

Puukuitususpension putkivirtauksen virtausprofiilin
symmetrisyys ja sen turbulenttisen alueen
mallintaminen

Pro Gradu -tutkielma



Pasi Karinkanta
Jyväskylän yliopisto,
Fysiikan laitos

11. joulukuuta 2007

Ohjaaja: Markku Kataja

Abstract

Pulsed ultrasonic Doppler velocimetry technique is used for an experimental investigation of pine and birch suspensions flow behaviour in straight PVC-tube of radius 22.45 mm. By using two different ultrasonic transducers 56 averaged velocity profiles with various flow rates were gathered for suspension consistencies within 0.25 %–2.00 %. Pressure loss as a function of flow rate is obtained as well. By comparing velocity profiles gathered by two different transducers at opposite sides of the tube, profiles are identified as symmetrical for both suspensions. Fitting is made for measured velocity profiles and pressure losses using a semiempirical model developed earlier in the ReoMaT project. Fitting of velocity profiles is successful only for the pine suspension flow, although a good correlation of pressure losses are obtained for both. In addition, sound velocity inside the pine suspension and distance between the ultrasonic transducer and tube's inner wall layer were studied.

Esipuhe

Tutkimukseni kokeellinen osuus suoritettiin valtion teknillisen tutkimuskeskuksen (VTT) kanssa yhteistyössä kesällä 2006. Tarvittavat lisämittaukset jatkotutkimusta varten suoritettiin Jyväskylän yliopistossa. Työn analyysi keskittyi yksinomaan tietokoneella tehtävään analyysiin, joka suoritettiin syksyjen 2006 ja 2007 välillä. Kiitokseni työni osalta haluan lausua Jyväskylän VTT:n henkilökunnalle sekä Jyväskylän yliopistolle. Erikoiskiitokset tahdon osoittaa työnohjaajalleni professori Markku Katajalle pitkäjänteisestä uurastuksesta ja loistavasta ohjauksesta.

Tämän työn valmistuminen on eräs koko opintourani suurimmista asioista. En arvostanut peruskoulun tai lukion päättötodistusta, puhumattakaan ylioppilaskirjoitusten suorittamista, läheskään yhtä paljon kuin Pro Gradu -tutkielman valmistumista. Korkeakouluopintoni olivat lähellä kariutua, kun kesällä 2005 jouduin hengenvaaralliseen onnettomuuteen. Päätäväisyyden, tahdon ja tuen avulla jaksoin jatkaa opintojani syksyllä 2005 Jyväskylän yliopistossa tavalliseen tapaan, vaikkakin puolikuntoisena. Toivon pitkän ja raskaan uurastukseni toimivan innoittajana suvussani tuleville jälkipolville, jotka tietävät kykenevänsä korkeakoulututkintoon. Jaksamisesta on iso vastuu myös läheisillä, joille kuuluu täten myös suuri kiitos. Omat kiitokseni tuesta tahdon lausua erityisesti Seija, Markku, Heidi, Kristiina ja Marko Karinkannalle sekä Paula Jalovaaralle.

Pasi Karinkanta

Pasi Karinkanta

Jyväskylässä 11. joulukuuta 2007

Sisältö

1	Johdanto	1
2	Puukuitususpension putkivirtaus	5
2.1	Virtaustyyppialueet	6
2.2	Tulppamaisen virtauksen alue	8
2.3	Turbulenttinen alue	11
3	Mittausmenetelmät	16
3.1	Pulssitettu ultraääni Doppler -menetelmä	17
3.1.1	Kohteen paikan määrittäminen	17
3.1.2	Doppler-siirtymä ja nopeuden määrittäminen	18
3.1.3	DOP2000-mittauslaitteisto	22
3.2	Mänty- ja koivususpension virtausprofiilien sekä painehäviöiden mittaaminen	25
3.2.1	Virtauslinjasto	25
3.2.2	Mittaukset	27
3.3	Pulssitetun ultraääni Doppler -menetelmän muita sovelluksia	28
3.3.1	Puukuitususpension äänen nopeuden mittaus	29
3.3.2	Seinämän paikka ja sen määrittäminen	30
4	Mittaustulokset ja analyysi	33
4.1	Mittaustulokset	34
4.1.1	Äänen nopeus putkivirtauksessa	34

4.1.2	Seinämän paikka DOP2000-laitteiston ultraääniantu- rilla havaittuna	34
4.1.3	Mänty- ja koivususpension putkivirtauksen painehäviöt	37
4.1.4	Mänty- ja koivususpension putkivirtauksen virtauspro- filit	37
4.2	Turbulenttisen alueen putkivirtauksen analyysi	39
4.2.1	Virtausprofiilin ja painehäviön sovitukset	42
4.2.2	Virtausprofiilin tutkimisen rajoitukset	43
4.3	Virtausprofiilin symmetrisyys	47
5	Johtopäätökset	49
	Kirjallisuutta	52
	Liitteet	53
A	Ohjelmien käyttöohje	54
A.1	Pää- ja aliohjelmat	54
A.2	Ohjelmien käyttäminen	56
A.2.1	ReadProf	57
A.2.2	QuadProf	58
A.2.3	ProfAnalysisQ	59
A.2.4	Profiletest	61
A.2.5	WallLayerCor	62
B	Mänty- ja koivususpension virtausprofiilit	63
C	Virtausprofiilin ja painehäviön sovitukset	82

Luku 1

Johdanto

Puukuitususpensiolla tarkoitetaan puukuitujen ja veden seosta. Puukuitususpension putkivirtausta esiintyy arkipäivässä esimerkiksi teollisuuden paperinvalmistusprosesseissa. Puukuitususpensio ei käyttäydy newtonisen nesteen tavoin, vaan se luokitellaan epänewtonisesti käyttäytyviin suspensioihin¹. Erilaisia suspensioita, kuten puukuitususpensiota, mallinnetaan niiden monimutkaisen luonteen vuoksi nojautumalla kokeellisiin tuloksiin. Puukuitususpension putkivirtauksen paremmalla ymmärtämisellä voitaisiin esimerkiksi säästää teollisuuden energiakustannuksissa, jotka aiheutuvat puukuitususpension siirtämisestä putkistoissa.

Newtoniseksi materiaaliksi kutsutaan nestettä tai kaasua, jonka viskositeetti säilyy vakiona vakiolämpötilassa ja -paineessa. Epänewtonisesti käyttäytyvälle materiaalille on luonteenomaista, ettei sen viskositeetti säily vakiona vaan muuttuu muun muassa ajan ja leikkausnopeuden funktiona. Tällaisia materiaaleja ovat esimerkiksi muovit, polymeerit ja erilaiset suspensiot. Epänewtonisille materiaaleille esiintyy kirjallisuudessa useita erilaisia luokitteluita, joista tässä tapauksessa mainittakoon leikkausoheneva ("shear-thinning") ja leikkauspaksuneva ("shear-thickening") käyttäytyminen [2]. Leikkausohenevan materiaalin virtauksessa tapahtuu paikottainen viskositeetin pienenty-

¹Suspensio tarkoittaa heterogeenistä seosta, jossa nesteeseen on sekoittunut kiinteää ainetta niin hienojakoisesti, että seos saostuu hitaasti [1].

minen leikkausnopeuden kasvaessa. Leikkauspaksunevan materiaalin virtauksessa tapahtuu vastaavasti paikottainen viskositeetin kasvu leikkausnopeuden kasvaessa. Erilaiset puukuitususpensiot on pyritty usein luokittelemaan leikkausoheneviin materiaaleihin [3].

G. G. Duffy on käsitellyt kattavasti puukuitususpension käyttäytymistä putkessa ja mallintanut sitä empiirisiin tuloksiin pohjautuen. Duffy esittelee artikkelissaan [4] kaksi virtaustyyppialuetta, joiden esiintyminen riippuu virtaamasta, sakeudesta ja puukuidusta. *Tulppamaisen virtauksen alue* ("plug flow regime"), jossa virtaava seos koostuu lähes kokonaan kuitujen muodostamasta suuresta rykelmästä eli tulpasta, esiintyy vain pienillä virtaamilla. *Seinäpäkitkan vähenemisen alue* ("drag reduction regime"), jolle on tyypillistä vettä pienempi painehäviö, esiintyy heti tulppamaisen virtausalueen jälkeen kun virtaamaa kasvatetaan. Bertel Myreen on artikkelissaan [3] lähestynyt puukuitususpension putkivirtausta fysikaalisemmista lähtökohdista. Myreenin mallinnus pohjautuu vahvasti reologiseen näkemykseen leikkausohenevas-ta kuitutulpasta². Mallintamisessa Myreen on käyttänyt klassista rajakerros-teoriaa tulpan sekä nestemäisen voitelukerroksen välillä. Puukuitususpension putkivirtauksista on tehty myös teollisuuden tarpeisiin useita painehäviö-korrelaatioita, mutta virtausten yksityiskohtaisempi dynamiikka tunnetaan edelleen huonosti. Lisää esitietoa puukuitususpension käyttäytymisestä putkivirtauksissa löytyy G. G. Duffyn artikkelin [4] viitteistä.

Tutkimukseni on osa laajempaa tutkimusta, jonka tarkoituksena on selvittää puukuitususpension putkivirtausten dynamiikkaa. Päämääränä on parantaa puukuitususpension putkivirtausten yleistä hallintaa. Virtausten dynamiikan tuntemisessa on olennaista virtausprofiilin muodon tunteminen ja ymmärtäminen.

²Reologiassa suspensioita käsitellään yksifaasisena materiaalina, jolla on epänewtonisesti käyttäytyvän materiaalin ominaisuudet. Näitä ominaisuuksia, kuten viskositeettia, selvitetään kokeellisesti erilaisilla reologisilla mittauksilla

Puukuitususpension virtausprofiilin tutkiminen voidaan nykyään tehdä entistä tarkemmin ja yksityiskohtaisemmin, käyttäen esimerkiksi pulssitettua ultraääni Doppler -menetelmää (PUDV). Menetelmä perustuu jaksotetusti lähetettäviin lyhyisiin ultraäänipurskeisiin, joiden avulla kerätään tietoa ultraääntä heijastavista kohteista. PUDV-menetelmän soveltamisesta mainittakoon G. Alfonsin, S. Brambillan ja D. Chiuhin suorittama tutkimus [5], jossa tutkittiin veden turbulenttisen alueen virtausprofiilia putkessa sekä Hanjiang Xun ja Cyrus Aidunin tutkimus [6], jossa he tarkastelivat puukuitususpension virtausprofiilia suorakulmaisessa putkessa.

Tutkimustani edeltävässä ReoMaT-projektissa [7] mittaukset suoritettiin optisella laitteistolla ja PUDV-menetelmällä, joiden avulla saatiin paljon tärkeää tietoa puukuitususpension putkivirtauksen luonteesta. Projektissa mallinnettiin sekä virtausprofiilin että painehäviön käyttäytymistä mänty- ja koivususpension putkivirtauksissa. PUDV-menetelmällä kerätyt kokeelliset tulokset synnyttivät kuitenkin lisäkysymyksiä. Virtausprofiilin muoto vaikutti epäsymmetriseltä, eikä seinämän läheisyydessä esiintyvistä virtauksista saatu varmaa tietoa. Tärkeimmäksi kysymykseksi muodostui se, että johtuiko epäsymmetrisyys mittausten menetelmästä vai oliko virtausprofiilin muoto todellakin syystä tai toisesta epäsymmetrinen.

Tässä työssä keskitytään tarkistamaan, onko virtausprofiilin epäsymmetrisyys todellinen ilmiö vai johtuuko havaittu epäsymmetrisyys mittausten menetelmästä, sekä jatkamaan mänty- ja koivususpension putkivirtauksen mallintamista turbulenttisella alueella. Päämääränä on tarkentaa ReoMaT-projektin tuloksia mänty- ja koivususpension putkivirtaukselle. Seuraavassa luvussa esitellään puukuitususpension putkivirtauksen teoriaa ReoMaT-projektin tulosten nojalla. Kolmannessa luvussa käsitellään pulssitettua ultraääni Doppler -menetelmää ja suoritettuja mittauksia. Neljäs luku sisältää tulosten esittelyä ja analysointia, missä mallinnetaan mänty- ja koivususpension turbulenttisen alueen virtausprofiilin muotoa sekä painehäviökäyttäytymistä putkivirtauksessa. Viidennessä luvussa selvitetään epäsymmetrisyyden ongelmaa ja

kuudennessa kootaan johtopäätökset. Lopuksi pohditaan mahdollisia jatkotutkimusten aiheita.

Luku 2

Puukuitususpension putkivirtaus

Puukuitususpension putkivirtaus voidaan luonteensa perusteella jakaa kahteen virtaustyyppialueeseen, joiden esiintyminen riippuu virtaamasta, sakeudesta ja kuitumateriaalista. *Tulppamaisen virtauksen alueelle*, joka esiintyy vain pienillä virtaamilla, on tyypillistä kuitujen muodostaman suuren rykelmän eli kuitutulpan esiintyminen. Kuitutulppa on halkaisijaltaan lähes putken kokoinen. *Turbulenttiselle alueelle*, joka esiintyy heti tulppamaisen virtauksen jälkeen kun virtaamaa kasvatetaan, on tyypillistä turbulenttien pyörteiden läsnäolo virtauksessa. Nämä kaksi aluetta voidaan yhä jakaa yhteensä viiteen dynaamisesti erilaiseen virtaustyyppialueeseen, joiden esiintyminen riippuu myös virtaamasta, sakeudesta ja kuitumateriaalista. Puukuitususpension putkivirtauksen painehäviökäyttäytyminen on huomattavasti erilainen kuin puhtaan veden ja muistuttaakin joiltakin osin leikkausohenevan materiaalin painehäviökäyttäytymistä. Tässä luvussa käsitellään puukuitususpension putkivirtausta ReoMaT-projektin tutkimustulosten mukaan. Aihetta alustetaan esittelemällä puukuitususpension putkivirtauksen virtaustyyppialueet ja painehäviökäyttäytyminen. Esittelyn jälkeen käydään läpi tulppamaisen virtauksen alueen sekä turbulenttisen alueen olennaiset tulokset. Esiteltävä teoria pätee vain täysin kehittyneeseen puukuitususpension

pension putkivirtaukseen, jonka sakeus on yli sedimentaatioarvon¹.

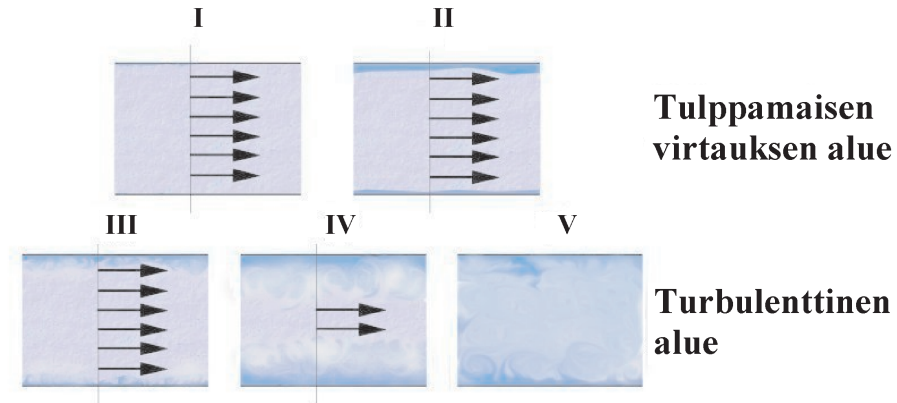
2.1 Virtaustyyppialueet

Puukuitususpension putkivirtaus jaetaan viiteen dynaamisesti erilaiseen virtaustyyppialueeseen (kuva 2.1a), jotka esiintyvät järjestyksessä **I–V** virtaaman kasvaessa. Virtaustyyppialueiden esiintyminen riippuu virtaaman lisäksi puukuitususpension sakeudesta ja käytetystä puukuidusta. Alueet voidaan erotella myös painehäviökäyttäytymisen mukaan (kuva 2.1b).

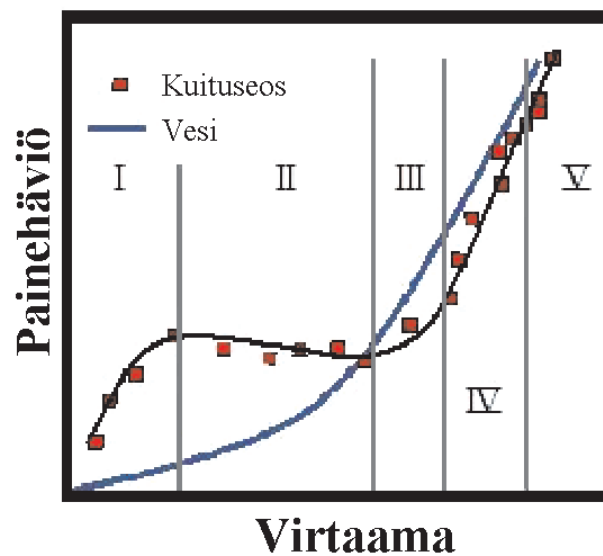
Hyvin pienillä virtaamilla esiintyy ainoastaan puhtaan veden virtaamista huokoisen kuitumateriaalin lomitse. Alueessa **I** virtausprofiilin muoto koostuu kauttaaltaan vakionopeudella etenevästä tulpasta. Painehäviö on kyseisessä alueessa suurempi kuin puhtaalla vedellä. Alueessa **II** voitelukerros eli täysin kuiduton vesikerros alkaa muodostua seinämän ja kuitutulpan väliin, minkä saavat aikaan seinämän lähettyvillä vaikuttavat inertiavoimat. Tälle alueelle on tyypillistä painehäviön paikallinen vakioituminen tai jopa vähentyminen virtaaman funktiona (kuva 2.1), tosin vähentymistä ei välttämättä esiinny silminnähävästi pienillä sakeuksilla (kuva 2.2). Virtaaman kasvaessa siirtyään alueeseen **III**, jossa voitelukerroksen paksuus seinämän ja tulpan välillä pienenee ja seinämän lähettyville alkaa kehittyä veden turbulenttista pyörteilyä. Seinämän läheisyydessä esiintyvä turbulenttinen pyörteily saa kuitutulppaan heikoiten sidotut kuituflokkit eli pienet kuiturykelmät tarttumaan pyörteilyn mukaan. Alueessa **IV** turbulenttiset pyörteet alkavat tunkeutua kuitutulppaan hajottaen sen yhä ohuemmaksi kunnes lopulta, alueessa **V**, virtausprofiili on verrattavissa veden turbulenttiseen virtausprofiiliin. Alueiden **IV** ja **V** välillä tapahtuu painehäviön kuvaajassa muutos lineaarisesti kasvavasta lähes neliöllisesti kasvavaksi virtaaman funktiona (kuva 2.1b) [7].

¹Suspensioissa esiintyvä kiinteä faasi on jakautunut tasaisesti nesteeseen, kun sen sakeus on yli sedimentaatioarvon

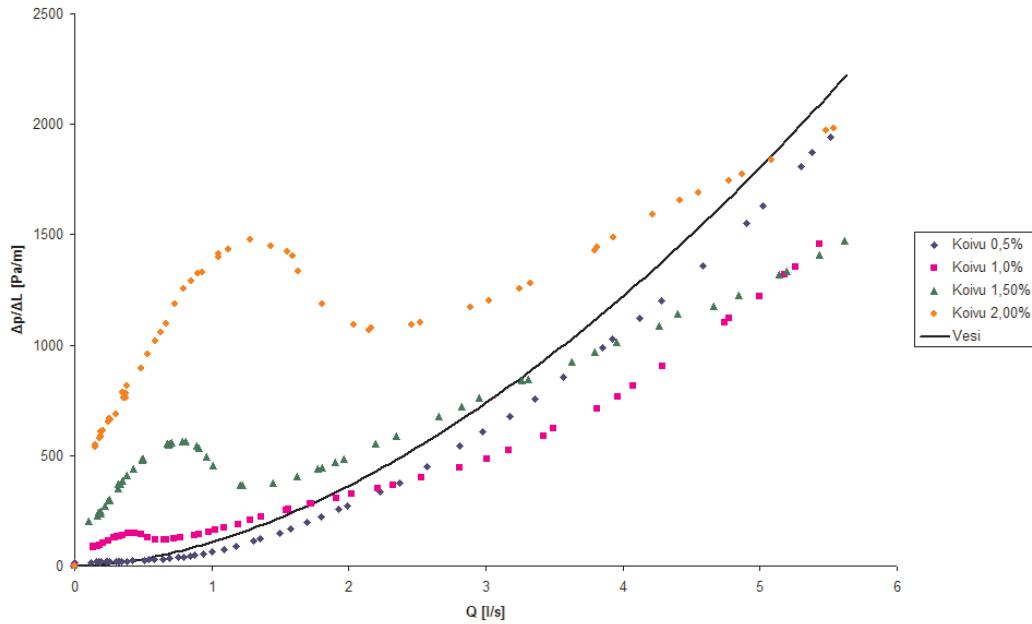
a)



b)



Kuva 2.1: Kuvassa (a) on havaintokuva virtaustyyppialueista. **I** Tulppamainen virtaustyyppialue, jossa kuidut ovat suorassa kosketuksessa seinämään. **II** Tulppamainen virtaustyyppialue voitelukerroksella. **III** Kuitutulpan alue, jossa seinämän läheisyydessä esiintyy puhtaasti nesteen turbulenssia. **IV** Tulppamaisen ja turbulenttisen virtaustyyppialueen yhdistelmä. **V** Täysin turbulenttinen virtaustyyppialue. Kuvassa (b) on havaintokuva painehäviöstä virtaaman funktiona; siinä on eroteltuna virtaustyyppialueiden **I-V** painehäviökäyttäytyminen.



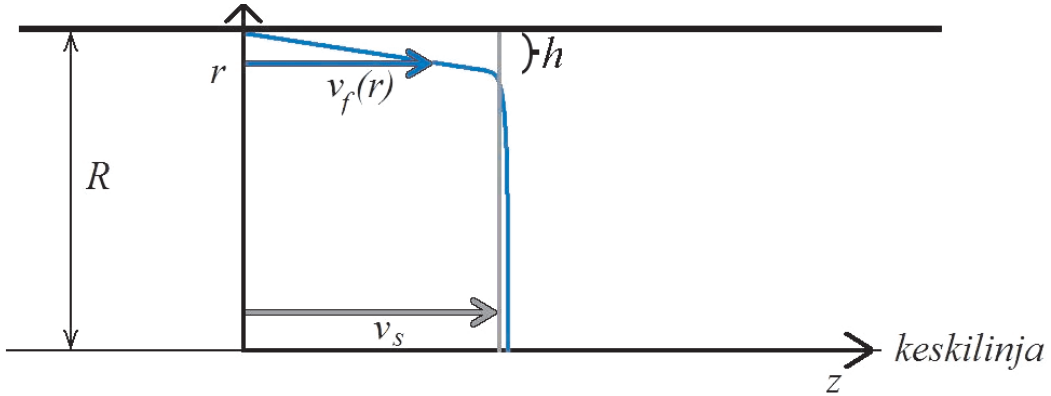
Kuva 2.2: Koivususpension putkivirtauksen painehäviö virtaaman funktiona neljälle eri sakeudelle PVC-putkessa (sisähalkaisija = 44,9 mm). Yhtenäinen viiva edustaa puhtaan veden painehäviötä.

2.2 Tulppamaisen virtauksen alue

Tulppamaisen virtauksen alueen mallinnus perustuu puhtaan veden virtaukseen voitelukerroksessa ja kahden faasin jatkumomalliin kuitutulpan alueella. Veden virtausnopeus voitelukerroksessa on likimain lineaarinen,

$$v_f(y) \cong \frac{\tau_w}{\mu} y, \quad (2.1)$$

missä μ on veden dynaaminen viskositeetti, $y = R - r \ll R$ ja $\tau_w = -\frac{R}{2} \frac{\partial}{\partial z} \tilde{p}_f$ on veden leikkausjännitys putken seinämällä ja \tilde{p}_f nesteen paine. Yhtälöä (2.1) voidaan soveltaa vain voitelukerroksen esiintyessä (virtaustyyppialueet II–V). Voitelukerrosta rajoittavat putken seinämä $y = 0$ sekä tulpan ja voitelukerroksen rajakerros $y = h$, missä h on voitelukerroksen paksuus seinämästä. [7.]



Kuva 2.3: Havaintokuva kuitutulpan (harmaa) ja kantajanesteen (sininen) virtausprofiileista putkessa. Profiilien tunnistamisen vuoksi kuvassa on liioiteltu voitelukerroksen paksuutta h ja nopeuksien $v_f(r)$ ja v_s välistä eroa, kun etäisyys seinämästä on suurempi kuin voitelukerroksen paksuus h .

Kuitutulpan alueella esiintyy kuitutulpan kiinteä faasi, joka etenee vakionopeudella v_s , sekä kantajanesteen nestefaasi, joka etenee nopeudella $v_f(r)$ (kuva 2.3). Nestefaasin virtausprofiili on symmetrinen keskilinjan suhteen, ja sen virtausnopeus riippuu paikan r kohtisuorasta etäisyydestä keskilinjaan. Kuitutulpan ja kantajanesteen välillä tiedetään olevan vuorovaikutus, joka vaikuttaa molempiin samansuuruisilla mutta erimerkkisillä voimilla. Näiden faasien liikeyhtälöt voidaan kirjoittaa erikseen, ottaen huomioon toistensa vuorovaikutus

$$\begin{cases} \nabla \cdot \bar{\sigma}_f - D\hat{e}_z - L\hat{e}_r = 0 \\ \nabla \cdot \bar{\sigma}_s + D\hat{e}_z + L\hat{e}_r = 0, \end{cases} \quad (2.2)$$

missä $\bar{\sigma}_f$ ja $\bar{\sigma}_s$ ovat kantajanesteen ja kuitutulpan jännitystensorit. D on pitkittäinen jännitysvoima ja L poikittainen nostovoima. Liikeyhtälöistä voidaan ratkaista kuitutulpan ja kantajanesteen virtausnopeudet. Kuitutulpan virtausnopeus on

$$v_s = \frac{1}{\mu} \sqrt{\frac{k}{\phi}} \left[\left(1 - \frac{h}{R}\right) \tau_w - \tau_s \right] - \frac{2\phi k}{\mu R} \tau_w + v_0, \quad (2.3)$$

missä k , ϕ ja τ_s ovat kuitutulpan permeabiliteetti, huokoisuus ja pinnan leikkausjännitys. $v_0 = \frac{\tau_w}{\mu}h$ on veden virtausnopeus voitelukerroksen ja tulpan rajakerroksessa yhtälön (2.1) mukaisesti. Kantajanesteen virtausnopeus on vastaavasti

$$v_f(r) = \frac{1}{\mu} \sqrt{\frac{k}{\phi}} \left[\left(1 - \frac{h}{R}\right) \tau_w - \tau_s \right] \left[1 - \exp\left(-\frac{y_t}{\sqrt{\phi k}}\right) \right] + v_0, \quad (2.4)$$

missä $y_t = (R - h) - r$ eli etäisyys tulpan pinnasta. Kuitutulpan pinnan leikkausjännitys ja voitelukerroksen paksuuden oletetaan noudattavan seuraavia yhtälöitä

$$\begin{cases} \tau_s = \max(0, C_s(P_{s0} - P_L)) \\ h = \max(0, \Gamma(P_L - P_{s0})), \end{cases} \quad (2.5)$$

missä C_s on kitkakerroin seinämän ja tulpan välillä sekä P_{s0} rakenteellinen jännitys tulpan keskellä. Yhtälössä (2.5) esiintyvä nostovoima P_L määritellään $P_L = \frac{1}{2}\rho_f v_s^2 C_L Re_s^{\beta-2}$, missä ρ_f on veden tiheys; C_L nostovoimakerroin; β positiivinen vakio sekä $Re_s = v_s \sqrt{k}/\nu$ on puukuitususpension Reynoldsin luku. Symbolilla ν merkitään kantajanesteen kinemaattista viskositeettia. [7.]

Tulppamaisen virtauksen painehäviö voidaan laskea seinämästä aiheutuvan leikkausjännityksen avulla, joka saadaan ratkaistua yhtälöistä (2.3) ja (2.4). Leikkausjännitykset tulppamaisen alueen virtaukselle kuitutulpan seinämäkosketuksella τ_{w0} (virtaustyyppialue **I**) ja voitelukerroksen esiintyessä τ_{w1} (virtaustyyppialue **II**) ovat seuraavat:

$$\begin{cases} \tau_{w0} = \left(1 - \frac{2}{R}\phi\sqrt{\phi k}\right)^{-1} C_s P_{s0} \\ \tau_{w1} = \left(1 - \frac{2}{R}\phi\sqrt{\phi k}\right)^{-1} \left(\frac{2P_{s0}}{C_L \rho \frac{\nu^2}{k}}\right)^{1/\beta} \sqrt{\phi} \rho \frac{\nu^2}{k}. \end{cases} \quad (2.6)$$

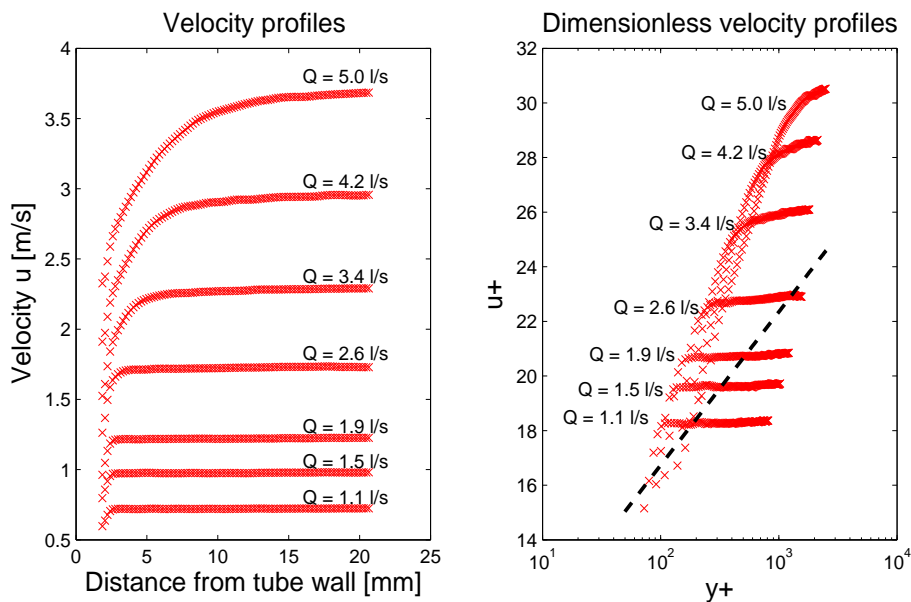
Tulppamaisen alueen virtaama voidaan lausua seuraavasti

$$\begin{cases} Q = 2\pi R \frac{\phi k}{\mu} [\tau_s - (1 - \phi)\tau_w] + \pi R^2 v_s + \frac{\pi R}{\mu} \tau_w h^2. \\ Q^+ = 2\pi R^+ \phi k^+ [\tau_s^+ - (1 - \phi)] + \pi R^{+2} v_s^+ + \pi R^+ h^{+2}, \end{cases} \quad (2.7)$$

missä $\tau_s^+ = \frac{\tau_s}{\tau_w}$, $R^+ = \frac{Ru^*}{\nu}$, $h^+ = \frac{hu^*}{\nu}$, $k^+ = k \left(\frac{u^*}{\nu}\right)^2$, $v_s^+ = \frac{v_s}{u^*}$ ja $u^* = \left(\frac{\tau_w}{\rho_f}\right)^{\frac{1}{2}}$ eli niin sanottu kitkanopeus. Yhtälön (2.7) oikealla puolen esiintyvissä termeissä suuret $\frac{\phi k}{\mu}$ ja h ovat yleensä suuruusluokaltaan todella pieniä. Tällöin yhtälön (2.7) toinen termi on hallitsevin tulppamaisen virtauksen alueella, luukuunottamatta tilannetta jossa kuitutulppa lähtee juuri liikkumaan. Yhtälö voidaan tällöin yksinkertaistaa käytännöllisempään muotoon [7.]

$$\begin{cases} Q \cong \pi R^2 v_s. \\ Q^+ \cong \pi R^{+2} v_s^+. \end{cases} \quad (2.8)$$

2.3 Turbulenttinen alue



Kuva 2.4: Kuvassa vasemmalla on esitetty sakeudeltaan 0,75-prosenttisen mätysuspension putkivirtauksen (PVC-putki, $R = 22,45$ mm) turbulenttisen alueen virtausprofiilit seinämältä keskilinjalle usealle eri virtaamalle. Kuvassa oikealla on esitetty vasemmalla esiintyvä kuvaaja dimensiottomilla muuttujilla ja logaritmisella y^+ -akselilla. Mustalla katkoviivalla on esitetty veden turbulenttisen alueen newtoninen virtausprofiili.

Turbulenttinen alue sisältää virtaustyyppialueet **III**, **IV** ja **V** (kuva 2.1a). Alueen mallinnus pohjautuu kokeellisiin tutkimustuloksiin, jotka on kerätty pulssitetulla ultraääni Doppler -menetelmällä. Turbulenttisen alueen parametrisaatio on käytännöllistä tehdä dimensiottomalle nopeudelle u^+ ja etäisyydelle putken seinämästä y^+ :

$$\begin{cases} u^+ = \frac{u}{u^*} \\ y^+ = \frac{yu^*}{\nu} \end{cases} \quad (2.9)$$

Kuvassa 2.4 on nähtävissä 0,75 % mäntysuspension virtausprofiilit seinämltä keskilinjalle sekä dimensiollisilla että dimensiottomilla muuttujilla. Turbulenttiselle alueelle pätee semiempiirisesti mallinnettu approksimaatio dimensiottomalle virtausnopeudelle

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(y^+) + B + \Delta u^+, \quad (2.10)$$

missä

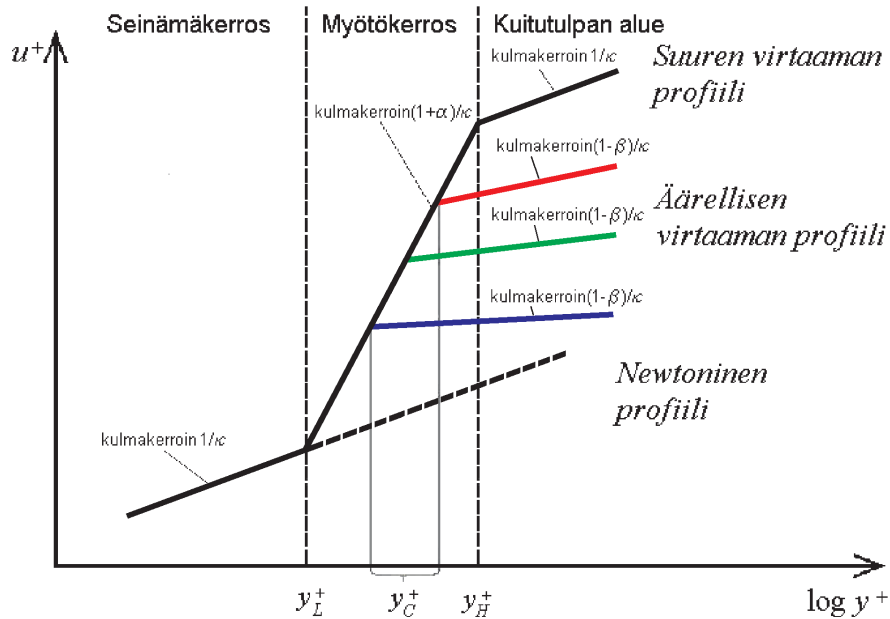
$$\Delta u^+ = \begin{cases} 0 & ; 0 < y^+ \leq y_L^+ \\ \frac{\alpha}{\kappa} \ln\left(\frac{y^+}{y_L^+}\right) & ; y_L^+ < y^+ \leq y_C^+ \\ \frac{\alpha}{\kappa} \ln\left(\frac{y_C^+}{y_L^+}\right) - \frac{\beta}{\kappa} \ln\left(\frac{y^+}{y_C^+}\right) & ; y_C^+ < y^+ \leq R^+ \end{cases}$$

Parametrit y_L^+ , y_H^+ ja α ovat vakioita aina tietylle sakeudelle, $B = 0,41$ ja $\kappa = 5,5$. Muuttujat β ja y_C^+ voidaan edelleen parametrisoida seuraavasti:

$$\begin{cases} y_C^+ = \min(y_H^+, (u^*/u_C^*)^2) \\ \beta = 1 - (y_C^+/y_H^+)^2, \end{cases} \quad (2.11)$$

missä $u_C^* = \sqrt{\frac{\nu\kappa\Gamma_C}{1+\alpha}}$ ja $\Gamma_C = \frac{du}{dy}|_{y=y_C} = \text{vakio}$. Parametrit α , y_L^+ , y_H^+ ja u_C^* ovat niin sanottuja vapaita parametrejä, jotka voidaan ratkaista sovittamalla yhtälön (2.10) mukainen teoreettinen virtausprofiili mitattuun. [7.]

