

Puukuitususpension putkistovirtaus,  
viskositeetti ja häviökorrelaatiomalli

Pro Gradu-tutkielma



JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO

Tapani Korhola  
Jyväskylän yliopisto,  
Fysiikan laitos

4.8.2010

Ohjaaja Markku Kataja

## Abstract

We measured pressure loss and velocity profile from pine and birch suspension flow in two straight PVC-tubes. The suspension consistencies were 0,5 %–4,0 % and tubes' radius were 105,2 mm and 191,6 mm. The velocity profiles were measured with pulsed ultrasonic Doppler velocimetry technique. Unusual laminar shaped profiles were discovered at low flow rates of birch suspension. With these profiles it was possible to calculate the actual viscosity for fiber suspension. In the analysis we discovered that the viscosity didn't depend on the flow velocity or geometry. It was possible to write a material law that describes the viscosity as a function of shear rate with two material related parameters:  $\mu = e^C \gamma^n$ . We compared theoretical velocity profiles plotted with the described viscosity to actual measured velocity profiles. Good match between profiles supports the material law. In the measurements we weren't able to measure as high flow rates we wanted to be able study loss correlation model between flow rate and pressure loss in depth. Still it was possible to do a simple parametrization of the model and test how it scales between two pipes of different diameter. The model scaled well only for low fiber consistencies, for birch with consistencies 1,0 % and 1,5 % and for pine at the consistency of 0,5 %.

# Sisältö

1	Johdanto.....	1
2	Teoreettiset lähtökohdat.....	3
2.1	Puukuitususpension virtausalueet.....	3
2.1.1	Laminaarinen leikkausvirtausprofiili alueilla I ja II.....	6
2.2	Häviö ja dimensioton esitys.....	7
2.3	Pulssitettu ultraääni ja Doppler menetelmä.....	9
2.3.1	Paikan määrittäminen.....	9
2.3.2	Nopeuden määrittäminen Doppler siirtymän avulla.....	11
2.4	Virtauksen mallintaminen.....	14
2.4.1	Puukuitususpension viskositeetti leikkausvirtaus alueella .....	15
2.4.2	Turbulenttisen alueen häviökorrelaatio.....	21
3	Mittaukset, mittauslaitteisto ja mittausmenetelmät.....	23
3.1	Linja.....	24
3.2	Häviön ja virtaaman mittaus.....	25
3.3	Nopeusprofiilin mittaus .....	26
3.4	Datan käsittely ja mittausten ohjaus.....	27
3.5	Käytetyn suspension valmistus ja sakeuden mittaus.....	29

4	Tulokset ja analyysi.....	30
4.1	Häviö.....	30
4.2	Suspension nopeusprofiilit.....	31
4.3	Kuituverkon viskositeetin määrittäminen leikkausvirtauksesta.....	33
4.4	Häviökorrelaation skaalautuvuus turbulentilla alueella.....	39
5	Johtopäätökset.....	41
	Kirjallisuutta.....	43

## Liitteet

- A Häviökäyrä, normituskerroin, dimensiottomat ja dimensiollisen nopeusprofiilit.
- B Laminaariset nopeusprofiilit, viskositeetti etäisyyden ja leikkausjännityksen funktiona sekä teoreettinen ja mitattu nopeusprofiili.
- C Häviökorrelaation skaalaukset.

# 1 Johdanto

Tässä työssä tutkitaan puukuitususpension putkistovirtausta. Suspensio tarkoittaa heterogeenistä seosta, jossa nesteeseen on sekoittunut kiinteää ainetta, tässä tapauksessa puukuituja vedessä, niin hienojakoisesti, että seos saostuu hitaasti [3]. Suspensio on epänewtonien neste, eli sen viskositeetti riippuu leikkausnopeudesta. Tarkemmin sanottuna puukuitususpensio luokitellaan leikkausohenevaksi, eli suspension viskositeetti pienenee leikkausnopeuden kasvaessa.

Virtausmekaniikan tutkimista motivoi tieteellisen uteliaisuuden lisäksi sen monet sovellukset. Esimerkiksi paperiteollisuudessa yhden yksikön energiankulutuksesta jopa 70 % voi mennä puukuitususpension putkistovirtauksiin [8]. Tuntemalla suspension virtausmekaniikkaa paremmin jopa pienillä optimoinneilla voidaan saada merkittävää hyötyä. Puukuitususpension käyttäytyminen on hyvin monimutkaista, joten sen käyttäytymistä mallinnetaan usein kokeellisesti.

Puukuitususpension käyttäytymistä on tutkittu mm. Valtion Teknillisessä Tutkimuskeskuksessa [5] ja A. Jäsbergin väitöskirjassa [2]. Tämä tutkielman mittaukset toteutettiin Jyväskylän VTT:n toimipisteessä, mm. monifaasivirtaukset-ryhmän avustuksella. Puukuitususpension häviökäyttäytymiselle on jo kehitelty malli [2]. Yksi tämän työn tarkoituksista oli tutkia mallia entistä suuremmilla putkikoilla ja virtaamilla. Mittauksissa ilmeni kuitenkin teknisiä ongelmia, joiden takia mallia ei voitu tutkia halutulla tavalla. Mallin toimivuutta pystyttiin kuitenkin testaamaan tutkimalla mallin skaalautuvuutta kahden erikokoisen putken välillä.

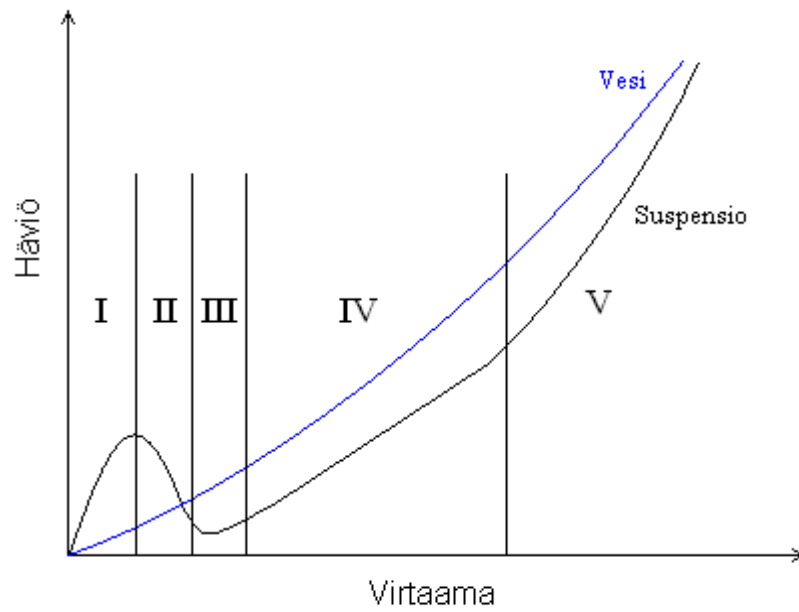
Mittauksissa ilmeni mielenkiintoinen laminaarinen leikkausvirtausprofiilin muoto koivususpensiolle. Tämä hieman yllättävä ilmiö mahdollisti koivususpension viskositeetin selvittämisen. Analyysis-

sa myös tutkitaan riippuuko viskositeetti leikkausnopeuden lisäksi myös virtauksen tai materiaalin ominaisuuksista. Viskositeetin riippuessa vain leikkausnopeudesta ja materiaalin ominaisuuksista on mahdollista määritellä materiaalilaki puukutususpension viskositeetille.

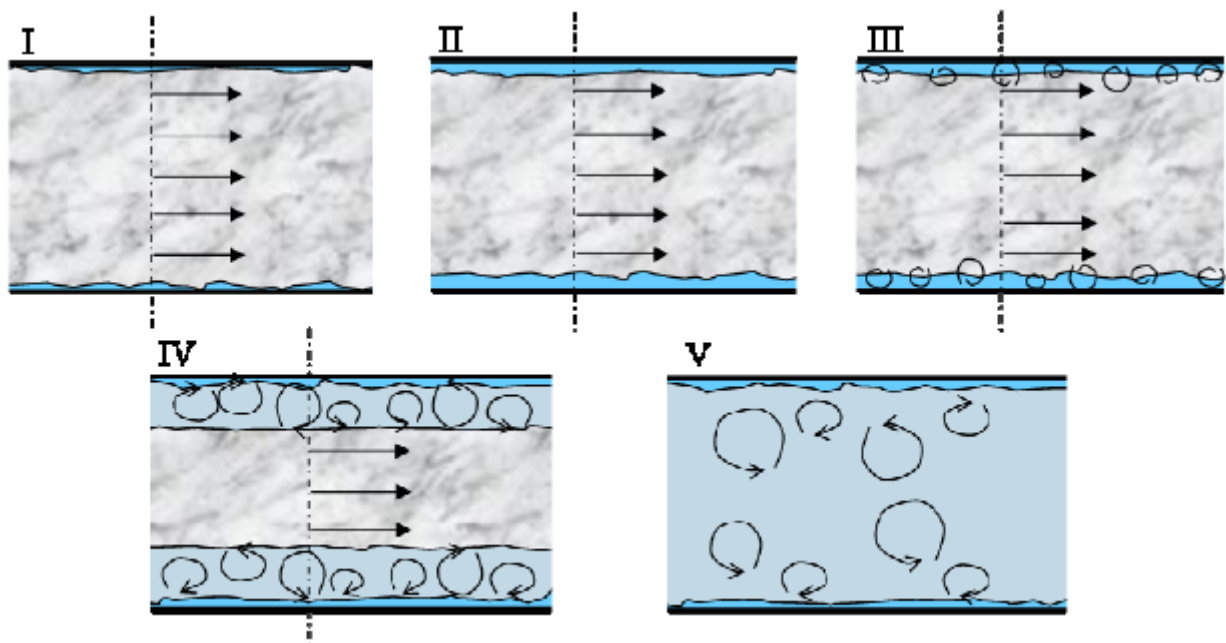
## 2 Teoreettiset lähtökohdat

### 2.1 Puukuitususpension virtausalueet

Jos suspension kuitupitoisuus on matala, esimerkiksi männyllä alle 0,5 %, käyttäytyy se putkistovirtauksessa lähes veden tavoin. Sakeuden noustessa riittävän suureksi alhaisilla virtaamilla kuidut voivat yhteen tarttuessaan muodostaa putkeen kuitutulpan [10]. Tämän kuitutulpan muodostuminen ja hajoaminen saa aikaan suspensiolle ominaisen käyttäytymisen. Virtaustilanteessa, jossa kuitupitoisuus on riittävän suuri kuitutulpan muodostumiseen ja virtaaman ollessa riittävän suuri, voidaan virtaus jakaa viiteen eri alueeseen. Virtaamaan suhteen ensimmäinen (*I*) tila on tulppavirtaus. Siinä kuidut muodostavat lähes putken halkaisijan kokoisen kiinteän kuitutulpan. Tämä yleensä kiinteä tulppa voi kuitenkin muuttaa muotoaan tietyissä olosuhteissa, tästä lisää kappaleessa 2.1.1. Virtausnopeuden kasvaessa (*II*) putken seinämän ja tulpan väliin muodostuu ohut kuiduton vesikerros, jota kutsutaan voitelukerrokseksi. Tämä kerros vähentää seinämä kitkaa ja pienentää häviötä. Seuraavassa virtausalueessa (*III*) voitelukerroksessa alkaa esiintyä turbulenssia. Neljännessä (*IV*) virtausalueessa turbulenssi alkaa sekoittaa kuitua tulpan reunalta voitelukerrokseen ja ulottuu jo syväälle tulpan sisään. Tässä yhdistelmä alueessa esiintyy sekä tulppa- että turbulenssia virtausta. Tällöin häviö käyttäytyy lähes lineaarisesti virtaaman funktiona. Viidennessä (*V*) alueessa virtaus on täysin turbulenttia ja kuitu on täysin sekoittunut veteen. Tällöin suspension käyttäytyy lähes turbulenttisen veden tavoin ja häviö kasvaa neliöllisesti virtaaman suhteen. Kuvassa 1 havainnollistetaan sakean suspension häviön riippuvuutta virtaamasta, samassa kuvassa on esitetty myös teoreettinen käyrä vedelle. Kuvassa 2 esitetty poikkileikkaus kuitususpension käyttäytymisestä putkistovirtauksessa [5].



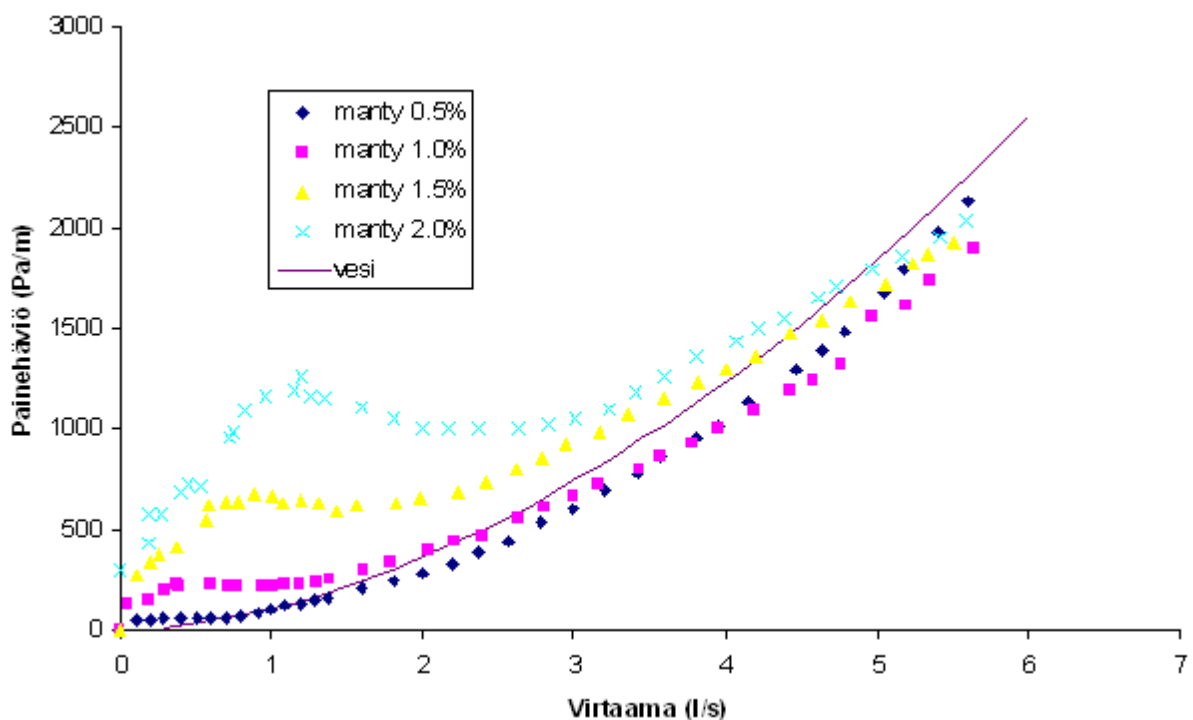
Kuva 1: Havainnekuva suspension häviöstä virtaaman funktiona, sekä eri virtausalueet. Kuvassa myös veden häviökäyrä



Kuva 2: Poikkileikkaus suspension putkistovirtauksesta eri virtausalueilla [2].



Virtaukseen ja eri virtaustilojen sijoittumiseen virtaaman suhteen vaikuttavat olennaisesti kuitupitoisuus, kuitujen ominaisuudet, virtausnopeus ja putkikoko. Pidemmät kuidut tarttuvat toisiinsa helpommin kuin lyhyet, ja siten muodostavat tulpan jo vähäisemmässä kuitupitoisuudessa sekä pitävät sen vahvemmin koossa. Suuremmilla kuitupitoisuuksilla tulppa muodostuu tiukemmaksi ja sen vaikutukset ovat voimakkaammat, tämä voidaan nähdä kuvasta 3. Kuvasta nähdään selvästi kuinka häviökäyrään muodostuu yhä selvempi mutka alueiden I–III kohdalla pitoisuuden kasvaessa. Myös kuitujen voimakas fibriloituminen (ohuiden ”karvojen” muodostuminen kuidun pintaan) vahvistaa kuitujen tarttumista toisiinsa ja siten voimistaa tulpan muodostumista ja sen rikkomiseen tarvittavia voimia [8]. Näissä mittauksissa pumppu fibriloitui ja jonkin verran katkoo useasti pumpun läpi meneviä kuituja. Suurempi putkikoko vaikuttaa suspension virtaustiloihin samoin kuin vedenkin, eli pienentää Reynoldsin lukua, jolloin vaaditaan suurempi virtaamaa turbulenssin synnyttämiseen [1].

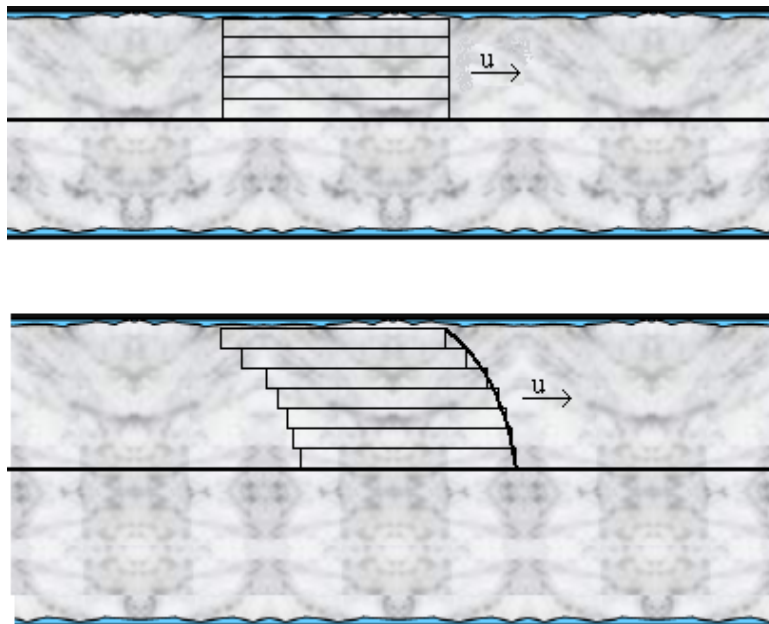


Kuva 3: Mitattu mäntysuspension painehäviö virtaaman funktiona neljälle eri sakeudelle 44,9mm PVC-putkessa. Kuvassa myös teoreettinen häviökäyrä vedelle [9].

## 2.1.1 Laminaarinen leikkausvirtausprofiili alueilla I ja II

Ensimmäisellä ja toisella virtausalueella kuituverkko pysyy usein koossa. Tällöin mitattu nopeusprofiili on hyvin tulppamainen eli, nopeusgradientti on nolla lähes koko halkaisijan mitalta. Tässä työssä tehdyissä mittauksissa kuitenkin huomattiin lyhytkuituisemmalla koivususpensiolla selvä nollasta poikkeava nopeusgradientti jo virtausalueilla **I** ja **II**. Virtausalue voitiin varmentaa häviökäyrästä. Näiden profiilien muoto muistuttaa leikkaavan laminaarisen virtauksen nopeusprofiilia. Suuremmilla virtaamilla muodostuvat kaarevat virtausprofiilit ovat selvästi jo turbulenttisilla alueilla **IV** ja **V**. Leikkaavat laminaariset profiilit erottuvat selvemmin  $200\text{ mm}$ :n putkessa  $100\text{ mm}$ :n verrattuna. Tähän luultavasti vaikuttaa kuidun pituuden ja putken halkaisijan suhde.

Kuitususpension leikkausvirtausprofiili voi syntyä jos seinämäkitkan ja suspension viskositeetin synnyttämä leikkausjännite on riittävän suuri irrottamaan kuituja toisistaan jo muodostuneessa kuitutulpassa. Tällöin kuidut ja kuitukimput pääsevät liikkumaan toistensa suhteen luoden muuttuvan nopeusjakauman (kuva 4). Kuituverkon murtamiseen tarvitaan siis riittävän suuri leikkausjännitys  $\tau_c$ . Niillä virtaamilla, joilla  $\tau_w > \tau_c$  nopeusprofiili on laminaarinen. Tarvittava leikkausjännite  $\tau_c$  voidaan siis määrittää kokeellisesti häviömittauksia vastaavien nopeusprofiilien avulla.



*Kuva 4: Ylemmässä kuvassa leikkausjännitys ei ole tarpeeksi suuri irrottamaan kuituja toisistaan. Alemmassa kuvassa tulpan rakenne murtuu ja virtausprofiili on leikkaava*

## 2.2 Häviö ja dimensioton esitys

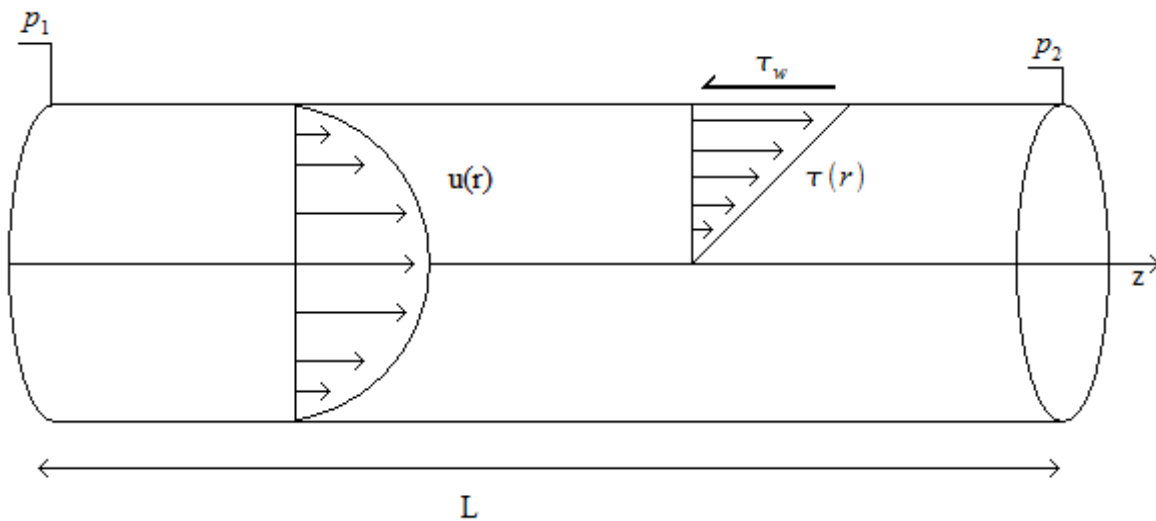
Virtaustilanteessa seinämäkontaktissa olevat molekyylit hakeutuvat energiatasapainoon seinämän kanssa [1]. Eli

$$V_{\text{molekyyli}} = V_{\text{seinämä}} \quad (1)$$

ja

$$T_{\text{molekyyli}} = T_{\text{seinämä}} . \quad (2)$$

Seinämältä poistuttaessa yksittäisten molekyylien välinen kitka tasaa virtausnopeuden seinämän ja putken keskiosan välillä. Osa fluidin liike-energiasta muuttuu kitkan vaikutuksesta lämmöksi. Tämä häviö näkyy virtauksessa paineen putoamisena virtauksen suunnassa. Nopeuden muutos putken säteen suunnassa eli nopeusgradientti saa aikaan leikkausjännityksen fluidissa. Leikkausjännite ilmenee fluidin seinämään kohdistamana voimana  $\tau_w$ . Tarkastellaan seuraavaksi yhdenmuotoisen vaakasuoran putken voimatasapainoa.



Kuva 5: Havainnekuva.

Kirjoitetaan liikeyhtälö kuvan 5 tilanteelle:

$$\Sigma F_z = (p_2 - p_1) \pi R^2 - \tau_w 2 \pi R L = \dot{m} (V_2 - V_1) = 0 \quad (3)$$

Missä suureet  $V_1$  ja  $V_2$  ovat virtaaman keskiarvonopeudet pisteessä 1 ja 2. Edellisestä uudelleen järjestelemällä saadaan häviö pituusyksikköä kohden:

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{2\tau_w}{R}. \quad (4)$$

Leikkausjännityksen avulla voidaan määritellä myös kitkanopeus [1]:

$$u^* = \sqrt{\tau_w / \rho}. \quad (5)$$

Häviön avulla esitettynä:

$$u^* = \sqrt{\frac{\Delta p R}{2\rho L}}. \quad (6)$$

Myöhemmin käytettävät dimensiottomat muodot määritellään kitkanopeuden avulla seuraavasti:

$$u^+ = \frac{u}{u^*}, \quad (7)$$

$$y^+ = \frac{y\rho u^*}{\mu} \quad (8)$$

tai

$$R^+ = \frac{R\rho u^*}{\mu}, \quad (9)$$

$$Q^+ = \frac{Qu^*}{\nu_f^2}. \quad (10)$$

Edellisissä  $u$  on virtaavan nesteen nopeus,  $y$  etäisyys seinämästä,  $R$  putken säde,  $Q$  virtaama ja  $\mu$  dynaaminen viskositeetti.

## 2.3 Pulssitettu ultraääni ja Doppler menetelmä

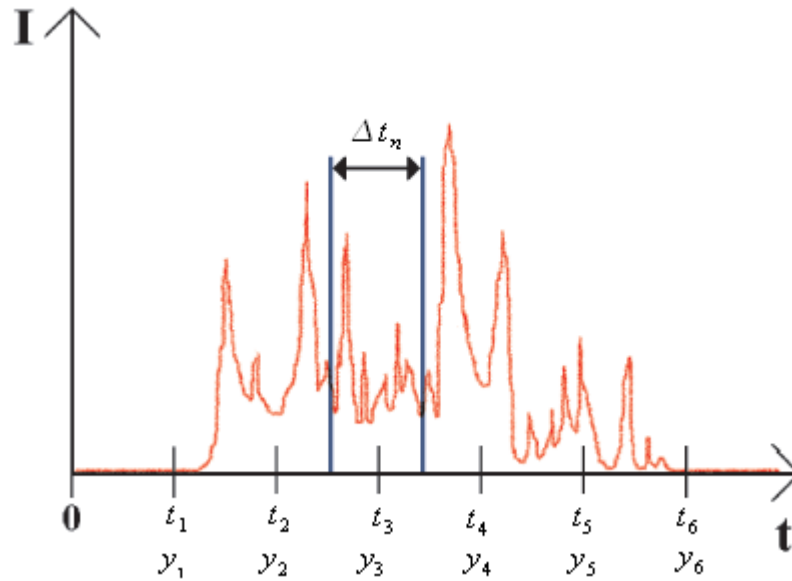
Pulssitettussa ultraääni-Doppler-menetelmässä hyödynnetään purskeina lähetettävän ultraäänen heijastumista aineiden rajapinnoista, tässä työssä veden ja kuidun. Menetelmässä mitataan kohteesta takaisin heijastunut kaiun intensiteetti, kaikuprofiili. Mittaamalla heijastukseen menevää aikaa voidaan määrittää kohteen sijainti ja vertaamalla peräkkäisten purskeiden kaikuprofiilien sijaintia voidaan määrittää kohteen nopeus. Menetelmässä ei siis varsinaisesti hyödynnetä heijastuvan signaalin taajuuden muutosta vaan purskeiden lähetys- ja paluutaajuuden Doppler siirtymää [7].

### 2.3.1 Paikan määrittäminen

Kaikuprofiili muodostuu purskeen heijastuessa aineen rajapinnoista. Kuvaamalla kaikuprofiili ajan suhteen voidaan äänennopeuden avulla määrittää sijainti, josta kaiku on saatu (kuva 6).

$$y_n = \frac{v_s t_n}{2} \quad (11)$$

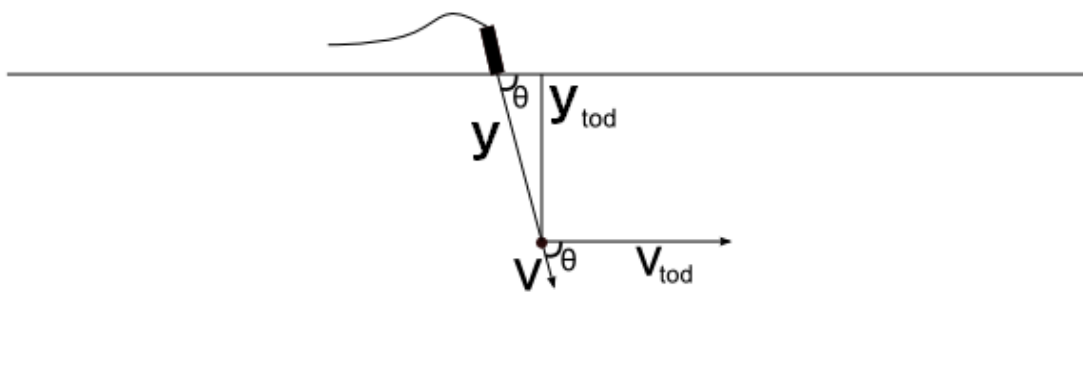
Yksittäisen rajapinnan sijainti saadaan mitatun ajan  $t_n$  ja äänennopeuden  $v_s$  tulona. Tulo jaetaan kahdella, koska purske kulkee anturin ja partikkelin välisen matkan kahdesti. Aika voidaan mitata äärellisellä tarkkuudella  $\Delta t_n$ , jolloin sijainnilla on rajattu resoluutio. Kultakin väliltä  $n$  saatu nopeus sijoitetaan kyseiseen pisteeseen. Tarkkuus määräytyy purskeen signaalin taajuudesta. Nostamalla purskesignaalin taajuutta eli pienentämällä aallonpituutta saadaan resoluutiota parannettua.



Kuva 6: Havainnekuva kaikuprofiilin intensiteetistä.

Vaikka ensimmäiset heijastavat rajapinnat ovat jo putken seinämällä, ei ensimmäisistä partikkeleista saatua kaikuprofiilia voida kuitenkaan hyödyntää. Lähiseinämän näkyvyyttä rajoittaa DOP-laitteiston purskeen lähetykseen ja vastaanottamiseen liittyvät tekniset ratkaisut. Lähetettyään purskeen laitteisto odottaa hetken, jotta ääntä lähettävän kiteen ja anturin rungon värähtely lakkaa [6]. Vastatämän jälkeen anturi voi vastaanottaa signaalia häiriöttä. Tästä johtuen ensimmäiset kaikusignaalit, jotka laitteisto rekisteröi tulevat jo hieman lähiseinämää kauempaa. Myös ääniaaltojen interferenssi aiheuttaa jonkin verran ongelmia lähiseinämällä.

Johtuen anturin sijoittamisesta putken kylkeen (kuva 7), mitattuun sijaintiin pitää myös laskea kulmakorjaus seuraavasti, jotta saadaan selville todellinen paikka.



Kuva 7: Havainnekuva laitteiston mitaamien suureiden suhteesta todellisiin suureisiin.

Trigonometrian avulla saadaan todellinen sijainti seuraavasti.

$$\sin \theta = \frac{y_{tod}}{y} \quad (12)$$

$$y_{tod} = y \sin \theta \quad (13)$$

Todellinen suure on muotoa

$$y_{tod} = \frac{v_s t_n}{2} \sin \theta \quad (14)$$

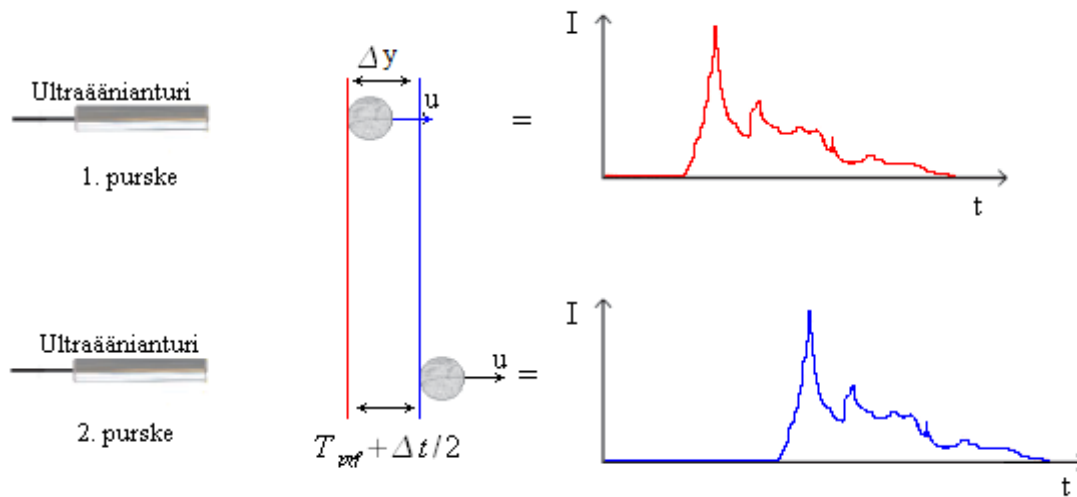
Suurinta luotaussyvyyttä rajoittaa pulssintoistotaajuus. Suurin luotaussyvyys saadaan kaavasta (11) korvaamalla kaiun mittausaika suurimmalla mahdollisella eli pulssintoistotaajuudella  $T_{prf}$ . Anturin täytyy vastaanottaa edellisen purskeen kaikuprofiili ennen seuraavan purskeen lähetystä.

$$y_{max} = \frac{v_s T_{prf}}{2} \sin \theta \quad (15)$$

### 2.3.2 Nopeuden määrittäminen Doppler siirtymän avulla

Matka  $\Delta y$ , jonka partikkeli ehtii kulkea kahden peräkkäisten mittausten eli purskeiden välissä, määritellään seuraavasti. Tässä  $u$  on partikkelin nopeus,  $T_{prf}$  on peräkkäisten puskeiden välinen aika ja  $\Delta t$  on aikaero, joka syntyy jälkimmäisen purskeen luoman kaikuprofiilin etäännyttyä ensimmäisen purskeen mittaamasta sijainnista (kuva 8).

$$\Delta y = u(T_{prf} + \Delta t/2) \quad (16)$$



Kuva 8: Kahden peräkkäisen purskeen mittaama kaikuprofiilin siirtymä.

Aikaeron  $\Delta t$  voi määrittää kaavasta (11) seuraavasti kaikuprofiilin siirtymän ja äänennopeuden avulla.

$$\Delta t = \frac{2 \Delta y}{v_s} \quad (17)$$

Sijoitetaan (16) kaavan (17), jolloin saadaan muoto

$$\Delta t = \frac{2u(T_{prf} + \Delta t/2)}{v_s}. \quad (18)$$

Tästä edelleen ratkaisemalla partikkelin nopeus  $u$  saadaan muoto, jossa esiintyy vain mitattu aika-siirtymä sekä vakiot äänennopeus suspensiossa ja pulssintoistotaajuus. Mittausten välissä tapahtuva aikasiirtymä  $\Delta t$  on putkistovirtaustilanteessa usein mikrosekunnin luokkaa ja pulssintoistoväli  $T_{prf}$  millisekunnin luokkaa, eli  $\Delta t$  voidaan approksimoida nimittäjän summasta pois.

$$u = \frac{v_s \Delta t}{2(T_{prf} + \Delta t)} \approx \frac{v_s \Delta t}{2T_{prf}} \quad (19)$$

Periaatteessa partikkelin nopeus voitaisiin mitata kahdella peräkkäisellä paikkamittauksella ja mit-



taamalla välissä kulunut aika. Tämä toimisi jos virtaavassa nesteessä olisi vain muutama partikkeli. Kuituspensiossa on lähes ääretön määrä ääntä heijastavia rajapintoja. Anturi havaitsee kaiun jatkuvana, muuttuvana spektrinä. Anturi ei pysty havaitsemaan partikkelin sijaintia puhtaasti mittaamalla aikaa lähetyksen ja vastaanottamisen välillä, koska anturi alkaa heti ottamaan vastaan takaisin heijastuneita signaaleja. Tästä syystä menetelmässä mitataan kaiun intensiteettiä, joka muodostuu hetkelliselle kuiturakenteelle ominaiseksi. Vertaamalla tämän karakteristisen kaiku-profiilin etääntymistä/lähestymistä laitteisto pystyy laskemaan kuitujen nopeuden.

Myös nopeudelle lasketaan kulmakorjaus (kuva 7):

$$\cos \theta = \frac{u}{u_{tod}} \quad (20)$$

$$u_{tod} = \frac{u}{\cos \theta} \quad (21)$$

Nyt todellinen nopeus on:

$$u_{tod} = \frac{v_s \Delta t}{2T_{prf} \cos \theta} \quad (22)$$

Suurimpaan mitattavaa nopeuteen vaikuttaa tapa jolla laitteisto käsittelee vastaanottamaansa kaikua. Johtuen jatkuvasta takaisinheijastumisesta nopeus lasketaan kuiduista heijastuneen signaalin muuttuvasta vaihe-erosta [6]. Tällaisessa menettelyssä vaihe-ero voi muuttua korkeintaan puoli jaksoa, jotta nopeus lasketaan oikein. Suurin sallittu nopeus saadaan siis kun vaihe-ero on puoli jaksoa (kuva 9). Suuremmat vaihe-eron arvot tulkitaan jo liian pieniksi nopeuksiksi. Määritellään vaihe-ero lähetettävän purskeen taajuuden ja mitatun aikasiirtymän avulla seuraavasti.

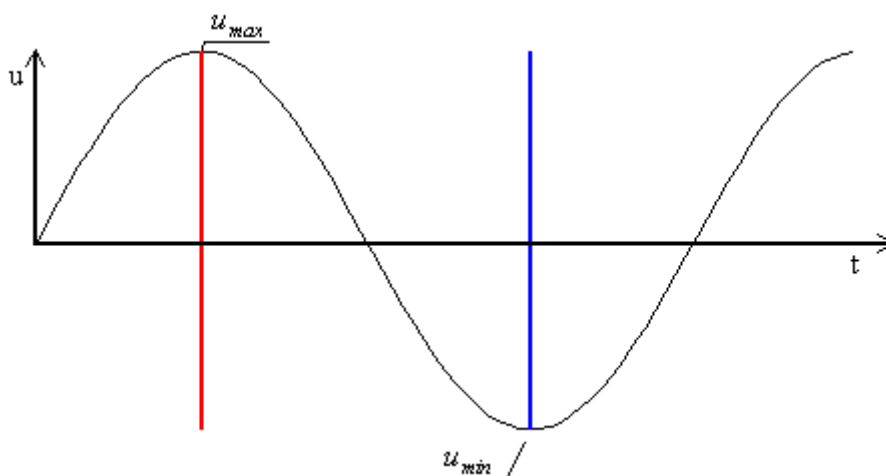
$$\delta = 2\pi f_e \Delta t \quad (23)$$

Missä  $f_e$  on lähetettävän purskeen signaalin taajuus. Nyt siis suurin sallittu arvo  $\delta$ :lle on puoli jaksoa eli  $\pi$ , joten

$$\Delta t_{max} = \frac{1}{2f_e} \quad (24)$$

Sijoitetaan  $\Delta t_{max}$  kaavaan (22) jolloin saadaan

$$v_{max} = \frac{v_s}{4 T_{prf} f_e \cos \theta} \quad (25)$$



Kuva 9: Kahden peräkkäisen mittauksen suurin mahdollinen vaihe-ero.

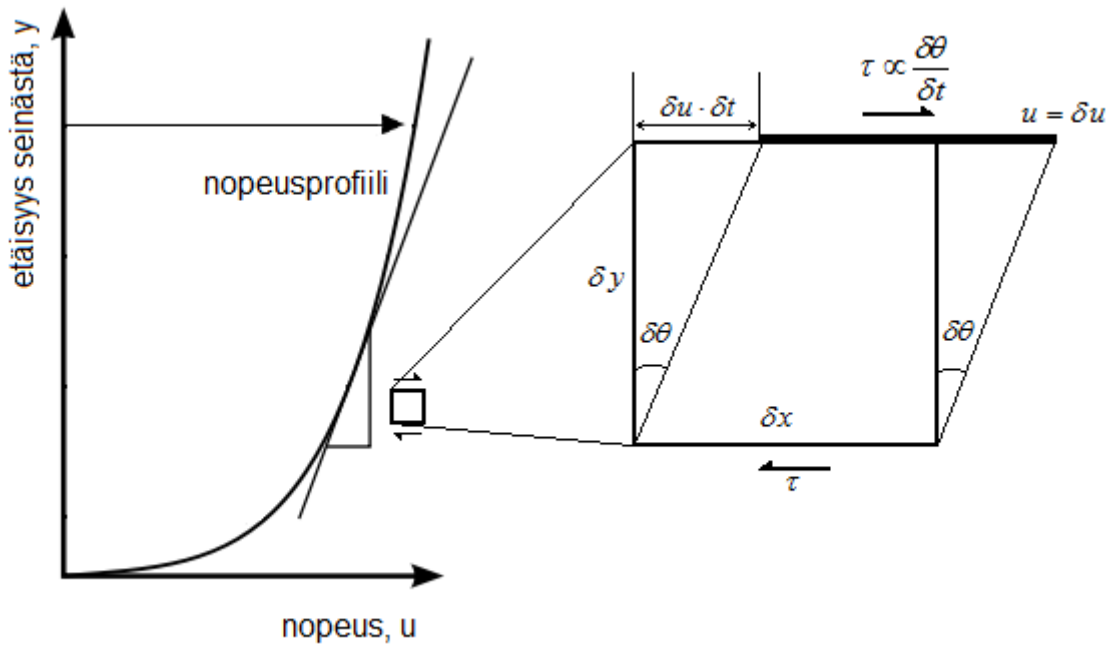
## 2.4 Virtauksen mallintaminen

Työssä havaittiin laminaarisen kaltaisia nopeusprofiileja koivukuiduilla. Tämä antaa mahdollisuuden puukuitususpension todellisen viskositeetin määrittämiseen. Tavoitteena oli selvittää käyttäytykö viskositeetti materiaalin vai virtaustilanteen ominaisuuksien mukaan. Jos viskositeetti voidaan määrittellä virtaustilanteesta riippumattomasti vain materiaalin ominaisuuksiin pohjautuvien parametrien avulla leikkausnopeuden funktiona voidaan silloin määrittellä materiaalilaki suspension viskositeetille.

Työssä tutkittiin myös häviökorrrelaatiomallin [2] skaalautuvuutta 100:n ja 200 mm:n putken välillä. Itse malliin ei syvennytä suuresti ja skaalautuvuuden tarkastelu rajoitetaan yhdistelmä ja turbulenttisen virtauksen alueelle. Mallin parametrit sovitetaan 100 mm:n putken häviödataan ja tutkitaan parametrien toimivuutta 200 mm:n putkella.

## 2.4.1 Puukuitususpension viskositeetti leikkausvirtaus alueella

Viskositeetti kuvaa fluidin sisäistä kykyä vastustaa veto- ja leikkausjännityksenjännityksen aiheuttamaa muodonmuutosta [1]. Virtaustilanteessa kitka seinämän ja fluidin välillä hidastaa virtausta seinämää lähestyttäessä, aiheuttaen virtaavaan fluidiin virtausnopeuden muutoksen etäisyyden funktiona. Tämä nopeuden muutos saa aikaan leikkausjännityksen fluidiin. Jännitys välittyy kohti putken keskiosaa nesteen sisäisen kitkan vaikutuksesta. Tarkastellaan tilannetta missä fluidielementtiin kohdistuva leikkausjännitys  $\tau$  saa aikaan jatkuvan leikkauskulman  $\delta\theta$  muutoksen (kuva 10).



Kuva 10: Leikkausjännitys aiheuttaa fluidielementin jatkuvan muodonmuutoksen.

Newtonisille nesteille kuten vedelle tämä leikkauskulman muutos ajan suhteen on suoraan verrannollinen leikkausjännitykseen [1]:

$$\tau \propto \frac{\delta\theta}{\delta t} \quad (26)$$

Kuvan 10 geometriasta saadaan

$$\tan(\delta\theta) = \frac{\delta u \delta t}{\delta y} . \quad (27)$$

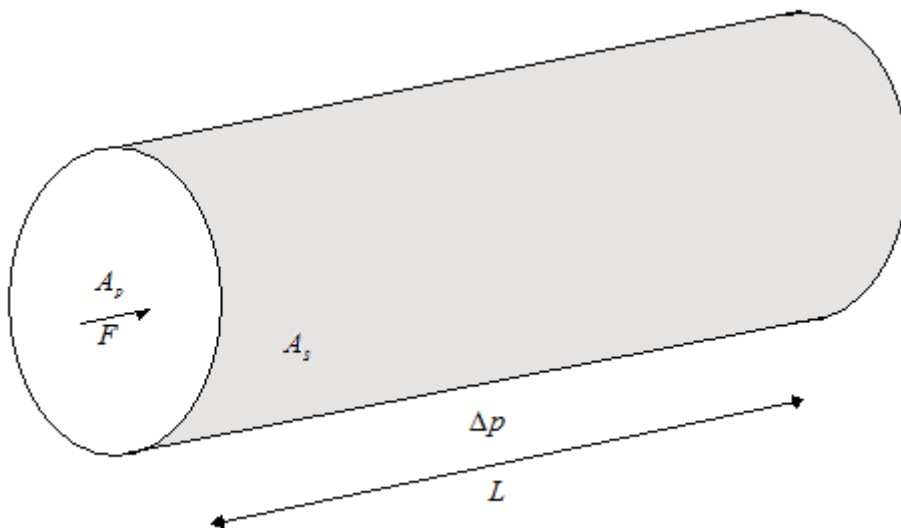
Kulman  $\theta$  muutosten ollessa infinitesimaalisen pieniä voidaan kirjoittaa:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{du}{dy} \quad (28)$$

Nyt kaavan (26) pohjalta voidaan sanoa leikkausjännityksen olevan suoraan verrannollinen myös nopeusgradienttiin newtonisille nesteille. Määritetään kyseiseksi verrannollisuuskertoimeksi viskositeetti  $\mu$ .

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (29)$$

Putkivirtauksessa leikkausjännitys  $\tau$  seinämällä voidaan määrittellä seinämän pintaan virtauksen suunnassa kohdistuvan voiman avulla. Putken poikkipinta-alaan  $A_p$  kohdistuva paine-ero  $\Delta p$  matkalla  $L$  saa aikaan virtausta eteenpäin vievän voiman  $F$ . Sama voima kohdistuu putken seinämään  $A_s$ , aiheuttaen leikkausjännityksen (kuva 11).



*Kuva 11: Putkessa etäisyydellä  $L$  syntyvä paine-ero ja poikkipinta-alaan kohdistuva voima.*

Yleiset esitykset leikkausjännitykselle ja pintaan kohdistuvan paineen aiheuttamalle voimalle:

$$\tau = \frac{F}{A_s} \quad (30)$$

$$F = \Delta p A_p \quad (31)$$

Esitetään pinta-alat putken geometrian avulla ja sijoitetaan kaava (31) kaavaan (30).

$$\tau_w = \frac{\Delta p \pi R^2}{2 \pi R L} \quad (32)$$

Kirjoittamalla esitys putken säteen  $R$  sijasta muuttujalla  $r$  saadaan laskettua leikkausjännitys halutulle etäisyydelle putken keskipisteestä.

$$\tau_r = \frac{\Delta p r}{2 L} \quad (33)$$

Edelleen yhdistämällä kaavat (29) ja (33) saadaan muoto mistä voidaan suoraan laskea suspension viskositeetti häviön ja nopeusprofiilin avulla:

$$\mu = \frac{\Delta p r}{2 L (du/dy)} \quad (34)$$

Aiemmin johdettu esitys viskositeetille edellyttää laminaarista virtausta, missä nestekerrokset liukuvat toistensa yli luoden nopeusgradientin ja leikkausjännityksen. Puukuitususpension putkistovirtauksessa kuituverkko useimmiten pysyy kiinteänä kun virtausnopeus on pieni ja tulppamainen rakenne alkaa rikkoontua vasta turbulentilla alueella. Tästä syystä todellisen viskositeetin määrittäminen laminaarisen virtausprofiilin nopeusgradientin avulla on usein mahdotonta. Suoritetuissa mittauksissa kuitenkin havaittiin koivukuiduilla erityisesti suuremmalla putkella merkittävä nopeusgradientti jo virtausalueen **I** lopussa ja alueen **II** alussa, missä suspension tai voitelukerroksen turbulenssia ei vielä esiinny. Vaikka kuidut todennäköisesti hieman pyörähtelevät toistensa suhteen tässäkin virtausalueessa voitaneen virtausta pitää riittävän laminaarisena edellä esitettyyn tarkasteluun.

Puukuitususpensio ei kuitenkaan ole newtoninen neste, jolloin viskositeetti ei ole vakio leikkausnopeuden suhteen. Suspensio ja newtoninen neste eroavat myös käyttäytymisellään seinämällä. Lähes kaikissa fluideissa seinämäkontaktissa olevat molekyylit hakeutuvat liikemäärä ja energia tasapainoon seinämän kanssa [1]. Tästä johtuen kontaktissa olevat molekyylit asettuvat samaan nopeuteen ja lämpötilaan seinämän kanssa, virtaus pysähtyy seinämällä. Suspension tapauksessa kantajanes-teenä toimiva vesi käyttäytyy kuten edellä mutta pienillä virtaamilla vielä ehjänä pysyvä kuituverkko vetää mukanaan myös seinämäkontaktissa olevia kuituja. Tästä johtuen suspension viskositeettia laskettaessa nopeusprofiilien tarkastelu aloitetaan hieman kauempaa seinämästä, missä kuitujen liu- kuminen seinämällä ei enää vaikuta nopeusprofiilin muotoon.

Tarkasteluun valitaan ne virtaamat, joiden nopeusprofiilit ovat selvästi leikkaavia virtausalueella **I** ja **II**. Alue voidaan määrittää tutkimalla häviökäyrää. Viskositeetin käyttäytymisen selvittämiseksi mitatusta nopeusprofiilista lasketaan leikkausnopeus ja mitatun paine-eron avulla saadaan leikkaus- jännitys. Tämän jälkeen voidaan piirtää viskositeetti leikkausnopeuden funktiona ja verrata yhden mittauksen eri virtaamia keskenään. Jos saman kuitulaadun ja -pitoisuuden käyrät limittyvät eri vir- taamilla ja eri putkikoilla voidaan viskositeetin todeta käyttäytyvän materiaalin, ei virtaustilanteen ominaisuuksien mukaan. Tällöin on mahdollista löytää puukuitususpension viskositeetin määrittävä materiaalilaki.

Tuloksia käsitellessä huomataan viskositeetin käyttäytyvän leikkausnopeuden  $y$  suhteen potenssi- funktion tavoin.

$$\mu = C y^n \quad (35)$$

Piirretään viskositeetti leikkausnopeuden funktiona logaritmien avulla, jolloin muodostuvasta suo- rasta voidaan laskea vakiot  $C$  ja  $n$ . Tällöin yhtälö (35) on muotoa

$$\ln(\mu) = \ln(C y^n) . \quad (36)$$

Logaritmien laskusääntöjen avulla yhtälö (36) voidaan kirjoittaa muotoon missä vakiot  $n$  ja  $\ln(C)$  ovat suoran kulmakerroin ja vakio-osa:

$$\ln \mu = n \ln(\gamma) + \ln(C) \quad (37)$$

Kirjoittamalla vakio  $C$  Neperin luvun potenssiin alkuperäiseen yhtälöön (35),

$$\mu = e^C \gamma^n \quad (38)$$

saadaan yhtälö (37) vakioiden esittämisen kannalta käyttökelpoisempaan muotoon.

$$\ln \mu = n \ln \gamma + C \quad (39)$$

Materiaalilain (38) toimivuus voidaan tarkistaa laskemalla sen mukaisella viskositeetilla teoreettinen nopeusprofiili ja vertaamalla sitä kokeellisesti saatuun profiiliin. Kaava (38) sijoitetaan kaavaan (29), jolloin saadaan

$$\tau = e^C \left( \frac{du}{dy} \right)^n \frac{du}{dy} \quad (40)$$

Esitetään leikkausjännitys  $\tau$  häviön avulla ja järjestellään uudelleen:

$$du = \left( \frac{\Delta p r}{2 e^C L} \right)^{\frac{1}{n+1}} dy \quad (41)$$

Ratkaistaan  $u$  integroimalla:

$$\int du = \left( \frac{\Delta p}{2 e^C L} \right)^{\frac{1}{n+1}} \int r^{\frac{1}{n+1}} dy \quad (42)$$

$$u = \left( \frac{\Delta p}{2 e^C L} \right)^{\frac{1}{n+1}} \frac{n+1}{n+2} y^{\frac{n+2}{n+1}} + c_1 \quad (43)$$

Integrointivakio  $c_1$  voidaan ratkaista reunaehdon avulla. Newtonisen nesteen tapauksessa virtausnopeus on nolla putken seinämällä, jolloin  $u(R)=0$ . Puukuitususpensio kuitenkin liukuu putken seinämää pitkin, joten reunaehto on  $u(R)=u_R$ , missä  $u_R$  on kuituverkon nopeus seinämällä. Reunaehto käyttämällä saadaan

$$u(R) = \left( \frac{\Delta p}{2 e^C L} \right)^{\frac{1}{n+1}} \frac{n+1}{n+2} R^{\frac{n+2}{n+1}} + c_1 = u_R, \quad (44)$$

ja

$$c_1 = u_R - \left( \frac{\Delta p}{2 e^C L} \right)^{\frac{1}{n+1}} \frac{n+1}{n+2} R^{\frac{n+2}{n+1}}. \quad (45)$$

Nyt alkuperäinen yhtälö (43) saadaan muotoon:

$$u = \left( \frac{\Delta p}{2 e^C L} \right)^{\frac{1}{n+1}} \frac{n+1}{n+2} (R^{\frac{n+2}{n+1}} - y^{\frac{n+2}{n+1}}) + u_R \quad (46)$$

Tässä mittauksessa häviö mitattiin positiivisena muutoksena virtauksen suunnassa, jolloin kaavan (46) merkki vaihtuu. Häviön ja materiaalilain parametrien avulla laskettua teoreettista nopeusprofiilia voidaan nyt verrata kokeellisesti saatuun profiiliin.



