24,9	8,129	1,197	329612	1,213
42	29,9	24,8	8,757	1,229	337850	25,1	8,53	1,198	337253	1,213

Pöytäkirja 5. Muoto: Neliö										
Leveys	Paksuus	Mitt. nro.	Päivä	Klo		Mitt. nro.	Päivä	Klo		
100 mm	3 mm	9	To 7.4.11	14.20		10	To 7.4.11	15.20		KA
v [m/s]	Hz	T [°C]	F [N]	C _v	Re	T [°C]	F [N]	C _v	Re	C _v
0	0	21,7	0	0,000	0	23,1	0	0,000	0	0,000
1	1	21,7	0,004	0,664	6551	23,1	0,006	1,000	6496	0,832
2	1,8	21,9	0,016	0,664	13086	23,2	0,022	0,917	12985	0,791
3	2,4	22	0,054	0,997	19618	23,2	0,055	1,019	19477	1,008
4	3,2	22,1	0,102	1,059	26141	23,2	0,105	1,094	25970	1,077
5	4	22,2	0,157	1,044	32657	23,2	0,163	1,087	32462	1,066
6	4,6	22,2	0,227	1,048	39188	23,2	0,234	1,084	38955	1,066
7	5,4	22,2	0,316	1,072	45720	23,2	0,323	1,099	45447	1,086
8	5,9	22,2	0,412	1,070	52251	23,2	0,423	1,102	51940	1,086
9	6,7	22,2	0,522	1,071	58782	23,1	0,535	1,101	58467	1,086
10	7,5	22,2	0,656	1,090	65314	23,1	0,673	1,122	64964	1,106
11	8,1	22,2	0,793	1,089	71845	23,1	0,815	1,123	71460	1,106
12	8,9	22,2	0,951	1,098	78376	23,1	0,972	1,125	77956	1,112
13	9,5	22,2	1,136	1,117	84908	23,1	1,157	1,141	84453	1,129
14	10,3	22,2	1,319	1,119	91439	23,1	1,343	1,142	90949	1,130
15	10,8	22,2	1,516	1,120	97971	23,1	1,545	1,145	97445	1,132
16	11,6	22,2	1,723	1,119	104502	23,1	1,757	1,144	103942	1,131
17	12,2	22,3	1,954	1,124	110967	23,1	1,99	1,148	110438	1,136
18	13	22,3	2,209	1,134	117494	23,1	2,25	1,158	116934	1,146
19	13,8	22,3	2,462	1,134	124022	23,1	2,508	1,158	123431	1,146
20	14,4	22,4	2,733	1,136	130471	23,1	2,78	1,159	129927	1,148
21	15,1	22,4	3,033	1,144	136995	23,2	3,086	1,167	136342	1,155
22	15,8	22,4	3,331	1,145	143518	23,2	3,389	1,168	142835	1,156
23	16,6	22,5	3,659	1,151	149952	23,3	3,72	1,173	149238	1,162
24	17,1	22,5	3,953	1,142	156472	23,3	4,024	1,165	155727	1,154
25	17,9	22,6	4,317	1,150	162894	23,4	4,388	1,172	162119	1,161
26	18,7	22,7	4,663	1,148	169309	23,4	4,745	1,171	168604	1,160
27	19,3	22,8	5,062	1,156	175716	23,5	5,143	1,178	174985	1,167
28	20,1	22,8	5,44	1,156	182224	23,5	5,527	1,177	181466	1,166
29	20,7	22,9	5,826	1,154	188619	23,6	5,925	1,177	187835	1,165
30	21,5	23	6,235	1,155	195007	23,7	6,337	1,176	194197	1,165
31	22	23,1	6,677	1,158	201387	23,8	6,799	1,182	200551	1,170
32	22,8	23,2	7,108	1,158	207760	23,9	7,234	1,181	206897	1,169
33	23,4	23,3	7,558	1,158	214125	24	7,692	1,181	213237	1,169
34	24,2	23,4	8,022	1,158	220482	24,1	8,16	1,181	219568	1,169
35	25	23,5	8,539	1,164	226832	24,3	8,678	1,186	225759	1,175
36	25,6	23,6	9,057	1,167	233174	24,4	9,206	1,189	232072	1,178
37	26,4	23,8	9,567	1,168	239367	24,5	9,718	1,189	238377	1,178
38	27	23,9	10,082	1,167	245691	24,6	10,254	1,190	244675	1,178
39	27,7	24,1	10,616	1,168	251858	24,8	10,789	1,189	250818	1,178
40	28,5	24,3	11,193	1,171	258010	25	11,385	1,194	256946	1,182
41	29,1	24,4	11,749	1,170	264304	25,1	11,952	1,193	263215	1,182
42	29,9	24,5	12,333	1,171	270590	25,3	12,526	1,193	269318	1,182

Liite 4
6 (19)

Pöytäkirja 6 (1/2). Muoto: Kolmio									
Leveys	Paksuus	Mitt. nro.	Päivä	Klo		Mitt. nro.	Päivä	Klo	
100 mm	3 mm	11	To 7.4. 11	16.50		12	To 7.4. 11	17.30	
v [m/s]	Hz	T [°C]	F [N]	C _v	Re	T [°C]	F [N]	C _v	Re
0	0	22,3	0	0,000	0	23,1	0	0,000	0
1	1	22,4	0,002	0,762	6549	23	0,003	1,146	6526
2	1,8	22,8	0,008	0,763	13067	23,5	0,008	0,765	13013
3	2,4	22,9	0,023	0,976	19589	23,6	0,024	1,020	19508
4	3,2	22,9	0,046	1,097	26119	23,7	0,045	1,077	25995
5	4	23	0,071	1,084	32629	23,7	0,069	1,056	32494
6	4,6	22,9	0,102	1,082	39179	23,6	0,101	1,073	39016
7	5,4	22,9	0,141	1,098	45708	23,6	0,139	1,085	45518
8	5,9	22,9	0,184	1,097	52238	23,6	0,182	1,088	52021
9	6,7	22,9	0,234	1,103	58768	23,6	0,231	1,091	58524
10	7,5	22,9	0,295	1,126	65298	23,6	0,29	1,110	65026
11	8,1	22,9	0,358	1,129	71827	23,6	0,353	1,116	71529
12	8,9	22,9	0,428	1,135	78357	23,5	0,421	1,118	78078
13	9,5	22,8	0,51	1,152	84938	23,5	0,501	1,134	84584
14	10,3	22,8	0,591	1,151	91471	23,5	0,581	1,134	91091
15	10,8	22,8	0,678	1,150	98005	23,5	0,669	1,137	97597
16	11,6	22,9	0,774	1,154	104476	23,5	0,763	1,140	104104
17	12,2	22,9	0,875	1,156	111006	23,5	0,864	1,144	110610
18	13	22,9	0,988	1,164	117536	23,5	0,975	1,151	117117
19	13,8	22,9	1,101	1,164	124065	23,5	1,085	1,150	123623
20	14,4	22,9	1,221	1,165	130595	23,5	1,204	1,151	130130
21	15,1	23	1,356	1,174	137043	23,5	1,337	1,160	136636
22	15,8	23	1,49	1,176	143569	23,5	1,469	1,161	143143
23	16,6	23	1,633	1,179	150095	23,6	1,611	1,165	149560
24	17,1	23,1	1,766	1,171	156528	23,6	1,745	1,159	156063
25	17,9	23,1	1,926	1,177	163050	23,6	1,901	1,164	162565
26	18,7	23,1	2,081	1,176	169572	23,6	2,054	1,163	169068
27	19,3	23,2	2,254	1,181	175989	23,7	2,226	1,169	175466
28	20,1	23,3	2,422	1,181	182398	23,8	2,393	1,169	181857
29	20,7	23,3	2,593	1,179	188912	23,8	2,563	1,167	188352
30	21,5	23,4	2,777	1,180	195310	23,9	2,742	1,167	194732
31	22	23,5	2,977	1,185	201701	23,9	2,94	1,172	201223
32	22,8	23,6	3,169	1,184	208084	24	3,128	1,170	207591
33	23,4	23,6	3,366	1,183	214586	24,1	3,326	1,171	213951
34	24,2	23,7	3,572	1,183	220958	24,2	3,53	1,171	220304
35	25	23,8	3,8	1,188	227322	24,2	3,756	1,176	226783
36	25,6	23,9	4,034	1,192	233678	24,3	3,986	1,180	233125
37	26,4	24	4,259	1,192	240027	24,4	4,211	1,180	239459
38	27	24,1	4,487	1,191	246368	24,5	4,436	1,179	245786
39	27,7	24,2	4,724	1,191	252702	24,6	4,668	1,178	252105
40	28,5	24,4	4,985	1,195	258875	24,7	4,925	1,182	258416
41	29,1	24,6	5,232	1,195	265033	24,8	5,17	1,182	264721
42	29,9	24,8	5,485	1,195	271177	25	5,421	1,181	270858

Pöytäkirja 6 (2/2). Muoto: Kolmio						
Leveys	Paksuus	Mitt. nro.	Päivä	Klo		
100 mm	3 mm	13	Ma 11.4. 11	10.30		KA
v [m/s]	Hz	T [°C]	F [N]	C _v	Re	C _v
0	0	21,3	0	0,000	0	0,000
1	1	21,4	0,001	0,380	6589	0,763
2	1,8	21,5	0,009	0,855	13169	0,794
3	2,4	21,5	0,023	0,971	19754	0,989
4	3,2	21,5	0,045	1,069	26339	1,081
5	4	21,5	0,07	1,064	32924	1,068
6	4,6	21,5	0,102	1,077	39508	1,077
7	5,4	21,5	0,143	1,109	46093	1,098
8	5,9	21,5	0,188	1,116	52678	1,101
9	6,7	21,5	0,238	1,116	59263	1,103
10	7,5	21,5	0,3	1,140	65847	1,125
11	8,1	21,6	0,365	1,147	72389	1,131
12	8,9	21,6	0,435	1,148	78969	1,134
13	9,5	21,6	0,517	1,163	85550	1,149
14	10,3	21,6	0,602	1,167	92131	1,151
15	10,8	21,7	0,692	1,169	98652	1,152
16	11,6	21,7	0,788	1,170	105229	1,155
17	12,2	21,7	0,892	1,174	111806	1,158
18	13	21,8	1,007	1,182	118312	1,166
19	13,8	21,8	1,125	1,185	124885	1,166
20	14,4	21,8	1,249	1,188	131458	1,168
21	15,1	21,9	1,385	1,195	137948	1,176
22	15,8	21,9	1,523	1,197	144517	1,178
23	16,6	21,9	1,674	1,204	151086	1,183
24	17,1	22	1,811	1,197	157560	1,176
25	17,9	22,1	1,976	1,204	164027	1,182
26	18,7	22,1	2,134	1,202	170588	1,180
27	19,3	22,1	2,315	1,209	177149	1,186
28	20,1	22,2	2,487	1,208	183600	1,186
29	20,7	22,3	2,667	1,208	190043	1,185
30	21,5	22,4	2,852	1,208	196479	1,185
31	22	22,5	3,061	1,214	202907	1,190
32	22,8	22,6	3,254	1,212	209327	1,189
33	23,4	22,7	3,459	1,212	215739	1,188
34	24,2	22,8	3,674	1,213	222144	1,189
35	25	22,9	3,91	1,218	228542	1,194
36	25,6	23	4,148	1,222	234931	1,198
37	26,4	23,1	4,378	1,222	241313	1,198
38	27	23,3	4,614	1,221	247540	1,197
39	27,7	23,4	4,856	1,221	253904	1,197
40	28,5	23,6	5,124	1,225	260105	1,201
41	29,1	23,7	5,378	1,225	266449	1,200
42	29,9	23,9	5,643	1,225	272624	1,200