Kuvassa 2.5 hahmoteltu turbulenttisen alueen virtausprofiili on jaettu kolmeen alueeseen: seinämä- ja myötökerrokseen sekä kuitutulpan alueeseen. Seinämäkerroksessa, eli kun $y^+ \leq y_L^+$, puukuitususpension virtausprofiili on



Kuva 2.5: Hahmotelma puukuitususpension putkivirtauksen turbulentsin alueen dimensiottomasta virtausprofiilista logaritmisella y^+ -akselilla. Yhtenäinen viiva edustaa puukuitususpension virtausprofiilia ja katkoviiva veden turbulentsin alueen newtonista virtausprofiilia.

yhtenevä puhtaan veden newtonisen virtausprofiilin kanssa. Myötökerroksessa, eli kun $y_L^+ < y^+ \leq y_C^+$, virtausnopeus kasvaa hyvin nopeasti ja virtausprofiilin muoto poikkeaa newtonisesta profiilista suuremmalla kulmakertoimen arvolla. Parametri y_C^+ voi saada arvoja väliltä $y_L^+ - y_H^+$ virtaamasta riippuen. Mitä suurempi on virtaama, sitä suuremman arvon y_C^+ saa. Kun $y_C^+ < y_H^+$ esiintyy kuitutulpan alueella kiinteä yhtenäinen tulppa, jonka kulmakerroin on ReoMaT-projektin mittausten perusteella $\frac{(1-\beta)}{\kappa}$. Tavallisesti kuitutulpan alueella on ajateltu olevan kuvan 2.3 mukainen virtausprofiili, jossa tulppa etenee vakionopeudella v_s . Tämä kummallinen havainto on itseasiassa tärkein motivaatio tälle työlle. Rajalla $y_C^+ = y_H^+$ ei y_C^+ :n arvo enää kasva. Tällöin kuitutulpan alueen virtausprofiilin muoto vastaa puhtaan veden turbulentsin alueen virtausprofiilin muotoa, mikä kuvastaa yhtenäisen kuitutulpan hajoamista kokonaan turbulentsiseksi pyörteilyksi. Kuitutulpan hajoaminen

tapahtuu välittömästi, kun sen halkaisija menee pienemmäksi kuin käytetyn kuidun pituus. [7.]

Puhtaassa nesteessä turbulenttiset pyörteet ovat tehokkaita kuljettamaan liikemäärää putken keskeltä seinämälle, jossa sitä kulutetaan tehokkaasti seinämän leikkausjännitystä vastaan tehtävään työhön. Myötökerroksessa oleva kuidukko rajoittaa turbulenttisten pyörteiden kasvua ja estää samalla liikemäärän siirtymisen virtausprofiilin keskustasta seinämälle. Myötökerroksen olemassaolo on siis syyllinen vettä suurempaan virtaamaan kiinnitetyllä seinämäkitkan arvolla turbulenttisella alueella. [7.]

Turbulenttisen alueen virtaamalle pätee yhtälö

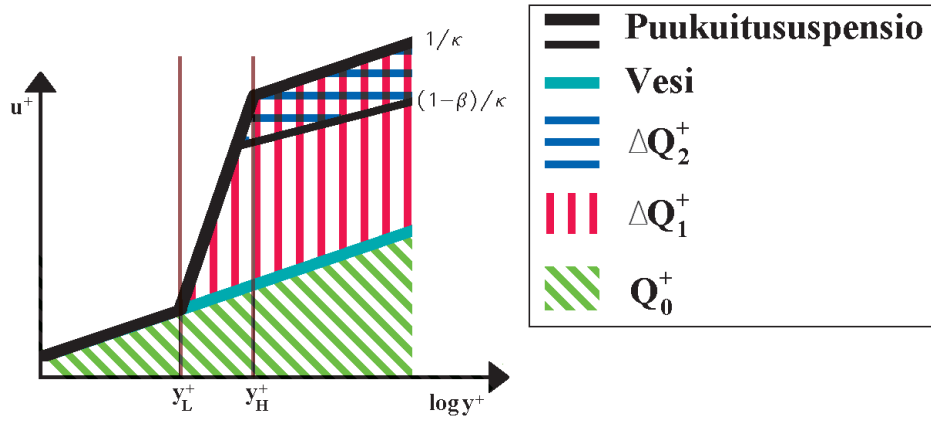
$$Q^+ = Q_0^+ + \Delta Q_1^+ + \Delta Q_2^+, \quad (2.12)$$

missä,

$$\begin{cases} Q_0^+ = \pi R^{+2} \frac{1}{\kappa} [\ln R^+ + B\kappa - \frac{3}{2}] \\ \Delta Q_1^+ = \pi R^{+2} \frac{\alpha}{\kappa} \left[\ln\left(\frac{y_C^+}{y_L^+}\right) + \frac{1}{2} \left(\left(\frac{y_C^+}{R^+}\right)^2 - \left(\frac{y_L^+}{R^+}\right)^2 \right) - 2 \left(\frac{y_C^+}{R^+} - \frac{y_L^+}{R^+} \right) \right] \\ \Delta Q_2^+ = \pi R^{+2} \frac{\beta}{\kappa} \left[\ln\left(\frac{y_C^+}{R^+}\right) + \frac{1}{2} \left(\frac{y_C^+}{R^+} - 3 \right) \left(\frac{y_C^+}{R^+} - 1 \right) \right]. \end{cases}$$

Kuvassa 2.6 on havainnollistettu dimensiottoman virtausprofiilin alueita, joista integroimalla saadaan yhtälössä (2.12) esitetyt virtaamat Q_0^+ , ΔQ_1^+ ja ΔQ_2^+ . Ensimmäinen termi Q_0^+ antaa veden newtonisen profiilin virtaaman. Toinen termi ΔQ_1^+ lisää kuvassa 2.6 peitetyn alueen osuuden kokonaisvirtaamaan, johon sisältyy myötökerros ja kuitutulpan alueella sijaitseva suuren virtaaman profiili (kuva 2.5). Kolmas termi ΔQ_2^+ vähentää kokonaisvirtaamasta suuren ja äärellisen virtaaman profiilien väliin jäävän alueen (kuva 2.6), joka sisältyy termiin ΔQ_1^+ . Jos kyseessä suuren virtaaman profiili, niin $\Delta Q_2^+ = 0$. Dimensiollinen virtaama voidaan lausua dimensiottoman avulla seuraavasti

$$Q = \frac{\nu^2}{u^*} Q^+. \quad (2.13)$$



Kuva 2.6: Havaintokuva puukuitususpension dimensiottomasta virtausprofiilista puolilogaritmisella asteikolla. Kuvassa on eroteltu alueet, joilla on osuutensa virtaamiin Q_0^+ , ΔQ_1^+ ja ΔQ_2^+ .

Jos virtausta tarkastellaan korkean leikkausjännityksen rajalla ja halkaisijaltaan suuressa putkessa on tällöin $y_C^+ = y_H^+$, josta yhtälön (2.11) mukaan saadaan $\beta = 0$. Voidaan myös olettaa, että $R^+ \gg y_L^+, y_H^+$ jolloin yhtälö (2.12) yksinkertaistuu muotoon:

$$Q^+ \cong Q_0^+ + \Delta Q_\infty^+, \quad (2.14)$$

missä $Q_\infty^+ = \lambda_1 R^+ + \lambda_2 R^{+2}$. Suureet λ_1 ja λ_2 voidaan lausua aikaisemmin määriteltyjen suureiden avulla [7.]

$$\begin{cases} \lambda_1 = 2\pi \frac{\alpha}{\kappa} (y_H^+ - y_L^+) \\ \lambda_2 = \pi \frac{\alpha}{\kappa} \ln(y_H^+/y_L^+). \end{cases} \quad (2.15)$$

Luku 3

Mittausmenetelmät

Tutkimuksessa käytettiin virtausprofiilin tutkimiseen pulssitettua ultraääni Doppler -menetelmää (PUDV). PUDV-menetelmä mahdollistaa sellaisten materiaalien virtausprofiilien tutkimisen, joissa esiintyy ultraääntä heijastavia rajapintoja. Nesteessä ultraääni voi heijastua tai sirota erilaisten kiinteiden ja kaasumaisten rajapintojen yhteydessä kuten puukuidun tai ilman [8, 9]. PUDV-menetelmässä lähetetään jaksotetusti ultraäänisykäyksiä, joiden avulla voidaan kerätä tietoa esimerkiksi puukuitususpension virtausprofiilista. Matthias Messer on esitellyt opinnäytetyössään hyvin kattavasti PUDV-menetelmän ja siihen perustuvan DOP2000-mittauslaitteiston [9].

Virtausprofiilin tutkimista varten rakennettiin virtauslinjasto. Linjastoon yhdistettiin mittauslaitteet, joilla voitiin mitata painehäviö, virtausprofiili ja virtaama. Mittaukset suoritettiin mänty- ja koivususpension putkivirtauksille useilla eri sakeuksilla väliltä 0,25 %–2,00 %. Jokaiselle sakeudelle kerättiin kahdella eri anturilla 56 keskiarvoistettua virtausprofiilia virtaaman arvoilla väliltä 0,15 l/s–5,60 l/s. Kunkin virtausprofiilin keskiarvoistamiseen käytettiin 3000 mitattua virtausprofiilia.

Luvun loppuosassa käsitellään PUDV-menetelmän muita sovelluksia, joissa tarkistettiin puukuitususpension äänen nopeus ja määritettiin virtauslinjastossa käytetyn PVC-putken lähiseinämän paikka.

3.1 Pulssitettu ultraääni Doppler -menetelmä

Pulssitettu ultraääni Doppler -menetelmä (PUDV) perustuu ultraäänen heijastumisominaisuuksiin. Menetelmää soveltamalla voidaan havaita ultraäänä heijastavien rajapintojen paikkamuutokset ja laskea niistä virtausprofiili. PUDV-menetelmässä ei mitata varsinaisen taajuuden muutosta vaan pulssitaajuuden Doppler-siirtymää [9, 10]. Mittauslaitteiston lähettimeltä lähetetään tutkittavaan kohteeseen jaksotetusti yksittäisiä ultraäänipurskeita. Vastaanottimella tarkastellaan kohteesta heijastunutta ultraäänen tehoa [11] ajan funktiona eli kaikuprofilina¹. Peräkkäisten purskeiden kaikuprofiileille tehdään ristikorrelaatioita, joiden avulla lasketaan tutkittavien kohteiden nopeus.

3.1.1 Kohteen paikan määrittäminen

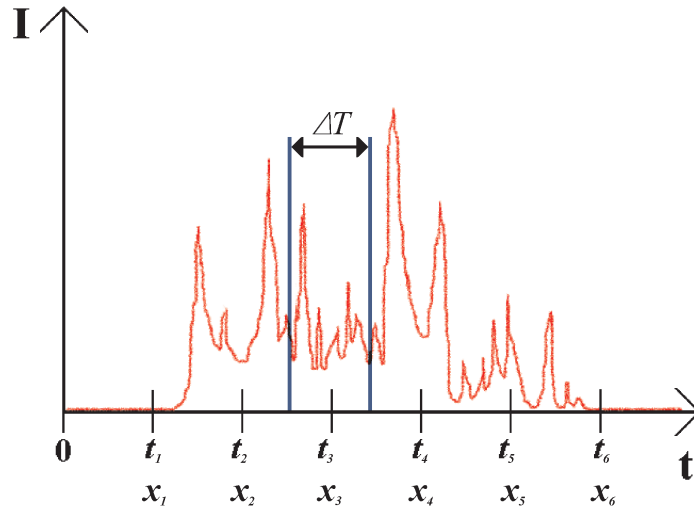
Yksittäisellä ultraäänipurskeella on tavallisesti useampia kohteita, joista heijastuneet kaikusignaalit havaitaan jatkuvana kaikuprofilina. Kaikuprofilin aika-akseli on jaettu aikaväleihin t_n , joista määritetään kohteen paikka

$$x_n = \frac{Ct_n}{2}. \quad (3.1)$$

Jokaiselle mittauspisteelle x_n on rajattu oma mittausikkuna, jonka rajojen sisältä mitattu nopeus sijoitetaan kyseisen paikan pisteeseen (kuva 3.1). Mittausikkunan ajallinen leveys ΔT määräytyy purskeen pituudesta². Mittauspisteet tuottavat ongelmia seinämien lähettyvillä, koska laitteisto käyttää aina samaa algoritmia niiden määrittämiseen eikä huomioi seinämän olemassaoloa. Pahimmassa tapauksessa tämä aiheuttaa sen, että mitatussa virtausprofiilissa esiintyy virtausnopeuksia seinämän sisällä. Toisaalta, anturinpuoleisen seinämän läheisyydessä esiintyvää virtausprofiilia ei muutoinkaan

¹Mittauksissa käytetyn DOP2000-mittauslaitteiston profiileissa esitetään kaikuprofiili heijastuneen ultraäänen intensiteetti kohteen paikan funktiona. Koska muutos $t_n \leftrightarrow x_n$ ei vaikuta kuin vaak-akselin skaalaukseen, käytetään tämän työn puitteissa käsitettä "kaikuprofiili" molemmissa merkityksissä.

²Käytetyssä laitteistossa mittausikkunan leveyden ΔT alarajana on 1,2 μs [12].



Kuva 3.1: Havaintokuva ultraäänikaiun intensiteetistä ajan funktiona (punainen käyrä). Kuvassa havainnollistetaan aikavälejä t_n ja mittauspisteitä x_n , missä $n = 1, 2, 3, 4, 5, 6$. Jokaiselle mittauspisteelle on määritelty ristikorrelaatiota varten ΔT :n levyinen mittausikkuna, joka esiintyy kuvassa mittauspisteen x_3 kohdalla.

saada mitatuksi putken seinämästä aiheutuvien häiriökaikujen vuoksi (kuva 3.10). Seinämän läheisyydessä esiintyvän mittauspisteen ongelmaa on tutkittu DOP1000-laitteistolle [13]. Tutkimuksessa on kehitetty matemaattinen korjaus etuseinämän lähetyvillä oleville paikoille, jotka tuottavat virtausnopeuksia seinämän sisälle. Liitteenä olevalla CD-levyllä on MATLAB-ohjelma, joka on tehty tutkimuksen [13] tulosten mukaan. Ohjelma siirtää virtaukseen sellaiset mittauspisteet, jotka aiheuttavat virtausnopeuksia seinämän sisälle. Liitteessä A on ohjelman käyttöohje.

3.1.2 Doppler-siirtymä ja nopeuden määrittäminen

Tarkastellaan ultraäänen vastaanotettua kaikuprofiilia kahdelle peräkkäiselle purskeelle (kuva 3.2) Tarkasteltavassa tapauksessa käytetään samaa ultraäänianturia jaksottaisten purskeiden lähettämiseen ja vastaanottamiseen.

Saatujen purskeiden kaiusta ikkunoidaan ΔT :n levyinen osa jokaisen mitauspisteen ympäriltä. Mittausikkunoiden sisäänjääville kaikuprofileille tehdään ikkunoittain ristikorrelaatio eri purskeiden välillä. Näin saadaan tietoon heijastavien kappaleiden nopeudesta aiheutuva aikamuutos Δt purskeiden kaikuprofilien välille. Kuvassa 3.3 on havainnollistettu ikkunointia ja aikamuutoksen määrittämistä mittauspistelle x_i . Kuvasta 3.2 on nähtävissä, kuinka anturin vastaanottama kaikuprofiili muuttuu ajallisesti kahden purskeen välillä, kun kappale etenee nopeudella v matkan Δs . Kappaleen paikkamuutokselle pätee tällöin

$$\Delta s = v(T_{PRF} + \Delta t/2) \approx vT_{PRF}, \quad (3.2)$$

joka havaitaan vastaanottimella aikasiirtymänä

$$\Delta t = 2\frac{\Delta s}{C}. \quad (3.3)$$

Ensimmäisen ja toisen purskeen välinen ajallinen etäisyys ultraäänipurskeita lähetettäessä on T_{PRF} (kuva 3.2). Kun anturin vastaanottaa ensimmäisen ja toisen ultraäänipurskeen kaikusignaaleja, niiden ajallinen etäisyys toisiinsa on (kuva 3.2)

$$T_r = T_{PRF} + \Delta t \stackrel{(3.3)}{=} T_{PRF} + 2\frac{\Delta s}{C} \stackrel{(3.2)}{=} T_{PRF} \left(1 + \frac{2v}{C}\right). \quad (3.4)$$

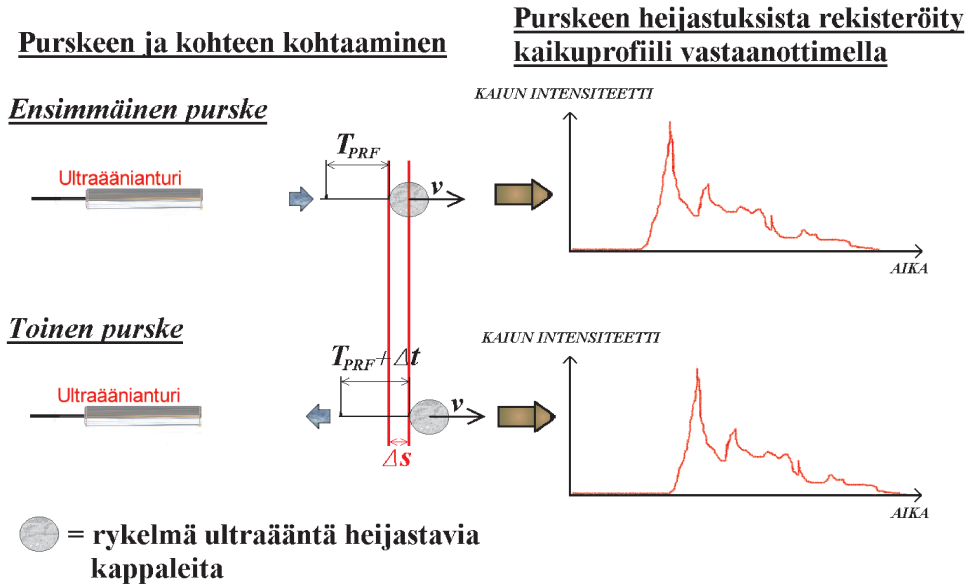
Lähetettyjen purskeiden ja vastaanotettujen kaikusignaalien välillä on tapahtunut jaksotuksen taajuuden muutos, jota kutsutaan Doppler-taajuudeksi.

$$f_d^{PRF} = f_e^{PRF} - f_r^{PRF} \stackrel{(3.4)}{=} f_e^{PRF} \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{2v}{C}}\right), \quad (3.5)$$

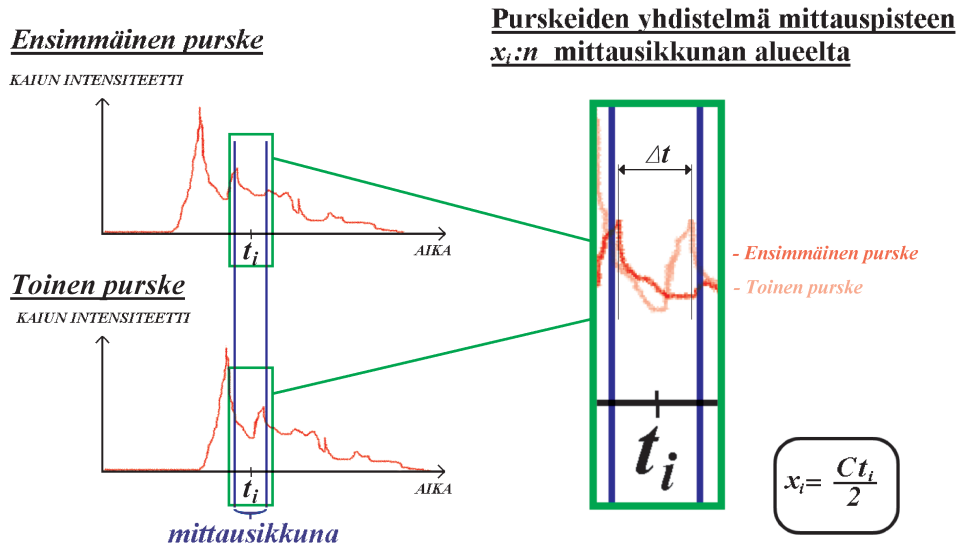
missä $f_e^{PRF} = \frac{1}{T_{PRF}}$ ja $f_r^{PRF} = \frac{1}{T_r}$. Yhtälöstä (3.5) voidaan ratkaista nopeus

$$v = \frac{f_d^{PRF}}{\frac{2}{C}(f_e^{PRF} - f_d^{PRF})} \approx \frac{C f_d^{PRF}}{2 f_e^{PRF}}. \quad (3.6)$$

Yhtälössä (3.1) tehty approksimaatio pätee aina kun $v \ll C$, jolloin $T_{PRF} \gg \Delta t$. Myös yhtälön (3.6) approksimaatio on pätevä kun $v \ll C$, koska tällöin



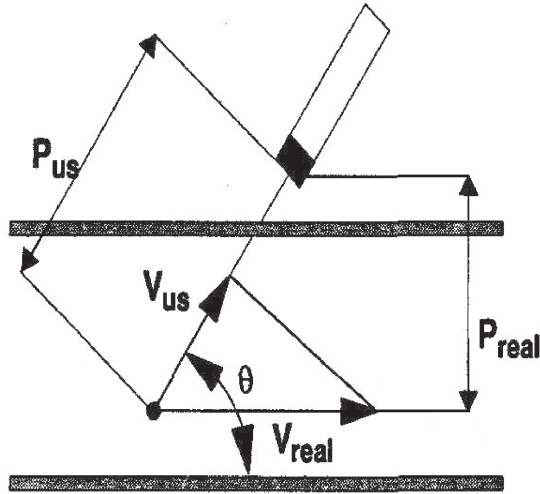
Kuva 3.2: Kuva havainnollistaa kahden peräkkäisen purskeen aiheuttamaa kaikuprofiilia vastaanottimella. Kahden purskeen välillä kohde etenee matkan Δs , joka vastaa aikavälin Δt lisäystä purskeiden välimatkaan. Kuvassa on esitetty vain kaksi pursketta ilmiön havainnollistamisen vuoksi.



Kuva 3.3: Havaintokuva vastaanotetun kaikuprofiilin ikkunoinnista ja aikamuutoksen Δt määrittämisestä mittauspisteen x_i ikkunasta.

yhtälössä (3.5) esiintyvä taajuus f_d^{PRF} on todella pieni verrattuna taajuuteen f_e^{PRF} .

Todellisuudessa on kuitenkin niin, ettei kappaleen paikkaa yleensä voida mitata nopeuden kanssa samansuuntaisesti, kuten kuvassa 3.2 on esitetty, vaan se mitataan tavallisesti kuvassa 3.4 esitetyllä tavalla. Kun huomioidaan



Kuva 3.4: Havaintokuva todellisesta mittausasetelmasta, jossa anturilla mitataan kohteen paikkaa ja nopeutta kulmasta Θ . Kuvassa P_{real} tarkoittaa todellista etäisyyttä, P_{us} ultraäänianturilla mitattua etäisyyttä, V_{real} hiukkasen todellista nopeutta, V_{us} ultraäänianturilla mitattua nopeutta ja Θ anturin ja putken seinämän välistä kulmaa eli Doppler-kulmaa [12].

Doppler-kulman Θ vaikutus, saadaan kohteen paikalle [12]

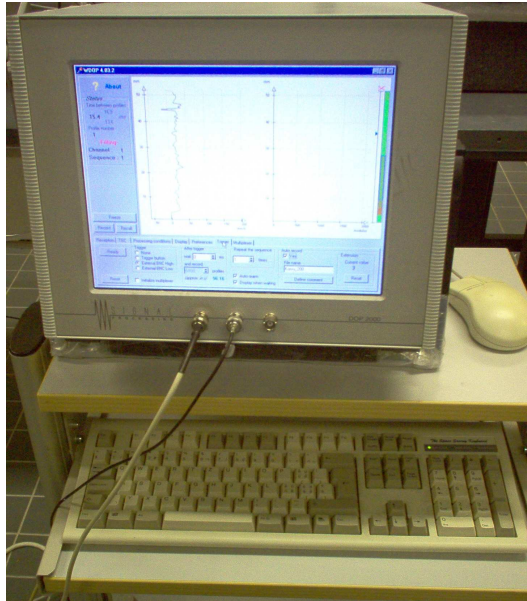
$$x_{tod} = x_n \sin \Theta. \quad (3.7)$$

Nopeudelle saadaan seuraava lauseke huomiomalla Doppler-kulman vaikutus yhtälössä (3.6):

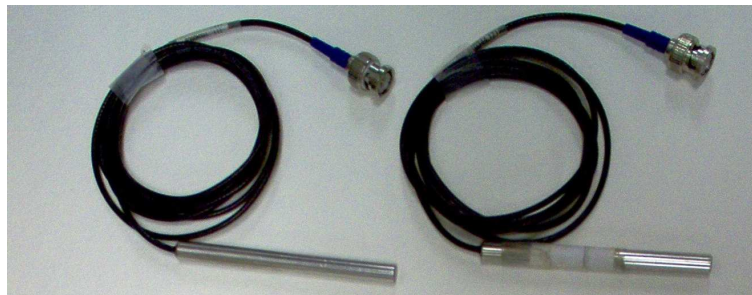
$$v_{tod} = \frac{v}{\cos \Theta} = \frac{C f_d^{PRF}}{2 f_e^{PRF} \cos \Theta}. \quad (3.8)$$

3.1.3 DOP2000-mittauslaitteisto

Mittauksissa käytettiin kuvassa 3.5 esitettyä DOP2000-laitteistoa, joka perustuu PUDV-tekniikkaan. Laitteiston ohjelmistoa käsiteltiin hiiren ja näppäimistön avulla.



Kuva 3.5: Mittauksissa käytetty DOP2000-laitteisto.



Kuva 3.6: DOP2000-laitteiston 4 MHz:n ultraäänianturit.

Laitteistoon kuului lisäksi erilliset ultraäänianturit (kuva 3.6), jotka toimivat 4 MHz:n taajuisten ultraäänipurskeiden lähettäjinä ja kaikusignaalien vastaanottajina. Ohjelmistoon sisältyi useita erilaisia muunneltavia parametrejä, joista seuraavaksi mittauksen kannalta olennaisimmat.

Äänen nopeus:	Äänen nopeus v_d , jonka avulla laitteisto laskee kohteen paikan muutokset.
Profilimäärä:	Lukumäärä kertoo, kuinka monta haluttua nopeus-, kaiku-, Doppler-energian tai näistä kahden eri suureen yhdistelmäprofiilia tallennetaan yhteen tiedostoon. Doppler-energian profilissa esiintyy vain liikkuvien ja vahvasti ultraääntä heijastavien kohteiden kaikuprofiili [13].
Purskeen toistotaajuus:	Kuinka monta pursketta lähetetään sekunnissa, f_{PRF} .
Purskeiden lähetysten välinen aikaväli:	$T_{PRF} = \frac{1}{f_{PRF}}$.
Anturin emittointitaajuus:	Anturilta lähtevän ultraäänipurskeen taajuus, f_e . Anturikohtainen, mutta säädettävä myös manuaalisesti koneelta.
Tehokkuustaso:	Purskeen teho, jolle on kolme voimakkuustasoa: matala, keskitaso ja korkea.
Purskeen pituus:	Määrää kuinka monta aallonpituuden moninkertaa purskeen pituus on. Kolme mahdollista pituuskerrointa: 2, 4 ja 8.
Resoluutio:	Mittauspisteiden tiheys purskeen etenemissuunnassa.

Anturin herkkyystaso:	Kaikusignaalin vahvistusherkyys, jolla on olemassa viisi eri tasoa: erittäin heikko, heikko, keskitaso, voimakas ja erittäin voimakas. Erittäin heikko taso vahvistaa ainoastaan vahvimmat kaiut ja erittäin voimakas taso vahvistaa heikoimmatkin kaiut.
TGC:	Vahvistustasoprofiili, jota muuttamalla voidaan heikentää tai vahvistaa vastaanotettua kaikusignaalia. Vahvistusta voidaan muuttaa myös paikallisesti.
Porttien lukumäärä:	Mittausporttien lukumäärä profiilia kohden.
Emissiota per profiili:	Kuinka useasta vastaanotetusta purskeesta yhteen profiiliin tulevat arvot koostetaan.
Nopeuden skaalauskerroin:	Nopeusakselin skaalaus. Kolme mahdollista skaalauskerrointa: 1, 2 tai 4. Parantaa resoluutiota pienentämällä nopeusakselia. 1 näyttää koko nopeusakselin, 2 jakaa nopeusakselin puoleen ja 4 neljäsosaan alkuperäisestä.
Doppler-kulma:	Anturin ja putken välinen kulma, joka on asetettava manuaalisesti. Voidaan vaihtoehtoisesti kytkeä myös pois päältä.

Tässä luvussa esiintyvät yhtälöt pätevät DOP2000-laitteistolle, kun huomioidaan että $C = v_d$. Laitteistolla on olemassa tietty raja luotaussyvyydelle ja

kohteen nopeudelle. Nämä ovat toisistaan riippuvaisia ja määritelty seuraavasti [12]:

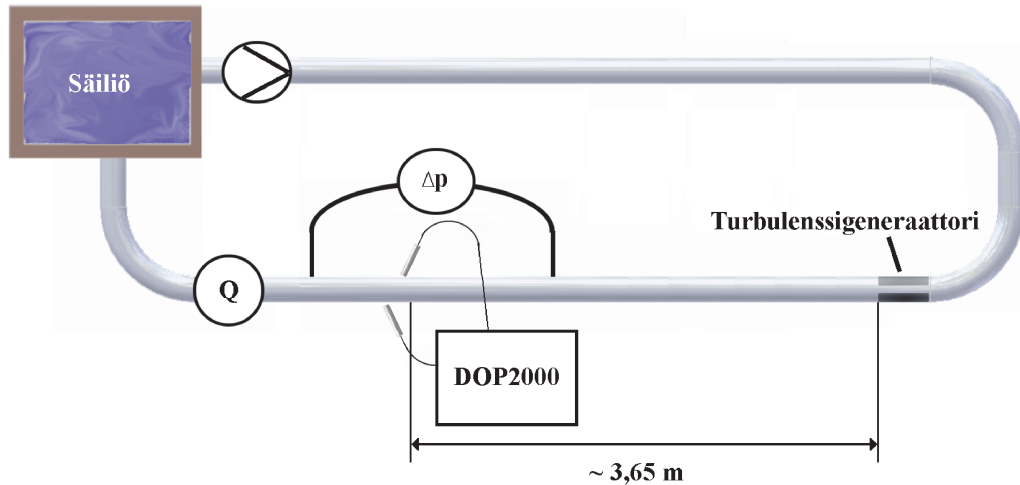
$$\text{Maksimisyvyys} = P_{max} = \frac{T_{PRF} v_d}{2},$$

$$\text{Maksiminopeus} = V_{max} = \frac{v_d^2}{8P_{max} f_e}.$$

Maksimisyvyys ja maksiminopeus ovat kääntäen verrannollisia toisiinsa. Tämä aiheuttaa sen, että mikäli halutaan tutkia virtausta, jossa esiintyy suuria nopeuksia, on maksimisyvyden oltava hyvin pieni. Toisaalta, jos halutaan luodata hyvin syvälle, on virtauksen maksiminopeuden oltava hyvin pieni.

3.2 Mänty- ja koivususpension virtausprofiilien sekä painehäviöiden mittaaminen

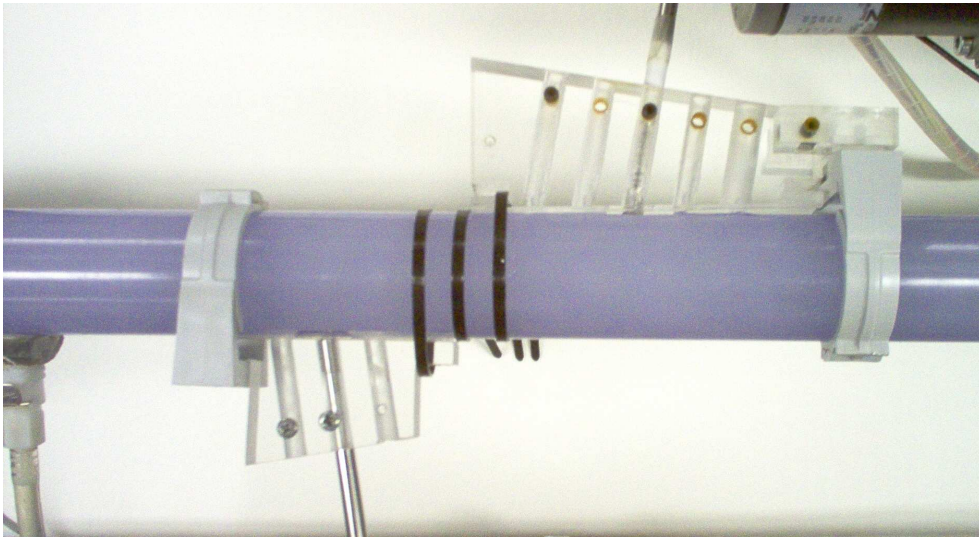
3.2.1 Virtauslinjasto



Kuva 3.7: Virtauslinjaston kaaviokuva.

Virtauslinjasto sisälsi kuvan 3.7 mukaisesti säiliön, johon voitiin varastoida puukuitususpensio. Vesi saatiin säiliöön vesiletkujen kautta suoraan vesijohdotverkostosta. Paperimassan lisäys tehtiin käsin lisäämällä säiliöön tarvitta-

va määrä paperiarkkeja, jotka sekoitettiin puukuitususpensioksi säiliöön kiinnitetyllä sauvasekoittimella. Keskipakoispumpulla pyöritettiin puukuitususpensiota linjastossa. Pumpun tehokkuuden säätäminen tapahtui manuaalisesti säätövastuksella tai tietokoneen kautta Labview-ohjelmalla. Virtaama ja paine-ero mitattiin niille tarkoitetuilla mittausantureilla, jotka oli yhdistetty tietokoneeseen. Tietokone laski keskiarvot kummallekin suurelle 10 sekunnin aikaväliltä ja paine-erolle myös keskihajonnan. DOP2000-laitteistolla tutkittiin putken virtaus- ja kaikuprofilia käyttäen kahta ultraäänianturia (kuva 3.8). Jokaisen profiilin yksittäisten virtausnopeuksien, kaikusignaalien ja paikkojen arvot tallennettiin DOP2000-laitteiston muistiin binäärimuotoisena tiedostona. Anturit asennettiin noin 3,65 metrin etäisyydelle turbulenssigenaattorista (kuva 3.7), jotta virtausprofiili olisi mahdollisimman kehittynyt. Turbulenssigenaattorina käytettiin supistusholkkia, jonka sisähalkaisija oli 20 mm. Sulkijaventtiileillä säädettiin virtauksen kulkua linjastossa. Linjastossa käytettiin polyvinyylikloridista (PVC) valmistettuja putkia, joiden sisähalkaisija oli 44,9 mm.



Kuva 3.8: Anturit kiinnitettyinä PVC-putkeen anturin pidikkeellä. Anturin ja pidikkeen välinen kulma on noin 80° .

3.2.2 Mittaukset

Mänty- ja koivususpensioille suoritettiin väliltä 0,25 %–2,00 % olevilla sakeuksilla mittaussarjat (taulukko 3.1). Mänty- ja koivususpension 0,25 % sakeuden saamiseksi sekoitettiin aluksi tarpeellinen määrä paperiarkkeja 300 litran vesimäärään, mistä eteenpäin sakeutta lisättiin aina 0,25 prosenttiyksikön verran seuraavaan mittaukseen. Paperiarkit sekoitettiin puukuitususpensioksi säilytysastian sauvasekoittimella ja kierrättämällä seosta virtauslinjastossa.

Säilytysastiaan laskettu vesimäärä mitattiin vesimittarilla ja paperiarkkien massa punnittiin digitaalisella vaa’alla. Paperiarkkien kuiva-ainepitoisuus määritettiin Sartorius MA 100 -pikakuivurilla, joka lämmitti paperinäytettä 105 celsiusasteessa, kunnes paperista oli haihtunut lähes kaikki vesi. Kuiva-ainepitoisuuden avulla voitiin laskea tarvittava paperiarkkien määrä halutun sakeuden saavuttamiseksi.

