

PUUKUITUSUSPENSION SUOTAUTUMISEN KOKEELLINEN  
MITTAUS

Pro gradu -tutkielma

Mikko Ahonen

Jyväskylän yliopisto  
Fysiikan laitos  
2013  
Ohjaaja: Markku Kataja

## Tiivistelmä

Tässä työssä kehitetään ja testataan mittauslaitteistoa, jonka avulla voidaan tutkia puukuitususpension suotautumista. Tavoitteena on kehittää laitteisto sellaiseksi, että sillä saadaan kerättyä hyvälaatuista dataa suotautumistapahtumasta ja voidaan toistaa suotautumisia mahdollisimman identtisinä. Työssä tutkitaan myös teoreettista mallia, jonka avulla suotautumista on mahdollista simuloida annettujen lähtötietojen perusteella. Tätä varten toiseksi tavoitteeksi asetetaan mittaussarjan tekeminen parannetulla laitteistolla ja teoreettisen mallin testaaminen saadun datan avulla.

Mittauslaitteistoon kuuluu suotautumislaitte, tietokone ja ultraääni-Doppler nopeusmittauslaite. Suotautumislaitte koostuu paksusta pystysuorasta vesisäiliöön kiinnitetystä putkesta, jonka alapäässä on viira. Puukuitususpensio laitetaan tähän putkeen ja tutkittava suotautuminen tapahtuu viiralla. Ultraääni-Doppler on laite joka mittaa nopeusprofiileja erilaisista virtauksista ultraäänipulssien avulla. Mittauslaitteistolla on tarkoitus määrittää puukuitujen nopeuskenttä pystysuunnassa suotautumisen aikana. Nopeuskentästä voidaan ratkaista kuitukerrosten polkuviivat ja rakennepaine.

Alkutilanteessa laitteistolla oli vaikea saada mitattua edes yhtä suotautumista onnistuneesti ja useamman mittauksen tekeminen peräkkäin oli mahdotonta. Suurimmat ongelmat aiheutti laitteistoon päässyt ilma, joka häiritsi ultraäänellä mitaamista. Laitteiston toimintaa parannettiin tiivistämällä vuotoja ja etsimällä ilmanlähteitä. Mittausten toistettavuuden parantamiseksi laitteistoon vaihdettiin toisenlainen pumppu ja lisättiin erinäisiä osia. Parannusten jälkeen tehtiin mittaussarja, joka sisälsi kuusi erilaista suotautumista. Näistä kustakin piirrettiin kuvaaja rakennepaineelle ja polkuviivoille ja niitä verrattiin teoreettisen mallin tuottamiin kuvaajiin.

Laitteiston parantaminen onnistui erittäin hyvin. Mittausten tekeminen helpottui ja tulosten laatu parani huomattavasti. Mittaussarjan tekeminen sujui myös ongelmitta ja saadun datan avulla voitiin todeta teoreettinen malli toimivaksi. Mallissa on edelleen parantamisen varaa, mutta kaikkiaan sitä voidaan pitää toimivana.

## **Alkusanat**

Vaikka vertailukohtia ei olekaan monia, voin silti sanoa tämän työn olleen elämäni mielenkiintoisin tieteellinen tutkimus. Työn tekeminen eteni mukavasti ilman ylimääräisiä vaikeuksia ja vastaan tulleet ongelmat olivat ennemmin inspiroivia kuin turhauttavia. Tästä suuri kiitos kuuluu Markku Katajalle, joka toimi työni ohjaajana. Häneltä sain mielenkiintoisen aiheen, jossa pääsi soveltamaan sopivassa suhteessa niin kädentaitoja, ongelmanratkaisua kuin teoreettista osaamistakin. Hankkimallaan rahoituksella hän myös antoi minulle mahdollisuuden paneutua työhön täysipainoisesti kesän 2012 aikana. Suuret kiitokset ansaitsee Arttu Miettinen, jolta sain korvaamatonta apua tietoteknisten ongelmien kanssa painiessa. Kiitän myös Sanna Haavistoa, joka antoi hyviä vinkkejä ja apua laitteiston käyttöön liittyvissä asioissa.

# Sisältö

<b>1 Johdanto</b>	<b>5</b>
<b>2 Kuitususpensio ja suotautuminen</b>	<b>6</b>
2.1 Yleistä kuitususpensiosta . . . . .	6
2.2 Suotautuminen tapahtumana . . . . .	7
<b>3 Yksiulotteinen suotautumismalli</b>	<b>8</b>
<b>4 Mittauslaitteisto</b>	<b>13</b>
4.1 Suotautumislaitte ja mittausjärjestely . . . . .	13
4.2 Suotautumislaitteen ohjaamiseen käytetty ohjelma . . . . .	16
4.3 Ultraääni-Doppler nopeusmittauslaite . . . . .	17
4.3.1 Laitteen säädöt . . . . .	17
4.3.2 Ultraäänianturit . . . . .	20
4.3.3 Nopeusprofiilin määrittäminen pulssitetulla ultraäänellä . . . . .	21
4.3.4 Kohteen paikan määrittäminen . . . . .	22
4.3.5 Kohteen nopeuden määrittäminen . . . . .	23
4.3.6 Menetelmän rajoitukset . . . . .	25
<b>5 Testimittaukset ja havaitut ongelmat</b>	<b>26</b>
5.1 Ilmakuplat ja niiden aiheuttamat ongelmat . . . . .	26
5.2 Häiriöt paineen mittauksessa . . . . .	26
5.3 Pinnankorkeuden vaihtelut . . . . .	27
5.4 Kuitujen määrä . . . . .	27
5.5 Ultraääni-Dopplerin säätöjen rajoittuneisuus . . . . .	28
<b>6 Mittauslaitteistoon tehdyt parannukset</b>	<b>30</b>
6.1 Veden seisottaminen ja laitteiston ilmaaminen . . . . .	30
6.2 Ilmalukon rakentaminen . . . . .	31
6.3 Toisen viiran asennus . . . . .	31
6.4 Kuristusventtiilin lisäys . . . . .	32
6.5 Pumpun vaihtaminen . . . . .	33
6.6 4 MHz:n ja 8 MHz:n anturien käyttäminen nopeuskentän muodostuksessa . . . . .	34

<b>7</b>	<b>Suotautumismittaukset</b>	<b>35</b>
7.1	<i>Mittausten suorittaminen käytännössä . . . . .</i>	35
7.2	<i>Tulosten käsittely . . . . .</i>	36
7.3	<i>Mittauksissa käytetyt ultraääni-Dopplerin asetukset . . . . .</i>	38
7.4	<i>Mittausdatan käyttäminen mallinnuksessa . . . . .</i>	39
<b>8</b>	<b>Tulokset</b>	<b>40</b>
8.1	<i>Kuituanalyysin tulokset . . . . .</i>	40
8.2	<i>Suotautuminen ilman pysäytystä . . . . .</i>	41
8.3	<i>Suotautuminen 4 sekunnin pysäytyksellä . . . . .</i>	43
<b>9</b>	<b>Johtopäätökset</b>	<b>45</b>

# 1 Johdanto

Tässä työssä tutkitaan puukuitususpension suotautumista. Käytännössä se tarkoittaa veden poistamista puukuitujen ja veden muodostamasta tasaisesta seoksesta tiheän suodatinkudoksen eli viiran avulla. Suotautumisesta kerätään dataa mittaamalla puukuitujen nopeuksia tapahtuman aikana ultraäänen avulla. Saadun datan avulla on tarkoitus testata ja kehittää teoreettista mallia kuvaamaan suotautumistapahtumaa. Tällaisesta mallista olisi hyötyä ainakin paperikoneen testaamisessa ja käytössä, sillä siinä tapahtuu vastaava suotautuminen.