Pöytäkirja 7. Muoto: Neliö										
Leveys	Paksuus	Mitt. nro.	Päivä	Klo		Mitt. nro.	Päivä	Klo		
150 mm	10 mm	14	Ma 11.4.11	11.30		15	Ma 11.4.11	12.25		KA
v [m/s]	Hz	T [°C]	F [N]	C _v	Re	T [°C]	F [N]	C _v	Re	C _v
0	0	22,2	0	0,000	0	22,7	0	0,000	0	0,000
1	1	22,2	0,011	0,818	9767	22,6	0,009	0,670	9744	0,744
2	1,8	22,3	0,043	0,799	19523	22,7	0,033	0,614	19476	0,707
3	2,4	22,3	0,1	0,826	29285	22,8	0,096	0,794	29197	0,810
4	3,2	22,4	0,208	0,967	39023	22,8	0,184	0,856	38930	0,912
5	4	22,4	0,335	0,997	48778	22,9	0,325	0,968	48633	0,983
6	4,6	22,4	0,533	1,101	58534	22,9	0,532	1,101	58359	1,101
7	5,4	22,4	0,736	1,117	68290	22,9	0,734	1,116	68086	1,117
8	6	22,4	0,961	1,117	78045	22,9	0,958	1,115	77813	1,116
9	6,7	22,4	1,213	1,114	87801	22,9	1,212	1,115	87539	1,114
10	7,5	22,4	1,526	1,135	97557	22,9	1,51	1,125	97266	1,130
11	8,1	22,4	1,835	1,128	107312	22,9	1,832	1,128	106992	1,128
12	8,9	22,4	2,183	1,127	117068	22,9	2,18	1,128	116719	1,128
13	9,5	22,4	2,593	1,141	126824	22,9	2,588	1,141	126446	1,141
14	10,3	22,4	3,01	1,142	136579	22,9	3	1,140	136172	1,141
15	10,9	22,4	3,452	1,141	146335	22,9	3,45	1,142	145899	1,142
16	11,7	22,4	3,934	1,143	156091	23	3,919	1,141	155533	1,142
17	12,3	22,4	4,426	1,139	165846	23	4,416	1,139	165253	1,139
18	13	22,5	5,005	1,149	175497	23	4,996	1,149	174974	1,149
19	13,8	22,6	5,575	1,149	185136	23	5,575	1,151	184695	1,150
20	14,4	22,6	6,192	1,152	194880	23,1	6,183	1,152	194300	1,152
21	15,2	22,7	6,878	1,161	204502	23,1	6,856	1,159	204015	1,160
22	15,9	22,7	7,525	1,157	214240	23,1	7,519	1,158	213730	1,158
23	16,6	22,8	8,274	1,165	223845	23,2	8,262	1,165	223312	1,165
24	17,2	22,8	8,939	1,156	233577	23,3	8,93	1,157	232882	1,156
25	18	22,9	9,75	1,162	243164	23,4	9,736	1,162	242442	1,162
26	18,8	23	10,539	1,162	252740	23,5	10,518	1,161	251989	1,162
27	19,3	23	11,4	1,165	262461	23,5	11,39	1,166	261681	1,166
28	20,1	23,1	12,266	1,166	272020	23,6	12,254	1,167	271212	1,167
29	20,7	23,2	13,125	1,164	281567	23,7	13,115	1,165	280731	1,164
30	21,5	23,3	14,049	1,164	291103	23,8	14,045	1,166	290240	1,165
31	22	23,4	15,05	1,169	300628	23,9	15,05	1,171	299736	1,170
32	22,8	23,7	15,996	1,167	309773	24	16,012	1,169	309222	1,168
33	23,4	23,8	17,025	1,168	319264	24,1	17,012	1,168	318696	1,168
34	24,2	23,9	18,061	1,168	328743	24,3	18,029	1,167	327965	1,168
35	25	24,1	19,194	1,172	338011	24,4	19,196	1,173	337412	1,173
36	25,6	24,3	20,368	1,176	347258	24,6	20,346	1,176	346643	1,176
37	26,4	24,5	21,505	1,177	356482	24,8	21,481	1,176	355851	1,176

Pöytäkirja 8. Muoto: Kolmio										
Leveys	Paksuus	Mitt. nro.	Päivä	Klo		Mitt. nro.	Päivä	Klo		
150 mm	10 mm	16	Ma 11.4.11	13.15		17	Ma 11.4.11	14.10		KA
v [m/s]	Hz	T [°C]	F [N]	C _v	Re	T [°C]	F [N]	C _v	Re	C _v
0	0	23,5	0	0,000	0	23,2	0	0,000	0	0,000
1	1	23,6	0,005	0,869	9646	23,3	0,003	0,521	9664	0,695
2	1,8	23,6	0,017	0,739	19293	23,4	0,019	0,825	19316	0,782
3	2,4	23,6	0,055	1,063	28939	23,5	0,055	1,062	28956	1,062
4	3,2	23,7	0,107	1,163	38562	23,6	0,105	1,141	38585	1,152
5	4	23,7	0,167	1,162	48203	23,6	0,163	1,134	48232	1,148
6	4,6	23,7	0,237	1,145	57844	23,6	0,236	1,140	57878	1,142
7	5,4	23,7	0,327	1,161	67484	23,6	0,327	1,160	67524	1,161
8	6	23,7	0,426	1,158	77125	23,6	0,426	1,157	77171	1,158
9	6,7	23,7	0,543	1,166	86766	23,6	0,539	1,157	86817	1,161
10	7,5	23,6	0,679	1,181	96463	23,6	0,676	1,175	96463	1,178
11	8,1	23,6	0,824	1,184	106110	23,6	0,82	1,178	106110	1,181
12	8,9	23,6	0,982	1,186	115756	23,6	0,975	1,177	115756	1,181
13	9,5	23,6	1,172	1,206	125402	23,6	1,164	1,198	125402	1,202
14	10,3	23,6	1,355	1,202	135049	23,6	1,349	1,197	135049	1,199
15	10,9	23,6	1,559	1,205	144695	23,6	1,551	1,199	144695	1,202
16	11,7	23,6	1,775	1,206	154341	23,6	1,763	1,197	154341	1,201
17	12,3	23,6	2,006	1,207	163988	23,6	1,992	1,198	163988	1,203
18	13	23,6	2,268	1,217	173634	23,6	2,254	1,210	173634	1,213
19	13,8	23,6	2,526	1,217	183280	23,6	2,513	1,210	183280	1,214
20	14,4	23,6	2,809	1,221	192927	23,6	2,79	1,213	192927	1,217
21	15,2	23,6	3,11	1,226	202573	23,6	3,095	1,220	202573	1,223
22	15,9	23,6	3,411	1,225	212219	23,6	3,396	1,220	212219	1,223
23	16,6	23,7	3,751	1,233	221734	23,7	3,733	1,227	221734	1,230
24	17,2	23,7	4,054	1,224	231375	23,7	4,032	1,218	231375	1,221
25	18	23,7	4,427	1,232	241015	23,8	4,396	1,224	240872	1,228
26	18,8	23,8	4,787	1,232	250507	23,9	4,752	1,223	250359	1,228
27	19,3	23,9	5,184	1,238	259988	23,9	5,158	1,231	259988	1,235
28	20,1	24	5,571	1,237	269457	24	5,547	1,232	269457	1,235
29	20,7	24	5,966	1,235	279081	24,1	5,934	1,229	278916	1,232
30	21,5	24,1	6,386	1,236	288533	24,2	6,352	1,230	288363	1,233
31	22	24,2	6,85	1,242	297975	24,3	6,813	1,236	297798	1,239
32	22,8	24,3	7,287	1,240	307405	24,4	7,246	1,234	307223	1,237
33	23,4	24,4	7,747	1,240	316824	24,6	7,709	1,235	316450	1,238
34	24,2	24,5	8,226	1,241	326232	24,7	8,177	1,234	325847	1,238
35	25	24,6	8,751	1,246	335629	24,8	8,702	1,240	335233	1,243
36	25,6	24,8	9,275	1,249	344811	24,9	9,231	1,244	344608	1,247
37	26,4	24,9	9,785	1,248	354180	25,1	9,745	1,244	353763	1,246
38	27	25,1	10,327	1,250	363324	25,2	10,274	1,244	363110	1,247
39	27,8	25,2	10,869	1,249	372666	25,4	10,814	1,244	372228	1,246
40	28,5	25,4	11,462	1,253	381772	25,6	11,405	1,248	381324	1,250
41	29,1	25,5	12,029	1,252	391087	25,8	11,977	1,248	390399	1,250
42	30	25,8	12,621	1,253	399921	26,1	12,562	1,249	399219	1,251

Liite 4
10 (19)

Pöytäkirja 9. Muoto: Neliö										
Leveys	Paksuus	Mitt. nro.	Päivä	Klo		Mitt. nro.	Päivä	Klo		
125 mm	10 mm	18	Ma 11.4.11	17.05		19	Ma 11.4.11	18.00		KA
v [m/s]	Hz	T [°C]	F [N]	C _v	Re	T [°C]	F [N]	C _v	Re	C _v
0	0	22,9	0	0,000	0	23,5	0	0,000	0	0,000
1	1	22,9	0,004	0,430	8100	23,6	0,006	0,646	8067	0,538
2	1,8	23,1	0,028	0,752	16181	23,8	0,031	0,835	16114	0,794
3	2,4	23,2	0,083	0,992	24258	23,8	0,081	0,970	24171	0,981
4	3,2	23,2	0,165	1,109	32344	23,9	0,169	1,138	32209	1,124
5	4	23,2	0,26	1,118	40429	23,9	0,264	1,138	40262	1,128
6	4,6	23,2	0,375	1,120	48515	23,9	0,378	1,132	48314	1,126
7	5,4	23,2	0,518	1,137	56601	23,8	0,522	1,148	56400	1,142
8	5,9	23,2	0,68	1,142	64687	23,8	0,679	1,143	64457	1,143
9	6,7	23,2	0,86	1,142	72773	23,8	0,862	1,147	72514	1,144
10	7,5	23,2	1,08	1,161	80859	23,8	1,081	1,165	80571	1,163
11	8,1	23,2	1,31	1,164	88945	23,8	1,306	1,163	88628	1,163
12	8,9	23,2	1,562	1,166	97031	23,8	1,558	1,166	96685	1,166
13	9,5	23,2	1,861	1,184	105117	23,8	1,856	1,183	104742	1,184
14	10,3	23,2	2,156	1,183	113202	23,8	2,15	1,182	112799	1,182
15	10,8	23,2	2,478	1,184	121288	23,8	2,472	1,184	120857	1,184
16	11,6	23,2	2,822	1,185	129374	23,8	2,809	1,182	128914	1,184
17	12,2	23,2	3,194	1,188	137460	23,8	3,176	1,184	136971	1,186
18	13	23,2	3,604	1,196	145546	23,8	3,59	1,194	145028	1,195
19	13,8	23,2	4,016	1,196	153632	23,9	3,999	1,194	152994	1,195
20	14,4	23,2	4,455	1,197	161718	23,9	4,432	1,194	161047	1,196
21	15,1	23,3	4,95	1,207	169703	23,9	4,925	1,204	169099	1,205
22	15,8	23,3	5,438	1,208	177784	23,9	5,406	1,204	177151	1,206
23	16,6	23,4	5,959	1,212	185754	24	5,935	1,210	185094	1,211
24	17,1	23,4	6,455	1,206	193830	24	6,423	1,202	193141	1,204
25	17,9	23,5	7,031	1,211	201787	24,1	7,006	1,209	201070	1,210
26	18,7	23,5	7,609	1,211	209858	24,1	7,559	1,206	209113	1,209
27	19,3	23,6	8,246	1,218	217800	24,2	8,185	1,211	217027	1,215
28	20,1	23,7	8,859	1,217	225733	24,3	8,799	1,211	224932	1,214
29	20,7	23,7	9,501	1,217	233795	24,4	9,453	1,213	232827	1,215
30	21,5	23,8	10,157	1,216	241713	24,5	10,097	1,212	240714	1,214
31	22	23,9	10,881	1,220	249622	24,6	10,824	1,217	248591	1,218
32	22,8	24	11,584	1,220	257522	24,7	11,51	1,215	256458	1,217
33	23,4	24,1	12,306	1,219	265412	24,8	12,256	1,217	264317	1,218
34	24,2	24,3	13,05	1,218	273132	24,9	12,983	1,214	272166	1,216
35	25	24,4	13,886	1,224	280999	25	13,804	1,219	280006	1,221
36	25,6	24,5	14,734	1,228	288856	25,2	14,657	1,224	287667	1,226
37	26,4	24,7	15,533	1,226	296530	25,4	15,465	1,224	295310	1,225
38	27	24,8	16,402	1,228	304365	25,6	16,302	1,224	302936	1,226
39	27,7	25	17,24	1,226	312006	25,7	17,126	1,221	310725	1,223
40	28,5	25,2	18,187	1,230	319630	25,9	18,082	1,226	318319	1,228
41	29,1	25,4	19,06	1,228	327236	26,1	18,984	1,226	325895	1,227
42	29,9	25,6	20	1,229	334823	26,4	19,922	1,227	333259	1,228