## 2.4.2 Turbulenttisen alueen häviökorrelaatio

Puukuitususpensiolle on kehitelty korrelaatio virtaaman ja häviön välille [2]. Korrelaatiossa hyödynnetään tulppavirtaama alueella mallinnettua nopeusprofiilia ja tulppamaisen ja turbulentin virtaaman yhdistelmä alueella sekä puhtaasti turbulentilla virtausalueella parametrisoitavaa mitattua nopeusprofiilia. Integroimalla nopeusprofiili putken poikkipinnan yli saadaan korrelaatio häviön aiheuttavan kitkanopeuden ja virtaaman välille. Tässä työssä ei paneuduta korrelaatioon erityisen syvästi, vaan kokeillaan yksinkertaisen parametrisoinnin avulla korrelaation skaalautumista mitattuun häviödataan yhdistelmä ja turbulenttisella alueella eri putkikokojen välillä.

Korrelaatiota tutkittaessa on havaittu dimensiottoman virtaaman  $Q^+$  riippuvan vain kahdesta suureesta [2].

$$Q^+ = Q^+(R^+, u^*/u_C^*) \quad (47)$$

Missä  $R^+$  on dimensioton putken säde,  $u^*$  kitkanopeus ja  $u_C^*$  liittyy kuitutulpan rikkomiseen vaadittavan turbulenssin intensiteettiin. Laajempi tarkastelu osoittaa  $R^+$ :n olevan määräävä termi.  $u^*/u_C^*$ :n vaikutus on vähäinen ja rajoittuu mataliin virtaamiin yhdistelmä alueen loppu puolella, joten termi voidaan approksimoida pois [2]. Lisäksi suurien putkien tapauksessa voidaan arvioida  $y_L^+, y_H^+ \ll R^+$ , jolloin voidaan kirjoittaa

$$Q^+ = Q_0^+ + \lambda_1 R^+ + \lambda_2 (R^+)^2. \quad (48)$$

Suureet  $y_L^+$  ja  $y_H^+$  liittyvät dimensiottomaan nopeusprofiiliin. Suure  $y_L^+$  kertoo missä nopeusprofiili erkanee newtonisesta profiilista ja  $y_H^+$  milloin profiili on taas yhdensuuntainen newtonisen profiilin kanssa, rajat erottuvat selvästi mm. kuvasta A.7 c. Kaavassa (48)  $Q_0^+$  on standardin newtonisen profiilin osuus dimensiottomassa muodossa:

$$Q_0^+ = \pi (R^+)^2 \frac{1}{\kappa} \left[ \ln R^+ + B \kappa - \frac{3}{2} \right]. \quad (49)$$

Työssä mitattiin täsmälleen samalla suspensiolla  $100:n$  ja  $200:n$   $mm:n$  putkille häviö virtaaman funktiona . Kaavan (48) skaalautuvuutta tutkitaan sovittamalla parametrit  $\lambda_1$  ja  $\lambda_2$   $100$   $mm:n$  putken mitattuun häviödataan ja laskemalla  $200$   $mm:n$  putken virtaama sille mitatun häviön ja sovitettujen parametrien avulla ja vertaamalla laskettua virtaamaa mitattuun. Sovitus ja virtaaman laskeminen suoritetaan dimensiottomassa muodossa. Vertailua varten suureista esitetään dimensiolliset arvot.

### 3 Mittaukset, mittauslaitteisto ja mittausmenetelmät

Tässä työssä mitattiin mänty- ja koivususpension nopeusprofiili, häviö ja virtaama. Mitatut kuitupitoisuudet eri nimellisakeuksille on esitetty taulukossa 1. Kummallekin putkelle käytettiin täsmälleen samaa suspensiotta, joten pitoisuudet ovat putkille samat. Lyhytkuituinen koivu käyttäytyy lähes veden tavoin 0,5 %:ssa, joten mittaukset aloitettiin 1,0 %:sta. Myös koivukuidulla oli tarkoitus mitata 4,0 %:n sakeus, mutta sakeus jäi liian alhaiseksi ja mittausten alkaessa sitä ei enää voitu muuttaa. Suuressa järjestelmässä halutun sakeuden tarkka sekoittaminen on haasteellista. Tämä ei ole kuitenkaan ongelma, koska analyysissa käytetään todellisia mitattuja pitoisuuksia.

Tavoitteena oli suorittaa mittaukset riittävän tiheällä ja laajalla virtaamasarjalla, jotta kaikki virtausalueet ja transiitot niiden välillä saadaan näkyviin. Mittaukset onnistuivat matalilla virtaamilla hyvin ja 100 mm:n putkella suurelta osin myös suuremmilla virtaamilla. Linjassa ennen mittaussuoraa olevat rakenteelliset kuristukset yhdistettynä suurempaan mittausputkeen saivat aikaan suuren paikallisen paine-eron aiheuttaen suuremmilla virtaamilla voimakasta kavitaatiota. Kavitaation aiheuttama voimakas tärinä aiheutti huomattavan häiriön erityisesti häviön mittaukseen. Tästä syystä suurin osa 200 mm:n putken mittauksista jäivät toivottua pienempiin virtaamiin.

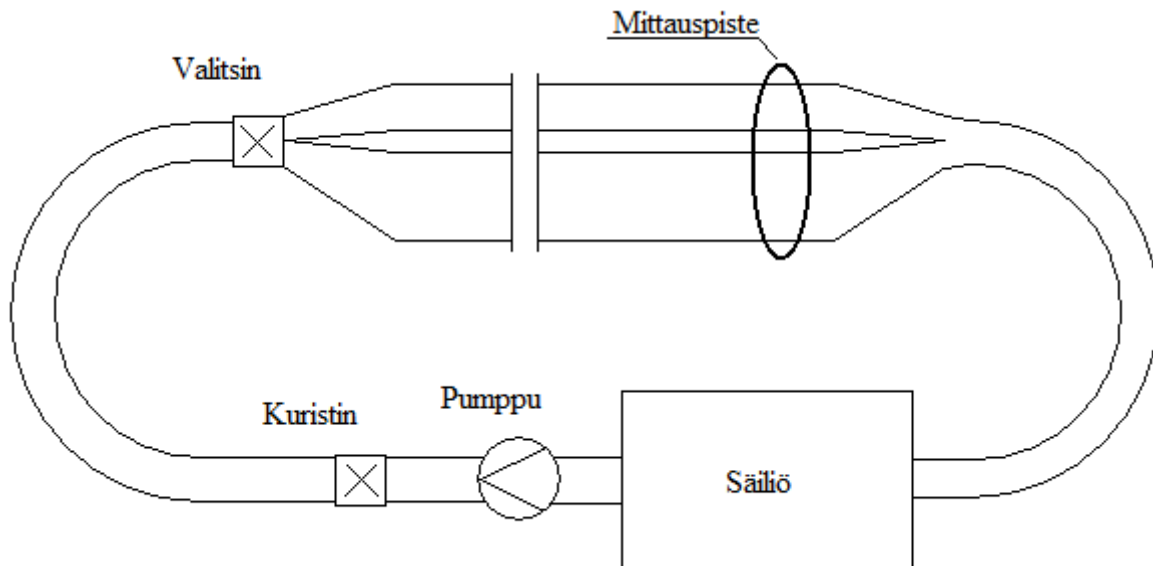
Nopeusprofiilia mitattaessa tavoitteena oli saada profiili koko putken halkaisijan alueelta. Näin suurissa putkissa on haastavaa saada riittävän voimakas kaikuprofiilin intensiteetti yhdellä anturilla, joten mittaukset toteutettiin kahdella vastakkaisella anturilla, tällöin voidaan myös tarkastella putken symmetrisyyttä. Ultraääntä eniten vaimentavilla suurilla sakeuksilla oli vaikeuksia saada mitattua nopeusprofiili edes putken puoleen väliin. Viskositeetti laskelmat tehtiin kuitenkin lähempänä putken seinämää, joten signaalin heikentyminen ei ollut suuri ongelma viskositeetin määrittämisen kannalta.

%	Koivu	Mänty
0,5	-	0,65
1,0	1,09	1,01
1,5	1,53	1,51
2,0	2,00	1,92
2,5	2,54	2,49
3,0	3,00	2,96
3,5	3,57	3,51
4,0	-	3,69

*Taulukko 1: Nimellispitoisuuksia vastaavat todelliset kuitupitoisuudet.*

### 3.1 Linja

Mittauksia tehtiin kahdella nimellisputkikoolla,  $100\text{ mm}$  ( $\varnothing 105,2\text{ mm}$ ) ja  $200\text{ mm}$  ( $\varnothing 191,6\text{ mm}$ ). Putket sijoitettiin rinnakkain samaan linjaan, ja käytettävä putki valittiin venttiilillä. Linja muodostuu suspensiosäiliöstä, pumpusta ja putkesta (kuva 12). Säiliössä suspension saostumisen estää erillinen sekoitin. Linjan tärkein osuus on PVC-muovista valmistettu mittaussuora, vähintään 50 kertaa putken halkaisijan pituinen suora ja sileä osuus. Häviön ja nopeusprofiilin mittaus sijoitettiin mittaussuoran päähän.



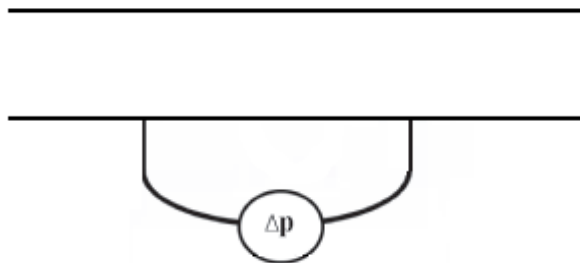
*Kuva 12: Periaatekuva mittauksissa käytetystä linjasta.*

Usein putkistovirtausmittauksissa käytetään turbulenssigeneraattoria eli kuristinta mittaussuoran alussa takaamaan täysin kehittynyt virtaus mittauspisteessä. Tällä linjalla suurilla virtaamilla kuristus saa aikaan suuren paikallisen paine-eron, mikä aiheuttaa voimakasta kavitointia. Kavitointi aiheutti suuria häiriöitä häviömittaukseen, joten turbulenssigeneraattori poistettiin. Puukutususpensio on huomattavan jäykkä fluidi, joten virtauksen voidaan olettaa olleen täysin kehittynyt mittauspisteessä ilman varsinaista turbulenssigeneraattoria.

Linjoissa oli myös kuristinventtiili pumpun jälkeen. Venttiilillä voitiin säätää virtausnopeutta pumpun kierrosluvun säätämisen lisäksi. Suspensiosäiliötä sekoitettiin mittauksen ajan saostumisen välttämiseksi. Poikkeuksena olivat pienten virtaamien mittaukset, joissa sekoitin sammutettiin hetkellisesti juuri mittauksen ajaksi mahdollisten sekoittimen lapojen aiheuttamien painepulsaatioiden minimoimiseksi. Vastaavasti pumppujen aiheuttamaa pulsaatiota hitaissa virtauksissa minimoitiin pyörittämällä pumppua kovilla kierroksilla mutta kuristamalla venttiilillä virtaus riittävän hitaaksi.

### 3.2 Häviön ja virtaaman mittaus

Häviömittaus suoritettiin mittaussuoran loppupäähän sijoitettujen paineyhteiden kautta (kuva 13). Yhteet toteutettiin poraamalla putkeen kaksi reikää, 100 mm putkella niiden etäisyys oli 1,4 metriä ja 200 mm:llä 3 metriä. Häviö pituusyksikköä kohti pienenee putken halkaisijan kasvaessa. Mittaus-tarkkuuden parantamiseksi yhteiden etäisyyttä kasvatettiin, jotta mittarin havaitsema paineyhteiden välinen häviö olisi riittävä. Reiät porattiin kohtisuorasti putken kylkeen, samalla varmistaen että putken sisäpinnan profiili säilyy mahdollisimman muuttumattomana.



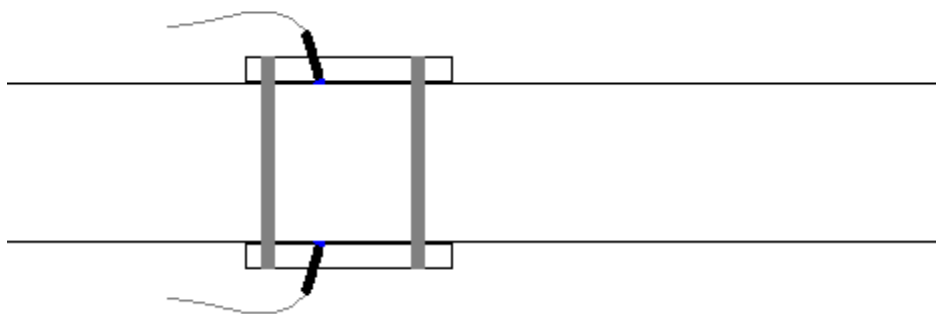
*Kuva 13: Kaaviokuva häviömittauksen toteutuksesta.*

Putken kylkeen liimattiin kappale PVC-muovia. Muovikappaleeseen tehtiin kierteet, johon impulssiletkun kiinnike voitiin kiertää paikalleen, ja letkut vedettiin paine-eromittariin (Rosemount). Mittarin korkeapainepuoli liitettiin ylävirtaan, matalapainepuoli vastaavasti alavirtaan. Impulssiletkun reiät sijoitettiin putken alapintaan, jotta linjassa mahdollisesti oleva ilma ei nousisi impulssiletkuun. Mittauksissa putken absoluuttinen paine nousee niin suureksi, että kuitu työntyy impulssiletkuun tukkien paineyhteyden. Impulssiletkuun mittarin puolelta johdetulla jatkuvalla purseveden syötöllä yhteys saatiin pysymään auki. Pursevesijärjestelmä puristaa vettä vakiovirtaamalla impulssiletkuun. Varmistamalla sama virtaus kummassakin impulssiletkussa, järjestelmä ei vaikuta mittaustuloksiin.

Virtaaman mittaukseen käytettiin Magflon virtaamamittaria MAG5000:sta. Magflo mittaa virtaaman magneettikentän avulla. Sisäpinnaltaan eristetty mittauspätkän säteen suuntainen magneettikenttä havaitsee elektromagneettisen induktion avulla kenttää vastaan kohtisuorasti liikkuvat varaukset, tässä tapauksessa veden ionit. Havaituista ionien liikkeistä laitteisto laskee virtaaman.

### 3.3 Nopeusprofiilin mittaus

Nopeusprofiili mitattiin DOP-2000 laitteistolla. Laite koostuu mittaustietokoneesta, signaalinkäsittelypiiristä ja itse mittaussensoreista. Nopeusprofiilit mitattiin mittaussuoran loppupäästä. Varsinainen profiili mitattiin kahdella vastakkaisella anturilla. Kumpikin anturi mittasi samasta virtaamasta oman profiilin. Tosin DOP2000-anturit eivät voi mitata saman aikaisesti, joten kahden eri anturin mitaamat profiilit eivät ole ajallisesti täsmälleen samasta virtaustilanteesta. Anturit kiinnitettiin tarkoitusta varten valmistetuilla akryylipidikkeillä (kuva 14). Pitkä pidike varmisti anturin linjan putken suuntaiseksi ja haluttuun kulmaan poratut reiät anturin poikittaiskulman putken suhteen. Ultraäänigeelillä varmistettiin signaalin kulkeminen putken ja anturin välillä. Anturi lukittiin paikalleen lukitusruuvilla mittauksen ajaksi.



*Kuva 14: Periaatekuva anturin kiinnityksestä putken kylkeen.*

### 3.4 Datan käsittely ja mittausten ohjaus

Mittaustilanteesta tallennetaan virtauksen nopeusprofiili, häviö ja virtaama. Virtaaman ja häviön mittaaminen sekä pumpun ohjaus suoritettiin Orion-järjestelmällä. Järjestelmään tuli virtaama Magflo -mittarilta ja häviödata Rosemount -painelähtetimeltä. Pumpun ohjausjännitettä säädettiin halutun virtaamaan aikaansaamiseksi. Virtaaman tasoituttua käynnistettiin profiilimittaus DOP2000:lta, virtaaman sekä häviön mittaus Orionilta. DOP2000:n mittaama profiili tallentui laitteen omalle levyille. Orion-järjestelmän mittaus tuottaa halutun määrän yksittäisiä mittauksia häviöstä ja virtaamasta. Arvot keskiarvoistettiin ja koottiin häviötiedostoon.

DOP2000 mittaa putken säteen suunnassa nopeuden diskreetisti paikkaikkunoissa, joita oli mittauksissa putken koosta ja kuitupitoisuudesta riippuen n. 150 – 350. Näin saadaan nopeusprofiili putken halkaisijaa pitkin. Hetkellisiä profiileja mitataan tuhansia nopeuden keskiarvoistusta varten. Vahvasti turbulentin virtauksen nopeusprofiilin keskiarvo alkaa vakiintua riittävästi 4000:lla profiililla. Käytössä oli kaksi anturia, joten todellisuudessa mitattuja profiileja kertyy kaksinkertainen määrä. Nopeusprofiilimittausten tuottama suuri tietomäärä käsiteltiin Matlabille kirjoitetuilla ohjelmilla. ReadProf-ohjelma lukee DOP:n luomat binääritiedostot ja tallentaa ne huomattavasti pienempiin Matlabin matriiseihin. Tämän jälkeen QuadProf -ohjelma laskee jokaisesta virtaamasta mitattujen yksittäisten profiilien keskiarvon ja piirtää lopulliset kuvat. QuadProf-ohjelma myös normittaa nopeuden keskiarvoprofiilit. Kerroin lasketaan antamalla ohjelmalle kulman arvo. Tätä arvoa käyttäen ohjelma integroi virtaaman mitatun profiilin ensimmäisestä puoliskosta. Laskettua arvoa verrataan

mitattuun virtaamaan ja normitetaan tarvittaessa. Näin saadaan normituskerroin kullekin yksittäiselle profiilille. Normituskerroin siis korjaa nopeusprofiilimittauksen epätarkkuuksia. QuadProf-ohjelma myös laskee häviön ja dimensiottomat nopeusprofiilit.

Seuraavaksi lasketaan Vfit -ohjelmalla suspension viskositeetti käyttäen laminaarivirtausalueen nopeusprofiileja (kuvat B.x b-d). Tämän jälkeen määritetään materiaalilain parametrit  $n$  ja  $C$  Parameters -ohjelmalla, lopuksi materiaalilain toimivuus varmistetaan ViskProf -ohjelmalla (kuvat B.x e). Korrelaatiomallin skaalautuvuus testataan Scale -ohjelmalla (kuvat liitteessä C)

Painekäyrän, nopeusprofiilin, normituskertoimen ja viskositeetin laskemiseen ohjelma tarvitsee seuraavat perusparametrit mittaustilanteesta.

Putken säde	$R [m]$
Paineyhteyksien välimatka	$L [m]$
Anturin kulma	$\theta$
Äänen nopeus suspensiossa	$v$

Dimensiottomien profiilien laskemiseen tarvitaan.

Kinemaattinen viskositeetti	$\nu_f [Pa s]$
Veden tiheys	$\rho [kg / m^3]$
Karmanin vakio	$K$
Turbulenssivakio	$B$

Ultraääni kulkee myös putken seinämän ja ohuen geelin läpi mitatessaan suspension liikettä. Koska äänennopeus putken seinämän sisällä on lähes kolme kertaa nopeampi kuin vedessä, on profiilin sijaintia on korjattava. Tämä tapahtuu säätämällä parametria, joka määrittää anturin todellisen etäisyyden putken sisäseinämään, eli siirtää kohtaa jossa profiili kohtaa seinämän. Johtuen profiilin reunaa-alueen siirtymisestä, profiili myös rajataan oikea kohdan löytymisen jälkeen aivan putken seinämän kohdalle. Näin saadaan mahdollisimman todellinen nopeusprofiili. Menetelmä on toisaalta riskialtis, koska profiilia voisi myös tulkita väärin. Tällöin esimerkiksi liian rajusti leikattu profiili voi näyttää luotettavalta dimensiottomassa kuvassa mutta on fyysikaalisesti väärä. Tällöin erityisesti lähiseinäma-alue voi vääristyä voimakkaasti.



### 3.5 Käytetyn suspension valmistus ja sakeuden mittaus

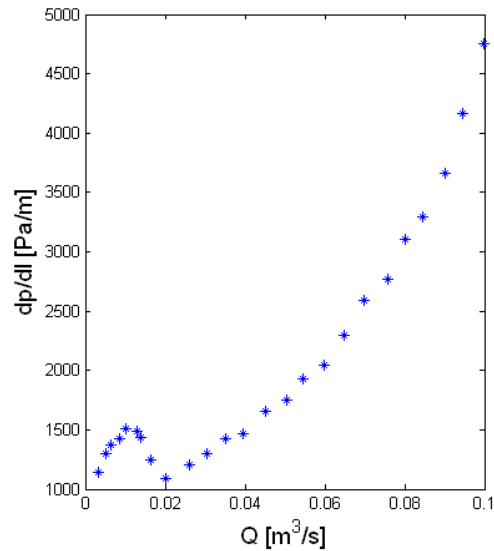
Puukuitususpensio tehtiin sekoittamalla kemiallisesti irrotettuja puukuituja veteen. Kuituarkeista mitattiin kuivatus-punnitusmenetelmällä kosteusprosentti täsmällisemmän kuiva-aine pitoisuuden varmistamiseksi suspensioon. Arkit rikottiin pulpperilla ja suspension pysyminen tasalaatuisena varmistettiin pyörittämällä suspensiota linjassa ennen ensimmäistä mittausta. Mittaukset aloitettiin sakeimmasta kuitupitoisuudesta. Suspensio sekoitettiin haluttuun suurimpaan sakeuteen ja vettä lisäämällä suspensio laimennettiin aina seuraavaan sakeuteen. Suspension sakeus varmistettiin mitaamalla varsinaisen mittauksen jälkeen. Suspension sakeuden mittaus toteutettiin punnitsemalla näyte ennen ja jälkeen kuivatuksen. Näyte otettiin linjasta venttiilin kautta mittauspisteen jälkeen.

## 4 Tulokset ja analyysi

Tuloksissa esitetään dimensiolliset ja dimensiottomat nopeusprofiilit, sekä häviökäyrät ja normituskertoimet. Kuvat löytyvät liitteestä *A*. Tässä työssä keskitytään pääasiassa koivususpension viskositeetin määrittelyyn. Häviökäyrien, nopeusprofiilien ja normituskertoimen tarkemman tulkinnan voi lukea erikoistyöstäni [9]. Tuloksissa esitetään olennaisesti koivususpension viskositeetin käyttäytyminen ja edelleen suspension viskositeetille kehitetty materiaalilaki parametreineen sekä materiaalin toimivuuden tarkastelu (liite *B*). Lopuksi tutkitaan häviökorrelaatio mallin skaalautuvuutta eri putkikokojen välillä (liite *C*).

### 4.1 Häviö

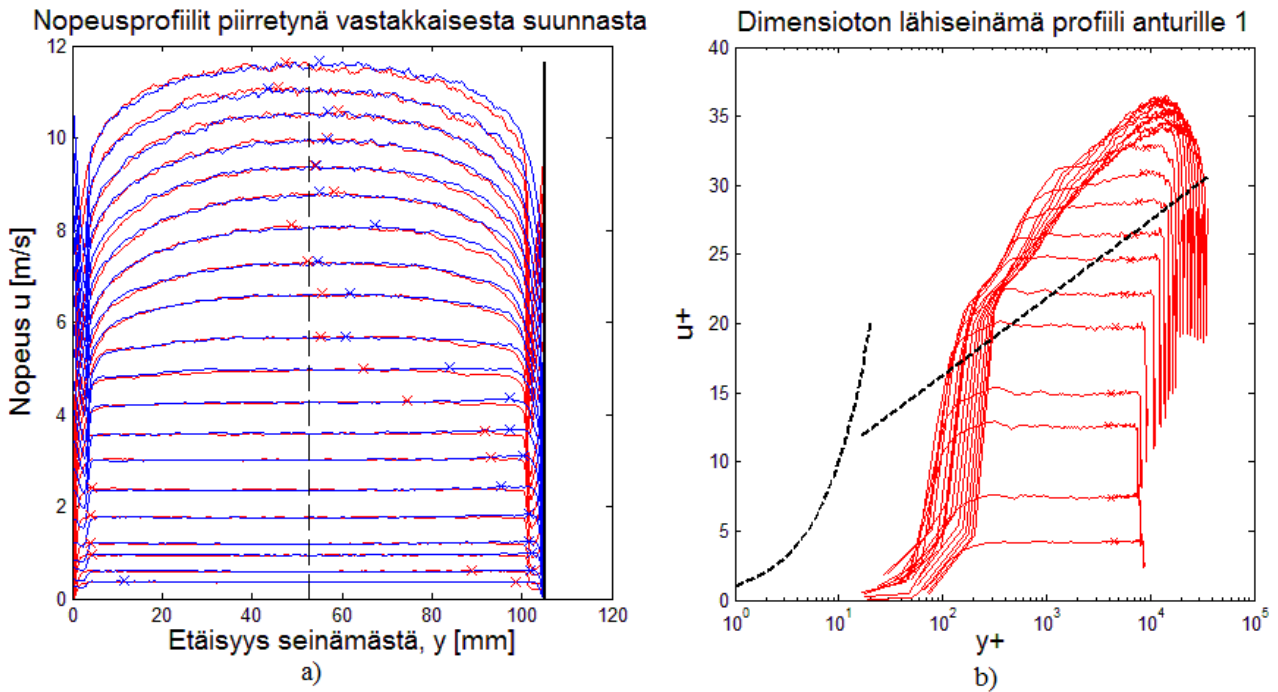
Häviö on esitetty paine-erona metriä kohti, pystyakselilla on paine-ero Pascaleina ja vaaka-akselilla virtaama kuutiometreinä sekunnissa (kuva 15). Häviökäyrästä nähdään helposti mittauksen kulku yleisesti. Jo yli yhden prosentin suspension häviökäyrässä erottuu selvästi virtausalueilla **I-III** tapahtuva tulpan muodostuminen, voitelukerroksen syntyminen ja painekäyrän tasaantuminen voitelukerrosvirtauksen muututtua turbulenttiseksi. Käyrästä on myös nähtävissä lineaarinen osuus **IV**, jossa esiintyy sekä turbulenttia että tulppavirtausta. Viimeisessä alueessa **V** täysin turbulentti virtaus käyttäytyy neliöllisesti. Tarkastelemalla näitä tunnusmerkkejä käyrästä nähdään virtaamat, joilla kyseiset ilmiöt tapahtuvat ja kuinka pitkälle eri virtausalueille mittauksessa päästään.



Kuva 15: Esimerkkikuva häviökäyrästä, 3,0 %:n koivususpensiolla 100 mm:n putkessa.

## 4.2 Suspension nopeusprofiilit

Nopeusprofiilit esitetään dimensiottomana ja dimensiollisena (kuva 16). Pystyakselilla dimensiollisessa kuvassa on nopeus metreinä sekunnissa ja vaaka-akselilla etäisyys putken seinämästä millimetreinä. Dimensiottomassa kuvassa nopeusprofiili esitetään dimensiottomien suureiden  $u^+$  (7) ja  $y^+$  (8) avulla. Suurilla putkilla signaali heikkenee voimakkaasti luotaussyvyyden kasvaessa, varsinkin sakeammalla suspensiolla. Tästä syystä joissain mittauksissa anturit mittasivat vain noin putken puoliväliin asti.

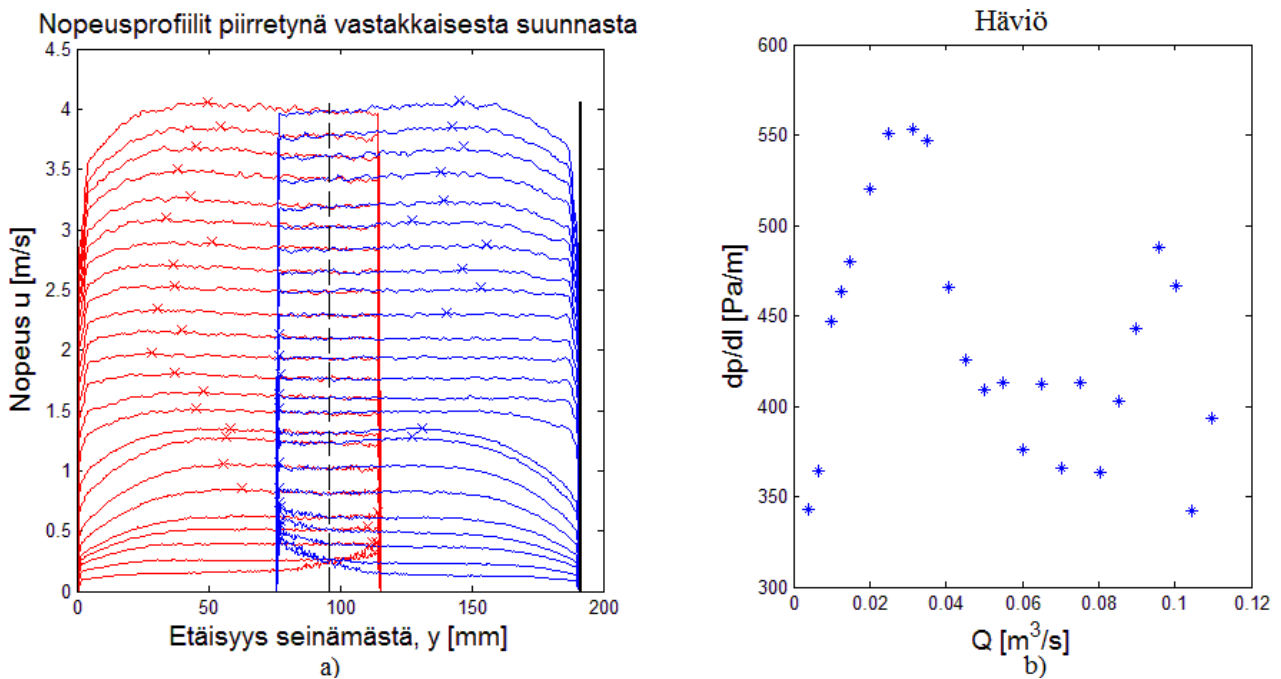


Kuva 16: Esimerkkikuva nopeusprofiileista 1,5 %:n mäntysuspensiolla 100 mm:n putkessa.

Samoin kuin häviökäyrästä myös nopeusprofiileja tarkastelemalla voidaan erottaa virtauksen eri tiloja, joskaan ei välttämättä yhtä selvästi. Suspension virratessa alhaisilla nopeuksilla tulppamainen nopeusprofiili erottuu hyvin. Virtaaman kasvaessa profiili alkaa pyöristyä turbulenssin rikkoessa kuitutulppaa. Profiilista on myös nähtävissä eri virtausalueet yksityiskohtaisemmin. Ensimmäisessä alueessa kuitutulpan uloimmat kuidut ovat kosketuksissa putken seinämään. Suuri kitka kuitujen ja seinämän välillä aiheuttaa suuren häviön. Usein suspensio virtaa täysin tulppamaisena rakenteena alueilla **I** ja **II**. Mutta kitkasta aiheutuvan leikkausjännityksen kasvaessa yli kriittisen rajan  $\tau_c$  voi kuitutulppa murtua jo ensimmäisellä virtausalueella, tällöin suspension virtaus muuttuu laminaariseksi. Laminaarinen virtaus jatkuu alueella **II** kunnes voitelukerroksen myötä pienenevä leikkausjännitys pienenee alle kriittisen rajan. Alueella **III** voitelukerroksen virtaus muuttuu turbulentiksi. Alueella **IV** turbulenttisen virtauksen osuus kasvaa ja nopeusprofiilin reunat pyöristyvät voimakkaammin ja kaareva alue levenee.

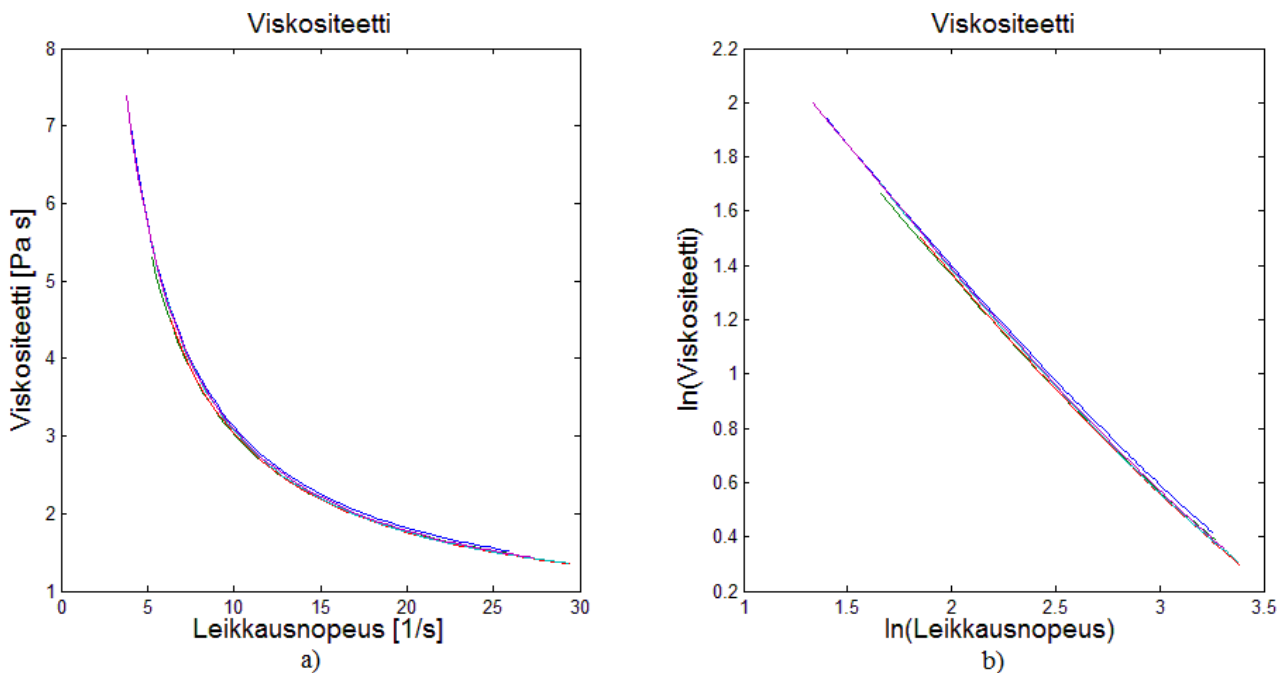
### 4.3 Kuituverkon viskositeetin määrittäminen leikkausvirtauksesta

Koivukuiduilla mitatuissa nopeusprofiileissa havaittiin laminaarinen leikkausvirtaus selvästi turbulentsin virtausnopeuden alapuolella (kuva 17). Häviökäyristä nähdään laminaaristen profiilien muodostuvan virtausalueilla **I** ja **II** kun puukuitususpension virtaus alkaa muuttua turbulentiksi vasta alueella **III**. Laminaarinen profiili havaittiin vain koivukuiduilla. Männyn pidemmät kuidut luultavasti pitävät verkon vahvemmin koossa vielä 200 mm:n putkessakin, jolloin syntyvä leikkausjännitys ei riitä murtamaan kuitutulppaa. Esimerkiksi erikoistyöhöni suoritetuissa mittauksissa laminaarisia leikkausvirtausprofiileja ei esiintynyt koivukuiduillakaan enää 40 mm:n putkessa. Laminaarinen leikkausvirtausprofiili olisi mahdollisesti havaittavissa myös mäntysuspensiolla selvästi suuremmalla putkikoolla. Myös suspension sakeus vaikuttaa leikkausvirtausprofiilin syntymiseen. Leikkausvirtausprofiilin syntymiseen vaaditaan riittävän suuri leikkausjännitys, jotta kuidut ja kuituflokot irtoavat toisistaan ja voivat liikkua ympäröivien partikkeleiden suhteen. Laimeassa suspensiossa kuidut eivät painaudu voimakkaasti putken seinämään, jolloin riittävän suurta leikkausjännitystä ei pääse syntymään. Suuremmilla sakeuksilla kuidut painautuvat voimakkaasti putken seinään, mutta kuidun ja seinämän välinen kitka ei riitä murtamaan tiheämpää kuituverkkoa.



Kuva 17: Profiileissa 6,7 ja 8 (alhaalta laskien) nähtävissä selvimmän leikkausvirtausprofiili 200 mm putkessa 2,5 % koivukuitu pitoisuudella. Kuvan a) nopeusprofiilit vastaavat kuvassa b) esitettyjä häviöarvoja eri virtaamilla.

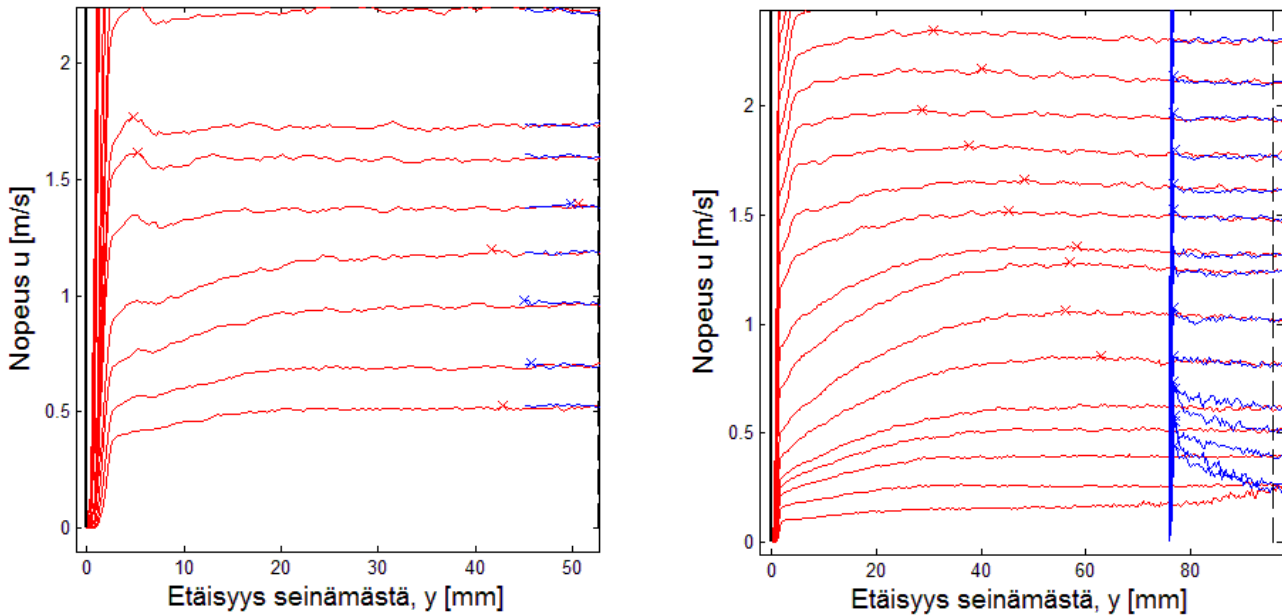
Suspension viskositeetti lasketaan mitatun nopeusprofiilin ja häviön avulla. Nopeusprofiilista laskeaan leikkausnopeus ja häviöstä aiheutuvan paine-eron avulla saadaan leikkausjännitys. Nyt viskositeetti voidaan laskea kaavan (34) avulla ja kuvata esimerkiksi säteen tai leikkausnopeuden suhteen. Viskositeetti piirrettynä leikkausnopeuden suhteen muodostaa laskevan potenssifunktiota muistuttavan käyrän. Sama käyrä piirrettynä logaritmisilla muuttujilla muodostaa suoran, jolloin alkuperäinen käyrä todella on potenssifunktio (kuva 18). Kuvasta 18 nähdään viskositeetin pienentyvän leikkausnopeuden kasvaessa, eli puukuitususpensio on leikkausoheneva.



Kuva 18: Kuvassa a) suspension dynaaminen viskositeetti leikkausnopeuden funktiona, kuvassa b) logaritmisilla muuttujilla. 200 mm putki, 2,5 % koivukuitu.

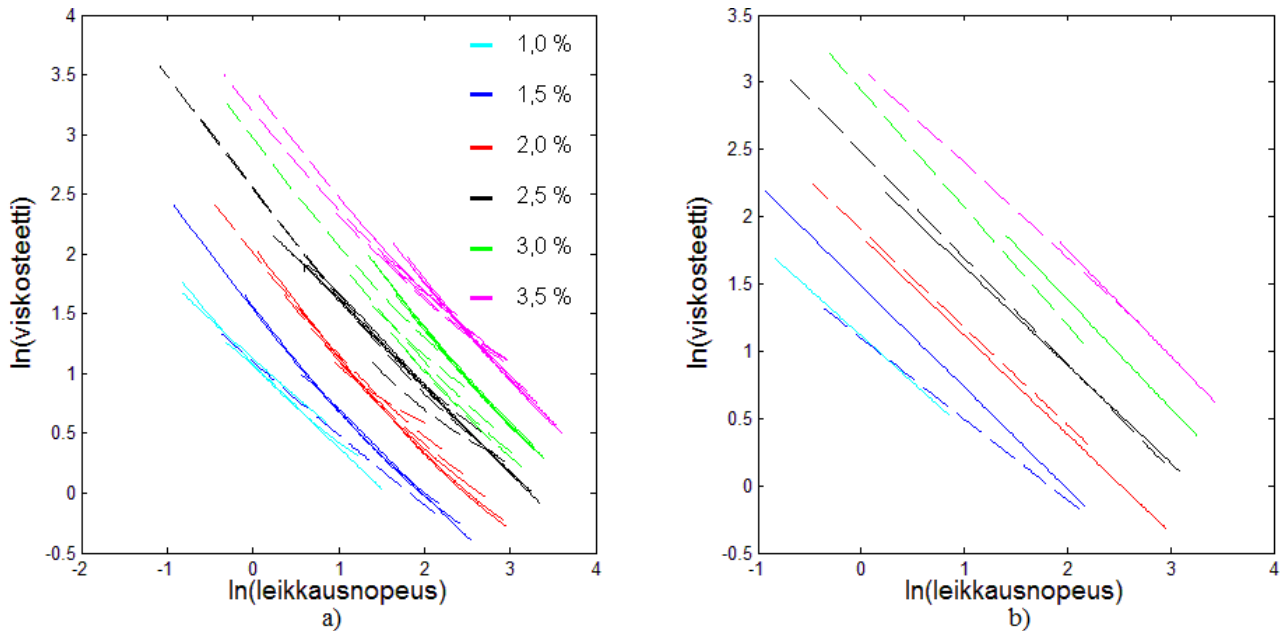
Laminaarinen leikkausvirtausalue oli havaittavissa koivukuiduilla 200 mm putkessa pitoisuuksilla 1,0 % - 3,5 % ja 100 mm putkessa pitoisuuksilla 1,5 % - 3,5 %. Kuidunpituuden ja putken halkaisijan suhteen pienentyessä nopeusgradientti pienenee ja 100 mm putkessa nopeusprofiili alueilla **I** ja **II** on jo huomattavasti suurempi 200 mm putkeen verrattuna (kuva 19). Nopeusprofiili mitataan putken halkaisijan alueelta mm. putkikoosta riippuen 150 – 350 pisteestä, eli noin 0,6 mm välein. Informaation säilyttämiseksi nopeusgradientti lasketaan yhtä tiheällä pisteistöllä. Nopeusprofiili ei kuitenkaan ole sileä riittävän läheltä tarkasteltuna, jolloin gradientin merkin ja arvon nopea vaihtelu aiheuttaa suuren häiriön viskositeetin arvoa laskiessa. Tästä johtuen mitattua nopeusprofiilia täytyy suodattaa. Informaation säilymisen ja tulosten luettavuuden kannalta paras tulos saadaan sovitta-

malla mitattuun pisteistöön käyrä. Sovituksessa käytettiin seitsemännen asteen polynomia, ja sovitus tehtiin vain kuvissa B.x b) näkyvälle alueelle. Nopeusprofiilin muoto taittuu jyrkästi lähellä seinämää missä kuidut alkavat liukua putken seinämän suhteen. Rajaamalla tämä alue sovituksen ulkopuolelle saadaan käyrä istumaan dataan tarkasti.



Kuva 19: 2,5 % koivususpension laminaariset virtausprofiilit. Vasemmalla 100 mm putkessa, oikealla 200 mm.

Nopeusprofiileille sovitetuista käyristä saadaan laskettua kunkin virtaaman nopeusgradientti ja siitä edelleen viskositeetti. Jokaisen yksittäisen mittauksen laminaaristen profiilien viskositeetti piirrettiin samaan kuvaan leikkausnopeuden funktiona logaritmisilla muuttujilla ja käyrille laskettiin keskiarvo. Kummankin putken jokaisen mittauksen laminaaristen profiilien keskiarvo käyrä piirrettiin samaan kuvaan (kuva 20). Samojen kuitupitoisuuksien käyrät limittyvät kohtuullisesti eri virtaamille ja putkikoille. Nyt voidaan todeta kuitususpension laminaarisen virtauksen viskositeetin olevan riippumaton virtausnopeudesta ja geometriasta. Viskositeetin arvo leikkausnopeuden funktiona riippuu siis vain materiaalin ominaisuuksista. Laskemalla kuvan 20 käyrille kulmakerroin ja pystyakselin leikkauspiste saadaan määriteltyä materiaalilain (38) parametrit  $n$ , ja  $C$ .

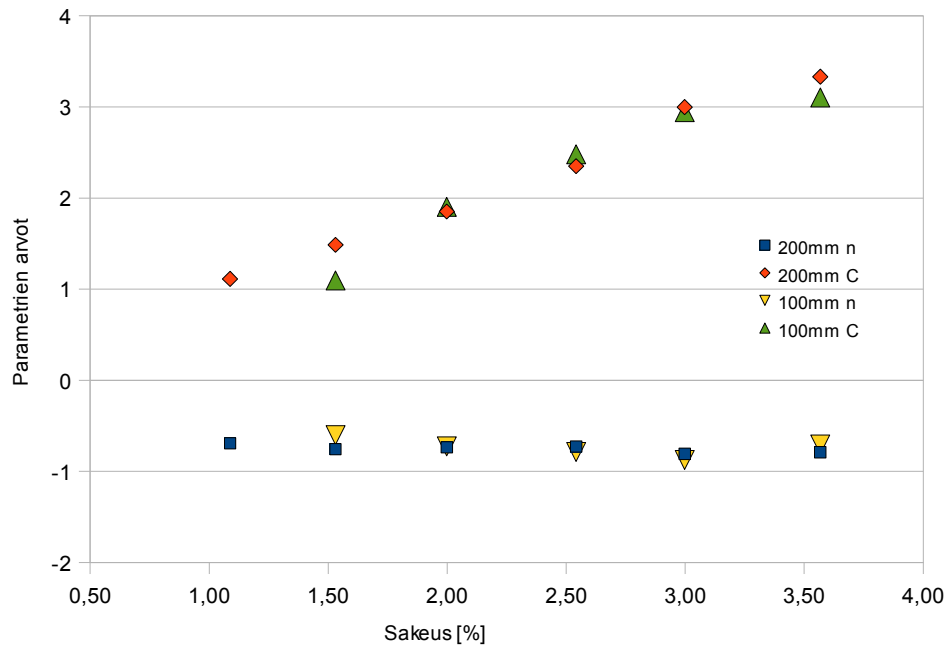


Kuva 20: Kuvassa a) kaikkien mittausten laminaariset profiilit. Kuvassa b) vastaavien käyrien keskiarvot. 200 mm putken käyrät piirretty yhtenäisillä viivoilla, 100 mm katkoviivalla.

Kulmakertoimien arvot ovat hyvin lähellä toisiaan eri suorille. Parametrin  $n$  arvot eivät siis näytä riippuvan suspension sakeudesta (kuva 21). Poikkeuksena 100 mm putken 1,5 % suspension kulmakerroin, joka on itseisarvoltaan selvästi muita pienempi. Ero muihin johtuu laimean suspension ja pienen putken yhdistelmästä. Tällöin laminaarisen virtauksen nopeusgradientin arvo jää pieneksi, jolloin virtauksen parametrisointi on epävarmempaa.

Odotetusti voidaan todeta suspension viskositeetin kasvavan kuitupitoisuuden kasvaessa. Materiaalilain avulla puukuitususpension laminaarisen virtauksen viskositeetin määrittämiseksi tarvitaan parametrin  $n$  arvo ja parametrin  $C$  riippuvuus suspension sakeudesta. Vakiot saadaan laskettua laminaarisen nopeusprofiilin ja häviön avulla. Parametrien käyttäytyminen kuitupitoisuuden suhteen kuvassa 21 ja tarkat arvot taulukossa 2. Kuvat viskositeetin laskemisessa käytetyistä nopeusprofiileista ja viskositeetista säteen ja leikkausnopeuden funktiona on esitetty liitteessä B.



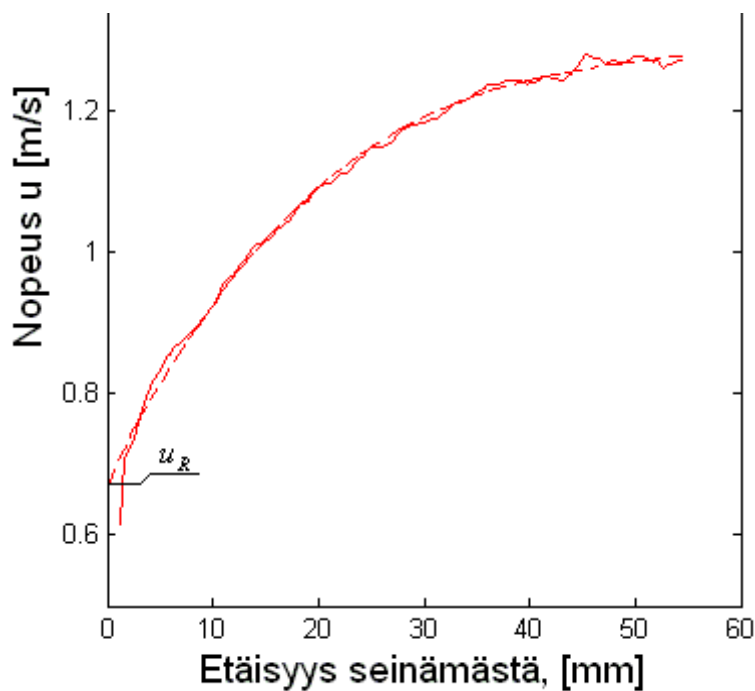


Kuva 21: Materiaalilakiin (38) eri mittauksista sovitetut parametrit kuitupi-toisuuden funktiona.

Sakeus %	200 mm		100 mm	
	n	C	n	C
1,09	-0,69	1,11	-	-
1,53	-0,76	1,49	-0,60	1,10
2,00	-0,74	1,85	-0,73	1,90
2,54	-0,73	2,35	-0,79	2,48
3,00	-0,81	3,00	-0,78	2,87
3,57	-0,79	3,33	-0,70	3,10

Taulukko 2: Materiaalilaissa (38) käytettävien parametrien tarkat arvot

Tarkastellaan seuraavaksi materiaalilain toimivuutta. Lasketaan kaavalla (46) teoreettiset nopeusprofiilit ja verrataan tuloksia mitattuihin nopeusprofileihin. Kaavassa (46) käytettävä seinämänopeus  $u_R$  saadaan kokeelliseen nopeusprofiiliin sovitetun käyrän leikkauspisteestä (kuva 22). Samaan kuvaan piirretyt teoreettiset ja kokeelliset nopeusprofiilit löytyvät liitteestä B kuvista e). Kuvissa on esitetty katkoviivalla teoreettinen profiili ja jatkuvalla viivalla mitattu nopeusprofiili. Teoreettiset käyrät vastaavat hyvin mitattuja nopeusprofileja. Merkittäviä virhelähteitä on kolme. Parametrien  $n$  ja  $C$  tarkkuus vaikuttaa merkittävästi teoreettisen profiilin määrittämiseen. Kaavassa (46) parametrit ovat muuttujan kertoimena, jolloin ne vaikuttavat käyrän muotoon, tämä näkyy mm. kuvassa B3.e). Systemaattista virhettä aiheuttaa virtauksen seinämänopeuden arvioinnin epätarkkuus, esimerkkinä profiilit kuvassa B5.e). Kokonaisuudessaan hyvän teoreettisen ja kokeellisen profiilin vastaavuuden nojalla voidaan todeta materiaalilain kuvaavan suspension viskositeetin käyttäytymistä hyvin.

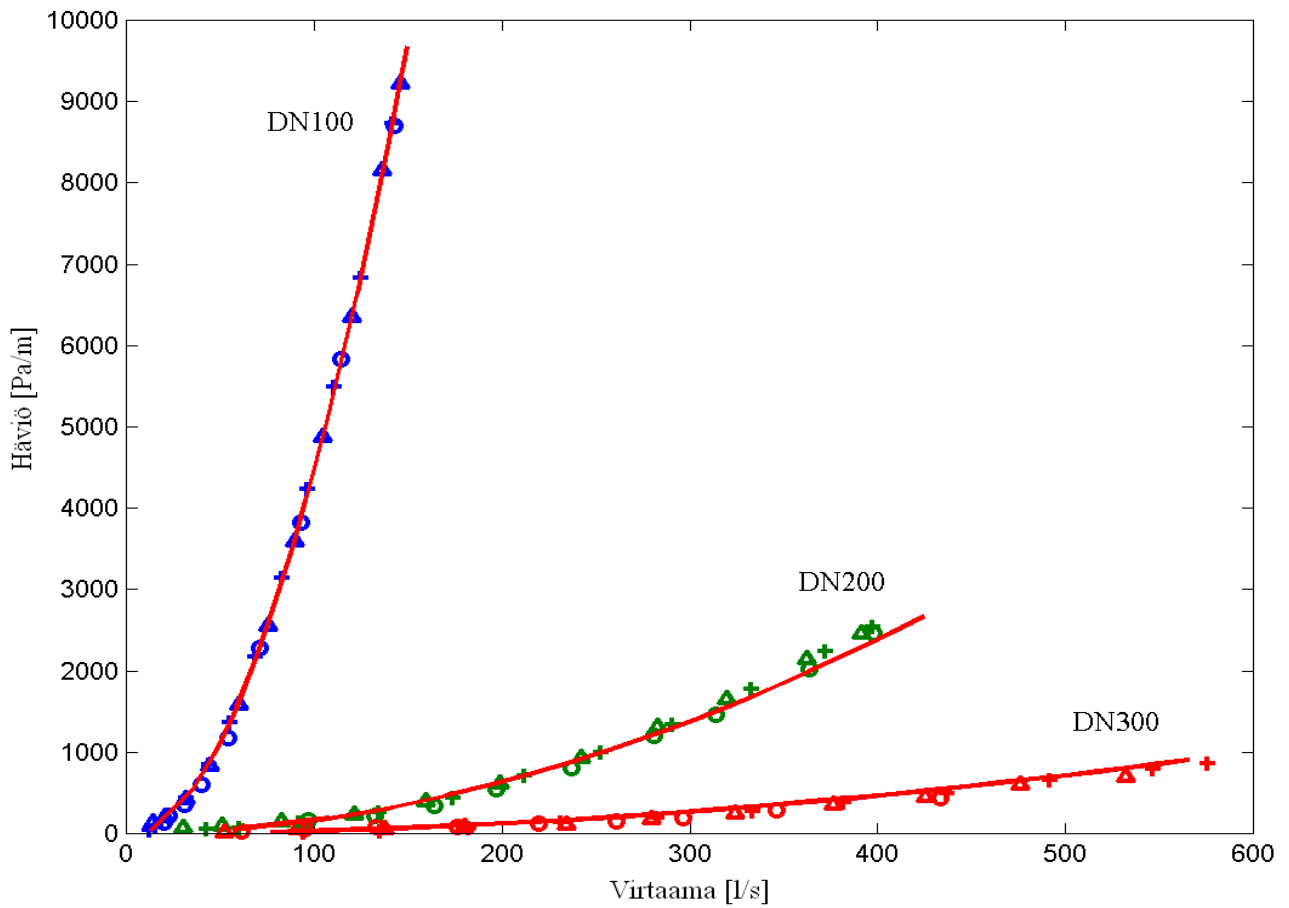


Kuva 22: Havainnekuva seinämänopeuden määrittämisestä. Kuvassa katkoviivalla esitetty sovitettu nopeusprofiili.