Työssä käydään läpi perusasiat puukuitususpensiosta, suotautumisesta ja monifaasivirtauksesta sekä esitellään kehitettävän teoreettisen mallin johtaminen ja käyttö lyhyesti. Lisäksi perehdytään käytettyyn mittauslaitteistoon ja mittausjärjestelyyn sekä ennen kaikkea siihen tehtyihin korjauksiin ja parannuksiin. Koska ultraäänen käyttö on keskeisessä osassa mittauksia, selvitetään nopeusprofiilien mittaamisen toimintaperiaate pulssitetun ultraäänen avulla. Lopuksi esitetään mittausten käytännön suoritus ja kerätyn datan käsittely sekä saadut tulokset. Mittaustuloksia verrataan mallin antamiin tuloksiin ja arvioidaan mallin toimivuutta.

Motivaationa tämän työn teolle on toimivan teoreettisen mallin kehittäminen kuvaamaan suotautumistapahtumaa. Vedenpoisto on paperin valmistuksen eniten energiaa kuluttava vaihe ja sillä on myös suuri vaikutus paperikoneen tuottavuuteen. Näin ollen tämän tapahtuman ymmärtäminen voisi mahdollistaa merkittäviä energian ja raaka-aineen säästöjä [1]. Mikäli kehitettävä malli saadaan toimimaan, olisi sen avulla mahdollista tehostaa paperikoneen toimintaa ja vähentää testiajoja.

Työn päätavoitteena on suotautumislaitteen kehittäminen sellaiseksi, että sillä saadaan kerättyä hyvälaatuisia dataa suotautumistapahtumasta ja toistettua suotautusta mahdollisimman samanlaisena monta kertaa peräkkäin. Lisäksi tavoitteena on suorittaa sarja mittauksia joista kerätyllä datalla kokeillaan mallin toimivuutta.

## 2 Kuitususpensio ja suotautuminen

### 2.1 Yleistä kuitususpensiosta

Suspensiolla tarkoitetaan seosta, jossa nesteeseen on sekoittunut kiinteää ainetta hyvin tasaisesti. Kiinteän aineksen tulee lisäksi olla niin hienojakoista, että seos saostuu hitaasti. Suspensioiden käytös eroaa selvästi pelkästään yhtä komponenttia sisältävistä nesteistä, kuten esimerkiksi vedestä. Virtausprofiilit ja häviöt ovat hyvin erilaisia, sillä suspensiossa olevat kiinteät hiukkaset liikkuvat vapaasti ja vuorovaikuttavat toistensa ja nesteen kanssa [2][s.57].

Tässä työssä tutkitaan veden ja puukuitujen muodostamaa suspensiota. Vastaavanlaista suspensiota on helppo valmistaa vaikka kotiooloissa laittamalla astiaan vettä sekä talouspaperiarkki ja sekoittamalla kunnes seos on tasaista. Tutkittu kuitususpensio sisälsi noin puoli massaprosenttia kuituja, joiden pituudet olivat muutaman millimetrin ja paksuudet muutaman kymmenen mikrometrin suuruusluokkaa. Kuidut ovat siis kuin ohuita langan pätkiä. Yksittäinen kuitu voi vuorovaikuttaa niiden ympärillään olevien kuitujen kanssa, jotka sijaitsevat lähempänä kuin kuidun itsensä pituuden päässä sen keskipisteestä (ks. viite [3][s.10]).

Suotautuva kuitumassa käyttäytyy viskoelastisesti, mikä tarkoittaa sillä olevan viskoottisia ja elastisia ominaisuuksia sen muuttaessa muotoaan. Viskositeetti on virtaaville aineille tyypillinen ominaisuus, joka kertoo kuinka tehokkaasti aine vastustaa virtausta [4][s.25]. Käytännön esimerkkinä voidaan ajatella veden ja hunajan kaatamista astiasta toiseen. Veden kaataminen onnistuu paljon helpommin ja nopeammin, koska sillä on pienempi viskositeetti, eikä se näin ollen vastusta virtaamista yhtä tehokkaasti kuin hunaja.

Elastisen kappaleen muodon muutokset riippuvat pelkästään sen jännitystilasta. Jännitysten poistuttua kappale palaa aina alkuperäiseen tilaansa. Käytännön esimerkkinä elastisesta kappaleesta voidaan pitää kierrejoustaa, joka puristamisen ja venyttämisen jälkeen palautuu alkuperäiseen muotoonsa. Esimerkki hyvin epäelastisesta aineesta puolestaan on savi tai muovailuvaha [5][s.313].

## 2.2 Suotautuminen tapahtumana

Suotautumisella tarkoitetaan erotteluprosessia, jossa kiinteät aineet erotellaan nesteestä. Erottelu voi perustua niiden kokoon tai sähkövaraukseen. Arkisina esimerkkeinä suotautumisesta voidaan pitää keitinveden poistamista riiseistä tai makaroneista siivilällä ja kahvinpurujen erottamista itse kahvista suodatinpussin avulla.

Tässä työssä suotautetaan puukuitususpensiota, toisin sanoen poistetaan siitä vettä. Suotauttaminen tapahtuu viiran avulla, joka on käytännössä vain hyvin tiheä verkko. Suotautuessa kuidut pakkautuvat viiralle ja muodostavat kuitumaton, joka vastustaa veden virtaamista. Koska kuidut ovat hyvin pieniä, ne vastustavat tehokkaasti veden poistumista. Kuitumaton virtausvastukseen vaikuttavat olennaisesti kuitujen ulkopinta-ala, vettyneen kuidun tilavuus ja kuitumaton kokoonpuristuvuus [6]. Mikäli kuidut pääsevät liikkumaan helposti toistensa ohitse, muodostuu kuitumatosta tiiviimpi ja se vastustaa tehokkaammin veden virtausta. Jos taas kuidut takertuvat helposti toisiinsa tulee matosta huokoisempi ja vesi virtaa vapaammin [1].

Keskeisiä käsitteitä tutkittavassa suotautuksessa ovat tilavuusosuus ja rakennepaine. Tilavuusosuus lasketaan suspensiossa sekä vedelle että kuiduille erikseen. Se on prosenttiluku, joka kertoo kuinka suuren osan vesi tai kuidut vievät tutkittavan suspension tilavuudesta. Rakennepaine puolestaan aiheutuu kuitujen välisistä kontakteista ja muodonmuutoksista [7]. Suotautuksen aikana toistensa päälle pinoutuvat kuidut muodostavat maton viiran päälle. Veden virratessa kuitumaton läpi siinä olevat kuidut ovat rasituksen alla ja pyrkivät ponnahtamaan ylöspäin samaan tapaan kuin syksyllä haravoitu lehtikasa, jota yritetään painaa kottikärryssä tiiviimmäksi.