Pöytäkirja 10. Muoto: Kolmio										
Leveys	Paksuus	Mitt. nro.	Päivä	Klo		Mitt. nro.	Päivä	Klo		
125 mm	10 mm	20	Ti 12.4.11	10.00		21	Ti 12.4.11	10.50		KA
v [m/s]	Hz	T [°C]	F [N]	C _v	Re	T [°C]	F [N]	C _v	Re	C _v
0	0	21,2	0	0,000	0	22,8	0	0,000	0	0,000
1	1	21,2	0,003	0,763	8057	22,8	0,003	0,767	7980	0,765
2	1,8	21,2	0,013	0,827	16114	22,8	0,014	0,895	15960	0,861
3	2,4	21,2	0,038	1,074	24171	22,9	0,04	1,137	23926	1,106
4	3,2	21,3	0,073	1,161	32209	22,9	0,074	1,184	31901	1,172
5	4	21,2	0,113	1,150	40285	22,9	0,116	1,187	39876	1,169
6	4,6	21,2	0,162	1,145	48342	22,8	0,165	1,172	47880	1,159
7	5,4	21,3	0,224	1,164	56365	22,8	0,229	1,196	55860	1,180
8	5,9	21,3	0,295	1,173	64417	22,8	0,299	1,195	63840	1,184
9	6,7	21,3	0,374	1,175	72469	22,8	0,379	1,197	71821	1,186
10	7,5	21,3	0,47	1,196	80521	22,8	0,474	1,213	79801	1,204
11	8,1	21,3	0,568	1,195	88573	22,8	0,574	1,214	87781	1,204
12	8,9	21,3	0,68	1,202	96626	22,7	0,683	1,213	95818	1,207
13	9,5	21,4	0,81	1,220	104615	22,7	0,814	1,232	103803	1,226
14	10,3	21,4	0,94	1,221	112662	22,7	0,942	1,229	111788	1,225
15	10,8	21,4	1,08	1,222	120709	22,7	1,082	1,230	119772	1,226
16	11,6	21,4	1,229	1,222	128757	22,7	1,234	1,233	127757	1,228
17	12,2	21,4	1,392	1,226	136804	22,8	1,396	1,236	135661	1,231
18	13	21,5	1,574	1,237	144764	22,8	1,576	1,244	143641	1,241
19	13,8	21,5	1,756	1,239	152806	22,8	1,757	1,245	151621	1,242
20	14,4	21,6	1,946	1,240	160752	22,8	1,949	1,246	159601	1,243
21	15,1	21,6	2,163	1,250	168790	22,8	2,16	1,253	167581	1,251
22	15,8	21,7	2,374	1,250	176721	22,8	2,377	1,256	175561	1,253
23	16,6	21,7	2,61	1,257	184754	22,9	2,611	1,263	183432	1,260
24	17,1	21,7	2,822	1,249	192787	22,9	2,821	1,253	191407	1,251
25	17,9	21,8	3,081	1,257	200699	22,9	3,074	1,259	199382	1,258
26	18,7	21,9	3,328	1,256	208602	23	3,329	1,261	207234	1,258
27	19,3	21,9	3,606	1,262	216625	23	3,609	1,267	215205	1,264
28	20,1	22	3,882	1,263	224513	23,1	3,883	1,268	223042	1,266
29	20,7	22,1	4,159	1,262	232392	23,2	4,154	1,265	230871	1,264
30	21,5	22,2	4,445	1,261	240262	23,2	4,451	1,267	238832	1,264
31	22	22,3	4,771	1,268	248122	23,3	4,766	1,271	246646	1,269
32	22,8	22,4	5,078	1,267	255973	23,4	5,078	1,271	254451	1,269
33	23,4	22,5	5,403	1,268	263814	23,4	5,402	1,272	262402	1,270
34	24,2	22,6	5,733	1,268	271646	23,5	5,728	1,271	270193	1,269
35	25	22,6	6,105	1,274	279636	23,6	6,09	1,275	277975	1,275
36	25,6	22,8	6,476	1,278	287282	23,7	6,465	1,280	285747	1,279
37	26,4	22,9	6,841	1,279	295086	23,8	6,833	1,281	293511	1,280
38	27	23,1	7,214	1,279	302700	23,9	7,201	1,280	301265	1,280
39	27,7	23,3	7,586	1,278	310296	24,1	7,573	1,279	308827	1,279
40	28,5	23,4	8,009	1,283	318064	24,2	7,988	1,283	316558	1,283
41	29,1	23,6	8,405	1,282	325628	24,4	8,399	1,285	324088	1,284
42	29,9	23,8	8,814	1,282	333174	24,5	8,802	1,284	331797	1,283

Liite 4
12 (19)

Pöytäkirja 11. Muoto: Neliö										
Leveys	Paksuus	Mitt. nro.	Päivä	Klo		Mitt. nro.	Päivä	Klo		
100 mm	10 mm	22	Ti 12.4.11	11.45		23	Ti 12.4.11	12.50		KA
v [m/s]	Hz	T [°C]	F [N]	C _v	Re	T [°C]	F [N]	C _v	Re	C _v
0	0	22,8	0	0,000	0	23,4	0	0,000	0	0,000
1	1	22,9	0,004	0,672	6475	23,4	0,004	0,674	6456	0,673
2	1,8	23	0,016	0,673	12942	23,4	0,017	0,716	12911	0,694
3	2,4	23,1	0,054	1,009	19402	23,5	0,056	1,048	19356	1,029
4	3,2	23,1	0,107	1,125	25869	23,5	0,107	1,126	25807	1,126
5	4	23,1	0,167	1,124	32336	23,5	0,168	1,132	32259	1,128
6	4,6	23,1	0,239	1,117	38803	23,5	0,24	1,123	38711	1,120
7	5,4	23,1	0,332	1,140	45271	23,4	0,332	1,141	45190	1,140
8	5,9	23,1	0,435	1,143	51738	23,4	0,434	1,142	51645	1,143
9	6,7	23,1	0,551	1,144	58205	23,4	0,552	1,148	58101	1,146
10	7,5	23,1	0,692	1,164	64672	23,4	0,694	1,169	64557	1,166
11	8,1	23,1	0,838	1,165	71139	23,4	0,841	1,170	71013	1,168
12	8,9	23,1	1,001	1,169	77607	23,4	1,004	1,174	77468	1,172
13	9,5	23,1	1,191	1,186	84074	23,4	1,195	1,191	83924	1,188
14	10,3	23,1	1,383	1,187	90541	23,3	1,386	1,190	90433	1,189
15	10,8	23,1	1,585	1,185	97008	23,3	1,59	1,190	96893	1,187
16	11,6	23,1	1,807	1,187	103476	23,3	1,814	1,193	103352	1,190
17	12,2	23,1	2,05	1,193	109943	23,3	2,052	1,195	109812	1,194
18	13	23,1	2,316	1,202	116410	23,4	2,315	1,203	116202	1,203
19	13,8	23,2	2,578	1,202	122804	23,4	2,585	1,206	122658	1,204
20	14,4	23,2	2,863	1,204	129267	23,4	2,864	1,206	129114	1,205
21	15,1	23,2	3,176	1,212	135731	23,4	3,179	1,214	135569	1,213
22	15,8	23,2	3,491	1,214	142194	23,4	3,501	1,218	142025	1,216
23	16,6	23,3	3,837	1,221	148569	23,5	3,849	1,226	148392	1,223
24	17,1	23,3	4,143	1,211	155029	23,5	4,152	1,214	154844	1,212
25	17,9	23,4	4,521	1,218	161392	23,6	4,528	1,221	161200	1,219
26	18,7	23,4	4,897	1,220	167848	23,6	4,898	1,221	167648	1,220
27	19,3	23,5	5,308	1,226	174200	23,7	5,308	1,227	173993	1,227
28	20,1	23,6	5,697	1,224	180544	23,7	5,699	1,225	180437	1,225
29	20,7	23,6	6,11	1,224	186992	23,8	6,122	1,227	186771	1,226
30	21,5	23,7	6,532	1,223	193326	23,9	6,547	1,227	193096	1,225
31	22	23,8	7,014	1,231	199651	24	7,023	1,233	199415	1,232
32	22,8	23,9	7,456	1,228	205970	24,1	7,472	1,232	205726	1,230
33	23,4	24	7,931	1,229	212280	24,2	7,933	1,230	212029	1,229
34	24,2	24,1	8,42	1,229	218583	24,3	8,431	1,232	218325	1,231
35	25	24,2	8,957	1,235	224879	24,4	8,974	1,238	224613	1,236
36	25,6	24,3	9,514	1,240	231168	24,5	9,504	1,239	230894	1,240
37	26,4	24,5	10,036	1,239	237308	24,6	10,056	1,242	237168	1,240
38	27	24,6	10,582	1,239	243578	24,7	10,592	1,241	243434	1,240
39	27,7	24,8	11,116	1,236	249693	24,9	11,131	1,239	249546	1,238
40	28,5	25	11,743	1,243	255794	25,1	11,747	1,243	255643	1,243
41	29,1	25,1	12,333	1,243	262034	25,2	12,335	1,243	261880	1,243
42	29,9	25,3	12,917	1,241	268110	25,4	12,923	1,242	267952	1,241

Pöytäkirja 12. Muoto: Kolmio										
Leveys	Paksuus	Mitt. nro.	Päivä	Klo		Mitt. nro.	Päivä	Klo		
100 mm	10 mm	24	Ti 12.4.11	14.35		25	Ti 12.4.11	15.15		KA
v [m/s]	Hz	T [°C]	F [N]	C _v	Re	T [°C]	F [N]	C _v	Re	C _v
0	0	22,8	0	0,000	0	22,7	0	0,000	0	0,000
1	1	22,8	0,001	0,387	6485	22,9	0,001	0,387	6481	0,387
2	1,8	22,8	0,006	0,581	12970	23	0,01	0,969	12955	0,775
3	2,4	22,8	0,021	0,904	19455	23,1	0,025	1,077	19420	0,990
4	3,2	22,8	0,047	1,138	25940	23,1	0,048	1,163	25894	1,151
5	4	22,8	0,072	1,116	32425	23,1	0,074	1,148	32367	1,132
6	4,6	22,8	0,104	1,119	38910	23,1	0,105	1,131	38841	1,125
7	5,4	22,8	0,145	1,146	45395	23,1	0,147	1,163	45314	1,155
8	5,9	22,8	0,19	1,150	51880	23,1	0,191	1,157	51787	1,154
9	6,7	22,8	0,243	1,162	58365	23,1	0,244	1,168	58261	1,165
10	7,5	22,8	0,306	1,185	64850	23	0,308	1,194	64773	1,190
11	8,1	22,8	0,37	1,184	71335	23	0,373	1,195	71250	1,190
12	8,9	22,8	0,443	1,192	77820	23	0,446	1,201	77727	1,196
13	9,5	22,8	0,529	1,212	84305	23	0,531	1,218	84205	1,215
14	10,3	22,8	0,611	1,208	90790	23	0,616	1,218	90682	1,213
15	10,8	22,8	0,704	1,212	97275	23	0,71	1,223	97159	1,218
16	11,6	22,8	0,802	1,214	103760	23	0,808	1,223	103637	1,218
17	12,2	22,8	0,908	1,217	110245	23	0,912	1,223	110114	1,220
18	13	22,8	1,027	1,228	116730	23	1,03	1,232	116591	1,230
19	13,8	22,8	1,146	1,230	123215	23,1	1,149	1,234	122995	1,232
20	14,4	22,8	1,271	1,231	129700	23,1	1,275	1,236	129468	1,233
21	15,1	22,9	1,412	1,241	136104	23,1	1,416	1,245	135942	1,243
22	15,8	22,9	1,552	1,243	142585	23,1	1,556	1,247	142415	1,245
23	16,6	23	1,704	1,249	148977	23,1	1,71	1,253	148889	1,251
24	17,1	23	1,844	1,241	155455	23,2	1,849	1,245	155270	1,243
25	17,9	23,1	2,01	1,247	161836	23,3	2,017	1,252	161643	1,250
26	18,7	23,1	2,174	1,247	168309	23,4	2,183	1,253	168009	1,250
27	19,3	23,2	2,359	1,255	174678	23,4	2,366	1,260	174471	1,257
28	20,1	23,2	2,538	1,256	181148	23,5	2,543	1,259	180825	1,258
29	20,7	23,3	2,719	1,254	187506	23,5	2,724	1,258	187283	1,256
30	21,5	23,3	2,911	1,255	193972	23,5	2,914	1,257	193741	1,256
31	22	23,4	3,123	1,261	200318	23,6	3,128	1,264	200080	1,263
32	22,8	23,5	3,325	1,261	206657	23,7	3,333	1,265	206412	1,263
33	23,4	23,6	3,536	1,261	212989	23,7	3,542	1,264	212862	1,262
34	24,2	23,7	3,756	1,262	219313	23,9	3,761	1,265	219053	1,264
35	25	23,8	3,998	1,268	225629	24	4,003	1,271	225362	1,270
36	25,6	23,9	4,245	1,273	231938	24,1	4,249	1,276	231663	1,274
37	26,4	24	4,485	1,274	238240	24,2	4,484	1,275	237958	1,274
38	27	24,1	4,729	1,274	244534	24,3	4,731	1,276	244244	1,275
39	27,7	24,2	4,975	1,273	250820	24,4	4,979	1,275	250524	1,274
40	28,5	24,3	5,253	1,278	257099	24,5	5,255	1,280	256796	1,279
41	29,1	24,4	5,516	1,278	263371	24,7	5,518	1,280	262905	1,279
42	29,9	24,5	5,786	1,278	269635	24,8	5,786	1,279	269158	1,278