Taulukko 3.1: Tietokoneelle syötetty mittaussarja

Profili	$Q(\frac{1}{s})$	Profili	$Q(\frac{1}{s})$	Profili	$Q(\frac{1}{s})$	Profili	$Q(\frac{1}{s})$	Profili	$Q(\frac{1}{s})$
1	0,15	13	0,34	25	0,85	37	1,90	49	4,20
2	0,16	14	0,36	26	0,90	38	2,00	50	4,40
3	0,17	15	0,38	27	0,95	39	2,20	51	4,60
4	0,18	16	0,40	28	1,00	40	2,40	52	4,80
5	0,19	17	0,45	29	1,10	41	2,60	53	5,00
6	0,20	18	0,50	30	1,20	42	2,80	54	5,20
7	0,22	19	0,55	31	1,30	43	3,00	55	5,40
8	0,24	20	0,60	32	1,40	44	3,20	56	5,60
9	0,26	21	0,65	33	1,50	45	3,40		
10	0,28	22	0,70	34	1,60	46	3,60		
11	0,30	23	0,75	35	1,70	47	3,80		
12	0,32	24	0,80	36	1,80	48	4,00		

Mittauksissa suoritettiin kullakin sakeudella ja kuitutyypillä taulukon 3.1 mukainen mittaussarja, joka ajettiin tietokoneen kautta. Jokaiselle mittaus-

sarjalle asetettiin erikseen mittaamiseen käytettävä aikaväli, jonka välein tietokone tahdisti DOP2000-laitteiston tiedonkeruuta. Virtaaman ja painehäviön mittaaminen aloitettiin yhtä aikaa DOP2000-laitteiston tiedonkeruun kanssa. Ennen kunkin mittauksen aloittamista tietokone säätöi virtaaman Q halutun suuruiseksi. Mittauksissa käytettiin taulukossa 3.2 esitettyjä DOP2000-laitteiston asetuksia.

Taulukko 3.2: DOP2000-laitteiston asetukset mittaussarjoille

Profilimäärä:	6000, josta 3000 per anturi
Purskeen toistotaajuus:	5617 Hz
Anturin emittointitaajuus:	4 Mhz
Tehokkuustaso männylle:	Keskitaso kun sakeus = 0,25 %-1,00 % Korkea kun sakeus = 1,25 %-2,00 %
Tehokkuustaso koivulle:	Keskitaso kun sakeus = 0,25 %-0,75 % Korkea kun sakeus = 1,00 %-2,00 %
Purskeen pituus:	4 aallonpituutta
Resoluutio:	0,19 mm
Anturin herkkyystaso:	Korkea
TGC:	Max = 60 dB Min = -18 dB
Mittausporttien lukumäärä:	272
Emissiota per profiili:	32
Nopeuden skaalauskerroin:	4 kun $Q = 0,00$ l/s–0,95 l/s 2 kun $Q = 1,00$ l/s–1,90 l/s 1 kun $Q = 2,00$ l/s–5,60 l/s

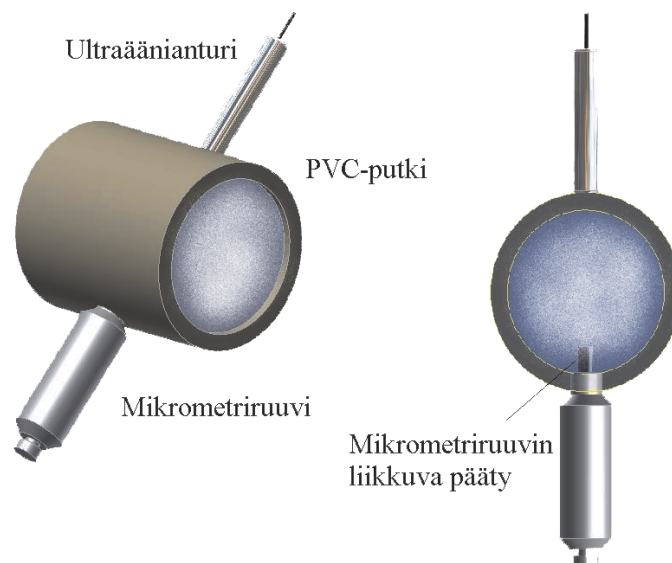
3.3 Pulssitetun ultraääni Doppler -menetelmän muita sovelluksia

Puukuitususpension virtausprofiilin analysoimista varten tehtiin lisämittaukset, joissa tutkittiin äänen nopeutta puukuitususpensiossa ja putken anturinpuoleisen sisäseinämän paikkaa. Äänen nopeus on merkittävä tekijä paikka-

tiedon kannalta, koska laitteistolle syötetty äänen nopeus v_d ei välttämättä ole sama kuin todellinen äänen nopeus C . Kappaleessa 3.2 esitetty mittausarja mitattiin käyttäen äänen nopeutta $v_d = 1500$ m/s. Mikäli $v_d \neq C$, eivät mitatut paikat vastaa todellisia paikkoja. Putken anturinpuoleisen seinämän aluetta, josta virtausprofiili alkaa, ei kyetä havaitsemaan PUDV-menetelmällä mitatuista profiileista häiriökaiun vuoksi. Sen tunteminen olisi kuitenkin tärkeää virtausprofiilin analysoinnissa.

3.3.1 Puukuitususpension äänen nopeuden mittaus

Äänen nopeuden määrittämiseksi puukuitususpensiossa lisättiin virtauslinjastoon mikrometriruuvi yhden PVC-putken kylkeen. Mikrometriruuvi asennettiin putken seinämää vasten kohtisuorasti (kuva 3.9). Vastakkaiselle puo-



Kuva 3.9: Havaintokuva puukuitususpension äänen nopeuden mittaamiseen käytetystä asetelmasta.

lelle asetettiin ultraäänianturi. Ultraäänianturin kiinnitys tehtiin joko anturin pidikkeellä (kuva 3.8), jonka Doppler-kulma on 80° tai statiivilla, jolla se saatiin kohtisuoraan putken seinämää vasten. Anturilla voitiin havaita

mikrometriruuvista tuleva heijastus kaikuprofilissa vahvana kaikusignaalina. Liikuttamalla mikrometriruuvia halutun matkan $\Delta x_{j,mm}$ voitiin laitteistosta lukea matkaa vastaavan vahvan kaikusignaalin etäisyyden muutos $\Delta x_{j,DOP}$. DOP2000-laitteistolla voitiin asettaa osoitin kaikuprofilin yksittäiseen pisteeseen, josta saatiin sen etäisyys ultraäänianturista.

Mittaukseen kulunut aika saatiin DOP2000-laitteistolle asetetun äänennopeuden v_d ja kaiun etäisyyksien $\Delta x_{j,DOP}$ avulla,

$$\Delta t_j = \frac{\Delta x_{j,DOP}}{v_d}. \quad (3.9)$$

Δt_j on laitteistoon integroidun kellon mittaama ja riippumaton mittauksista. Puukuitususpension todellinen nopeus C saatiin sovittamalla pienimmän neliösumman suora arvopisteille $\Delta x_{j,mm}$ ja Δt_j ,

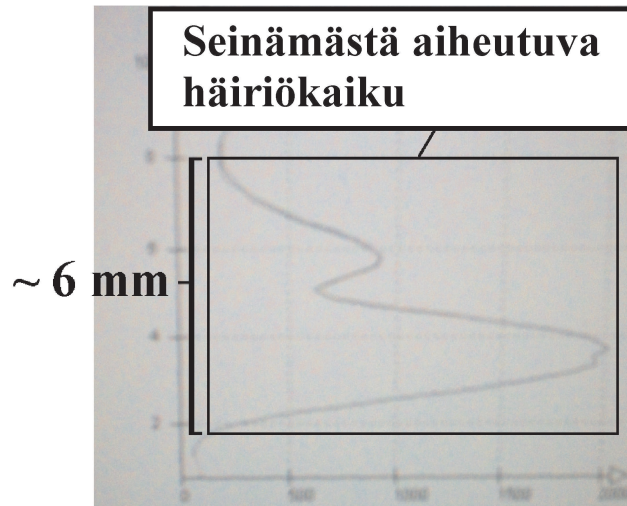
$$\underbrace{\Delta x_{j,mm}}_{\text{y:n arvot}} = \underbrace{C}_{\text{kk}} \underbrace{\Delta t_j}_{\text{x:n arvot}} + \underbrace{D}_{\text{vakio}}, \quad (3.10)$$

missä D on anturin rakenteesta riippuva offset-arvo etäisyydelle.

3.3.2 Seinämän paikka ja sen määrittäminen

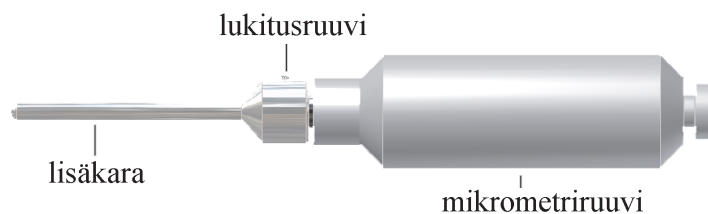
Seinämän paikan määrittäminen on hyvin hankalaa, koska ultraääniantureiden lähettimen ja vastaanottimen tarkkaa sijaintia ei tunneta. Eräs ratkaisu olisi sen määrittäminen ultraäänien kaikuprofilista. Ultraääni ei heijastu pelkästään puukuitususpensiossa olevien puukuitujen pinnoilta, vaan myös putken seinämän ja nesteen rajapinnasta. Tämä aiheuttaa vahvan signaalin ultraäänien kaikuprofilissa, josta voidaan havaita putken sisäseinämä. Ongelmana on se, että putken seinämässä voi tapahtua useampia ultraäänien heijastuksia edestakaisin, jolloin jokin purskeen osa osuu useamman heijastuksen jälkeen takaisin anturille ja aiheuttaa vääristymän kaikuprofilissa. Kuvassa 3.10 on kaikuprofiliin laatikoitu anturinpuoleisen seinämän eli lähi-seinämän aiheuttama häiriökaiku, joka ulottuu noin 6 millimetrin leveydelle ultraäänipurskeen suunnassa. Seinämästä aiheutuvat häiriösignaalit peittävät tehokkaasti lähiseinämän lähetyviltä virtaukseen liittyvät kaikusignaalit,

kuten myös lähiseinämän tarkan sijainnin. Näin ollen pelkästä kaikuprofilista ei voida määrittää seinämän paikkaa tarkasti.



Kuva 3.10: Seinämän aiheuttama häiriökaiku kaikuprofilissa, joka on mitattu fokusoivalla 8 MHz:n ultraäänianturilla vesijohtovedelle. Pystysuora akseli on kaiun etäisyys purskeen suunnassa ja vaakasuora akseli kaiun intensiteetti.

Lähiseinämän paikka määritettiin epäsuorasti mittaamalla mikrometriruuvista heijastuvaa kaikusignaalia samalla tavalla kuin äänen nopeuden mitauksissa. Erona oli vain, että puukuitususpension sijasta käytettiin ionivaihdettua vettä ja mikrometriruuviin liitettiin lisäkara (kuva 3.11).



Kuva 3.11: Havaintokuva mikrometriruuvista lisäkaran kanssa.

Lisäkara liitettiin mikrometriruuviin, koska mikrometrin pääty ei yltänyt anturinpuoleiselle seinämälle. Lisäkaran avulla saatiin mitattua anturinpuoleisen sisäseinämän paikka mikrometriruuvilla $x_{s,mm}$ ja kerättyä mittaustuloksia anturin lähetyiltä. Kaikusignaalin paikka ja mikrometriruuvin lukemat otettiin paikoista, joissa oli selvästi havaittava kaikusignaalin maksimi.

Laitteistolle asetettiin ionivaihdetun veden äänen nopeudeksi $v_d = 1500 \text{ m/s} \approx C$ ja valittiin mikrometrin etäisyyden alkuarvoksi anturinpuoleisen sisäseinämän paikka $x_{s,mm}$. Tällöin voitiin mitatuille arvopisteille $\Delta x_{k,mm}$ ja $\Delta x_{k,DOP}$ tehdä pienimmän neliösumman suoran sovitus,

$$\underbrace{\Delta x_{k,DOP}}_{y:n \text{ arvot}} = \underbrace{\Delta x_{k,mm}}_{x:n \text{ arvot}} + \underbrace{E}_{\text{vakio}}, \quad (3.11)$$

missä E on laitteistolla mitattu anturinpuoleisen sisäseinämän paikka.

Luku 4

Mittaustulokset ja analyysi

Luvun aluksi käydään läpi mittaustulokset puukuitususpension äänen nopeudelle ja ultraäänianturin havaitsemalle seinämän paikalle, jotka ovat tärkeitä tuloksia sovituksia ajatellen. Sen jälkeen esitetään mänty- ja koivususpensiolle mitatut painehäviöt ja virtausprofiilit. Mittaustulosten jälkeen tutustutaan mänty- ja koivususpension virtausprofiilien analyysiin. Analyysissa mallinnettiin mänty- ja koivususpension putkivirtausta turbulenttisella alueella tekemällä yhtälöiden (2.10) ja (2.12) mukaiset sovitukset mitatuille profiileille. Sovitukset tehtiin vain sedimentaatioarvon ylittävälle sakeuksille. Analyysin jälkeen tarkastellaan työstettyjä virtausprofiilien sovituksia ja pohditaan niiden rajoituksia. Sovitukset ovat päteviä ainoastaan mänty- ja koivususpension turbulenttisen alueen putkivirtauksille, kun niiden sakeus on sama kuin sovituksissa käytettyjen mitattujen profiilien. Lisäksi on huomioitava, että mittauksissa käytettiin sisähalkaisijaltaan 44,9 mm olevaa PVC-putkea. Sovitusten toimivuus voi tulla kyseenalaiseksi myös virtaamilla, joiden arvot ylittävät $5,6 \frac{1}{s}$. Luvun lopuksi tarkastellaan mänty- ja koivususpension putkivirtauksen virtausprofiilin symmetrisyyttä.

4.1 Mittaustulokset

4.1.1 Äänen nopeus putkivirtauksessa

Kuvissa 4.1 ja 4.2 on nähtävissä kuvaajat, joissa on esitetty mikrometrillä mitattu etäisyyden muutos DOP2000-laitteistolla mitatun ajan funktiona. Kuvaajissa esitetään myös yhtälöön (3.10) pohjautuva pienimmän neliösumman suoran sovitus kolmelle eri mittaussarjalle. Kuvaajassa 4.2 esitetyt arvot on mitattu kahdella eri anturilla, joiden sovitusten antamat äänen nopeudet on taulukoitu taulukkoon 4.1.

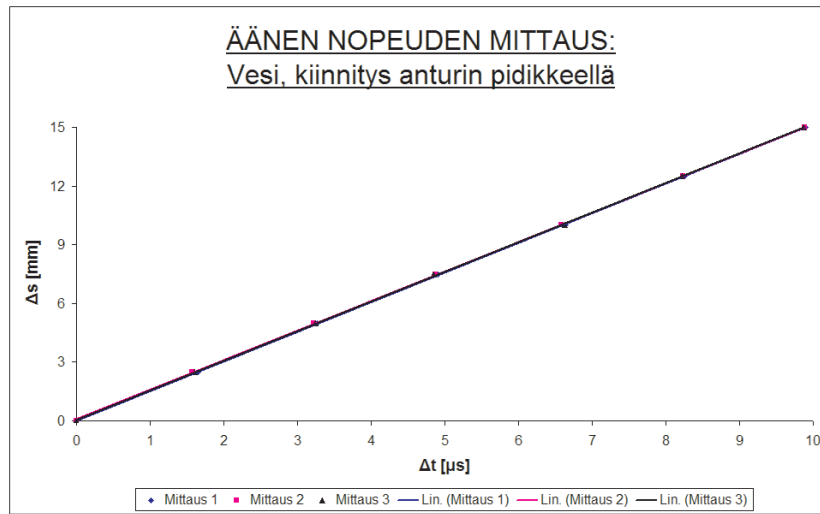
Taulukko 4.1: Äänen nopeus 0,25-prosenttisessa mäntysuspensiossa

	C ($Q = 0$ l/s)	C ($Q = 0,48$ l/s)
Anturi 1	1490,1 m/s	1493,1 m/s
Anturi 2	1490,1 m/s	1490,1 m/s

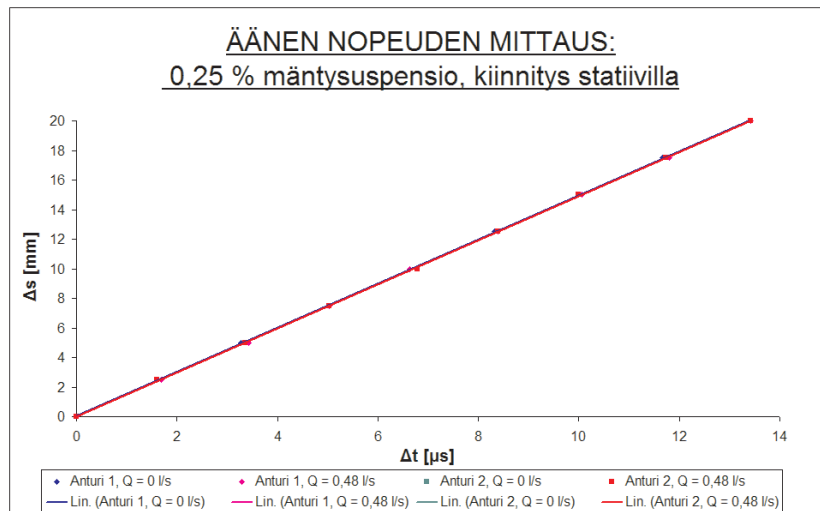
Kuvaajien (kuvat 4.1 ja 4.2) lineaaristen sovitusten mukaan äänen nopeus on vedelle $1513 \pm 2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ja sakeudeltaan 0,25-prosenttiselle mäntysuspensiolle $1491 \pm 3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Mittaustilassa säilytetyn suspension lämpötila vaihteli mitausten suorittamisen aikana välillä $20^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}$, mikä vastaa veden äänen nopeuden vaihtelua välillä $1480 \frac{\text{m}}{\text{s}} - 1509 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ [14].

4.1.2 Seinämän paikka DOP2000-laitteiston ultraäänianturilla havaittuna

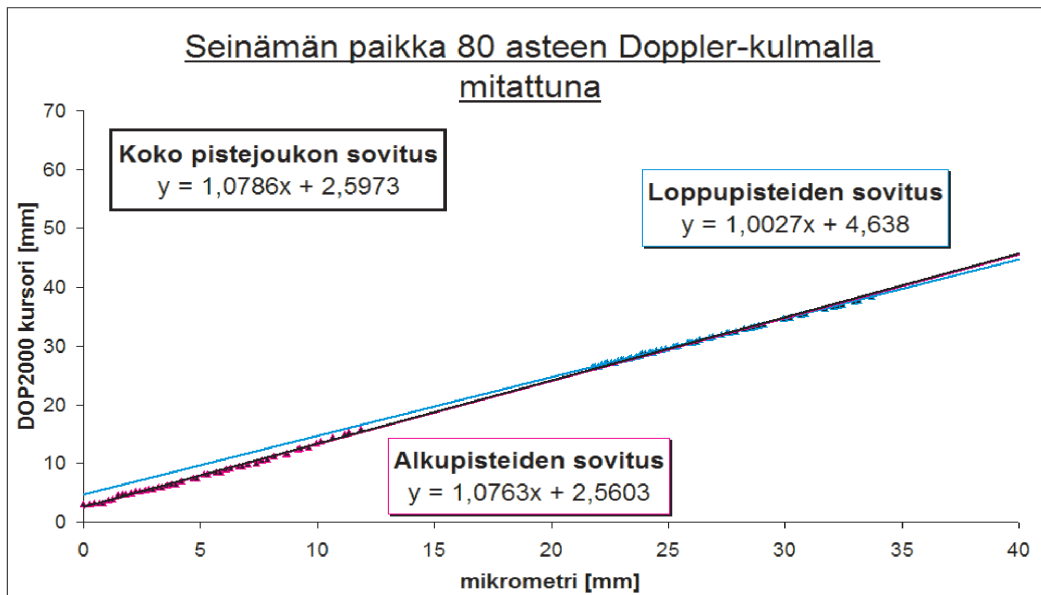
Kuvissa 4.3 ja 4.4 on esitetty kuvaajat, joissa esitetyt sovitukset perustuvat yhtälöön (3.11). Kuvissa on esitetty pienimmän neliösumman suora koko pistejoukolle sekä alku- ja loppupisteille havainnollistamaan sovitusten eriävyyttä. Kuvassa 4.3 alku- ja loppupisteiden lineaaristen sovitusten ero on havaittavissa silmännähtävästi, kun taas kuvassa 4.4 ero on lähes mitätön. Alkupisteet on mitattu lisäkaran kanssa (kuva 3.11) ja loppupisteet ilman lisäkaraa.



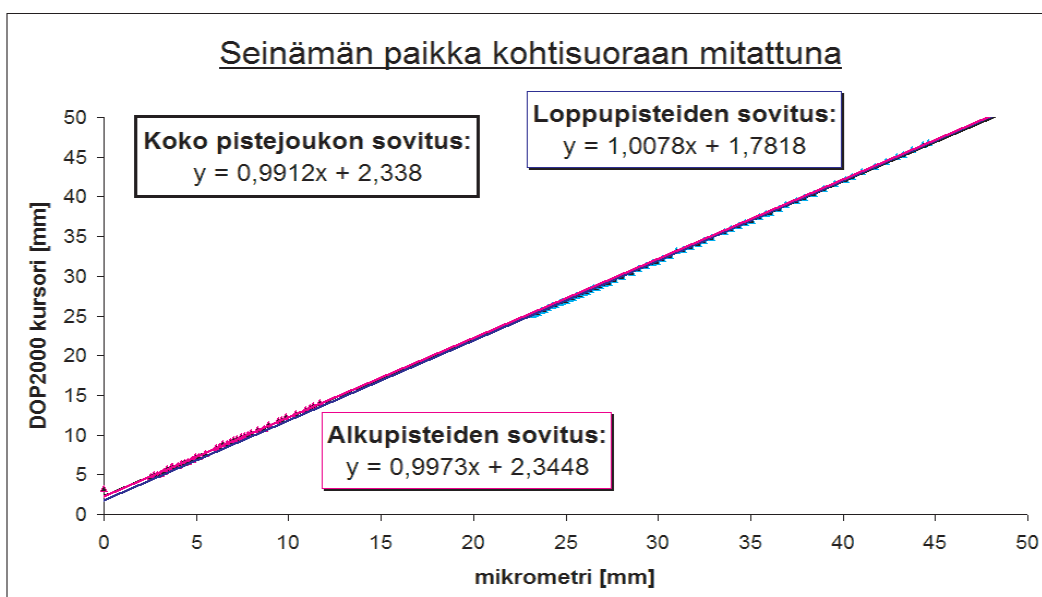
Kuva 4.1: Mikrometrillä mitattu etäisyyden muutos Δs DOP2000-laitteistolla mitatun ajan Δt funktiona. Mittaukset on suoritettu vesijohtovedelle. Kuvaaajassa on nähtävissä pienimmän neliösumman suoran sovitus kolmelle eri mittaussarjalle. Eri mittaussarjojen mittauspisteet ja niiden lineaariset sovitukset menevät kuvaaajassa päällekkäin.



Kuva 4.2: Kuten kuva 4.1, mutta mittaukset on suoritettu sakeudeltaan 0,25-prosenttiselle mäntysuspensiolle käyttäen kahta eri anturia. Osissa mittauksista on käytetty $0,48 \frac{l}{s}$ virtaamaa. Eri mittaussarjojen mittauspisteet ja niiden lineaariset sovitukset menevät kuvaaajassa päällekkäin.



Kuva 4.3: DOP2000-laitteistolla mitattu etäisyys mikrometrillä mitatun etäisyyden funktiona. Mikrometrillä pienillä etäisyyksillä sijaitsevat mittauspisteet eli alkupisteet mitattiin lisäkaran kanssa (kuva 3.11) ja mikrometrillä kauemmilla etäisyyksillä sijaitsevat mittauspisteet eli loppupisteet ilman lisäkaraa. Anturi oli mitausten aikana 80 asteen kulmassa putken keskilinjaan nähden.



Kuva 4.4: Kuten kuva 4.3, mutta anturi oli kohtisuoraan seinämää vasten.

4.1.3 Mänty- ja koivususpension putkivirtauksen painehäviöt

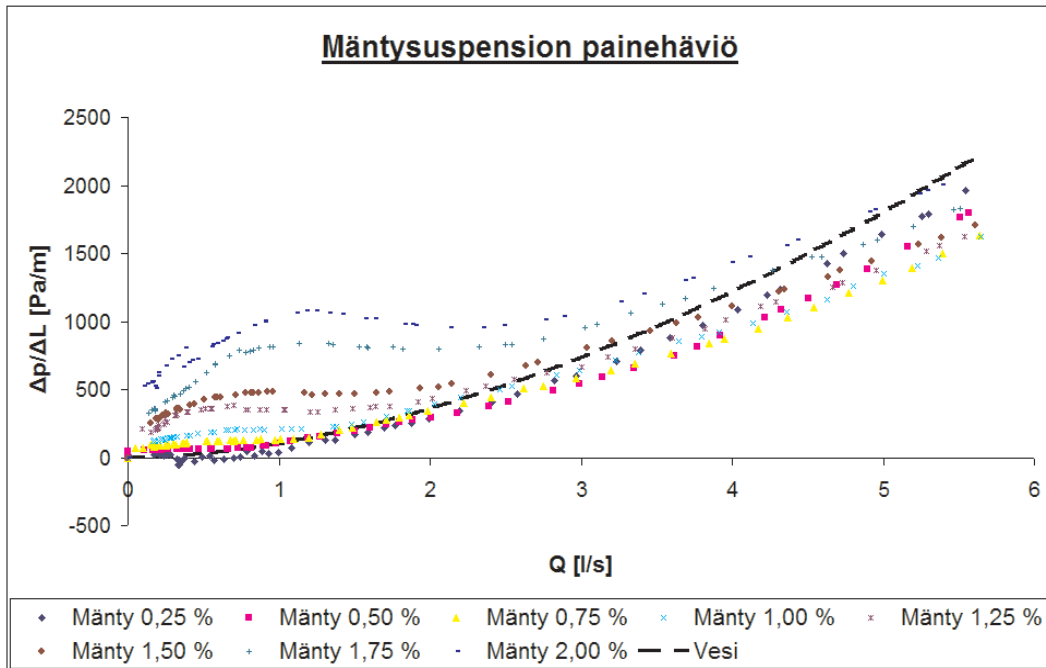
Mänty- ja koivususpension eri sakeuksilla mitatut painehäviöt virtaaman funktiona ovat nähtävissä kuvissa 4.5 ja 4.6. Kuvien 4.5 ja 4.6 kuvaajissa esiintyy myös puhtaan veden painehäviö putkivirtauksessa [14]. Painemittausten systeemaattinen virhe oli ± 20 Pa ja statistinen virhe ± 3 Pa.

4.1.4 Mänty- ja koivususpension putkivirtauksen virtausprofiilit

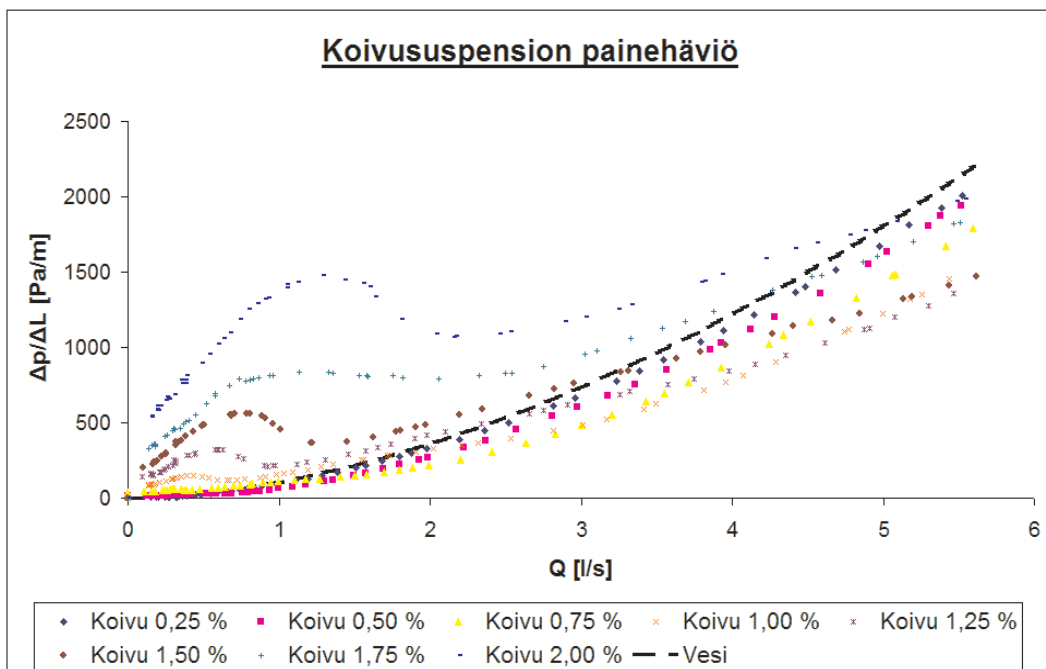
Virtausprofiilien kuvaajissa on eri ultraääniantureilla kerätyt mittaustulokset eroteltu anturikohtaisesti eri värillä. Kuvassa 4.7 selvennetään profiileissa käytettyä värikoodia. Mänty- ja koivususpension virtausprofiilit ovat nähtävissä liitteessä B. Virtausprofiilit työstettiin MATLAB-ohjelmilla, jotka löytyvät liitteeltä D. Ohjelmien käyttöohjeet löytyvät liitteestä A. Binäärimuotoiset mittaustiedostot on julkaistu erikoistyössä [15].

Virtausprofiilien työstämisessä käytettiin äänen nopeuden arvoja väliltä 1480–1509 m/s. Äänen nopeuden vaihtelu saattoi mittaustilanteessa aiheuttaa jo yksistään mitatun suspension lämpötilan muutoksesta sekä virtauksessa esiintyneistä ilmakuplista. Lähiseinämälle käytettiin sijaintia väliltä 2,5–3,5 mm, jonka epätarkkuus perustellaan putken seinämän epätasaisuudella ja ultraäänianturin sijoittumisella mittausten välillä. Doppler-kulma valittiin 80 asteen lähetyviltä siten, että mitattu virtaama ja virtausprofiilista laskettu virtaama saatiin normituksessa samansuuruisiksi. Normitus esitellään tarkemmin liitteessä B.

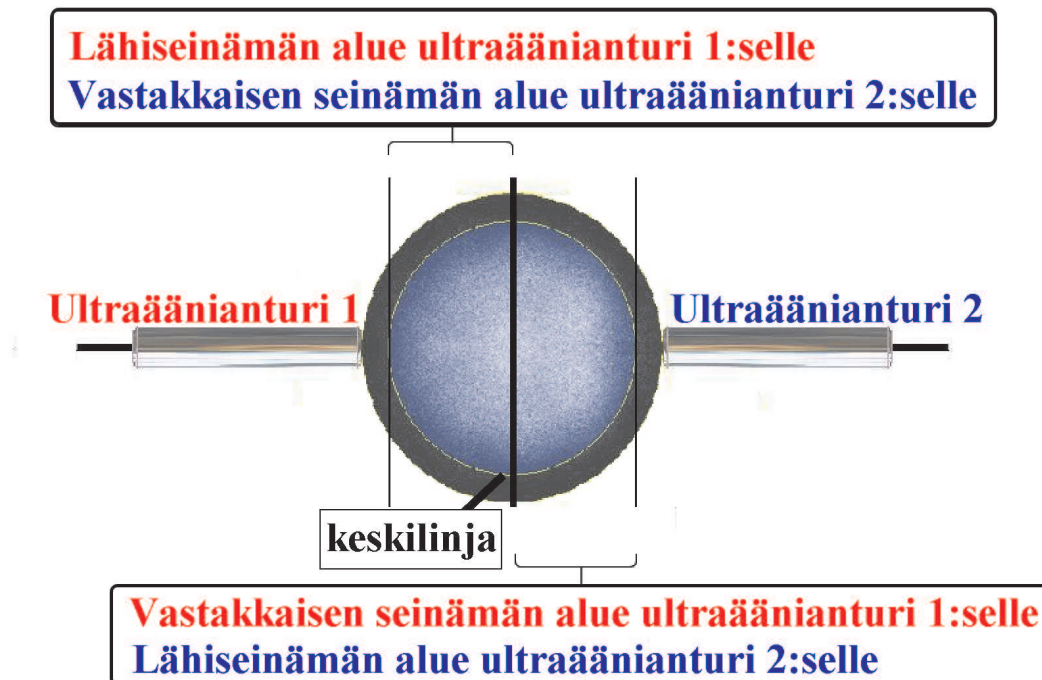
Joissakin virtausprofiileissa (Liite B) esiintyy pieniä "kuoppia". Todennäköisin selitys ilmiölle on kaikusignaalissa esiintynyt liian suuri paikallinen vahvistus, jonka vuoksi vastaanotetun signaalin intensiteetti on ylittänyt sallitun rajan ja aiheuttanut häiriötä nopeuden mittaukseen.



Kuva 4.5: Mäntysuspension painehäviö virtaaman funktiona eri sakeuksille.



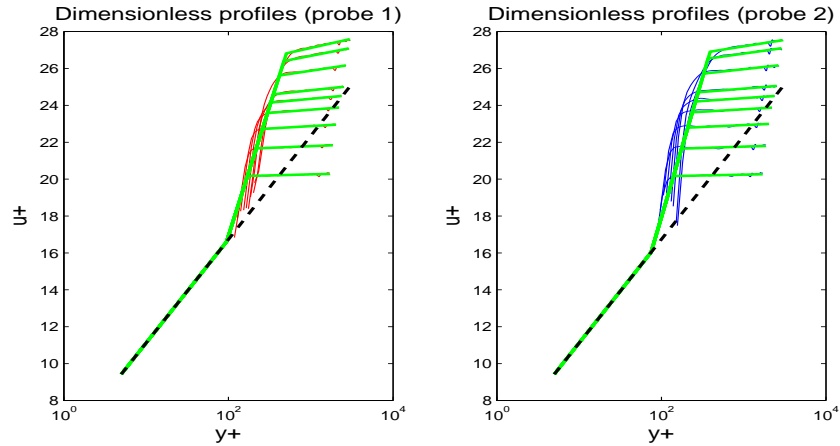
Kuva 4.6: Koivususpension painehäviö virtaaman funktiona eri sakeuksille.



Kuva 4.7: Havaintokuva ultraääniantureiden 1 ja 2 värikoodista. Kuvassa havainnollistetaan myös lähiseinämän ja vastakkaisen seinämän alueita kummallekin anturille.

4.2 Turbulenttisen alueen putkivirtauksen analyysi

Virtausprofiilin analyysissä sovitettiin mitattuihin virtausprofileihin yhtälön (2.10) mukainen profiili. Sovituksella ratkaistiin viisi tuntematonta parametria: α , y_L^+ , y_H^+ , u_C^* ja n . Näistä viides parametri n esitellään myöhemmin tässä kappaleessa. Virtausprofiilien sovittamisessa käytettiin ProfAnalysisQ-pääohjelmaa (Liite D), josta enemmän liitteessä A. Sovitus tehtiin erikseen molempien ultraääniantureiden mittaustuloksille. Analyysin selventämisen apuna käsitellään kuvissa 4.8–4.10 sakeudeltaan 1,25-prosenttisen mäntysuspension analyysissä työstettyjä kuvaajia.

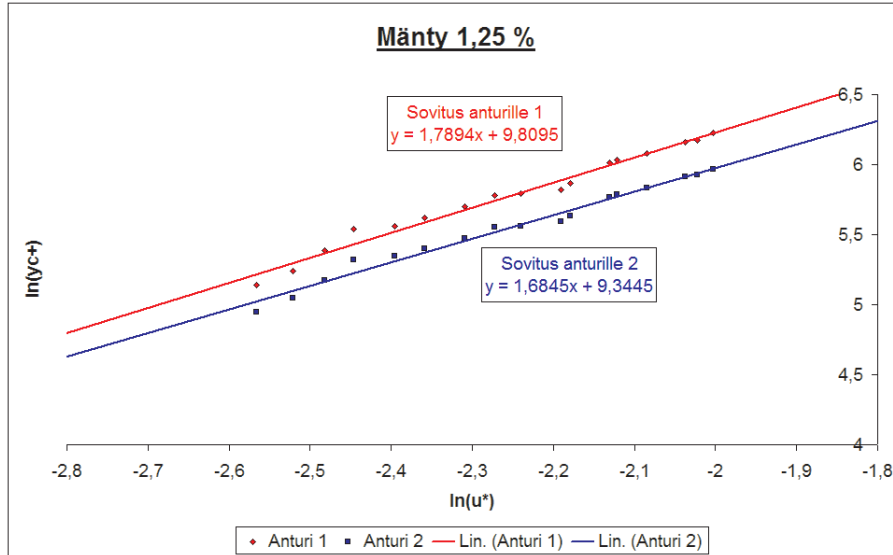


Kuva 4.8: Sakeudeltaan 1,25-prosenttisen mäntysuspension dimensioton virtausprofiili puolilogaritmisella asteikolla. Siniset ja punaiset käyrät edustavat eri ultraäänianturilla mitattuja virtausprofileja. Vihreä käyrä kuvaa yhtälön (2.10) mukaan tehtyä virtausprofiilin sovituksia. Musta katkonainen suora edustaa veden turbulentsin alueen newtonista virtausprofiilia. Virtausprofiilin sovituksessa käytettiin vakioarvoja parametreille α , y_L^+ , y_H^+ ja $n = 2$. Arvoa u^* käsiteltiin muuttujana virtaaman funktiona.