Tutkittavan suotautumisen alkutilanteessa puukuitususpensio on tasaisesti sekoituneena massana, toisin sanoen kuitujen tilavuusosuus on joka puolella yhtäsuuri. Suotautuksen aikana kuidut painuvat kerroksittain pohjalle kohti viiraa ja kuitujen tilavuusosuus kasvaa mitä lähempänä viiraa ollaan. Kuitukerrosten liikettä voidaan kuvata polkuviivoilla, jotka kertovat kunkin kuitukerroksen paikan ajan funktiona. Nämä polkuviiivat ovat tässä työssä keskeisessä osassa, koska niiden avulla voidaan laskea tilavuusosuudet ja rakennepaine suotautuksen aikana.



### 3 Yksiulotteinen suotautumismalli

Monifaasivirtauksella tarkoitetaan sellaista virtausta, joka sisältää kahta tai useampaa eri faasissa olevaa komponenttia. Mikäli esimerkiksi nesteen seassa virtaa joitain kiinteitä osasia tai ilmakuplia, on kyseessä monifaasivirtaus. Teollisuudessa tällaiset virtaukset ovat hyvin yleisiä ja sen takia niiden ymmärtäminen on tärkeää. Niitä esiintyy muun muassa kavitoivissa pumpuissa ja turbiineissa, joissa virtaavaan nesteeseen ilmestyy kaasukuplia paikallisten paineen muutosten johdosta. On myös helppoa kuvitella, kuinka suuria määriä rakeisia materiaaleja, kuten malmia tai jyviä, maailmassa liikutellaan päivittäin. Kaikki nämä joutuvat virtaamaan tavalla tai toisella ja niinpä tällaisten virtausprosessien tuntemisella on mahdollista saada aikaan suuria energian säästöjä [8][s.1]. Tässä työssä tutkittava virtaus sisältää vettä ja puukuituja.

Monifaasivirtausten tuntemus on selvästi heikompaa verrattaessa yksifaasivirtaukseen. Siinä missä yksifaasivirtauksia voidaan kuvata Navier-Stokesin yhtälöillä, ei monifaasivirtaukselle ole löydetty vastaavaa. Sopivalla keskiarvoistuksella pystytään kuitenkin johtamaan yhtälöitä kuvaamaan monifaasivirtausta, mutta näin saadaan aina aikaan enemmän tuntemattomia muuttujia kuin yhtälöitä. Monifaasivirtauksia voi olla hyvin paljon erilaisia riippuen siitä mitä materiaaleja on sekoitettu keskenään. Näin ollen näyttää lähes mahdottomalta löytää yleisiä lakeja kuvaamaan niissä tapahtuvia vuorovaikutuksia [9][s.9].

Darcyn laki kuvaa nesteen virtausta huokoisessa väliaineessa kuten vaikka maaperässä tai pesusienessä. Henry Darcy johti lain kokeellisesti tukimalla veden virtaamista hiekkakerroksen läpi [10][s.119]. Laki on muotoa

$$q = -\frac{k}{\mu} \nabla P \quad (1)$$

missä  $q$  on tilavuusvirta pinta-alayksikköä kohden,  $\mu$  virtaavan aineen viskositeetti ja  $\nabla P$  paineen gradientti. Muuttuja  $k$  on huokoisen aineen permeabiliteetti, joka kertoo kuinka hyvin se päästää nesteen virtaamaan lävitseen. Tämän työn tapauksessa huokoisena väliaineena toimii suotautuksessa muodostuva kuituverkosto ja siitä virtaa vesi lävitse.

Suotautumista kuvaava teoreettinen malli voidaan esittää yhtälönä, jonka avulla on mahdollista laskea kuitukerrosten polkuviivat suotautuksen aikana annettujen lähtötietojen perusteella. Malli saadaan muodostamalla yhtälö kuitujen nopeudelle, jota integroimalla ajan suhteen voidaan ratkaista polkuviivat. Koska tämä työ on luonteeltaan kokeellinen, yhtälöä ei johdeta tarkasti vaihe vaiheelta. Tarkoituksena vain lyhyesti kuvailla kuinka lopullinen yhtälö on saatu.

Liikkeelle lähdetään massan ja liikemäärän säilymislaeista. Johtaminen on melko monimutkainen operaatio ja se on esitetty yksityiskohtaisesti viitteessä [9][s.13]. Massan ja liikemäärän säilymistä kuvaavat yhtälöt vedelle ja puukuiduille saadaan seuraavaan muotoon

$$\frac{\partial}{\partial t}\phi_f + \frac{\partial}{\partial z}(\phi_f\tilde{u}_f) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\phi_s + \frac{\partial}{\partial z}(\phi_s\tilde{u}_s) = 0 \quad (3)$$

$$\phi_f \frac{\partial}{\partial z}\tilde{p}_f = D - \phi_f\tilde{\rho}_f g \quad (4)$$

$$\phi_f \frac{\partial}{\partial z}p_s = -D - \phi_f\phi_s(\tilde{\rho}_s - \tilde{\rho}_f)g \quad (5)$$

joissa alaindeksi f viittaa nestefaasiin eli veteen ja alaindeksi s kiinteään faasiin eli puukuituihin. Yhtälöissä (2)-(5) muuttuja  $\phi$  on tilavuusosuus,  $\tilde{u}$  nopeus,  $\rho$  tiheys,  $g$  putoamiskiihtyvyys ja  $\tilde{p}_f$  veden paine sekä  $p_s$  kuitujen rakennepaine. Termi  $D$  on faasien välinen liikemäärän siirto. Soveltamalla Darcyn lakia (1) termi  $D$  saadaan muotoon

$$D = -\frac{\mu}{k}(\tilde{u}_f - \tilde{u}_s) \quad (6)$$

missä  $\tilde{u}_f$  on virtaavan aineen nopeus ja  $\tilde{u}_s$  huokoisen aineen nopeus.

Termin D laskemista varten tarvitsee ratkaista permeabiliteetti  $k$ . Johdettavan yksiulotteisen suotautumismallin käyttäminen edellyttää, että permeabiliteetti on annettu kiinteän aineksen tilavuusosuuden funktiona. Permeabiliteetin laskemiseen löytyy useampia funktioita, jotka täyttävät tämän ehdon, mutta aiemmissa käytännön kokeissa tällaiseen puukuitujen suotauttamiseen käyttökelpoisimmaksi on havaittu Kuwabaran permeabiliteettifunktio [7]. Sen lauseke on muotoa

$$k = \frac{a^2}{8\phi_s(1 - \phi_s)^2} \left( -\log(\phi_s) - \frac{3}{2} + 2\phi_s \right) \quad (7)$$

missä  $\phi_s$  on kiinteän aineksen, tässä työssä kuitujen, tilavuusosuus. Kuwabaran mallin antama permeabiliteetti on johdettu huokoiselle aineelle, joka koostuu sylinterin muotoisista kappaleista. Parametri  $a$  on tällaisen sylinterin säde.