## 4.4 Häviökorrelaation skaalautuvuus turbulentilla alueella

Korrelaation (48) skaalautuvuutta kokeiltiin sovittamalla parametrit  $\lambda_1$  ja  $\lambda_2$  100 mm putkesta mitattuihin häviötuloksiin ja vertaamalla 200 mm putken mitattua virtaamaa häviötulosten avulla määritettyjen parametrien avulla laskettuun virtaamaan. Parametrit sovitettiin pienemmän putken tulokseen, koska sillä mitatut häviökäyrät kattavat huomattavasti paremmin viimeisenkin virtausalueen, jolloin parametrien sovitus on luotettavampaa. Skaalaus tehtiin mäntysuspensiolle pitoisuuksille 0,5 % - 2,5 % ja koivususpensiolle 1,0 % - 2,5 %. Tavoite oli kokeilla korrelaation skaalautuvuutta 4 % saakka. Kavitaatio ongelmista johtuen virtaamat jäivät toivottua pienemmiksi, jolloin turbulentille alueelle luodun mallin testaaminen ei ole järkevää. Korrelaatio skaalautuu hyvin 1,0 %:n ja 1,5 %:n koivususpensiolle (liite C). Myös 0,5 %:n männyn mitattu ja laskettu virtaama käyttäytyvät samoin, mutta mahdollisesti häviön systemaattisen mittausvirheen takia virtaamat ovat noin neljä litraa liian suuria.

Suurelta osin korrelaatiomallin avulla saatu häviökäyrä ei vastaa mitattuja arvoja eri sakeuksilla. Tähän voi olla monia syitä. Yksi merkittävimmistä on kavitaation seurauksena matalaksi jääneet virtaamat 200 mm:n putkella. Malli on luotu erityisesti turbulenttiselle alueelle, jolloin vertaaminen yhdistelmä alueelle jääneisiin virtaamiin ei ole luotettavaa. Huonoon vastaavuuteen voi myös olla syynä liian yksinkertainen parametrisointi. Vastaava yksinkertaisella parametrisoinnilla suoritettu vertailu on tehty VTT:llä 1 %:lle hieno paperi, LWC ja SC paperimassoille [5]. Vertailun vastaavuus on hyvä (kuva 23). Tässä työssä suoritettut vertailut antavat hyvän vastaavuuden sakeuksilla 1,0 %:a ja 1,5 %:a samoin kuin VTT:n mittaus 1,0 %:lle massalle. Korrelaatiomalli ei ilmeisesti näin sovellettuna pysty mallintamaan sakeamman suspension häviökäyttäytymistä.



Kuva 23: Mitattu häviö virtaaman funktiona 1 %:lle hienopaperi- ( $\Delta$ ), LWC- (0) ja SC- (+) massoille, kolmelle teräsputkelle DN 100 ( $\varnothing$ 110,3 mm), DN200 ( $\varnothing$ 215,1 mm) ja DN 300 ( $\varnothing$ 300 mm) (VTT 1996).

## 5 Johtopäätökset

Työssä tutkittiin mänty- ja koivususpension putkistovirtausta kuitupitoisuuksilla  $0,5\text{--}4,0\%$  kahdella putkella, halkaisijoiltaan  $105,2\text{ mm}$  ja  $191,6\text{ mm}$ . Virtaustilanteesta mitattiin virtauksen nopeusprofiili, häviö ja virtaama. Alunperin tarkoituksena oli tutkia häviökorrelaatiomallia suurilla virtaamilta. Voimakas kavitaatio kuitenkin häiritsi suuresti mittauksia erityisesti suuremmalla putkella, jolloin virtaamat jäivät toivottua alhaisemmiksi. Johtuen matalista virtaamista korrelaatiomallia ja sen skaalautuvuutta ei voitu tutkia halutulla tavalla. Tuloksia tutkiessa kuitenkin huomattiin koivususpensiolla mielenkiintoinen laminaarista leikkausvirtausprofiilia muistuttava nopeusprofiilin muoto. Tämä antoi mahdollisuuden tutkia puukuitususpension todellista viskositeettia. Johtuen häviökorrelaatiomallin tutkimisen ongelmista alhaisten virtaamien takia tutkielman painopistettä siirrettiin mielenkiintoiseen ilmiöön koivususpension nopeusprofiileissa.

Aluksi selvitettiin viskositeetin riippuvuus virtaustilanteesta ja materiaalista. Alustavassa analyysissä huomattiin viskositeetin riippuvan vain leikkausnopeudesta ja materiaalin ominaisuuksiin liittyvistä parametreista, ei virtaustilanteesta. Tällöin on mahdollista löytää suspension viskositeettia kuvaava materiaalilaki. Koivususpension viskositeetille onnistuttiin löytämään relaatio, missä viskositeetti esitetään kahden materiaaliparametrin ( $n$  ja  $C$ ) avulla leikkausnopeuden funktiona. Parametri  $C$  riippuu lineaarisesti kuitupitoisuudesta ja parametri  $n$  on riippumaton suspension sakeudesta. Parametrit voidaan määrittää laminaaristen leikkausvirtausprofiilien ja häviön avulla. Materiaalilain toimivuutta kokeiltiin vertaamalla sen avulla esitetyn viskositeetin avulla laskettua teoreettista nopeusprofiilia mitattuun nopeusprofiiliin. Vastaavuus oli hyvä, joten materiaalilain voidaan todeta kuvaavan koivukuitususpension viskositeettia hyvin. Lisätutkimuksilla voitaisiin edelleen varmentaa mallin toimivuutta tutkimalla onnistuuko parametrisointi myös muilla suspensiolaaduilla ja putki-

koilla, ja tuottaako malli edelleen mitattuja arvoja vastaavia tuloksia. Kuidunpituuden ja putken säteen suhteen vaikutuksia laminaarisen profiilin syntymiseen voitaisiin tutkia etsimällä putkikoot, joilla erimittaisista kuiduista sekoitetut suspensiot muodostavat laminaarisen nopeusprofiilin.

Matalista virtaamista johtuen syvällisen häviökorrelaatiomallin tutkimisen sijasta päätettiin tutkia häviökorrelaatiomallin skaalautuvuutta putkien välillä yksinkertaisella parametrisoinnilla. Korrelaatiomallin parametrit sovitettiin pienemmän putken häviödataan ja suuremmalle putkelle sovitettujen parametrien avulla piirrettyä teoreettista häviökäyrää verrattiin mitattuun käyrään. Vastaavuus on hyvä koivukuiduille pitoisuuksilla 1,0 ja 1,5 % ja kohtuullinen mäntysuspensiolle 0,5 % pitoisuudella. Suuremmilla kuitupitoisuuksilla teoreettinen käyrä poikkeaa merkittävästi mitatuista arvoista. Valtion Teknillisen Tutkimuskeskuksen tekemässä vastaavassa tutkimuksessa vastaavuus on hyvä 1,0 %:lla suspensiolle. Mahdollisilla lisätutkimuksilla voitaisiin selvittää soveltuuko malli vain laimeille suspensioille vai johtuuko tässä tutkielmassa saadut poikkeavat tulokset mittausteknisistä ongelmista. Lisätutkimuksissa tulisi varmistaa pääsy riittävän suuriin virtaamiin ilman häiriöitä. Putken halkaisijan kasvaessa myös ultraäänianturien riittävä luotaussyvyys tulee varmistaa.

## Kirjallisuutta

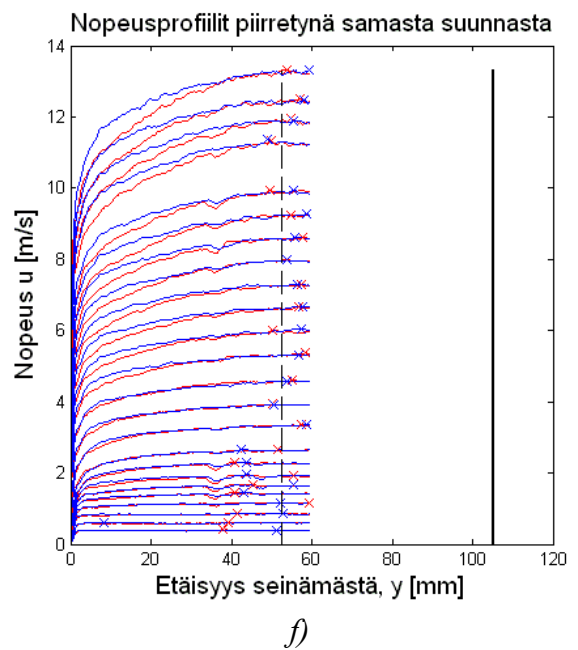
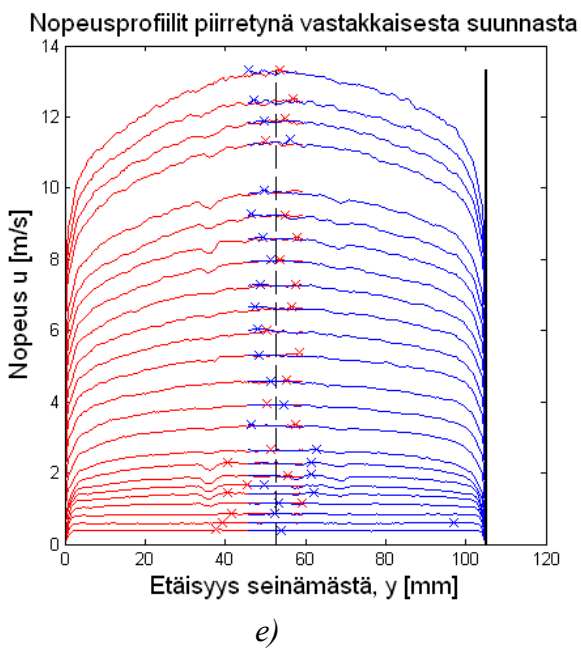
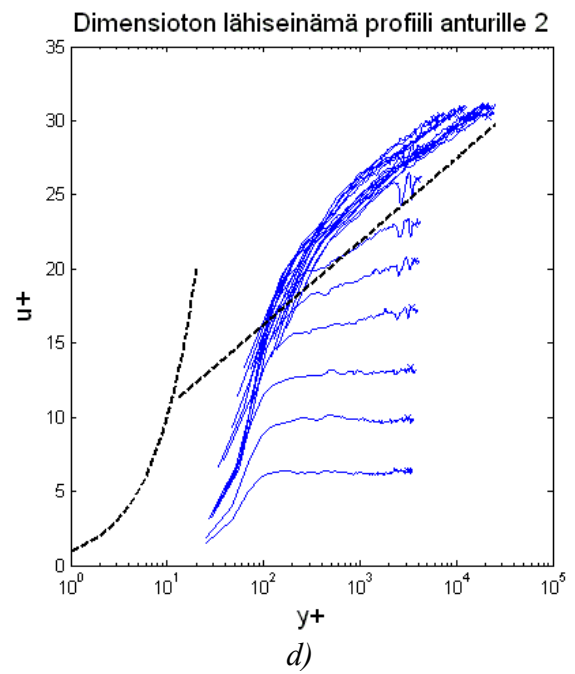
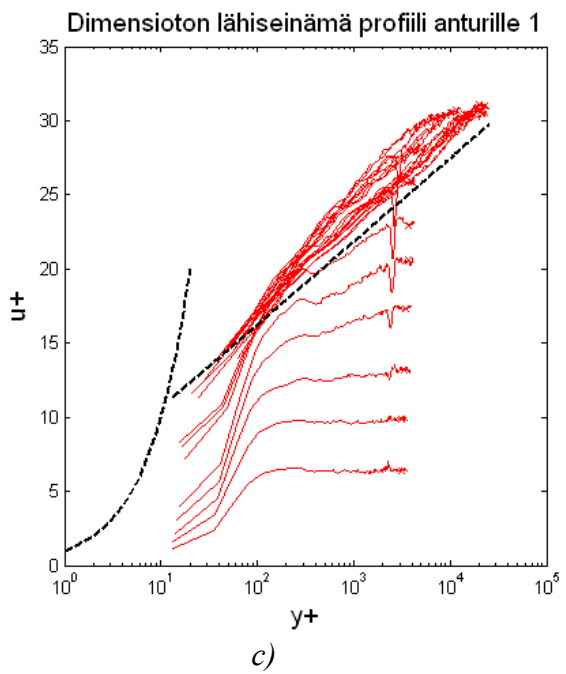
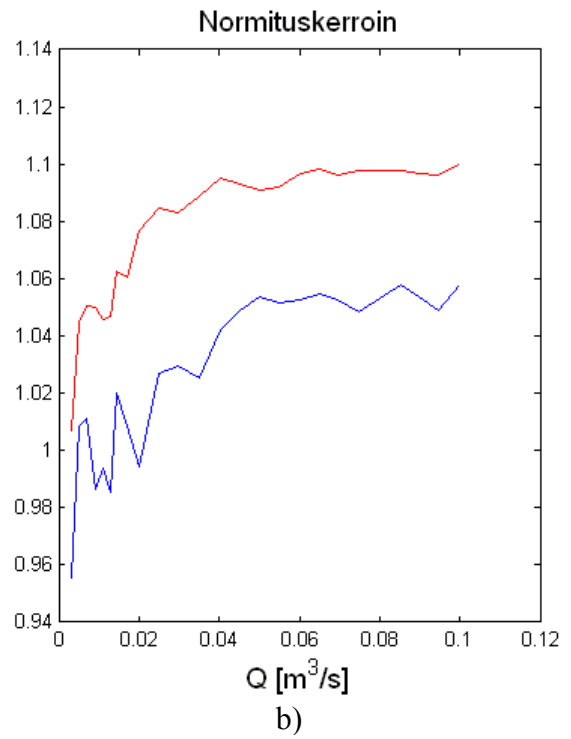
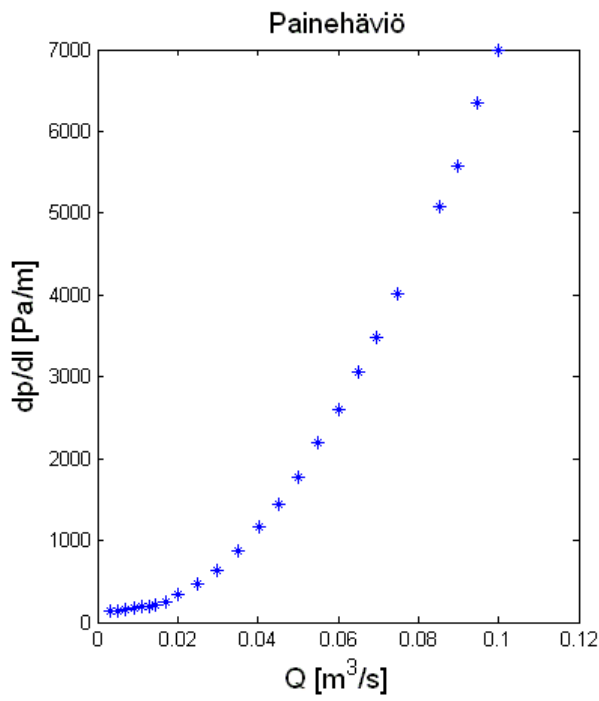
- [1] F. M. White, *Fluid mechanics*, 5.painos (McGraw-Hill companies, New York, 2003).
- [2] A. Jäsberg, *Flow behaviour of fibre suspensions in straight pipes: new experimental techniques and multiphase modeling*. Tohtorin väitöskirja (Jyväskylän Yliopisto, Jyväskylä, 2007)
- [3] P. Karinkanta, *Puukuitususpension putkivirtauksen virtausprofiilin symmetrisyys ja sen turbulenttisen alueen mallintaminen*, Pro Gradu (Jyväskylän Yliopisto, Jyväskylä, 2007).
- [4] M. Spiegel, J. Liu, *Schaum's ouTlines*, (McGraw-Hill companies, USA, 1999).
- [5] M. Kataja(toim.), *Rheological matters in process industry*, ReoMaT final report (Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus, Espoo, 2008).
- [6] Signal Processing, *DOP 2000 user's manual* (Signal Processing, 2000).
- [7] M. Messer, *Pulsed ultrasonic Doppler velocimetry for measurement of velocity profiles in small channels and capillaries*, A thesis presented to academic faculty (Georgia Institute of Technology, 2005)
- [8] KnowPap, *Paperitekniiikan ja tehtaan automaation oppimisympäristö*, <http://www.knowpap.com/suomi/> (luettu 07.06.10)
- [9] T. Korhola, *Puukuitususpension putkistovirtaus, nopeusprofiilin ja painehäviön mitaaminen*, Erikoistyö (Jyväskylän Yliopisto, Jyväskylä, 2010).
- [10] G. G. Duffy, *The unique flow behaviour of wood pulp fibre suspensions*, T&S 9th International Conference on Transport and Sedimentation of Solid Particles, (1997).

# LIITE A

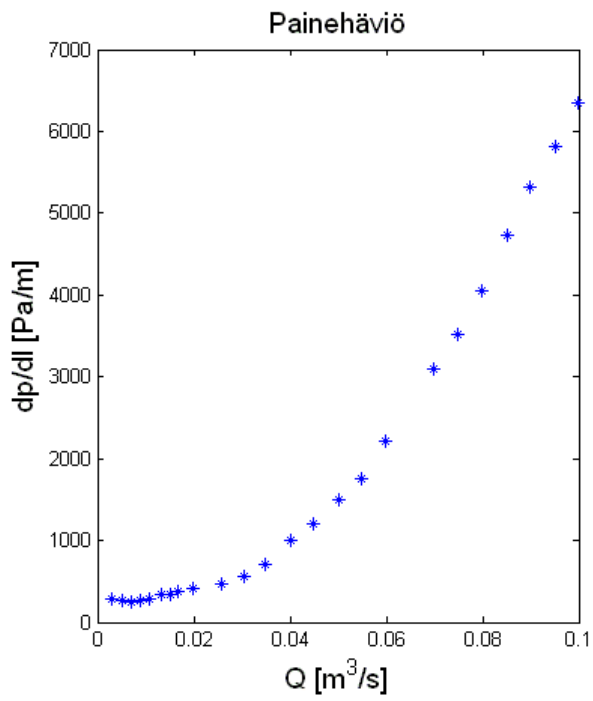
Liitteessä A esitetty:

- a) Häviökäyrä. Virtauksen häviö virtaaman funktiona.
- b) Normituskerroin. Nopeusprofiilin normituksessa käytetty kerroin eri virtaamilla.
- c) Anturin 1 mittaama dimensioton nopeusprofiili.
- d) Anturin 2 mittaama dimensioton nopeusprofiili.
- e) Virtaamasarjan nopeusprofiilit vastakkain mitattuna ja piirrettynä. Anturin 1 mittaama profiili punaisella ja anturin 2 sinisellä.
- f) Virtaamasarjan nopeusprofiilit vastakkain mitattuna, mutta samasta suunnasta piirrettynä. Anturin 1 mittaama profiili punaisella ja anturin 2 sinisellä

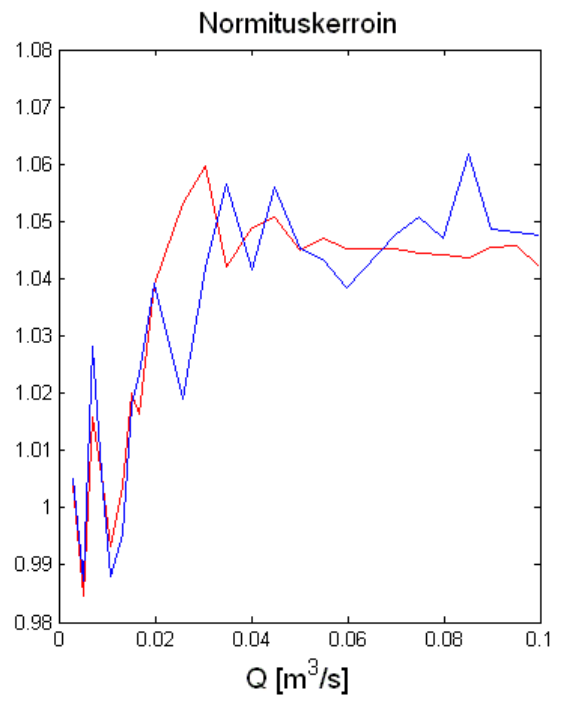




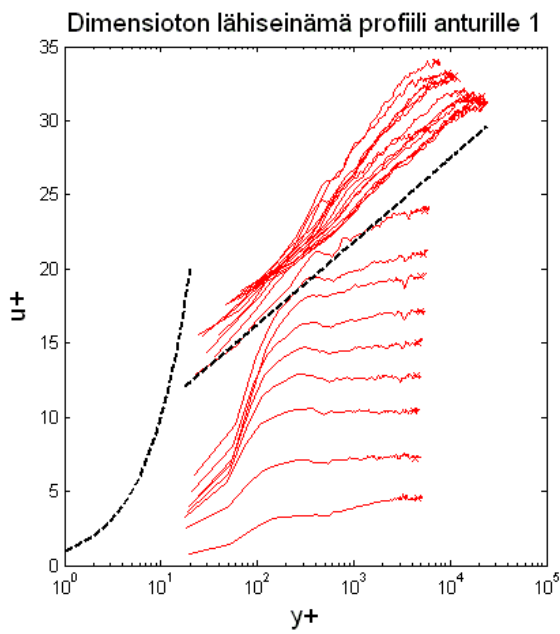
Kuva A.1: 100 mm putki, koivu 1,0 %



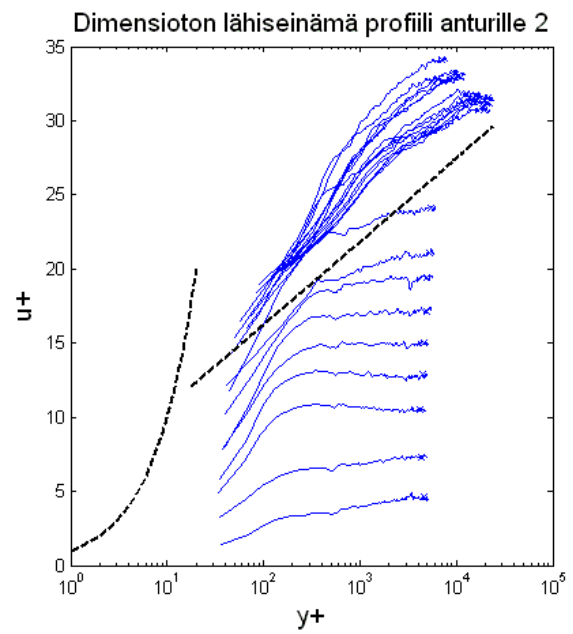
a)



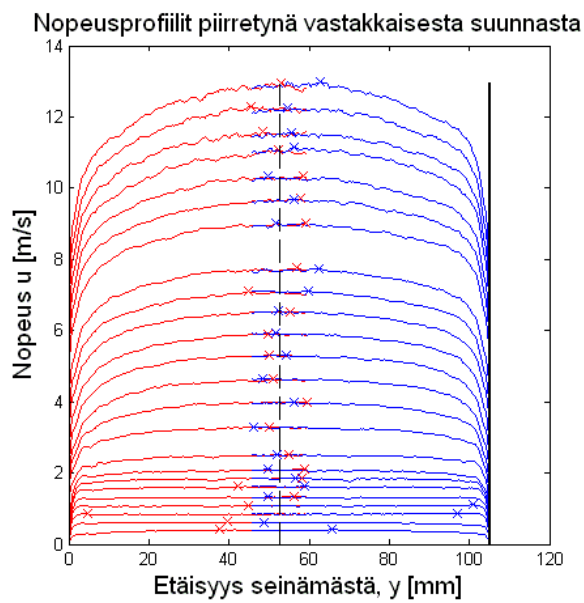
b)



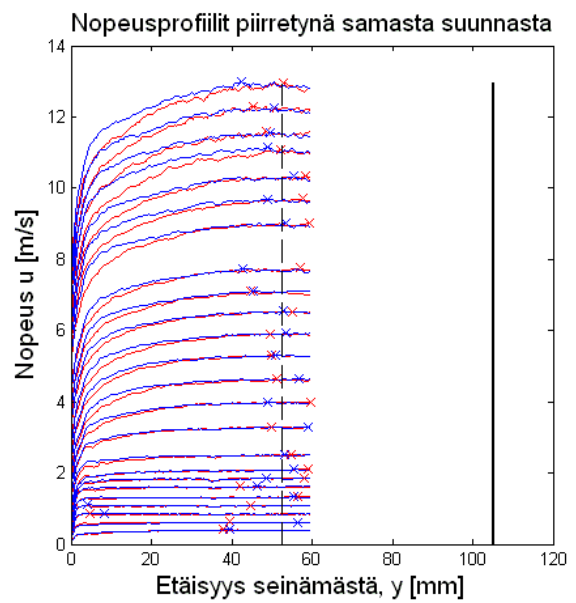
c)



d)

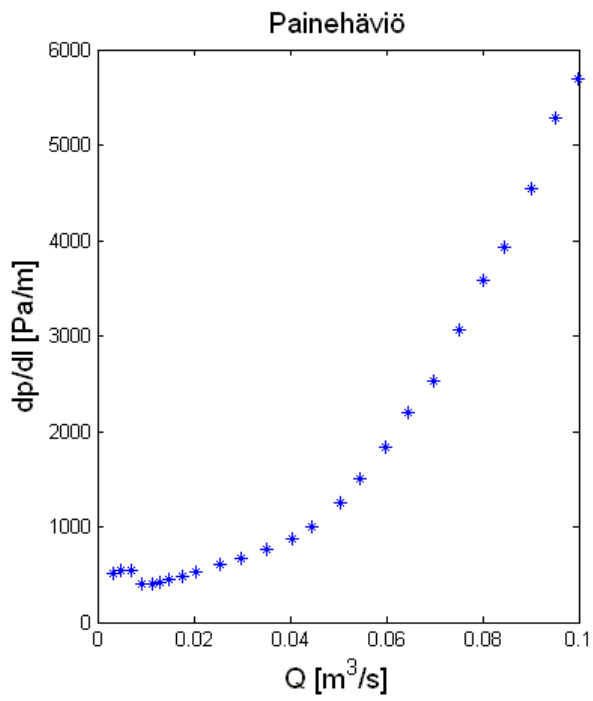


e)

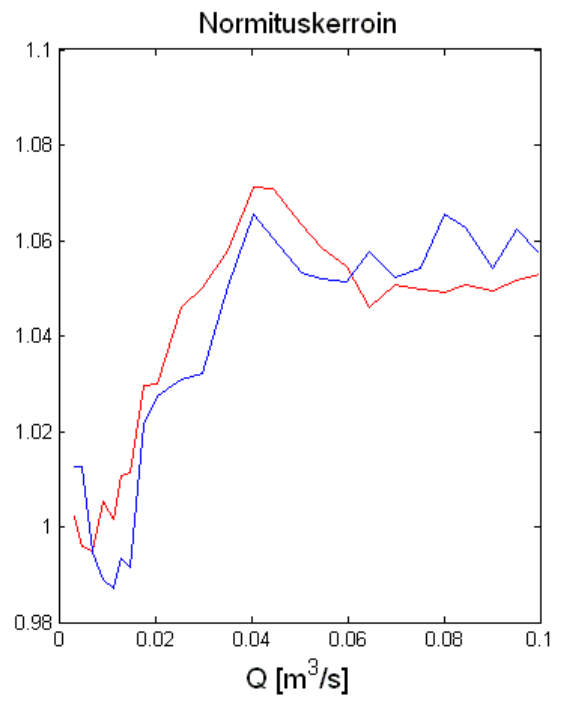


f)

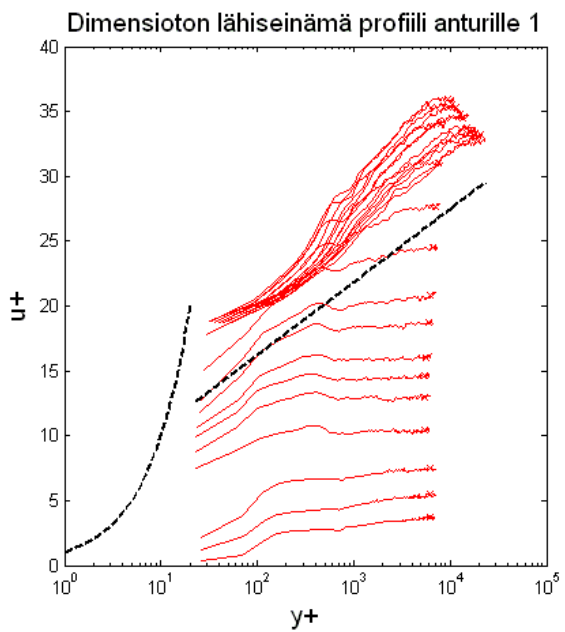
Kuva A.2: 100 mm putki, koivu 1,5 %



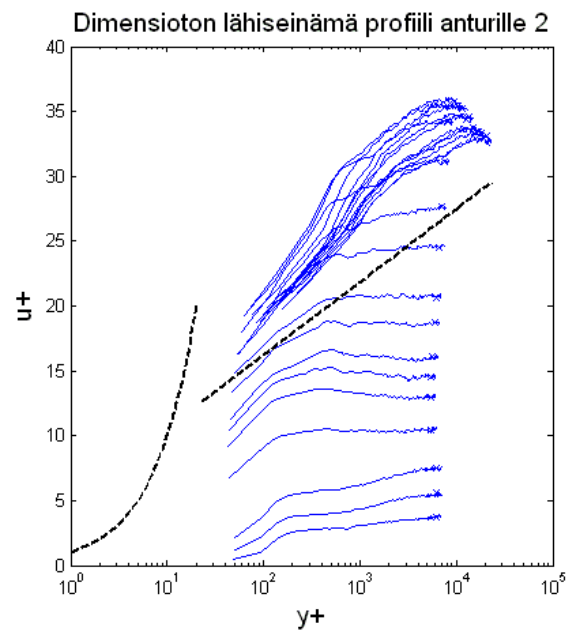
a)



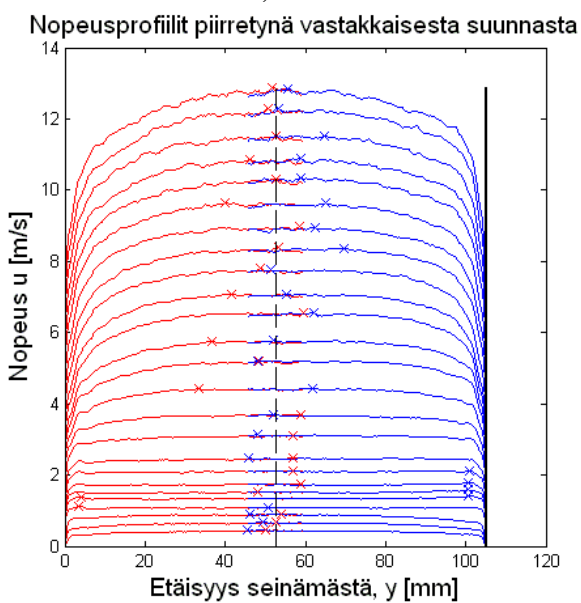
b)



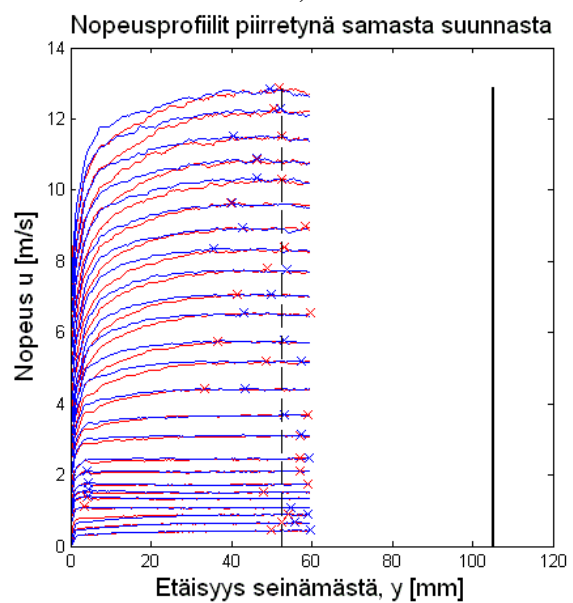
c)



d)

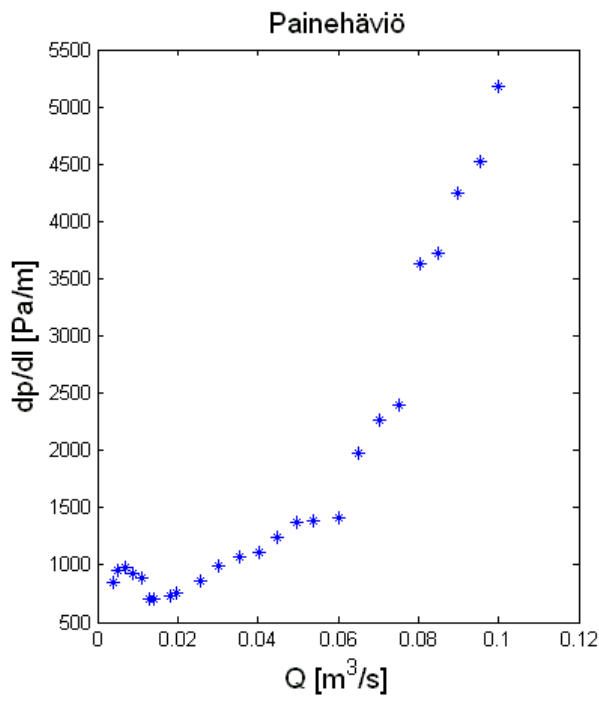


e)

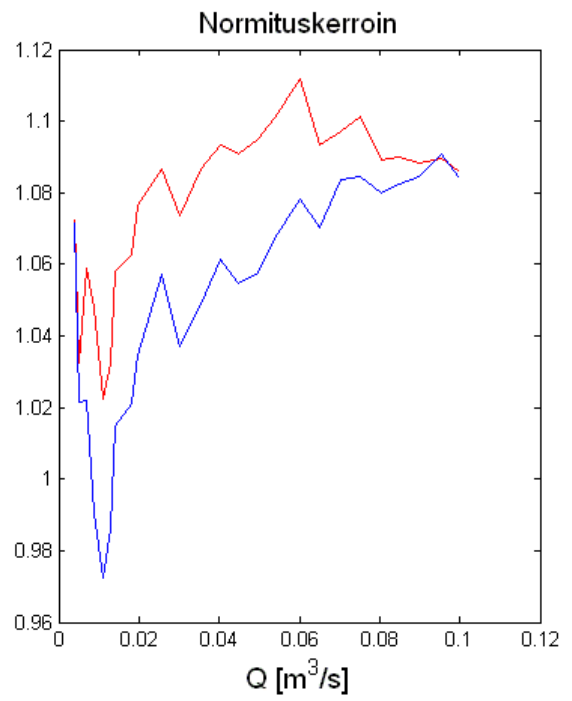


f)

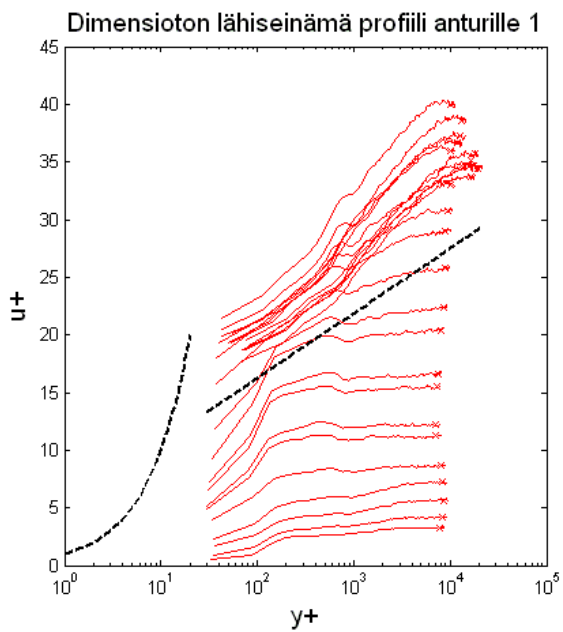
Kuva A.3: 100 mm putki, koivu 2,0 %



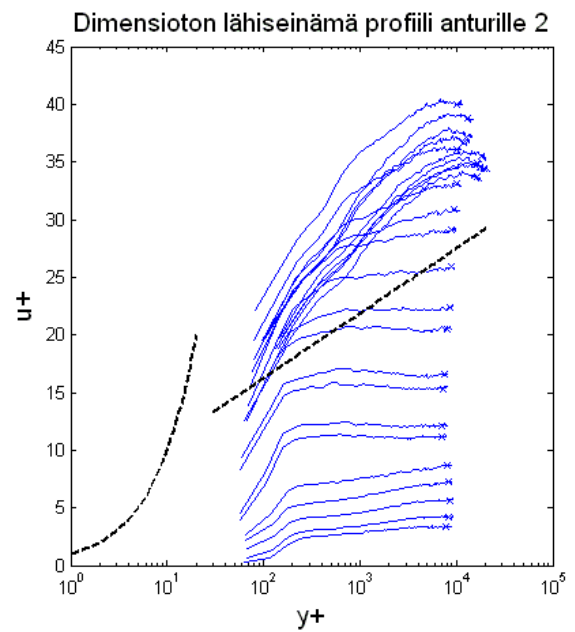
a)



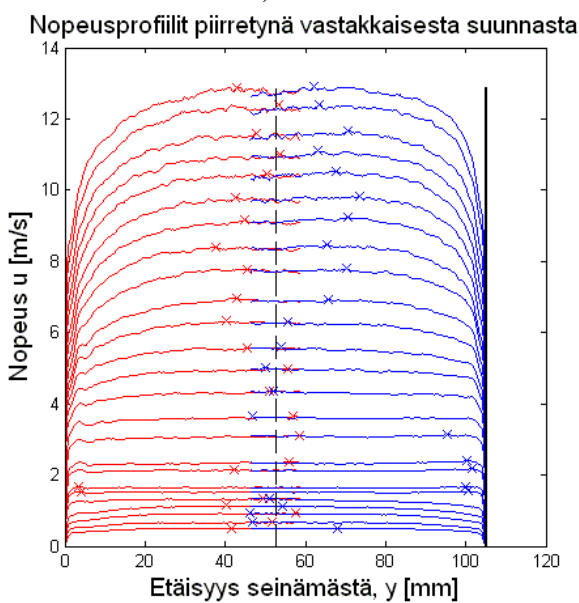
b)



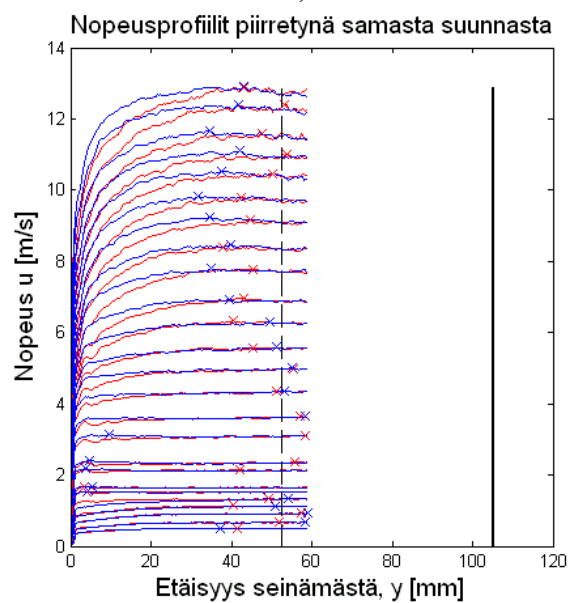
c)



d)

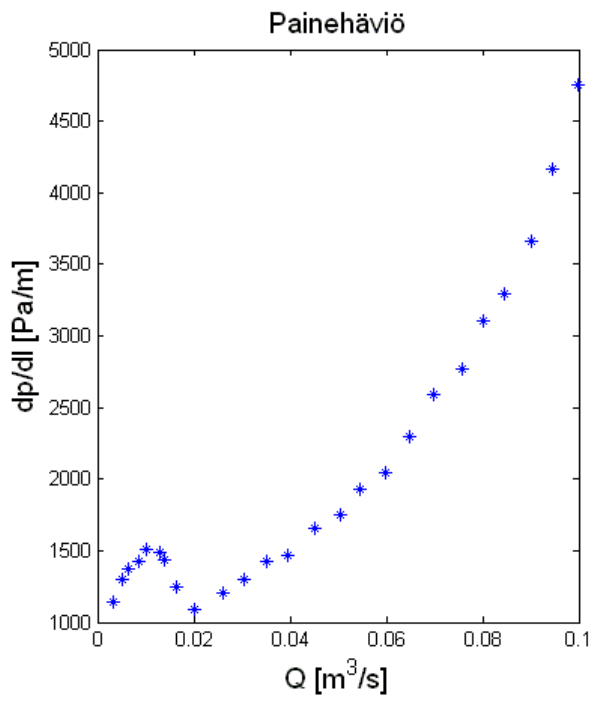


e)

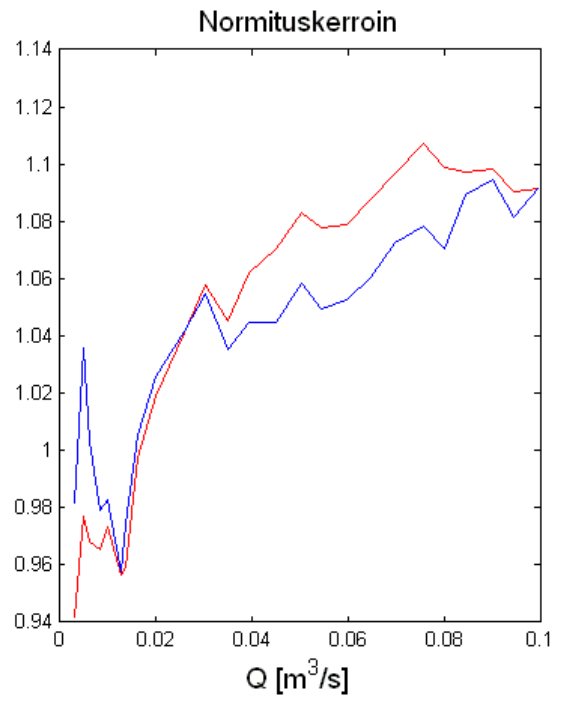


f)

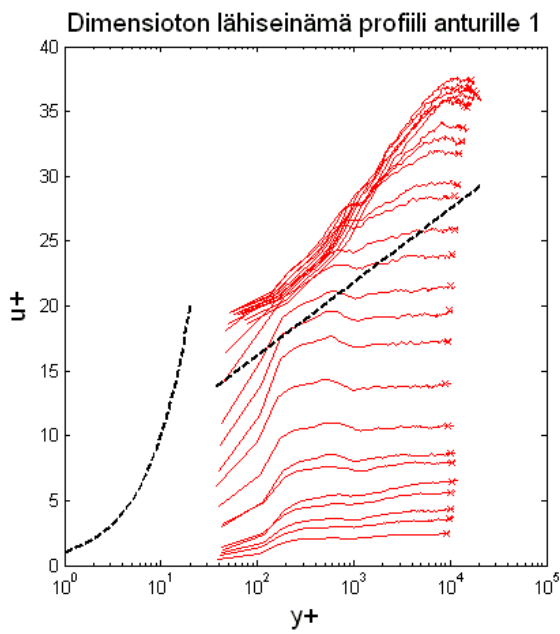
Kuva A.4: 100 mm putki, koivu 2,5 %



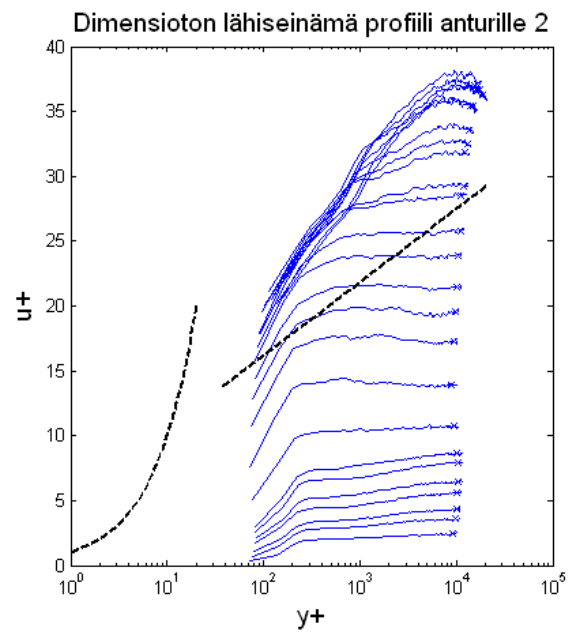
a)



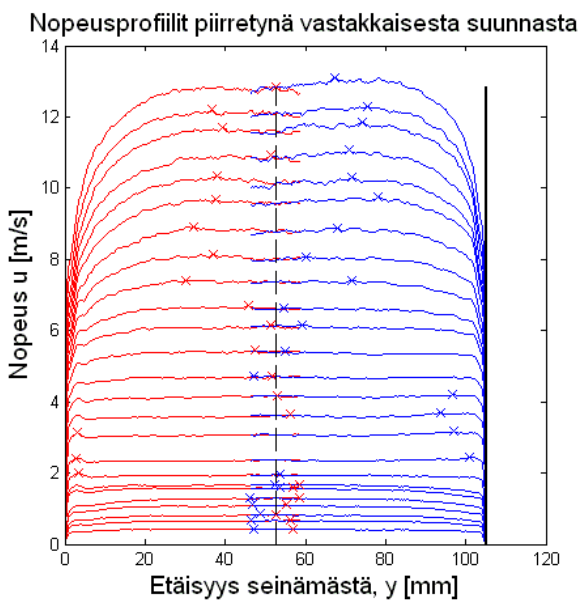
b)



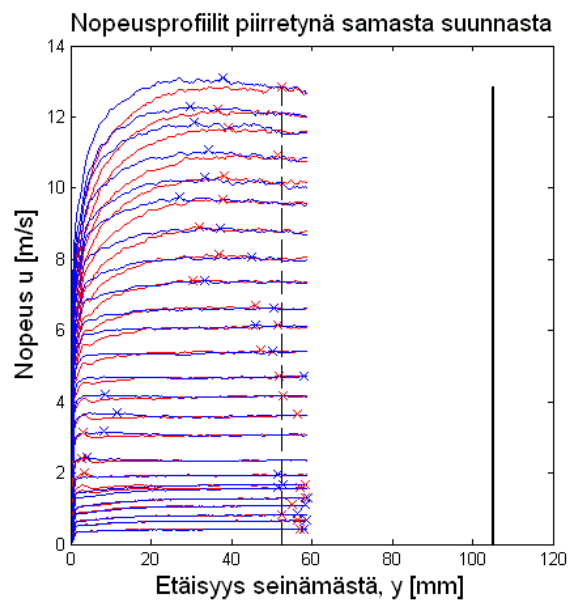
c)



d)

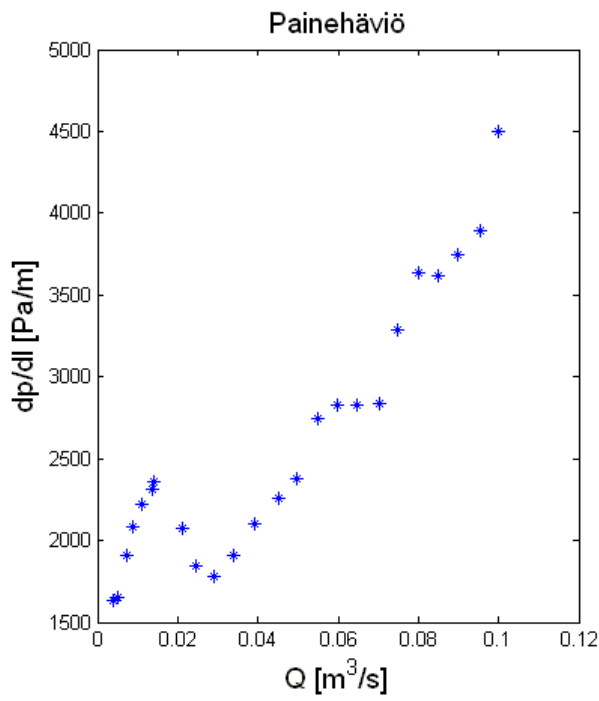


e)

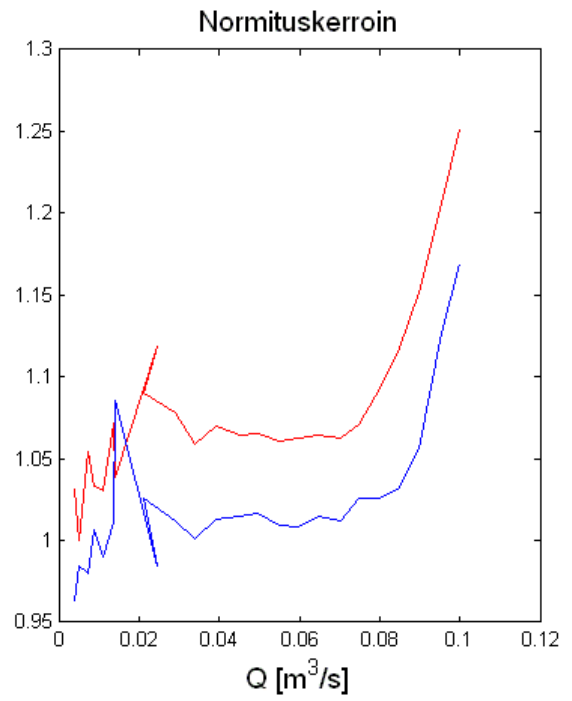


f)

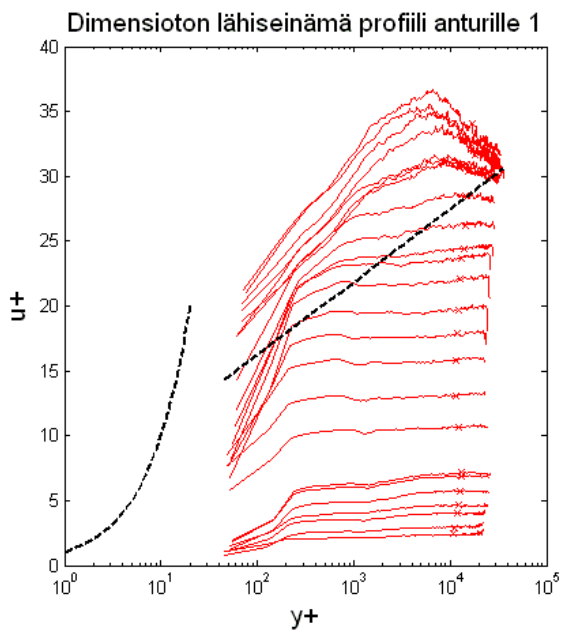
Kuva A.5: 100 mm putki, koivu 3,0 %



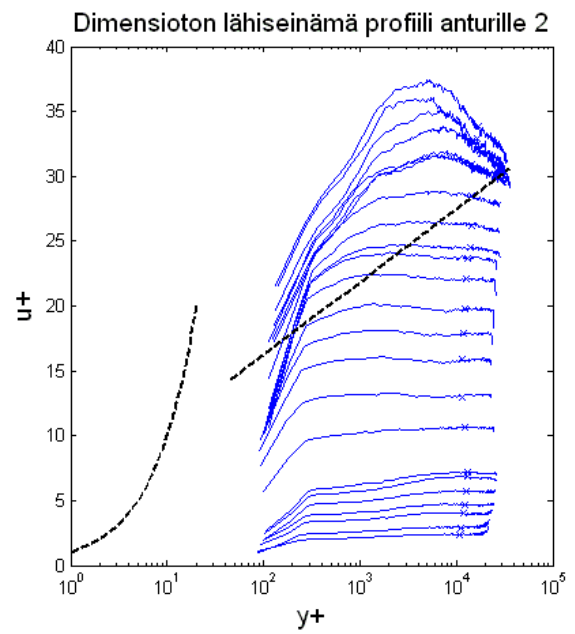
a)