Liite 4
14 (19)

Pöytäkirja 13. Muoto: Ympyrä										
Leveys	Paksuus	Mitt. nro.	Päivä	Klo		Mitt. nro.	Päivä	Klo		
150 mm	10 mm	26	Ke 13.4.11	10.20		27	Ke 13.4.11	11.15		KA
v [m/s]	Hz	T [°C]	F [N]	C _v	Re	T [°C]	F [N]	C _v	Re	C _v
0	0	20,7	0	0,000	0	22,5	0	0,000	0	0,000
1	1	20,7	0,006	0,565	9853	22,8	0,008	0,759	9729	0,662
2	1,8	20,8	0,036	0,848	19693	22,8	0,036	0,854	19458	0,851
3	2,4	20,8	0,09	0,943	29540	22,8	0,088	0,928	29187	0,935
4	3,2	20,8	0,192	1,131	39387	22,8	0,191	1,133	38917	1,132
5	4	20,9	0,299	1,128	49204	22,8	0,3	1,139	48646	1,133
6	4,6	20,9	0,431	1,129	59044	22,8	0,43	1,133	58375	1,131
7	5,4	20,9	0,594	1,143	68885	22,8	0,594	1,150	68104	1,147
8	5,9	20,9	0,779	1,148	78726	22,8	0,779	1,155	77833	1,151
9	6,7	20,9	0,985	1,147	88566	22,8	0,979	1,147	87562	1,147
10	7,5	20,9	1,231	1,161	98407	22,8	1,228	1,165	97291	1,163
11	8,1	20,9	1,491	1,162	108248	22,8	1,488	1,167	107021	1,164
12	8,9	21	1,78	1,166	118017	22,7	1,778	1,171	116819	1,168
13	9,5	21	2,119	1,183	127852	22,7	2,11	1,184	126554	1,183
14	10,3	21	2,45	1,179	137687	22,7	2,449	1,185	136289	1,182
15	10,8	21,1	2,817	1,181	147433	22,7	2,811	1,185	146024	1,183
16	11,6	21,1	3,216	1,185	157262	22,7	3,195	1,184	155759	1,185
17	12,2	21,1	3,626	1,184	167090	22,7	3,613	1,186	165494	1,185
18	13	21,2	4,098	1,194	176813	22,7	4,087	1,196	175229	1,195
19	13,8	21,2	4,565	1,193	186636	22,7	4,558	1,198	184964	1,196
20	14,4	21,2	5,068	1,196	196459	22,8	5,051	1,198	194583	1,197
21	15,1	21,3	5,637	1,207	206157	22,8	5,6	1,205	204312	1,206
22	15,8	21,4	6,173	1,204	215844	22,8	6,158	1,207	214041	1,206
23	16,6	21,5	6,782	1,211	225520	22,8	6,758	1,212	223770	1,212
24	17,1	21,5	7,324	1,201	235325	22,9	7,311	1,205	233360	1,203
25	17,9	21,6	7,993	1,209	244983	22,9	7,972	1,211	243083	1,210
26	18,7	21,7	8,658	1,211	254629	23	8,614	1,210	252656	1,210
27	19,3	21,8	9,368	1,215	264264	23	9,341	1,217	262374	1,216
28	20,1	21,8	10,068	1,214	274051	23,1	10,026	1,215	271929	1,215
29	20,7	21,9	10,791	1,214	283669	23,2	10,773	1,217	281473	1,215
30	21,5	22	11,52	1,211	293274	23,3	11,516	1,216	291006	1,214
31	22	22,1	12,366	1,218	302868	23,4	12,332	1,220	300527	1,219
32	22,8	22,3	13,167	1,218	312264	23,5	13,113	1,218	310037	1,218
33	23,4	22,5	13,989	1,218	321637	23,6	13,942	1,218	319536	1,218
34	24,2	22,6	14,867	1,219	331186	23,7	14,788	1,217	329024	1,218
35	25	22,7	15,788	1,222	340723	23,8	15,748	1,224	338500	1,223
36	25,6	22,9	16,724	1,225	350040	23,9	16,695	1,227	347965	1,226
37	26,4	23,1	17,653	1,225	359335	24,1	17,612	1,226	357207	1,225
38	27	23,3	18,597	1,224	368608	24,2	18,51	1,222	366644	1,223
39	27,7	23,4	19,581	1,224	378083	24,4	19,552	1,226	375848	1,225
40	28,5	23,7	20,65	1,228	387087	24,5	20,616	1,230	385257	1,229
41	29,1	23,9	21,671	1,228	396294	24,7	21,658	1,230	394423	1,229

Liite 4
15 (19)

Pöytäkirja 14. Muoto: Ympyrä										
Leveys	Paksuus	Mitt. nro.	Päivä	Klo		Mitt. nro.	Päivä	Klo		
150 mm	3 mm	28	Ke 13.4.11	12.15		29	Ke 13.4.11	13.40		KA
v [m/s]	Hz	T [°C]	F [N]	C _v	Re	T [°C]	F [N]	C _v	Re	C _v
0	0	23	0	0,000	0	22,3	0	0,000	0	0,000
1	1	23	0,008	0,760	9718	22,3	0,006	0,568	9758	0,664
2	1,8	23,1	0,033	0,784	19424	22,6	0,034	0,806	19482	0,795
3	2,4	23,2	0,086	0,908	29118	22,6	0,084	0,885	29222	0,896
4	3,2	23,2	0,189	1,122	38824	22,6	0,185	1,096	38963	1,109
5	4	23,2	0,298	1,133	48530	22,6	0,295	1,119	48704	1,126
6	4,6	23,2	0,43	1,135	58236	22,6	0,424	1,117	58445	1,126
7	5,4	23,2	0,595	1,154	67942	22,6	0,591	1,144	68185	1,149
8	5,9	23,2	0,775	1,151	77648	22,6	0,771	1,142	77926	1,146
9	6,7	23,1	0,979	1,148	87406	22,6	0,978	1,145	87667	1,146
10	7,5	23,1	1,229	1,167	97118	22,6	1,227	1,163	97408	1,165
11	8,1	23,1	1,489	1,169	106829	22,6	1,484	1,163	107148	1,166
12	8,9	23,1	1,777	1,172	116541	22,6	1,77	1,165	116889	1,169
13	9,5	23,1	2,112	1,187	126253	22,6	2,108	1,183	126630	1,185
14	10,3	23,1	2,449	1,187	135965	22,6	2,443	1,182	136371	1,184
15	10,8	23,1	2,812	1,187	145676	22,6	2,804	1,182	146111	1,184
16	11,6	23,1	3,207	1,190	155388	22,6	3,197	1,184	155852	1,187
17	12,2	23,1	3,617	1,189	165100	22,7	3,615	1,186	165494	1,188
18	13	23,1	4,09	1,199	174812	22,7	4,095	1,199	175229	1,199
19	13,8	23,1	4,561	1,200	184523	22,7	4,552	1,196	184964	1,198
20	14,4	23,1	5,058	1,201	194235	22,7	5,046	1,197	194699	1,199
21	15,1	23,1	5,608	1,208	203947	22,8	5,606	1,206	204312	1,207
22	15,8	23,2	6,157	1,209	213531	22,8	6,156	1,207	214041	1,208
23	16,6	23,2	6,763	1,215	223237	22,9	6,75	1,211	223637	1,213
24	17,1	23,2	7,314	1,206	232943	22,9	7,309	1,204	233360	1,205
25	17,9	23,3	7,982	1,214	242505	23	7,956	1,209	242939	1,211
26	18,7	23,3	8,626	1,213	252205	23,1	8,62	1,211	252506	1,212
27	19,3	23,4	9,337	1,218	261750	23,2	9,33	1,216	262061	1,217
28	20,1	23,5	10,023	1,216	271283	23,2	10,026	1,215	271767	1,215
29	20,7	23,6	10,744	1,215	280805	23,3	10,754	1,215	281306	1,215
30	21,5	23,6	11,491	1,215	290488	23,4	11,48	1,213	290833	1,214
31	22	23,7	12,323	1,220	299992	23,5	12,31	1,218	300349	1,219
32	22,8	23,8	13,099	1,218	309486	23,6	13,113	1,218	309853	1,218
33	23,4	23,9	13,928	1,218	318968	23,7	13,935	1,218	319347	1,218
34	24,2	24	14,762	1,217	328439	23,8	14,756	1,215	328829	1,216
35	25	24,1	15,716	1,223	337899	24	15,689	1,220	338099	1,221
36	25,6	24,2	16,67	1,226	347347	24,1	16,655	1,225	347553	1,225
37	26,4	24,3	17,571	1,224	356785	24,2	17,576	1,224	356996	1,224
38	27	24,5	18,498	1,222	365995	24,4	18,541	1,225	366211	1,224
39	27,7	24,6	19,457	1,221	375404	24,5	19,518	1,225	375626	1,223
40	28,5	24,8	20,548	1,227	384576	24,7	20,53	1,225	384803	1,226
41	29,1	25	21,564	1,226	393726	24,9	21,571	1,226	393958	1,226

Liite 4
16 (19)

Pöytäkirja 15. Muoto: Ympyrä										
Leveys	Paksuus	Mitt. nro.	Päivä	Klo		Mitt. nro.	Päivä	Klo		
125 mm	10 mm	30	Ke 13.4.11	14.30		31	Ke 13.4.11	15.50		KA
v [m/s]	Hz	T [°C]	F [N]	C _v	Re	T [°C]	F [N]	C _v	Re	C _v
0	0	23,7	0	0,000	0	23,4	0	0,000	0	0,000
1	1	23,7	0,004	0,548	8064	23,5	0,006	0,822	8074	0,685
2	1,8	23,7	0,026	0,891	16129	23,6	0,025	0,856	16138	0,874
3	2,4	23,7	0,071	1,081	24193	23,6	0,071	1,081	24207	1,081
4	3,2	23,7	0,132	1,131	32257	23,6	0,131	1,122	32276	1,126
5	4	23,7	0,205	1,124	40322	23,6	0,204	1,118	40345	1,121
6	4,6	23,7	0,295	1,123	48386	23,6	0,295	1,123	48415	1,123
7	5,4	23,7	0,409	1,144	56450	23,6	0,409	1,144	56484	1,144
8	5,9	23,6	0,536	1,147	64553	23,5	0,536	1,147	64591	1,147
9	6,7	23,6	0,683	1,155	72622	23,5	0,681	1,151	72665	1,153
10	7,5	23,5	0,858	1,175	80739	23,5	0,854	1,170	80739	1,172
11	8,1	23,5	1,036	1,173	88813	23,5	1,035	1,171	88813	1,172
12	8,9	23,5	1,237	1,176	96887	23,5	1,238	1,177	96887	1,177
13	9,5	23,5	1,474	1,194	104961	23,5	1,473	1,194	104961	1,194
14	10,3	23,5	1,711	1,196	113034	23,5	1,71	1,195	113034	1,195
15	10,8	23,5	1,967	1,197	121108	23,5	1,964	1,195	121108	1,196
16	11,6	23,5	2,244	1,200	129182	23,5	2,233	1,195	129182	1,198
17	12,2	23,5	2,533	1,200	137256	23,5	2,531	1,199	137256	1,200
18	13	23,5	2,862	1,210	145330	23,5	2,86	1,209	145330	1,209
19	13,8	23,5	3,195	1,212	153404	23,5	3,188	1,209	153404	1,211
20	14,4	23,5	3,542	1,213	161478	23,5	3,538	1,211	161478	1,212
21	15,1	23,5	3,934	1,222	169552	23,5	3,932	1,221	169552	1,221
22	15,8	23,5	4,322	1,223	177626	23,5	4,316	1,221	177626	1,222
23	16,6	23,5	4,738	1,227	185700	23,6	4,735	1,226	185589	1,226
24	17,1	23,5	5,124	1,218	193773	23,6	5,121	1,218	193658	1,218
25	17,9	23,6	5,589	1,225	201727	23,6	5,583	1,224	201727	1,224
26	18,7	23,6	6,043	1,225	209797	23,7	6,043	1,225	209672	1,225
27	19,3	23,7	6,544	1,230	217736	23,8	6,545	1,231	217607	1,231
28	20,1	23,8	7,032	1,230	225667	23,8	7,033	1,230	225667	1,230
29	20,7	23,8	7,546	1,230	233726	23,9	7,534	1,229	233588	1,229
30	21,5	23,9	8,067	1,229	241642	24	8,058	1,228	241499	1,229
31	22	24	8,649	1,235	249549	24,1	8,652	1,236	249401	1,235
32	22,8	24,1	9,212	1,235	257447	24,1	9,213	1,235	257447	1,235
33	23,4	24,2	9,785	1,233	265335	24,2	9,778	1,233	265335	1,233
34	24,2	24,3	10,379	1,233	273214	24,4	10,378	1,233	273052	1,233
35	25	24,4	11,039	1,238	281083	24,5	11,038	1,238	280917	1,238
36	25,6	24,5	11,722	1,243	288943	24,6	11,707	1,242	288773	1,242
37	26,4	24,6	12,367	1,242	296794	24,8	12,367	1,243	296444	1,242
38	27	24,8	13,038	1,242	304456	24,9	13,022	1,241	304277	1,241
39	27,7	24,9	13,719	1,241	312284	25,1	13,714	1,242	311916	1,241
40	28,5	25	14,473	1,245	320102	25,3	14,451	1,244	319538	1,245
41	29,1	25,2	15,207	1,246	327719	25,4	15,181	1,245	327334	1,245
42	29,9	25,4	15,924	1,244	335318	25,7	15,92	1,245	334727	1,245