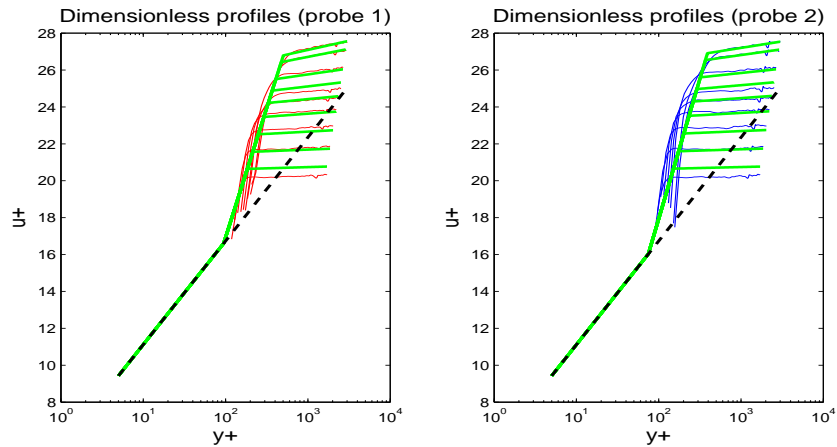
Analysissä etsittiin jokaiselle viidelle tuntemattomalle parametrille vakioarvot. Parametrien y_L^+ ja y_H^+ arvot etsittiin hakemalla myötökerroksen virtausprofiilin alku- ja loppupiste suurten virtaamien profileista. Parametri α saatiin etsimällä mittaustuloksiin sopivaa kulmakerrointa myötökerroksen virtausprofiilille. Tässä vaiheessa annettiin parametrin n olla 2 ja haettiin muuttujalle u_C^* arvot jokaiselle virtaamalle erikseen sovittamalla yhtälö (2.10) mitattuihin profileihin. Sovittamisen jälkeen otettiin yhtälössä (2.11) esiintyvistä muuttujasta y_C^+ puolittain logaritmi ja merkittiin siinä esiintyvää eksponenttia 2 muuttujana n :

$$\ln(y_C^+) = \min(\ln(y_H^+), n \ln(u^*) - n \ln(u_C^*)). \quad (4.1)$$

Seuraavaksi laskettiin logaritmiset arvot sovituksen arvoille y_C^+ ja u^* ja sijoitettiin ne karteesiseen koordinaatistoon. Sen jälkeen voitiin pienimmän



Kuva 4.9: Kuvassa esitetään $\ln(y_C^+)$ $\ln(u^*)$:n funktiona sakeudeltaan 1,25-prosenttiselle mäntysuspensiolle, kun parametrit α , y_L^+ ja y_H^+ on vakioitu. Värit ovat anturikohtaiset kuten kuvassa 4.8.



Kuva 4.10: Sakeudeltaan 1,25-prosenttisen mäntysuspension dimensioton virtausprofiili puolilogaritmisella asteikolla. Siniset ja punaiset käyrät on esitetty anturikohtaisesti kuten kuvassa 4.8. Vihreä käyrä on virtausprofiilin sovitus, joka on tehty molempien antureiden mittaustuloksille erikseen analysoiduilla arvoilla. Musta katkonainen suora edustaa veden turbulenttisen alueen newtonista virtausprofiilia.

neliösumman suoran sovituksen avulla ratkaista n ja virtaamasta riippumaton u_C^* . Ratkaisemisessa oletettiin, että $n \ln(u^*) - n \ln(u_C^*) < \ln(y_H^+)$, jolloin yhtälö (4.1) yksinkertaistui muotoon

$$\underbrace{\ln(y_C^+)}_{y:n \text{ arvot}} = \underbrace{n}_{kk} \underbrace{\ln(u^*)}_{x:n \text{ arvot}} - \underbrace{n \ln(u_C^*)}_{\text{vakio}}. \quad (4.2)$$

Edellä kuvatulla analyysillä saatiin ratkaistua jokaiselle viidelle parametrille vakioarvot. Liitteessä C on esitetty sovitetut virtausprofiilit ja sovituksiin käytettyjen parametrien vakioarvot. Liitteessä C olevissa tuloksissa on myös yhtälön (2.12) mukainen painehäviön sovitus jokaiselle mitatulle sakeudelle ja kuitutyypille.

4.2.1 Virtausprofiilin ja painehäviön sovitukset

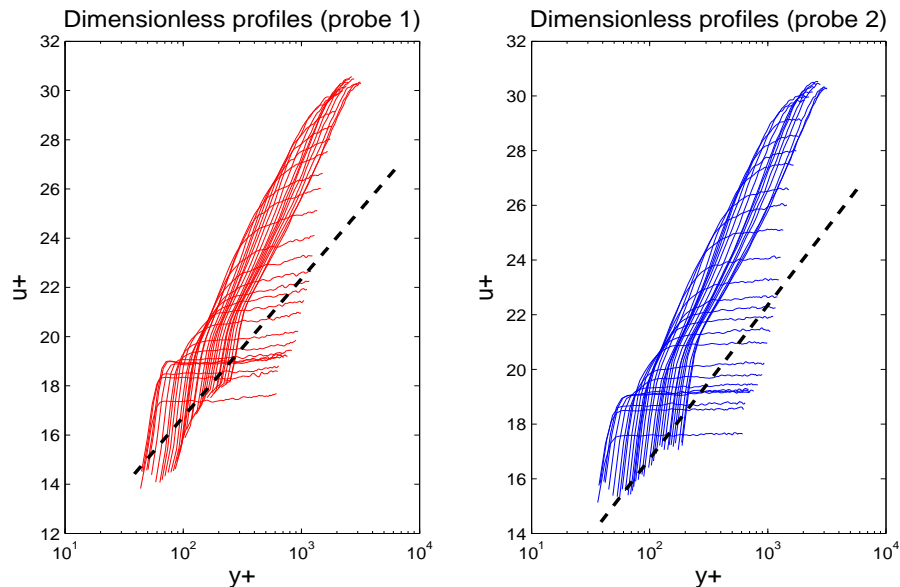
Yhtälöiden (2.10) ja (2.12) mukaan työstetyt virtausprofiilin ja painehäviön sovitukset mänty- ja koivususpension putkivirtaukselle ovat nähtävissä liitteessä C. Liitteessä C esitetyt sovitukset pätevät ainoastaan tutkituille mänty- ja koivususpension putkivirtauksille PVC-putkessa ($R = 22, 45$ mm). Sovitukset eivät sovellu myöskään tilanteisiin, joissa virtaaman arvo on yli 5,6 l/s.

Taulukoihin C.1 ja C.2 on kerätty tuntemattomien parametrien arvot jokaiselle tehdyille sovitukselle. Taulukoista C.1 ja C.2 on havaittavissa, että arvo n ei ole täysin vakio vaan sen arvo vaihtelee likimain välillä 0,7–2,5. Virtausprofiilin sovitus toimii hyvin mäntysuspensiolle, jonka sakeus on yli 1,00 % (kuvat C.3–C.7). Mäntysuspension painehäviön sovitus toimii sakeuksilla 0,75–2,00 % (kuvat C.2–C.7). Koivususpension virtausprofiilien sovittamisessa ilmeni muutama ongelma. Ensimmäinen ongelma esiintyy selvästi vain pienillä sakeuksilla, kun kuitutulpan alueen virtausprofiilin kulmakerroin menee suuremmaksi kuin $1/\kappa$ (kuvat C.8a ja C.9a). Kyseisessä kohdassa esiintyy jyrkkä painehäviön kasvu. Sama ilmiö aikaansaadaan myös painehäviön sovituksissa, kun y_C^+ saavuttaa arvon y_H^+ (kuvat C.8b ja C.9b), mutta tällöin

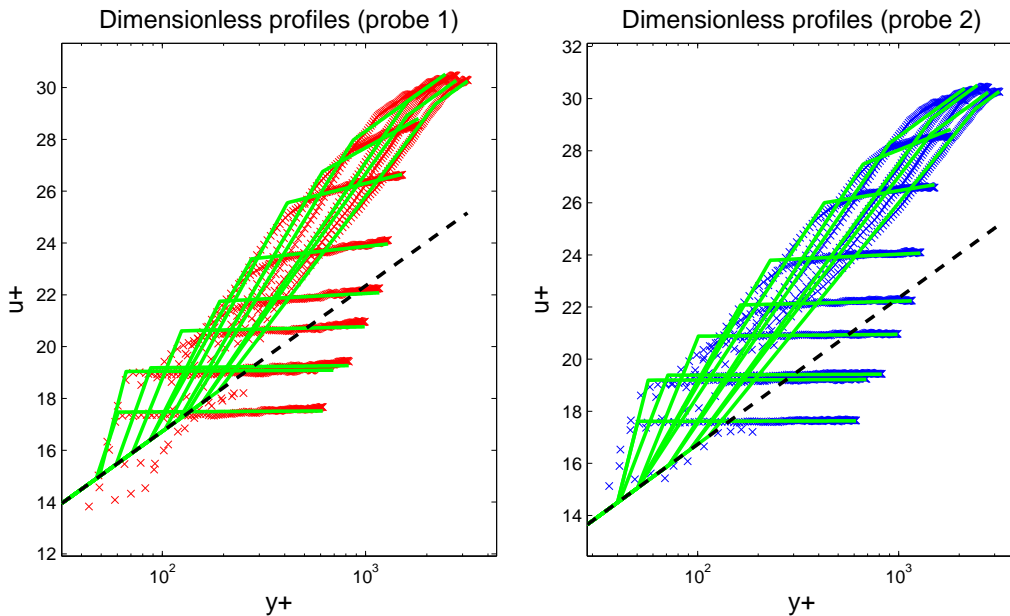
virtausprofiilin muoto ei vastaa mitattua (kuvat C.8c ja C.9c). Toinen ongelma on koivususpension virtausprofileissa esiintyvä notkahdus (kuvat C.8a–C.12a), jonka vuoksi sovitukset eivät vastaa kovinkaan hyvin mitattuja. Sovitusten vakioparametreilla voidaan arvioida koivususpension painehäviötä turbulenttisella alueella sakeuksille väliltä 0,50–2,00 %.

4.2.2 Virtausprofiilin tutkimisen rajoitukset

Edellä esitellyssä analyysissä etsittiin tuntemattomille parametreille vakioarvot. Vakioarvojen antama sovitus ei kuitenkaan toimi hyvin pienillä sakeuksilla kun virtaama kasvaa suureksi. Hyvän esimerkin sovituksen toimimattomuudesta antaa liitteessä C esiintyvä 0,50-prosenttisen mäntysuspension sovitus (kuva C.1). Kuvasta 4.11 voidaan havaita, että kyseisen virtausprofiilin muoto ja sijainti muuttuu virtaaman funktiona. Vapaat parametrit α , y_L^+ ja y_H^+ eivät säily vakiona virtaaman kasvaessa, kuten ei myöskään u_C^* .

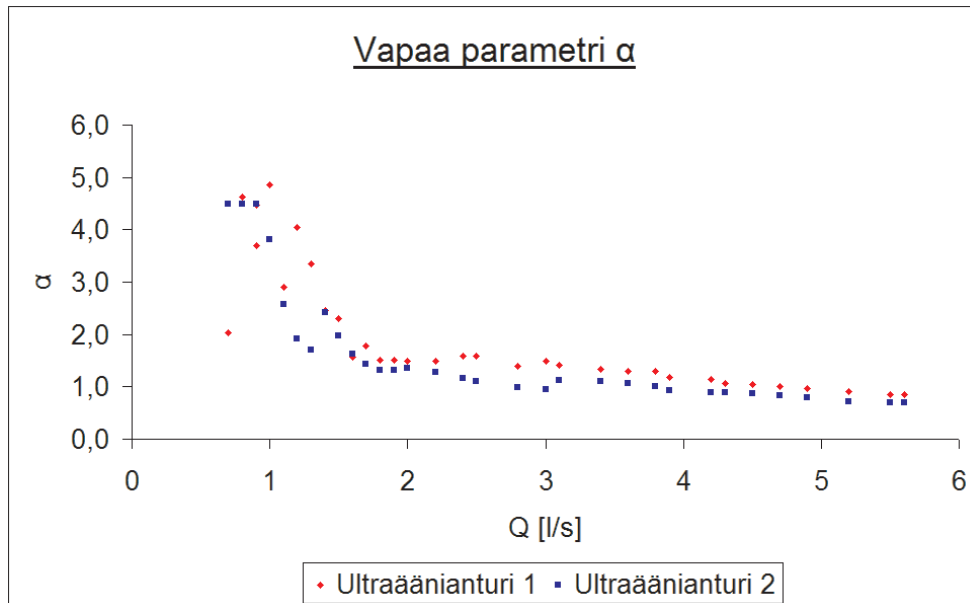


Kuva 4.11: Sakeudeltaan 0,50-prosenttisen mäntysuspension putkivirtauksen dimensiottomat virtausprofiilit puolilogaritmisella asteikolla. Värit ovat anturikohtaisesti kuten kuvassa 4.8.

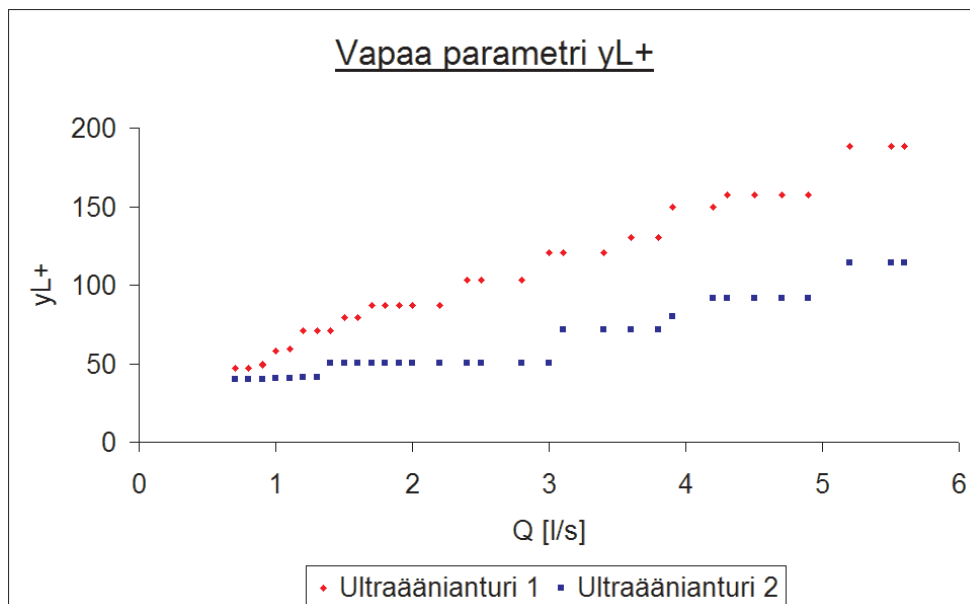


Kuva 4.12: Kuvassa on esitetty sakeudeltaan 0,50-prosenttisen mäntysuspension mitattu dimensioton virtausprofiili puolilogaritmisella asteikolla. Mitattujen virtausprofiilien värit ovat anturikohtaisia kuten kuvassa 4.8. Vihreällä käyrällä on esitetty yhtälön (2.10) mukainen sovitus, jossa on käytetty muuttuvia vapaita parametrejä α , y_L^+ , y_H^+ ja u_C^* ja vakioarvoa $n = 2$.

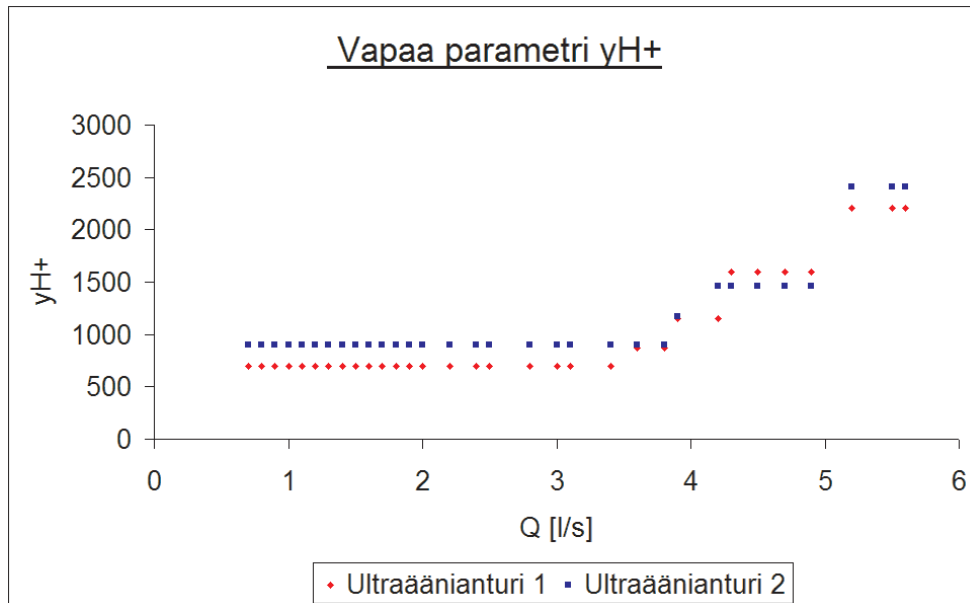
Kuvassa 4.12 on esitetty 0,50-prosenttiselle mäntysuspensiolle sovitus, jossa on käytetty vapaita parametrejä virtaamasta riippuvina muuttujina ja arvoa $n = 2$. Kuvissa 4.13–4.16 on nähtävissä kuvan 4.12 sovitukseen käytetyt parametrit virtaaman funktiona. Kyseisen ilmiön vuoksi analyysissä rajoituttiin pienillä mänty- ja koivususpension sakeuksilla huomioimaan vain virtausprofiilit, joille pystyttiin vakioimaan kaikki tuntemattomat parametrit. Analyysissä tuli ongelmia myös parametrin y_H^+ etsimisessä. Suurilla mänty- ja koivususpension sakeuksilla ei kyetty pääsemään niin suuriin virtaamiin, että y_H^+ :n arvo olisi voitu havaita kohdasta, jossa $y_C^+ = y_H^+$. Kyseisen ongelman vuoksi suurille sakeuksille sovitettiin parametri y_H^+ siten, että saatiin sovituksen kuitutulpan alueen kulmakerroin vastaamaan mitatun virtausprofiilin kulmakerrointa kun $y_C^+ < y_H^+$.



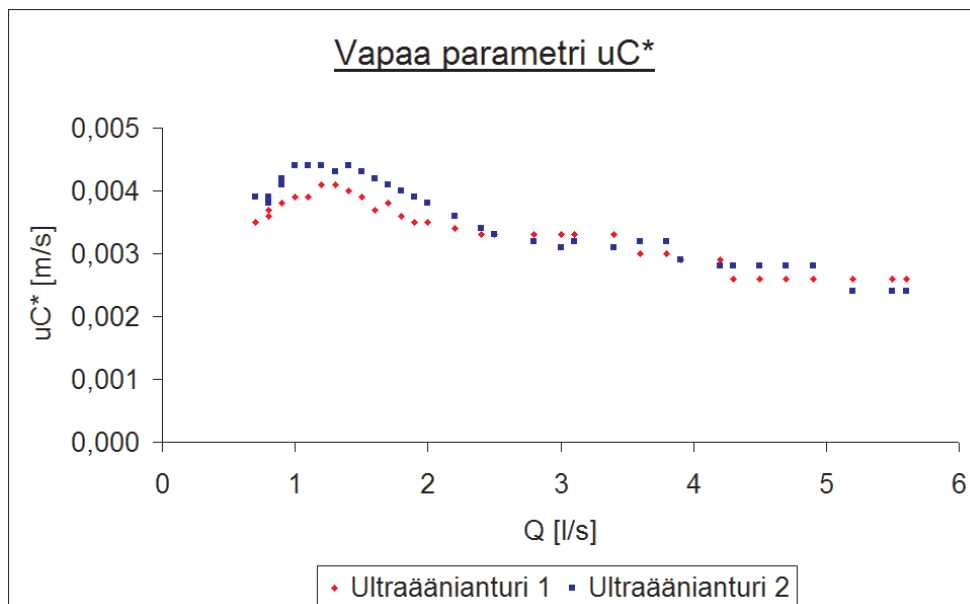
Kuva 4.13: Kuvan 4.12 työstämiseen käytetyn parametrin α arvot virtaaman funktiona.



Kuva 4.14: Kuvan 4.12 työstämiseen käytetyn parametrin y_L^+ arvot virtaaman funktiona.

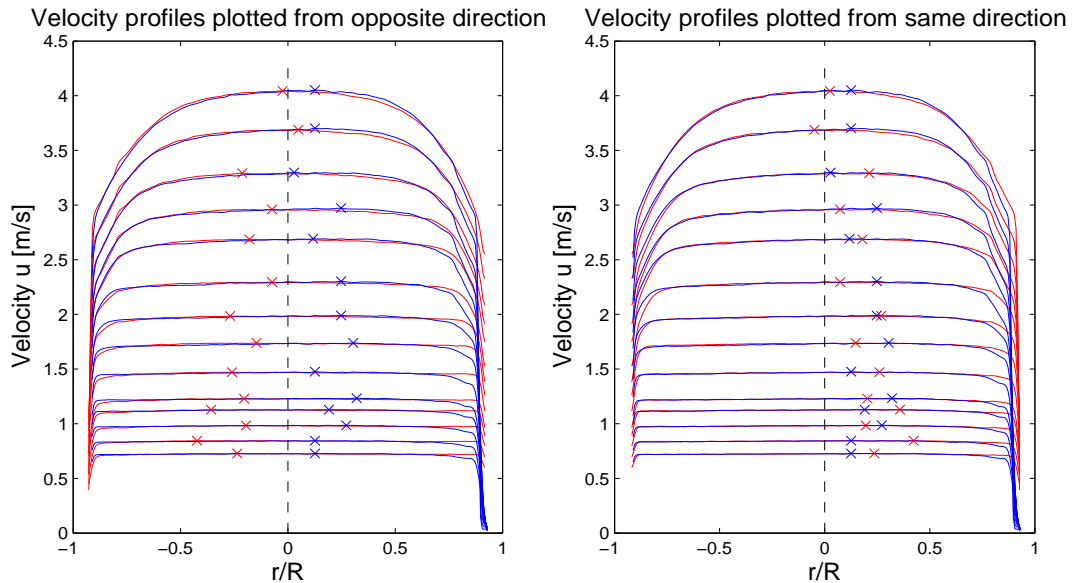


Kuva 4.15: Kuvan 4.12 työstämiseen käytetyn parametrin y_H^+ arvot virtaaman funktiona.



Kuva 4.16: Kuvan 4.12 työstämiseen käytetyn parametrin u_C^* arvot virtaaman funktiona.

4.3 Virtausprofiilin symmetrisyys



Kuva 4.17: Kuvassa on esitetty sakeudeltaan 0,75-prosenttisen mäntysuspension virtausprofiili. Kuvaajassa on eroteltu punaisella ja sinisellä värillä eri ultraäänianturit. Vasemmanpuoleisessa kuvaajassa on esitetty kahden eri anturin virtausprofiilit vastakkaisista suunnista mitattuina, kun taas oikeanpuoleisessa kuvaajassa on esitetty virtausprofiilit antureiden ollessa samalla puolen.

Alkuperäisessä ongelmassa oli kaksi vaihtoehtoa: joko virtausprofiili on epäsymmetrinen tai mittauslaitteisto aiheuttaa epäsymmetrisyyden. Tämän ongelman ratkaisemiseksi virtausprofiili mitattiin kahdella eri anturilla. Kuvassa 4.17 on nähtävissä sakeudeltaan 0,75-prosenttisen mäntysuspension putkivirtauksen virtausprofiilit. Loput virtausprofiilit ovat nähtävissä liitteessä B. Kuvasta 4.17 havaitaan vasemmanpuoleisen kuvaajan virtausprofiilien sijaitsevan hyvin symmetrisesti toistensa suhteen. Tämä kertoo mittauslaitteiston toimineen oikein, koska putken eri puolilta mitatut virtausprofiilit ovat yhteneviä. Oikeanpuoleisessa kuvaajassa (kuva 4.17) on nähtävissä lähes samanlainen symmetrisyys eri antureilla mitatuissa profileissa kuin vasemmanpuoleisessa kuvaajassa. Myös virtausprofiilien muoto on keskilinjan suhteen sym-

metrinen. Näillä tiedoilla todetaan sakeudeltaan 0,75-prosenttisen mäntysuspension virtausprofiilin olevan symmetrinen. Vastaavalla tavalla voidaan tarkastella kaikkia mitattua virtausprofileja, joiden kuvaajat esiintyvät liitteessä B. Lopputulokseksi voidaan todeta mänty- ja koivususpension virtausprofiilien olevan symmetrisiä mittausmenetelmän tarkkuuden puitteissa.

Luku 5

Johtopäätökset

Työssä etsittiin selittävää tekijää luvussa 2 esitetulle kuitutulpan alueen kulmakertoimelle $\frac{(1-\beta)}{\kappa}$, joka on nähtävissä myös liitteiden B ja C dimensiottomissa virtausprofileissa. Selittäviksi tekijöiksi oli kaksi ehdokasta, joko virtausprofiili on epäsymmetrinen tai ilmiö aiheutuu mittausmenetelmästä. Mänty- ja koivususpension putkivirtauksen virtausprofiili on todettu luvussa 4 olevan mittausten tarkkuuden puitteissa symmetrinen. Mittausmenetelmästäkään ei löytynyt mitään tekijää, jolla ilmiö olisi voitu selittää. Kyseessä on siis todellinen fysikaalinen ilmiö. Aikaisemmin on kuitutulpan oletettu olevan kiinteä vakionopeudella etenevä rakenne, joka virtaamaa lisättäessä alkaa hajoamaan reunamilta. Kasvatettaessa virtaamaa yhä lisää tulpan hajoaminen jatkuu hiljalleen lähemmäksi putken keskilinjaa, kunnes hyvin suurilla virtaamilla puukuitususpensio fluidisoituu¹. Mittausten perusteella vaikuttaisi kuitenkin siltä, että turbulenttisella alueella kuitutulppa kokee plastisen muodonmuutoksen ennen kuin ehtii fluidisoitumaan. Kyseisen plastisen muodonmuutoksen syytä ja mekanismia ei tunneta, mutta sen yläraja ennen fluidisoitumista riippuu sakeudesta ja leikkausjännityksestä.

Mäntysuspension putkivirtauksen mallinnukset ovat onnistuneita virtausprofileille joiden sakeus on väliltä 1,00–2,00 % ja painehäviölle sakeuksilla väliltä

¹Puukuitususpension fluidisoituessaan kuitutulpan yhtenäinen rakenne hajoaa ja tilalle syntyy lähes puhtaan veden kaltainen turbulenttinen profiili

0,75–2,00 %. Koivususpension virtausprofilia ei voida mallintaa tarkasti virtausprofiilissa esiintyvän notkahduksen vuoksi. Pienemmillä koivususpension sedimentaatioosakeuksilla kuitutulpan alueella esiintyvä liian suuri kulmakeroin vaikeuttaa mallintamista yhä lisää. Toisaalta, koivususpension painehäviön mallinnus on onnistunut sakeuksilla väliltä 0,50–2,00 %. Edellä mainitut onnistuneet mallinnukset ovat päteviä ainoastaan mänty- ja koivususpension turbulenttisen alueen putkivirtauksille PVC-putkessa ($R = 22,45$ mm), kun virtaama ei ylitä arvoa 5,6 l/s. On mahdollista, että virtaaman kasvaessa todella suureksi esiintyy suuremmillakin sakeuksilla samanlainen käyttäytyminen kuin kuvassa 4.11 esitetyllä pienisakeuksisella mäntysuspensiolla. Tämä tarkoittaisi sitä, että lopulta mille tahansa puukuitususpension sakeudelle löytyisi veden turbulenttista virtausprofilia muistuttava profiili.

Tutkimuksessa ei saatu alkuperäisen suunnitelman mukaisesti mitattua seinämän lähettyvillä sijaitsevaa virtausprofilia seinämästä aiheutuvien häiriökaikujen vuoksi. Jatkotutkimuksia vaatisivat myös aikaisemmin mainitut kuitutulpan plastinen muodonmuutos ja puukuitususpension putkivirtauksen käyttäytyminen erittäin suurilla virtaamilla.

Kirjallisuutta

- [1] Wikipedia, *Suspensio*, <http://fi.wikipedia.org/wiki/Suspensio> (luettu 25.09.2007).
- [2] H. A. Barnes, J.F.Hutton ja K.Walters, *An introduction to rheology* (Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, 1989).
- [3] B.Myreen, *Modelling the flow of pulp suspensions in pipes, parts 1&2*, Paperi ja Puu **5** & **7**, 497–504 & 791–798 (1989).
- [4] G. G. Duffy, *The unique flow behaviour of wood pulp fibre suspensions*, T&S 9th International Conference on Transport and Sedimentation of Solid Particles, 2–5 syyskuuta, Krakova, 1997.
- [5] G. Alfonsi, S. Brambilla & D. Chiuah, *The use of an ultrasonic Doppler velocimeter in turbulent pipe flow*, Experiment in Fluids **35**, 553–557 (2003).
- [6] H. Xu & C. Aidun, *Characteristics of fiber suspension flow in rectangular channel*, International Journal of Multiphase Flow **31**, 318–336 (2005).
- [7] M. Kataja(toim.), *Rheological matters in process industry*, ReoMaT final report (Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus, Jyväskylä, 2007).
- [8] S. Asikainen, *Clamp-on ultraäänivirtausmittareilla tehtävät mittaukset pienissä vesiputkissa*, Vestan loppuraportti (Tampereen Teknillinen Korkeakoulu, Tampere, 2000).

-
- [9] M. Messer, *Pulsed ultrasonic Doppler velocimetry for measurement of velocity profiles in small channels and capillaries*, A thesis presented to the academic faculty (Georgia Institute of Technology, 2005).
- [10] Signal Processing, *Background of ultrasonic Doppler velocimetry*, http://www.signal-processing.com/tech/intro_udv_frame.htm (luettu 25.09.2007).
- [11] J. L. Fouts, *Forming screen effect on ultrasonic beam field*, A thesis presented to the academic faculty (Georgia Institute of Technology, 2005).
- [12] Signal Processing, *DOP 2000 user's manual* (Signal Processing, 2000).
- [13] T. Wunderlich & P. O. Brum, *A wall layer correction for ultrasound measurement in tube flow: comparison between theory and experiment*, *Flow Measurement and Instrumentation* **11**, sivut 63-69 (2000).
- [14] F. M. White, *Fluid mechanics*, 5.painos (McGraw-Hill companies, New York, 2003).
- [15] P. Karinkanta, *Pulssitettu ultraääni doppler -mittaukset kuitususpension putkistovirtaukselle*, Erikoistyö (Jyväskylän Yliopisto, Jyväskylä, 2007).

Liitteet

Liite A: Ohjelmien käyttöohje

Liite B: Mänty- ja koivususpension virtausprofiilit

Liite C: Virtausprofiilien ja painehäviöiden sovitukset

Liite D: Ohjelmat, CD-levy

Liite A

Ohjelmien käyttöohje

Käytetyt ohjelmat ovat muodossa M-file, joka on yleinen tiedostomuoto MATLAB:lle. Jokainen tässä esitetty M-file esiintyy liitteellä D samalla nimellä.

A.1 Pää- ja aliohjelmat

Taulukoissa A.1 ja A.2 on käyty läpi ohjelmien nimet ja käyttötarkoitukset. Taulukot on jaettu pääohjelmiin sekä aliohjelmiin, jotka toimivat vain pääohjelman kutsumana. Taulukossa A.1 merkintä *nimi* tarkoittaa tiedoston nimeä.

Taulukko A.1: Pääohjelmat

M-file:n nimi	Ohjelman käyttötarkoitus
<i>ReadProf</i>	Lukee DOP2000-laitteistolla binäärimuotoon tallennetun mittaustiedoston ja laskee keskiarvoistetut virtausnopeudet kummankin anturin mittaamille profiileille. Työstää tiedoston " <i>nimi_MeanProf.mat</i> ", jossa virtausnopeudet esiintyvät matriiseina " <i>uM1</i> ", " <i>uM2</i> " ja paikat vektorina " <i>Pos</i> ".
<i>QuadProf</i>	Laskee ja tuottaa tiedostosta " <i>nimi_MeanProf.mat</i> " liitteessä B esiintyvät kuvaajat B.3–B.18.
<i>ProfAnalysisQ</i>	Laskee ja tuottaa tiedostosta " <i>nimi_MeanProf.mat</i> " mitatun ja sovitettun virtausprofiilin sekä painehäviön virtaaman funktiona, jossa jokaista tuntematonta parametria α , y_L^+ , y_H^+ , n ja u_C^* voidaan käyttää muuttujana. Sovitus tehdään ainoastaan vastakkaiselta seinämältä mitatuille arvoille.
<i>Profiletest</i>	Laskee ja tuottaa tiedostosta " <i>nimi_MeanProf.mat</i> " liitteessä C esiintyvät kuvaajat.
<i>WallLayerCor</i>	Laskee tiedostosta " <i>nimi_MeanProf.mat</i> " paikkavektorille " <i>Pos</i> " uudet paikat arvoille, jotka aiheuttavat virtausta putken seinämään ja tallentaa korjatun tiedoston nimellä " <i>nimi_MeanProfnew.mat</i> ".

Taulukko A.2: Aliohjelmat

M-file:n nimi	Pääohjelmat	Ohjelman käyttötarkoitus
BinDopF	<i>ReadProf</i>	Lukee DOP2000-laitteistolla mitatut binäärimuotoiset tiedostot tuottaen niistä matriiseja, joita voidaan käsitellä MATLAB:lla.
Uprof	<i>ReadProf</i>	Käsittelee aliohjelmalla BinDopF luettuja arvoja ja luo matriisit kahdella anturilla mitatuille virtausnopeuksille "uM1", "uM2" sekä paikkavektorin "Pos" jatkokäsittelyä varten.
QNorm	<i>QuadProf</i> <i>ProfAnalysisQ</i>	Tekee virtausprofiilin normituksen ultraäänianturi 1:lle.
Parameters_gen	<i>QuadProf</i> <i>ProfAnalysisQ</i> <i>Profiletest</i>	Toimii useiden parametrien asettajana.
Experimental	<i>ProfAnalysisQ</i> <i>Profiletest</i>	Lukee ReadProf-ohjelmalla tuotetun tiedoston ja laskee useampia parametreja jatkokäsittelyä varten.
ChisqrUplus1	<i>ProfAnalysisQ</i>	Laskee sovituksen ultraäänianturilla 1 mitatuille virtausprofileille.
ChisqrUplus2	<i>ProfAnalysisQ</i>	Laskee sovituksen ultraäänianturilla 2 mitatuille virtausprofileille.
j0,j1,j2,m0,m1,m1u	<i>WallLayerCor</i>	Toimivat pääohjelmassa erilaisina funktioina.

A.2 Ohjelmien käyttäminen

Jokaista ohjelmaa käsitellään MATLAB:n editorilla. Ohjelma käynnistetään käyttämällä MATLAB:n komentoikkunassa pääohjelman kutsua. Kutsuna toimii pääohjelman M-file:n nimi. Ennen pääohjelman käyttöä on varmistet-

tava, että jokainen aliohjelma on käytössä. Tarvittavat aliohjelmat löytyvät taulukosta A.2. Ohjelmia käytettäessä on huomioitava, että binäärimuotoiset tiedostot ovat nimetty seuraavanlaisesti:

tiedoston nimi_nimen loppuliite.bdd.

Esimerkiksi

Koivu_025_01.bdd,

jossa "Koivu_025" on tiedoston nimi ja "01" nimen loppuliite. Nimen loppuliite on viitteessä [15] julkaistuissa mittaustuloksissa juokseva numero väliltä 01–56. Numero erottaa eri virtaamalla mitatut arvot ja noudattaa taulukossa 3.1 esitettyä profiilin numerointia. Jokainen luettava tiedosto on sen lisäksi oltava kansiossa, jonka nimi on sama kuin kyseisen tiedoston nimi, ja sijaittava kovalevyllä paikassa, johon ohjelmissa esiintyvä muuttuja "Folder" osoittaa. Kansion nimeä ei sijoiteta muuttujaan "Folder".