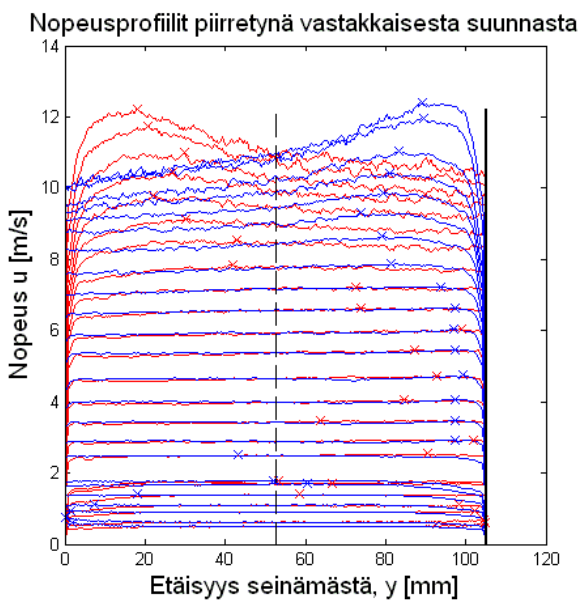
b)



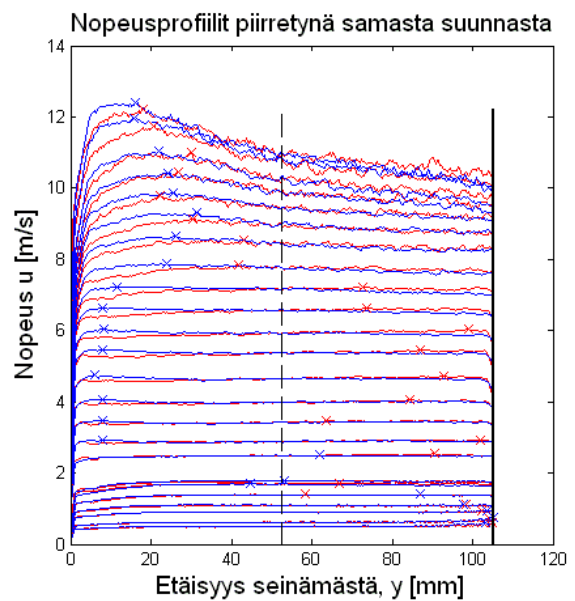
c)



d)

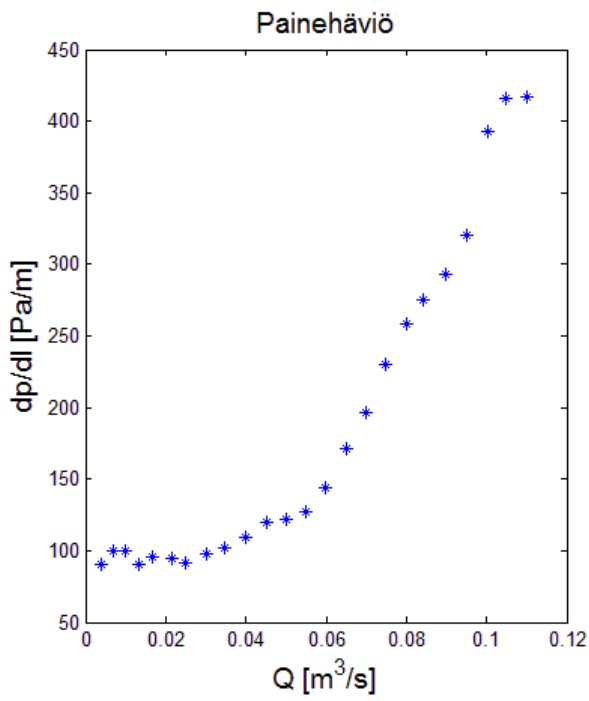


e)

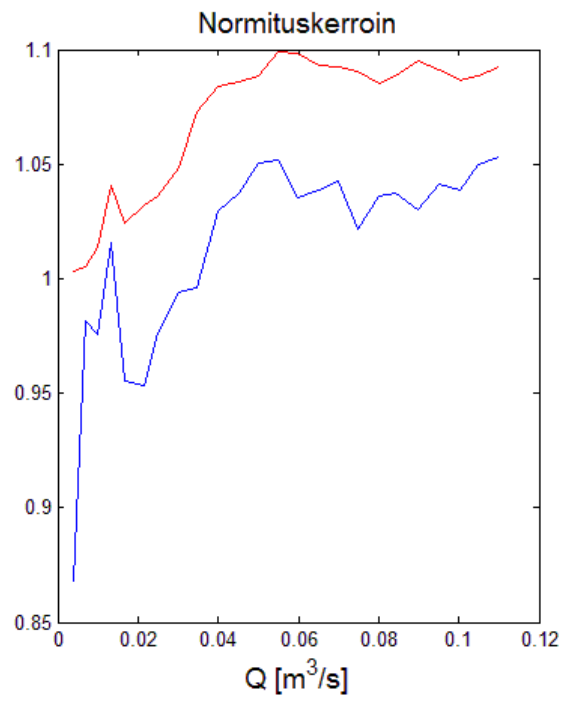


f)

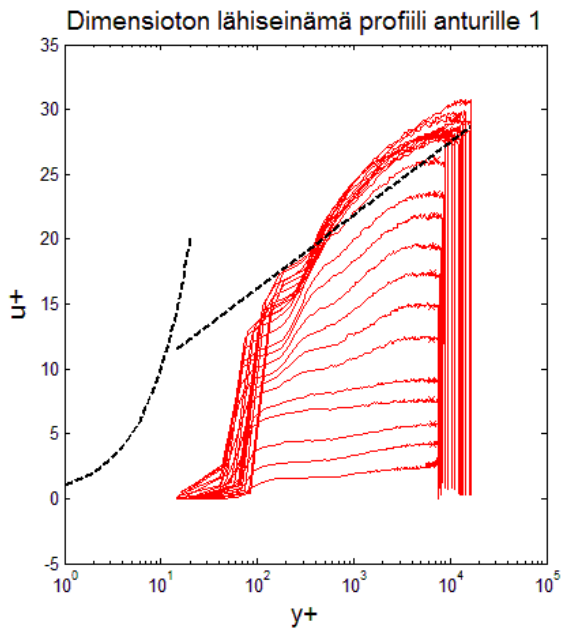
Kuva A.6: 100 mm putki, koivu 3,5 %



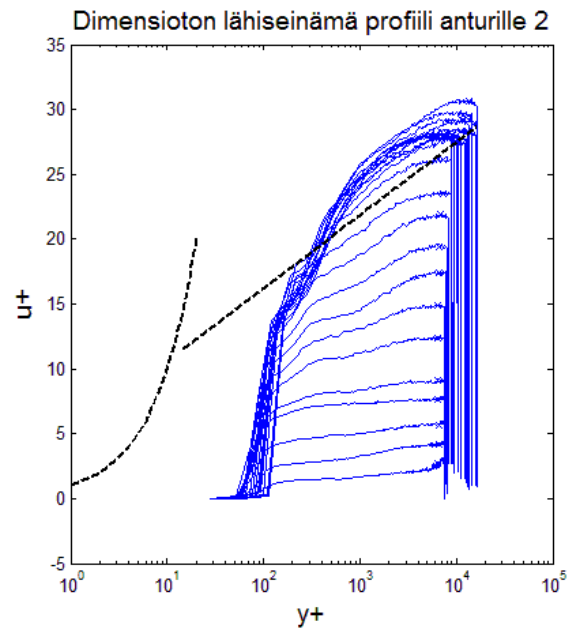
a)



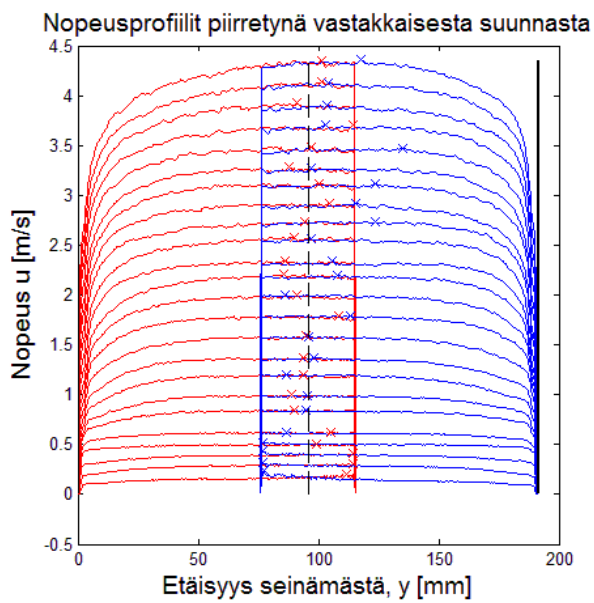
b)



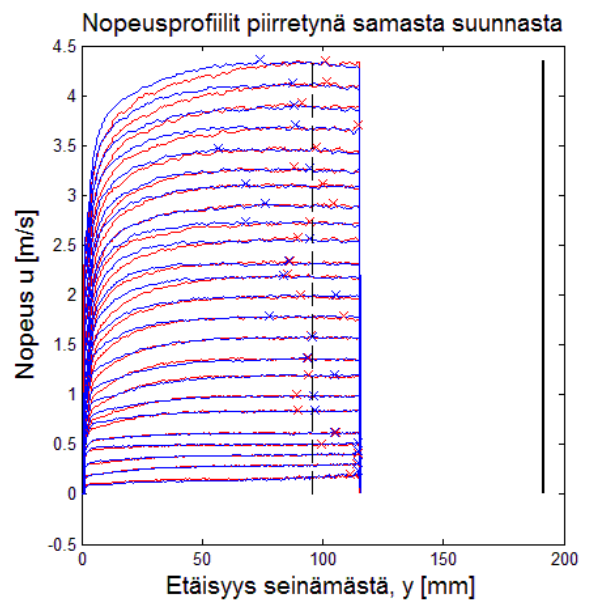
c)



d)

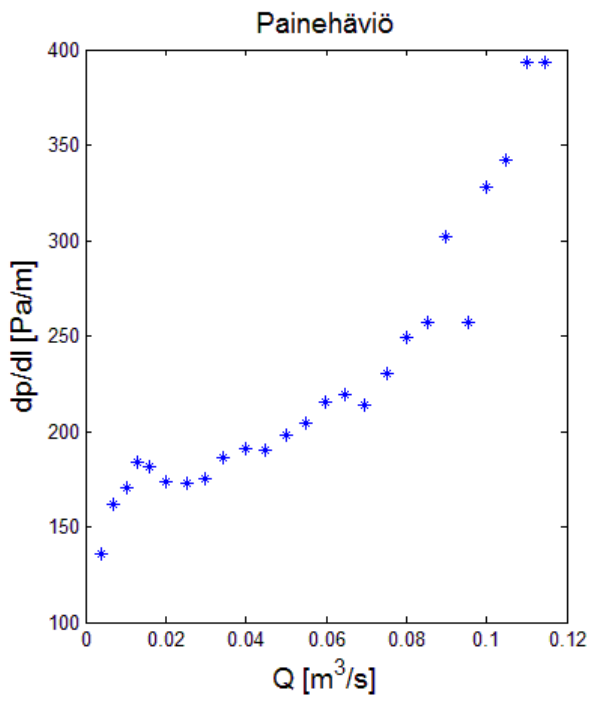


e)

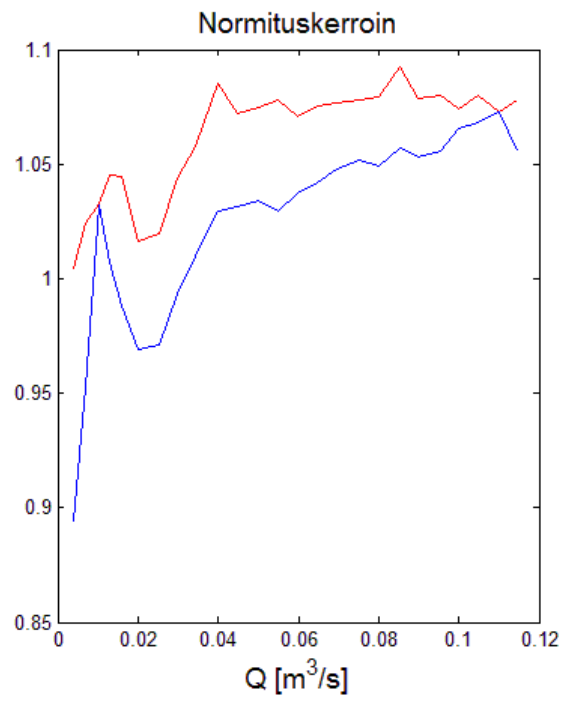


f)

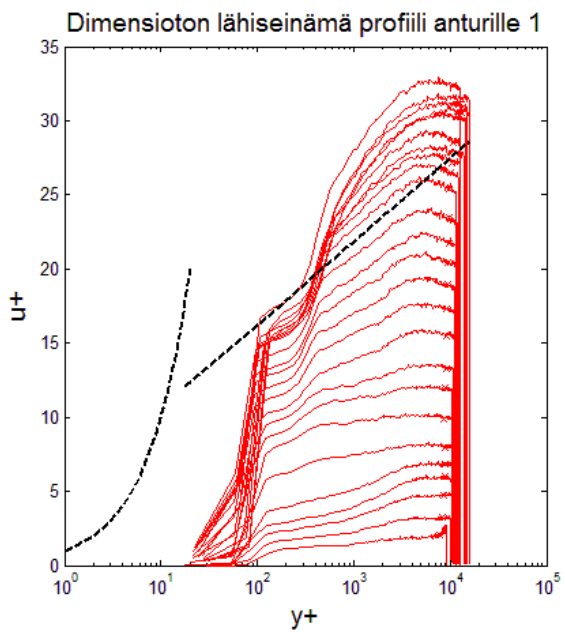
Kuva A.7: 200 mm putki, koivu 1,0 %



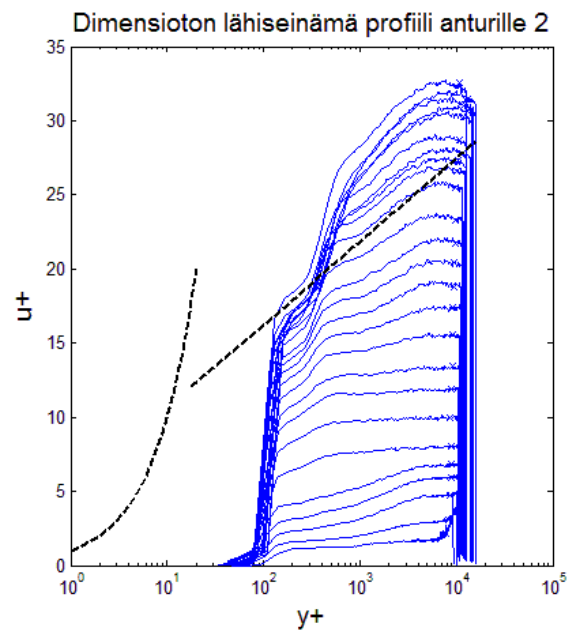
a)



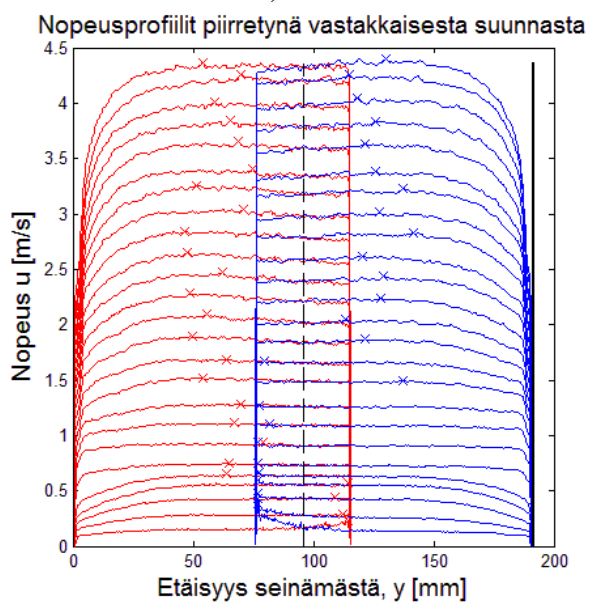
b)



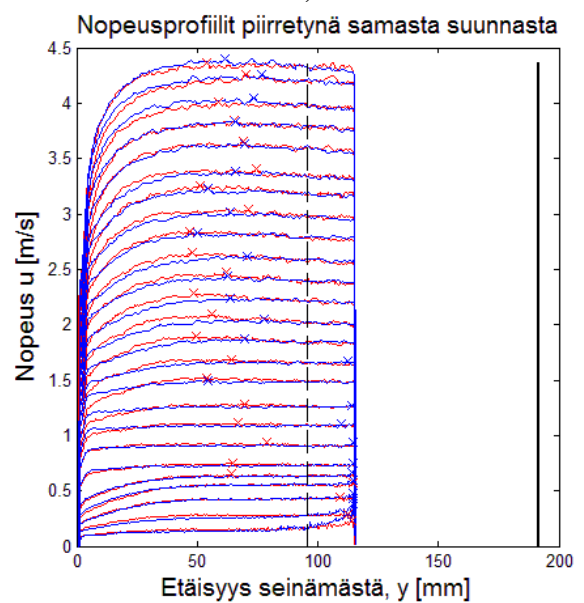
c)



d)



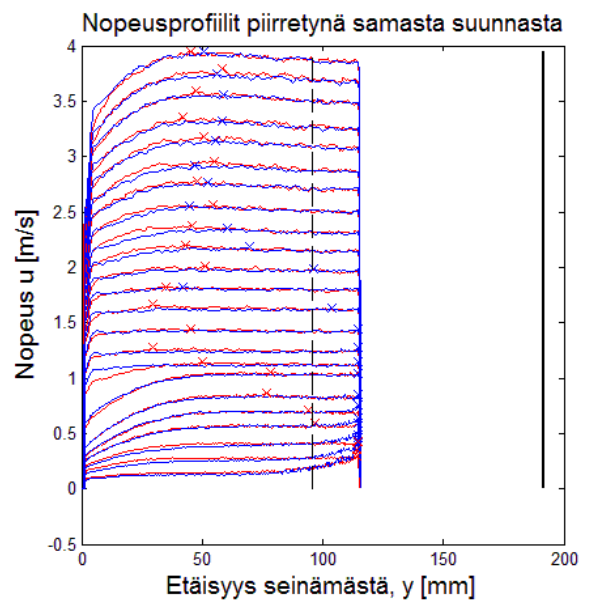
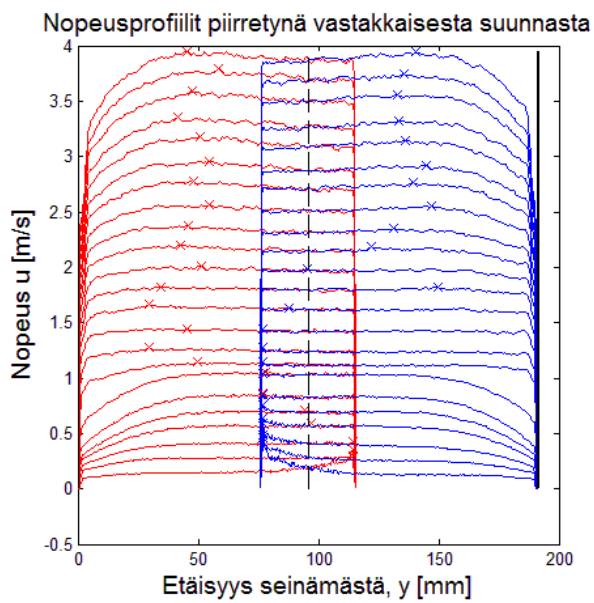
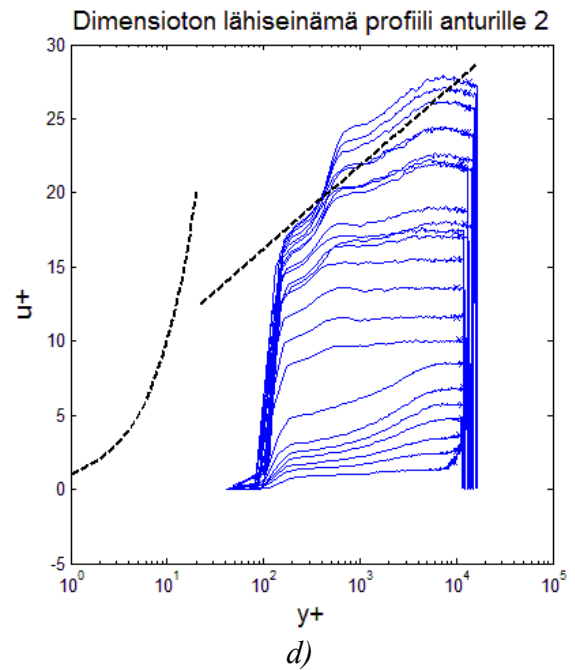
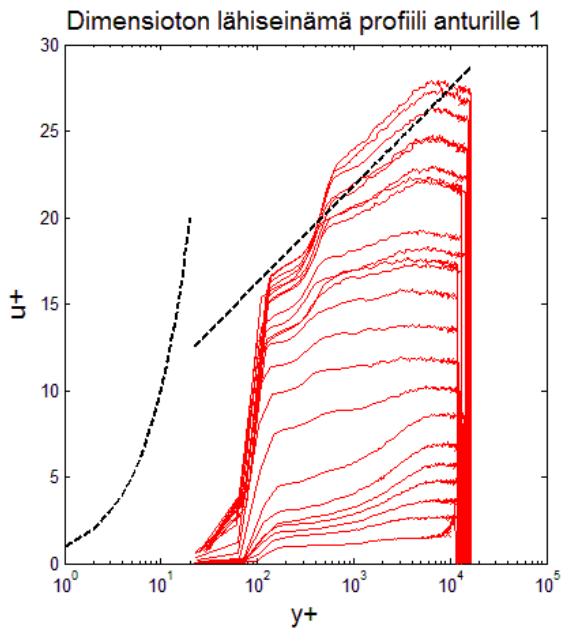
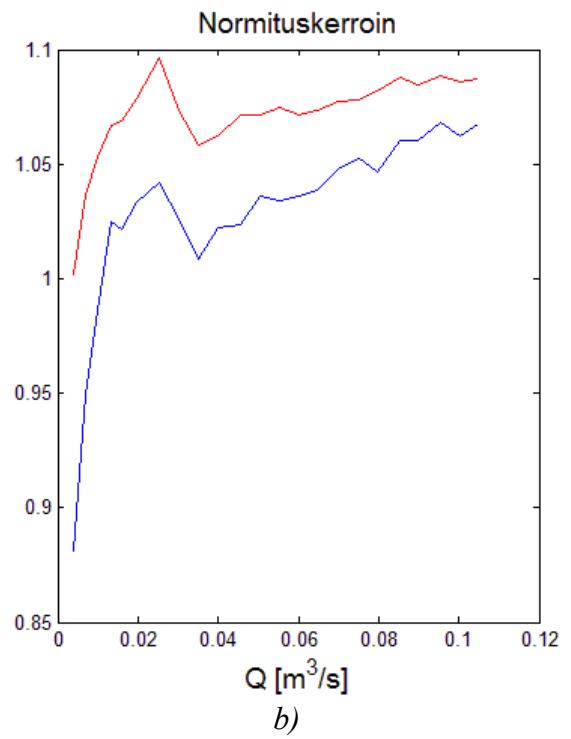
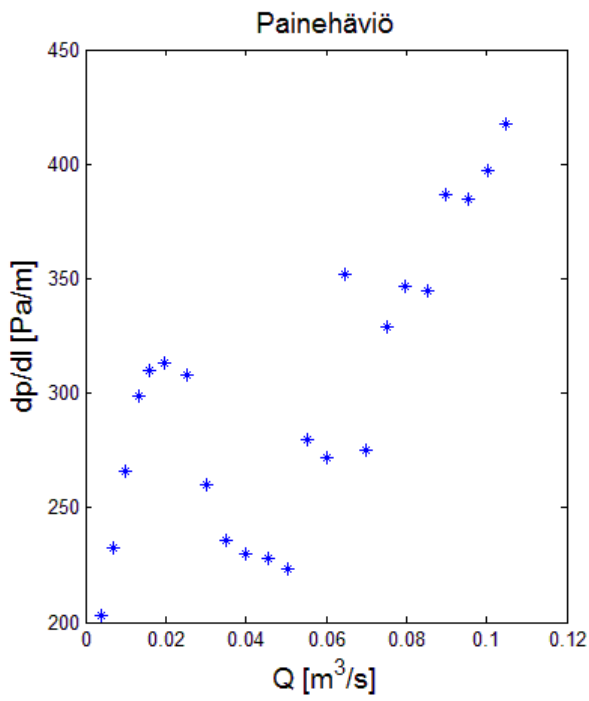
e)



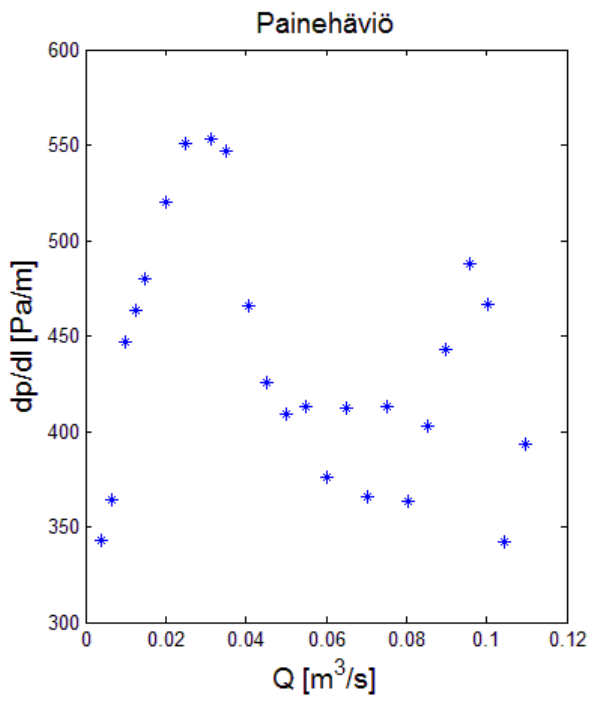
f)

Kuva A.8: 200 mm putki, koivu 1,5 %

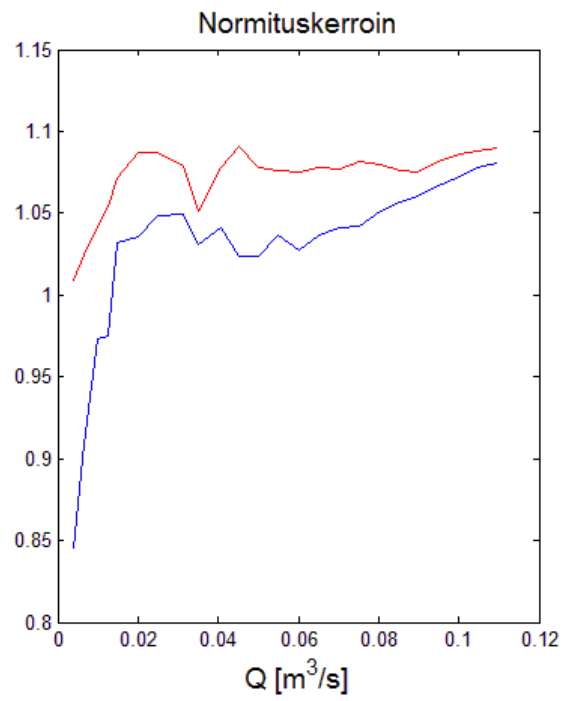




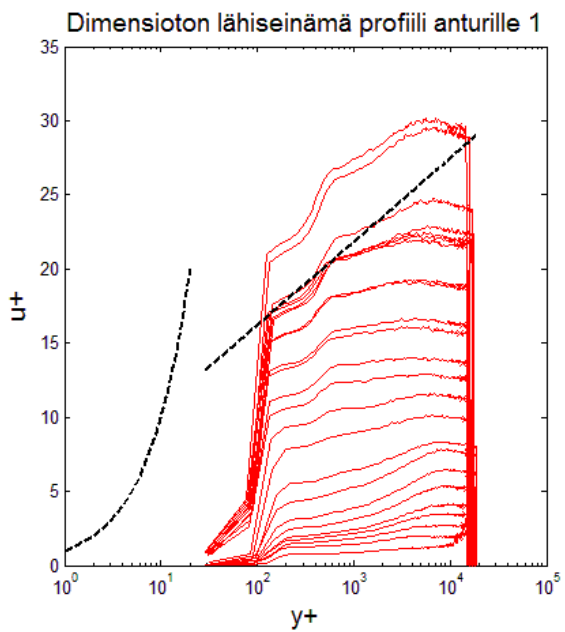
Kuva A.9: 200 mm putki, koivu 2,0 %



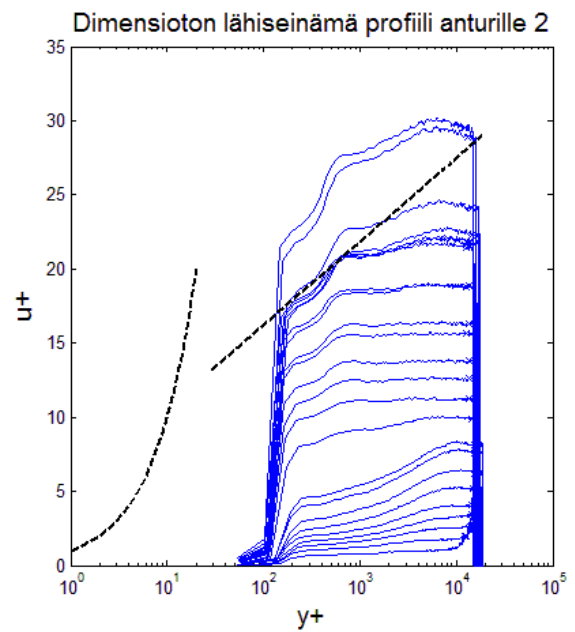
a)



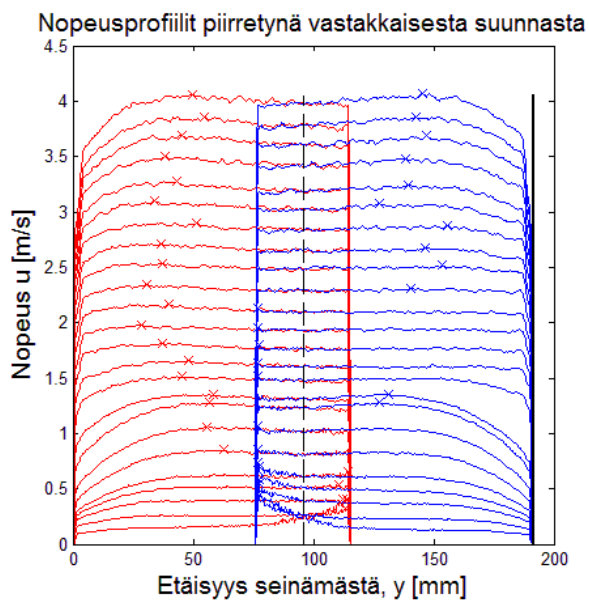
b)



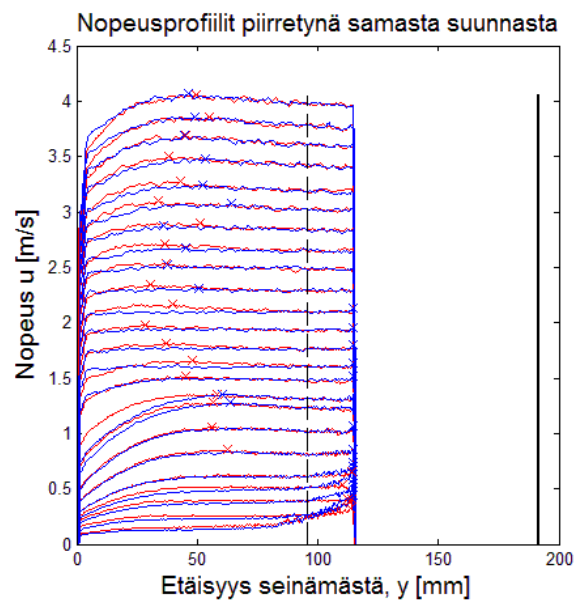
c)



d)

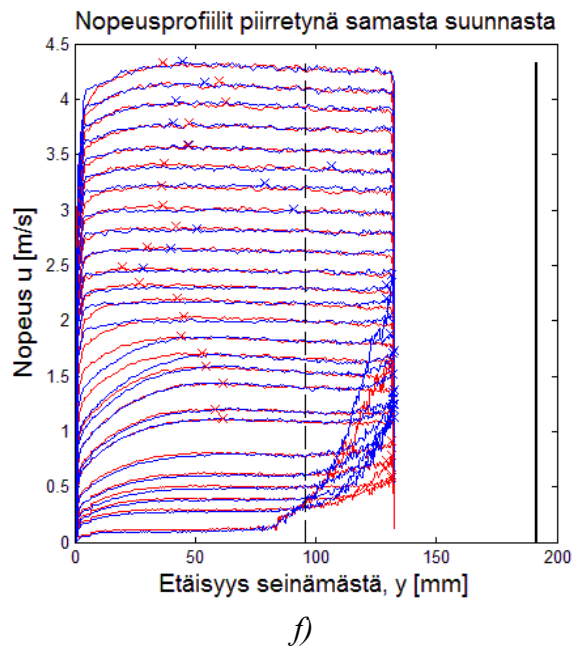
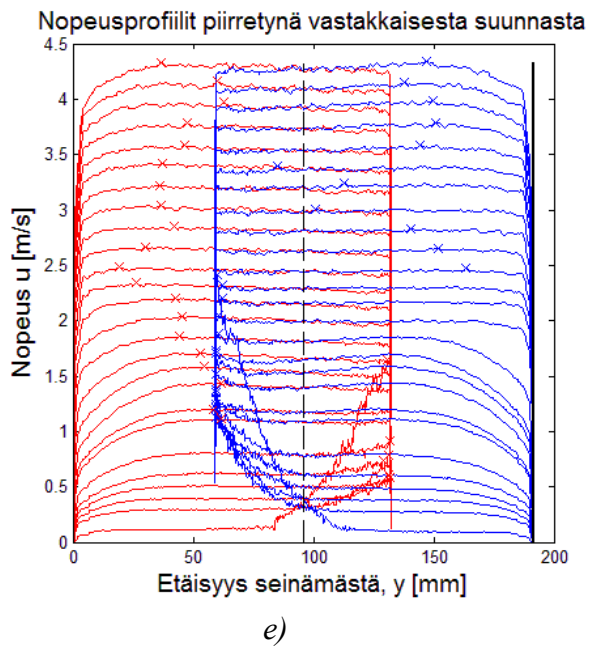
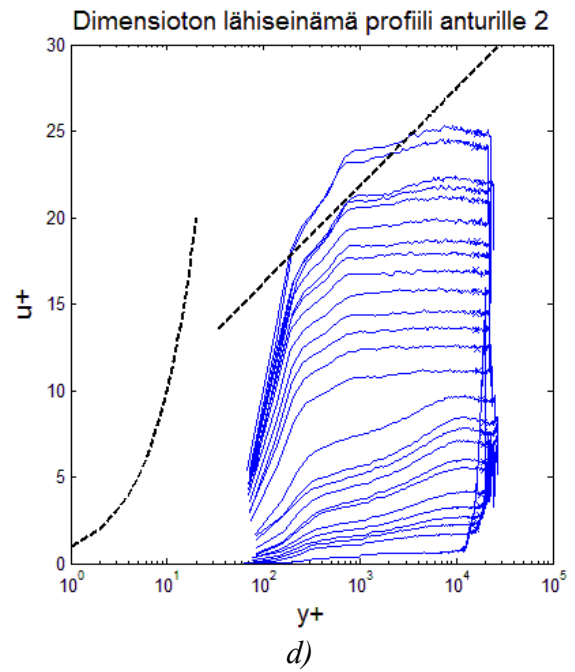
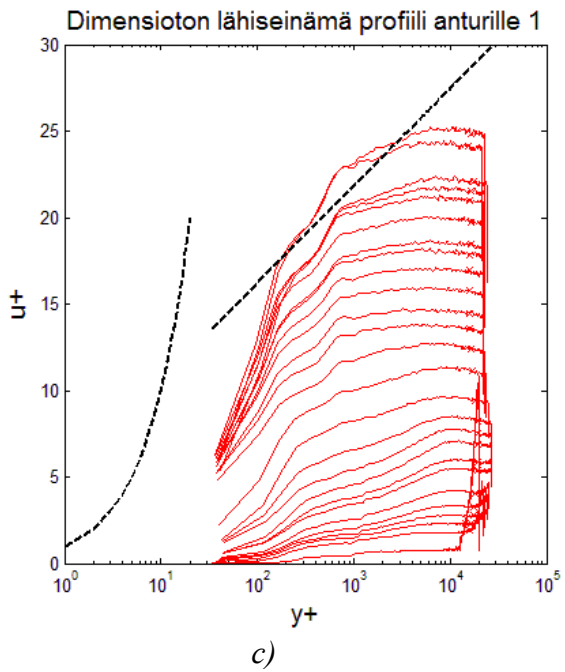
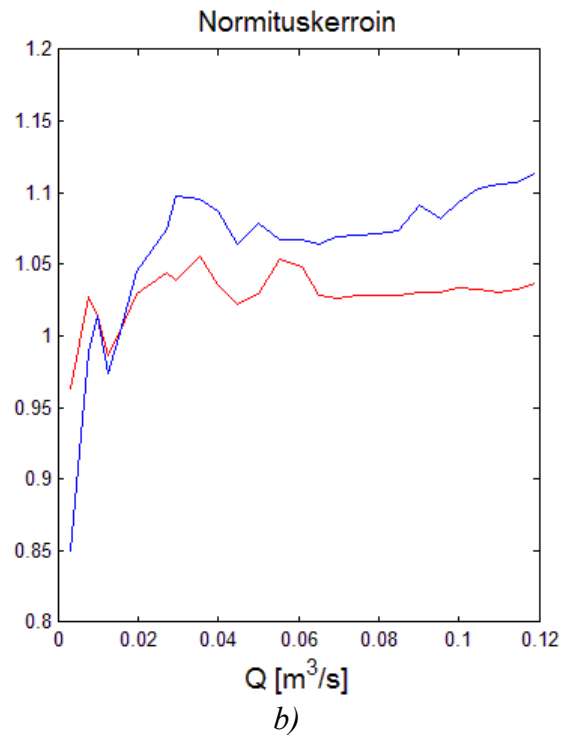
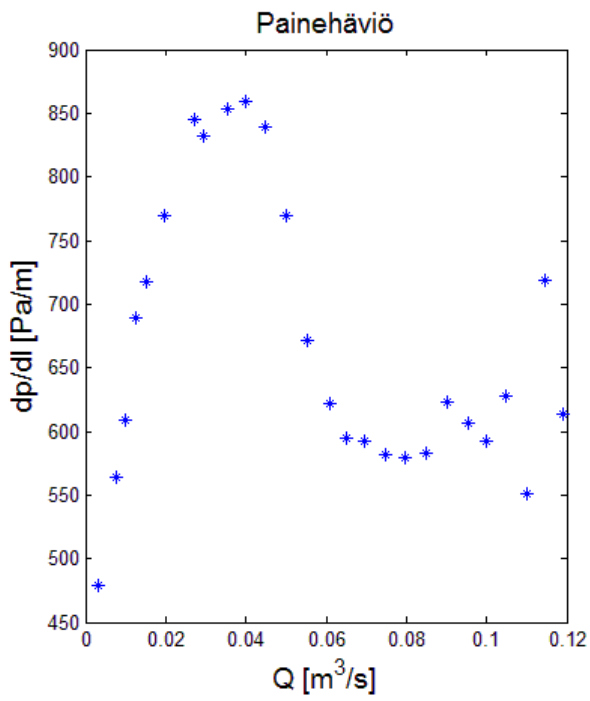


e)

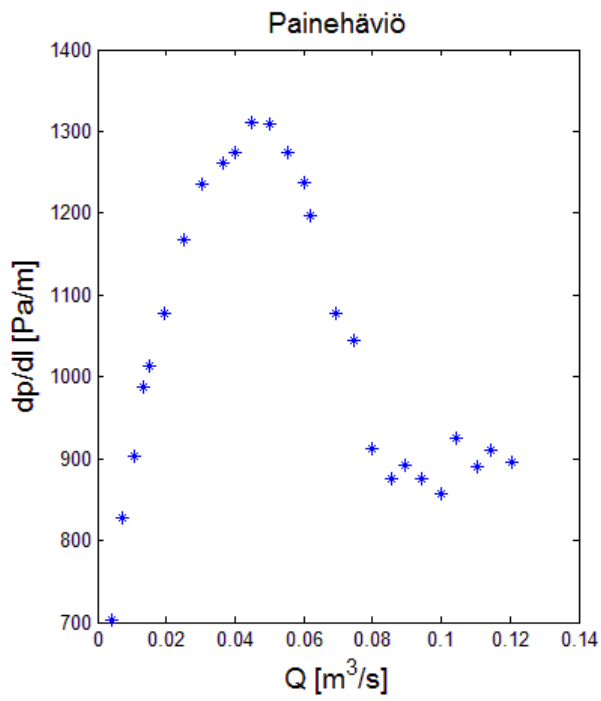


f)

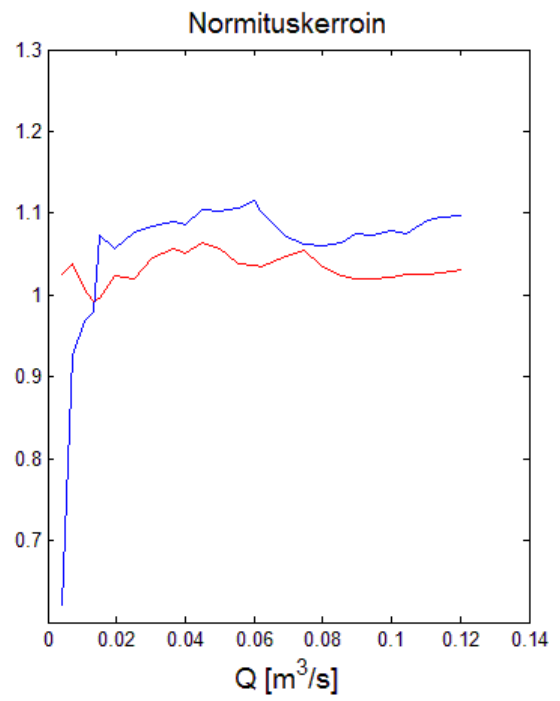
Kuva A.10: 200 mm putki, koivu 2,5 %



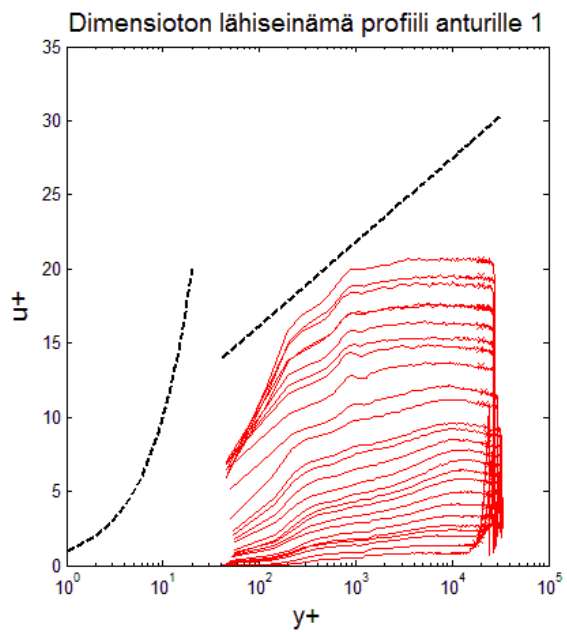
Kuva A.11: 200 mm putki, koivu 3,0 %



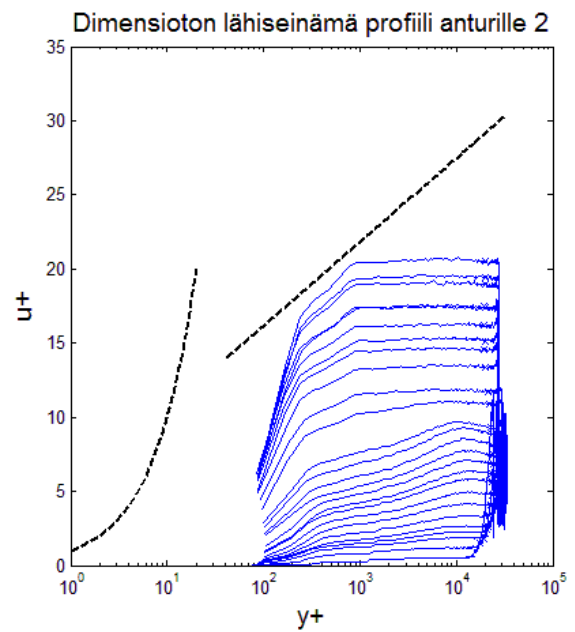
a)



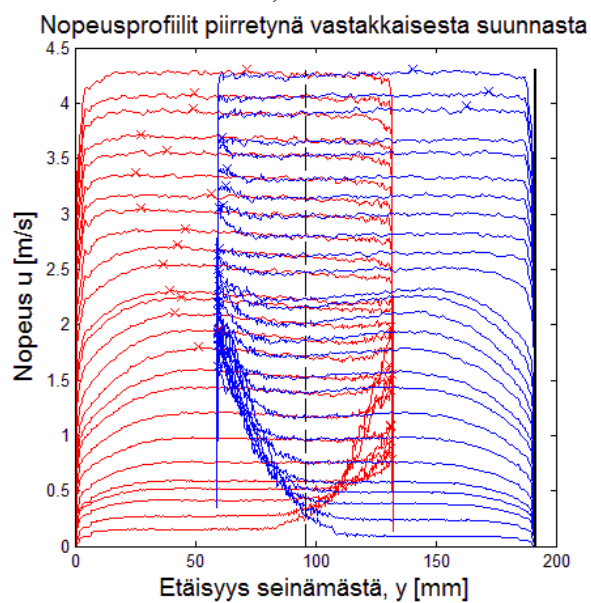
b)



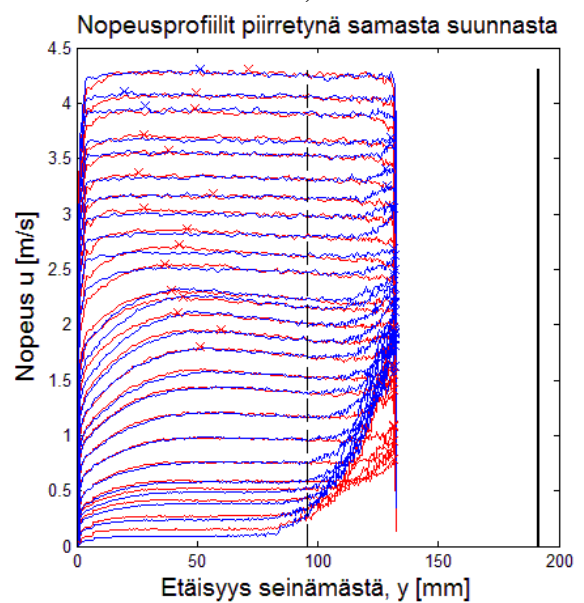
c)



d)

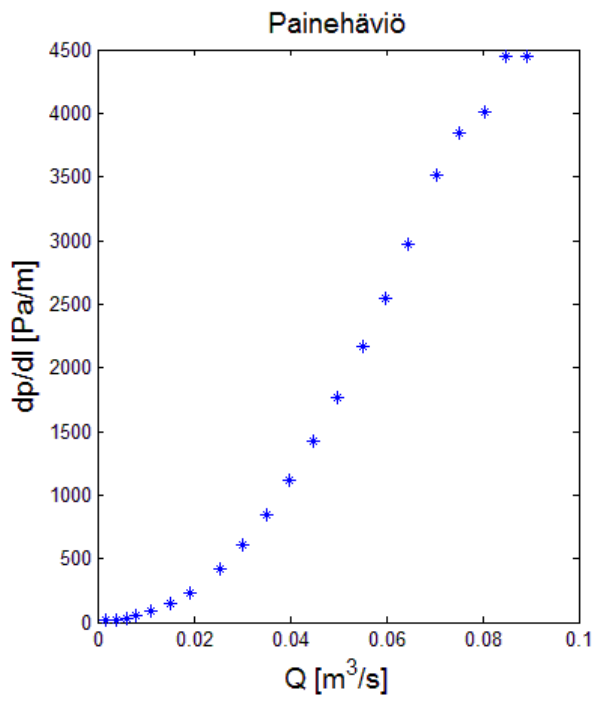


e)

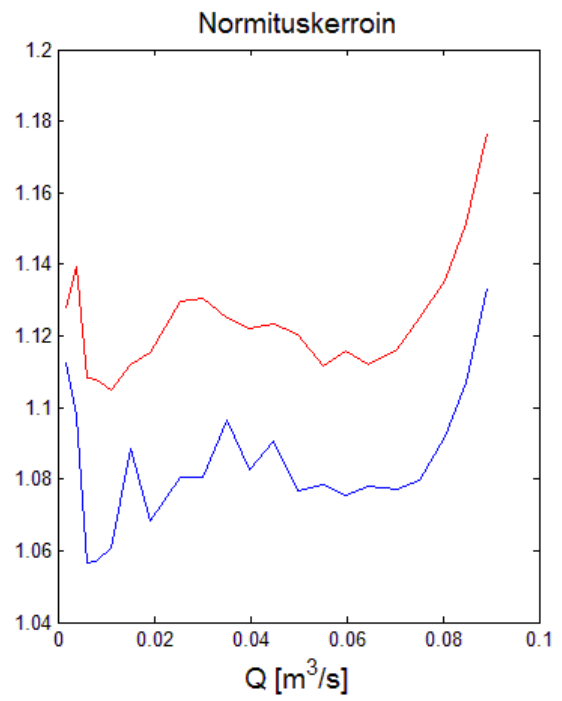


f)

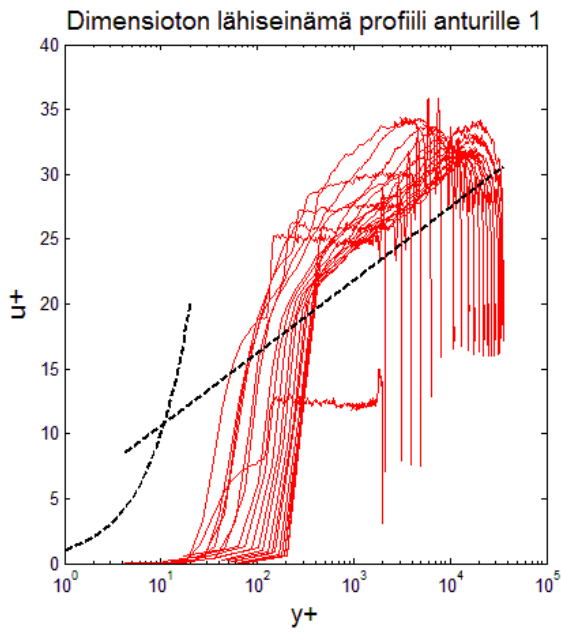
Kuva A.12: 200 mm putki, koivu 3,5 %



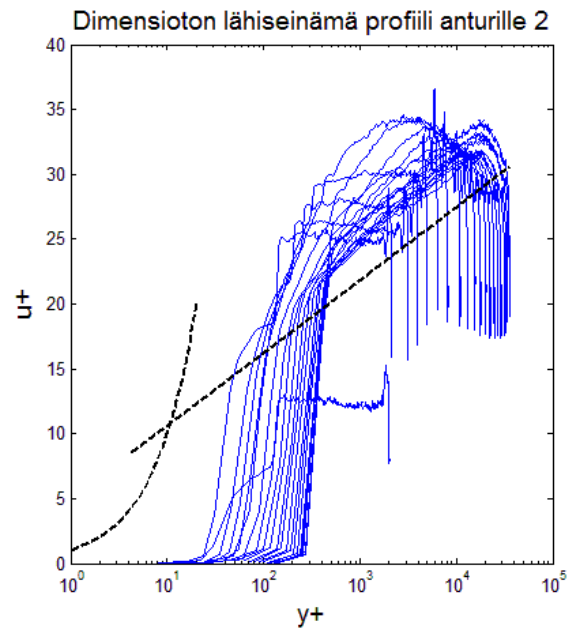
a)



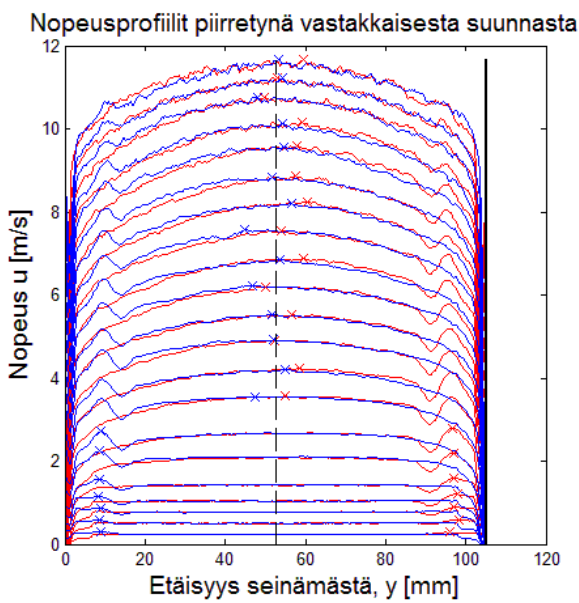
b)



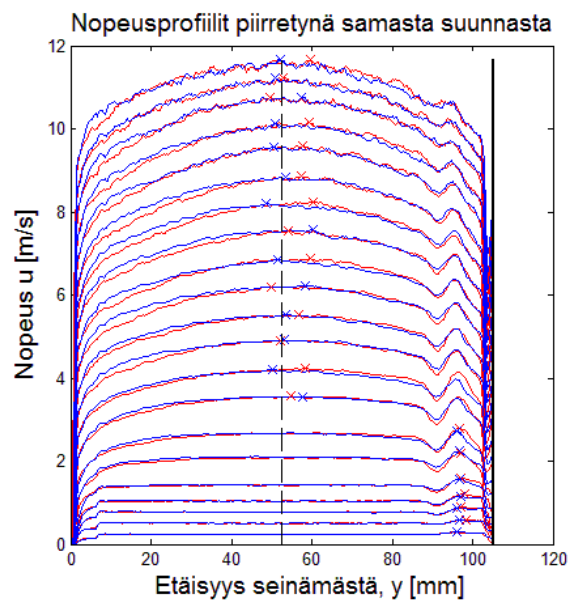
c)



d)