Liite 4
17 (19)

Pöytäkirja 16. Muoto: Ympyrä										
Leveys	Paksuus	Mitt. nro.	Päivä	Klo		Mitt. nro.	Päivä	Klo		
125 mm	3 mm	32	Ke 13.4.11	17.05		33	Ke 13.4.11	18.00		KA
v [m/s]	Hz	T [°C]	F [N]	C _v	Re	T [°C]	F [N]	C _v	Re	C _v
0	0	22,7	0	0,000	0	23,6	0	0,000	0	0,000
1	1	22,7	0,007	0,956	8112	23,6	0,005	0,685	8069	0,821
2	1,8	22,7	0,028	0,956	16225	23,6	0,026	0,890	16138	0,923
3	2,4	22,8	0,071	1,078	24323	23,6	0,071	1,081	24207	1,079
4	3,2	22,8	0,135	1,153	32430	23,6	0,135	1,156	32276	1,154
5	4	22,8	0,21	1,148	40538	23,6	0,209	1,145	40345	1,147
6	4,6	22,8	0,3	1,139	48646	23,6	0,297	1,130	48415	1,134
7	5,4	22,8	0,414	1,154	56753	23,6	0,412	1,152	56484	1,153
8	5,9	22,8	0,541	1,155	64861	23,5	0,538	1,151	64591	1,153
9	6,7	22,8	0,685	1,155	72969	23,5	0,682	1,153	72665	1,154
10	7,5	22,8	0,86	1,175	81076	23,5	0,855	1,171	80739	1,173
11	8,1	22,8	1,042	1,177	89184	23,5	1,039	1,176	88813	1,176
12	8,9	22,7	1,244	1,180	97349	23,5	1,237	1,176	96887	1,178
13	9,5	22,7	1,481	1,197	105462	23,5	1,477	1,197	104961	1,197
14	10,3	22,7	1,715	1,195	113574	23,5	1,712	1,196	113034	1,196
15	10,8	22,7	1,972	1,197	121687	23,5	1,968	1,198	121108	1,197
16	11,6	22,7	2,245	1,198	129799	23,5	2,242	1,199	129182	1,199
17	12,2	22,8	2,541	1,201	137829	23,5	2,528	1,198	137256	1,200
18	13	22,8	2,872	1,211	145937	23,5	2,858	1,208	145330	1,210
19	13,8	22,8	3,197	1,210	154045	23,5	3,19	1,210	153404	1,210
20	14,4	22,9	3,549	1,213	162056	23,6	3,539	1,212	161382	1,212
21	15,1	22,9	3,93	1,218	170158	23,6	3,921	1,218	169451	1,218
22	15,8	22,9	4,324	1,221	178261	23,6	4,31	1,220	177520	1,221
23	16,6	22,9	4,748	1,227	186364	23,7	4,737	1,227	185479	1,227
24	17,1	23	5,128	1,217	194351	23,7	5,126	1,220	193543	1,218
25	17,9	23	5,596	1,224	202449	23,8	5,584	1,225	201488	1,225
26	18,7	23,1	6,047	1,223	210421	23,8	6,04	1,225	209548	1,224
27	19,3	23,2	6,556	1,230	218384	23,9	6,541	1,230	217478	1,230
28	20,1	23,3	7,056	1,232	226338	24	7,038	1,232	225399	1,232
29	20,7	23,4	7,541	1,228	234282	24,1	7,541	1,231	233311	1,229
30	21,5	23,5	8,071	1,228	242217	24,2	8,056	1,229	241213	1,228
31	22	23,6	8,653	1,234	250142	24,3	8,639	1,234	249106	1,234
32	22,8	23,7	9,216	1,233	258058	24,4	9,19	1,233	256990	1,233
33	23,4	23,8	9,811	1,235	265964	24,5	9,768	1,233	264865	1,234
34	24,2	23,9	10,393	1,233	273861	24,6	10,368	1,233	272730	1,233
35	25	24,1	11,052	1,238	281582	24,7	11,025	1,238	280585	1,238
36	25,6	24,2	11,737	1,243	289456	24,8	11,71	1,243	288432	1,243
37	26,4	24,4	12,39	1,243	297145	25	12,357	1,242	296095	1,243
38	27	24,5	13,065	1,243	304996	25,2	13,012	1,241	303740	1,242
39	27,7	24,7	13,728	1,241	312652	25,3	13,704	1,241	311549	1,241
40	28,5	24,9	14,474	1,245	320291	25,5	14,462	1,246	319163	1,246
41	29,1	25	15,196	1,244	328105	25,7	15,162	1,244	326758	1,244
42	29,9	25,2	15,931	1,244	335712	25,9	15,91	1,245	334335	1,245

Liite 4
18 (19)

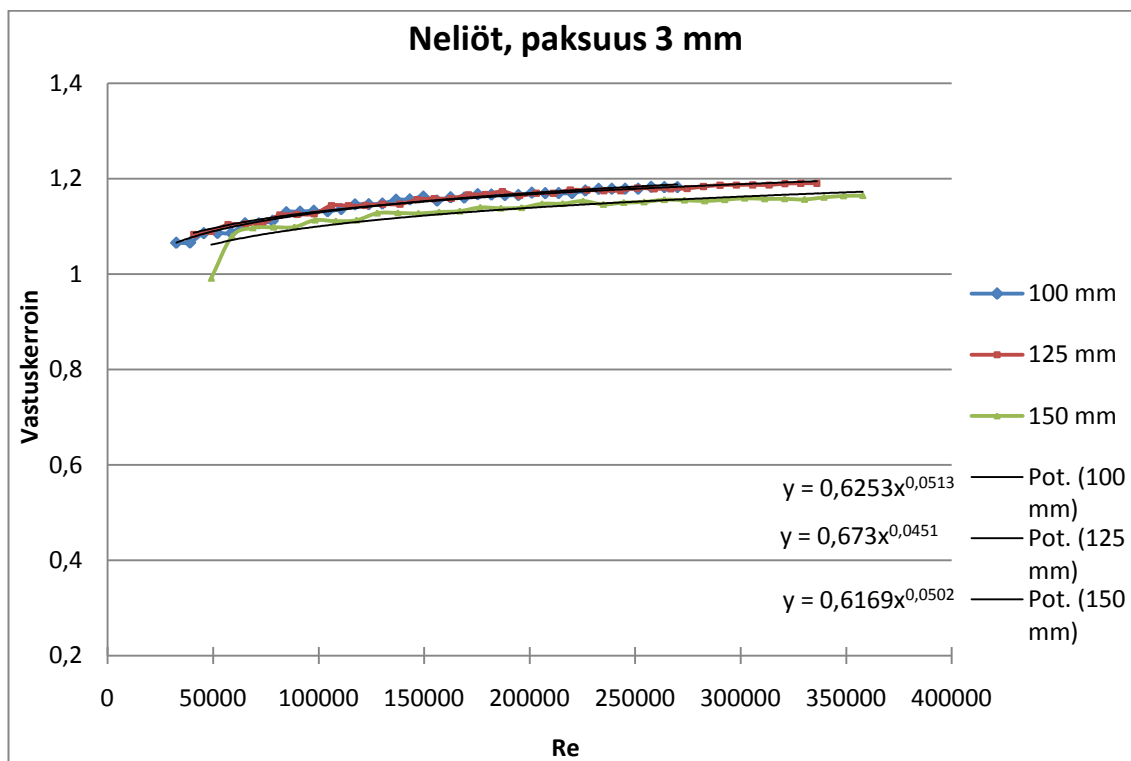
Pöytäkirja 17. Muoto: Ympyrä										
Leveys	Paksuus	Mitt. nro.	Päivä	Klo		Mitt. nro.	Päivä	Klo		
100 mm	10 mm	34	To 14.4.11	09.50		35	To 14.4.11	10.40		KA
v [m/s]	Hz	T [°C]	F [N]	C _v	Re	T [°C]	F [N]	C _v	Re	C _v
0	0	21,9	0	0,000	0	23,3	0	0,000	0	0,000
1	1	21,9	0,003	0,639	6521	23,4	0,004	0,856	6463	0,747
2	1,8	21,9	0,017	0,905	13042	23,4	0,018	0,963	12926	0,934
3	2,4	21,9	0,044	1,041	19563	23,4	0,047	1,117	19389	1,079
4	3,2	21,9	0,085	1,131	26084	23,4	0,086	1,150	25852	1,140
5	4	21,9	0,132	1,124	32606	23,4	0,133	1,138	32315	1,131
6	4,6	21,9	0,189	1,117	39127	23,4	0,192	1,141	38778	1,129
7	5,4	21,9	0,264	1,147	45648	23,3	0,264	1,152	45268	1,149
8	5,9	21,9	0,345	1,147	52169	23,3	0,348	1,163	51734	1,155
9	6,7	21,9	0,441	1,159	58690	23,3	0,441	1,164	58201	1,162
10	7,5	21,9	0,553	1,177	65211	23,2	0,555	1,186	64706	1,182
11	8,1	21,9	0,673	1,184	71732	23,2	0,673	1,189	71177	1,186
12	8,9	21,9	0,804	1,188	78253	23,2	0,805	1,195	77648	1,192
13	9,5	21,9	0,957	1,205	84774	23,2	0,959	1,213	84118	1,209
14	10,3	21,9	1,109	1,204	91296	23,2	1,113	1,214	90589	1,209
15	10,8	21,9	1,278	1,209	97817	23,2	1,277	1,213	97060	1,211
16	11,6	21,9	1,458	1,212	104338	23,2	1,458	1,218	103530	1,215
17	12,2	21,9	1,649	1,214	110859	23,2	1,648	1,219	110001	1,217
18	13	22	1,86	1,222	117310	23,2	1,86	1,227	116472	1,225
19	13,8	22	2,075	1,224	123827	23,2	2,076	1,229	122942	1,227
20	14,4	22	2,301	1,225	130344	23,2	2,3	1,229	129413	1,227
21	15,1	22,1	2,557	1,235	136779	23,2	2,552	1,237	135884	1,236
22	15,8	22,1	2,809	1,236	143293	23,3	2,809	1,241	142270	1,239
23	16,6	22,2	3,085	1,243	149716	23,3	3,079	1,245	148736	1,244
24	17,1	22,2	3,336	1,234	156226	23,3	3,332	1,237	155203	1,236
25	17,9	22,3	3,64	1,241	162638	23,4	3,634	1,244	161574	1,243
26	18,7	22,4	3,934	1,241	169042	23,4	3,929	1,243	168037	1,242
27	19,3	22,5	4,266	1,248	175439	23,4	4,258	1,249	174500	1,249
28	20,1	22,5	4,587	1,248	181936	23,5	4,573	1,248	180855	1,248
29	20,7	22,6	4,913	1,246	188321	23,6	4,906	1,249	187203	1,248
30	21,5	22,7	5,256	1,246	194699	23,6	5,245	1,248	193658	1,247
31	22	22,9	5,637	1,253	200949	23,7	5,627	1,254	199995	1,253
32	22,8	23	6,001	1,252	207308	23,8	5,994	1,254	206324	1,253
33	23,4	23,1	6,379	1,252	213659	23,9	6,378	1,255	212645	1,253
34	24,2	23,2	6,771	1,252	220002	24	6,761	1,254	218959	1,253
35	25	23,3	7,202	1,257	226338	24,1	7,19	1,259	225266	1,258
36	25,6	23,4	7,648	1,262	232666	24,2	7,645	1,265	231565	1,264
37	26,4	23,6	8,063	1,261	238845	24,3	8,068	1,265	237856	1,263
38	27	23,7	8,502	1,261	245155	24,4	8,503	1,264	244141	1,262
39	27,7	23,9	8,944	1,260	251308	24,6	8,939	1,262	250270	1,261
40	28,5	24,1	9,446	1,266	257447	24,7	9,441	1,268	256535	1,267
41	29,1	24,2	9,916	1,265	263727	24,9	9,912	1,268	262639	1,267
42	29,9	24,4	10,404	1,266	269840	25,1	10,397	1,268	268728	1,267