A.2.1 ReadProf

Muuttujiin "Folder" ja "DataID" asetetaan luettavan tiedoston sijainti ja nimi. Muuttujalle "OutFileID" asetetaan nimi, jolla halutaan keskiarvoistetut virtausnopeudet "uM1" ja "uM2" sekä paikkavektori "Pos" tallennettavan. Muuttujan "OutFileID" oletuksena on MeanProf, jota käytetään tämän tekstin yhteydessä. Tallennettavan tiedoston sijainti on sama kuin luettavan tiedoston. Muuttujalle "ProfFileExt" asetetaan luettava tiedoston päätte. Muuttujaan "M" asetetaan viimeisen luettavan tiedoston loppuliite ja muuttujaan "m" sen tiedoston loppuliite, josta käsittely aloitetaan

Esimerkki

Aluksi määritellään editorilla luettavan tiedoston sijainti, nimi ja päätte sekä tallennettavan tiedoston nimi.

```
Folder = 'D:\DOP_2000\Mittaukset\Koivu';  
DataID = 'Koivu_025';
```

```
OutFileID = 'MeanProf';
```

```
ProfFileExt = 'bdd';
```

Lopuksi määritellään viimeinen ja ensimmäinen käsiteltävä tiedosto.

```
M = 52;
```

```
m = 3;
```

Ohjelman suoritus käynnistetään MATLAB:n komentoikkunasta käskyllä *Read-Prof*.

A.2.2 QuadProf

QuadProf-ohjelmassa muuttujiin "Folder" ja "DataID" asetetaan luettavan tiedoston sijainti ja nimi. Muuttujalle "ProfFileID" asetetaan nimi, josta luetaan keskiarvoistetut virtausnopeudet "uM1", "uM2" sekä paikkavektori "Pos". Muuttujiin "LossFileID" ja "LossFileExt" asetetaan painehäviötiedoston nimi ja päätte. Aliohjelmaa Parameters_gen on myös käsiteltävä MATLAB:n editorilla. Kyseisessä aliohjelmassa on useita muuteltavia parametrejä, joista jokainen on erikseen kommentoitu M-file:ssa "Parameters_gen".

Esimerkki

Aluksi syötetään editorilla QuadProf-ohjelmaan luettavan tiedoston sijainti ja nimi; tiedoston nimi, joka sisältää matriisit "uM1", "uM2" ja vektorin "Pos" sekä painehäviötiedoston nimi ja päätte.

```
Folder = 'D:\DOP_2000\Mittaukset\Koivu';
```

```
DataID = 'Koivu_025';
```

```
ProfFileID = 'MeanProf';
```

```
LossFileID = 'LossData';
```

```
LossFileExt = 'txt';
```

Tämän jälkeen määritellään aliohjelman Parameters_gen muuttujat.

```
Mstart = 34;
```

```
Mskip = 2;

Theta1 = 80.5*(pi/180);
Theta2 = 80.4*(pi/180);

Soundvel = 1500;
SoundvelDOP = 1500;

DWP1 = 0.0025;
DWP2 = 0.0030;

R = 0.02245;

nu = 1.0e-6
rho = 1000

Kappa = 0.41
B = 5.5

ymin = 0.002375;
ExtraSel = 'log';
DiNorm2=10;

ylim1 = [0.0028 2*R+0.000];
ylim2 = [0.0028 2*R+0.000];
```

Parametrien asettamisen jälkeen ohjelman suoritus käynnistetään MATLAB:n komentoikkunasta käskyllä *QuadProf*.

A.2.3 ProfAnalysisQ

ProfAnalysisQ-ohjelmassa asetetaan aluksi ultraäänianturilla 1 mitatuille virtausprofileille tehtävän sovituksen tuntemattomien parametrien lähtöarvot, joista ohjelma laskee ensimmäisen sovituksen. Muuttujiin "bvec0(indice,1)" asetetaan α , "bvec0(indice,2)" y_H^+ , "bvec0(indice,3)" u_C^* , "bvec0(indice,4)" y_L^+ ja "bvec0(indice,5)" n . Sama idea pätee myös ultraäänianturilla 2 mitatuille virtausprofileille tehtävän sovituksen lähtöarvojen asettamiselle, mutta parametrin "indice" tilalta käytetään "indice2". Lähtöarvojen asettamisen jäl-

keen täytyy `fmincon`-komennolle asettaa rajaehdot. Tutkimuksessa käytettiin vain kahta rajaehto "lb" ja "ub". Käytetyt rajaehdot edustavat sovitusrvojen sallittua ala- ja ylärajaa. Mikäli jokin tuntematon parametri halutaan vakioida on sen alaraja määritettävä yhtä suureksi kuin yläaraja. Komenolle `fmincon` voidaan antaa myös asetuksia, joista tarkemmin MATLAB:n ohjeessa. Aliohjelmaan Experimental asetetaan samat muuttujat kuin pääohjelmassa QuadProf. Parameters_gen toimii kuten kappaleessa A.1.2 on esitetty.

Esimerkki

Asetetaan ensiksi parametreille (α , y_H^+ , u_C^* , y_L^+ ja n) lähtöarvot ja rajaehdot, joita lähdetään sovittamaan ultraäänianturilla 1 mitattuun virtausprofiliin. Kyseiset parametrit ja rajaehdot löytyvät pääohjelmasta heti otsikon "DATA ANALYSING - PROBE 1" jälkeen.

```
bvec0(indice,1) = 1,5;
```

```
bvec0(indice,2) = 150;
```

```
bvec0(indice,3) = 0.009;
```

```
bvec0(indice,4) = 25;
```

```
bvec0(indice,5) = 2;
```

```
lb = [1.5, 150, 0.0009, 25, 2];
```

```
ub = [1.7, 170, 0.1, 25, 2];
```

Asetetaan sitten parametreille (α , y_H^+ , u_C^* , y_L^+ ja n) lähtöarvot ja rajaehdot, joita lähdetään sovittamaan ultraäänianturilla 2 mitattuun virtausprofiliin. Kyseiset parametrit ja rajaehdot löytyvät pääohjelmasta heti otsikon "DATA ANALYSING - PROBE 2" jälkeen.

```
bvec0(indice2,1) = 1,5;
```

```
bvec0(indice2,2) = 150;
```

```
bvec0(indice2,3) = 0.009;
```

```
bvec0(indice2,4) = 25;
```

```
bvec0(indice2,5) = 2;
```

```
lb = [1.5, 150, 0.0009, 25, 2];
```

```
ub = [1.6, 160, 0.1, 25, 2];
```

Arvojen asettamisen jälkeen sijoitetaan aliohjelmaan Experimental arvot kuten pääohjelmassa QuadProf. Aliohjelmaa Parameters_gen käsitellään kappaleen A.1.2 esimerkin mukaisesti. Parametrien asettamisen jälkeen ohjelman suoritus käynnistetään MATLAB:n komentoikkunasta käskyllä *ProfAnalysisQ*.

A.2.4 Profiletest

Profiletest toimii muutoin täysin samalla tavoin kuin ProfAnalysisQ, mutta sille ei tarvitse asettaa rajaehdoja, koska lopullinen sovitus tehdään suoraan annetuilla arvoilla. Sovituksen parametrit α , y_H^+ , u_C^* , y_L^+ ja n sijoitetaan muuttujiin "alpha", "zhplus", "ucstar", "zlplus" ja "n".

Esimerkki

Sijoitetaan parametreille (α , y_H^+ , u_C^* , y_L^+ ja n) arvot, joiden mukaan tehtyä sovitusta verrataan ultraäänianturilla 1 mitattuun dimensiottomaan ja dimensiolliseen virtausprofiliin. Sijoitus tehdään heti pääohjelmassa esiintyvän otsikon "DATA ANALYSING - PROBE 1" jälkeen.

```
alpha = 1.5;
```

```
zhplus = 150;
```

```
ucstar = 0.011589;
```

```
zlplus = 25;
```

```
n = 2.6675;
```

Sijoitetaan parametreille (α , y_H^+ , u_C^* , y_L^+ ja n) arvot, joiden mukaan tehtyä sovitusta verrataan ultraäänianturilla 2 mitattuun dimensiottomaan ja dimensiolliseen virtausprofiliin. Sijoitus tehdään heti pääohjelmassa esiintyvän otsikon "DATA ANALYSING - PROBE 2" jälkeen.

```
alpha = 1.5;
```

```
zhplus = 150;
```

```
ucstar = 0.011727;  
zlplus = 25;  
n = 2.68034;
```

Aliohjelmiin Experimental ja Parameters_gen sijoitetaan arvot kuten pääohjelmassa ProfAnalysisQ. Parametrien asettamisen jälkeen ohjelman suoritus käynnistetään MATLAB:n komentoikkunasta käskyllä *Profiletest*.

A.2.5 WallLayerCor

WallLayerCor-ohjelmassa asetetaan muuttujin "Folder" ja "DataID" tallennettavan tiedoston sijainti ja nimi. Muuttujaan "OutFileID" annetaan tallennettavan tiedoston loppuliite. Tämän jälkeen annetaan lataamiskohde, josta tiedosto "MeanProf.mat" haetaan. Loput ohjelmassa esiintyvät muunneltavat parametrin ovat "innerwall", "tubeD", "d", "cs", "tt", "theta" ja "resolution". Edellä mainitut parametrin on selitetty kommentein pääohjelmassa.

Esimerkki

```
Folder = 'D:\DOP_2000\Mittaukset\Koivu';  
DataID = 'Koivu_025';  
OutFileID = 'MeanProfnew';  
  
load('D:\DOP_2000\Mittaukset\Koivu\Koivu_025_MeanProf.mat')  
  
innerwall= 0.00238;  
  
tubeD = 0.04966;  
  
d = 0.00818;  
cs = 1500;  
tt = 0.00000085;  
  
theta = 80;  
resolution = 0.00019;
```

Arvojen asettamisen jälkeen ohjelma käynnistetään MATLAB:n komentoikkunasta käskyllä *WallLayerCor*.

Liite B

Mänty- ja koivususpension virtausprofiilit

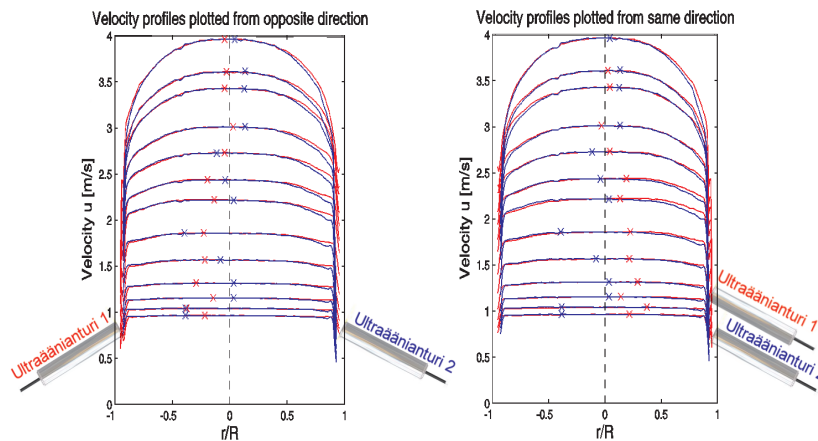
Kuvissa B.2–B.18 on esitetty mänty- ja koivususpension putkivirtaukseen liittyen kolme erilaista kuvaa **(a)**–**(c)**, jotka on mitattu PUDV-menetelmällä. Mittauksissa käytettiin kahta ultraäänianturia, jotka sijoitettiin putken molemmin puolin. Kuvien B.2–B.18 kuvaaajissa esiintyvät punaiset ja siniset käyrät edustavat eri ultraäänianturilla mitattuja arvoja (kts. kuva 4.7). Punaisella merkittyjen virtausprofiilien normitus tehtiin vastakkaisen seinämän alueen (far wall) mukaan. Vastakkaiselta seinämältä katsoen ultraäänianturilla 1 mitattujen profiilin normituksessa käytettiin turbulenttisen alueen newtonista virtausprofiilia etäisyyksillä 0,00–3,00 mm ja mitattua virtausprofiilia etäisyyksillä 3,00–22,45 mm. Ultraäänianturilla 2 mitattujen virtausprofiilien normituksessa käytettiin ultraäänianturilla 1 mitattuja normitettuja profiileja, joihin normitettiin ultraäänianturilla 2 mitattujen vastaavien profiilien keskilinjan lähetyviltä 10 mitattua arvoa. Normituksessa oletettiin virtausprofiilin olevan symmetrinen keskilinjan suhteen. Seuraavaksi käydään läpi kuvissa B.2–B.18 esiintyvät kuvat **(a)**–**(c)**.

- Kuvassa **(a)** on kaksi kuvaajaa. Vasemmanpuoleisessa kuvaajassa on esitetty painehäviö virtaaman funktiona. Oikeanpuoleisessa kuvaajassa on esitetty normituksesta saadut normituskertoimet molemmille an-

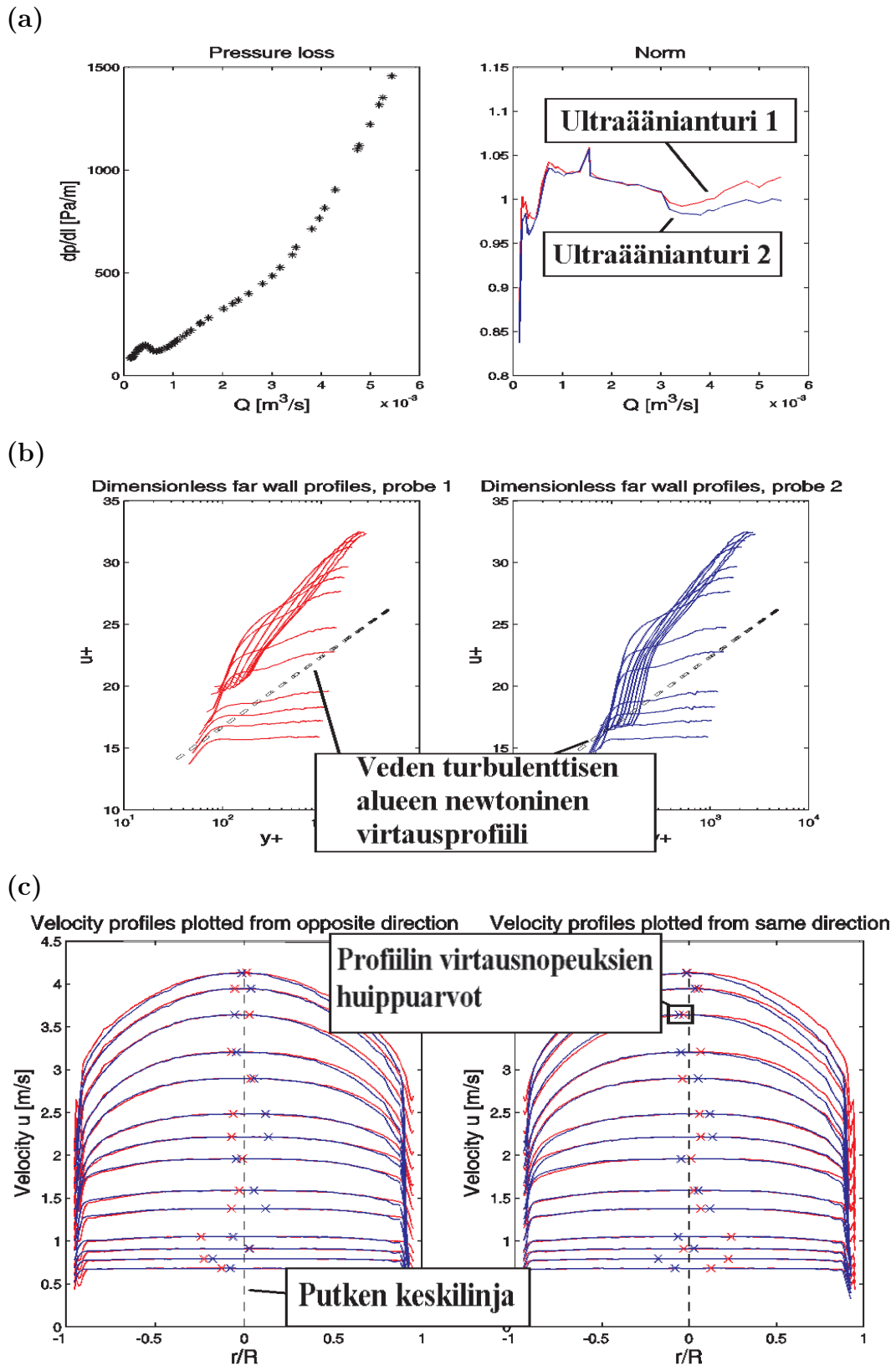
tureille (kuva B.2a). Normituskertoimilla kerrottiin kunkin virtausprofiilin nopeuksien arvot, jolloin saatiin virtausprofiilista määritetty virtaama vastaamaan mitattua virtaamaa.

- Kuvassa (b) on esitetty vastakkaisen seinämän alueelta mitatut dimensiottomat virtausprofiilit puolilogaritmisella asteikolla. Mustalla värillä esitetty katkonainen suora edustaa turbulenttisen alueen newtonista virtausprofiilia (kuva B.2b).
- Kuvassa (c) on esitetty mitatut virtausprofiilit. Vasemmanpuoleisessa kuvaajassa on ultraääniantureilla mitatut virtausprofiilit vastakkain, aivan kuten ne todellisuudessa mitattiin. Oikeanpuoleisessa kuvaajassa on esitetty virtausprofiilit samasta suunnasta. Ultraääniantureiden sijaintia on havainnollistettu kuvassa B.1. Kuvaajien keskellä sijaitseva pystysuora katkonainen viiva edustaa putken keskilinjaa (kuva B.2c). Kullekin profilille on myös merkitty virtausnopeuden huippuarvot merkillä "x" (kuva B.2c).

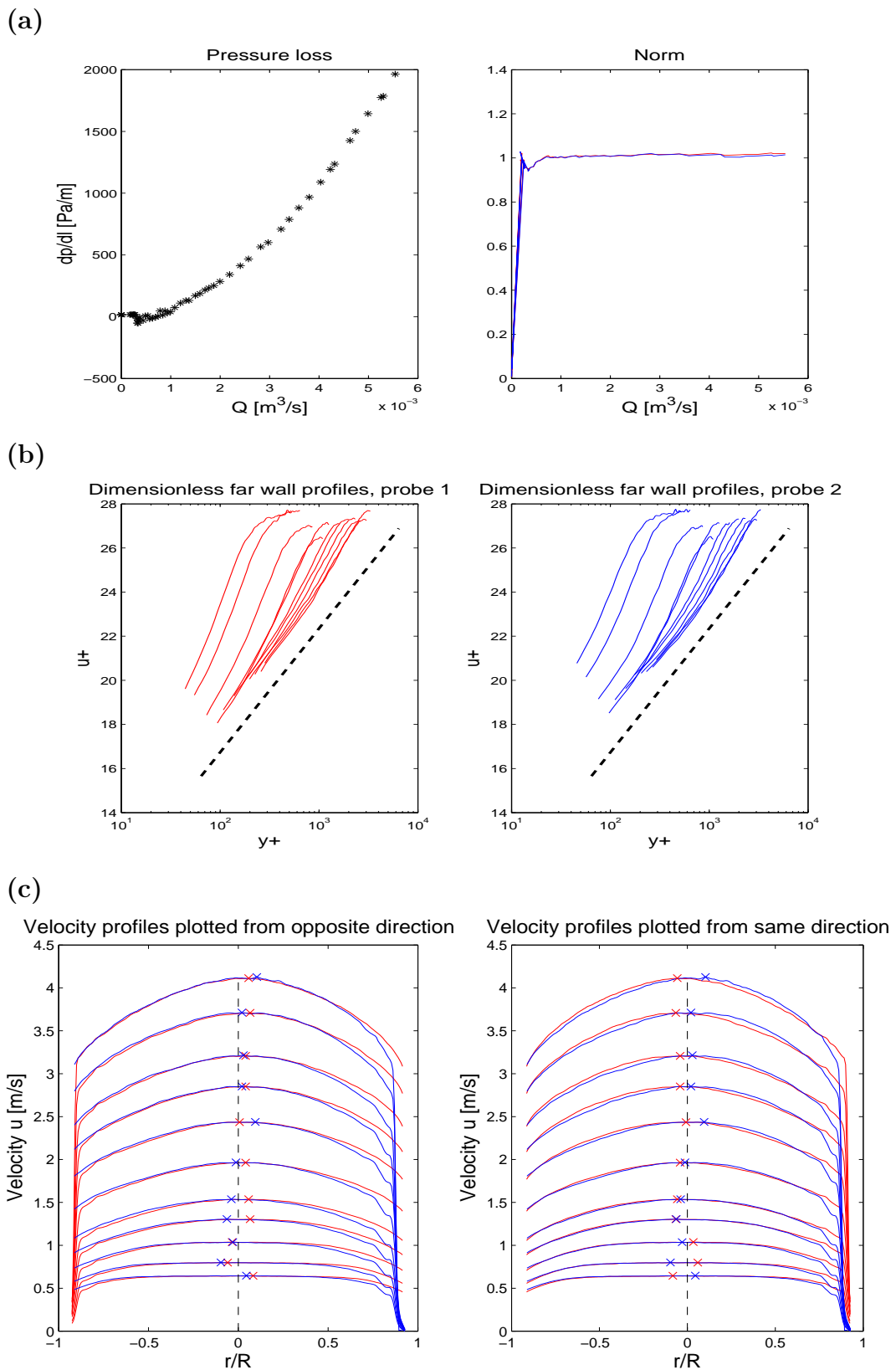
Kuvat B.3–B.18 on otsikoitu suspension puukuitumateriaalin ja sakeuden mukaan.



Kuva B.1: Kuvassa havainnollistetaan ultraäänianturien sijaintia kuvien B.2c–B.18c virtausprofiilien kuvaajissa.

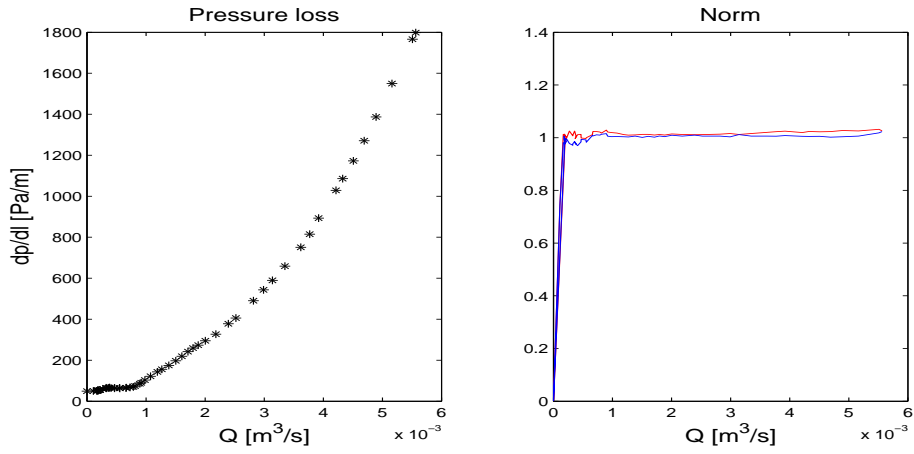


Kuva B.2: Esimerkkikuva.

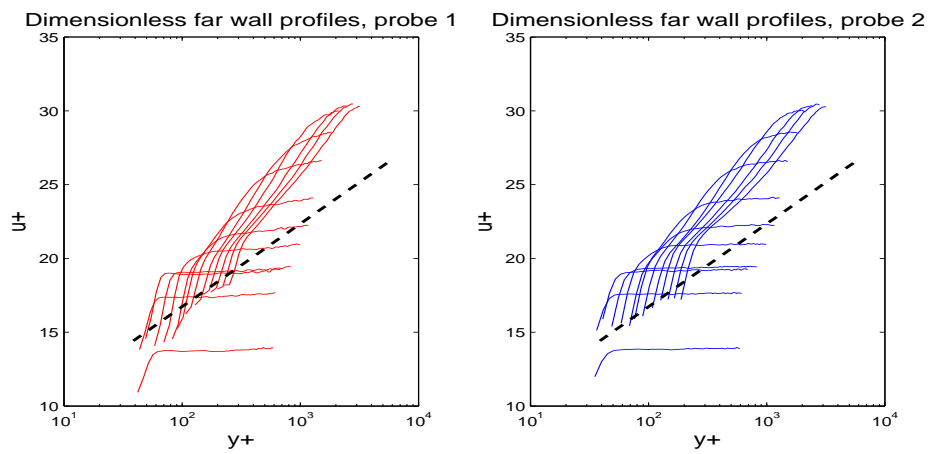


Kuva B.3: Mänty 0,25 %.

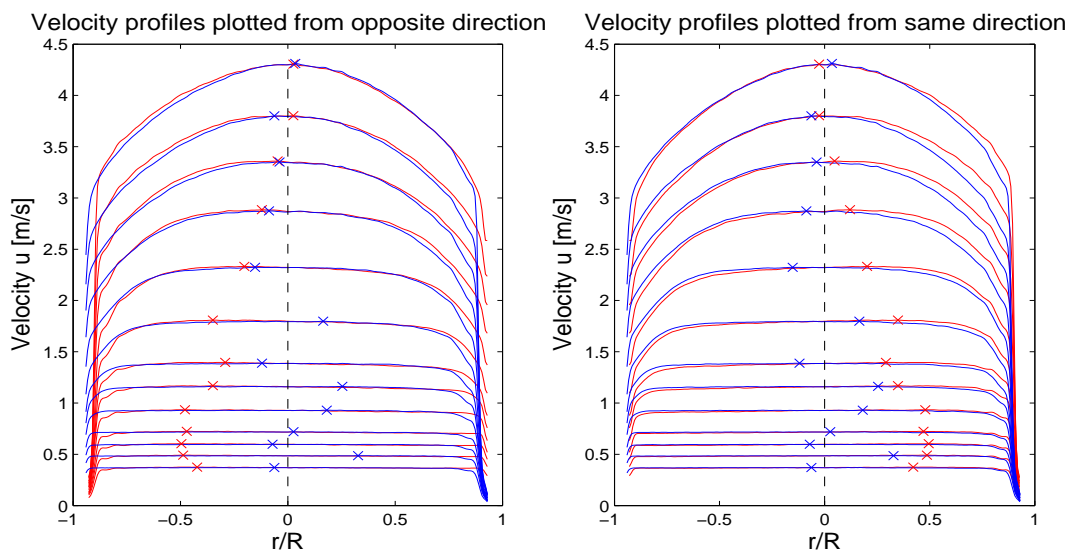
(a)



(b)

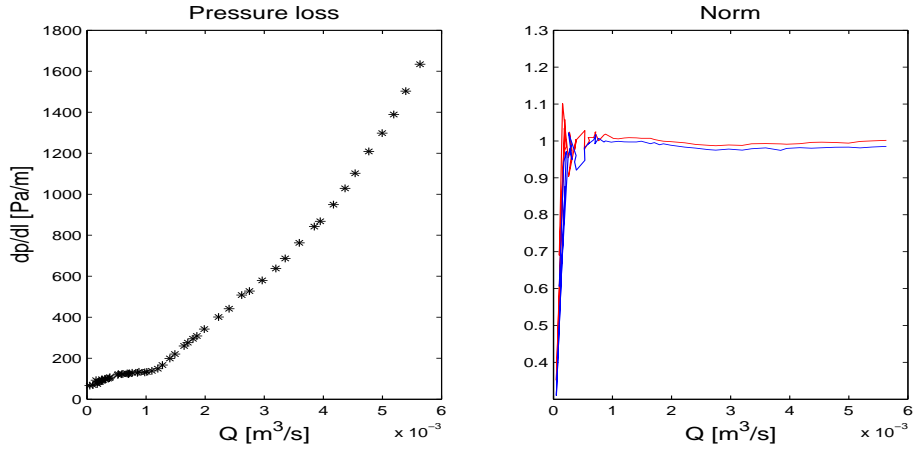


(c)

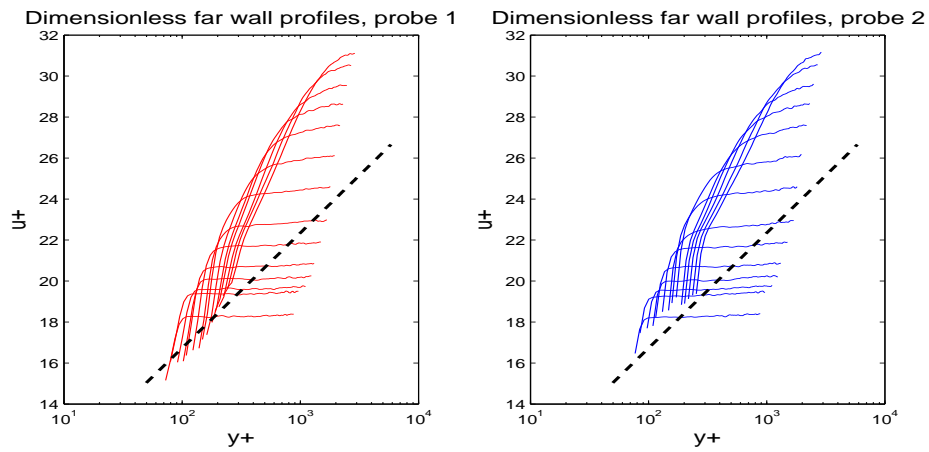


Kuva B.4: Mänty 0,50 %.

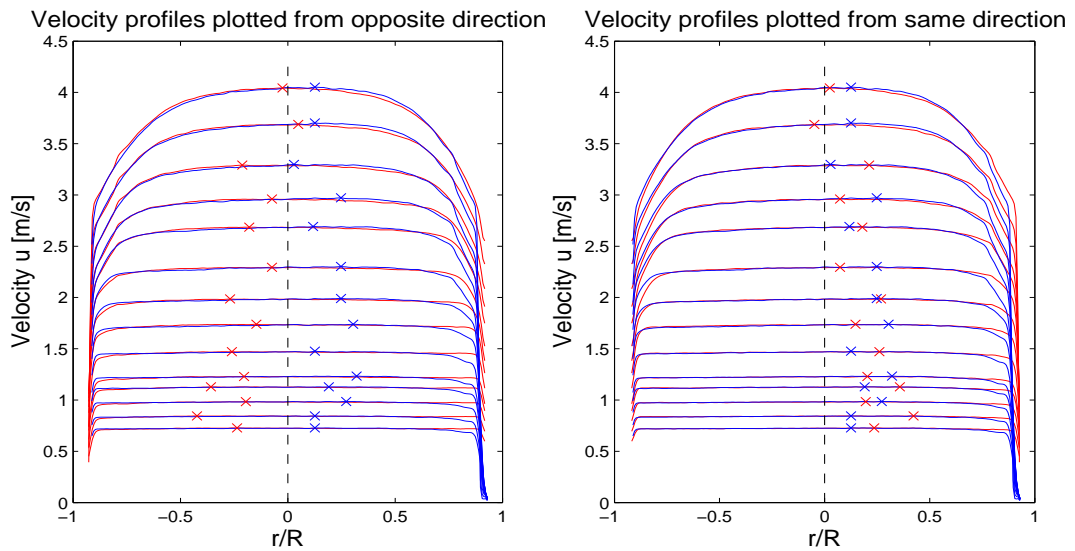
(a)



(b)

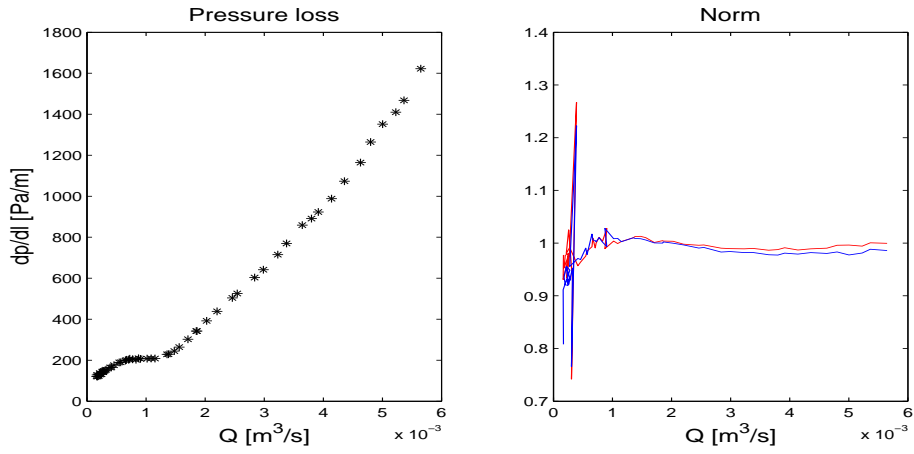


(c)

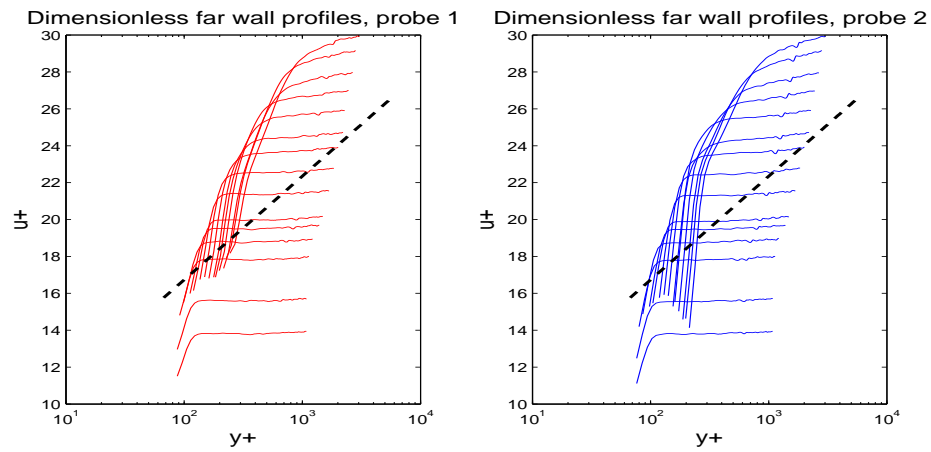


Kuva B.5: Mänty 0,75 %.

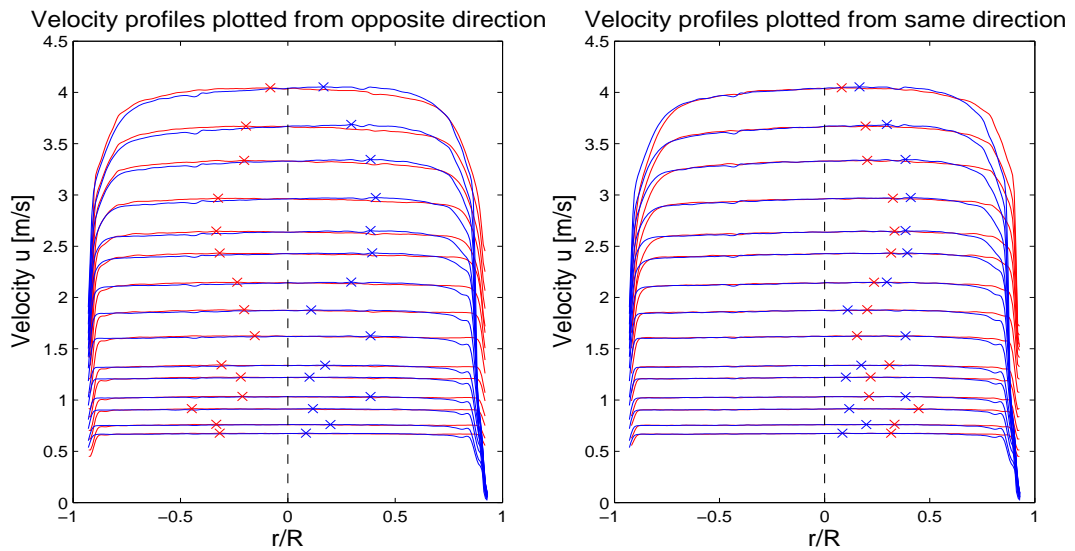
(a)



(b)

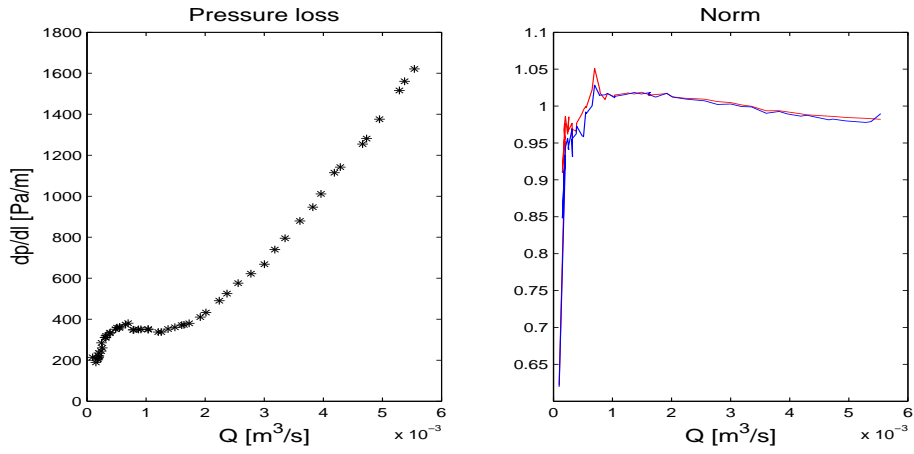


(c)

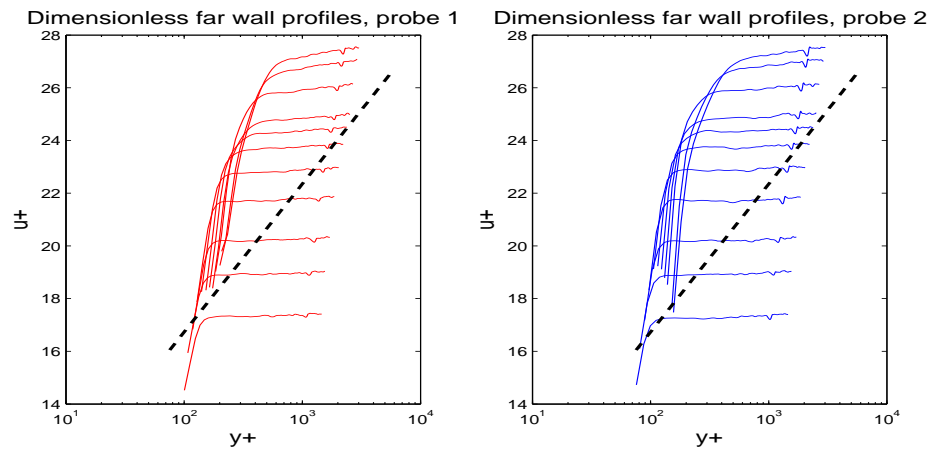


Kuva B.6: Mänty 1,00 %.