Laskemalla yhtälöt (2) ja (3) yhteen ja käyttämällä tietoa  $\phi_f + \phi_s = 1$  saadaan yhtälö kokonaisvirtaamalle. Vastaavasti laskemalla yhtälöt (4) ja (5) yhteen ja soveltamalla Terzaghin periaatetta [11][s.163]  $p_T = p_s + \tilde{p}_f$  saadaan yhtälö kokonaispainelle. Sijoittamalla näihin yhtälöihin termi D (6) ja Kuwabaran permeabiliteettifunktio (7) sekä sopivasti sieventelemällä ja laskemalla yhtälöitä yhteen saadaan yhtälö josta polkuviivat voidaan ratkaista. Se on muotoa

$$\frac{Dz_s^i}{Dt} = q_T + \frac{k^i}{\mu} (1 - \phi_s^i)^2 \left( -\frac{\partial}{\partial z} p_s^i + g\phi_s^i(\tilde{\rho}_f - \tilde{\rho}_s) \right), \quad (8)$$

missä yläindeksi  $i$  viittaa polkuviivaan. Termi  $q_T$  tarkoittaa kokonaisvuota ja se saadaan laskettua lausekkeella

$$q_T = \phi_f \tilde{u}_f + \phi_s \tilde{u}_s. \quad (9)$$

Yhtälö (8) on suotautumista kuvaava teoreettinen malli. Sitä integroimalla ajan suhteen on mahdollista ratkaista kuitukerrosten polkuviivat teoreettisesti annetuilla lähtötie-

doilla (kokonaisvuo, permeabiliteettifunktiossa esiintyvä termi  $a$ , viskositeetti, kuitujen määrä ja rakennepaine). Polkuviivojen avulla voidaan ratkaista kuitujen ja veden tilavuusosuudet ja rakennepaine suotautuksessa. Annetusta lähtöasetelmästä seuraava suotautuminen voidaan siis simuloida yhtälöllä (8).

Koska suotautuva kuitumassa käyttäytyy viskoelastisesti, rakennepaineen  $p_s$  mallintamiseen käytetään lineaarista viskoelastista mallia. Sen antama rakennepaine voidaan sijoittaa yhtälöön (8), minkä jälkeen on mahdollista ratkaista polkuviivat teoreettisesti. Käytetty viskoelastinen malli on [12][s.278]

$$p_s(t) = \int_0^t E(t - \tau) \dot{\epsilon}(\tau) d\tau \quad (10)$$

missä  $E(t)$  on materiaalista riippuva relaksaatiofunktio, joka sisältää aineen muodonmuutoshistorian ja  $\dot{\epsilon}(\tau)$  on muodonmuutoksen aikaderivaatta.  $E(t)$ :tä voidaan mallintaa Pronyn sarjakehitelmällä [13][s.1], joka on muotoa

$$E(t) = E_0 + \sum_{i=1}^N E_i e^{-\frac{t}{\lambda_i}}. \quad (11)$$

Koska muodonmuutokset kuitumatossa tapahtuvat veden poistumisen seurauksena, käytetään tilavuusosuutta muodonmuutoksen mittana. Näin ollen yhtälöön (10) voidaan sijoittaa

$$\dot{\epsilon}(\tau) = \frac{d\phi_s^i}{dt}(\tau) \quad (12)$$

ja kirjoittaa se tilavuusosuuden avulla muotoon

$$p_s^i(t) = \int_0^t E(t - \tau) \frac{d\phi_s^i}{dt}(\tau) d\tau. \quad (13)$$

Yhtälö (13) antaa nyt rakennepaineen sillä polkuviivalla, jota vastaava kuitujen tilavuusosuus  $\phi_s^i$  sille annetaan. Tilavuusosuus saadaan laskettua yhtälön

$$\phi_s = \frac{\phi_{0s}}{\exp(-s)} \quad (14)$$

avulla, missä  $\phi_{0s}$  on kuitujen tilavuusosuus suotautuksen alussa. Yhtälössä (14) esiintyvä logaritminen muodonmuutos [14][s.118] saadaan yhtälöllä

$$s = -\log\left(\frac{\partial z}{\partial z_0}\right), \quad (15)$$

missä  $z_0$  on kahden tarkasteltavan kuitukerroksen välimatka mittauksen alussa ja  $z$  samojen kerrosten välimatka tutkittavalla ajanhetkellä.

Yhtälö (14) on saatu johdettua käyttämällä logaritmissen muodonmuutoksen ja tilavuusosuuden määritelmiä. Lisäksi on oletettu kuitujen tilavuuden ja suotautumisputken pohjan pinta-alan pysyvän vakioina.

## 4 Mittauslaitteisto

### 4.1 Suotautumislaitteisto ja mittausjärjestely

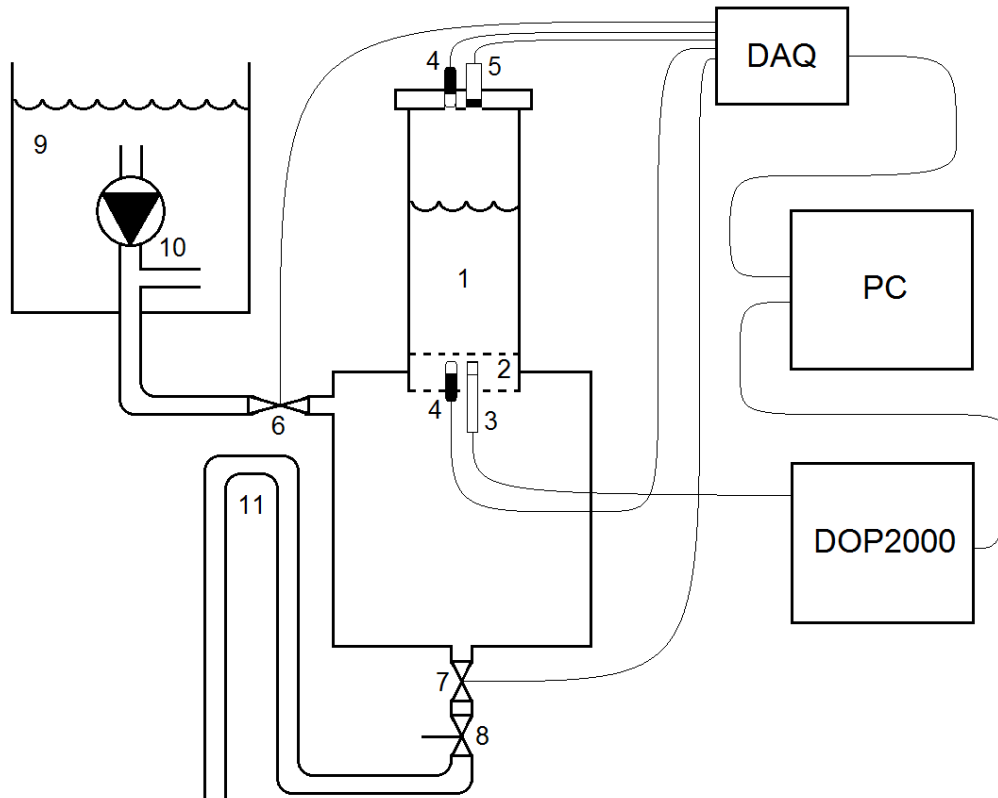
Tässä kappaleessa kuvaillaan mittauslaitteisto siinä kokoonpanossa, jolla mittauksia lähdettiin suorittamaan. Kuvattu laitteisto sisältää siis jo kaikki muutokset ja parannukset, joista kerrotaan tarkemmin kappaleessa 6.