Liite 4
19 (19)

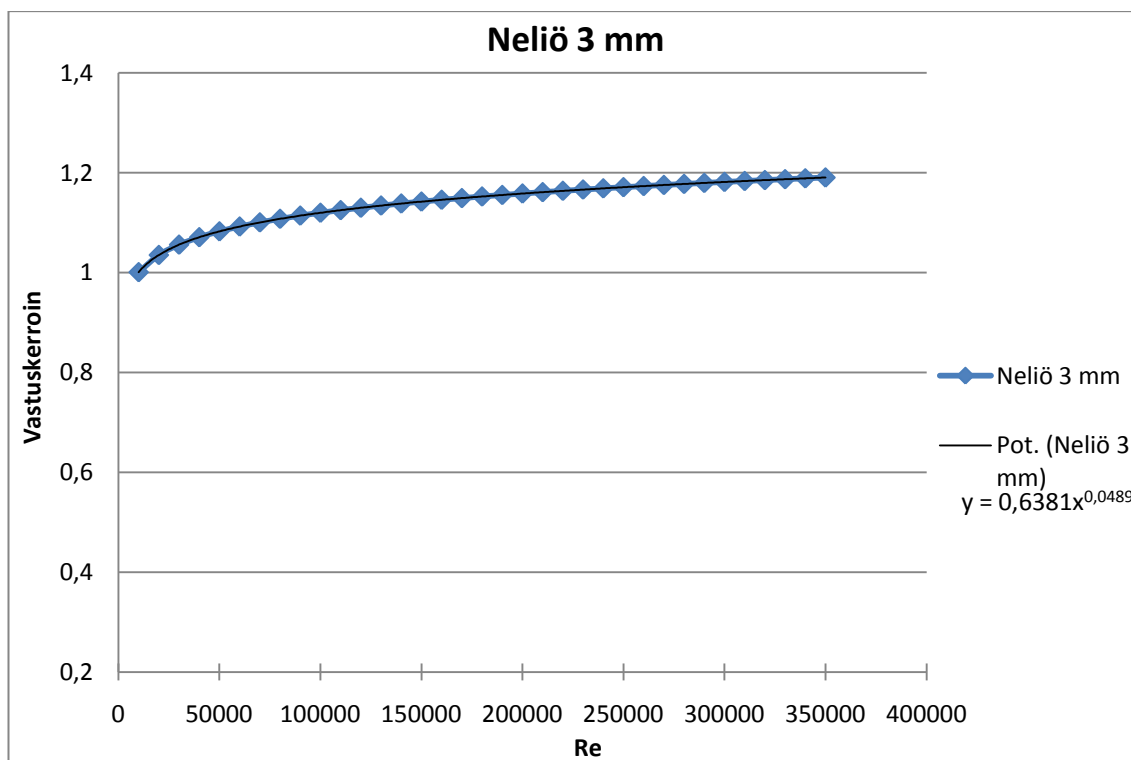
Pöytäkirja 18. Muoto: Ympyrä										
Leveys	Paksuus	Mitt. nro.	Päivä	Klo		Mitt. nro.	Päivä	Klo		
100 mm	3 mm	36	To 14.4.11	12.00		37	To 14.4.11	12.55		KA
v [m/s]	Hz	T [°C]	F [N]	C _v	Re	T [°C]	F [N]	C _v	Re	C _v
0	0	22,7	0	0,000	0	23,8	0	0,000	0	0,000
1	1	22,7	0,003	0,640	6490	23,8	0,004	0,857	6448	0,749
2	1,8	22,7	0,015	0,800	12980	23,8	0,018	0,964	12895	0,882
3	2,4	22,8	0,045	1,067	19458	23,8	0,047	1,119	19343	1,093
4	3,2	22,8	0,084	1,121	25944	23,7	0,086	1,151	25806	1,136
5	4	22,8	0,13	1,110	32430	23,7	0,133	1,139	32257	1,125
6	4,6	22,8	0,188	1,115	38917	23,7	0,19	1,130	38709	1,123
7	5,4	22,8	0,26	1,133	45403	23,7	0,264	1,154	45160	1,143
8	5,9	22,8	0,342	1,141	51889	23,6	0,346	1,157	51642	1,149
9	6,7	22,8	0,435	1,147	58375	23,6	0,439	1,160	58098	1,153
10	7,5	22,8	0,548	1,170	64861	23,6	0,553	1,184	64553	1,177
11	8,1	22,8	0,666	1,175	71347	23,6	0,669	1,184	71008	1,179
12	8,9	22,8	0,795	1,179	77833	23,5	0,8	1,189	77509	1,184
13	9,5	22,8	0,949	1,199	84319	23,5	0,954	1,208	83968	1,203
14	10,3	22,8	1,1	1,198	90805	23,5	1,105	1,206	90428	1,202
15	10,8	22,8	1,268	1,203	97291	23,5	1,269	1,207	96887	1,205
16	11,6	22,8	1,444	1,204	103778	23,5	1,45	1,212	103346	1,208
17	12,2	22,8	1,635	1,208	110264	23,5	1,639	1,214	109805	1,211
18	13	22,8	1,848	1,218	116750	23,5	1,853	1,224	116264	1,221
19	13,8	22,8	2,059	1,218	123236	23,5	2,063	1,223	122723	1,220
20	14,4	22,9	2,287	1,221	129645	23,5	2,289	1,225	129182	1,223
21	15,1	22,9	2,537	1,229	136127	23,6	2,54	1,233	135561	1,231
22	15,8	22,9	2,786	1,229	142609	23,6	2,793	1,235	142016	1,232
23	16,6	23	3,062	1,237	149002	23,6	3,065	1,240	148471	1,238
24	17,1	23	3,315	1,229	155481	23,6	3,315	1,232	154927	1,231
25	17,9	23,1	3,616	1,236	161863	23,7	3,617	1,239	161286	1,238
26	18,7	23,1	3,911	1,236	168337	23,8	3,908	1,238	167638	1,237
27	19,3	23,2	4,234	1,242	174708	23,9	4,238	1,246	173983	1,244
28	20,1	23,2	4,553	1,241	181178	23,9	4,554	1,245	180426	1,243
29	20,7	23,3	4,876	1,240	187537	24	4,877	1,243	186759	1,241
30	21,5	23,4	5,219	1,240	193889	24,1	5,223	1,244	193085	1,242
31	22	23,5	5,601	1,247	200233	24,1	5,598	1,249	199521	1,248
32	22,8	23,6	5,96	1,246	206569	24,2	5,953	1,247	205835	1,246
33	23,4	23,7	6,327	1,244	212898	24,3	6,33	1,247	212142	1,246
34	24,2	23,8	6,723	1,246	219219	24,4	6,722	1,248	218442	1,247
35	25	23,9	7,164	1,253	225533	24,6	7,15	1,254	224601	1,253
36	25,6	24	7,597	1,256	231839	24,8	7,583	1,258	230746	1,257
37	26,4	24,1	8,03	1,258	238138	24,9	8,002	1,257	237015	1,257
38	27	24,3	8,444	1,255	244285	25	8,448	1,258	243278	1,256
39	27,7	24,4	8,897	1,256	250565	25,2	8,88	1,257	249386	1,256
40	28,5	24,5	9,393	1,260	256838	25,4	9,37	1,261	255480	1,261
41	29,1	24,7	9,862	1,261	262949	25,5	9,833	1,260	261713	1,260
42	29,9	24,9	10,335	1,260	269045	25,7	10,314	1,261	267782	1,260

Vastuskertoimien yhdistäminen

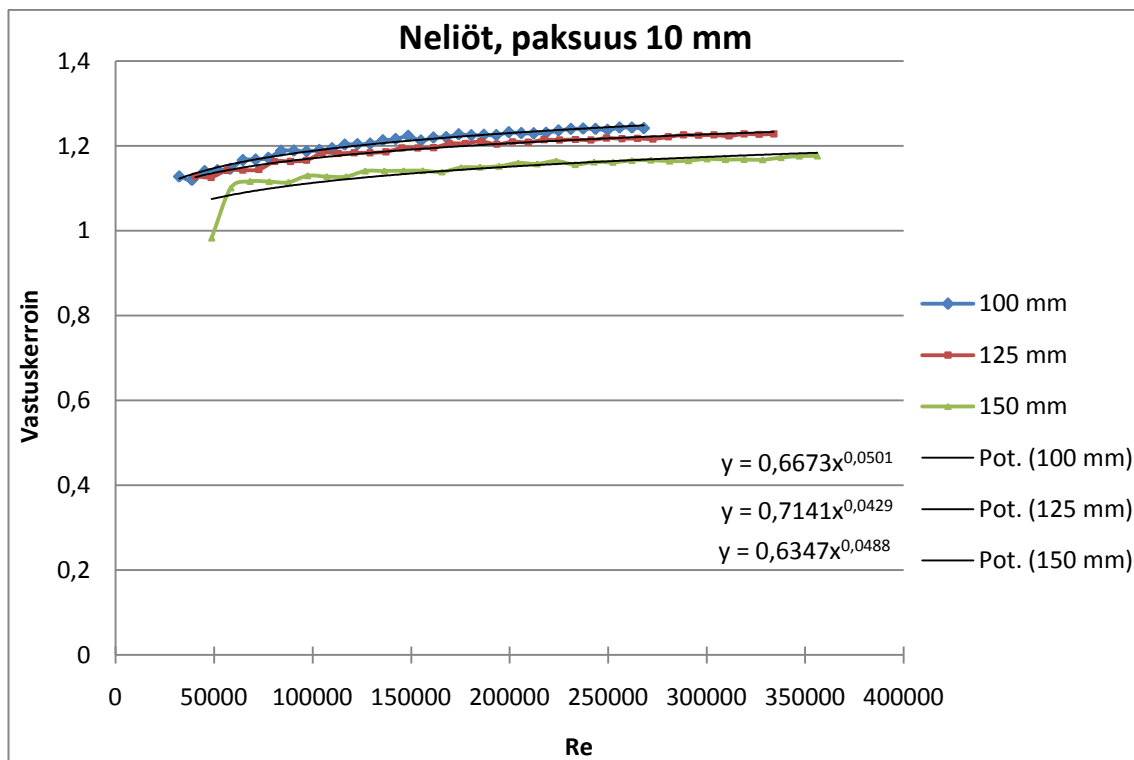
1 (6)



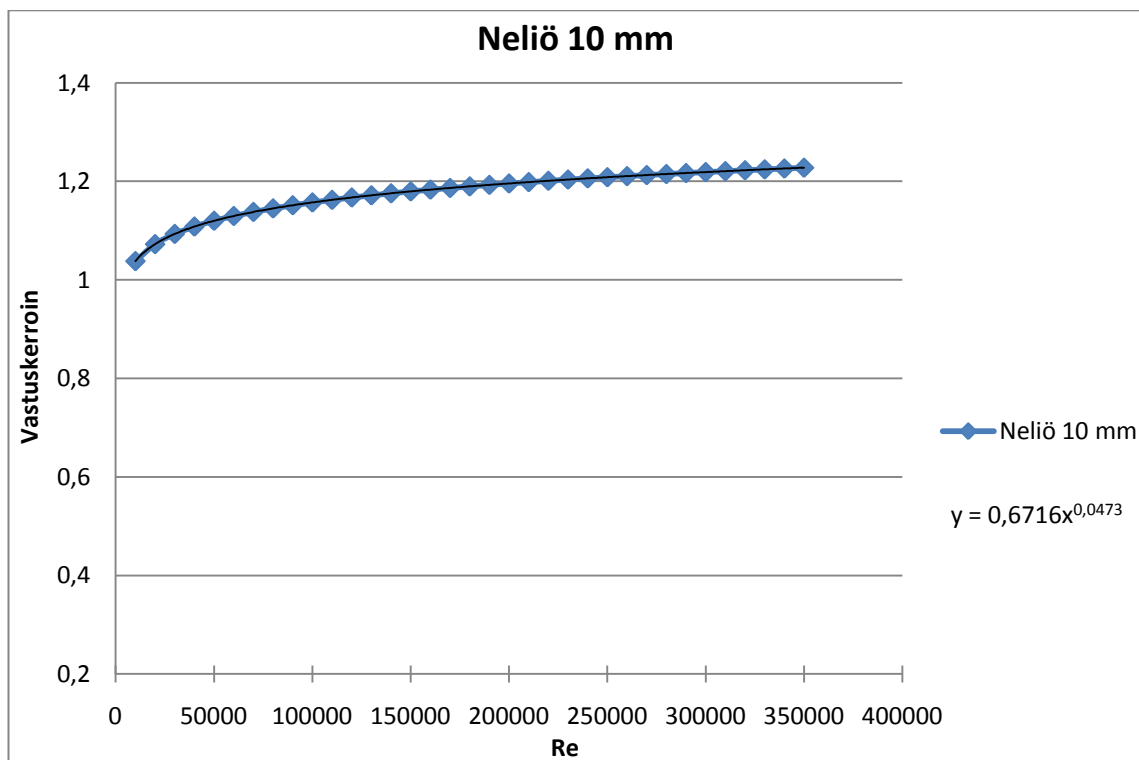
Kuva 1. Trendiviivat, neliö 3 mm.