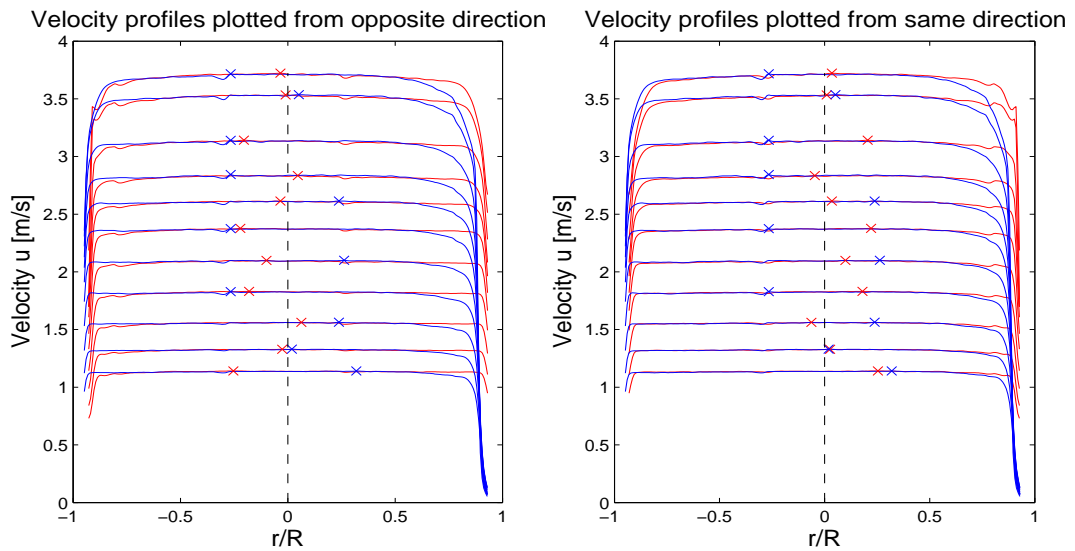
(a)



(b)

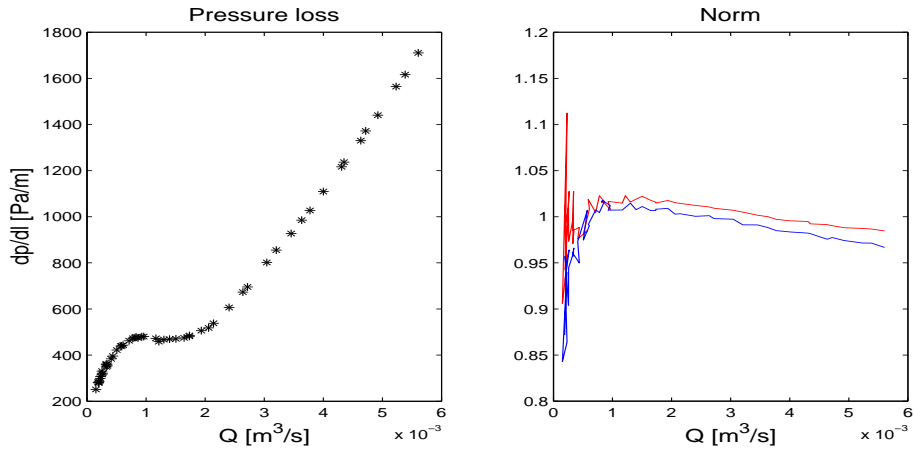


(c)

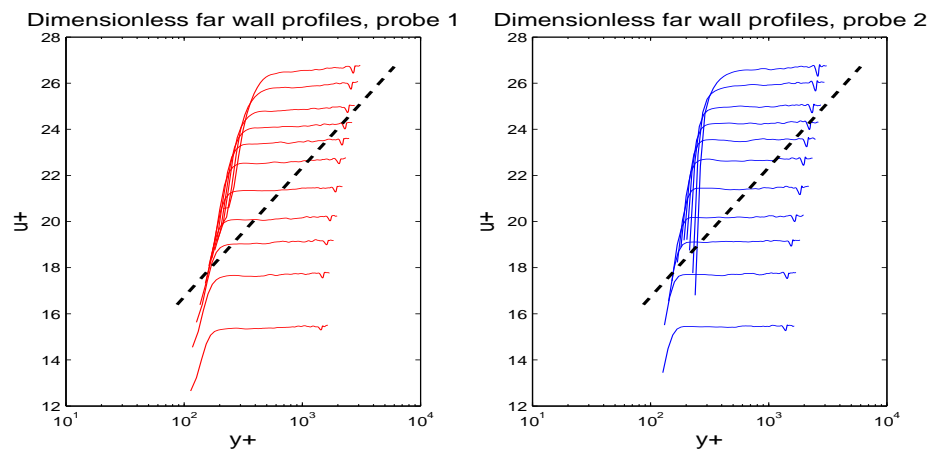


Kuva B.7: Mänty 1,25 %.

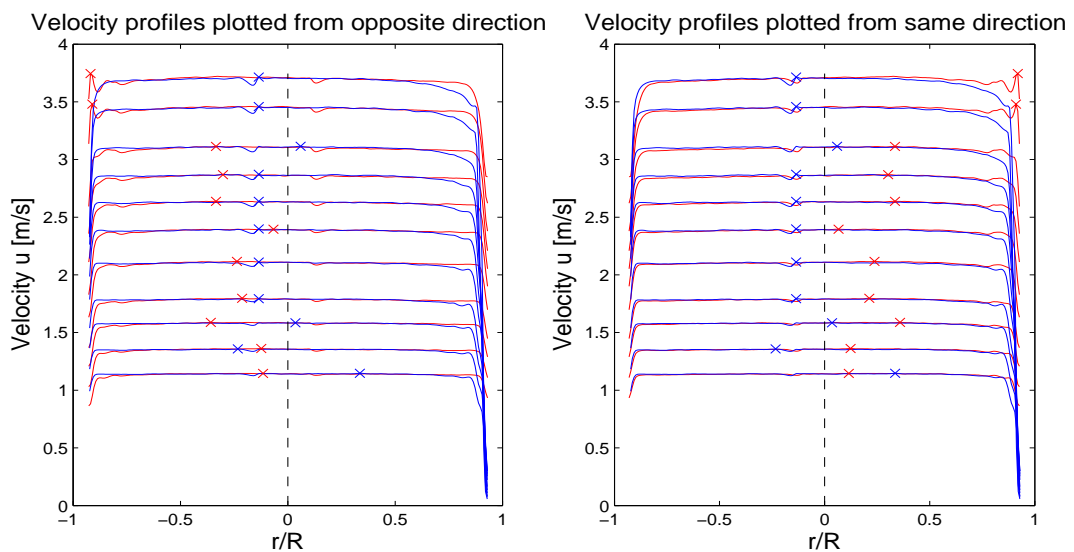
(a)



(b)

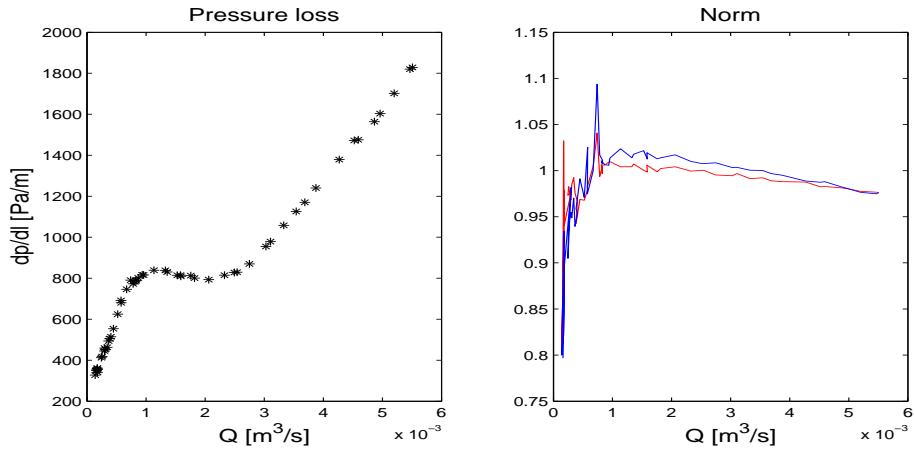


(c)

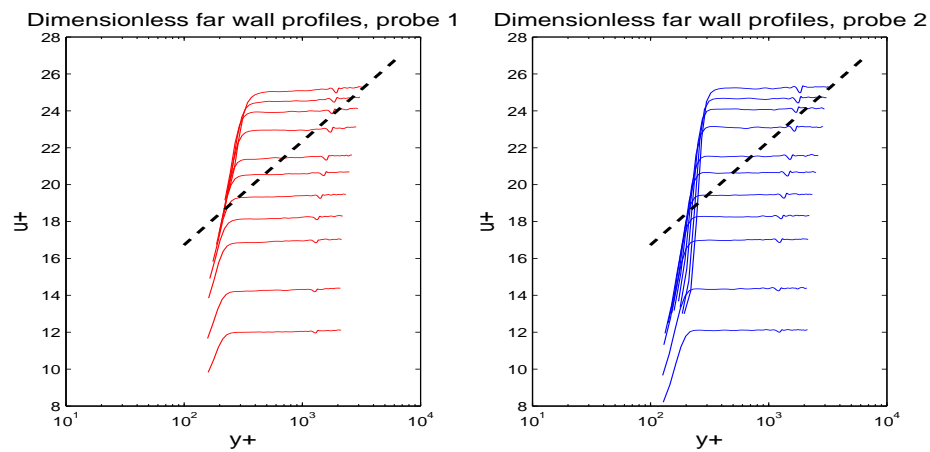


Kuva B.8: Mänty 1,50 %.

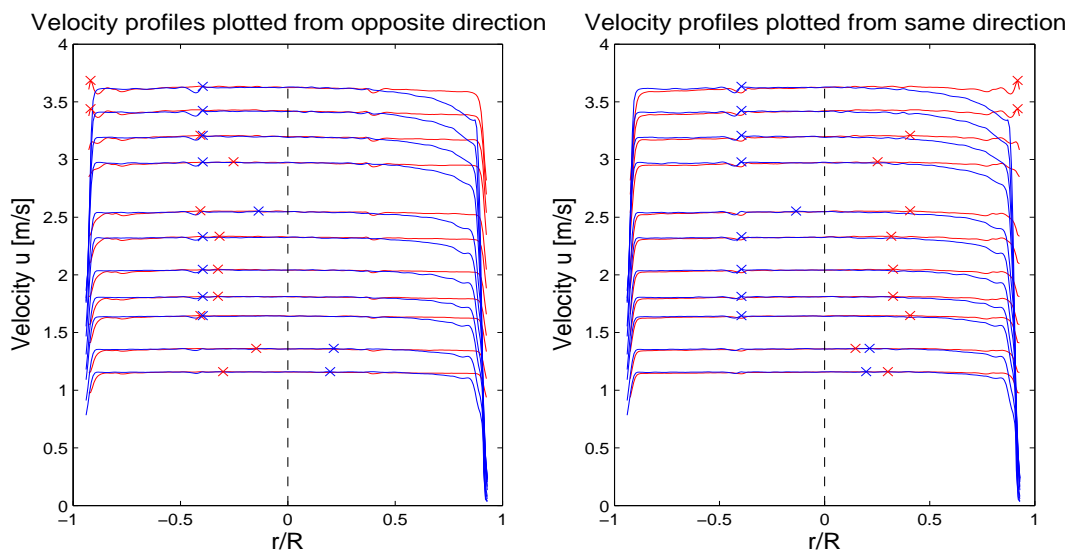
(a)



(b)

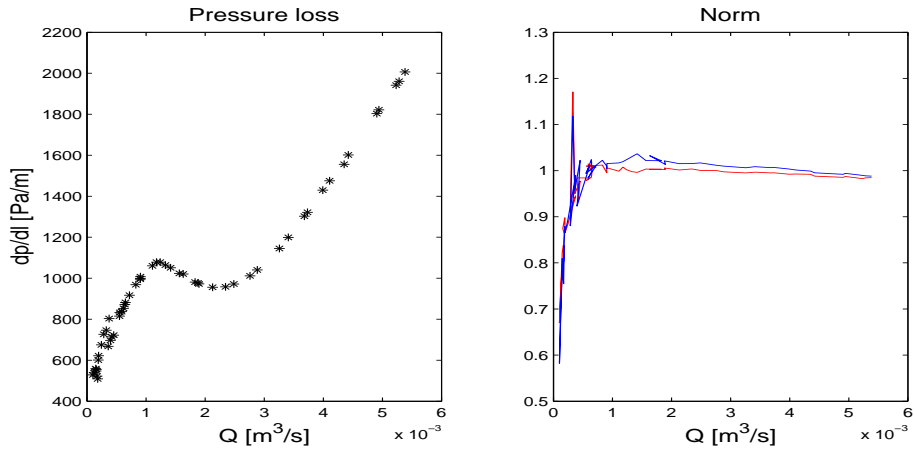


(c)

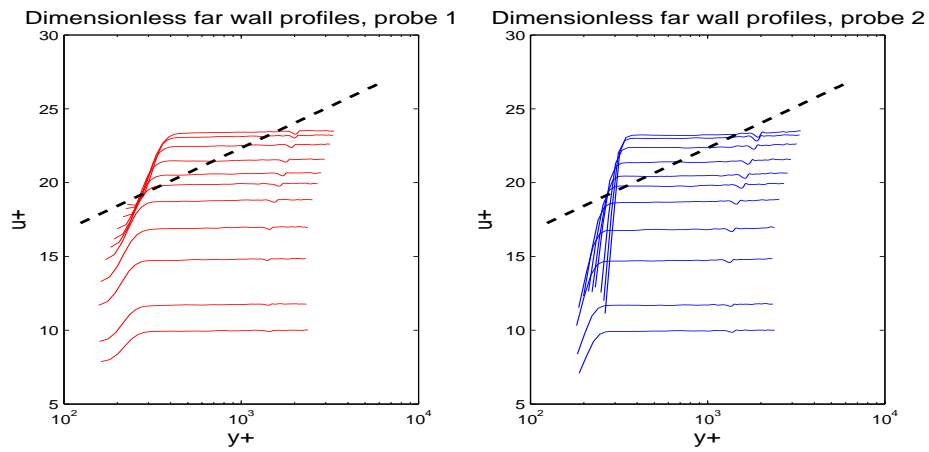


Kuva B.9: Mänty 1,75 %.

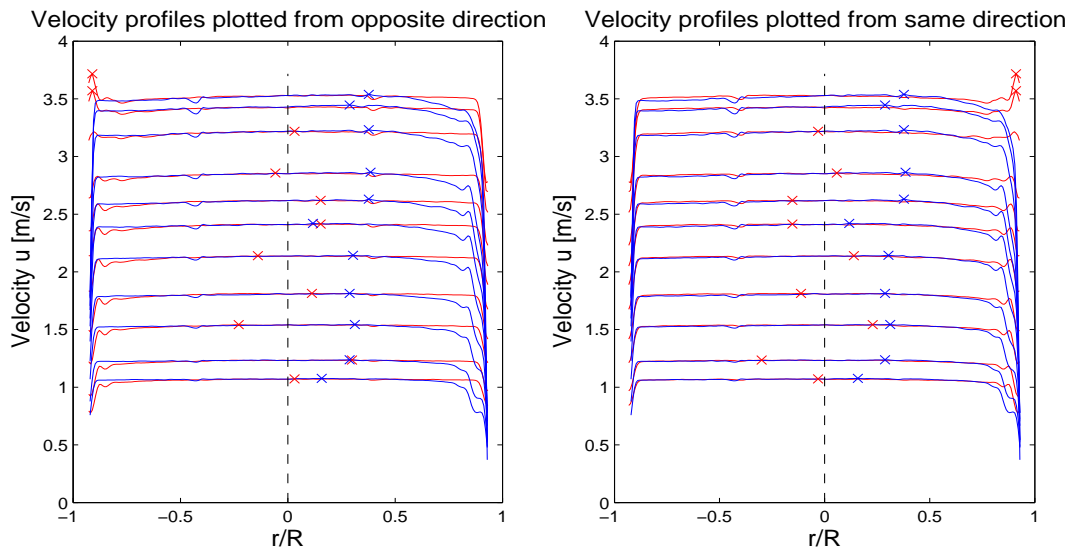
(a)



(b)

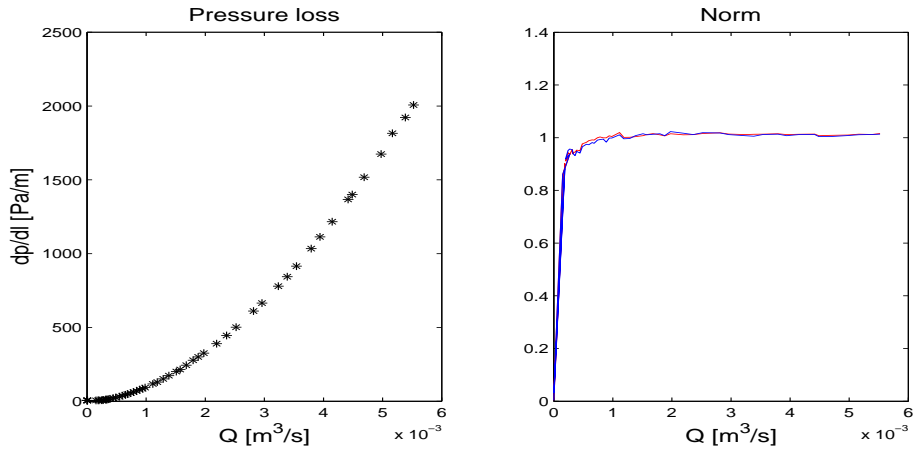


(c)

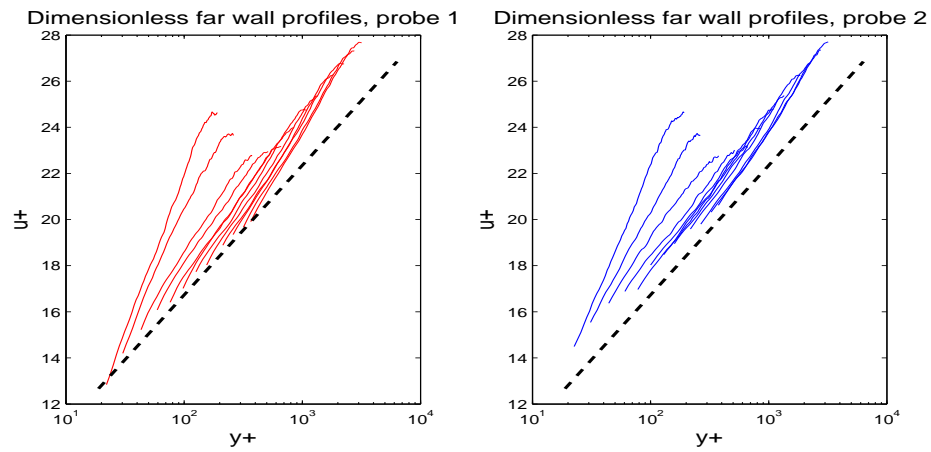


Kuva B.10: Mänty 2,00 %.

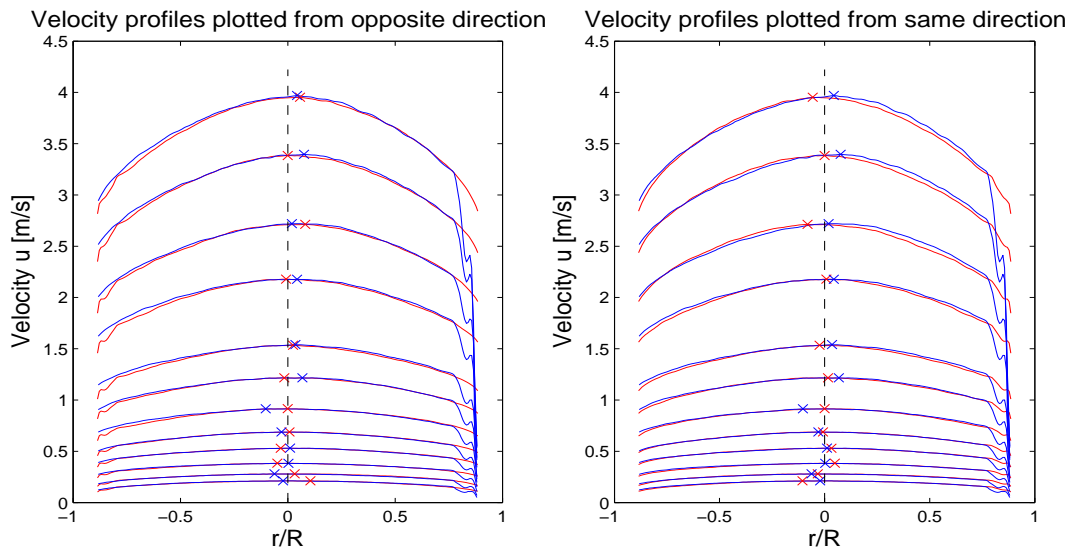
(a)



(b)

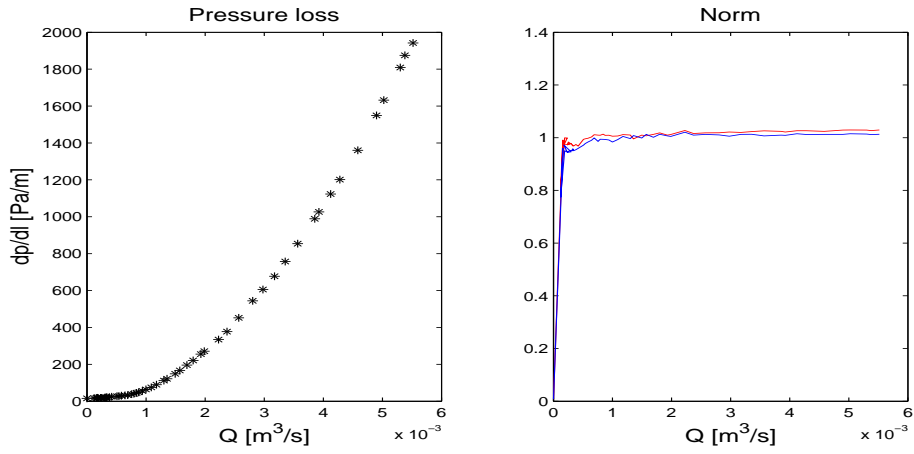


(c)

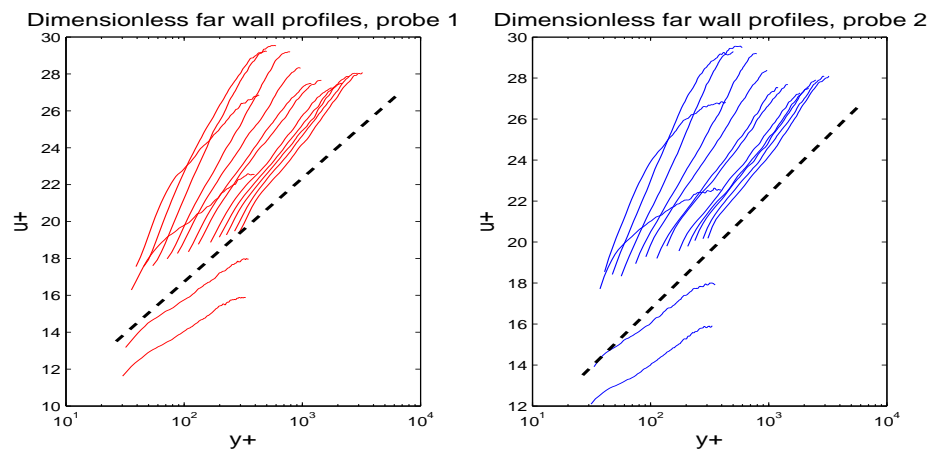


Kuva B.11: Koivu 0,25 %.

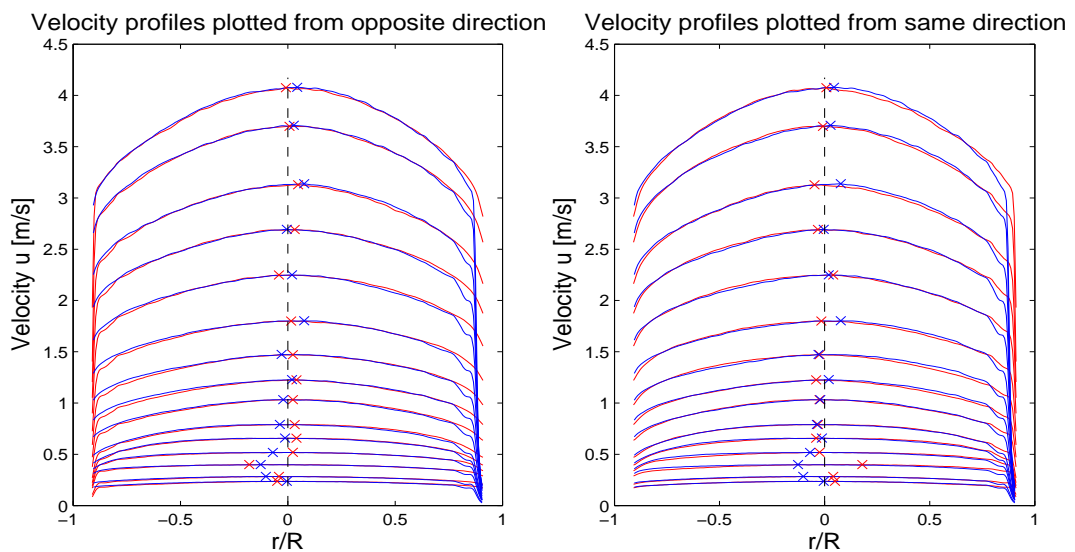
(a)



(b)

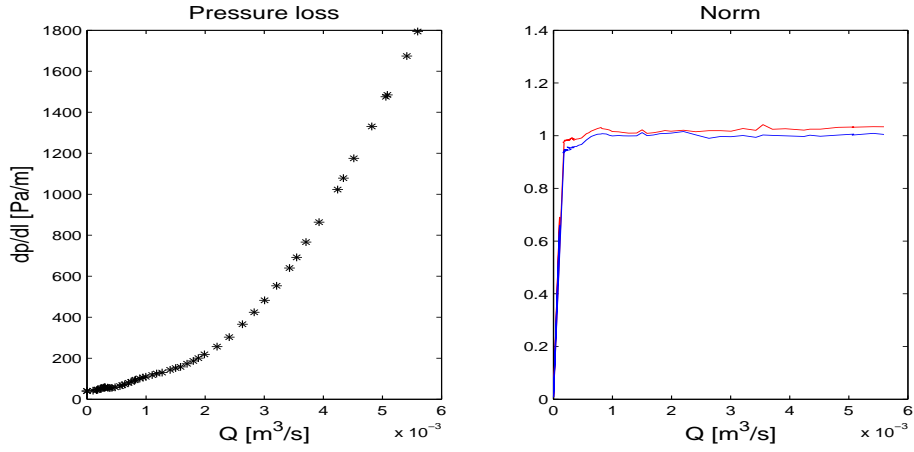


(c)

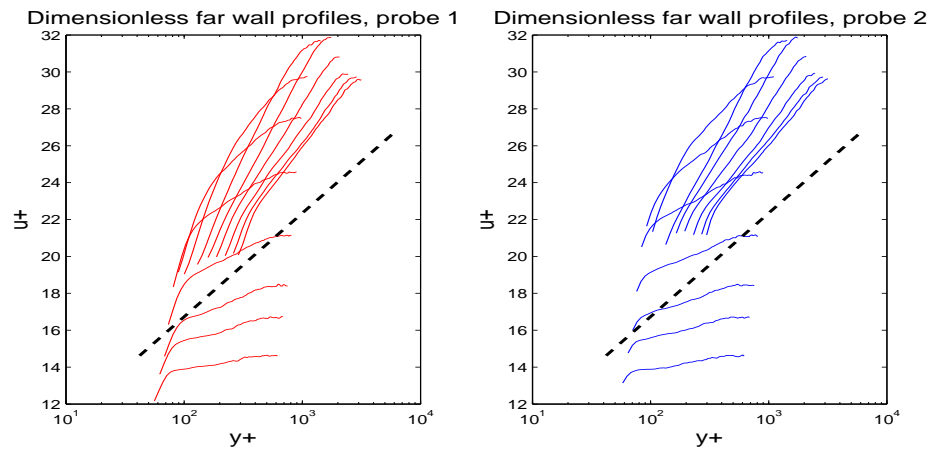


Kuva B.12: Koivu 0,50 %.

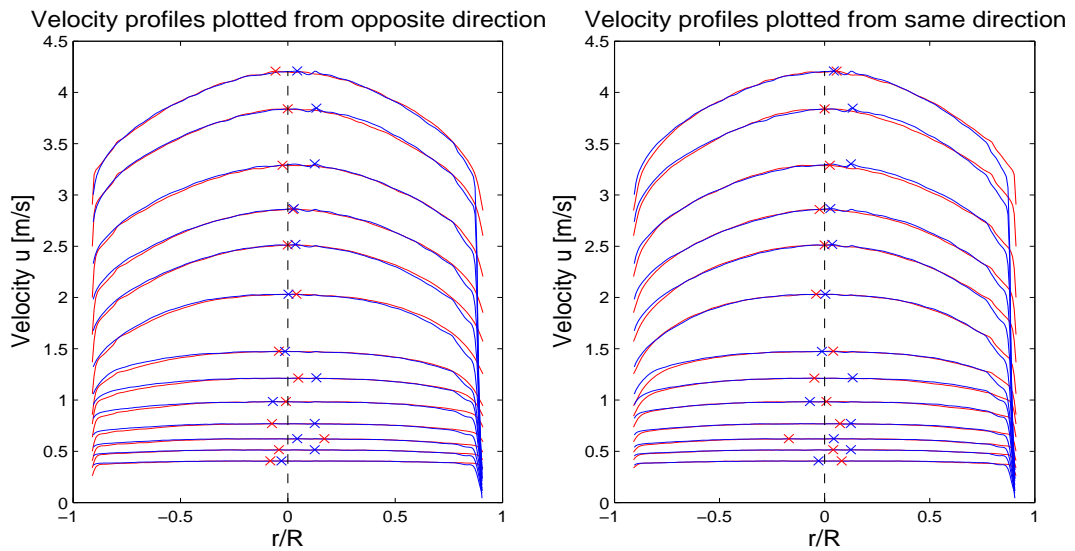
(a)



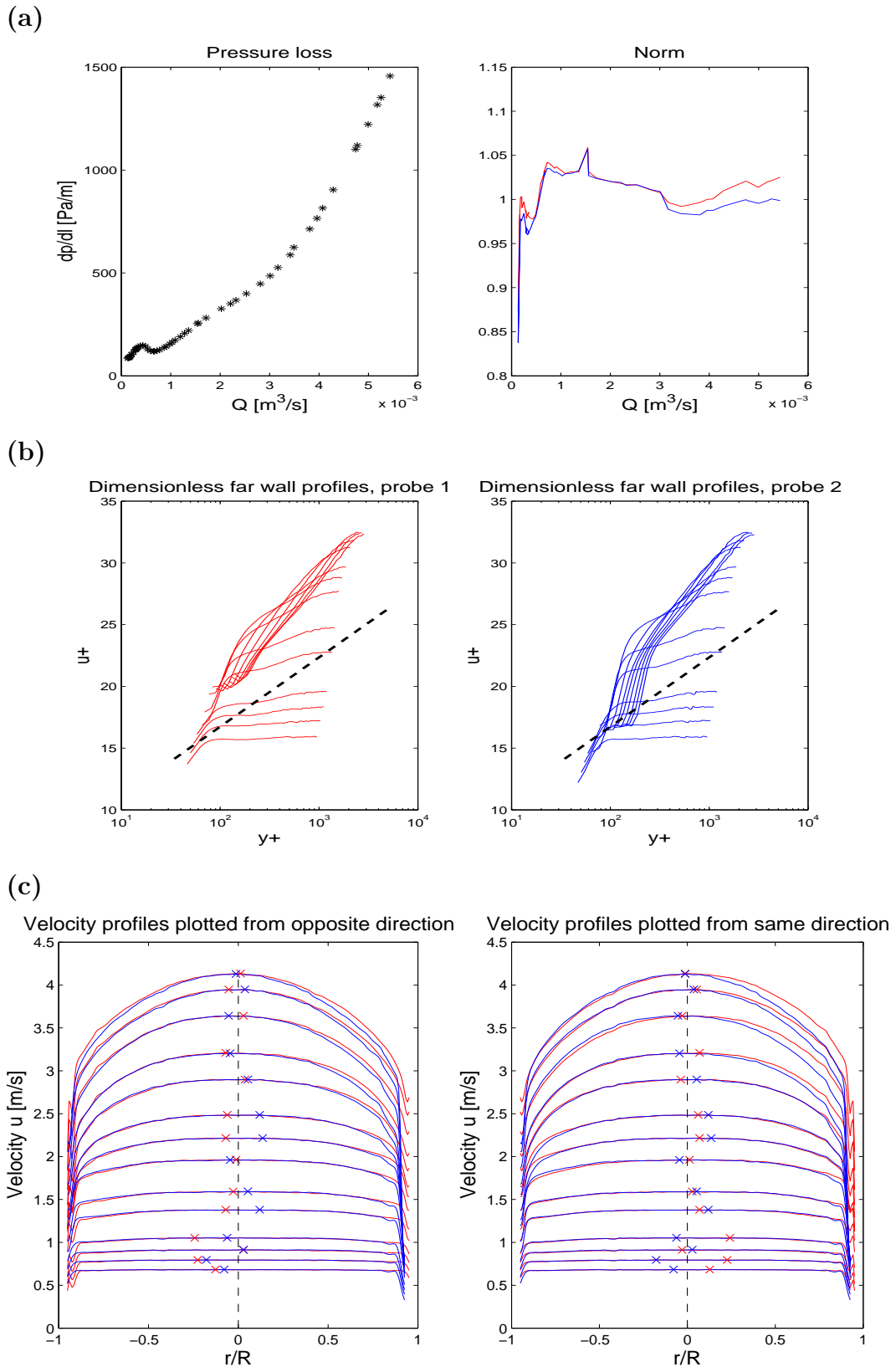
(b)



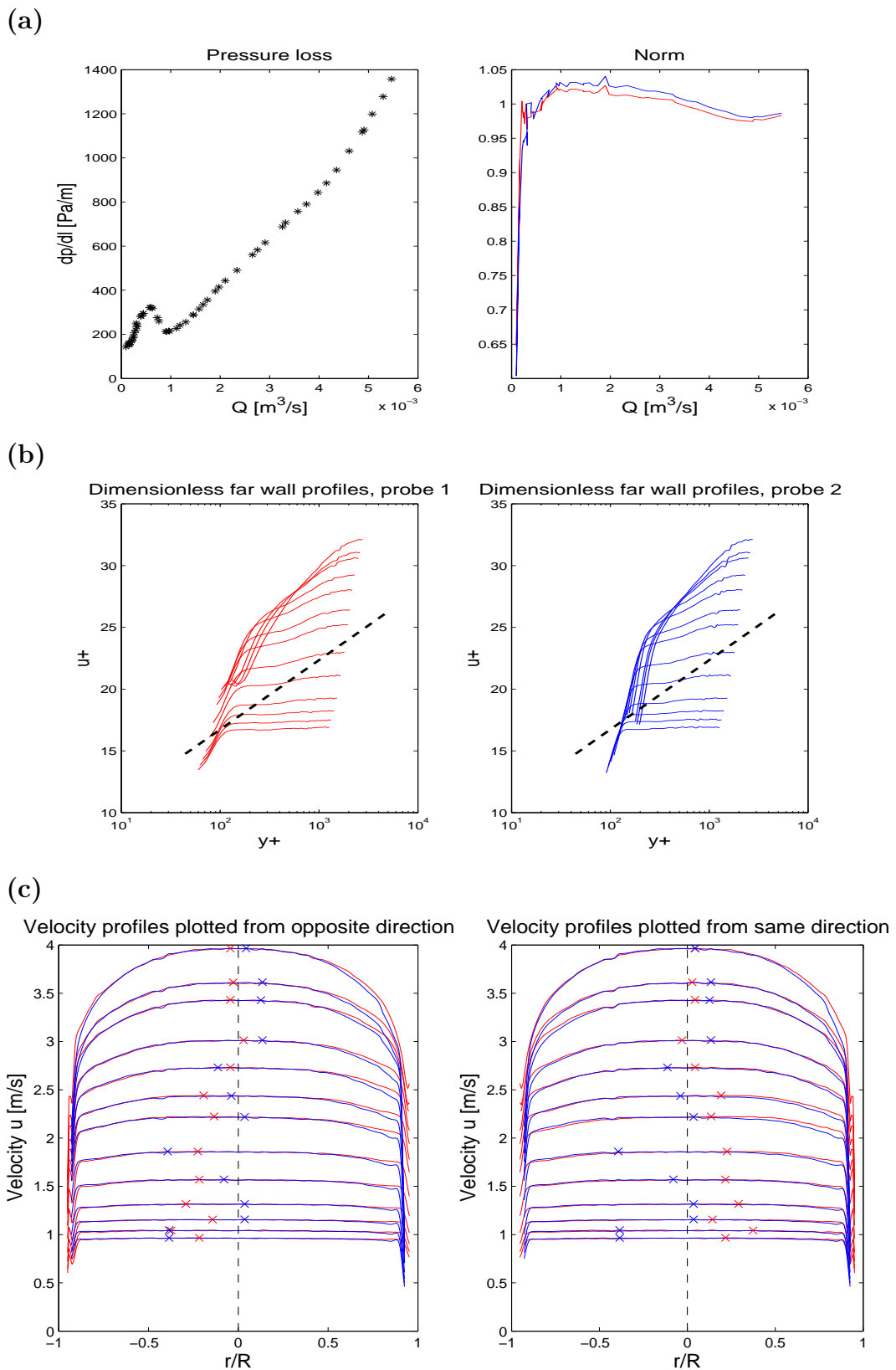
(c)



Kuva B.13: Koivu 0,75 %.