Mittauksissa käytetty laitteisto on esitetty kuvassa 1. Laitteiston olennaisimmat osat ovat suotautumislaitteisto, vesitankki, ultraääni-Doppler nopeusmittauslaitteisto ja tietokone. Itse suotautumislaitteisto on hyvin yksinkertainen ja käsittää olennaisesti vain paksun läpinäkyvän putken, jonka alapäässä on viira. Tähän putkeen laitetaan suotautettava massa ja itse suotautuminen tapahtuu viiralla. Suotautusputken alapää on kiinnitetty vesisäiliöön, jonka kautta putken lisättävä tai sieltä poistuva vesi kulkee. Mikäli vedenpintaa tahdotaan nostaa, pumpataan tähän säiliöön lisää vettä, jolloin se nousee viiran läpi suotautusputken. Mikäli taas vedenpintaa tahdotaan laskea, avataan vesisäiliössä oleva tyhjennysventtiili, jolloin vesi pääsee valumaan laitteesta viemäriin. Suotautettava massa, tämän työn tapauksessa puukuidut, eivät pääse kulkemaan viiran läpi ja näin ollen pysyvät putkessa koko ajan. Valokuva suotautumislaitteesta on nähtävillä kuvassa 2.

Vettä laitteeseen pumpataan 500 litran tankista uppopumpun avulla. Mikäli vedenpintaa halutaan nostaa, avataan täyttöventtiili, jolloin uppopumppu pääsee pumppaamaan vettä laitteeseen. Muun ajan se pumppaa vettä vesitankissa olevaan ohikiertoon, joten pumppua ei tarvitse sammuttaa missään vaiheessa.

Tyhjennysventtiilin jälkeen on erillinen käsikäyttöinen kuristusventtiili. Koska tyhjennysventtiili voi olla pelkästään auki tai kiinni, voidaan kuristusventtiilin avulla vaikuttaa veden virtausnopeuteen ulos laitteesta. Näin saadaan säädettyä suotautumisen nopeus halutuksi. Kuristusventtiilin jälkeen vesi kiertää vielä korkean ilmalukon kautta ennen viemäriin päätymistä. Tämän tarkoituksena on ehkäistä ilman pääseminen laitteistoon.

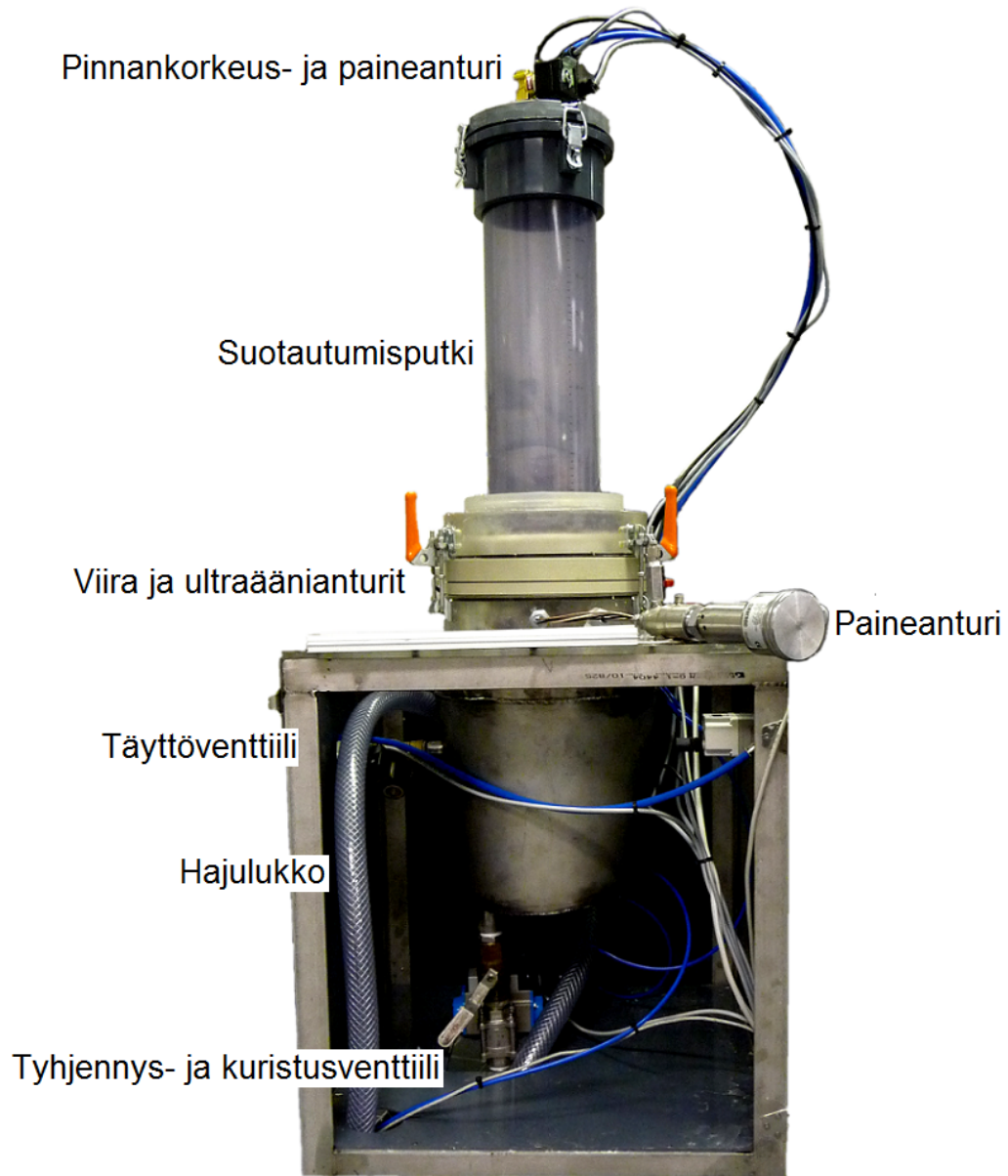
Suotautumisputken tulevan korvausilman virtausta on mahdollista säätää korvausilmaventtiilin avulla. Pienentämällä korvausilmaventtiiliä on mahdollista hidastaa suotautumista. Laitteessa on myös regulaattori, jonka avulla suotautumisputken voidaan luoda ylipaine ja sen avulla ajaa suotautettava massa viiran läpi. Tässä työssä regu-