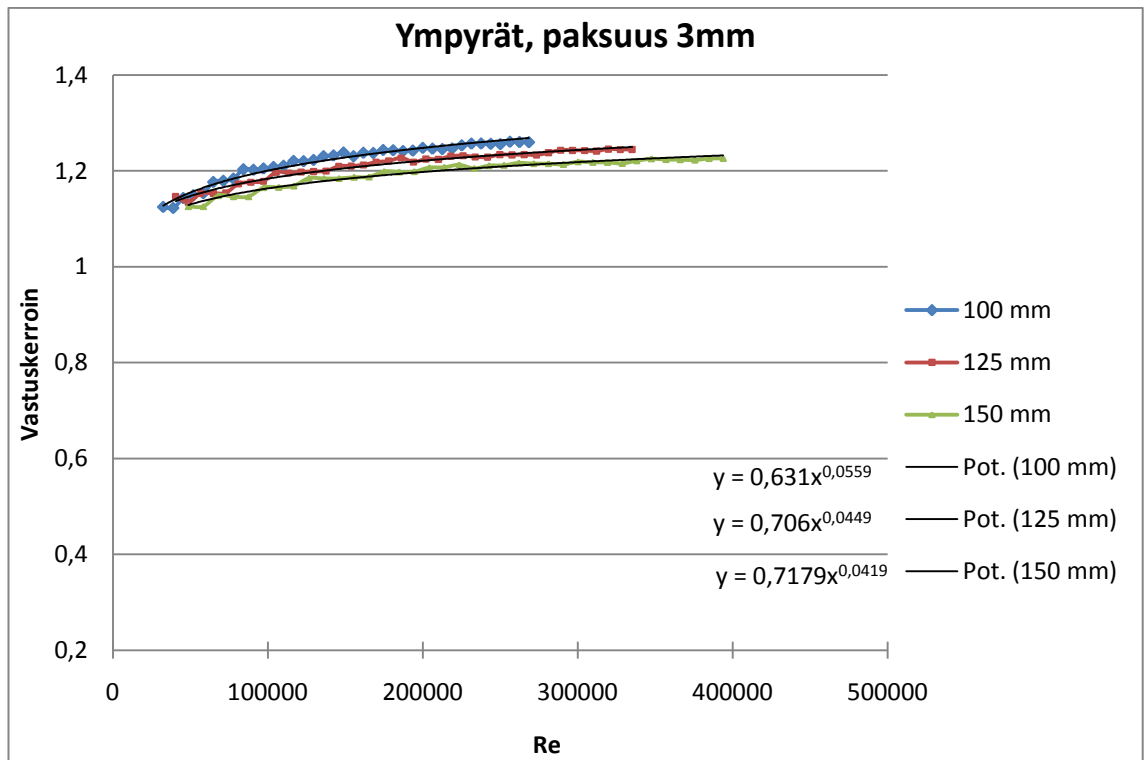
Kuva 2. Trendiviiva, neliö 3 mm.



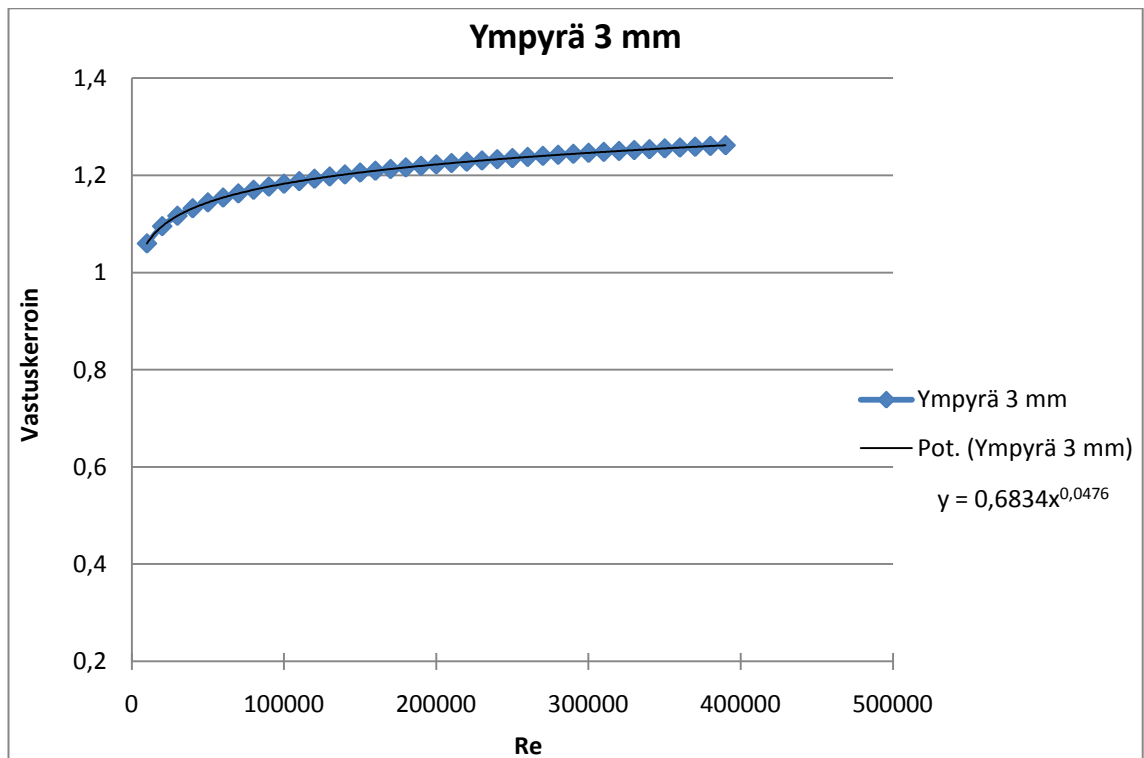
Kuva 3. Trendiviivat, neliö 10 mm.



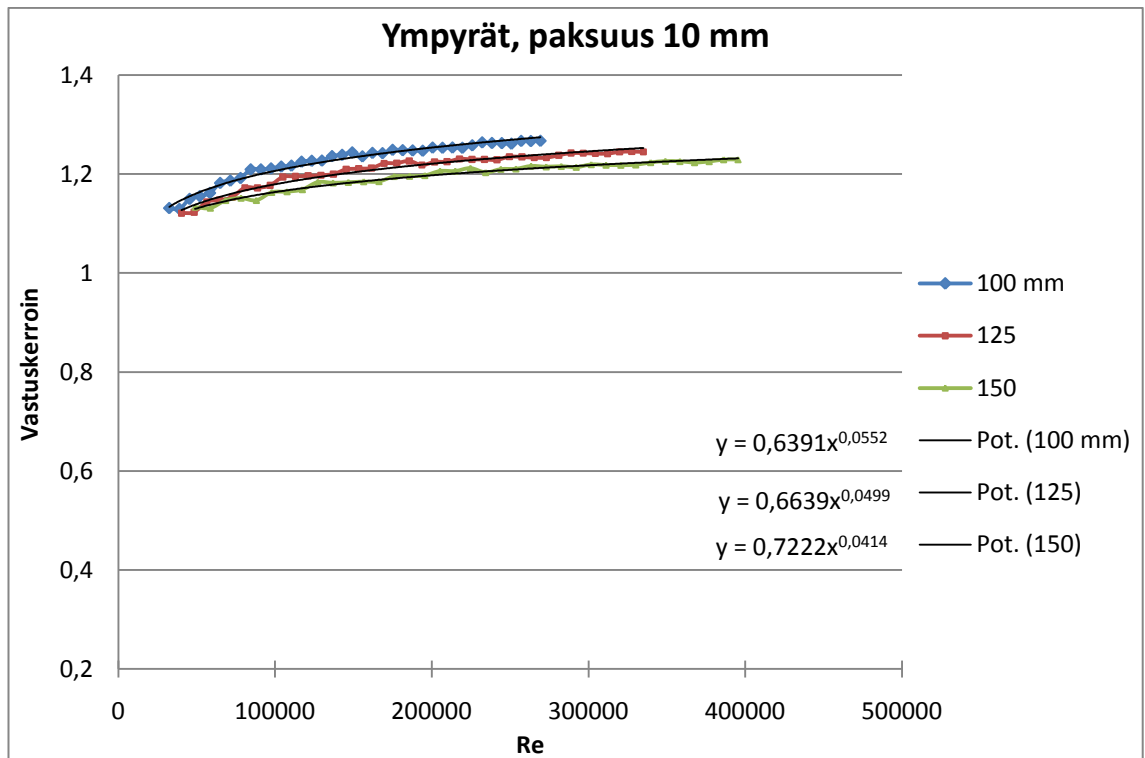
Kuva 4. Trendiviiva, neliö 10 mm.



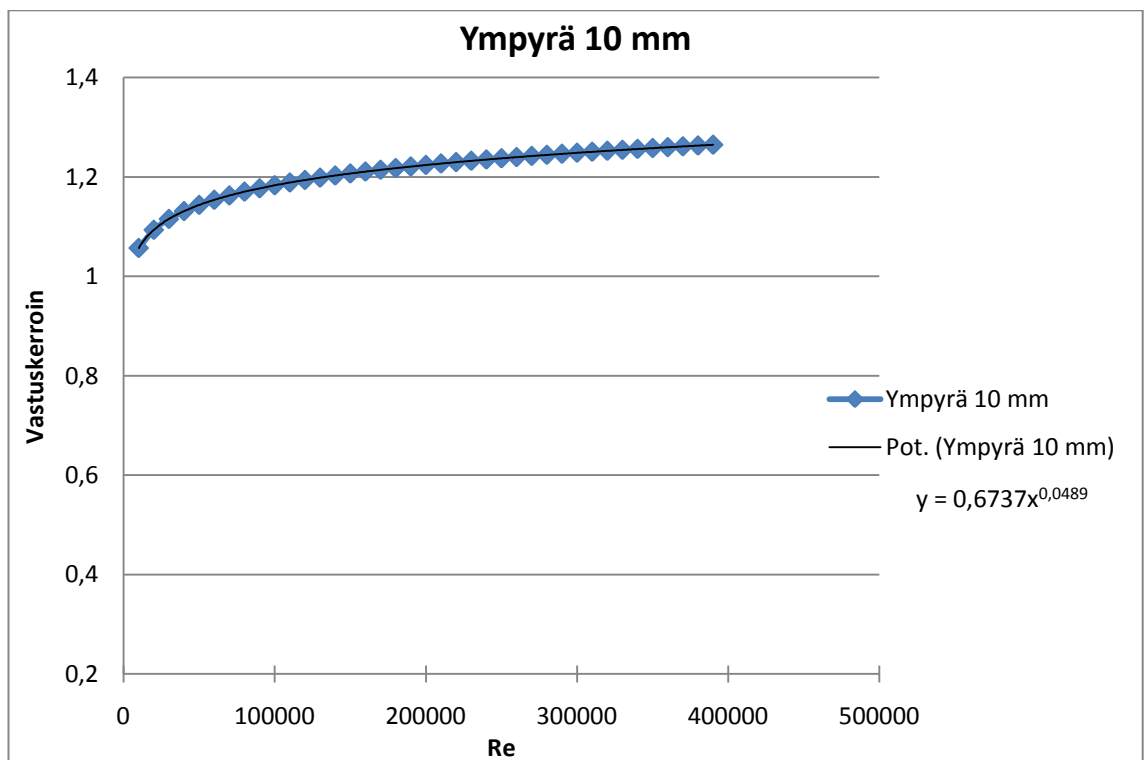
Kuva 5. Trendiviivat, ympyrä 3 mm.