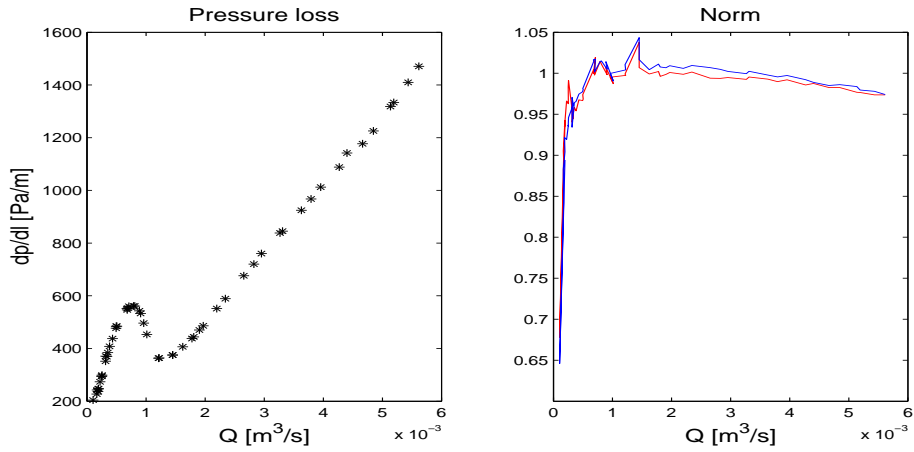


Kuva B.14: Koivu 1,00 %.

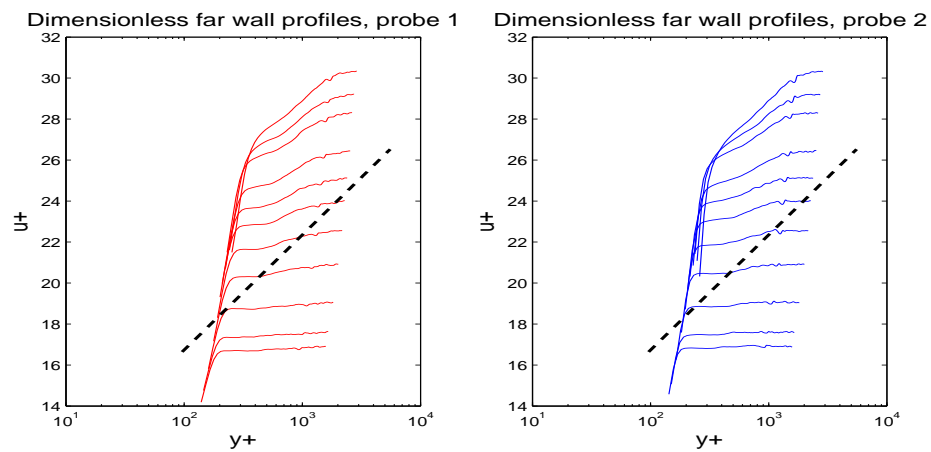


Kuva B.15: Koivu 1,25 %.

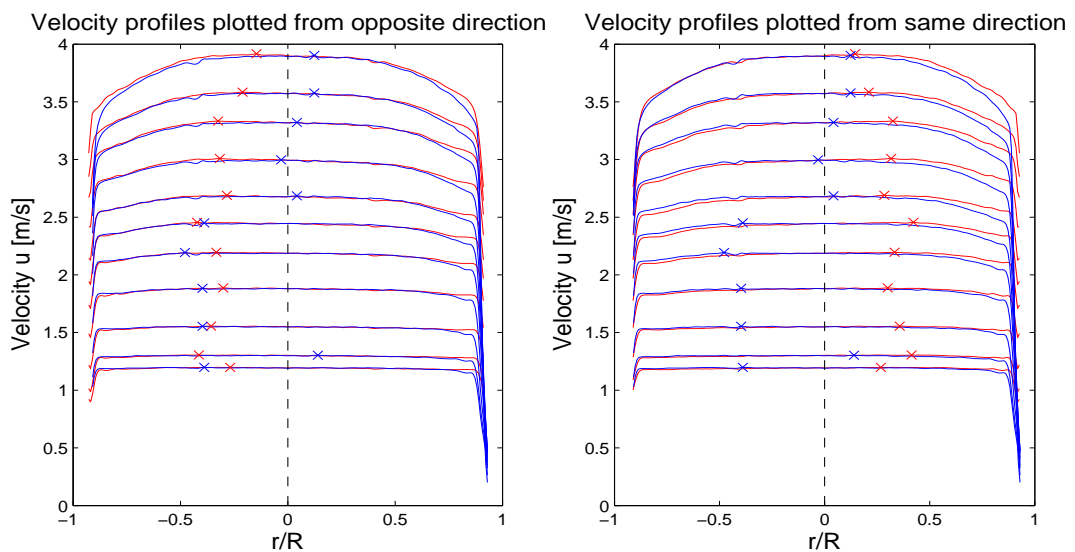
(a)



(b)

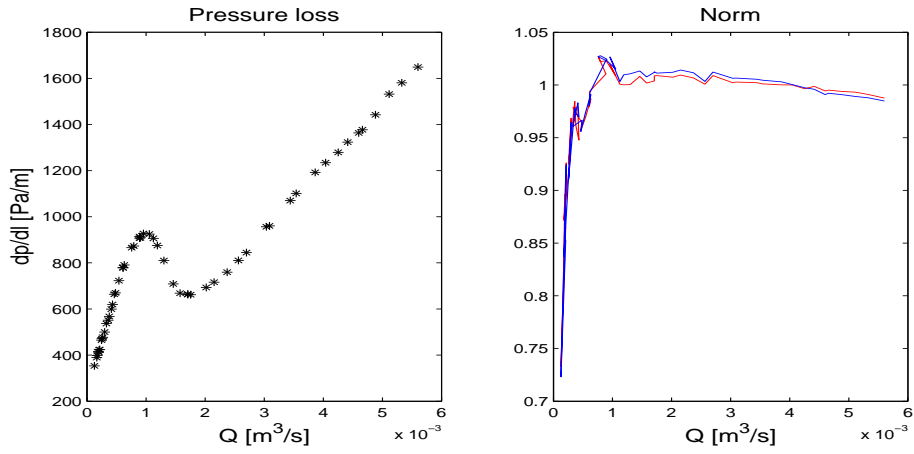


(c)

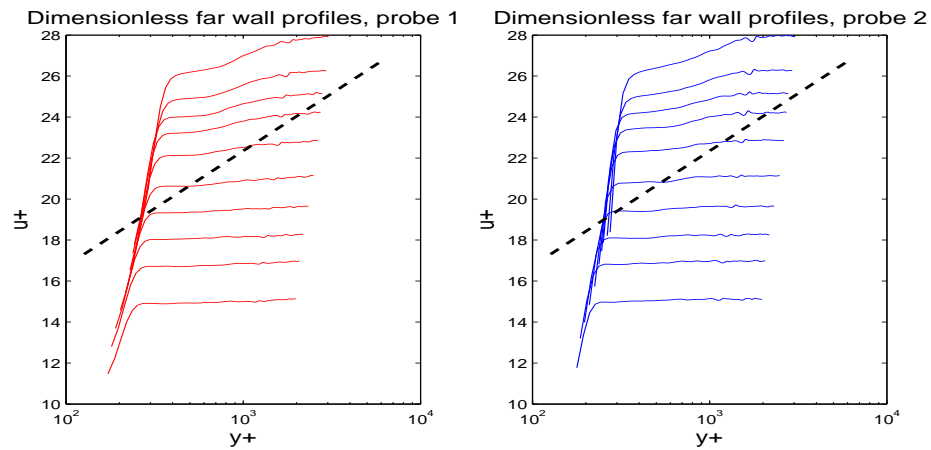


Kuva B.16: Koivu 1,50 %.

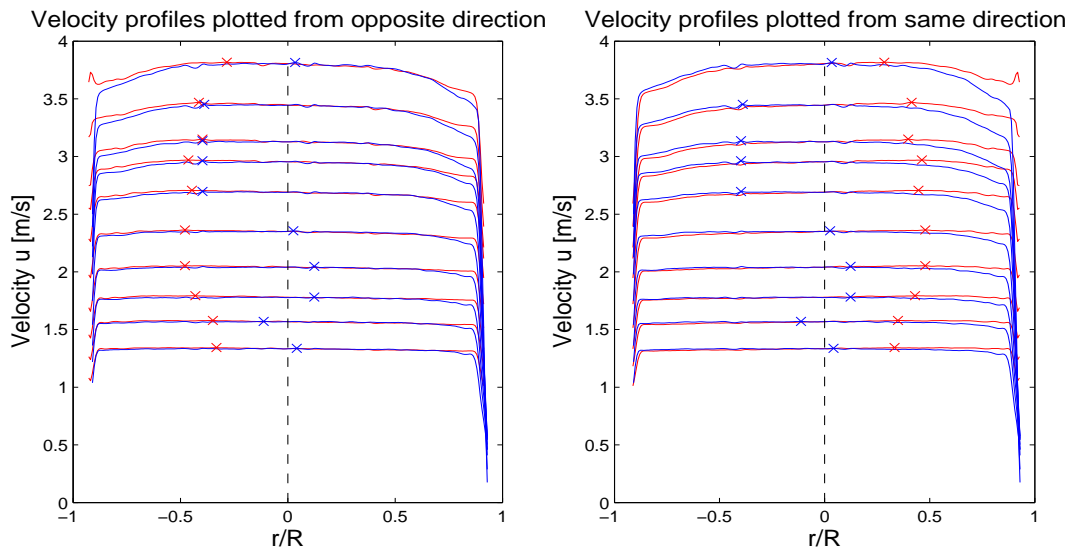
(a)



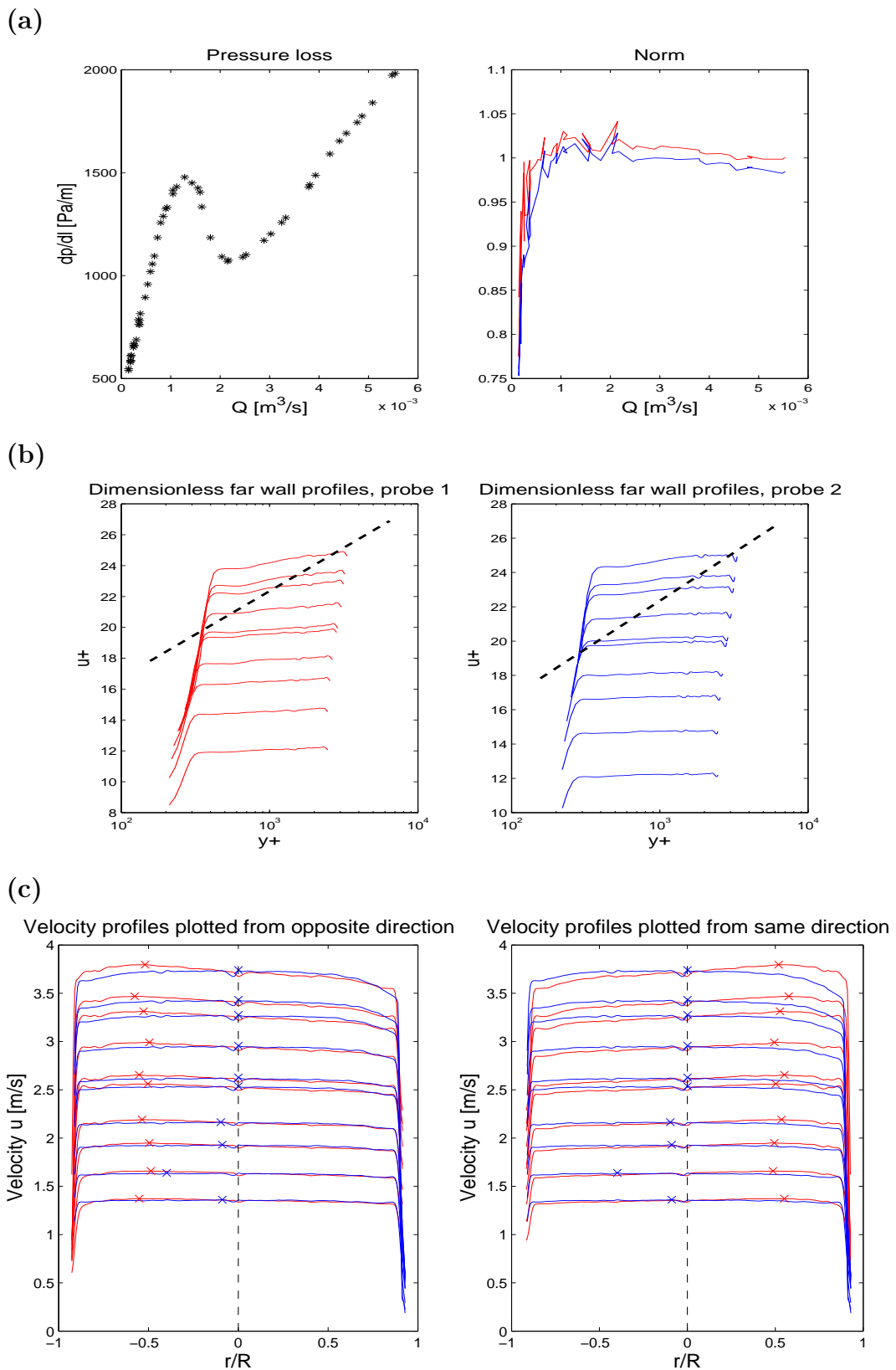
(b)



(c)



Kuva B.17: Koivu 1,75 %.



Kuva B.18: Koivu 2,00 %.

Liite C

Virtausprofiilin ja painehäviön sovitukset

Tarkastellaan kuvissa C.1-C.13 on esitettyä kolmea erilaista kuvaa **(a)**–**(c)**. Kuvissa **(a)** ja **(c)** on punaisella käyrällä esitetty ultraäänianturilla 1 ja sinisellä käyrällä ultraäänianturilla 2 mitatut arvot. Kuvassa **(a)** on esitetty dimensioton virtausnopeus u^+ dimensiottoman paikan y^+ funktiona puoli-logaritmisella asteikolla ja mustalla katkonaisella suoralla on esitetty veden turbulenttisen alueen newtoninen virtausprofiili. Yhtälön (2.10) mukaan tehty sovitus on esitetty vihreällä käyrällä kuvissa **(a)** ja **(c)**, joissa on käytetty yhtälön (4.2) mukaan määritettyä arvoa n . Kuvassa **(b)** on esitetty painehäviö virtaaman funktiona. Siinä punaiset ja siniset x-merkit edustavat mitattua painehäviötä, ja vihreällä käyrällä on esitetty yhtälön (2.12) mukainen sovitus. Vihreät +-merkit ovat kuvissa **(a)** ja **(c)** esiintyvien sovitettujen profiilien painehäviöitä. Kuvassa **(c)** on esitetty kuvassa **(a)** esiintyvä virtausprofiili dimensiollisena ja lineaarisella asteikolla. Sovitusten parametrit löytyvät kuvan **(c)** alapuolelta. Kuvien **(a)** ja **(c)** kuvaajissa profiilin esitys rajoitetaan anturin vastakkaiselta seinämältä aina putken keskilinjalle. Jokaisen virtausprofiilin ja painehäviön analyysiin käytettiin pelkästään ultraäänianturin vastakkaisen seinämän alueelta mitattuja virtausprofileja, jotka normitettiin liitteessä B esitetyllä tavalla. Kuvat C.1–C.13 on otsikoitu sus-

pension puukuitumateriaalin ja sakeuden mukaan. Taulukoissa C.1 ja C.2 on esitetty sovituksiin käytettyjen parametrien α , y_H^+ , y_L^+ , u_C^* ja n arvot.

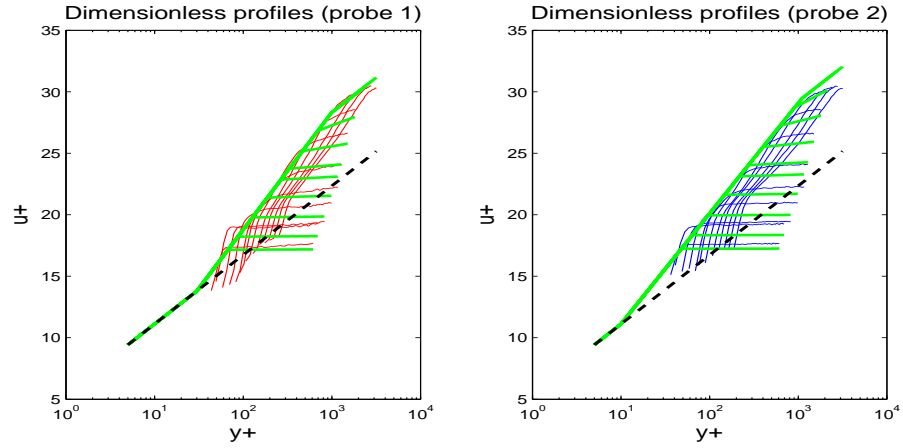
Taulukko C.1: Sovitukseen käytetyt arvot (ultraäänianturi 1)

Puukuitu ja suspension sakeus	α	y_H^+	u_C^* (m/s)	y_L^+	n
Mänty 0,50 %	0,7	1000	0,00387472	30	2,1499
Mänty 0,75 %	0,9	1100	0,00408053	40	1,9311
Mänty 1,00 %	1,2	1200	0,00672606	95	2,2656
Mänty 1,25 %	1,5	1200	0,00416098	95	1,7894
Mänty 1,50 %	2,4	1600	0,00386222	160	1,7040
Mänty 1,75 %	4,7	1600	0,00186889	210	1,3406
Mänty 2,00 %	4,5	1600	0,00106250	270	1,1925
Koivu 1,00 %	2,5	180	0,00771323	60	2,2895
Koivu 1,25 %	2,7	250	0,00583018	90	1,9066
Koivu 1,50 %	4,4	420	0,00308761	200	1,5967
Koivu 1,75 %	6,4	800	0,00391868	250	1,6762
Koivu 2,00 %	6,4	800	0,00476781	340	1,7550

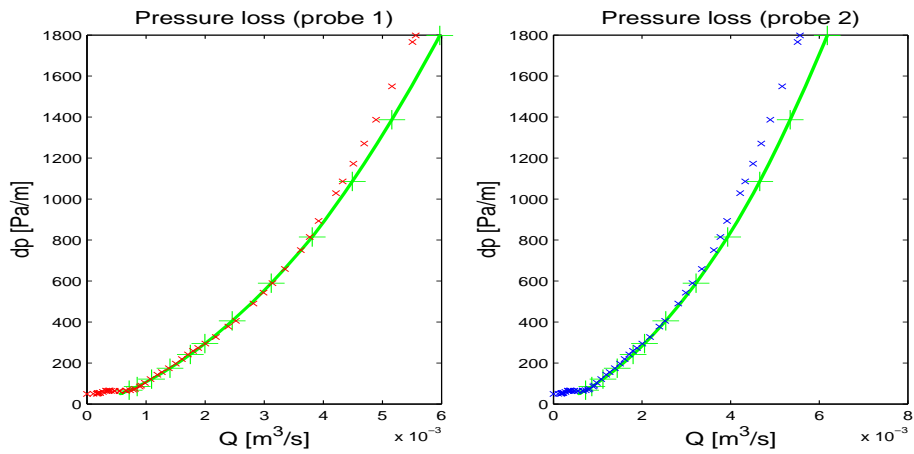
Taulukko C.2: Sovitukseen käytetyt arvot (ultraäänianturi 2)

Puukuitu ja suspension sakeus	α	y_H^+	u_C^* (m/s)	y_L^+	n
Mänty 0,50 %	0,6	1100	0,00533033	10	2,3598
Mänty 0,75 %	0,9	1100	0,00417649	35	1,9225
Mänty 1,00 %	1,3	1100	0,00612103	90	2,1505
Mänty 1,25 %	1,7	1100	0,00389780	75	1,6845
Mänty 1,50 %	3,0	1600	0,00233543	160	1,4590
Mänty 1,75 %	5,0	1600	0,00163097	200	1,2872
Mänty 2,00 %	8,0	1600	0,00005140	270	0,7246
Koivu 1,00 %	2,9	180	0,00615833	70	2,0845
Koivu 1,25 %	3,0	320	0,00492632	130	1,8872
Koivu 1,50 %	4,8	440	0,00259448	200	1,5209
Koivu 1,75 %	6,8	800	0,00332941	250	1,5991
Koivu 2,00 %	6,8	900	0,00526145	270	1,7542

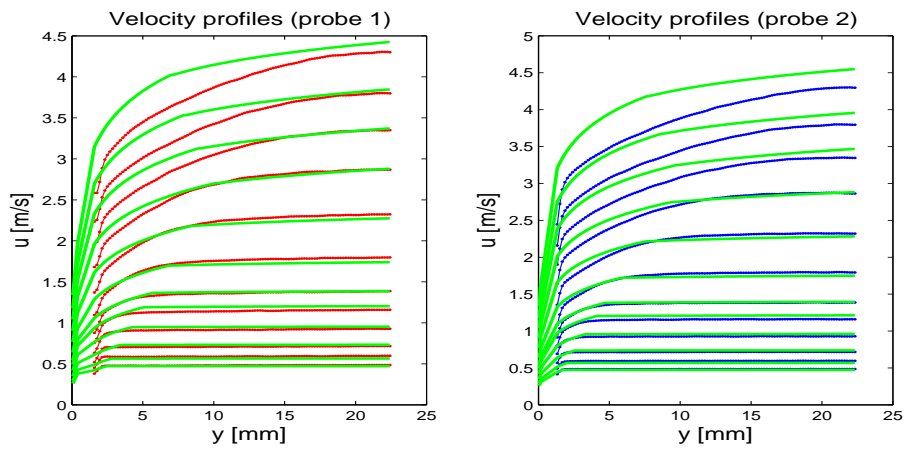
a)



b)



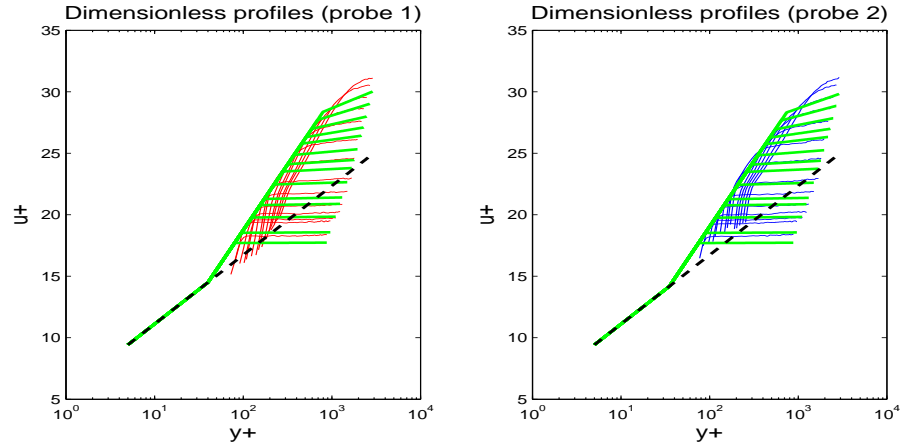
c)



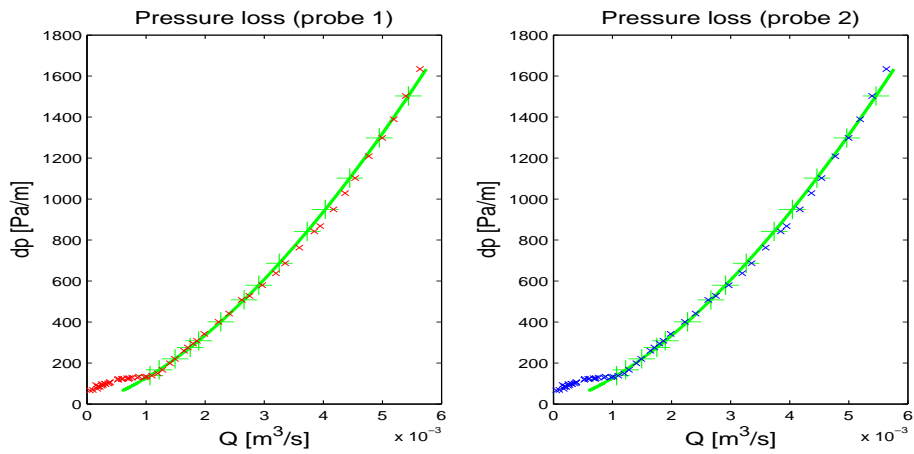
$\alpha = 0,7$	$y_H^+ = 1000$	$\alpha = 0,6$	$y_H^+ = 1100$
$u_C^* = 0,00387472 \text{ m/s}$	$y_L^+ = 30$	$u_C^* = 0,00533033 \text{ m/s}$	$y_L^+ = 10$
$n = 2,1499$		$n = 2,3598$	

Kuva C.1: Mänty 0,50 %.

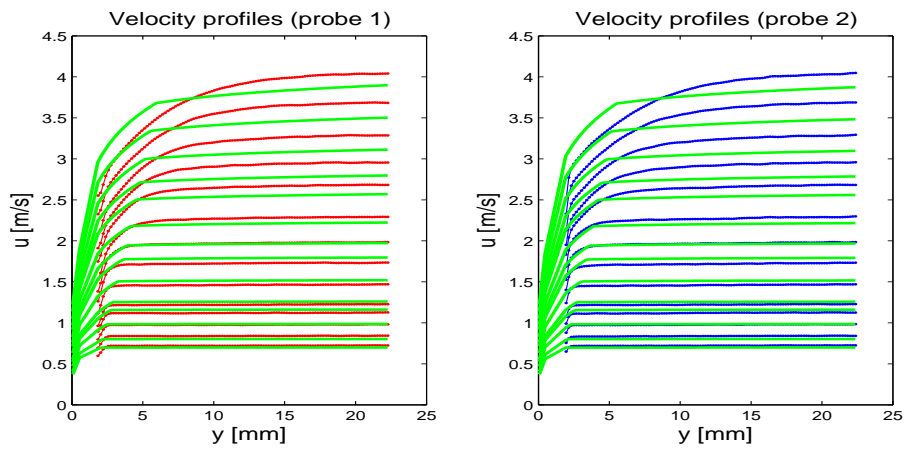
a)



b)



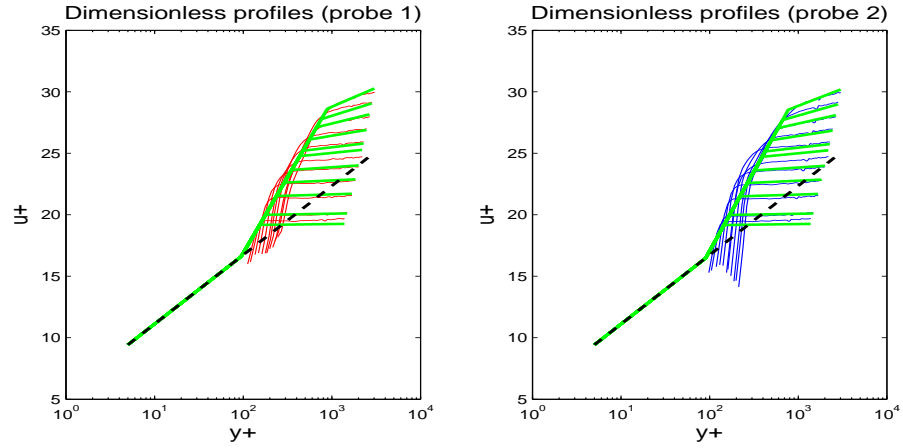
c)



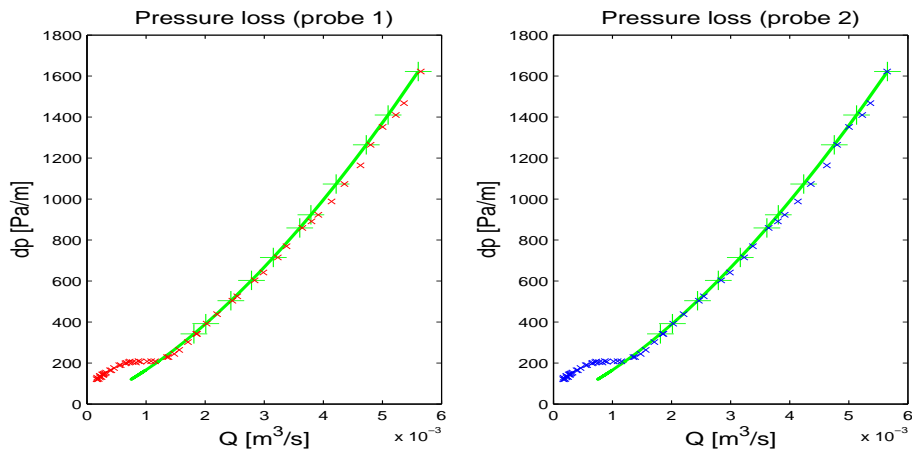
$\alpha = 0,9$	$y_H^+ = 1100$	$\alpha = 0,9$	$y_H^+ = 1100$
$u_C^* = 0,00408053 \text{ m/s}$	$y_L^+ = 40$	$u_C^* = 0,00417649 \text{ m/s}$	$y_L^+ = 35$
$n = 1,9311$		$n = 1,9225$	

Kuva C.2: Mänty 0,75 %.

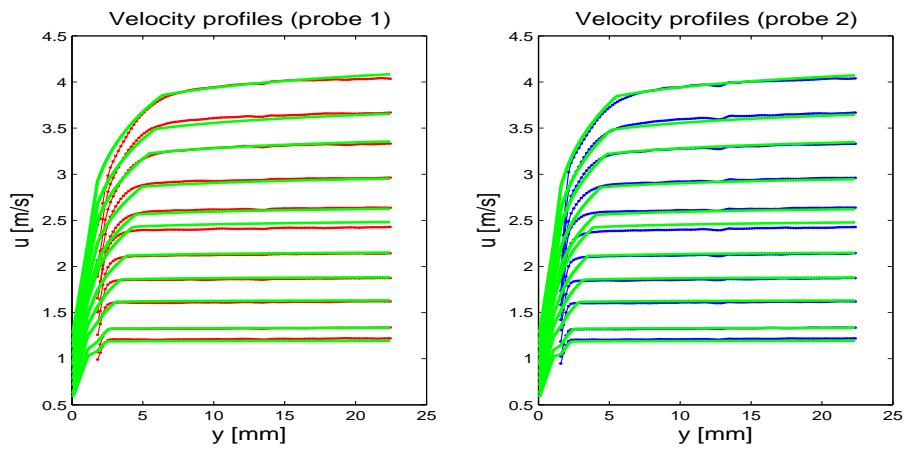
a)



b)



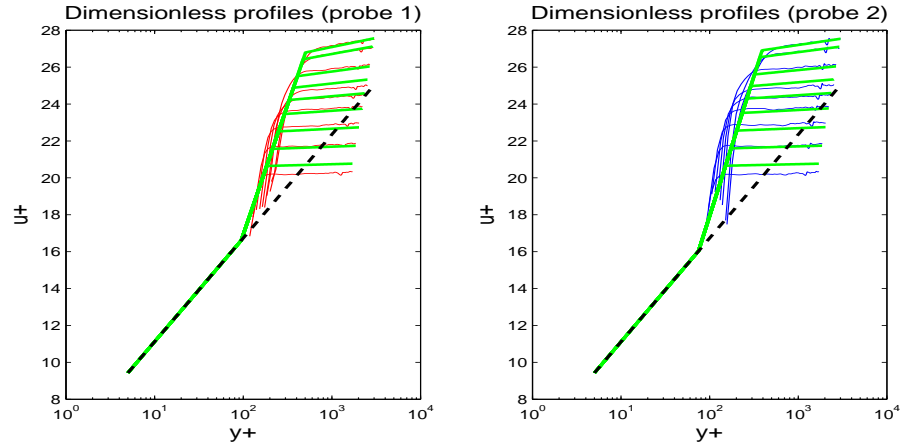
c)



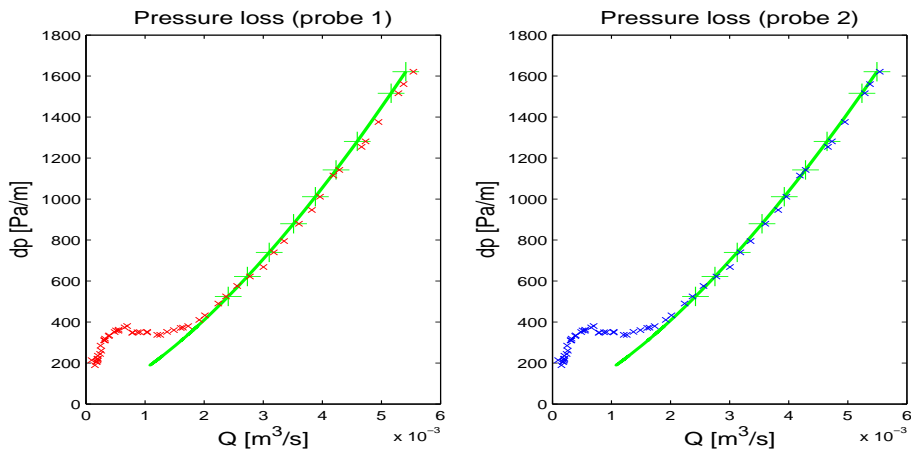
$\alpha = 1,2$	$y_H^+ = 1200$	$\alpha = 1,3$	$y_H^+ = 1100$
$u_C^* = 0,00672606 \text{ m/s}$	$y_L^+ = 95$	$u_C^* = 0,00612103 \text{ m/s}$	$y_L^+ = 90$
$n = 2,2656$		$n = 2,1505$	

Kuva C.3: Mänty 1,00 %.