Kuva 1: Periaatekuva suotautumislaitteesta ja mittausjärjestelystä. 1. Suotautumisputki ja suotautuva massa 2. Viira 3. Ultraäänianturit 4. Paineanturi 5. Pinnankorkeusanturi 6. Täyttöventtiili 7. Tyhjennysventtiili 8. Kuristusventtiili 9. Vesitankki 10. Uppopumppu ja ohikierto 11. Ilmalukko

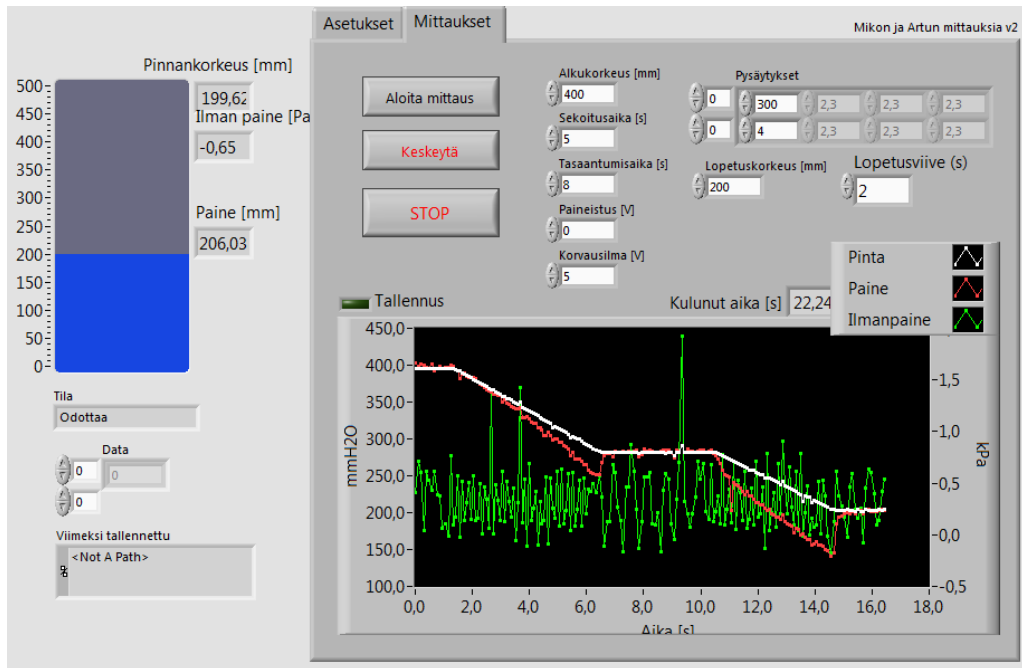
laattoria ei kuitenkaan käytetä ja korvausilmaventtiili pidetään koko ajan aivan auki. Tämän lisäksi putken kannessa ollut varoventtiili ruuvattiin kokonaan irti, jotta korvausilma pääsisi mahdollisimman vapaasti virtaamaan putkeen. Mittausten kannalta parhaaksi tavaksi säätää suotautumisen nopeutta havaittiin poistoveden virtauksen säätäminen kuristusventtiilin avulla.

Suotautumislaitteen tyhjennys- ja täyttöventtiileitä, pinnankorkeusanturia ja paineantureita hallitaan ja seurataan tietokoneen avulla. Suotaumisessa esiintyvät kuitujen nopeudet mitataan viiran alapuolelta ultraääni-Dopplerilla. Tämä on myös kytketty tietokoneeseen, johon mitattu nopeusdata voidaan lukea heti suotautuksen jälkeen. Laitteen hallinta ja mittaaminen tapahtuu siis pääasiassa tietokoneen avulla.



Kuva 2: Suotautumislaitte ja sen tärkeimmät osat.





Kuva 3: Suotautumislaitteen hallintaan käytetyn ohjelman käyttöliittymä. Vasemmassa laidassa on esitetty pinnankorkeus suotautumisputkessa graafisesti ja numeroarvona. Kuvaajassa valkoinen käyrä kertoo pinnankorkeuden ja punainen kokonaispaineen viiralla ajan funktiona. Vihreä käyrä esittää ilmanpaineen putkessa ajan funktiona.

## 4.2 Suotautumislaitteen ohjaamiseen käytetty ohjelma

Suotautumislaitteen hallitsemiseen käytetyn ohjelman on tehnyt Sanna Haavisto LabVIEW:llä, joka on graafinen ohjelmointiympäristö [15]. Ohjelman avulla on mahdollista hallita laitteessa olevia veden sisääntulo- ja ulosmenoventtiileitä, korvausilmaventtiiliä, regulaattoria ja kuitumassan sekoitusta paineilman avulla. Ohjelma kerää jatkuvasti dataa pinnankorkeudesta, joka esitetään sekä graafisesti että numeroarvona, ja paineesta pinnan yläpuolella sekä viiran alla.

Ohjelma voidaan laittaa toteuttamaan halutunlainen mittaus, jossa pinta ensin nostetaan asetetulle korkeudelle, kuitumassa sekoitetaan, aloitetaan suotautus ja lopetetaan se asetetulle korkeudelle. Suotautukseen on mahdollista asettaa myös halutun mittainen välipysäytys. Mittauksen jälkeen ohjelma piirtää kuvaajat pinnankorkeudesta, paineesta viiralla ja ilmanpaineesta ajan funktiona mittauksen ajalta. Kerätty data on mahdollista tallentaa tiedostoon.

### 4.3 Ultraääni-Doppler nopeusmittauslaite

Ultraääni-Doppler on laite, jolla voidaan mitata nopeusprofiileja erilaisista virtauksista käyttäen ultraäänipulsseja. Menetelmä on alunperin kehitetty lääketieteellisiin tarkoituksiin 70-luvulla, mutta myöhemmin sen käyttöä on laajennettu muihin soveluksiin [3][s.52]. Käytetty laite on Signal Processingin valmistama mallimerkinnältään DOP2000 ja se soveltuu teollisempaan käyttöön.

Ultraääni-Doppler on tavallinen tietokone, johon voidaan kytkeä ultraääniantureita ja tuottaa sekä vastaanottaa näiden avulla ultraäänipulsseja. Laite laskee lähetettyjen ultraäänipulssien ja niistä aiheutuneiden kaikkujen avulla mitattavassa kohteessa esiintyviä nopeuksia ja piirtää niistä nopeusprofiilin paikan funktiona. Näin saatu nopeusdata on mahdollista tallentaa tiedostoon laitteen kovalevyille. Laite on myös mahdollista kytkeä lähiverkkoon muiden tietokoneiden kanssa. Näin ollen mittausdataan pääsee nopeasti käsiksi. Mittauksen hallitsemiseen ja datan keruuseen käytetään WDOP 4.06.1 ohjelmaa. Se on Signal Processingin tuottama ohjelma, jonka avulla on mahdollista tehdä mittauksia käytetyllä ultraääni-Dopplerilla ja vaikuttaa mittauksessa käytettäviin asetuksiin sekä tallentaa saatua dataa. Laite on nähtävillä kuvassa 4.