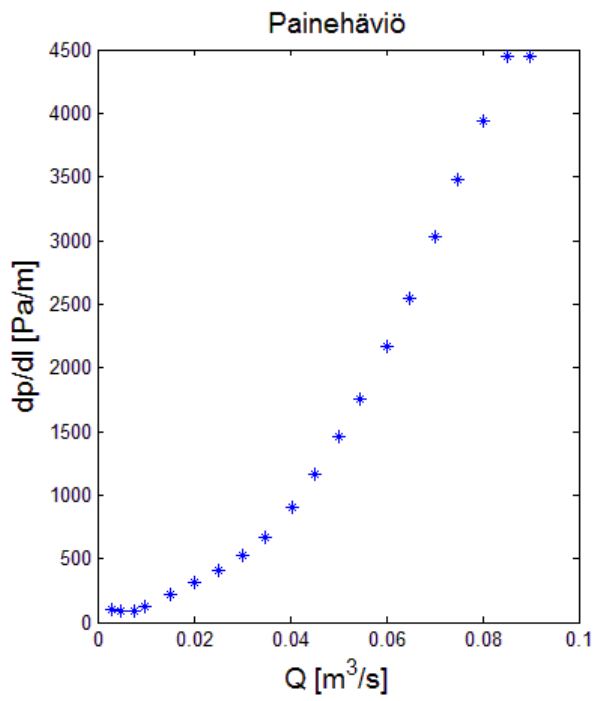


e)

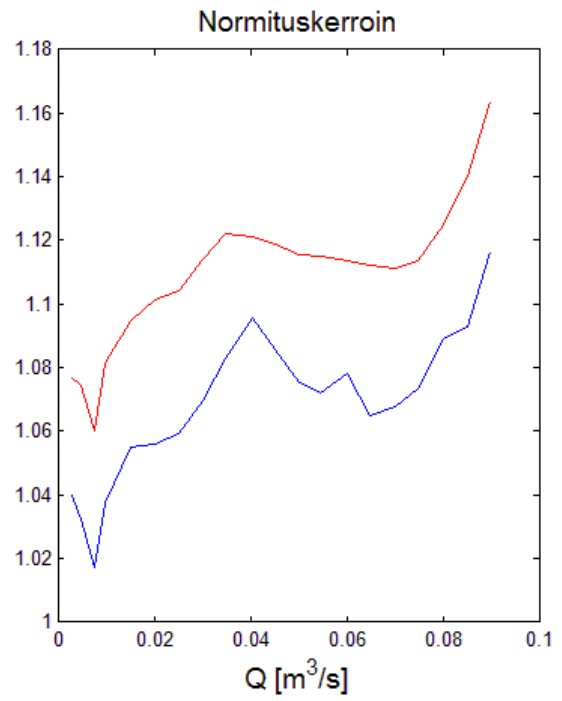


f)

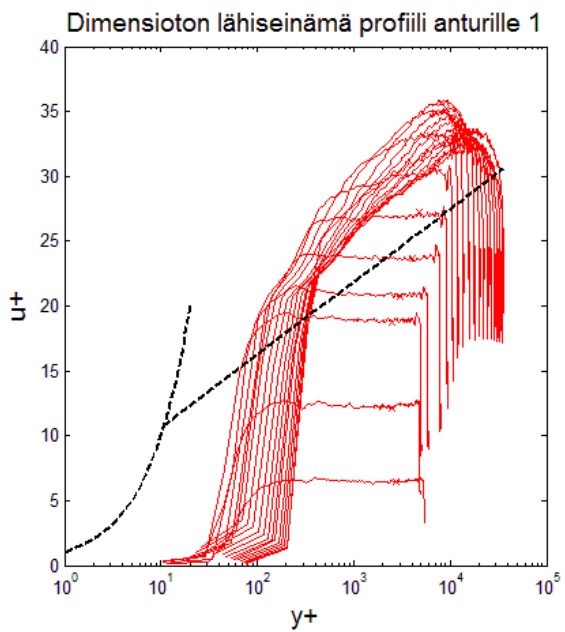
Kuva A.13: 100 mm putki, mänty 0,5 %



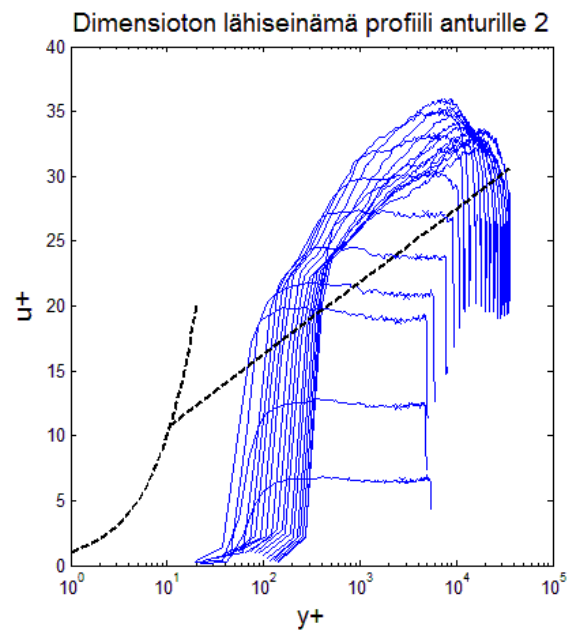
a)



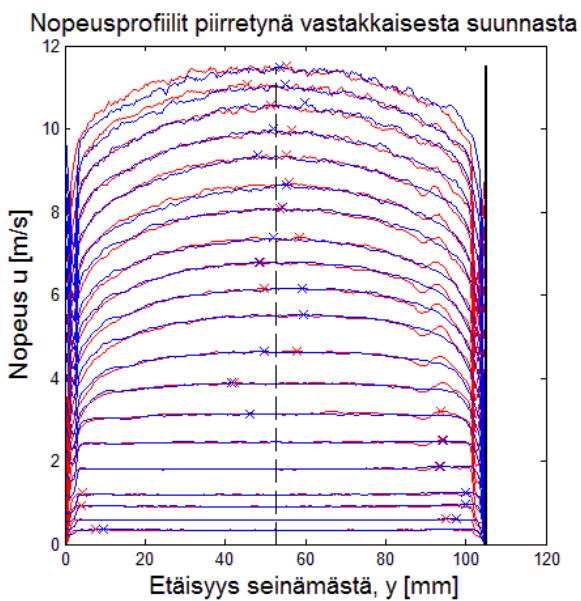
b)



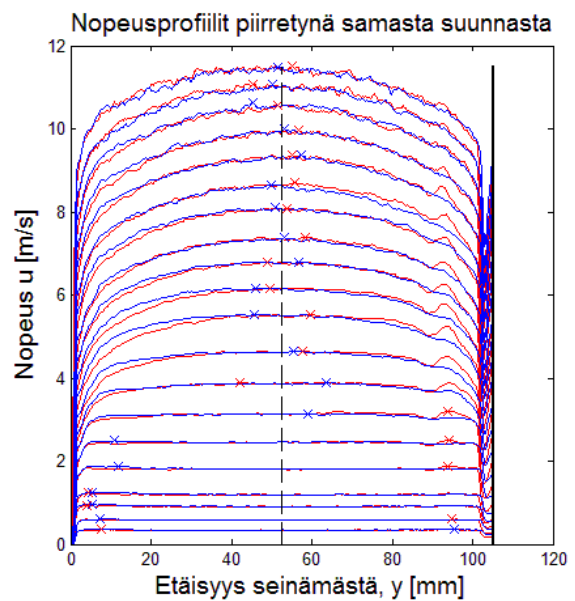
c)



d)

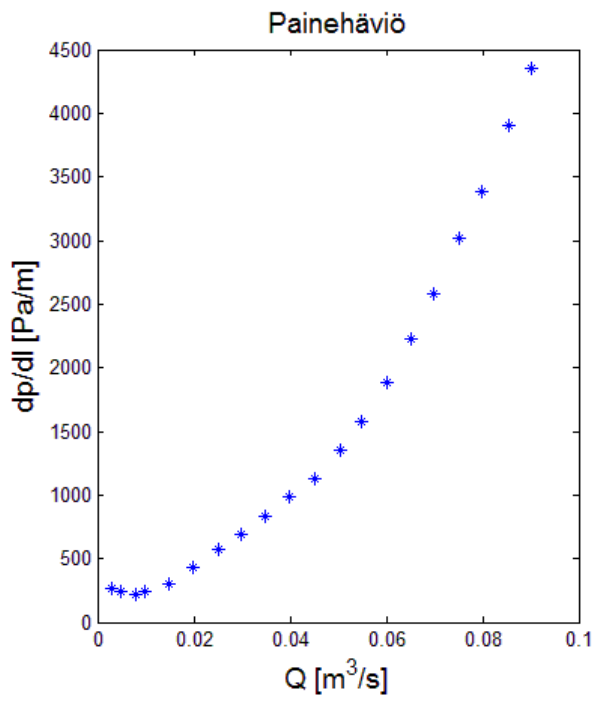


e)

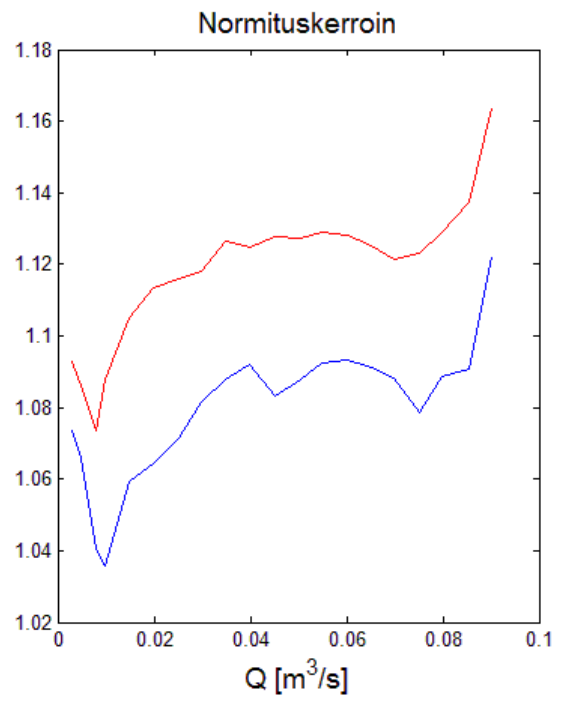


f)

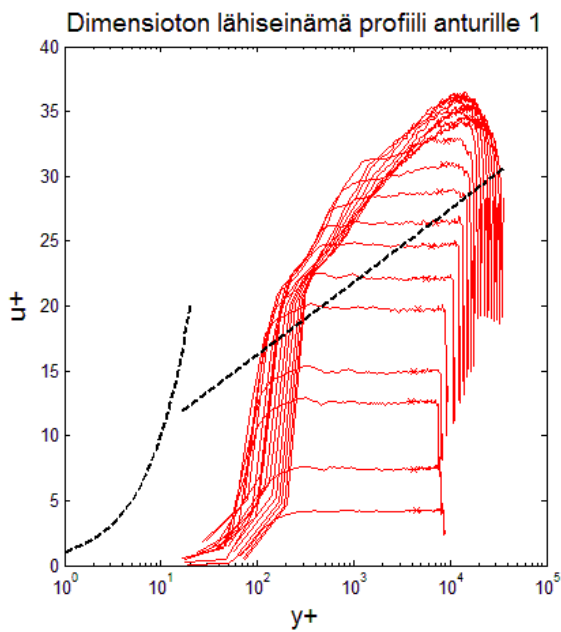
Kuva A.14: 100 mm putki, mänty 1,0 %



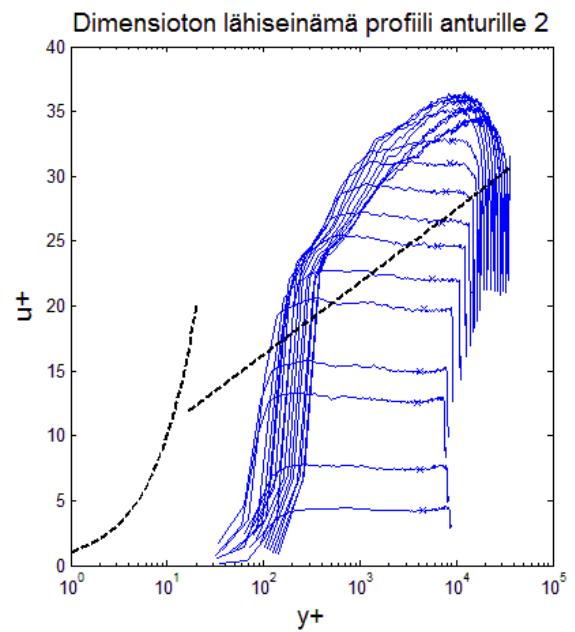
a)



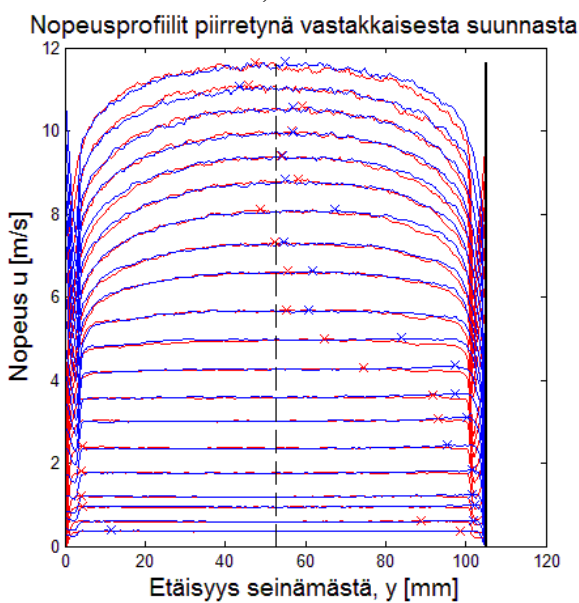
b)



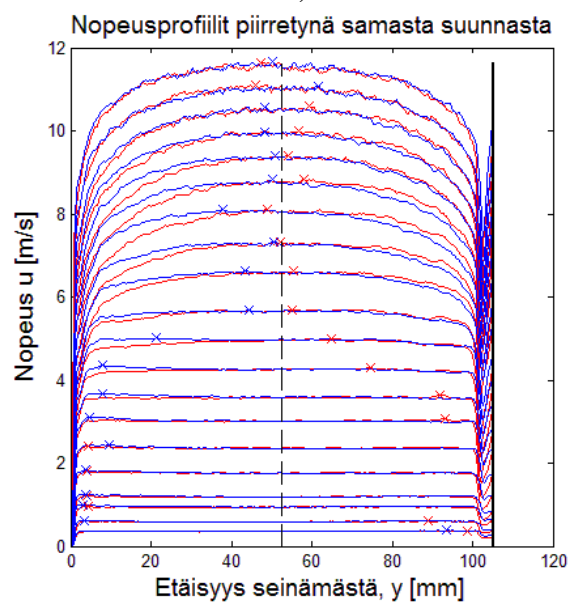
c)



d)

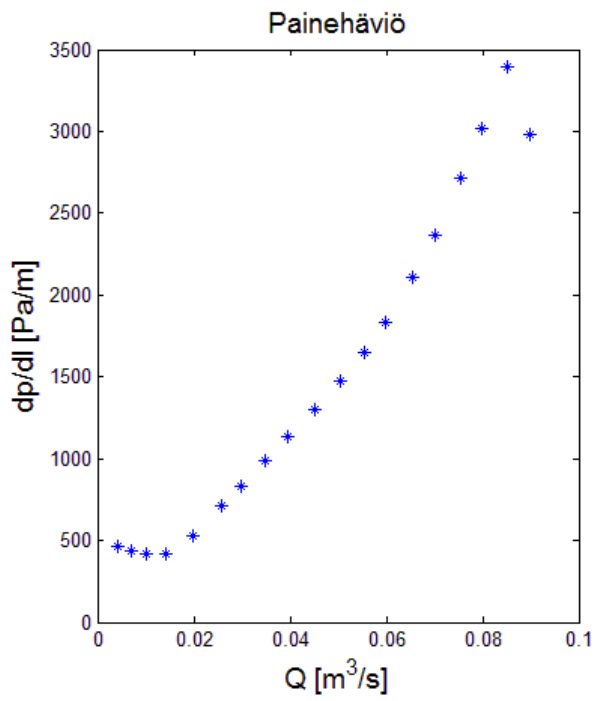


e)

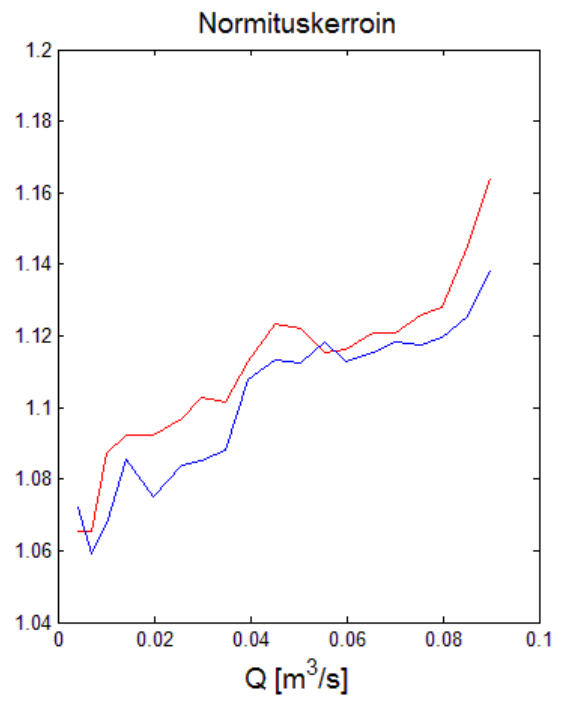


f)

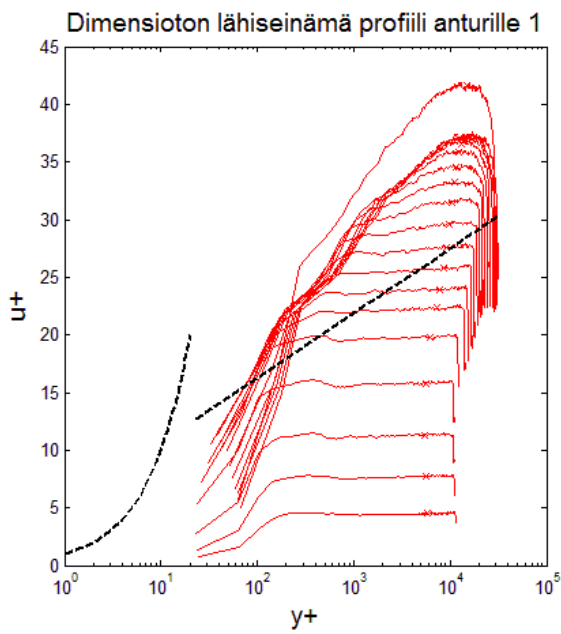
Kuva A.15: 100 mm putki, mänty 1,5 %



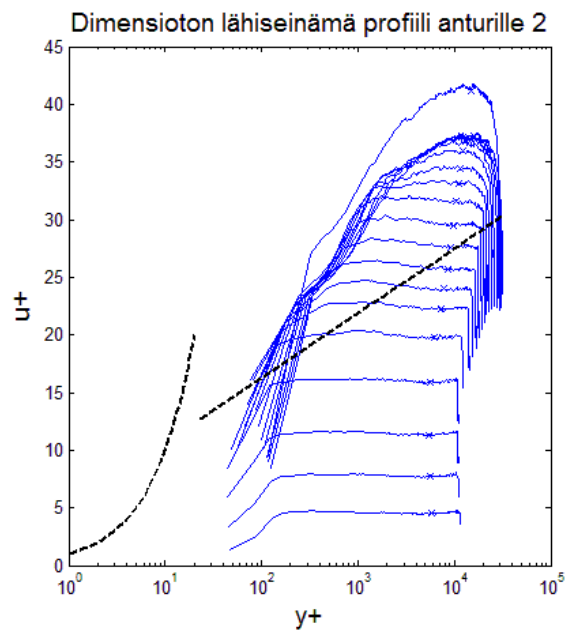
a)



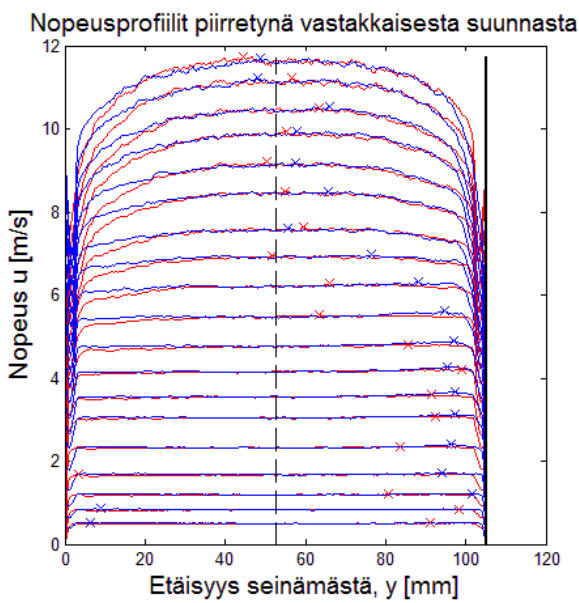
b)



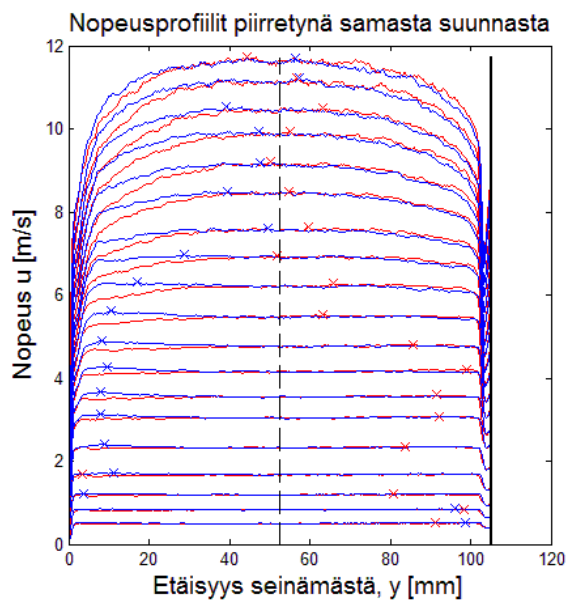
c)



d)



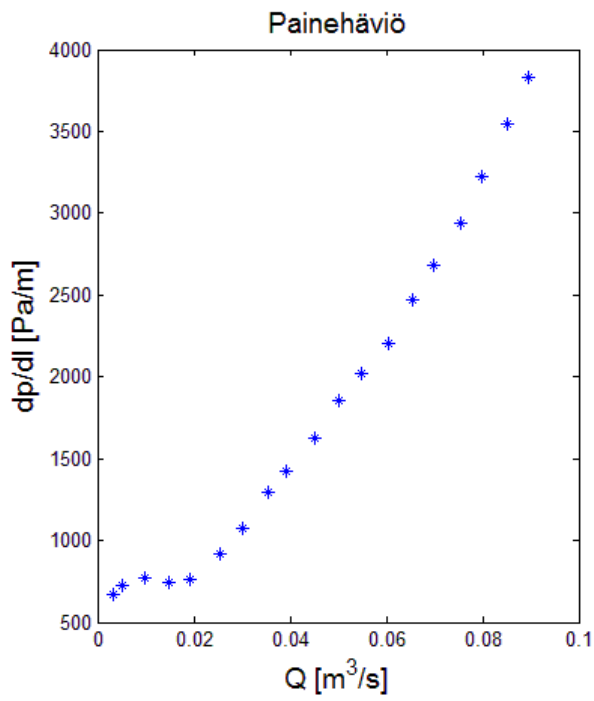
e)



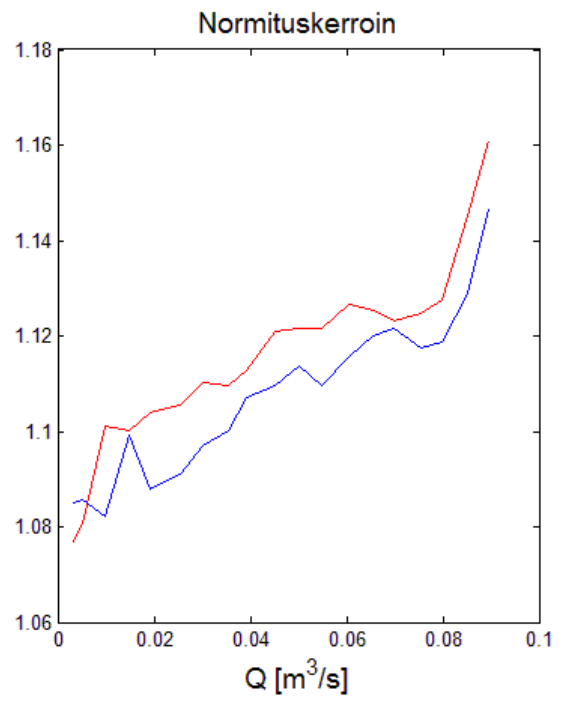
f)

Kuva A.16: 100 mm putki, mänty 2,0 %

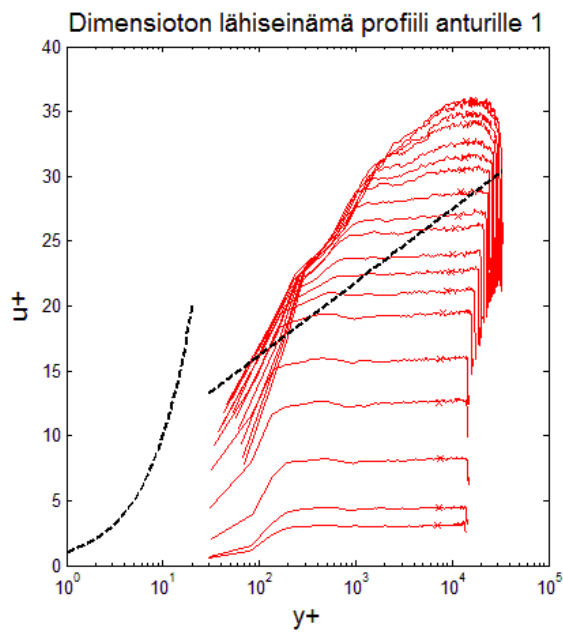




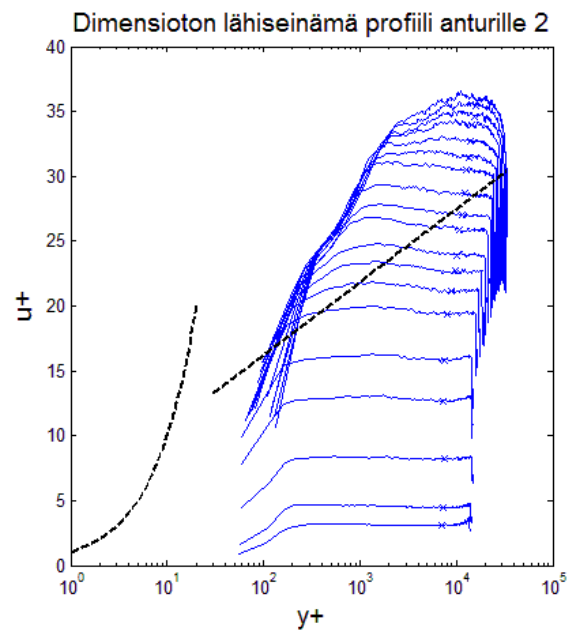
a)



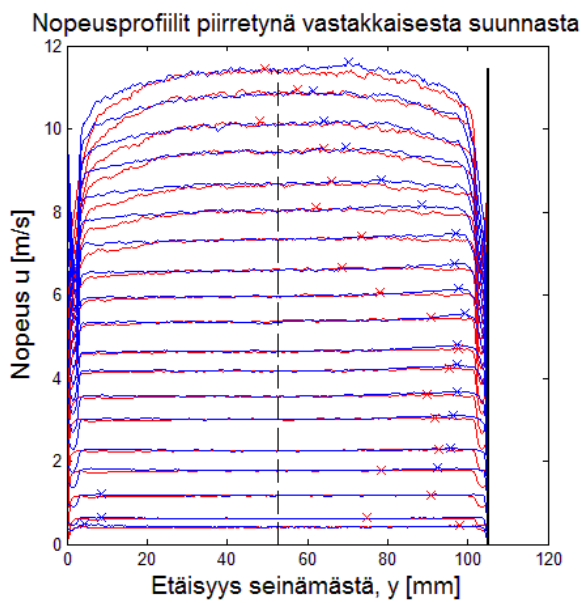
b)



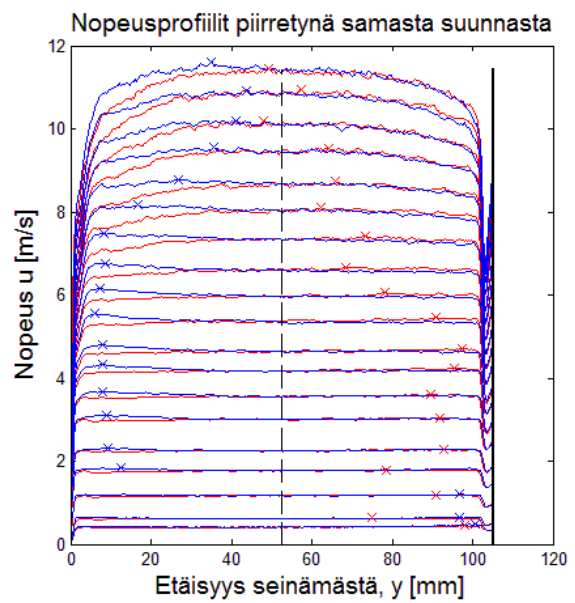
c)



d)

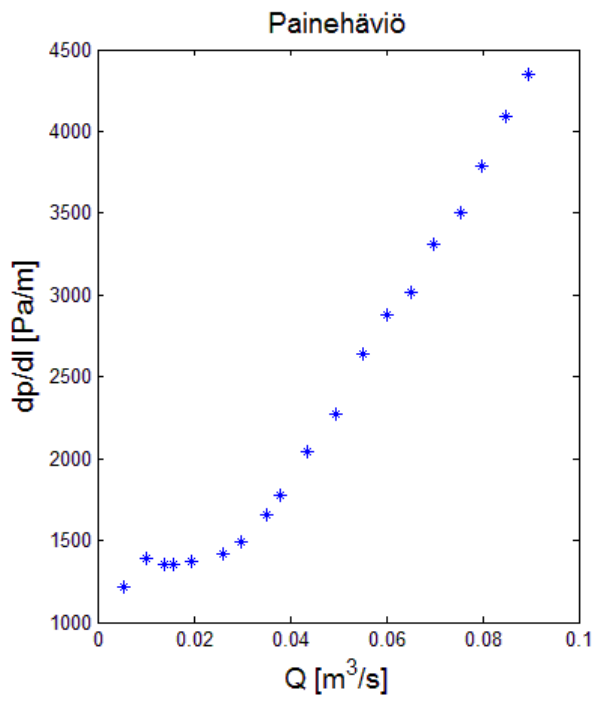


e)

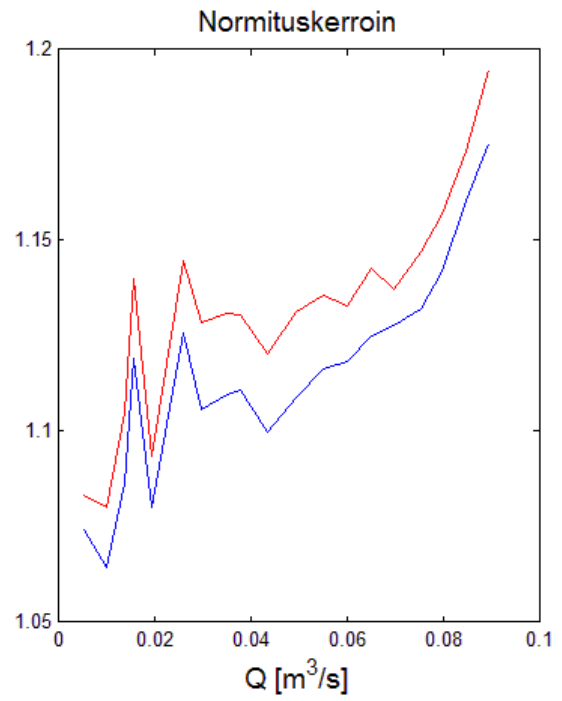


f)

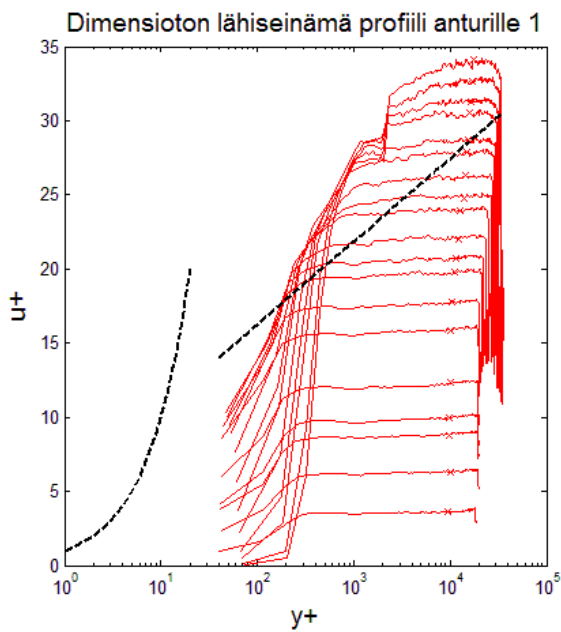
Kuva A.17: 100 mm putki, mänty 2,5 %



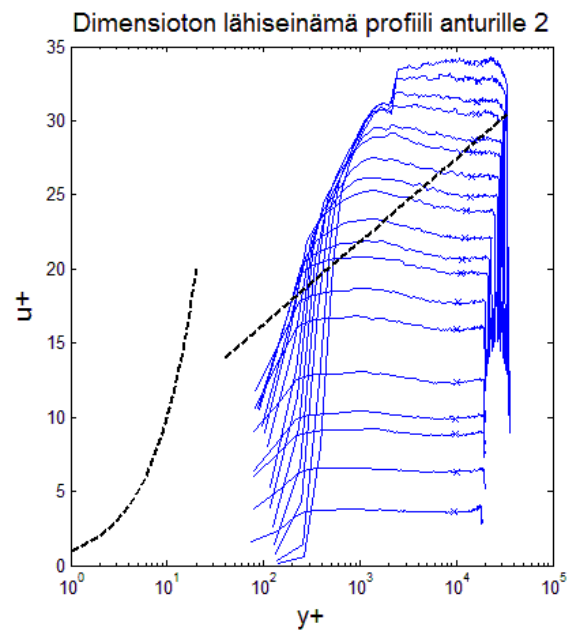
a)



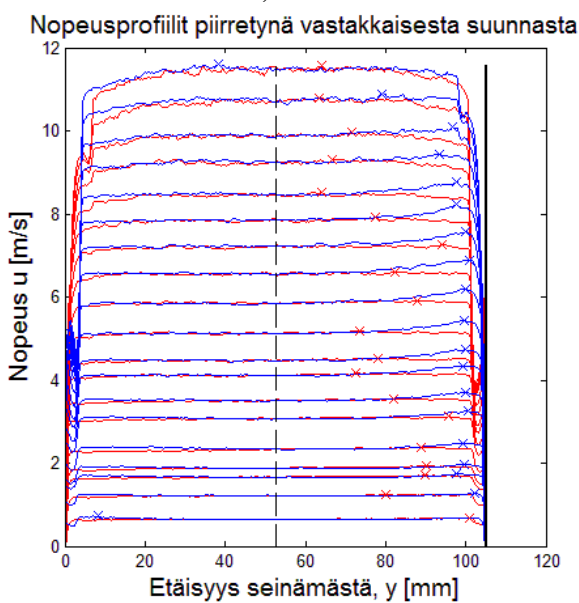
b)



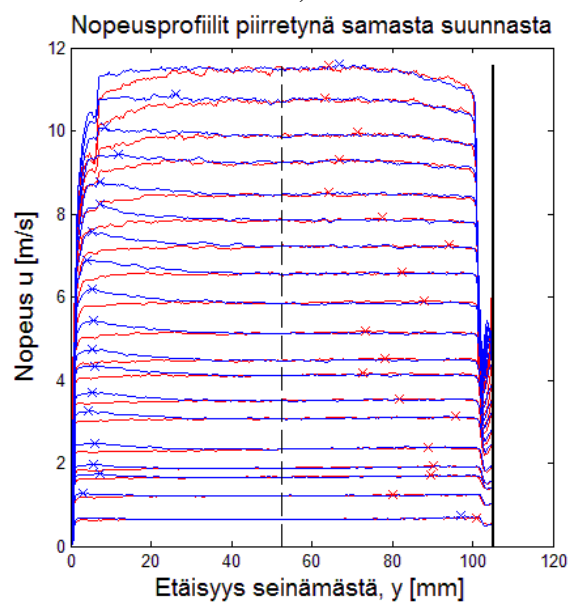
c)



d)

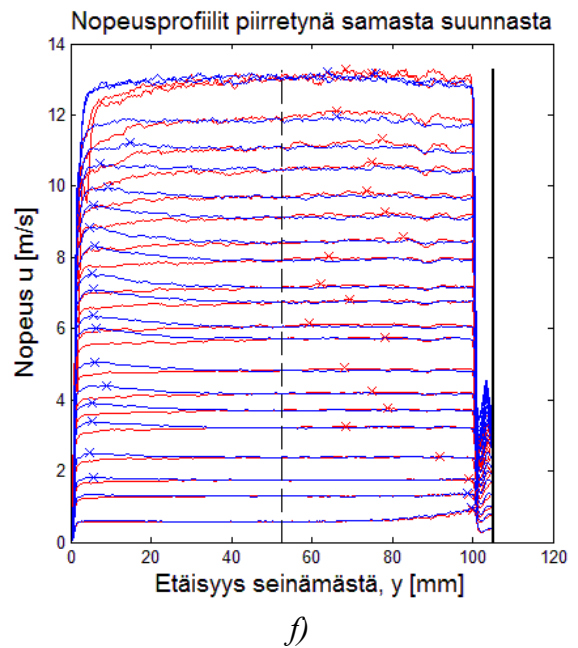
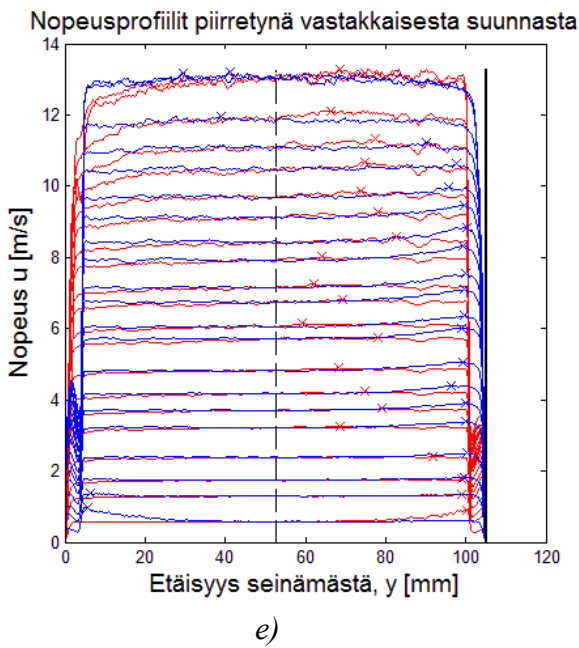
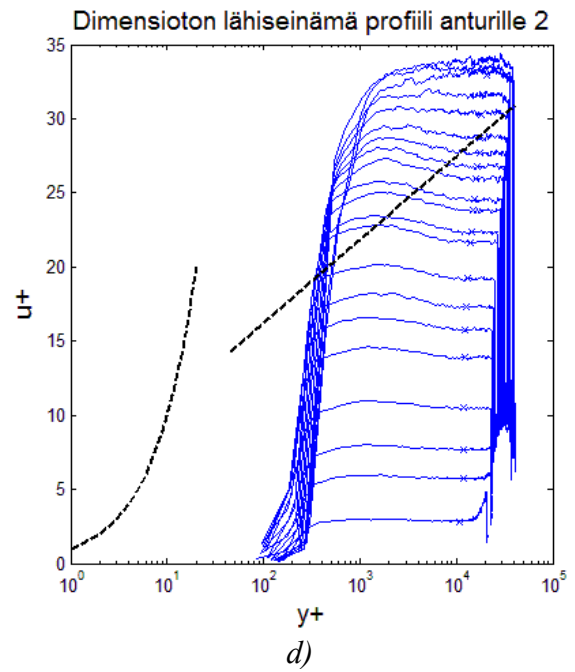
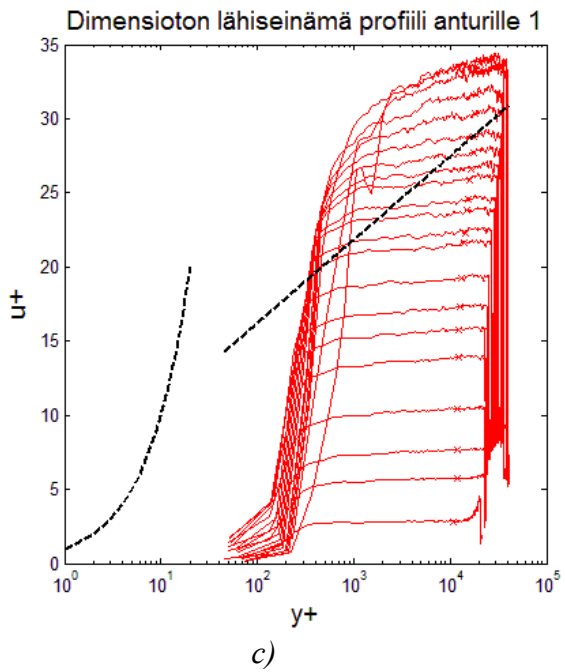
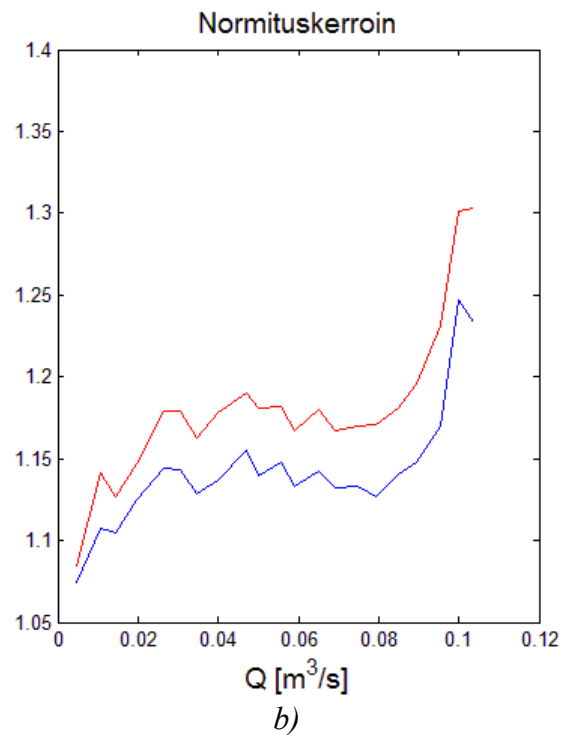
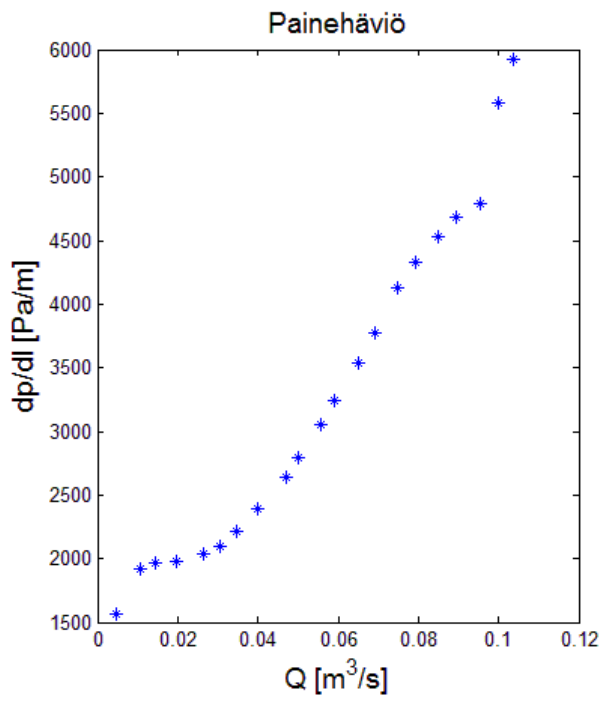


e)

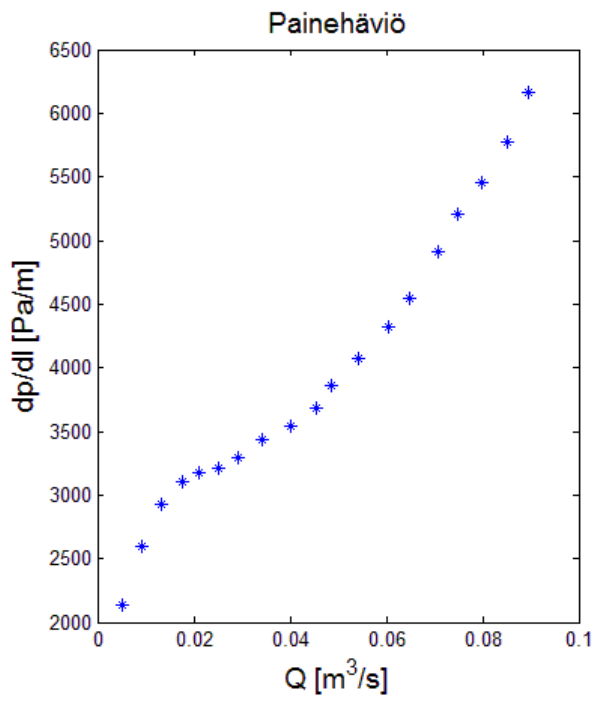


f)

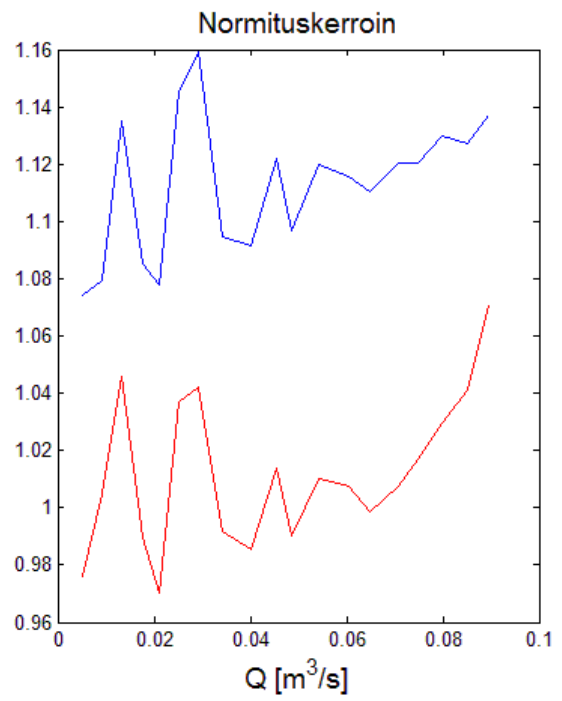
Kuva A.18: 100 mm putki, mänty 3,0 %



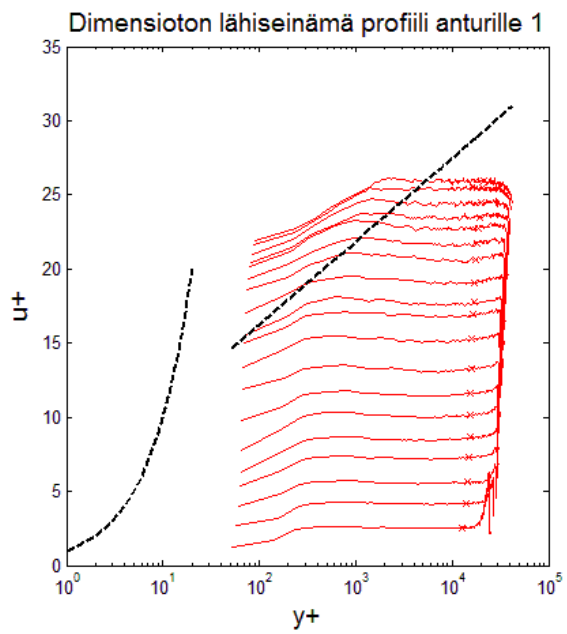
Kuva A.19: 100 mm putki, mänty 3,5 %



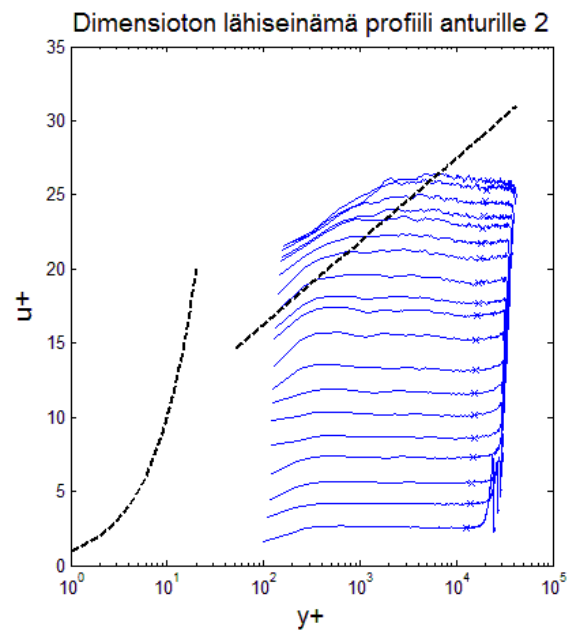
a)



b)



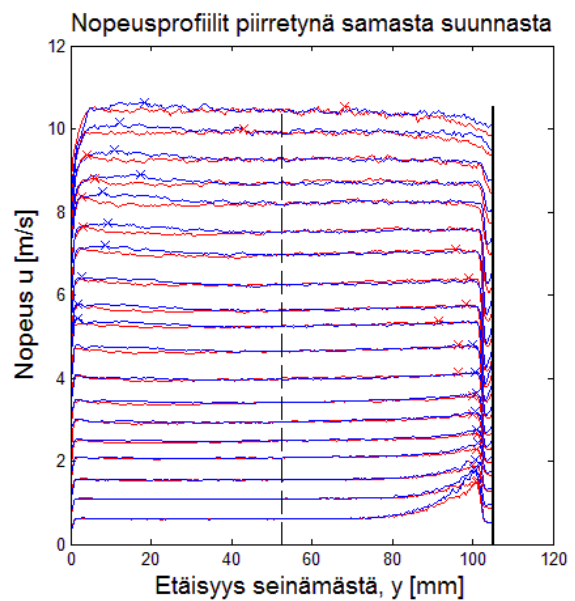
c)



d)

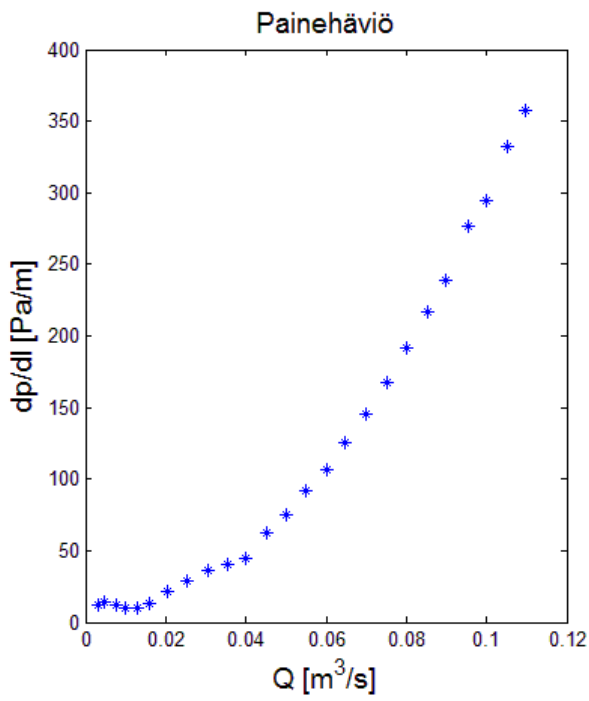


e)

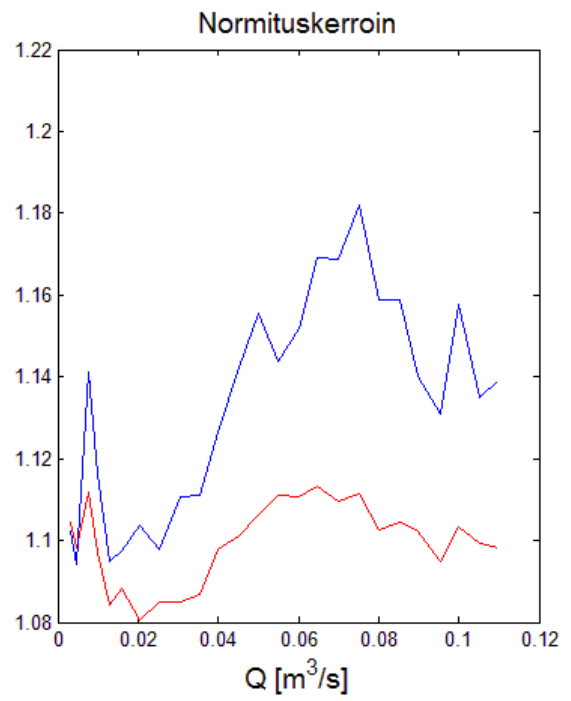


f)