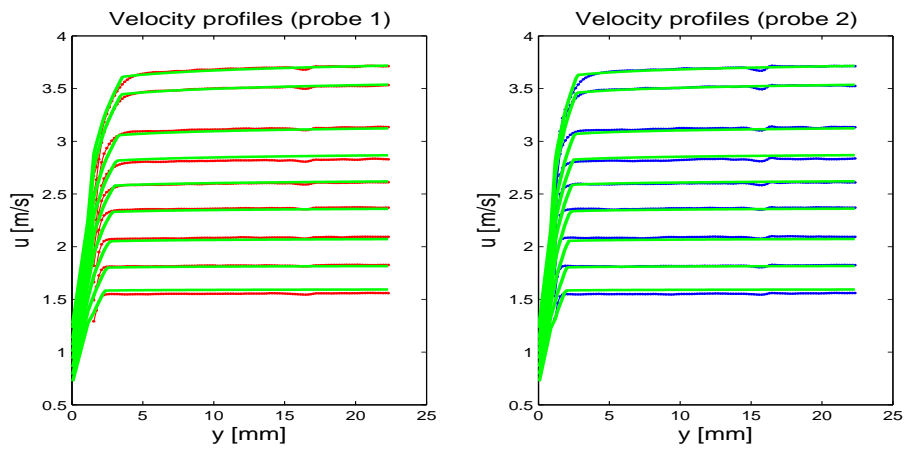
a)



b)



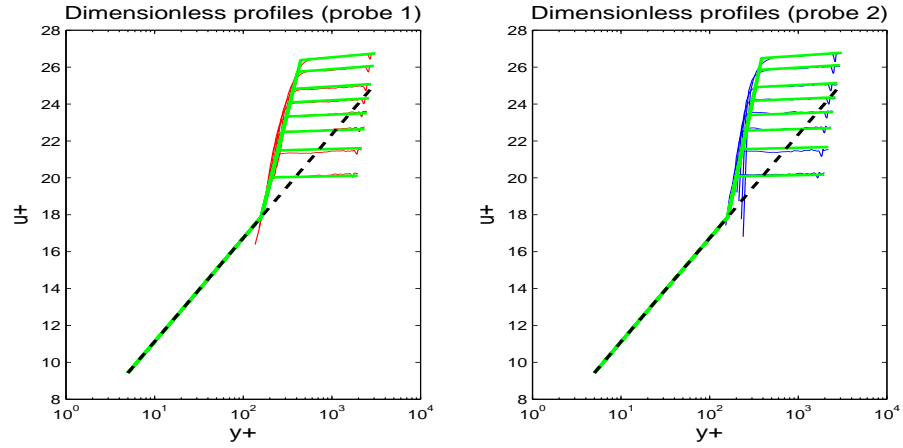
c)



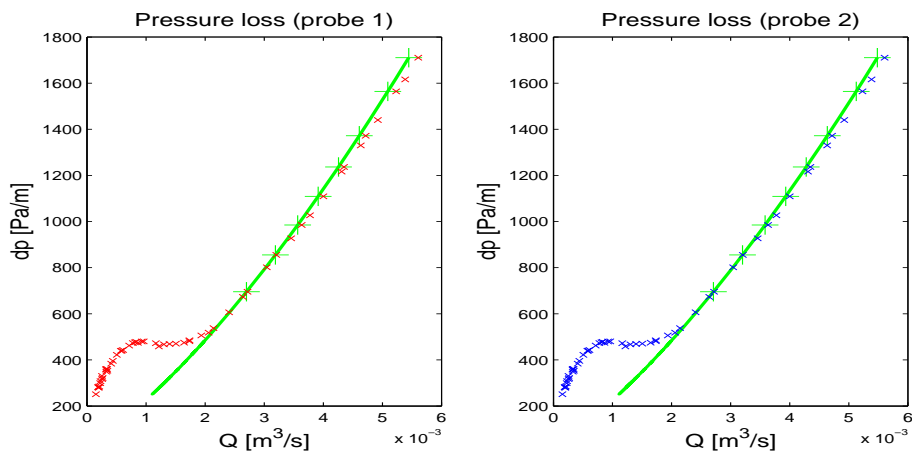
$\alpha = 1,5$	$y_H^+ = 1200$	$\alpha = 1,7$	$y_H^+ = 1100$
$u_C^* = 0,00416098 \text{ m/s}$	$y_L^+ = 95$	$u_C^* = 0,00389780 \text{ m/s}$	$y_L^+ = 75$
$n = 1,7894$		$n = 1,6845$	

Kuva C.4: Mänty 1,25 %.

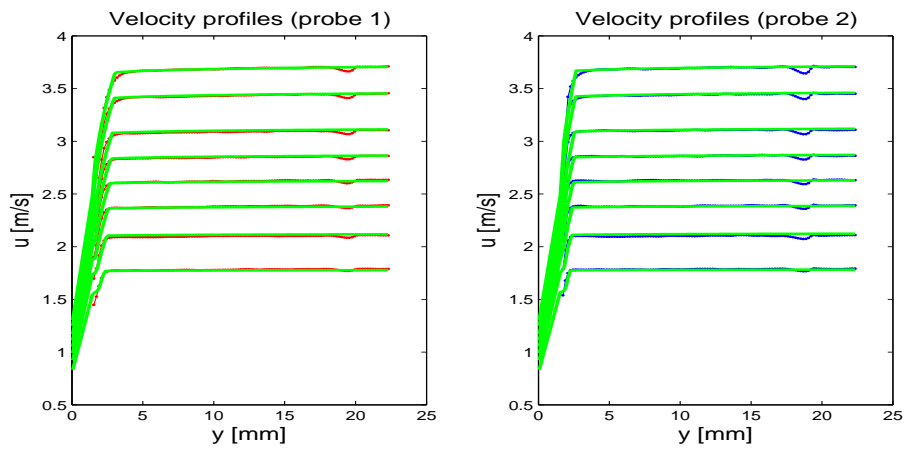
a)



b)



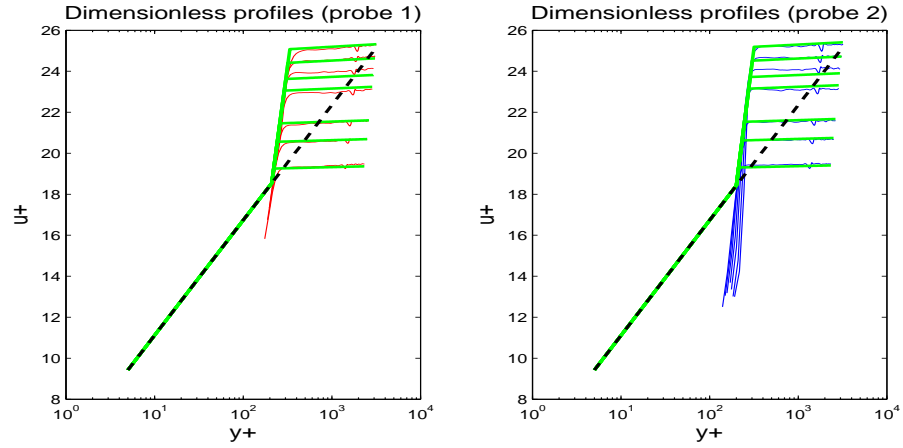
c)



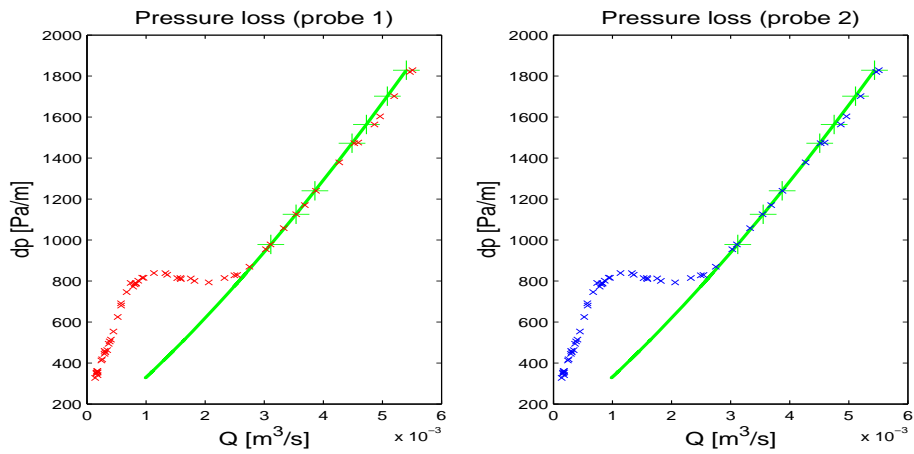
$\alpha = 2,4$	$y_H^+ = 1600$	$\alpha = 3,0$	$y_H^+ = 1600$
$u_C^* = 0,00386222 \text{ m/s}$	$y_L^+ = 160$	$u_C^* = 0,00233543 \text{ m/s}$	$y_L^+ = 160$
$n = 1,7040$		$n = 1,4590$	

Kuva C.5: Mänty 1,50 %.

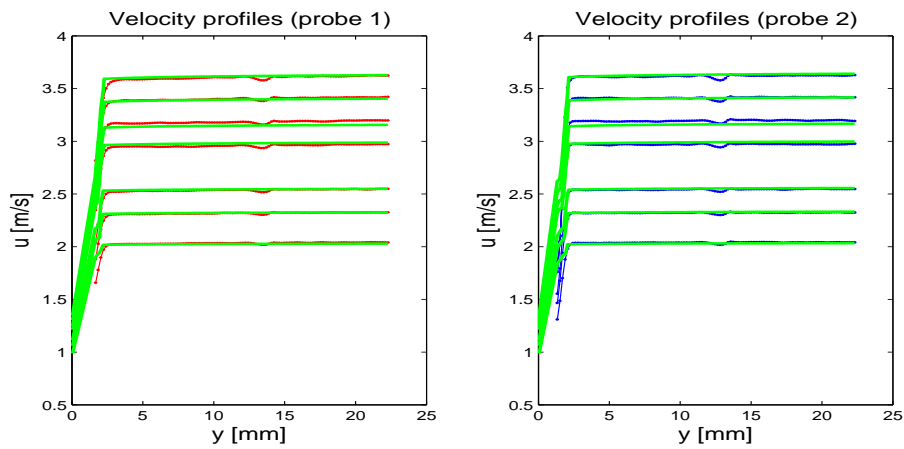
a)



b)



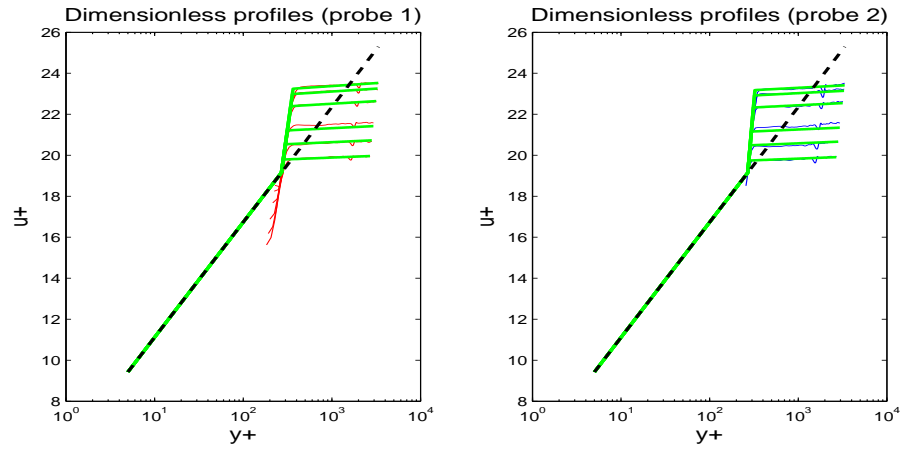
c)



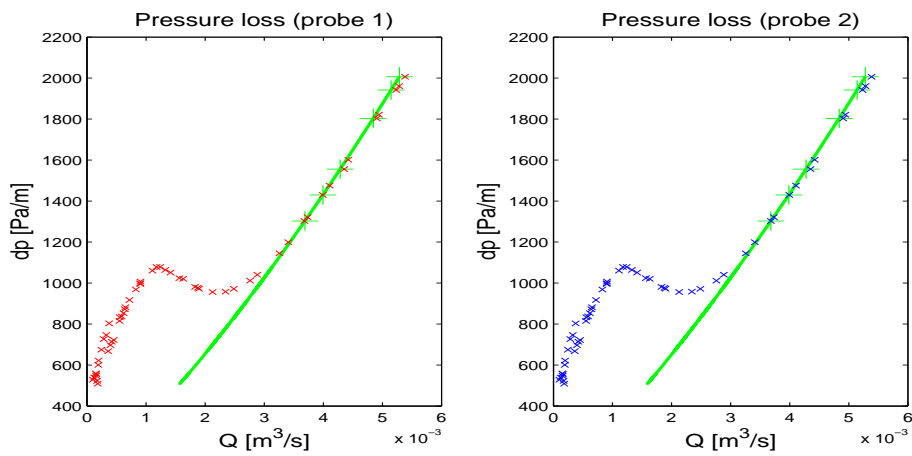
$\alpha = 4,7$	$y_H^+ = 1600$	$\alpha = 5,0$	$y_H^+ = 1600$
$u_C^* = 0,00186889 \text{ m/s}$	$y_L^+ = 210$	$u_C^* = 0,00163097 \text{ m/s}$	$y_L^+ = 200$
$n = 1,3406$		$n = 1,2872$	

Kuva C.6: Mänty 1,75 %.

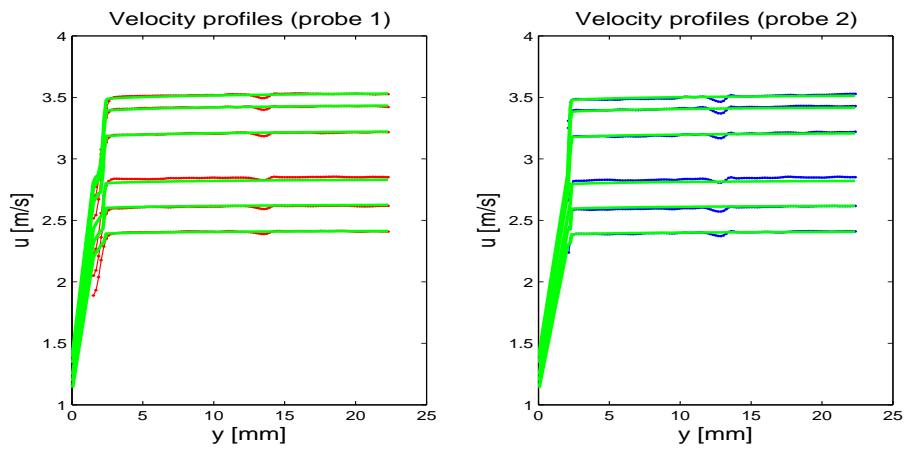
a)



b)



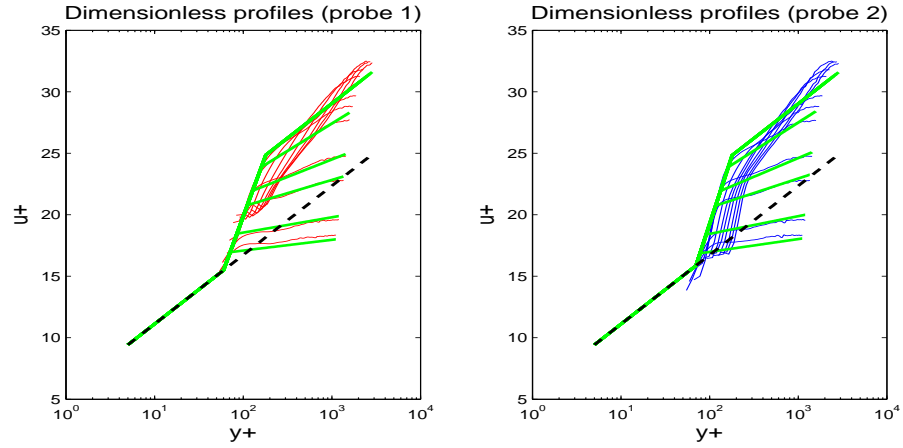
c)



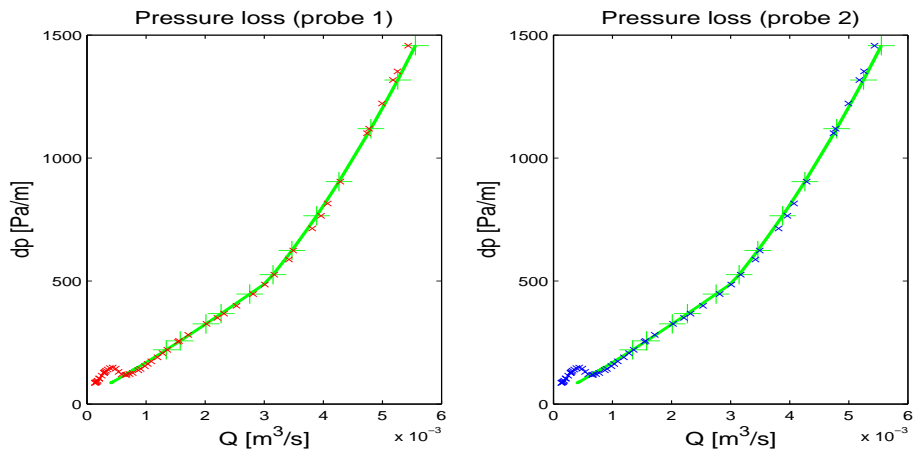
$\alpha = 4,5$	$y_H^+ = 1600$	$\alpha = 8,0$	$y_H^+ = 1600$
$u_C^* = 0,00106250 \text{ m/s}$	$y_L^+ = 270$	$u_C^* = 0,00005140 \text{ m/s}$	$y_L^+ = 270$
$n = 1,1925$		$n = 0,7246$	

Kuva C.7: Mänty 2,00 %.

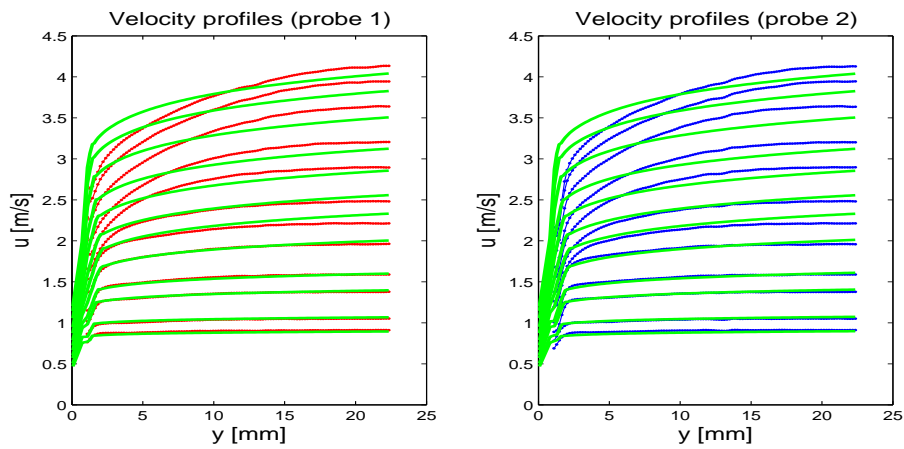
a)



b)



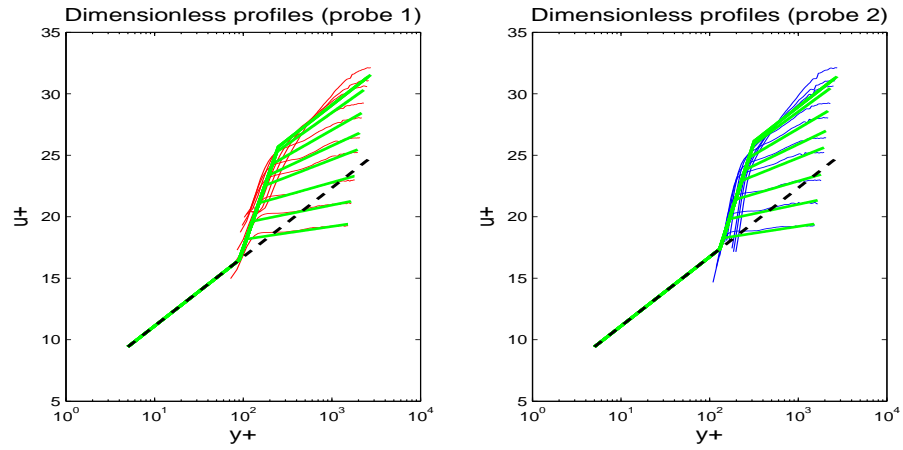
c)



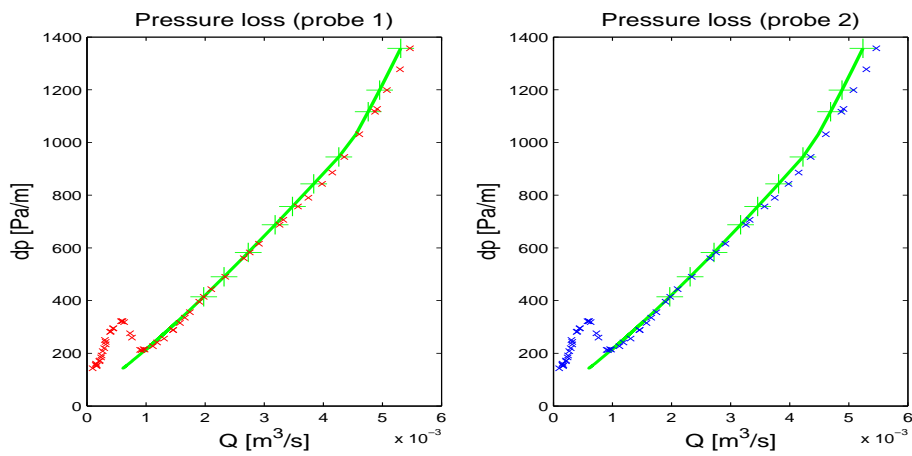
$\alpha = 2,5$	$y_H^+ = 180$	$\alpha = 2,9$	$y_H^+ = 180$
$u_C^* = 0,00771323 \text{ m/s}$	$y_L^+ = 60$	$u_C^* = 0,00615833 \text{ m/s}$	$y_L^+ = 70$
$n = 2,2895$		$n = 2,0845$	

Kuva C.8: Koivu 1,00 %.

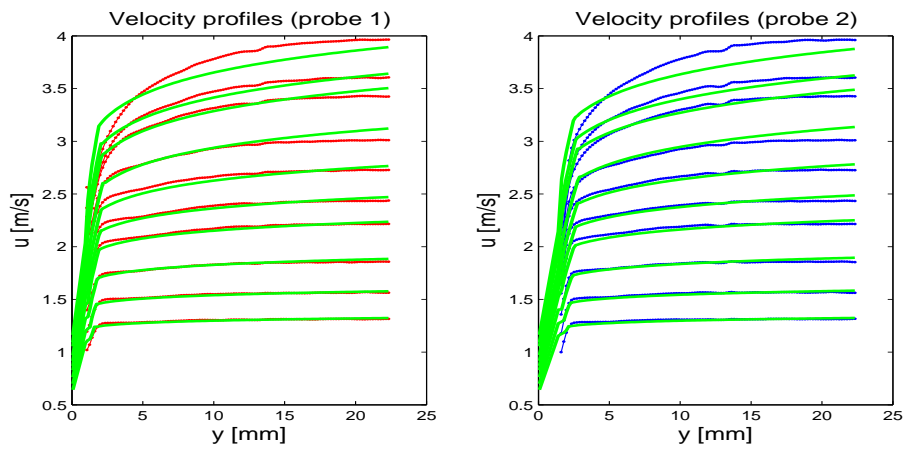
a)



b)



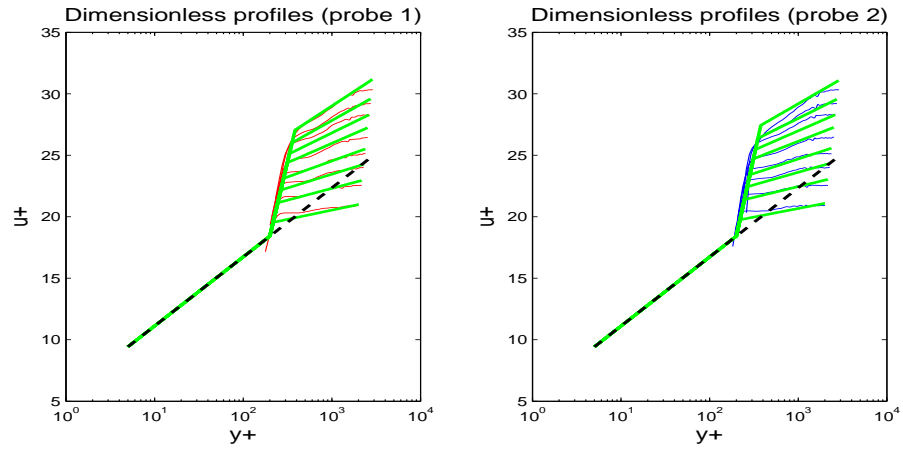
c)



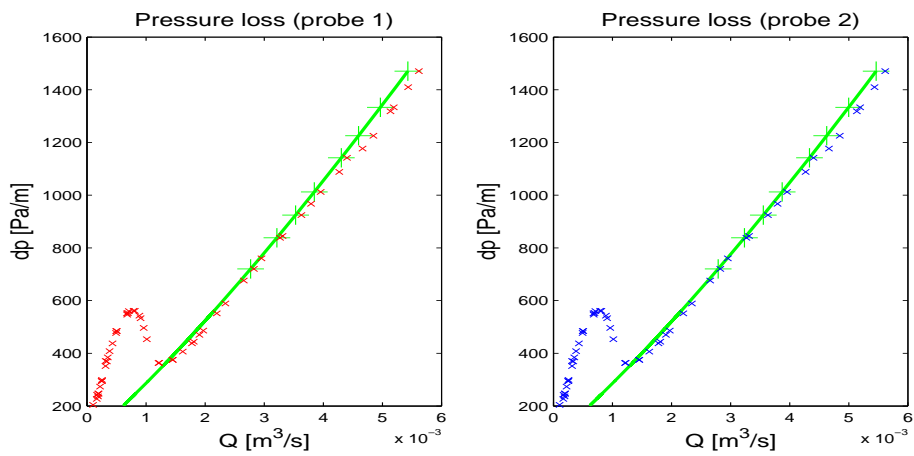
$\alpha = 2,7$	$y_H^+ = 250$	$\alpha = 3.0$	$y_H^+ = 320$
$u_C^* = 0,00583018 \text{ m/s}$	$y_L^+ = 90$	$u_C^* = 0,00492632 \text{ m/s}$	$y_L^+ = 130$
$n = 1,9066$		$n = 1,8872$	

Kuva C.9: Koivu 1,25 %.

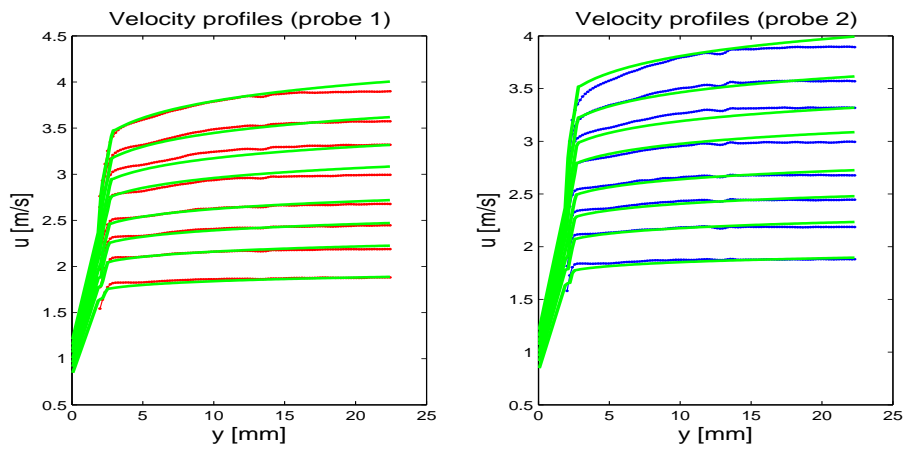
a)



b)



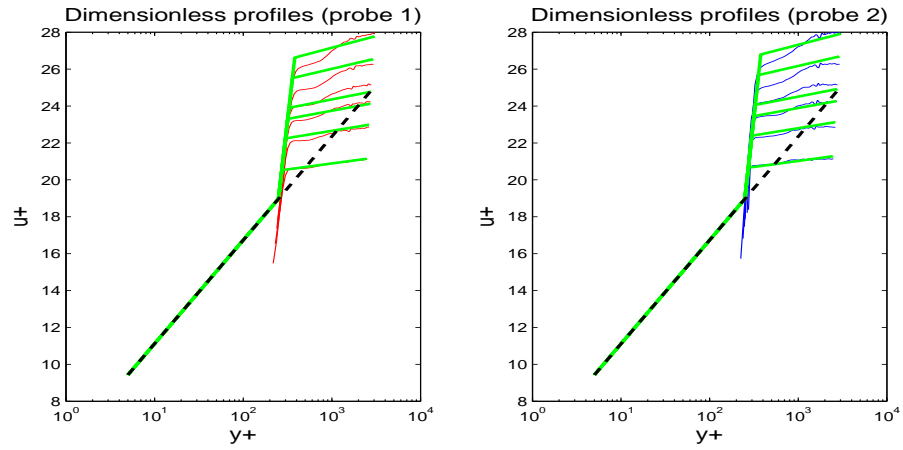
c)



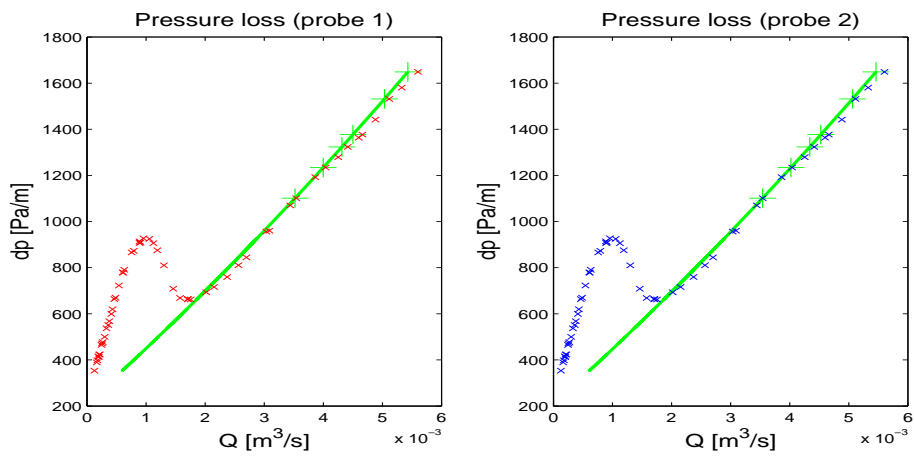
$\alpha = 4,4$	$y_H^+ = 420$	$\alpha = 4.8$	$y_H^+ = 440$
$u_C^* = 0,00308761 \text{ m/s}$	$y_L^+ = 200$	$u_C^* = 0,00259448 \text{ m/s}$	$y_L^+ = 200$
$n = 1,5967$		$n = 1,5209$	

Kuva C.10: Koivu 1,50 %.

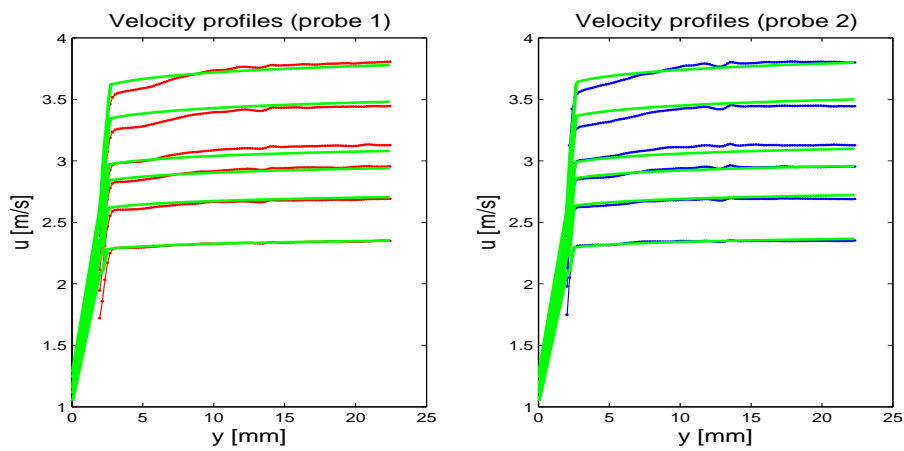
a)



b)



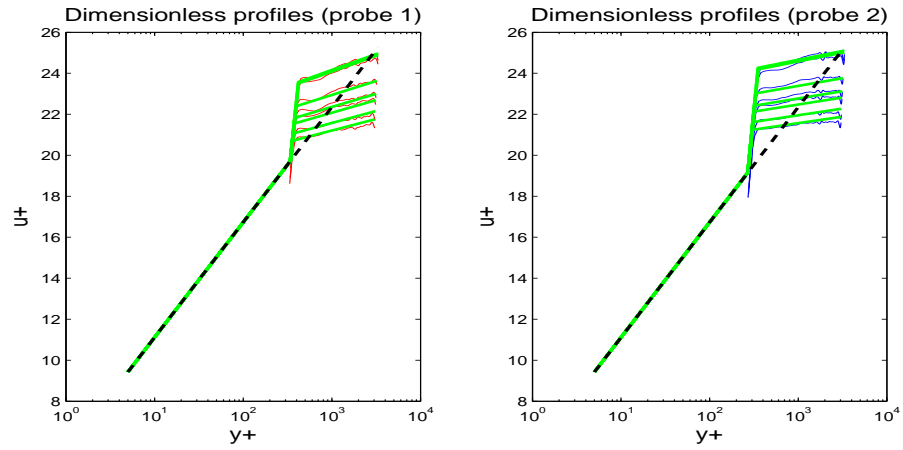
c)



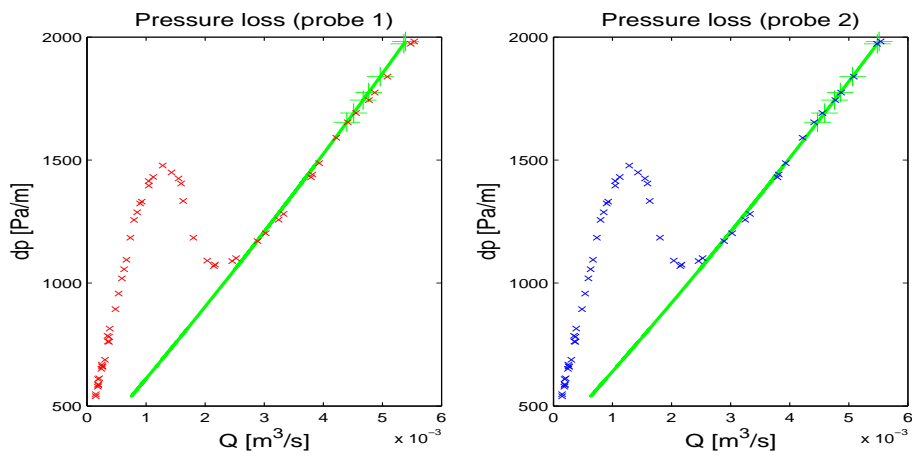
$\alpha = 6,4$	$y_H^+ = 800$	$\alpha = 6.8$	$y_H^+ = 800$
$u_C^* = 0,00391868 \text{ m/s}$	$y_L^+ = 250$	$u_C^* = 0,00332941 \text{ m/s}$	$y_L^+ = 250$
$n = 1,6762$		$n = 1,5991$	

Kuva C.11: Koivu 1,75 %.

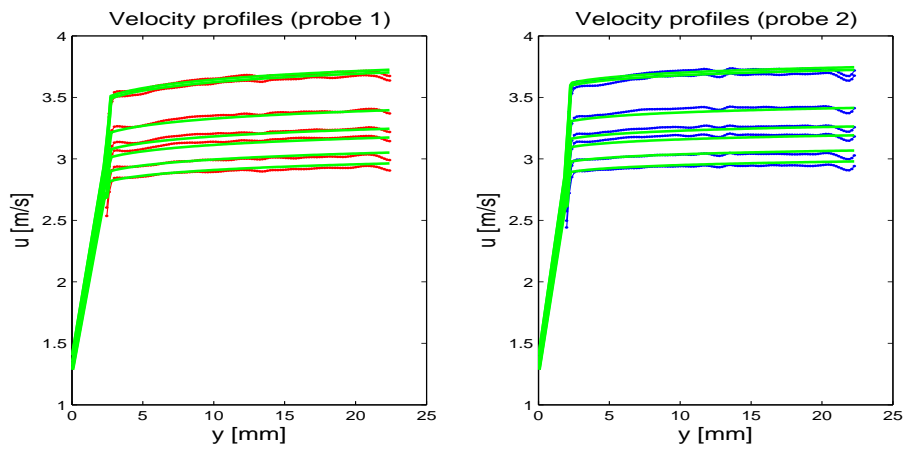
a)



b)



c)



$\alpha = 6,4$	$y_H^+ = 800$	$\alpha = 6.8$	$y_H^+ = 900$
$u_C^* = 0,00476781 \text{ m/s}$	$y_L^+ = 340$	$u_C^* = 0,00526145 \text{ m/s}$	$y_L^+ = 270$
$n = 1,7550$		$n = 1,7542$	

Kuva C.12: Koivu 2,00%.