Mittaaminen on mahdollista käynnistää joko käsin tai ulkopuolelta laitteeseen tuodulla signaalilla. Tehdyissä mittauksissa datan keruu aloitettiin suotautumislaitteesta saadulla signaalilla. Näin ollen mittaus saatiin automaattisesti käyntiin molemmissa laitteissa yhtä aikaa.

#### 4.3.1 Laitteen säädöt

DOP2000 tarjoaa monenlaisia säätöjä ja asetuksia, joilla voidaan vaikuttaa nopeusprofiilien mittaamiseen. Seuraavaksi käydään läpi keskeisimpiä säätöjä, joita mittauksissa käytettiin. Tiedot on saatu valmistajan laitteelle toimittamasta ohjekirjasta [16].

**Pulssintoistotaajuus (PRF)** kertoo, kuinka pitkä aika kahden perättäisen nopeuden mittausta varten lähetettävän pulssipaketin välillä odotetaan, toisin sanoen se vastaa näytteenottotaajuutta. Pulssintoistotaajuus on mittauksen kannalta olennainen muuttuja, sillä se määrää suurimman mitattavan nopeuden ja syvyyden. Mitä suurempi pulssintoistotaajuus on, sitä tiheämpään tahtiin mitattavasta kohteesta saadaan näytteitä ja sitä suurempia nopeuksia voidaan mitata. Pienemmällä pulssintoistotaajuudella



Kuva 4: DOP2000 nopeusmittauslaite.

taas näyttöiden oton välillä on pidempi aika ja ultraäänipulssi ehtii kauempana olevista kohteista, jolloin mittaussyvyys suurenee. Suurimman mitattavan nopeuden ja mittaussyvyuden välillä joudutaan siis tekemään kompromissi, eli molempia ei voida saavuttaa yhtä aikaa. Pulssintoistotaajuudelle voidaan antaa arvoja väliltä 100-15625 Hz.

**Pulssipaketin pituus** kertoo, kuinka monen aallonpituuden mittaisia purskeita ultraääntä kohteeseen lähetetään. Pulssipaketin pituus vaikuttaa mittauksen resoluutioon. Pituudeksi voidaan valita kaksi, neljä tai kahdeksan aallonpituutta.

**Profiilin muodostukseen käytettävät emissiot** määrittää kuinka monta pulssipakettia ultraääntä lähetetään mitattavaan kohteeseen yhden nopeusprofiilin muodostusta varten. Mikäli paketteja lähetetään monta, saadaan enemmän dataa nopeusprofiilin muodostusta varten ja satunnaisten virheiden vaikutus vähenee. Useamman paketin lähettäminen kestää kuitenkin kauemmin, jolloin myös yksittäisen profiilin muodostamiseen kuluu enemmän aikaa ja mittauksen aikaresoluutio heikkenee.

**Lähetysteholla** voidaan määrittää, kuinka voimakkaita pulsseja lähetetään. Lähettämällä voimakkaampi pulssi, saadaan myös voimakkaampi kaiku, jonka mittaaminen on helpompaa. Korkeampi lähetysteho aiheuttaa toisaalta häiriöitä anturissa. Tämän takia on parempi nostaa vahvistusta kuin lähetystehoa, jos se vain on mahdollista.

DOP2000:ssa lähetysteho voidaan valita kolmesta vaihtoehdosta.

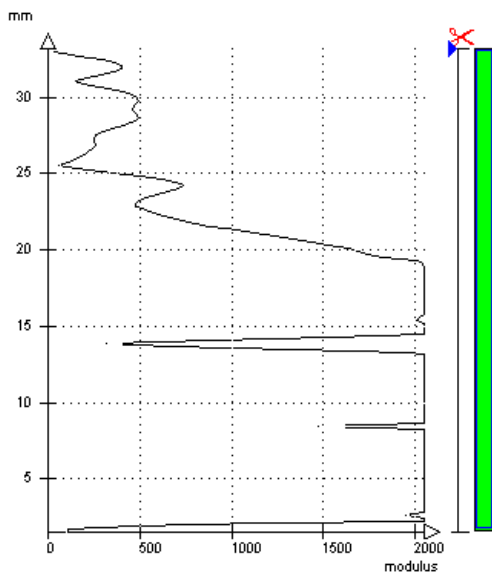
**Herkkyys** asetuksella voidaan vaikuttaa siihen, mikä mittauksessa saatavasta datasta tulkitaan kohinaksi. Pienemmällä lähetysteholla saatava data sisältää enemmän kohinaa. Herkkyyden arvoa muuttamalla voidaan tulkita kaikki asetettua arvoa matalammalla energialla esiintyvät kaiut kohinaksi ja jättää huomiotta.

**Porttien lukumäärä** kertoo, kuinka suurelta alueelta syvyysuunnassa nopeuksia mitataan. DOP2000 kykenee mittaamaan jopa 1000 porttia, mutta käytännössä mitattavien porttien määrään vaikuttaa pulssintoistotaajuus ja resoluutio. Käyttäjä voi myös valita ensimmäisen mitattavan portin paikan. Tällä tavalla voidaan jättää osa mittausalueen alusta huomiotta, mikäli se ei sisällä mitään kiinnostavaa.

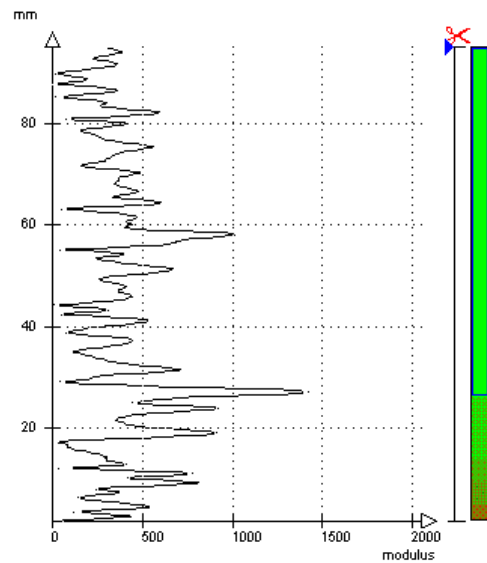
**Resoluutio** määrittää välimatkan kahden vierekkäisen näytteenottotilavuuden keskipisteille. Näytteenottotilavuuksien muodon ja koon määräävät käytetty ultraäänikeila, lähetetyn pulssipaketin pituus ja laitteen vastaanottopiirin kaistaleveys. DOP2000 laitteella näytteenottotilavuus on syvyysuunnassa pienimmillään 0,9 mm, mutta resoluutiolle voidaan kuitenkin antaa arvoja välillä 0,187 - 15 mm. Mikäli resoluutio on pienempi kuin näytteenottotilavuus, menevät tilavuudet päällekkäin. Mikäli se on suurempi, jää tilavuuksien väliin tyhjää aluetta, josta ei saada mitään tietoa.