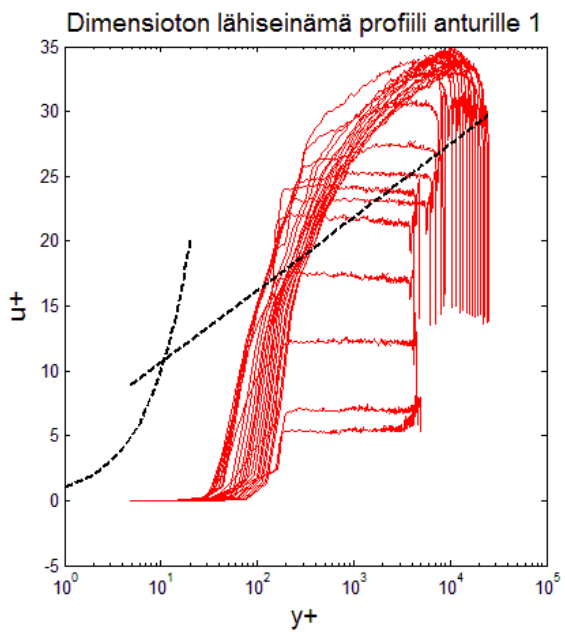
Kuva A.20: 100 mm putki, mänty 4,0 %



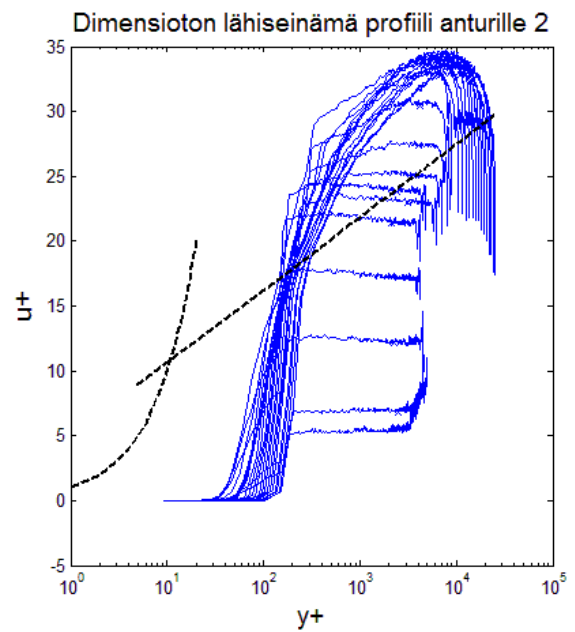
a)



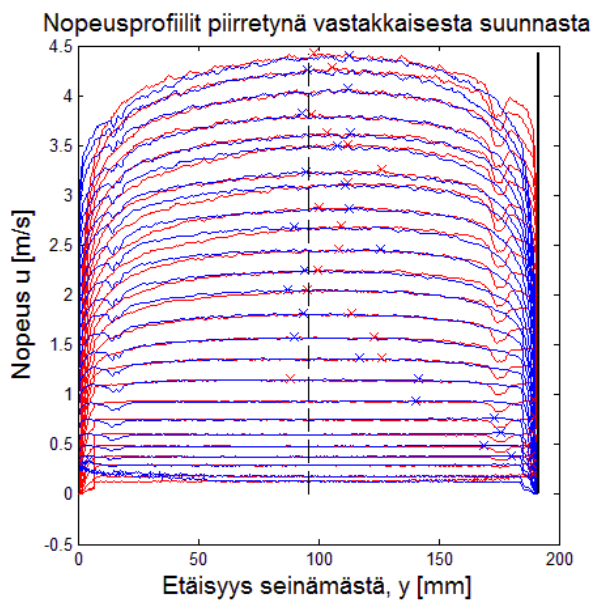
b)



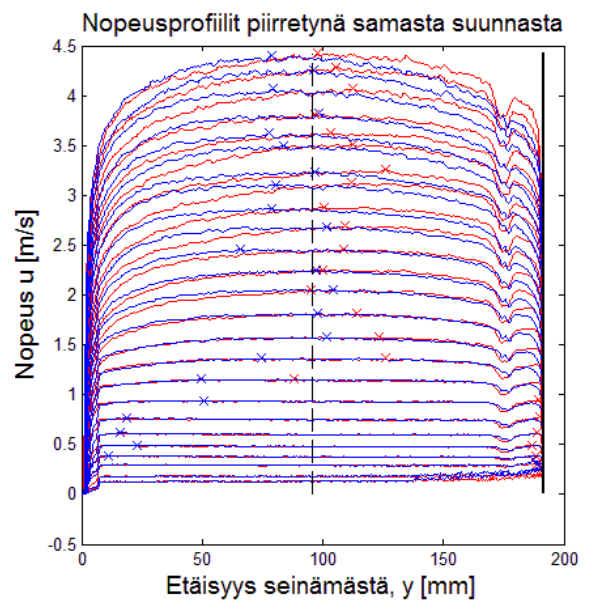
c)



d)

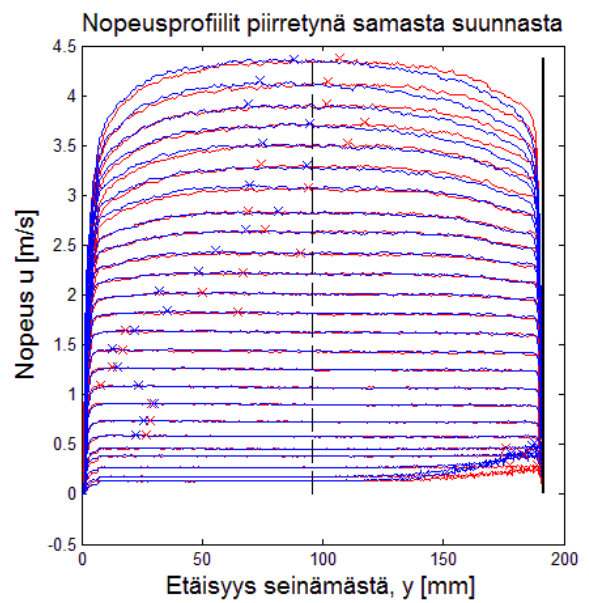
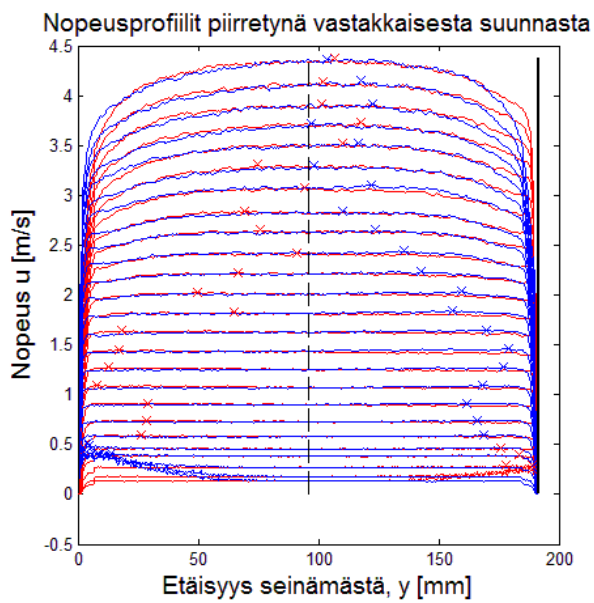
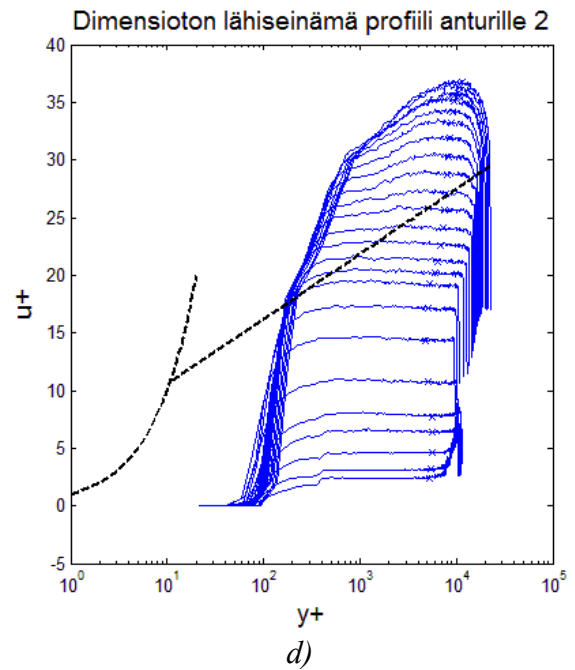
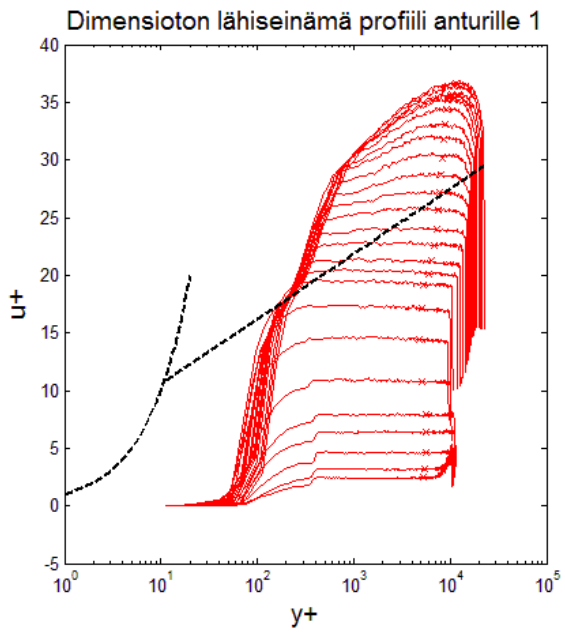
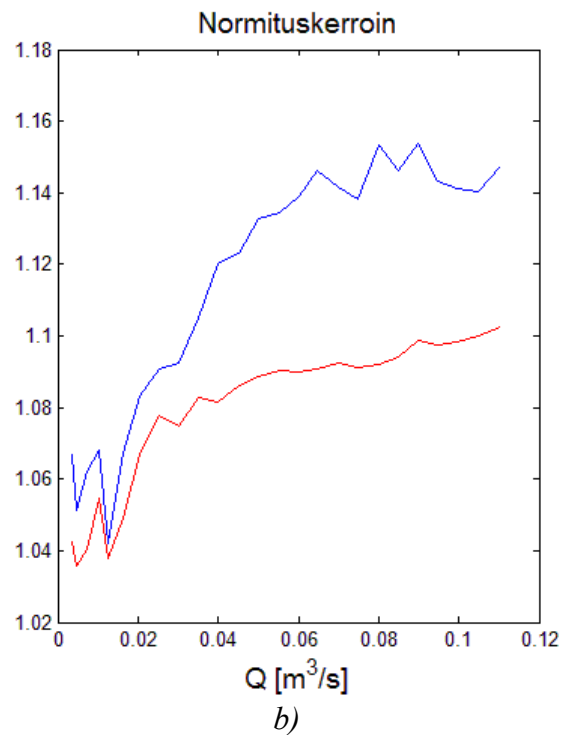
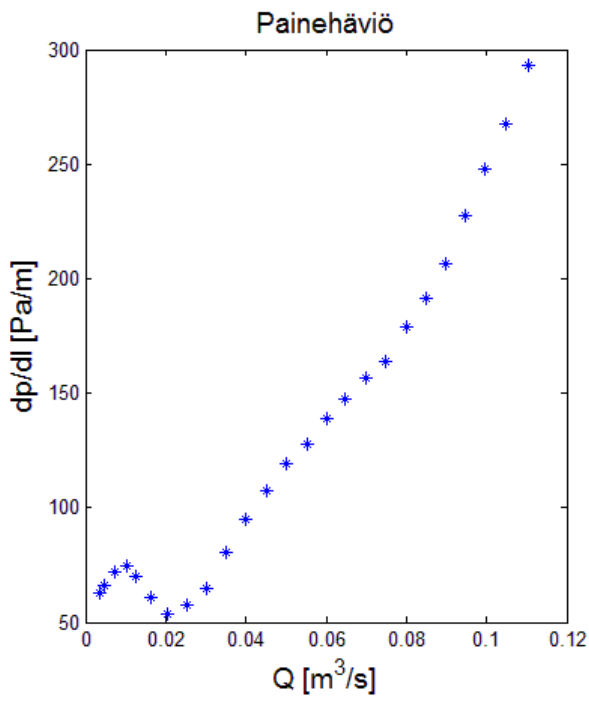


e)

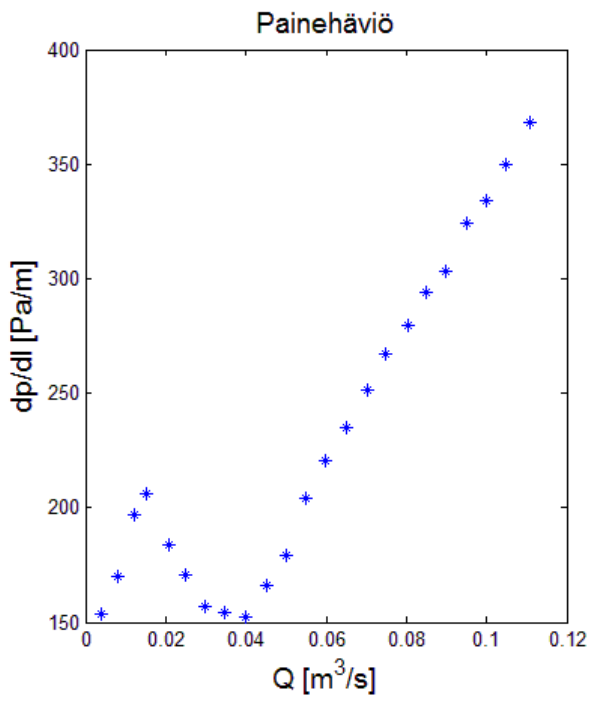


f)

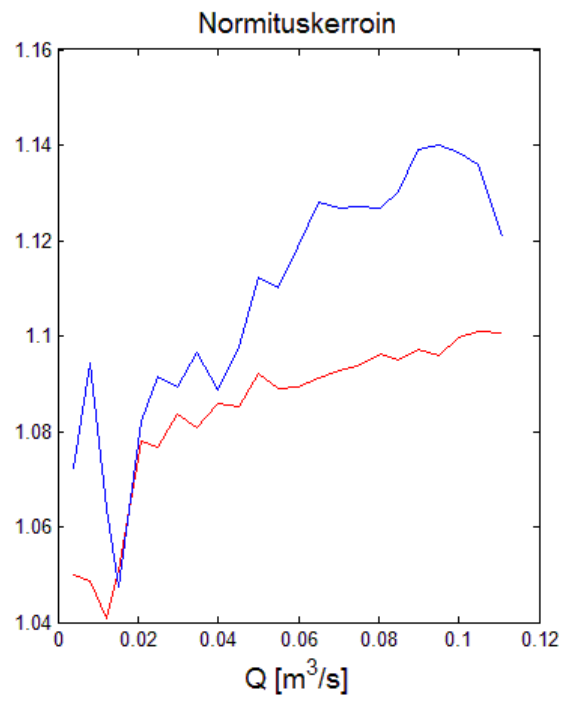
Kuva A.21: 200 mm putki, mänty 0,5 %



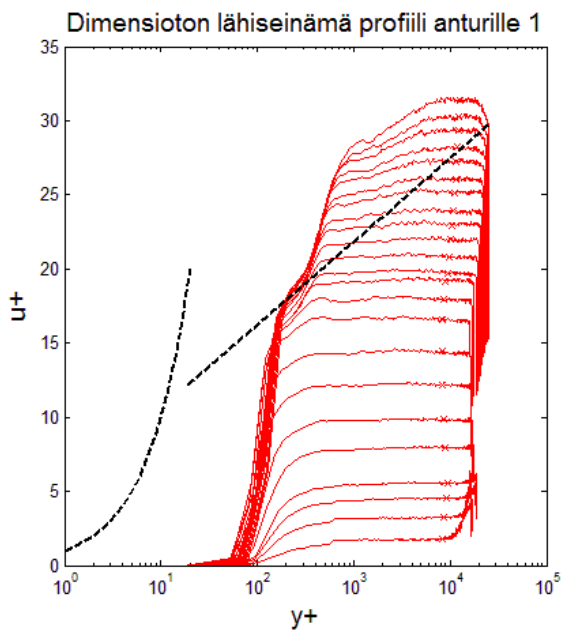
Kuva A.22: 200 mm putki, mänty 1,0 %



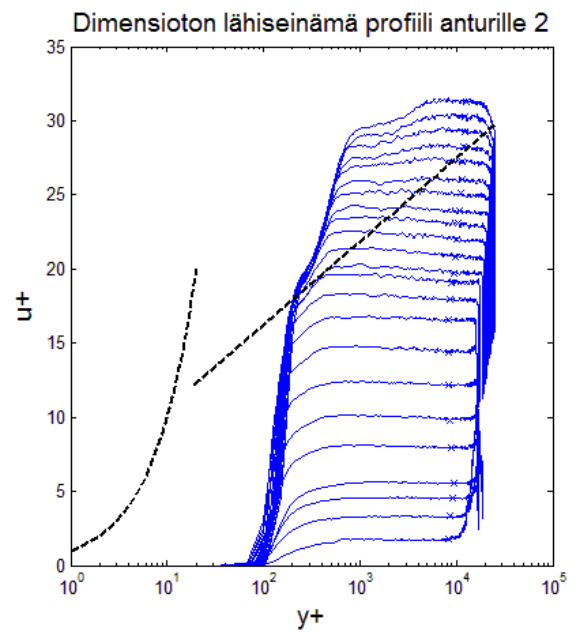
a)



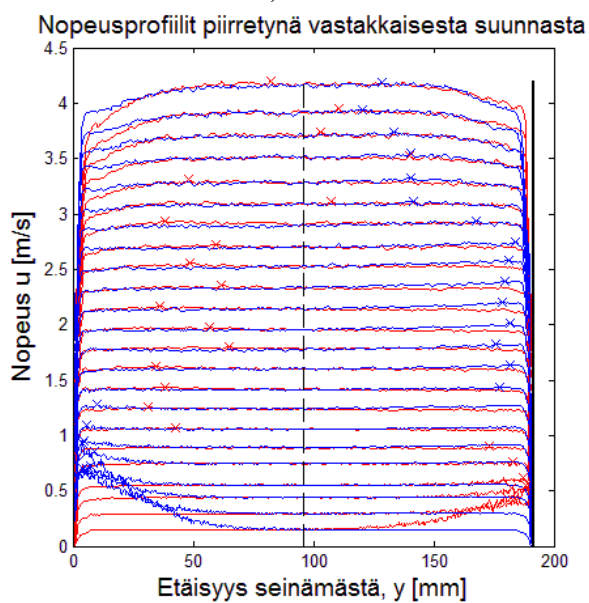
b)



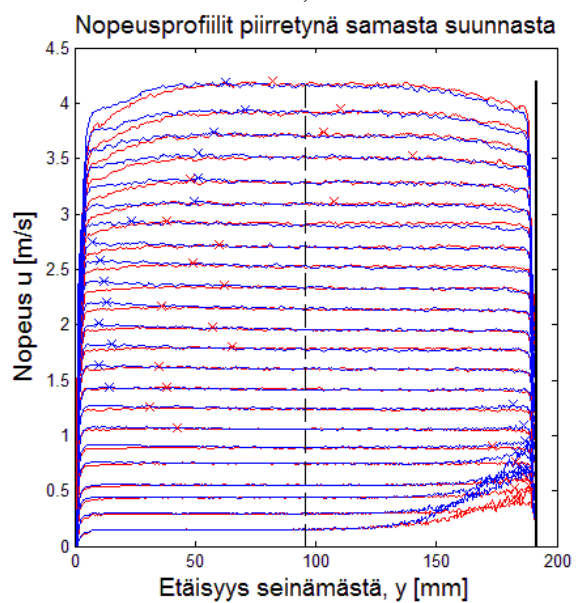
c)



d)

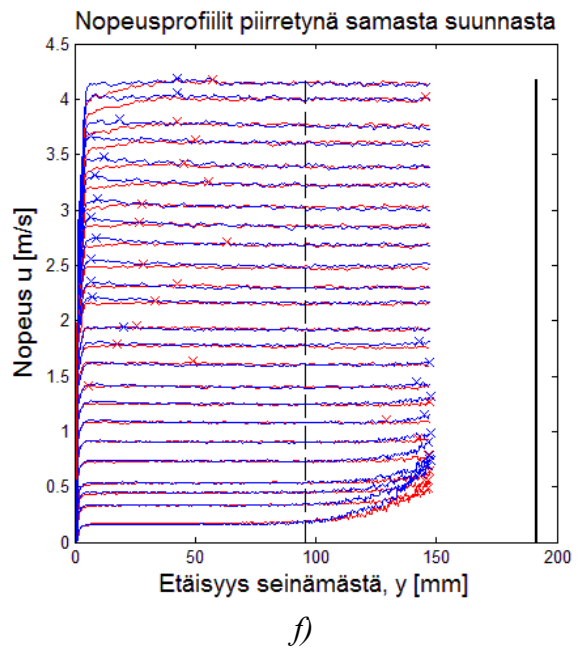
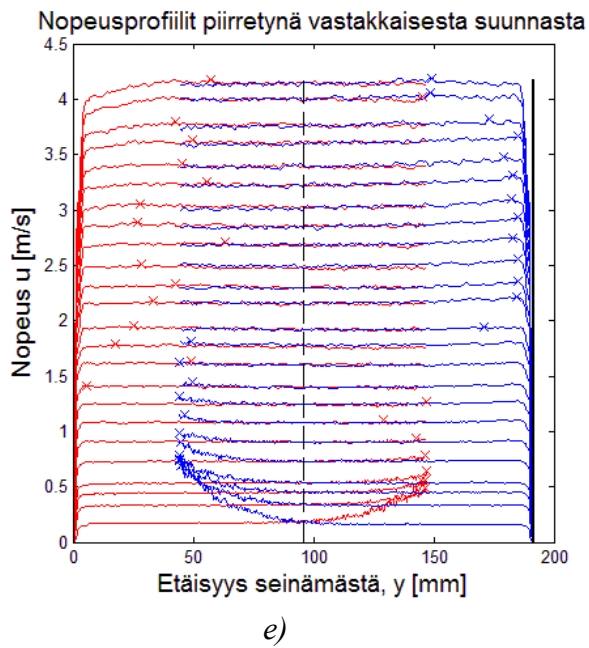
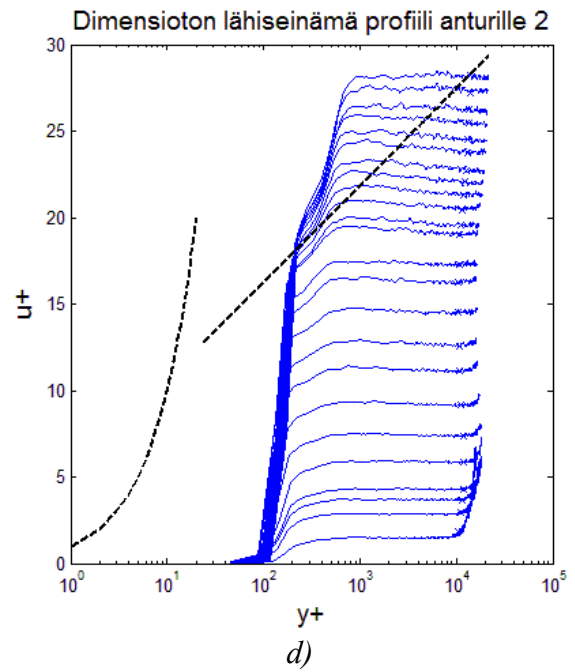
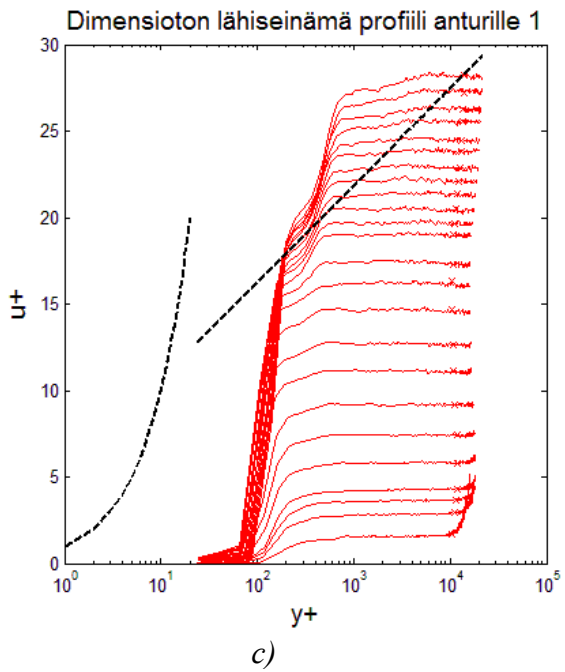
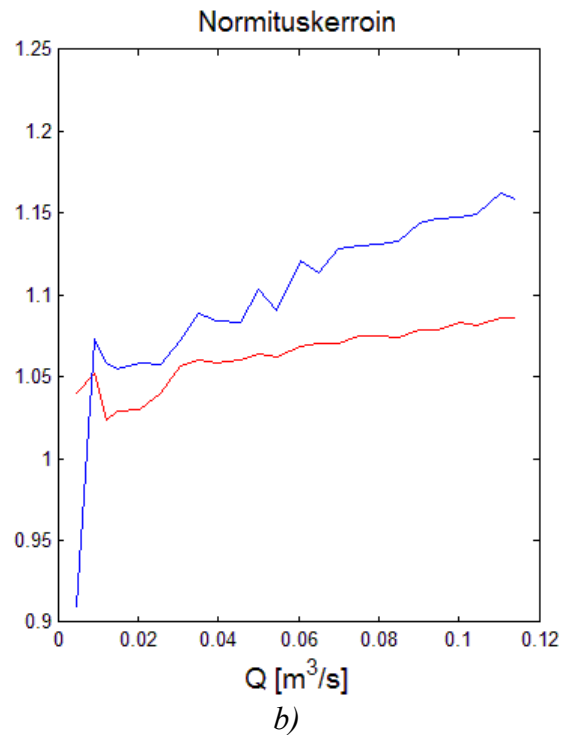
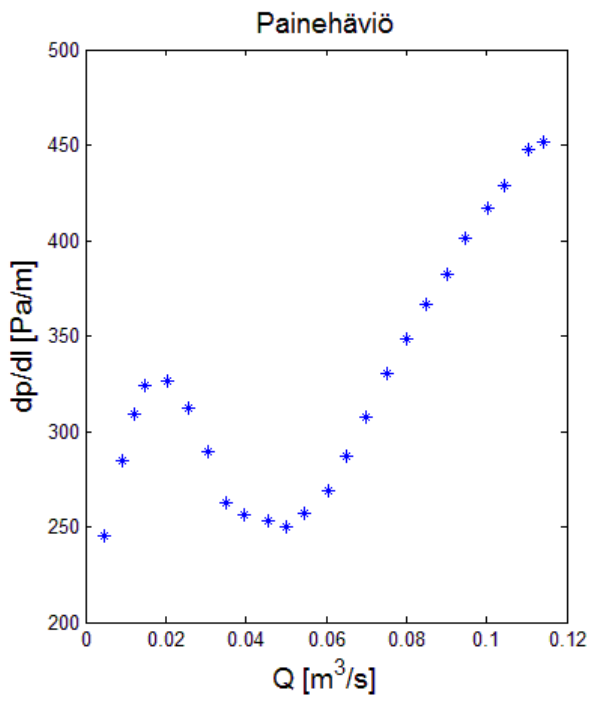


e)



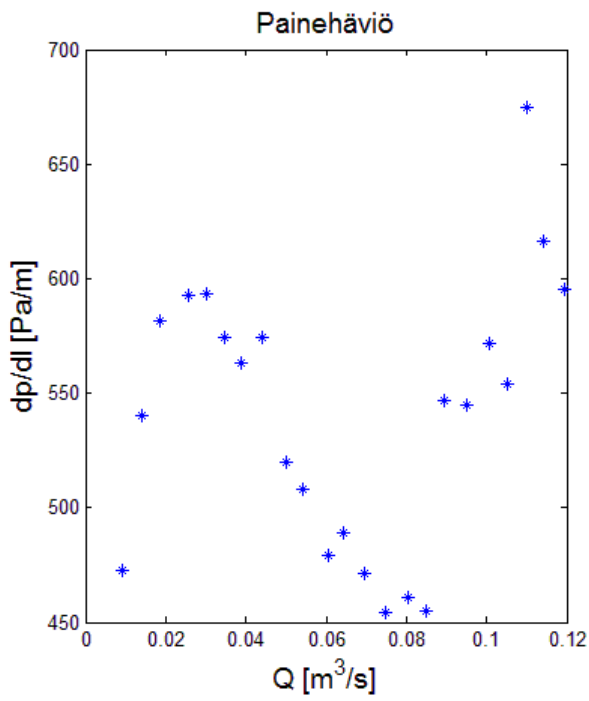
f)

Kuva A.23: 200 mm putki, mänty 1,5 %

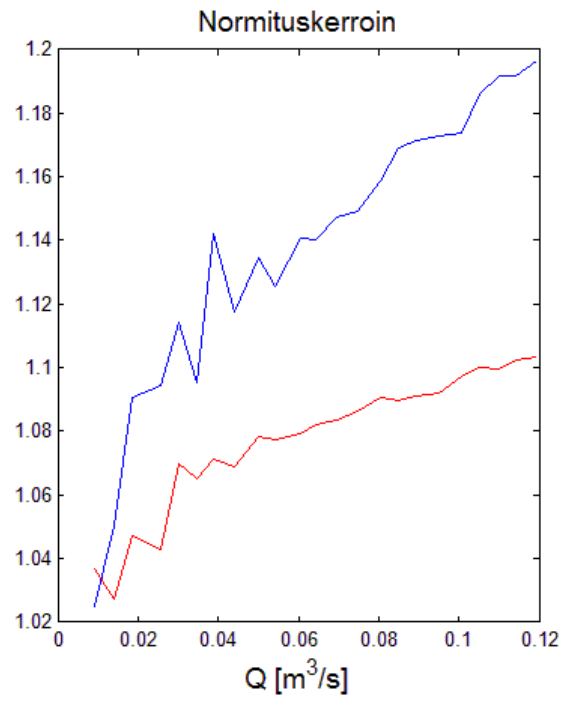


Kuva A.24: 200 mm putki, mänty 2,0 %

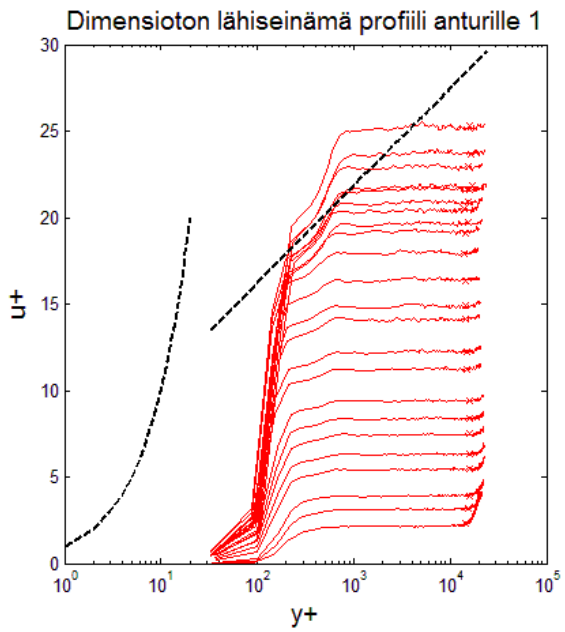




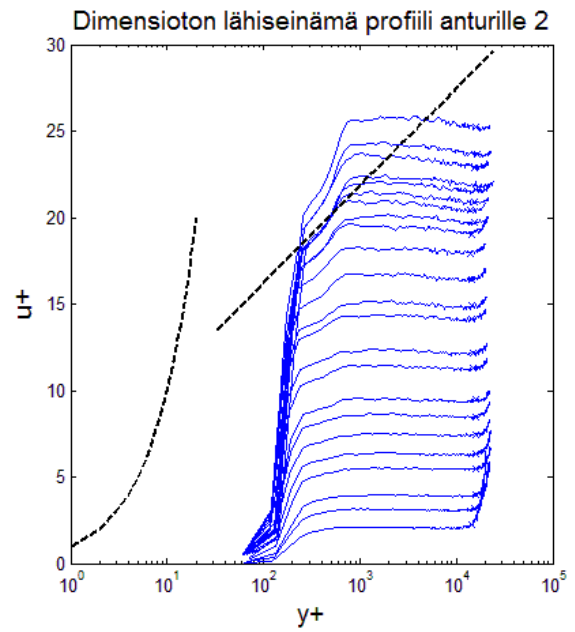
a)



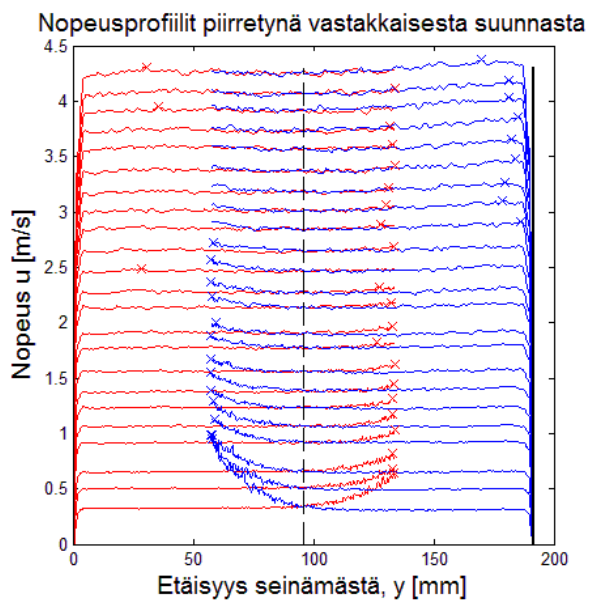
b)



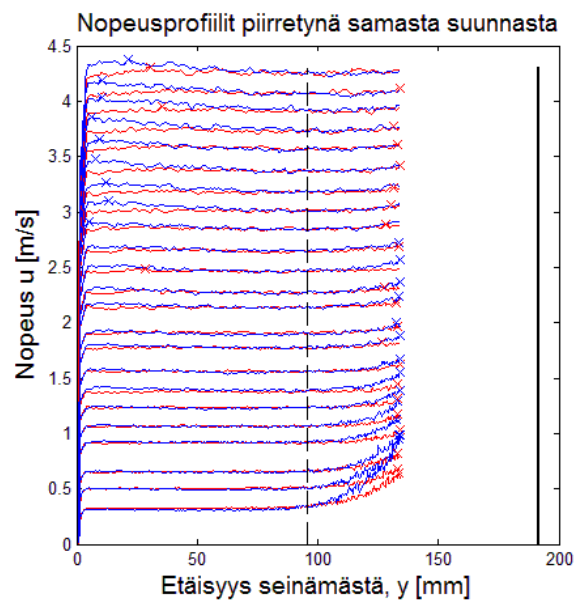
c)



d)

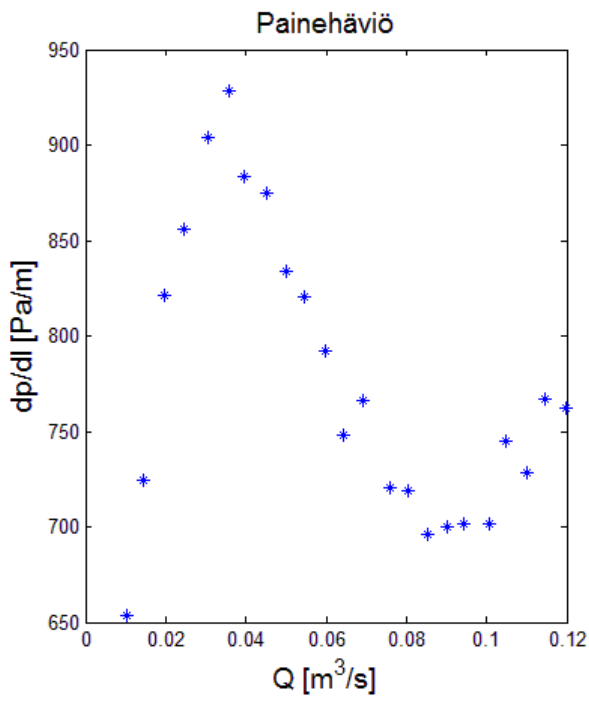


e)

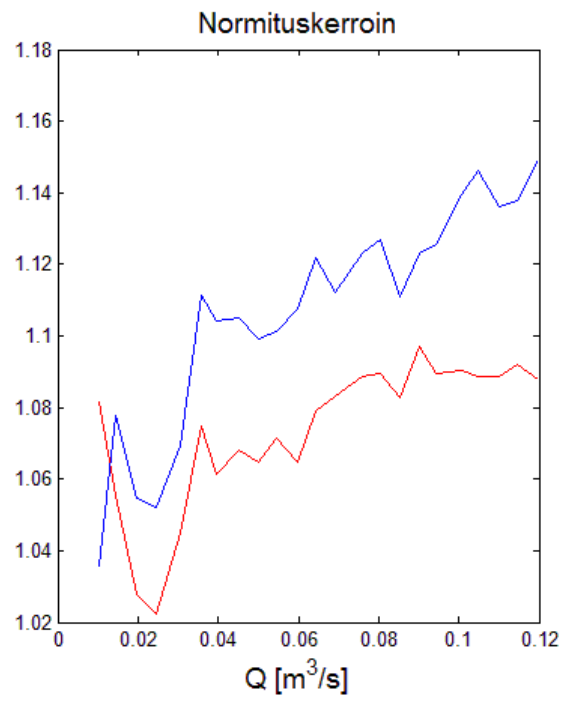


f)

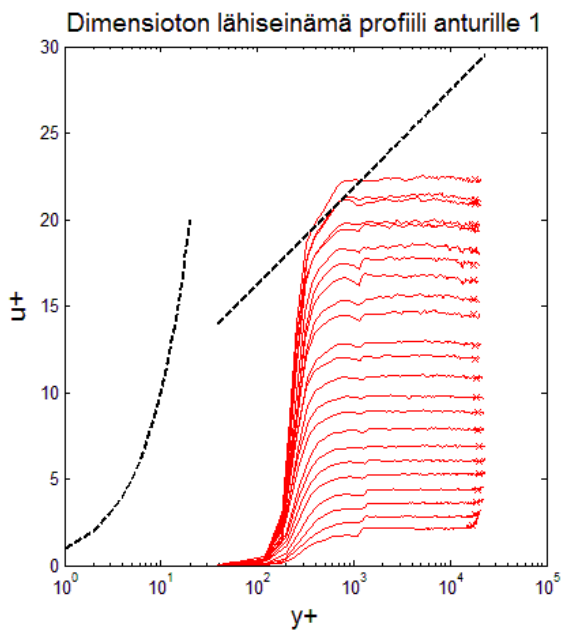
Kuva A.25: 200 mm putki, mänty 2,5 %



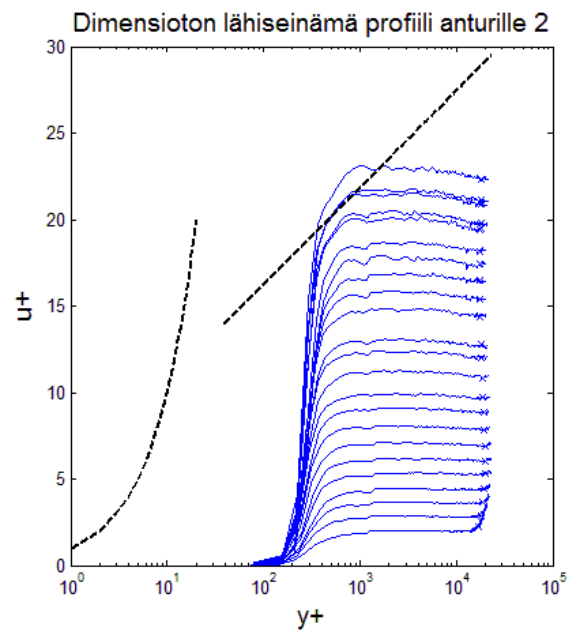
a)



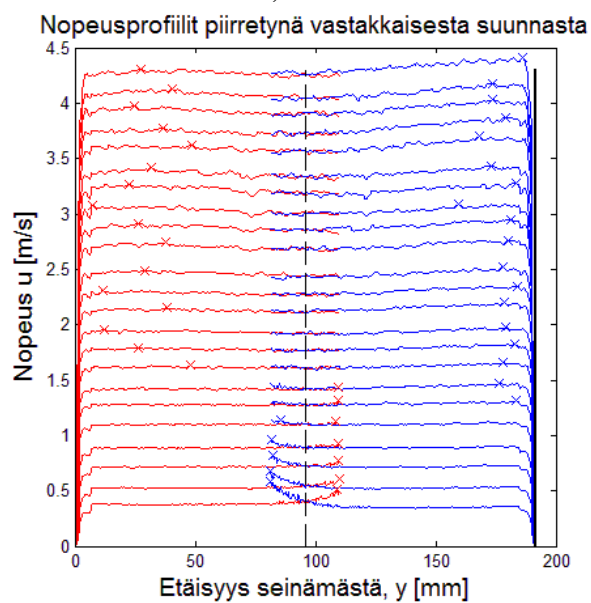
b)



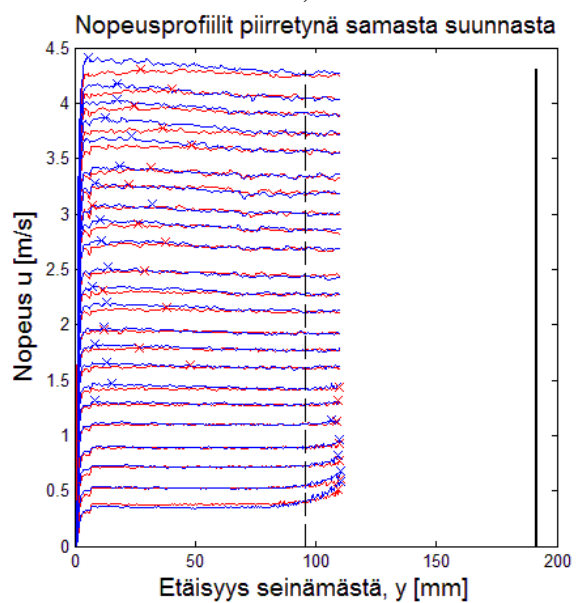
c)



d)

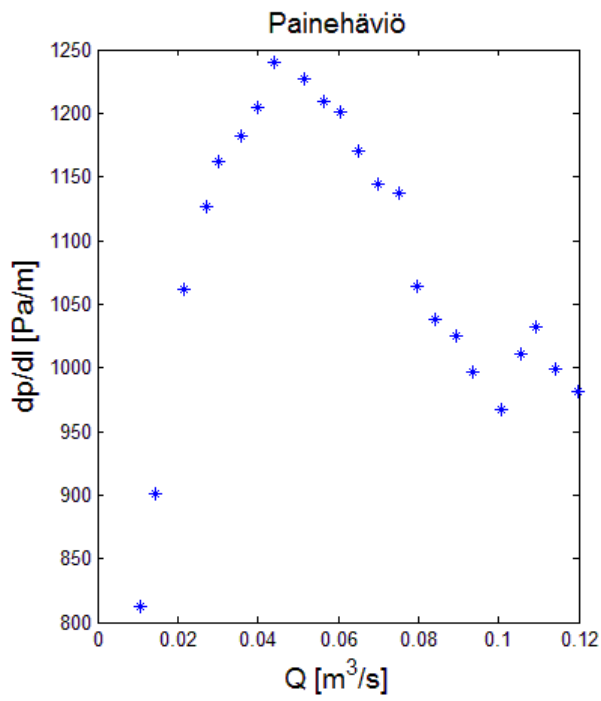


e)

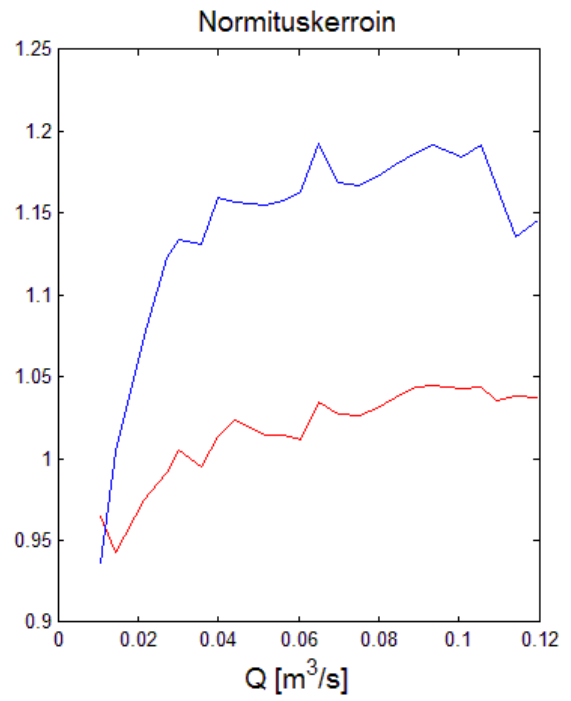


f)

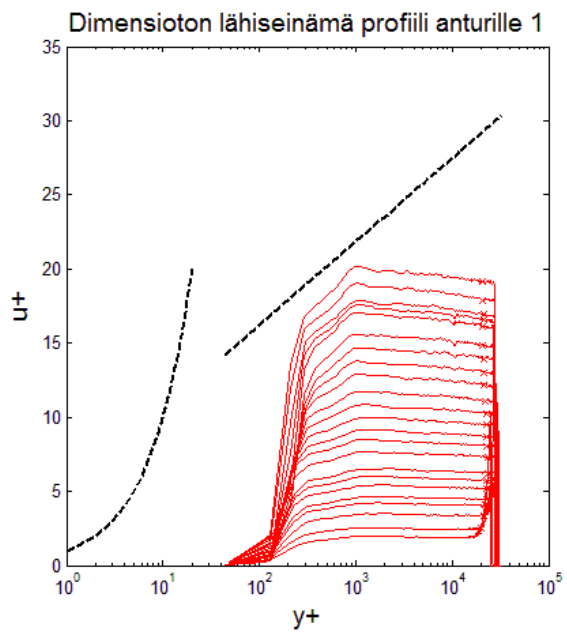
Kuva A.26: 200 mm putki, mänty 3,0 %



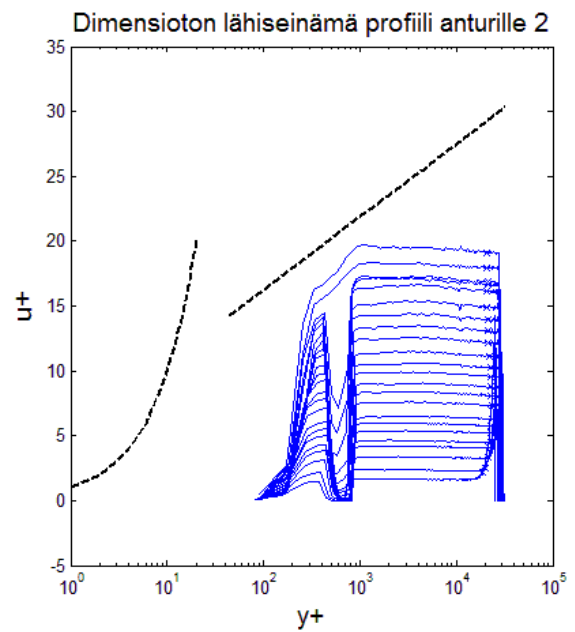
a)



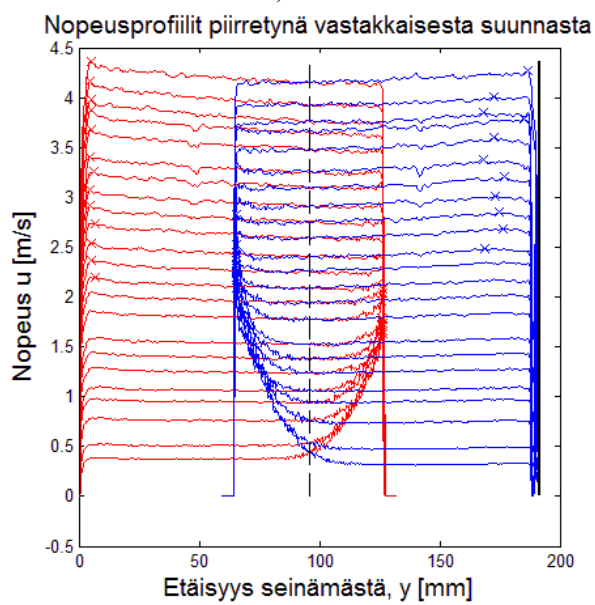
b)



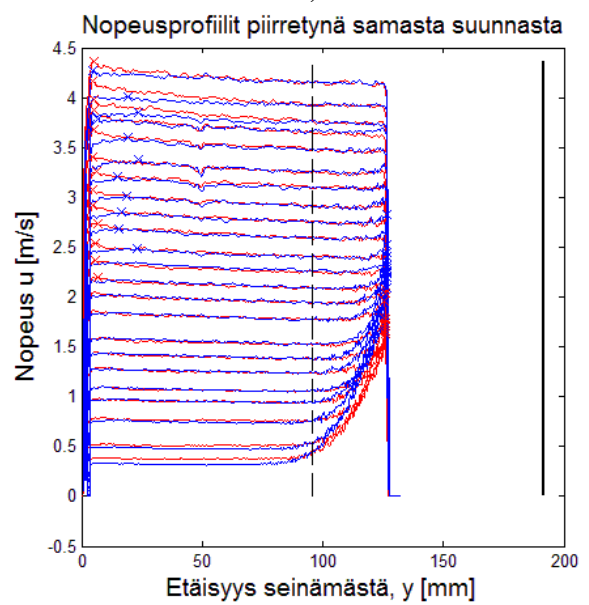
c)



d)

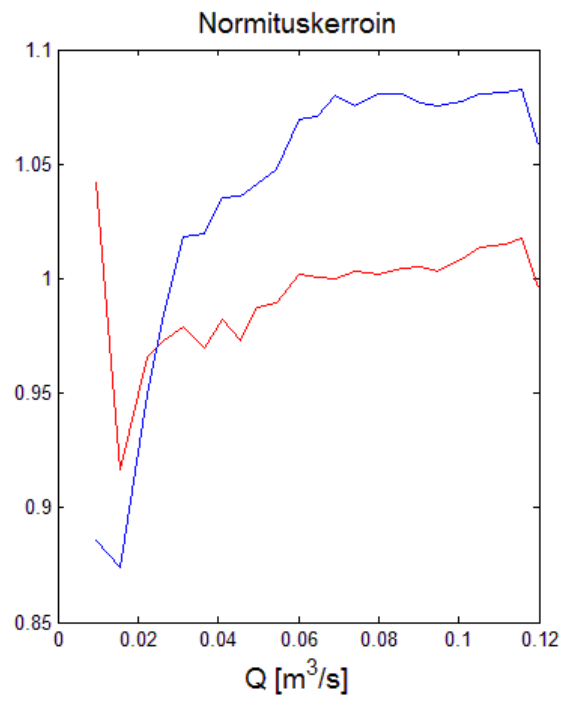
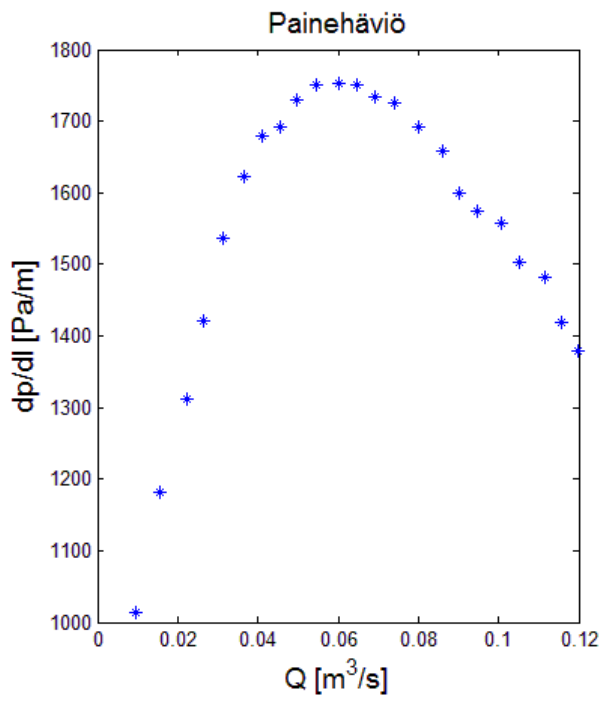


e)



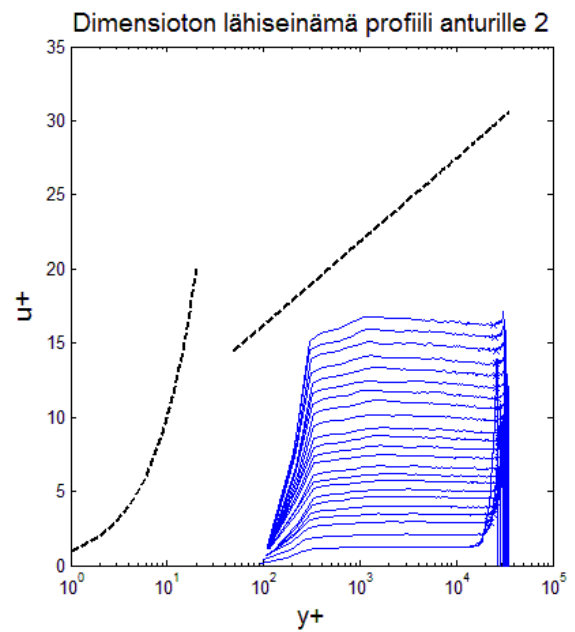
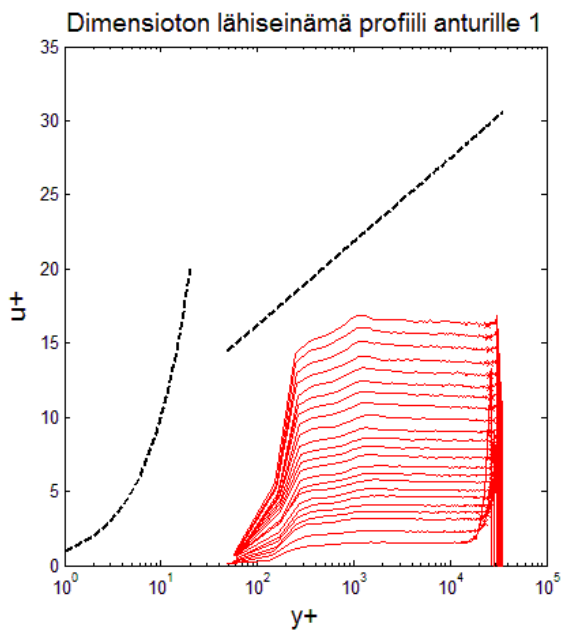
f)