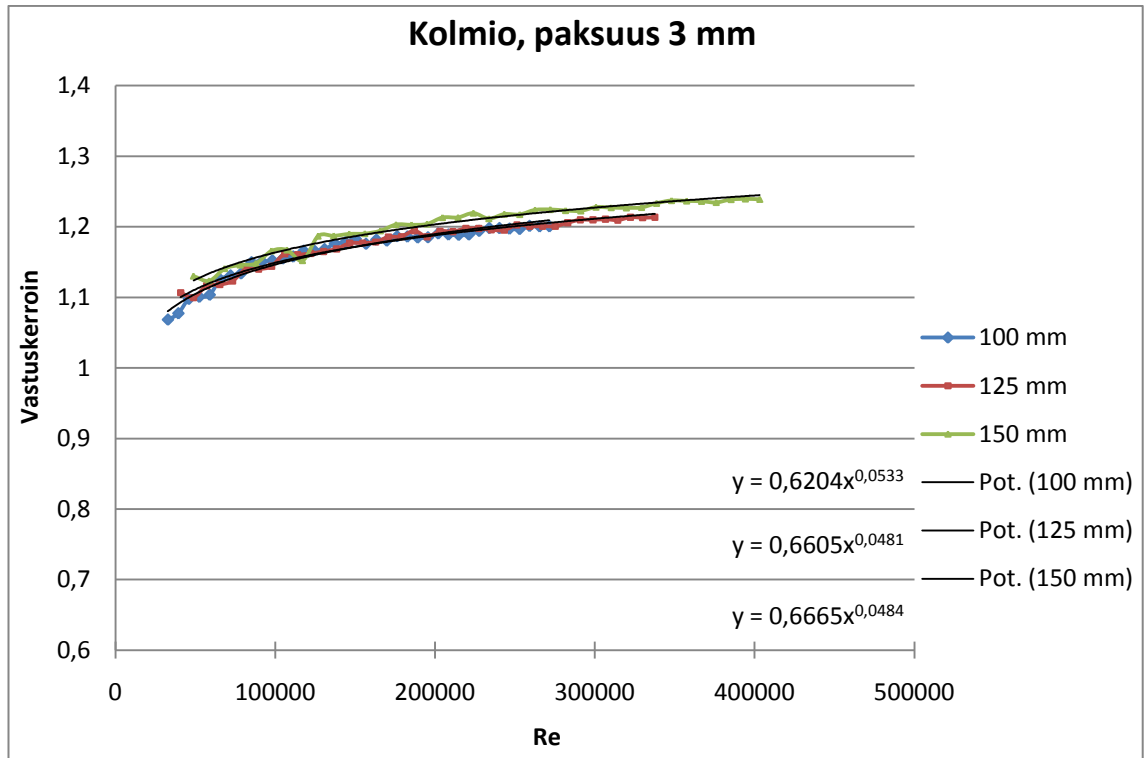
Kuva 6. Trendiviiva, ympyrä 3 mm.



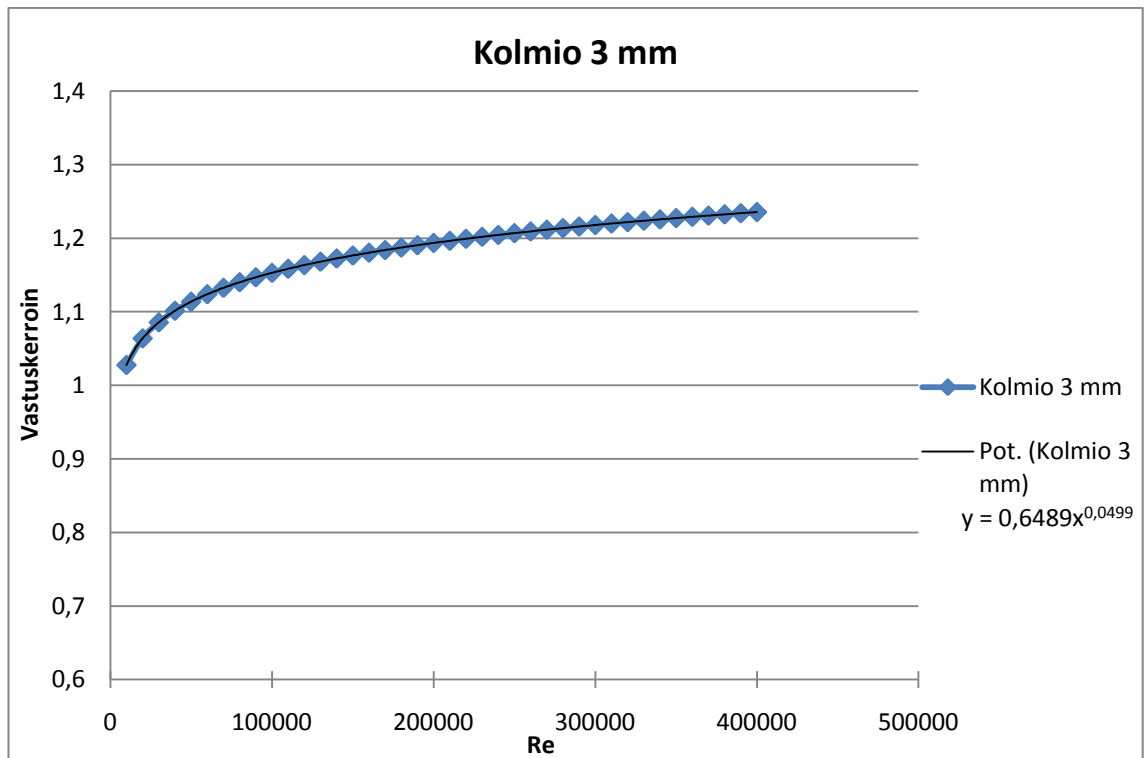
Kuva 7. Trendiviivat, ympyrä 10 mm.



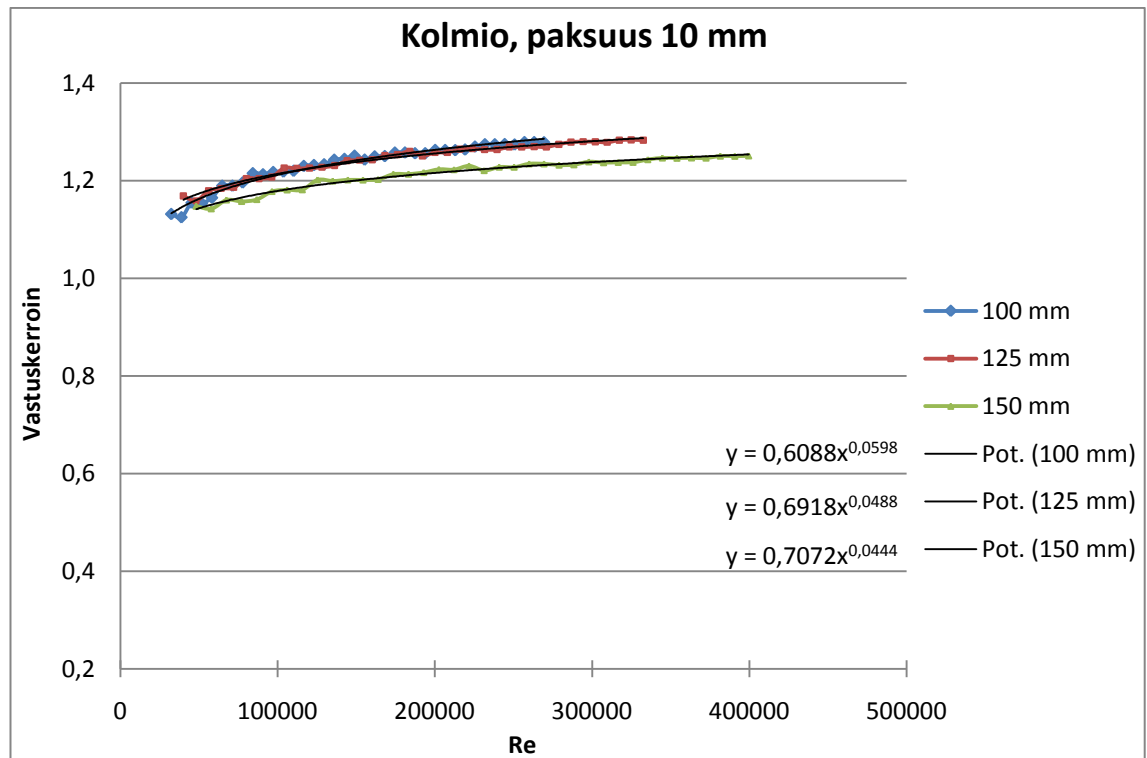
Kuva 8. Trendiviiva, ympyrä 10 mm.



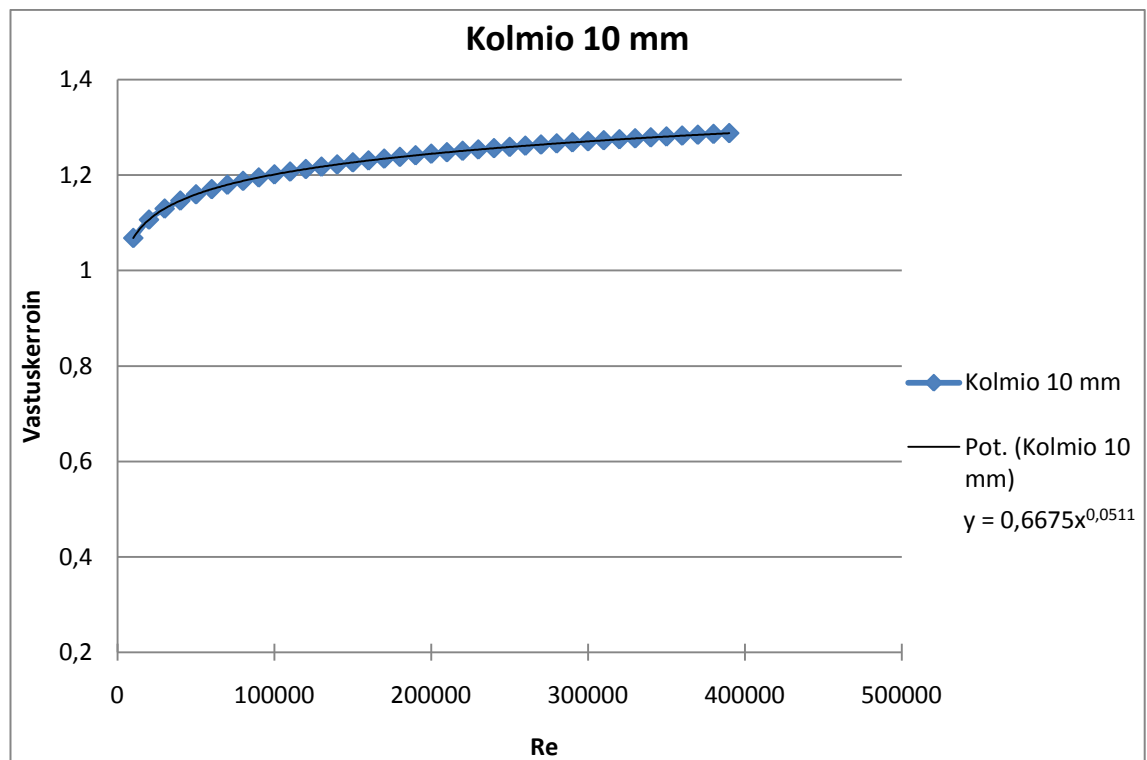
Kuva 9. Trendiviivat, tasasivuinen kolmio 3 mm.



Kuva 10. Trendiviiva, tasasivuinen kolmio 3 mm.



Kuva 11. Trendiviivat, tasasivuinen kolmio 10 mm.



Kuva 12. Trendiviiva, tasasivuinen kolmio 10 mm.