Kuva A.27: 200 mm putki, mänty 3,5 %



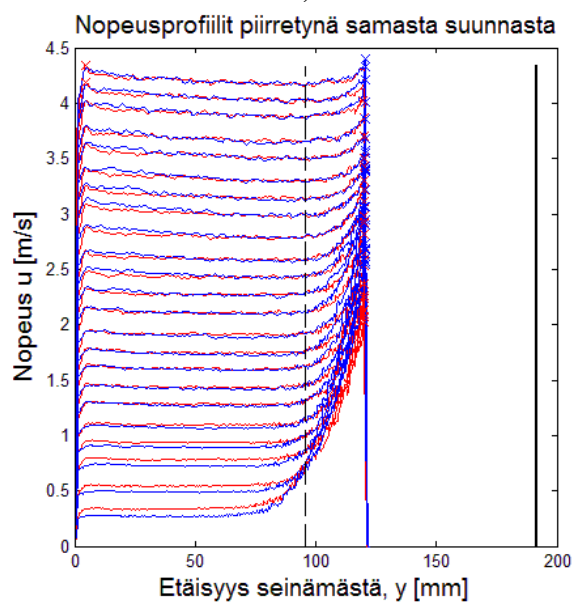
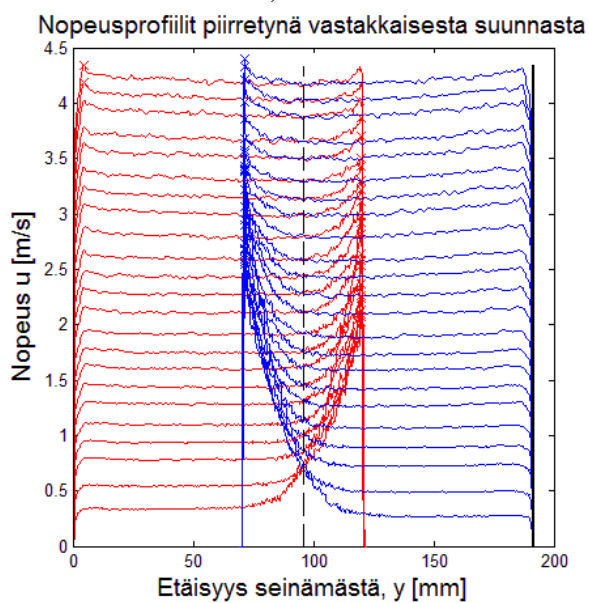
a)

b)



c)

d)



e)

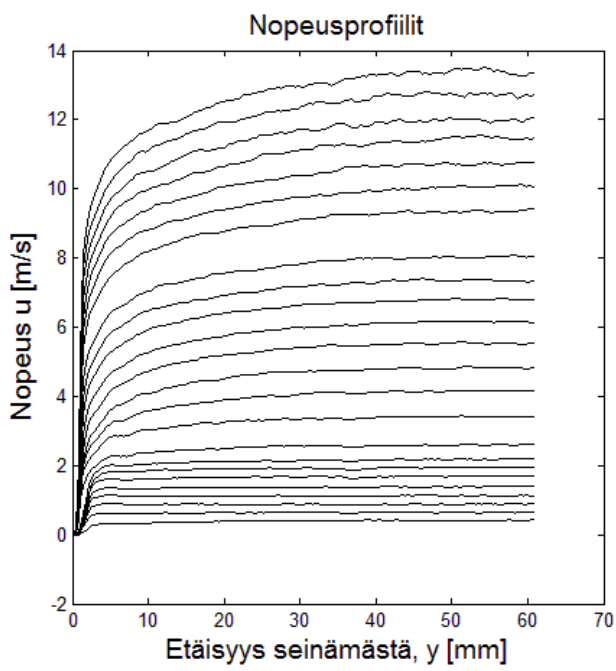
f)

Kuva A.28: 200 mm putki, mänty 4,0 %

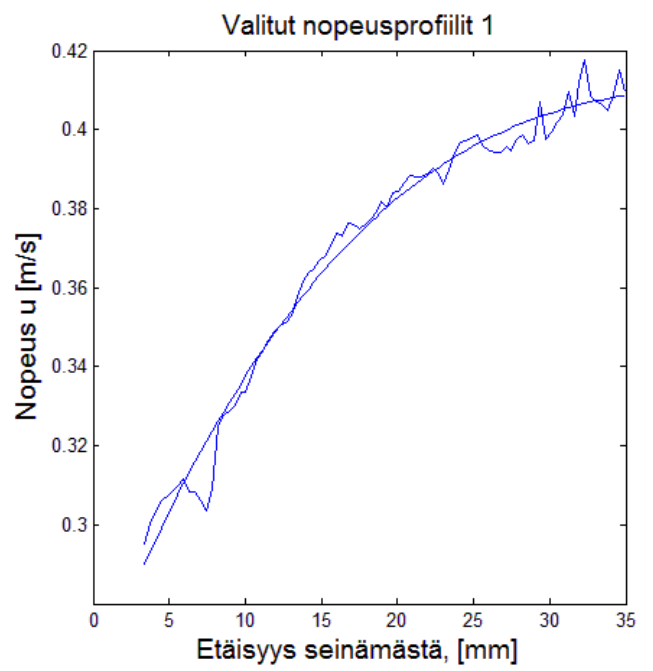
# LIITE B

Liitteessä B esitetty:

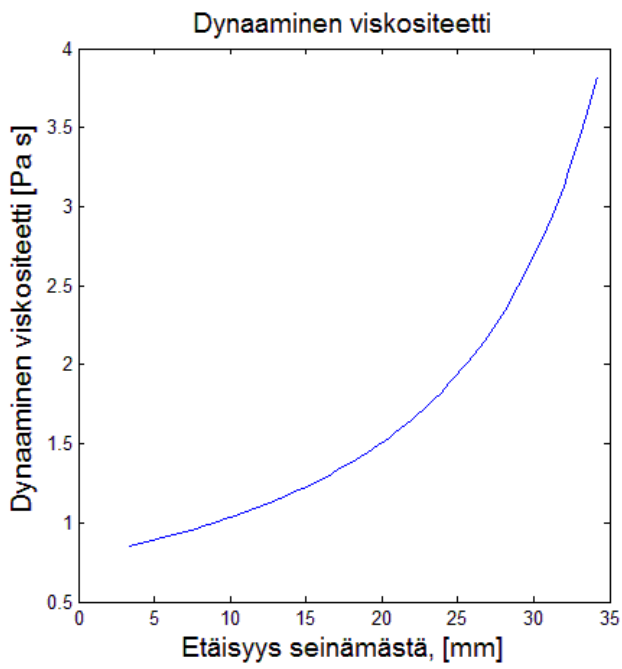
- a) Koko virtaamasarjan nopeusprofiilit.
- b) Viskositeettitarkasteluun valitut virtaamat alhaalta laskien. Kuvassa sileällä viivalla mittaustuloksiin sovitettu nopeusprofiili.
- c) Suspension viskositeetti putken säteen suhteen.
- d) Suspension viskositeetti leikkausnopeuden funktiona logaritmisilla muuttujilla.
- e) Mittaustuloksista piirretyt nopeusprofiilit ja materiaalilain avulla laskettu teoreettinen nopeusprofiili katkoviivalla



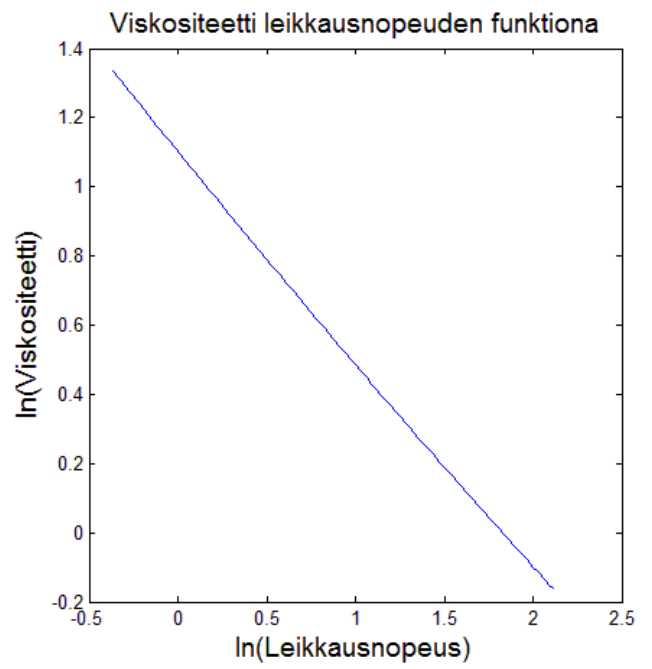
a)



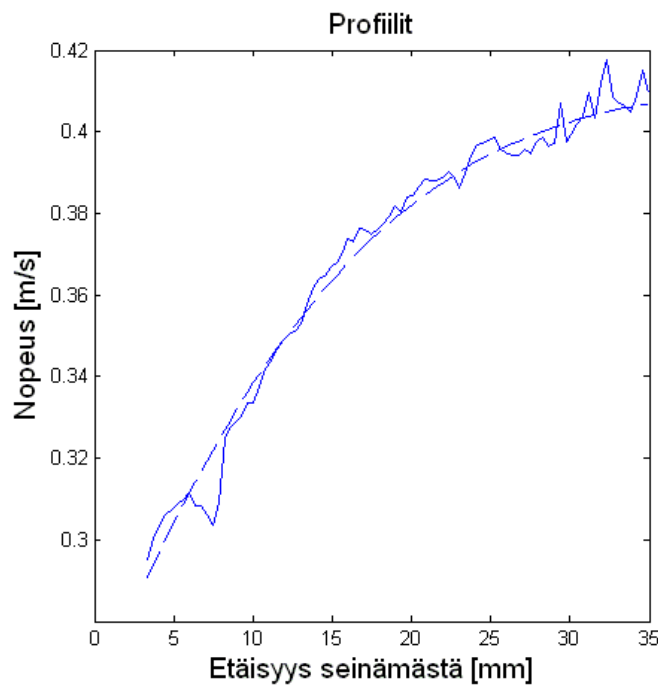
b)



c)

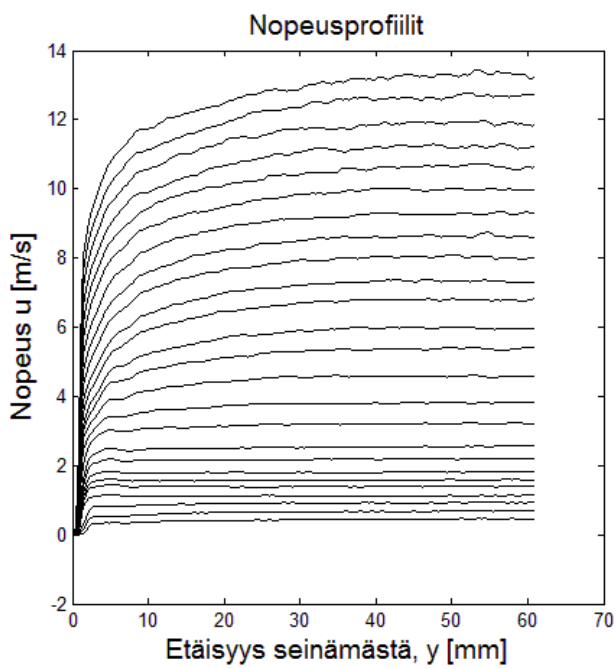


d)

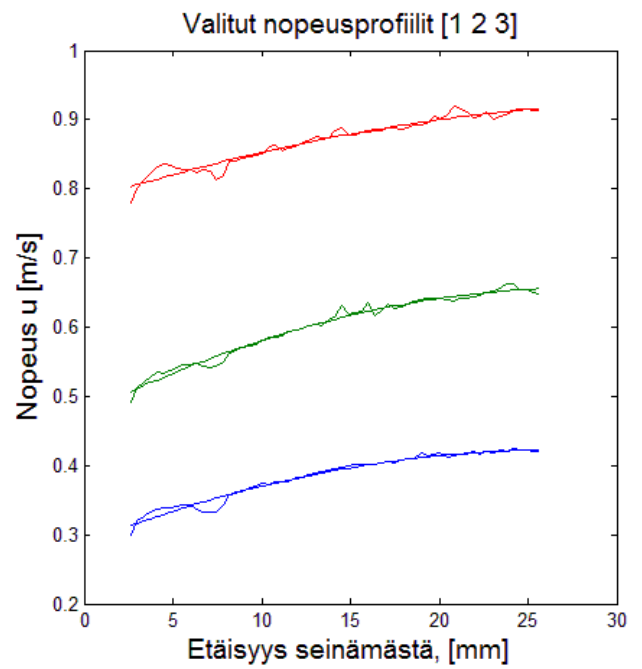


e)

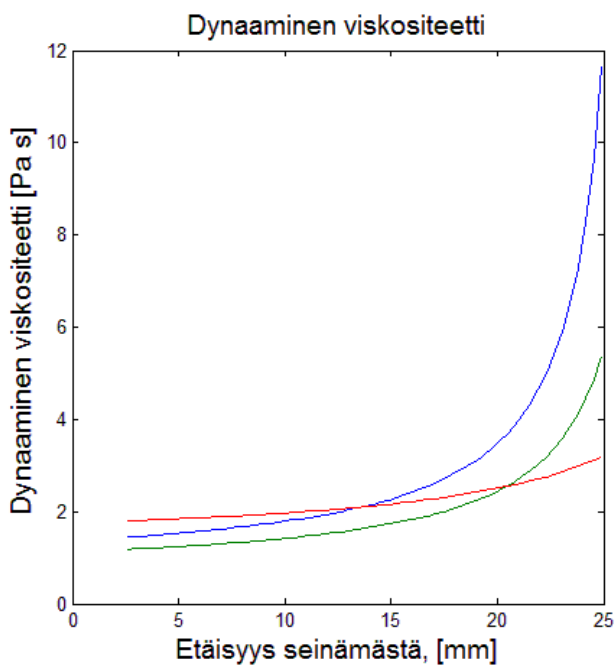
Kuva B.1: 100mm, koivu 1,5 %



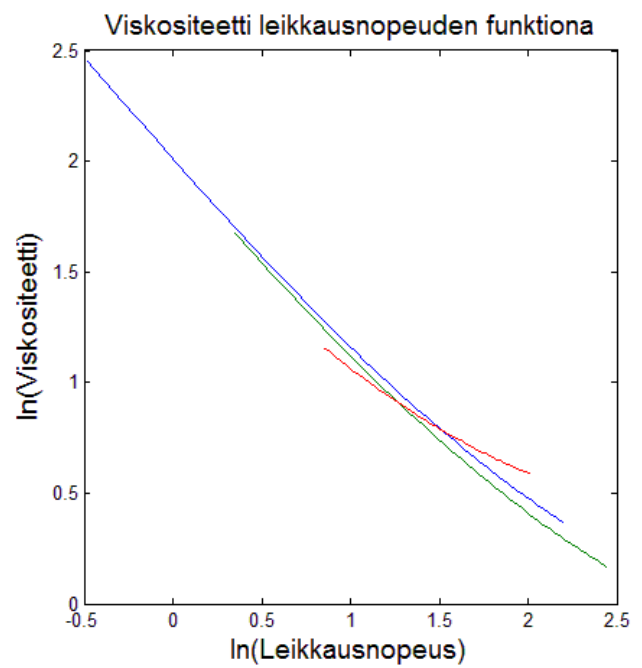
a)



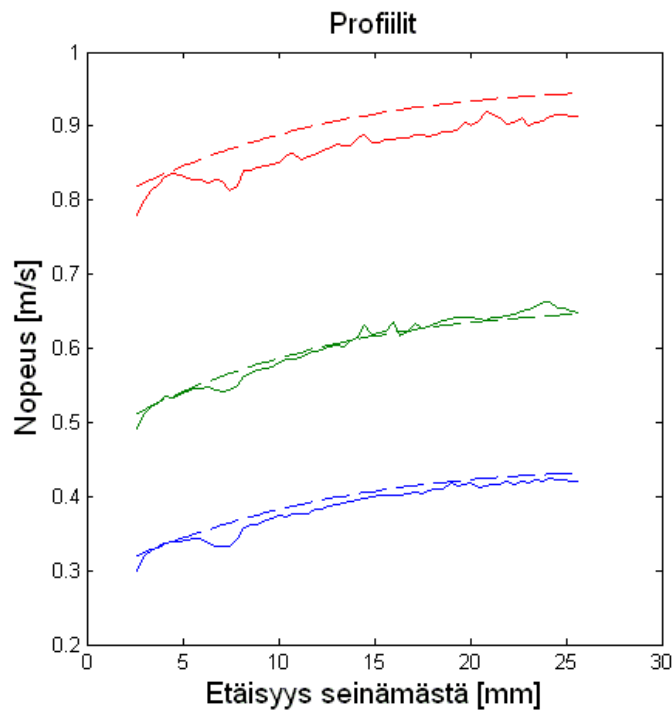
b)



c)

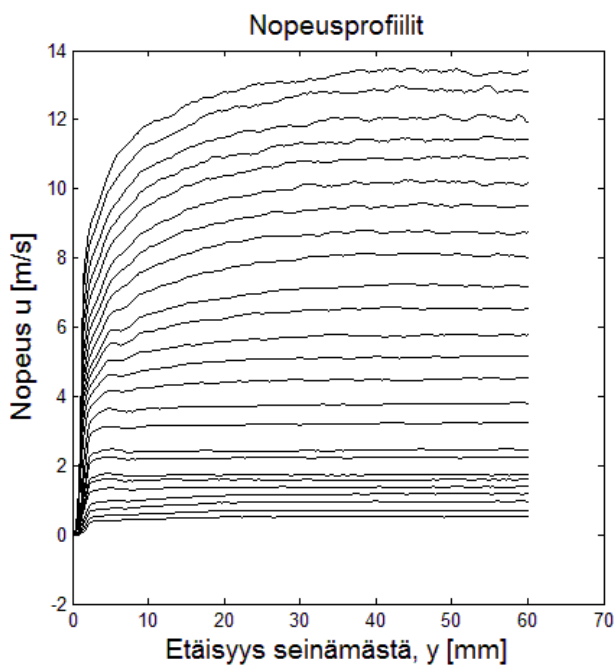


d)

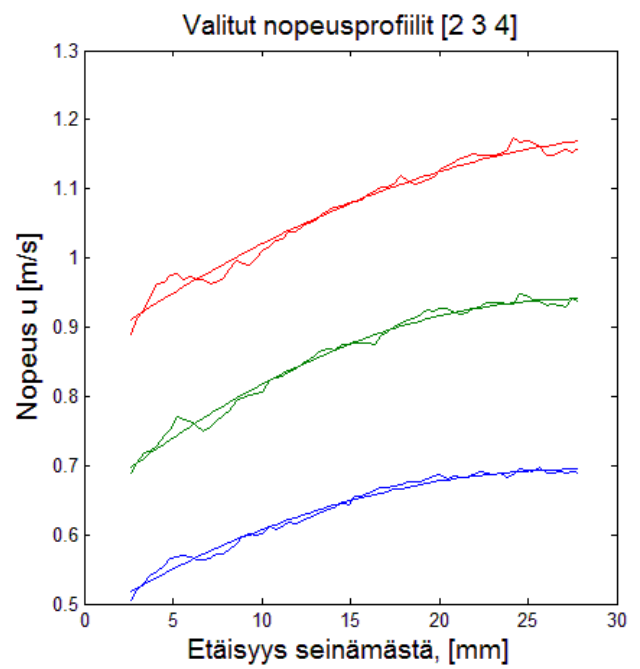


e)

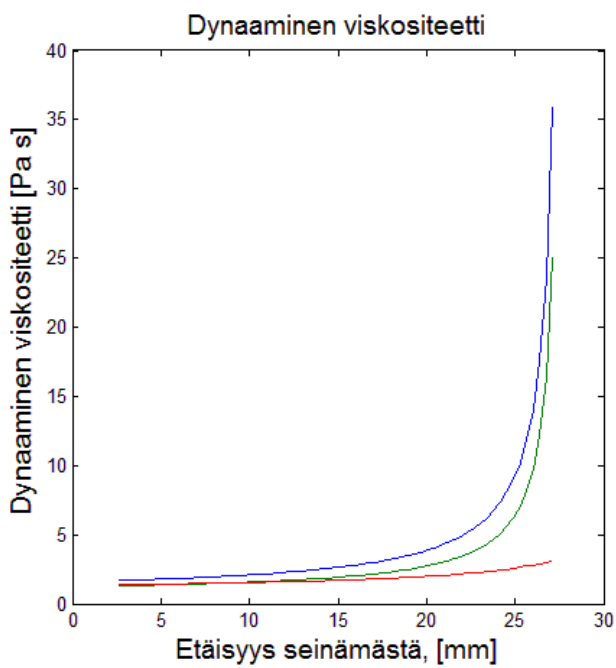
Kuva B.2: 100mm, koivu 2,0 %



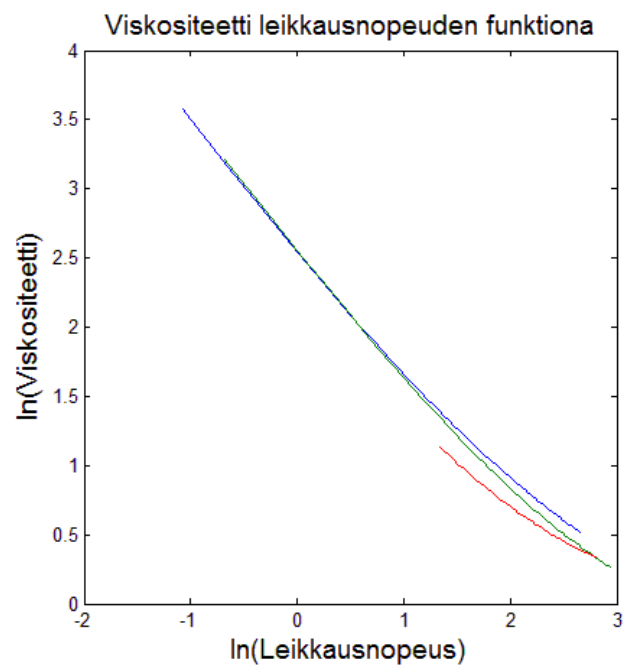
a)



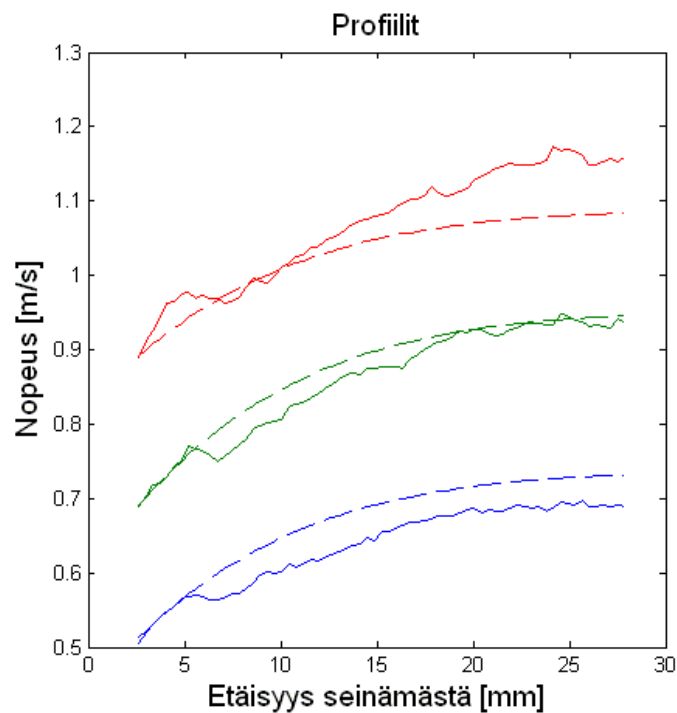
b)



c)



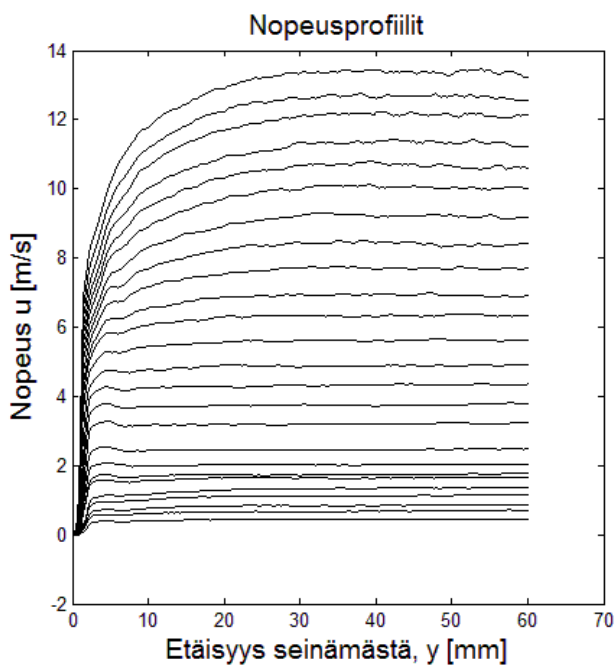
d)



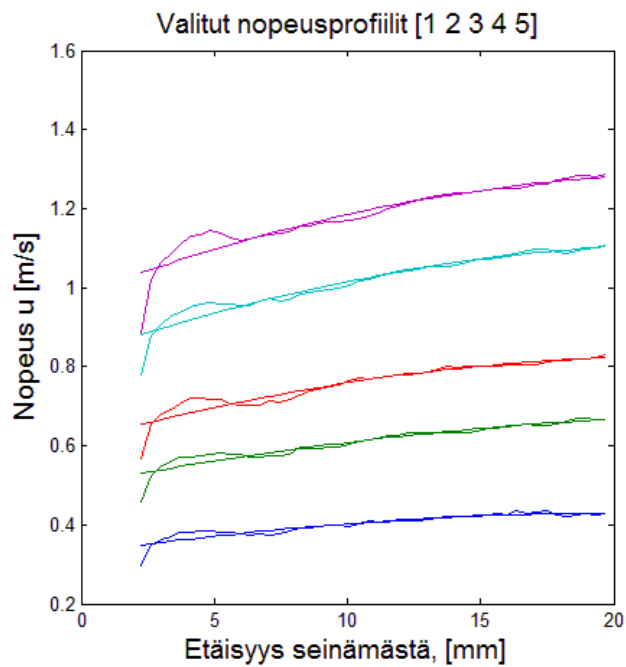
e)

Kuva B.3: 100mm, koivu 2,5 %

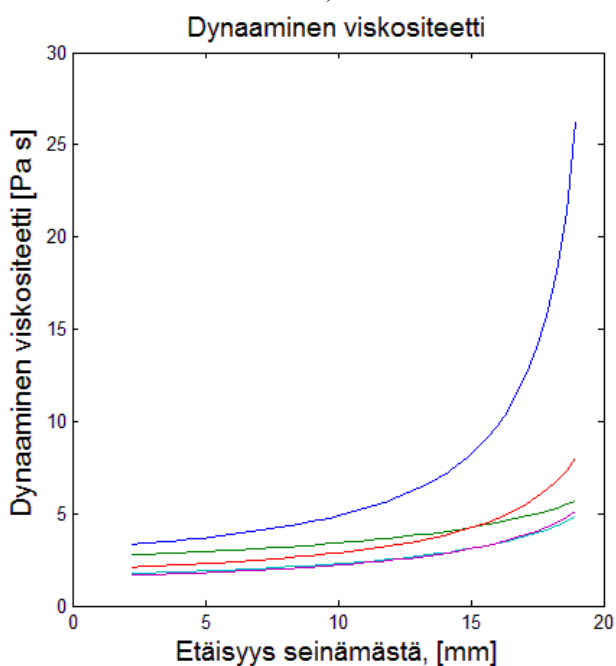




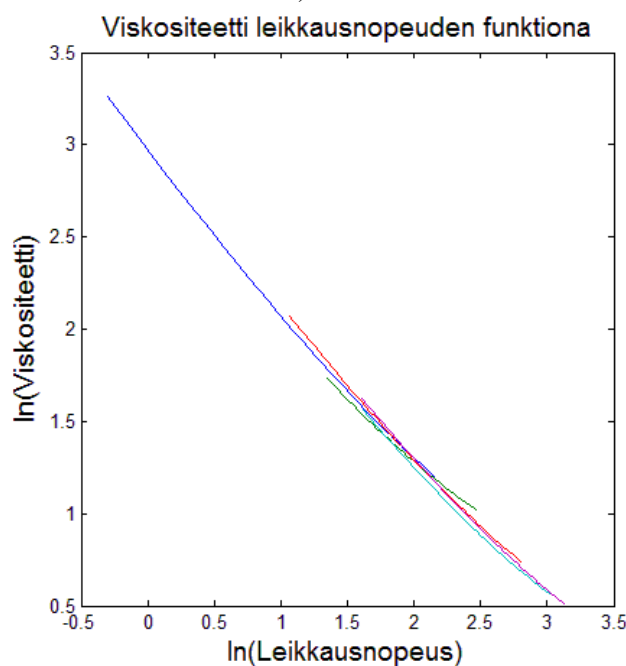
a)



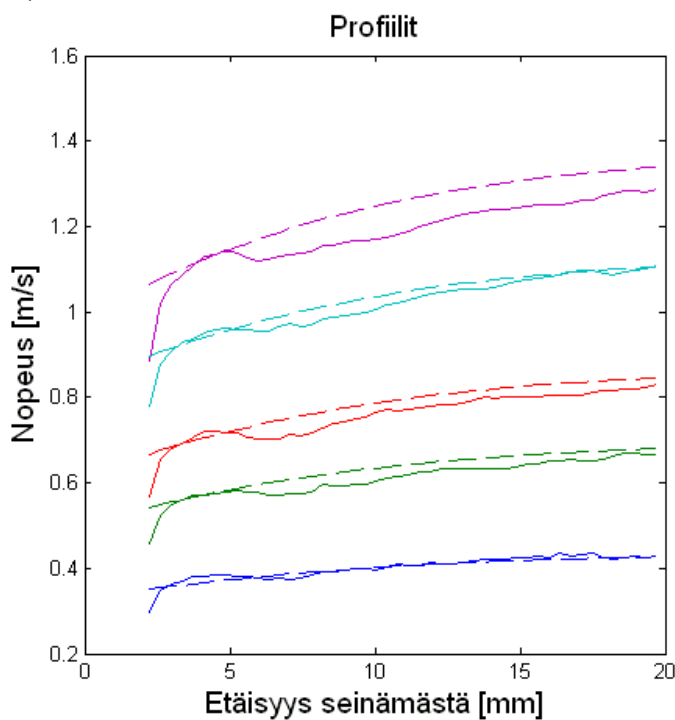
b)



c)

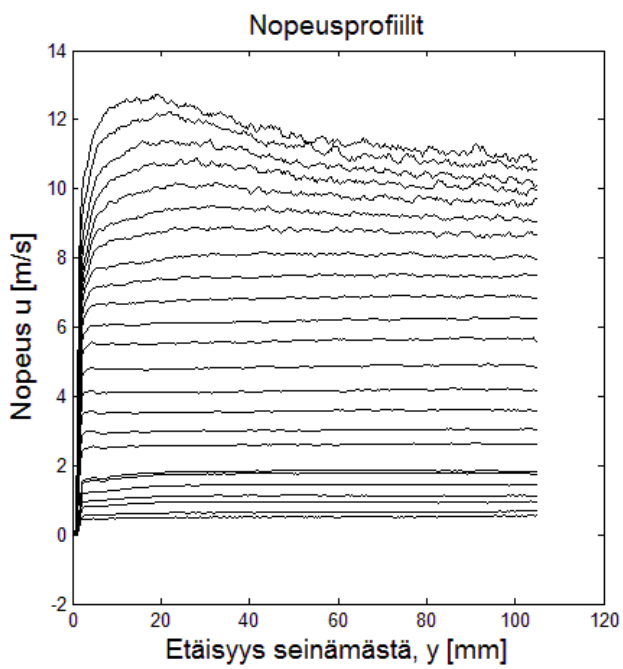


d)

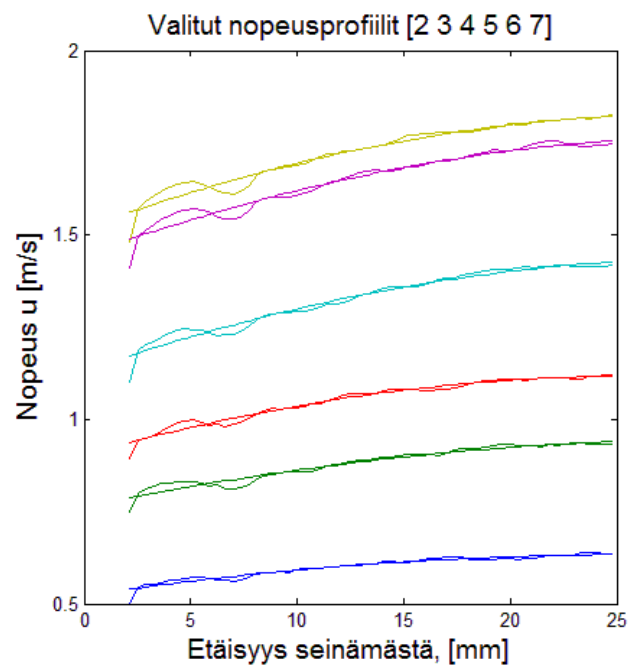


e)

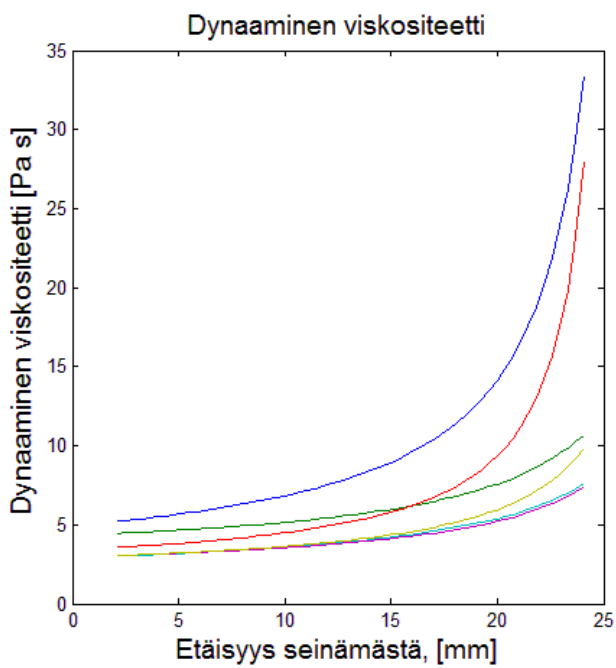
Kuva B.4: 100mm, koivu 3,0 %



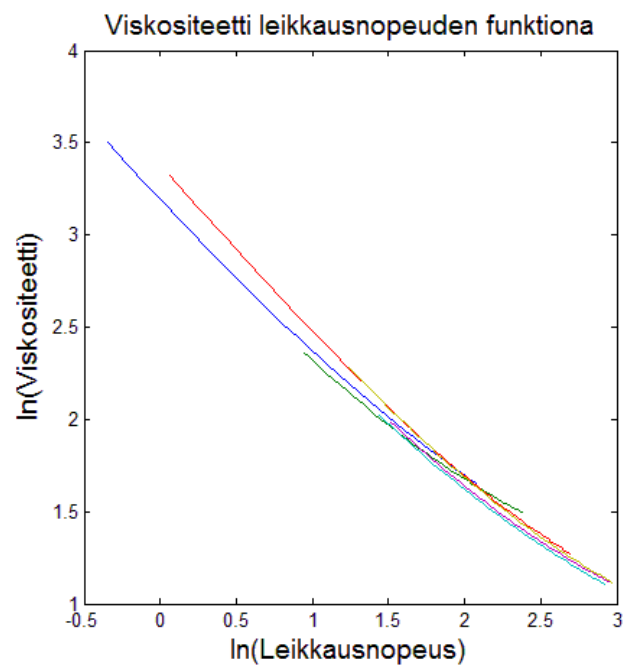
a)



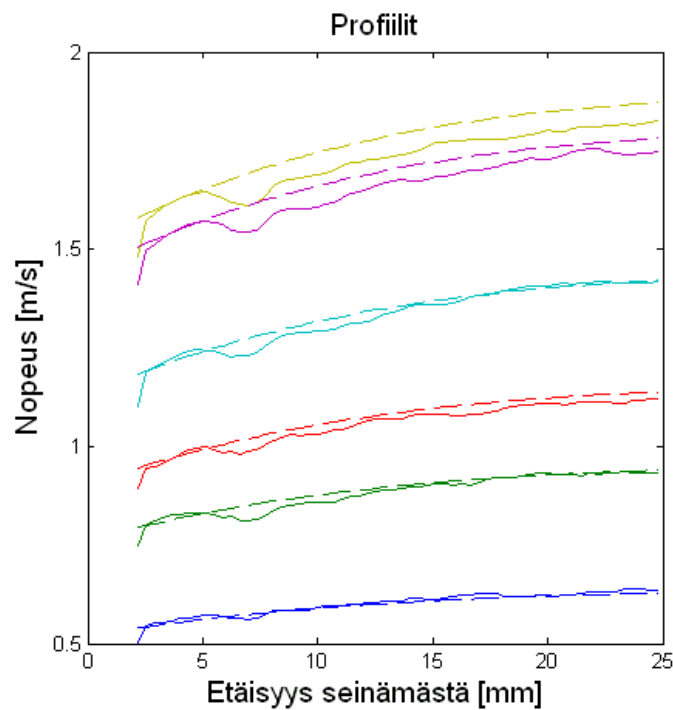
b)



c)

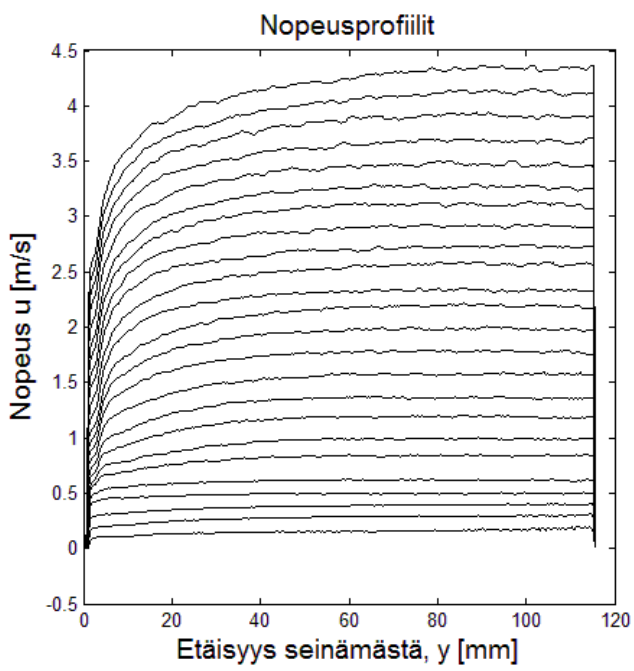


d)

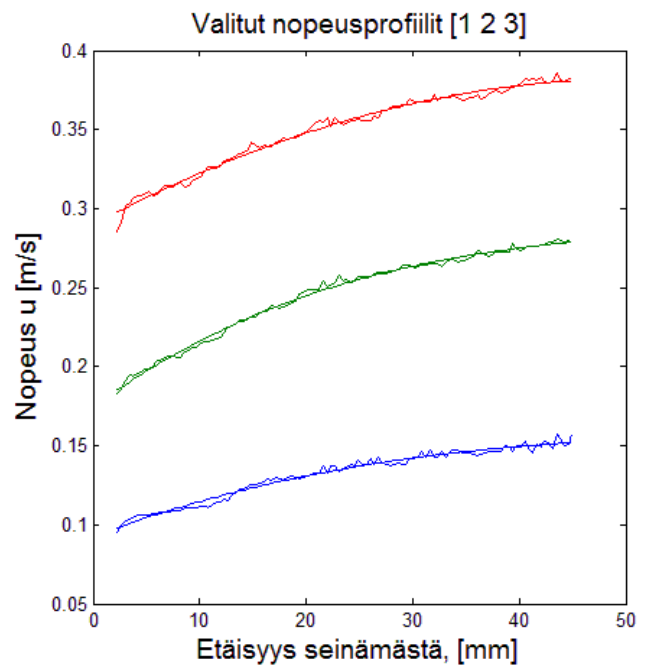


e)

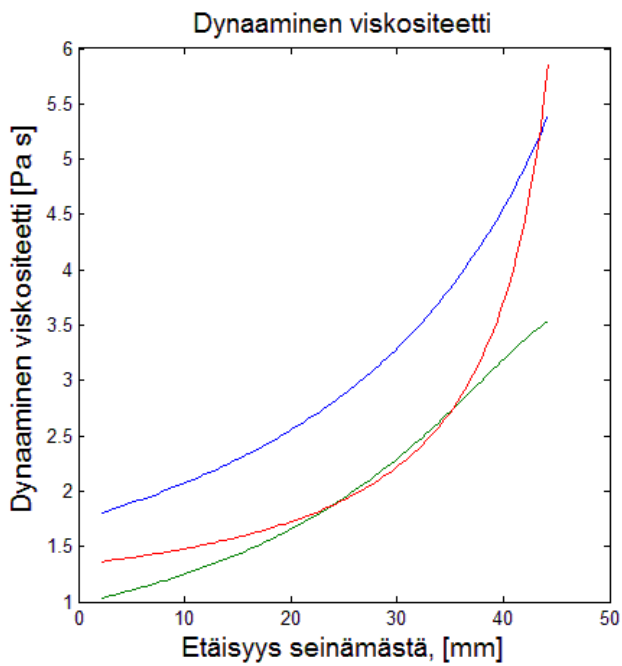
Kuva B.5: 100mm, koivu 3,5 %



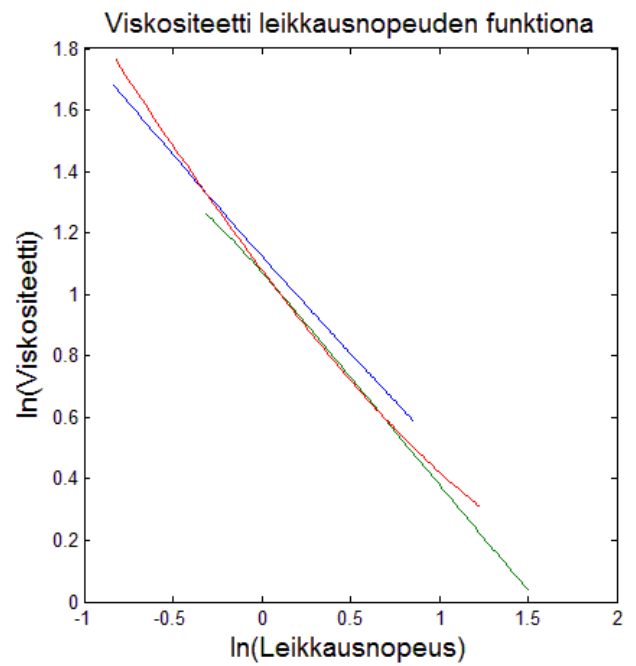
a)



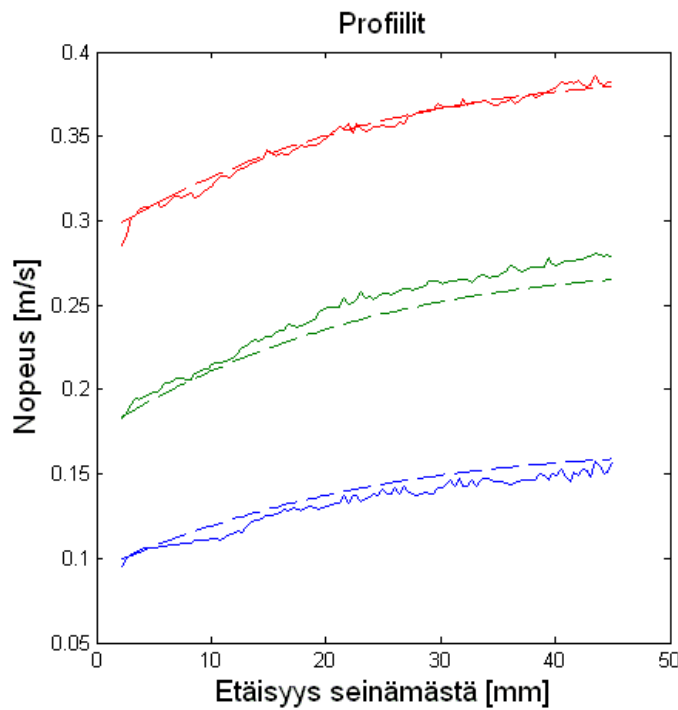
b)



c)

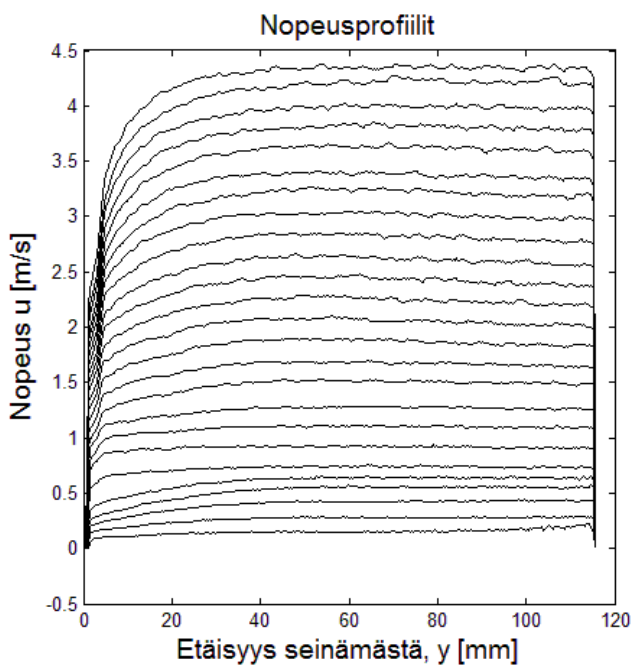


d)

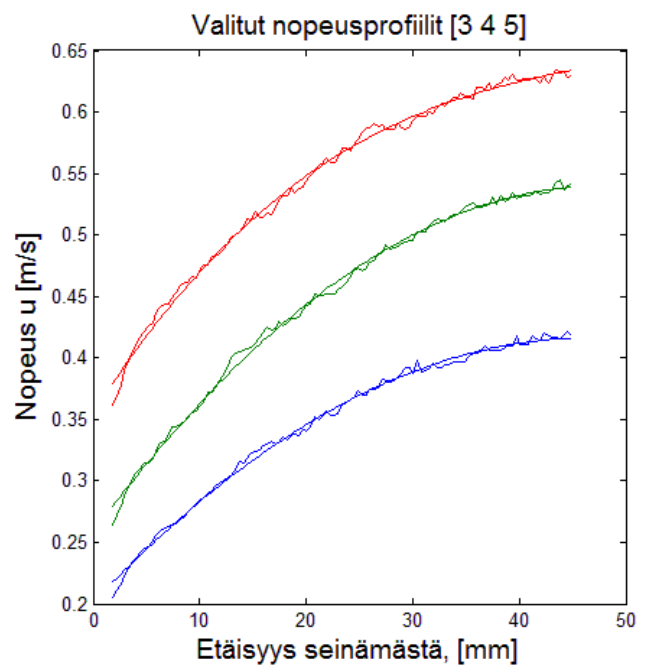


e)

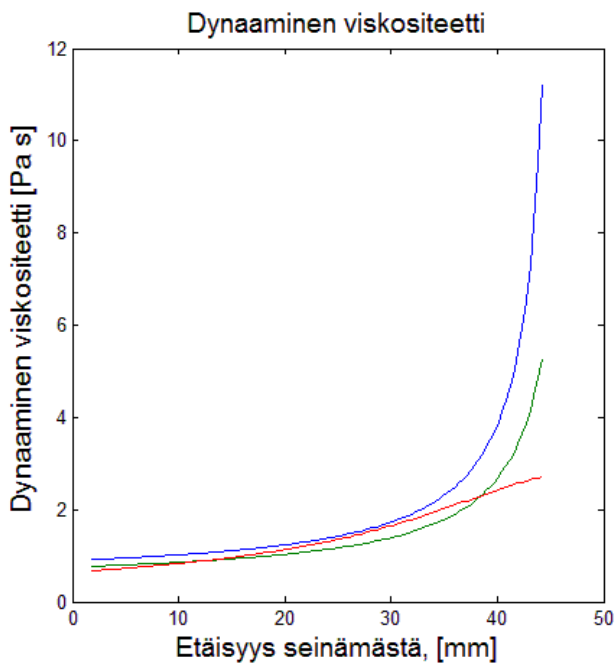
Kuva B.6: 200mm, koivu 1,0 %



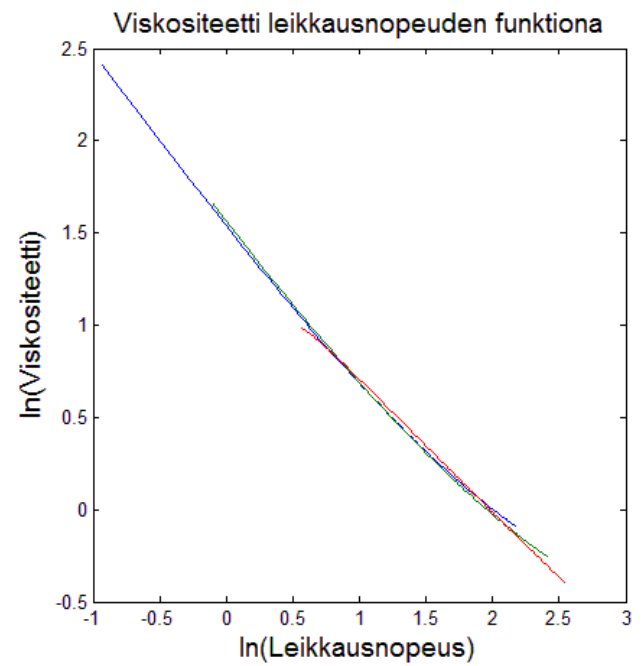
a)



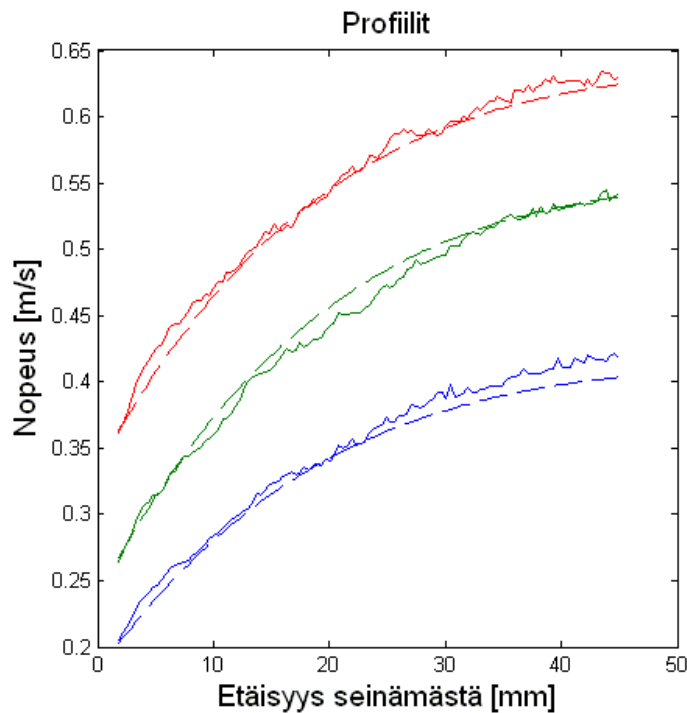
b)



c)

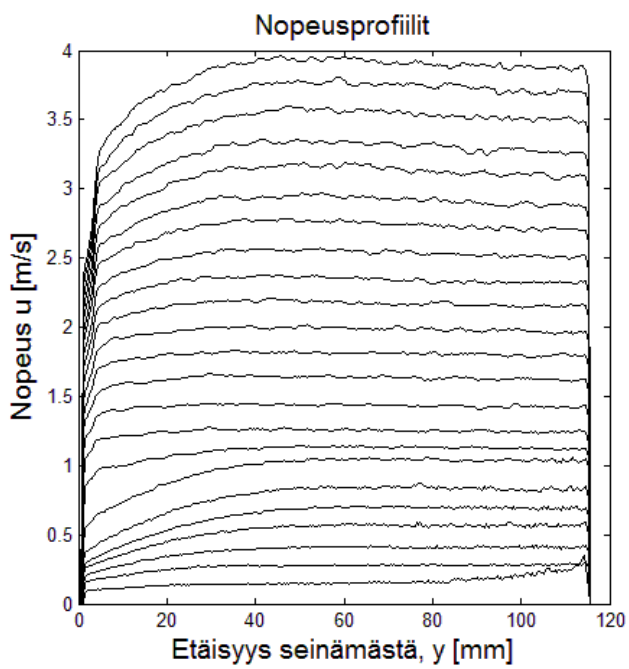


d)

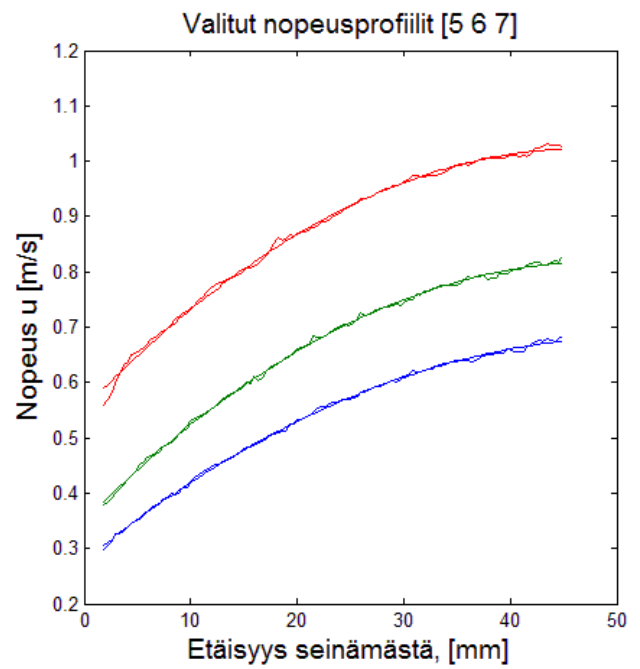


e)

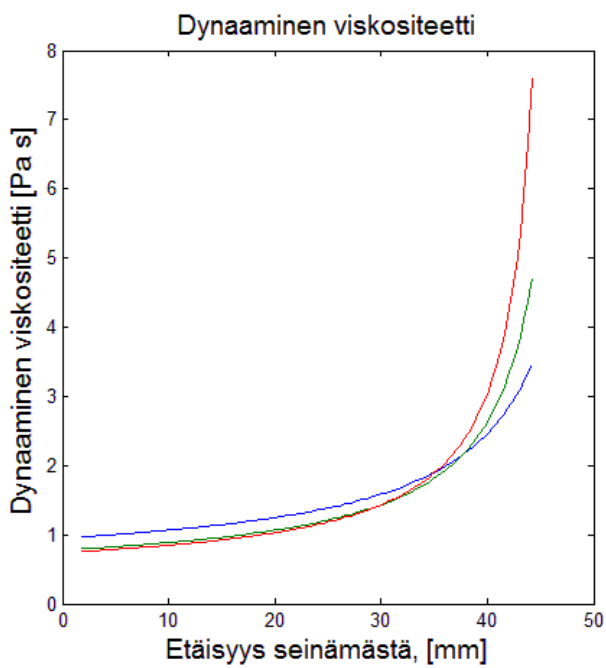
Kuva B.7: 200mm, koivu 1,5 %



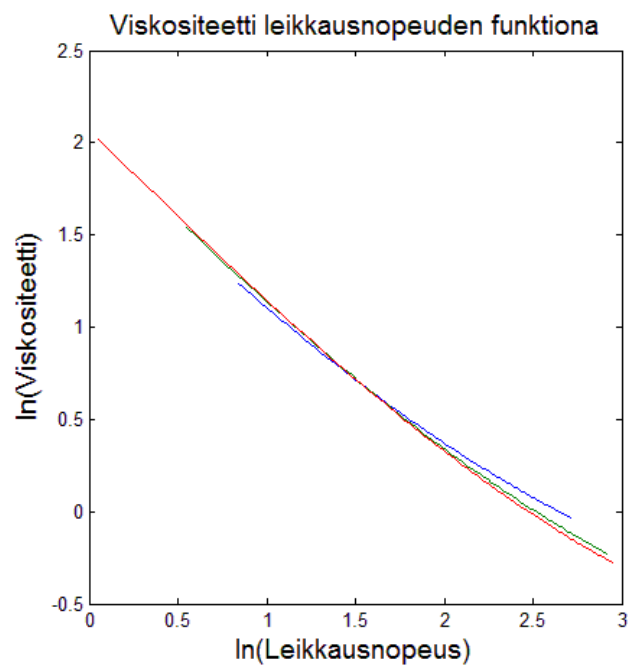
a)



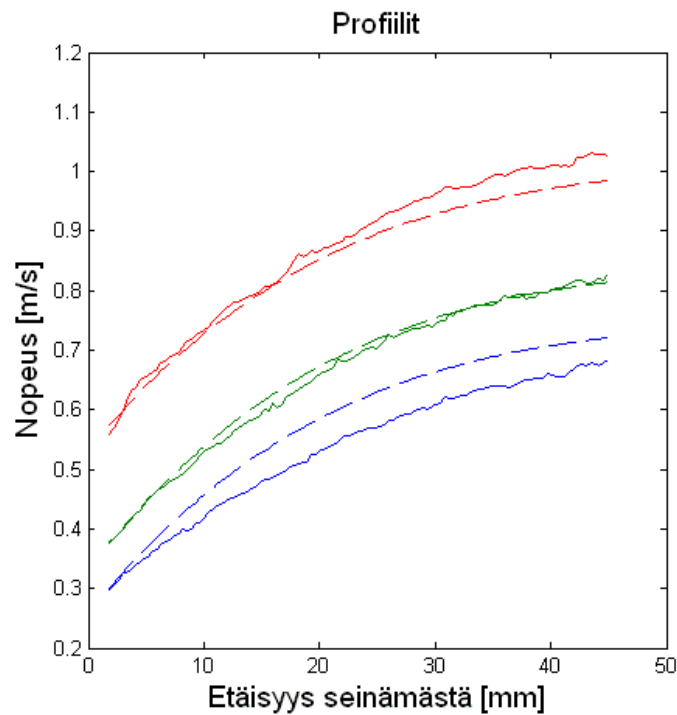
b)



c)

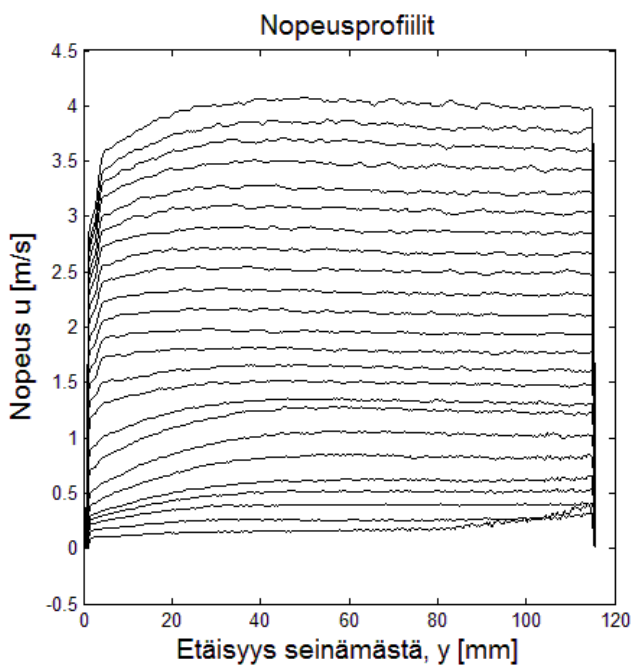


d)

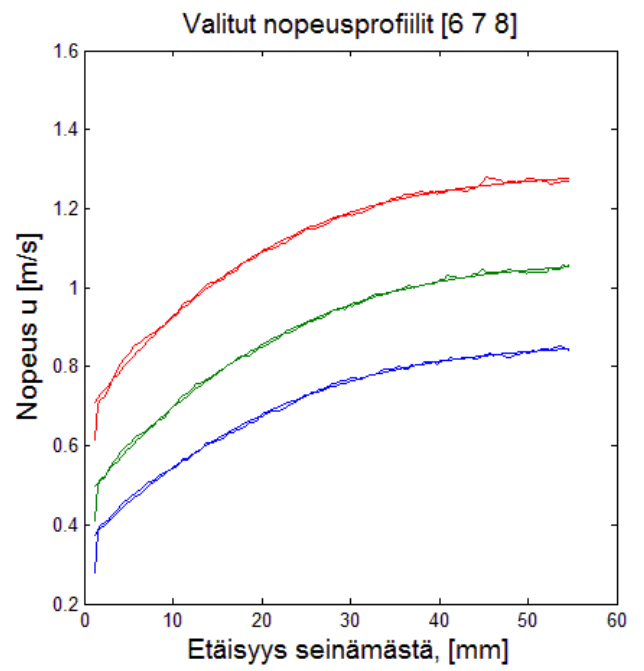


e)

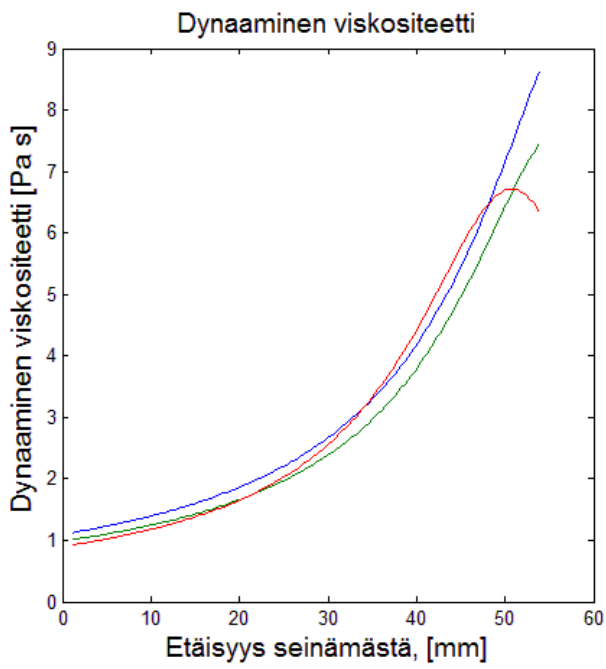
Kuva B.8: 200mm, koivu 2,0 %



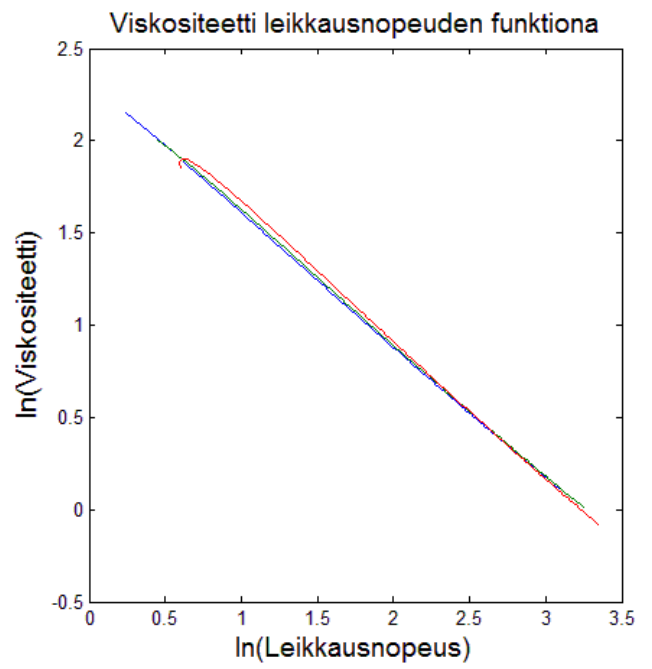
a)



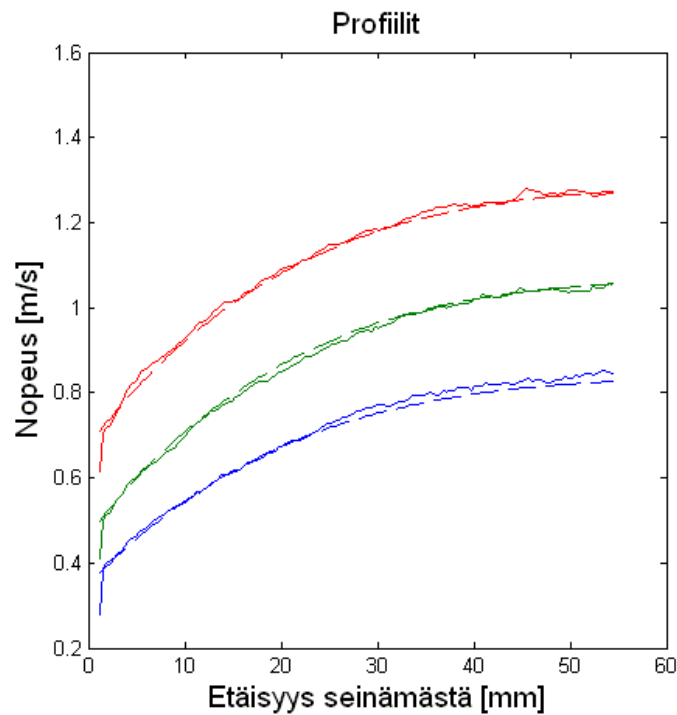
b)



c)

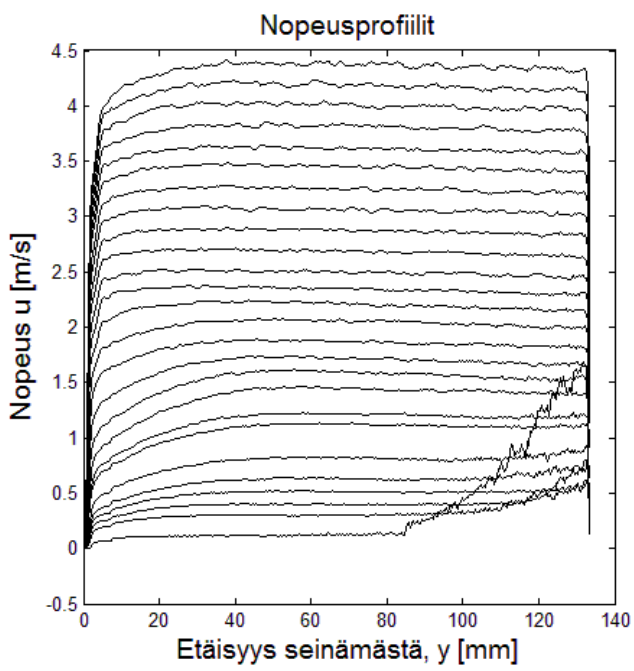


d)

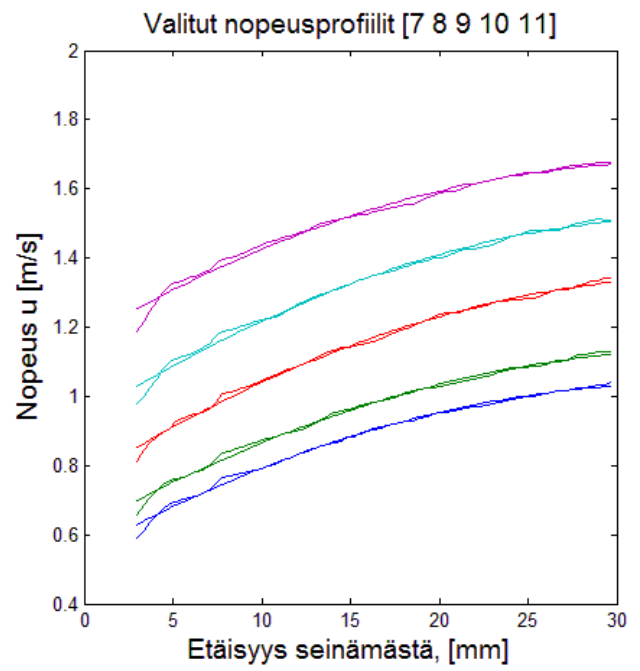


e)

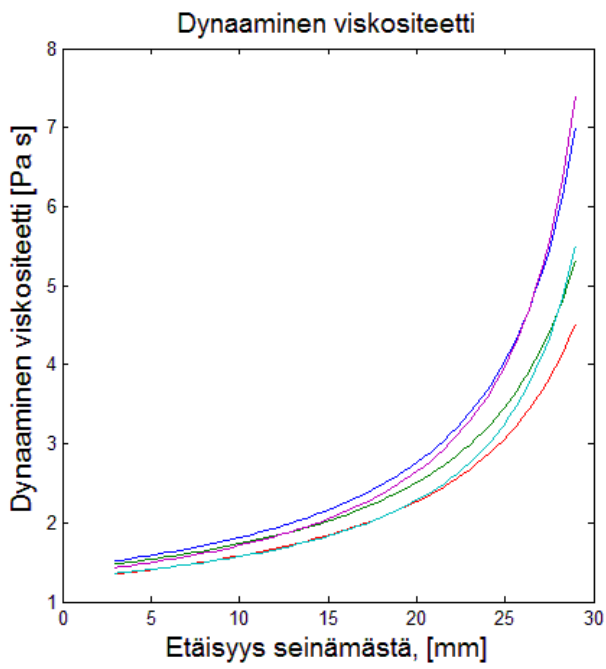
Kuva B.9: 200mm, koivu 2,5 %



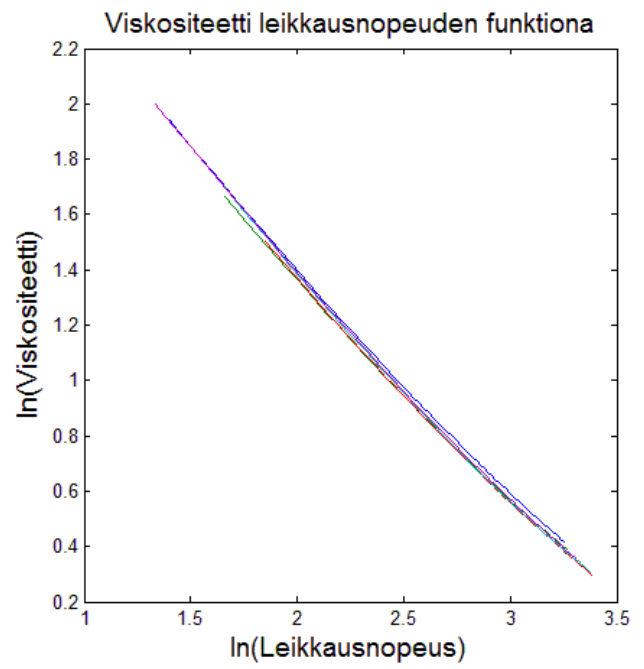
a)



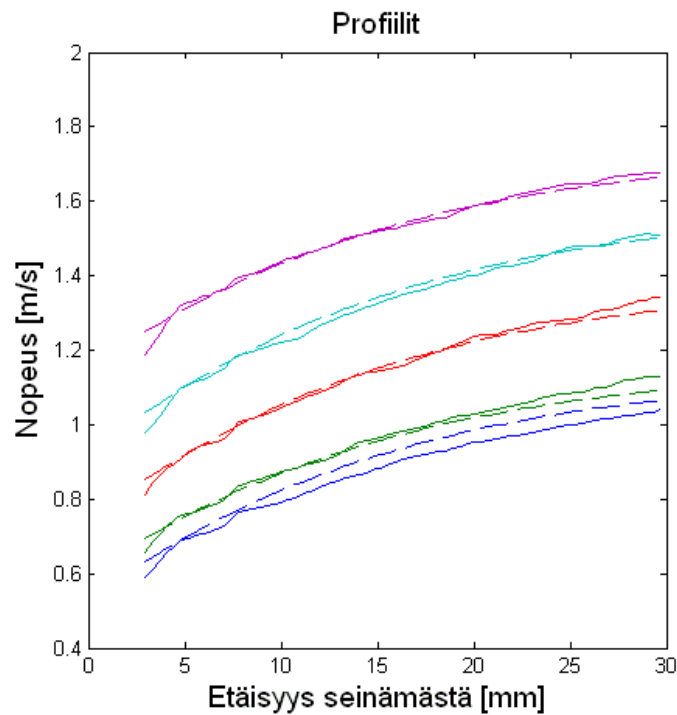
b)



c)

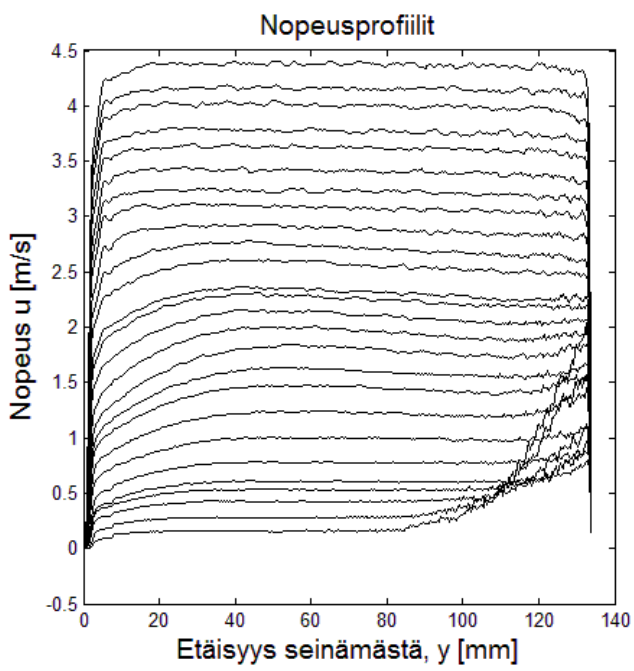


d)

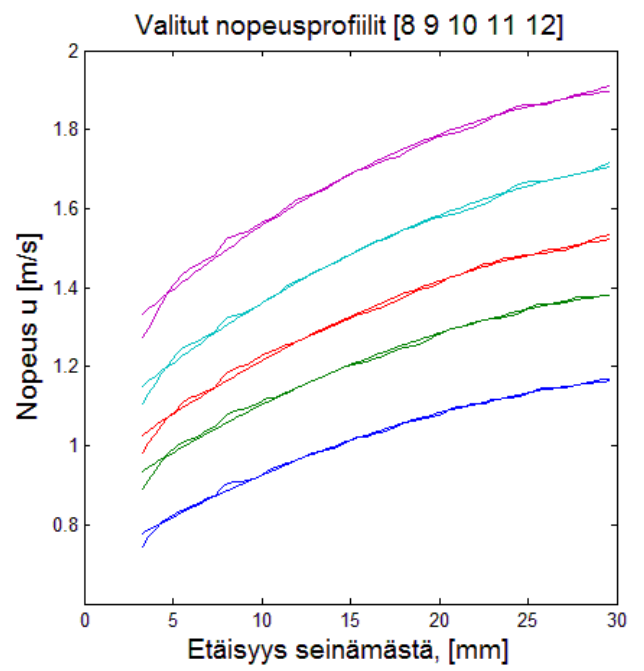


e)

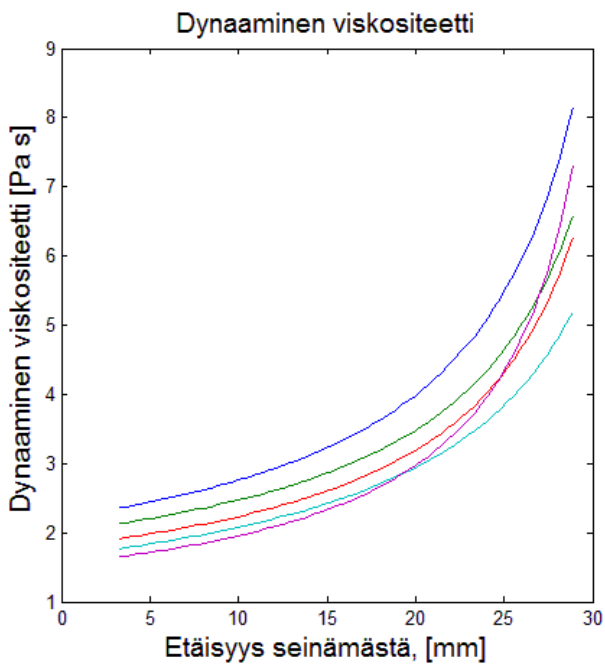
Kuva B.10: 200mm, koivu 3,0 %



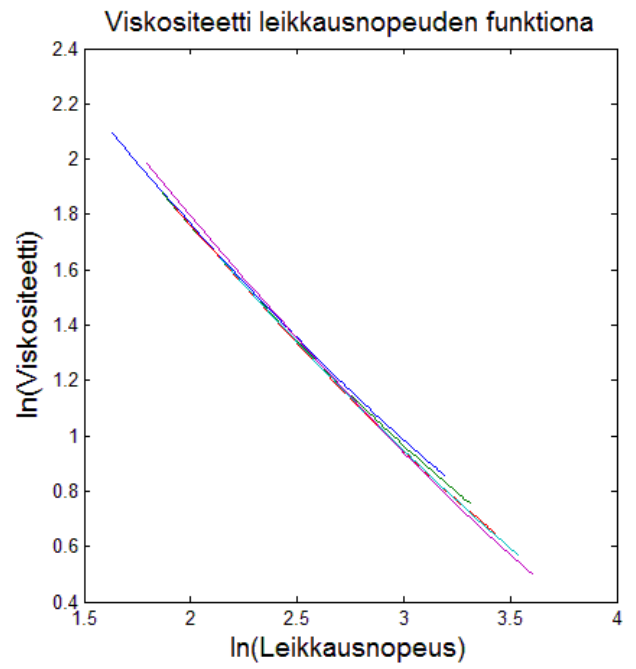
a)



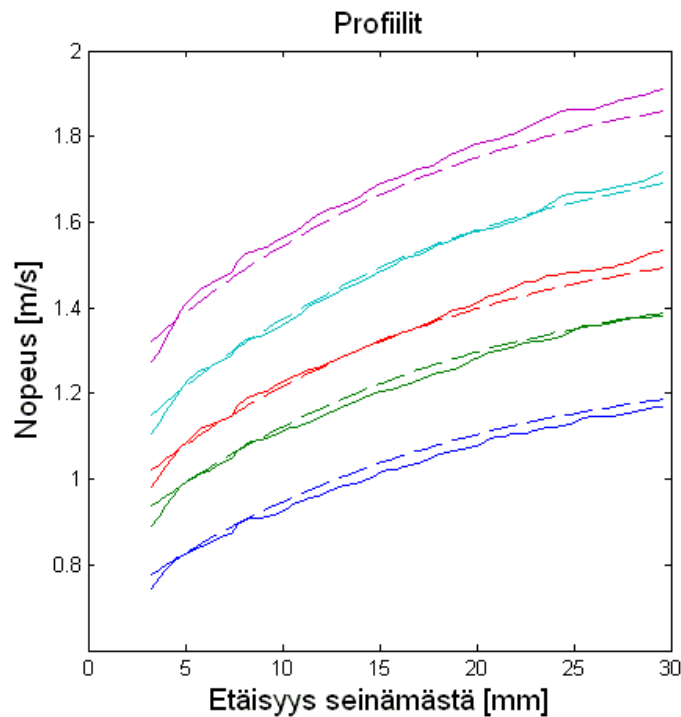
b)



c)



d)



e)

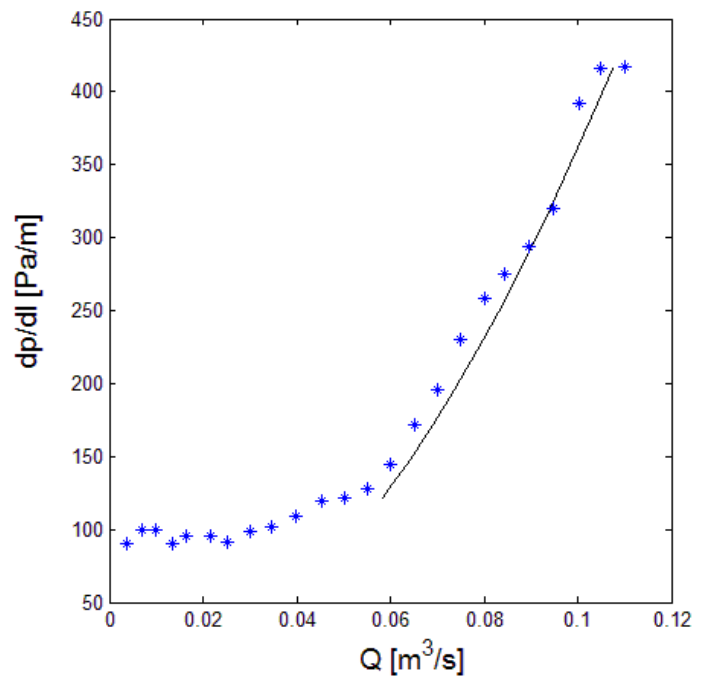
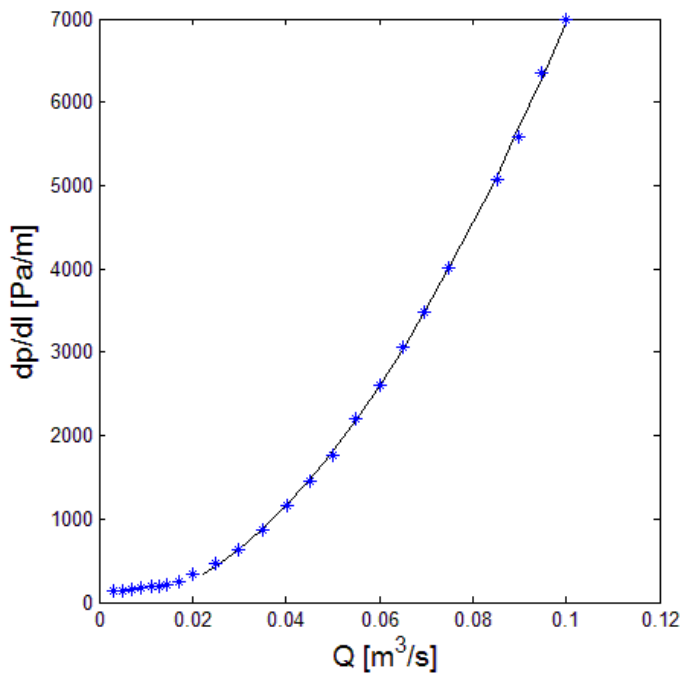
Kuva B.11: 200mm, koivu 3,5 %



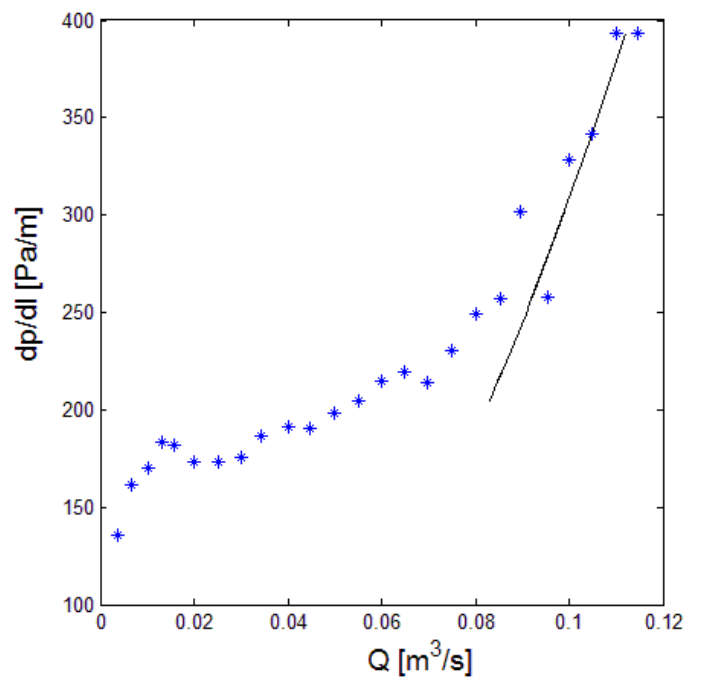
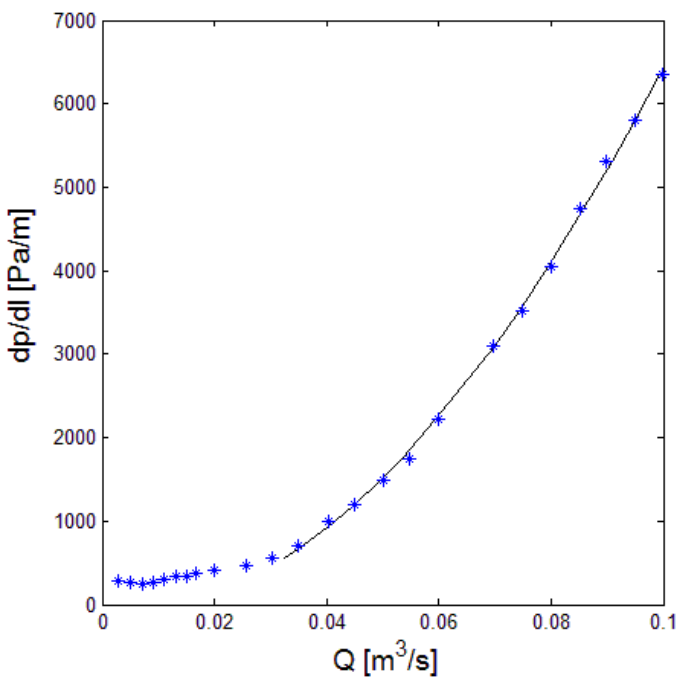
## LIITE C

Liitteessä C esitetty:

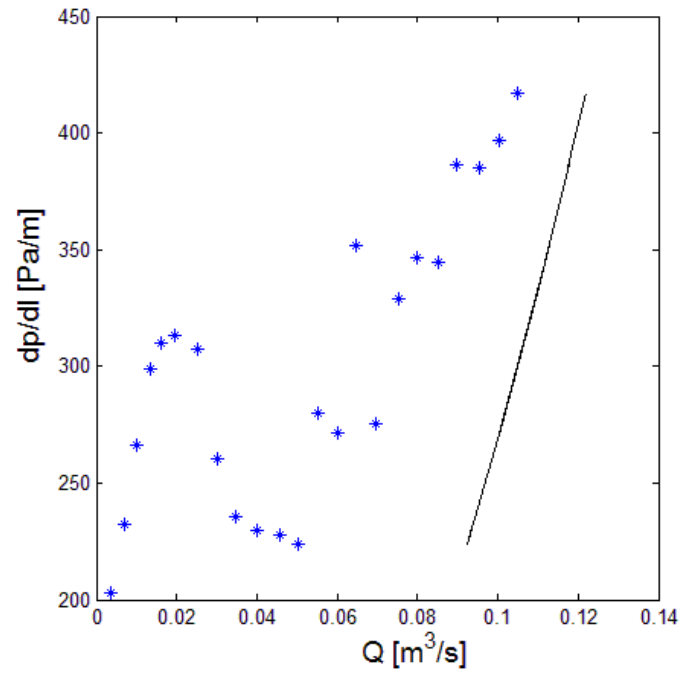
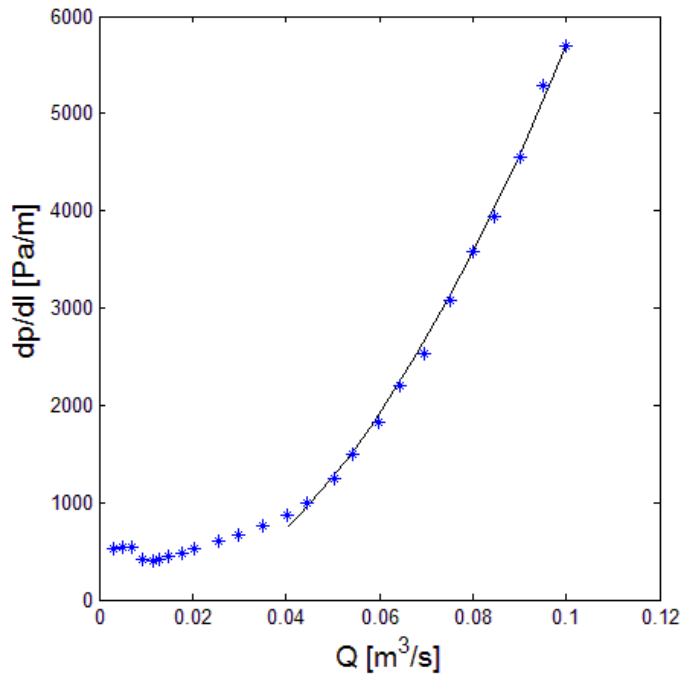
- a) *100 mm:n* putken häviökäyrään sovitettu korrelaatiofunktio.
- b) Sovitetuilla parametreilla piirretty häviökäyrä *200 mm:n* putkelle.



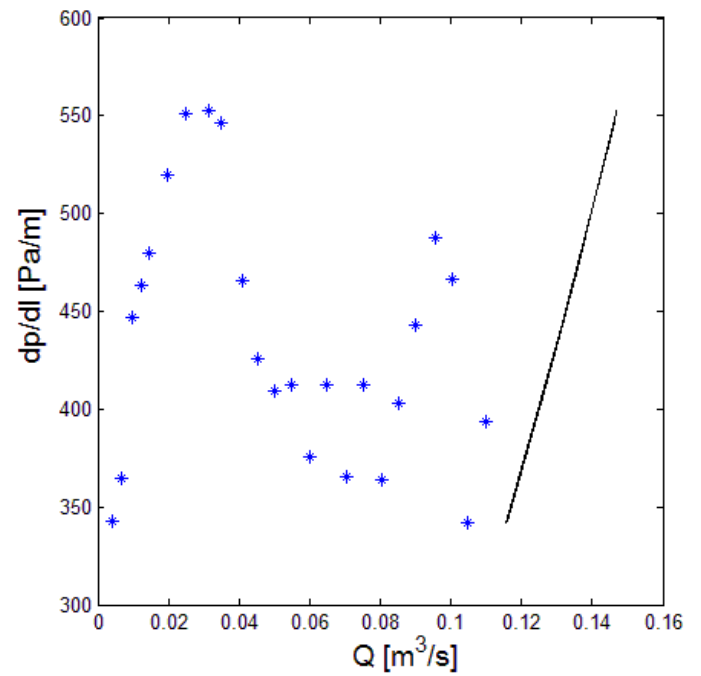
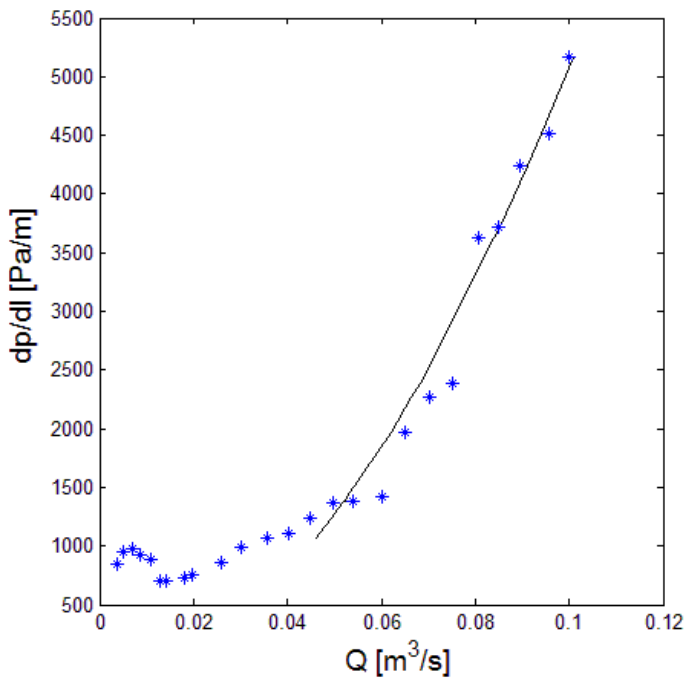
*Kuva C.1: Koivu 1,0 %*



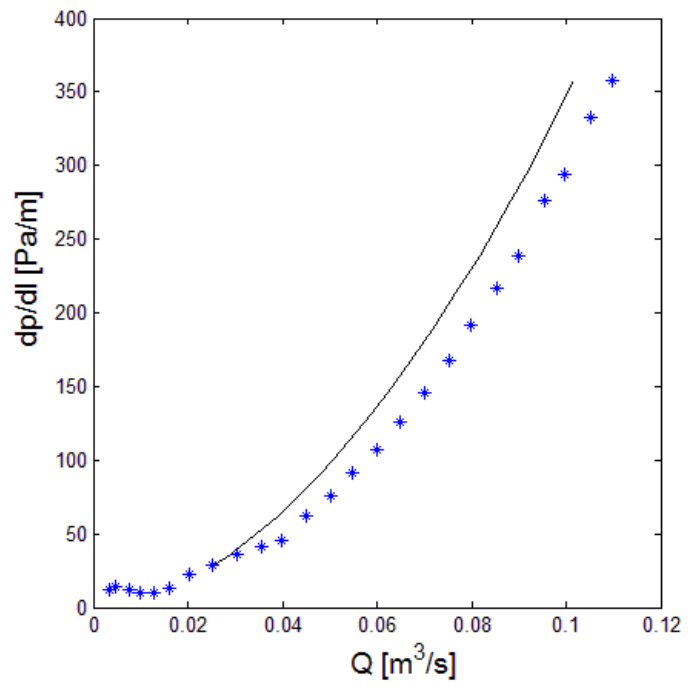
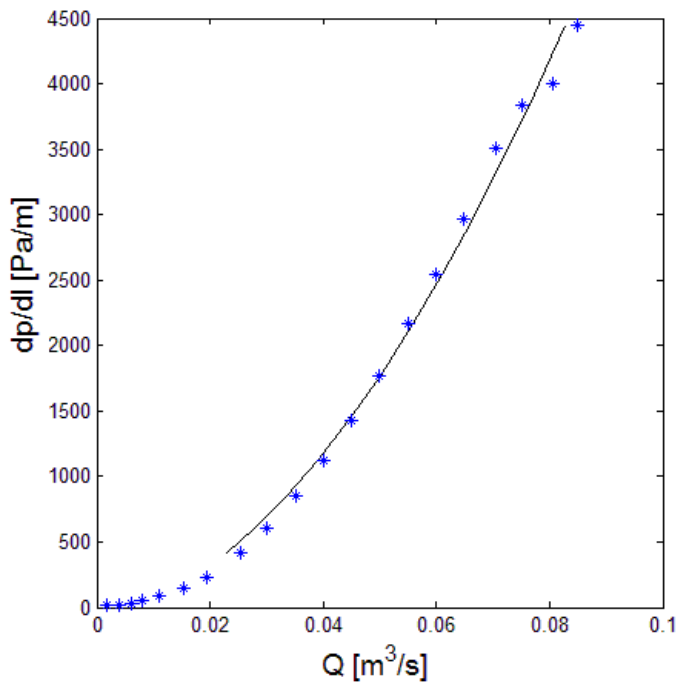
*Kuva C.2: Koivu 1,5 %*



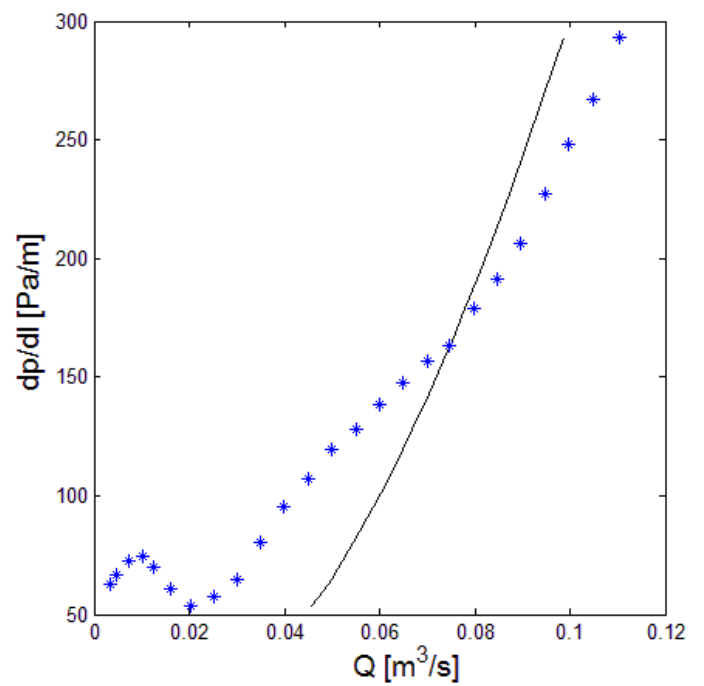
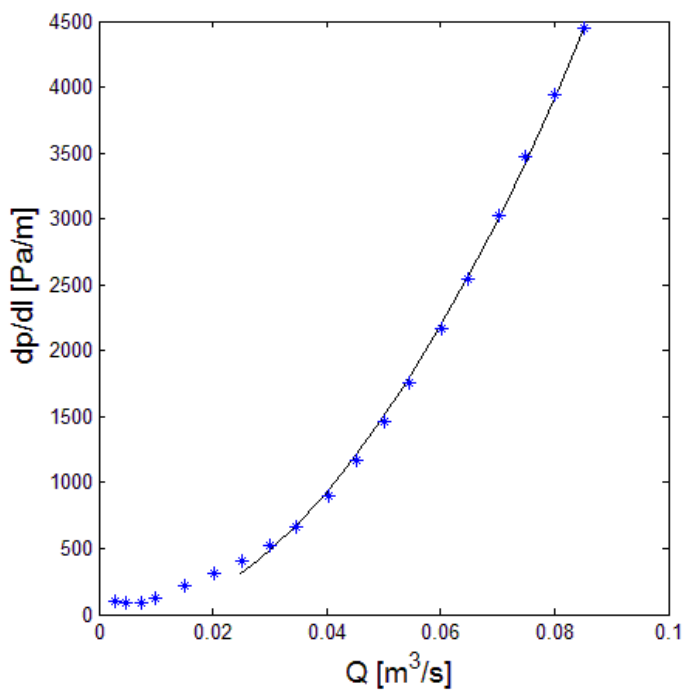
*Kuva C.3: Koivu 2,0 %*



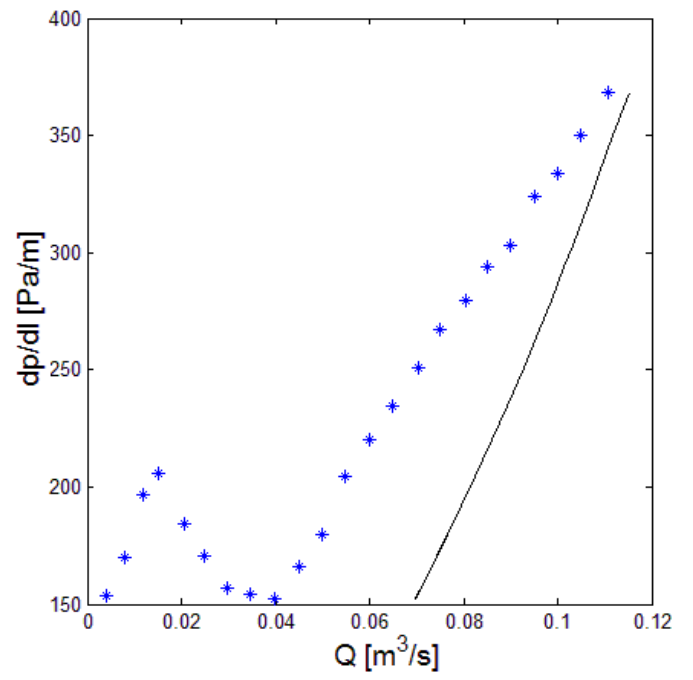
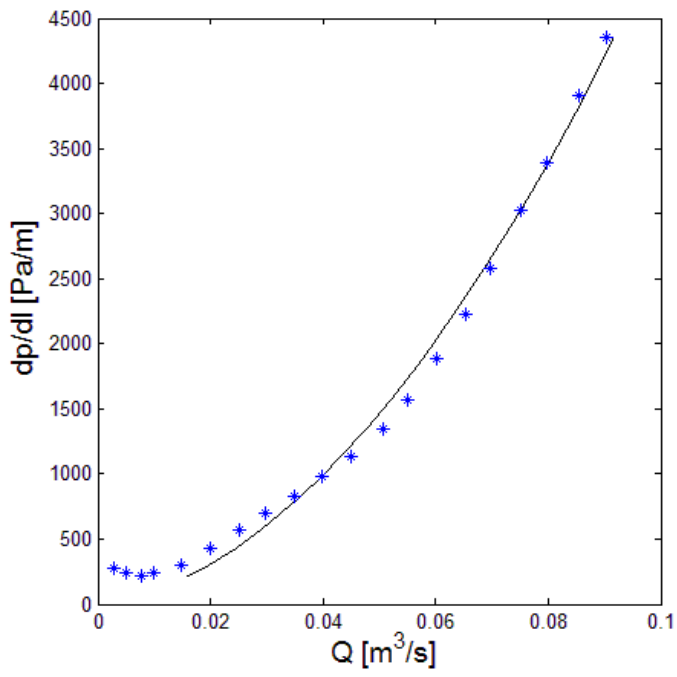
*Kuva C.4: Koivu 2,5 %*



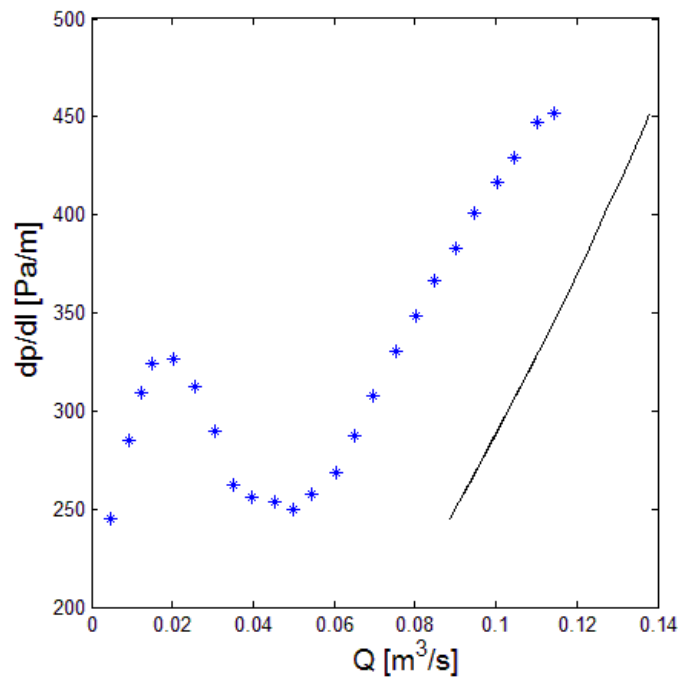
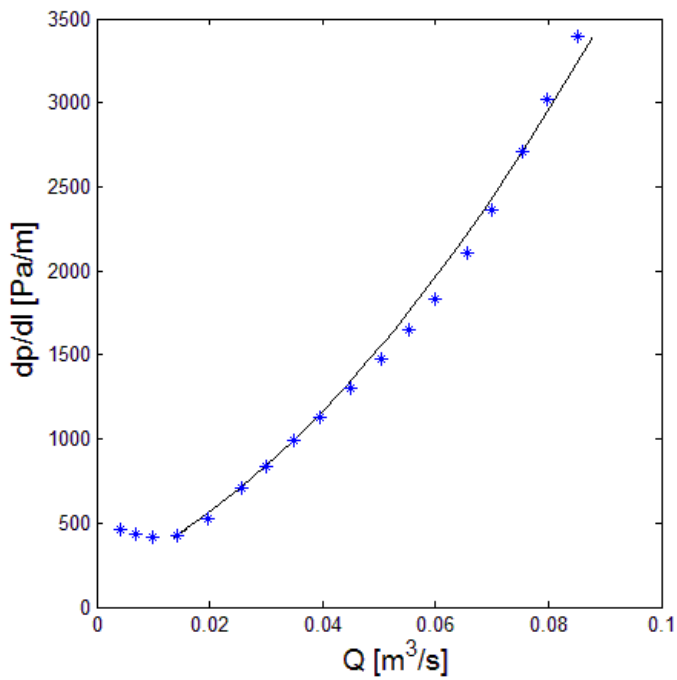
Kuva C.5: Mänty 0,5 %



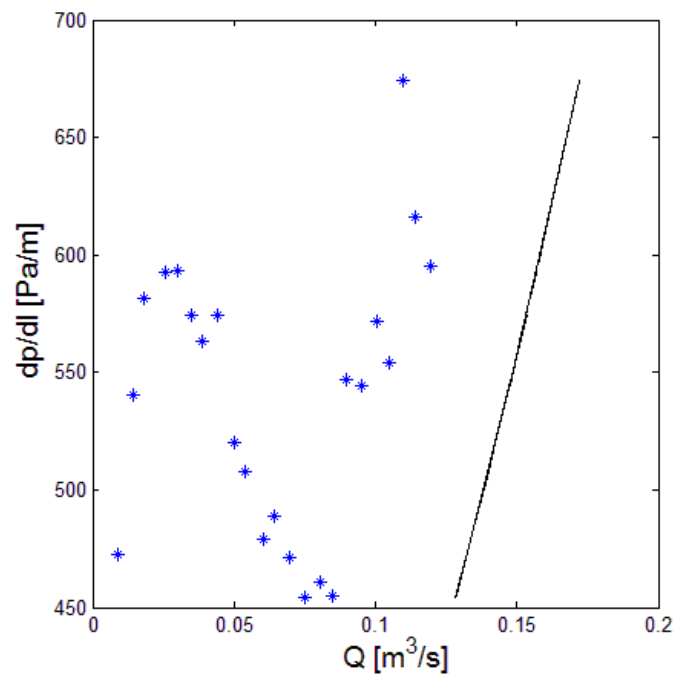
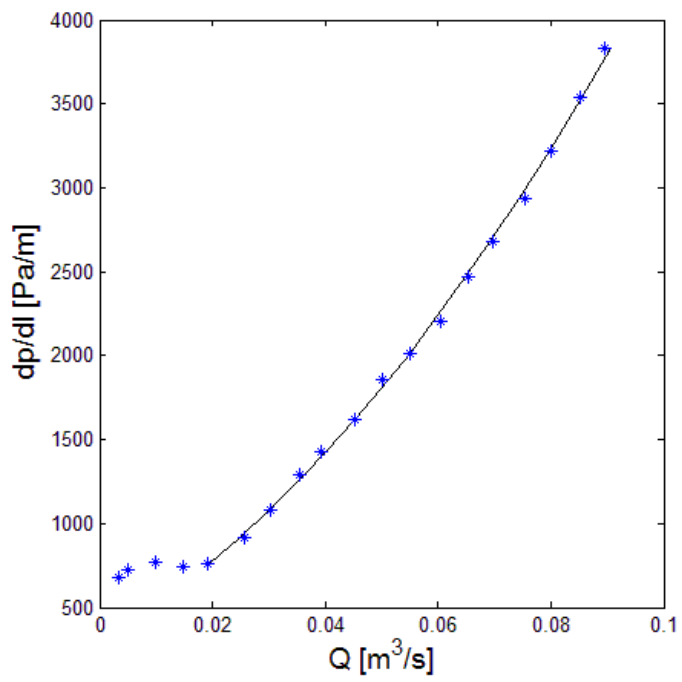
Kuva C.6: Mänty 1,0 %



Kuva C.7: Mänty 1,5 %



Kuva C.8: Mänty 2,0 %



*Kuva C.9: Mänty 2,5 %*