**Vahvistuksen taso**a voidaan säätää eri kohdissa mittausaluetta. Lähempänä anturia olevat mitattavat kohteet antavat paremman kaiun lähetetystä ultraäänipulssista kuin kauempana olevat. Näin ollen läheltä tulevaa kaikua on monesti syytä heikentää ja kaukaa tulevaa syytä vahvistaa. Tavoitteena on saada joka puolelta mittausaluetta hyvin kaikua, mutta niin, ettei se missään vaiheessa mene yli asteikon. Kuvassa 5 on esimerkit sekä säätämättömästä että säädetyistä kaikuprofiilista.

**Multipleksaus** tarkoittaa useiden signaalien yhdistämistä yhdeksi signaaliksi. DOP2000 laitteessa on mahdollista kerätä dataa enintään kymmenellä ultraäänianturilla ja yhdistää nämä. Multipleksausta varten käytettävät anturit tulee kytkeä laitteen takapaneelista löytyviin kanaviin ja tämän jälkeen tuoda signaalit takapaneelin ulostuonnin kautta etupaneelin anturille tarkoitettuun liittimeen erillisellä koaksaalikaapelilla. Multipleksauksessa dataa voidaan kerätä saman tapaan kuin yksittäiselläkin anturilla joko jatkuvasti tai keruu voidaan laukaista ulkopuolisella signaalilla. Tarkoituksena on kerätä jokaisella anturilla haluttu määrä nopeusprofiileja ja sen jälkeen siirtyä seuraavaan



(a) Säättämätön kaikuprofiili



(b) Säädetty kaikuprofiili

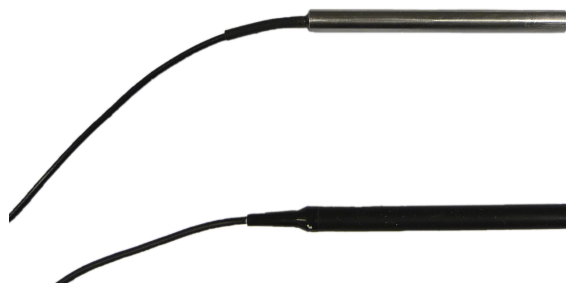
Kuva 5: Esimerkkikuvat kaikuprofiilista ennen ja jälkeen vahvistuksen säädön. Kuvassa 5a vahvistus on kauttaaltaan täysillä ja kaiku menee yli asteikoin mitta-alueen alkupäässä. Kuvassa 5b vahvistusta on pienennetty mitta-alueen alkupäästä, minkä seurauksena kaikua saadaan tasaisesti koko alueen matkalta.

anturiin, jolla suoritetaan vastaava toimenpide. Kukin anturi kerää siis vuoronperään saman määrän dataa ja näistä luodaan yksi kokonaisuus.

#### 4.3.2 Ultraäänianturit

Ultraääni-Dopplerin kanssa käytetyt ultraäänianturit toimivat sekä lähettiminä että vastaanottiminä. Ne pystyvät siis itse tuottamaan ultraäänipulsseja sekä vastaanottamaan mitattavista kohteista tulevaa kaikua. Anturien toiminta perustuu pietsosähköiseen ilmiöön. Niiden valmistuksessa on käytetty niin kutsuttua pietsosähköistä materiaalia, joka muuttaa muotoaan kun sen pintojen välille kytketään sähköinen jännite. Ilmiö toimii myös toiseen suuntaan. Jos tällaisesta aineesta valmistetulle kappaleelle aiheutetaan mekaanisia muodonmuutoksia puristamalla tai venyttämällä, syntyy sen pintojen välille jännite-ero [3][s.43].

Ultraääntä voidaan tuottaa johtamalla anturiin jännitepulssi, joka saa pietsosähköisen ilmiön johdosta anturin kärjen värähtelemään. Anturin kärki toimii siis rumpukalvon tavoin ja tuottaa väliaineeseen mekaanista värähtelyä eli ääniaaltoja. Vastaanotettaessa



Kuva 6: Mittauksissa käytetyt ultraäänianturit. Mustan anturin lähetystaajuus on neljä ja harmaan kahdeksan megahertsiä.

ultraääntä sama ilmiö tapahtuu päinvastoin. Saapuva ultraääniaalto saa anturin kärjen värähtelemään ja värähtely muuntuu jännitepulsseiksi, jotka voidaan mitata.

Anturit luokitellaan niiden lähettämän ultraäänien taajuuden mukaan. Tässä työssä käytetään antureita, joiden lähetystaajuudet ovat neljä ja kahdeksan megahertsiä ja ne on esitetty kuvassa 6. Mitä suurempi lähetystaajuus on, sitä parempi avaruudellinen resoluutio mittaukselle saadaan. Suurempi lähetystaajuus ei kuitenkaan ole yksiselitteisesti aina parempi vaihtoehto. Suuremmalla lähetystaajuudella mittausalue nopeuden ja paikan suhteen on rajoittuneempi. Lisäksi ultraäänien eteneminen väliaineessa riippuu sen taajuudesta, korkeampitaajuinen värähtely voi kantaa lyhyemmän matkaa [17].

Lähetystaajuuden ohella anturin ominaisuuksiin vaikuttaa olennaisesti sen halkaisija. Anturin halkaisija kertoo siinä käytetyn pietsokiteen koon, joka taas vaikuttaa muodostuvan ultraäänikeilan muotoon. Ohuet anturit eivät ole yhtä herkkiä kuin paksumat. Paksut anturit muodostavat kapeamman ultraäänikeilan, joten niillä voidaan tutkia pienempää aluetta tarkemmin, mutta niillä on taas pidempi lähialue. Tämä tarkoittaa aluetta anturin kärjen lähellä, jossa mittaukseen aiheutuu häiriöitä. Paksummilla antureilla ei voida siis mitata yhtä lähellä sijaitsevia kohteita luotettavasti kuin ohuilla [17].

#### 4.3.3 Nopeusprofiilin määrittäminen pulssitetulla ultraäänellä

Yleisesti ultraäänellä tarkoitetaan pitkittäistä aaltoliikettä, joka vaatii edetäkseen väliaineen. Sen taajuus on yli 20 kHz eikä ihmiskorva voi kuulla sitä [18][s. 592]. Tässä työssä käytetään pulssitettua ultraääntä Dopplerin menetelmällä kuitujen nopeuskentän määrittämiseen. Nimestään huolimatta menetelmä ei perustu Dopplerin ilmiöön,

vaan mitattavan kohteen nopeus saadaan selville pulssien välillä kaikuprofiilissa tapahtuvien muutosten avulla [19].

Menetelmässä lähetetään ultraääntä mitattavaan kohteeseen lyhyinä pulsseina. Jokainen ultraäänipulssi kaikuu törmätessään mitattavaan kohteeseen. Kaikkien lähetettyjen ultraäänipulssien aiheuttamat kaiut mitataan ja niistä muodostetaan kaikuprofiilit. Näitä profiileja vertaamalla saadaan selville mitattavassa kohteessa tapahtuneet paikan muutokset, joiden avulla päästään käsiksi nopeuksiin.

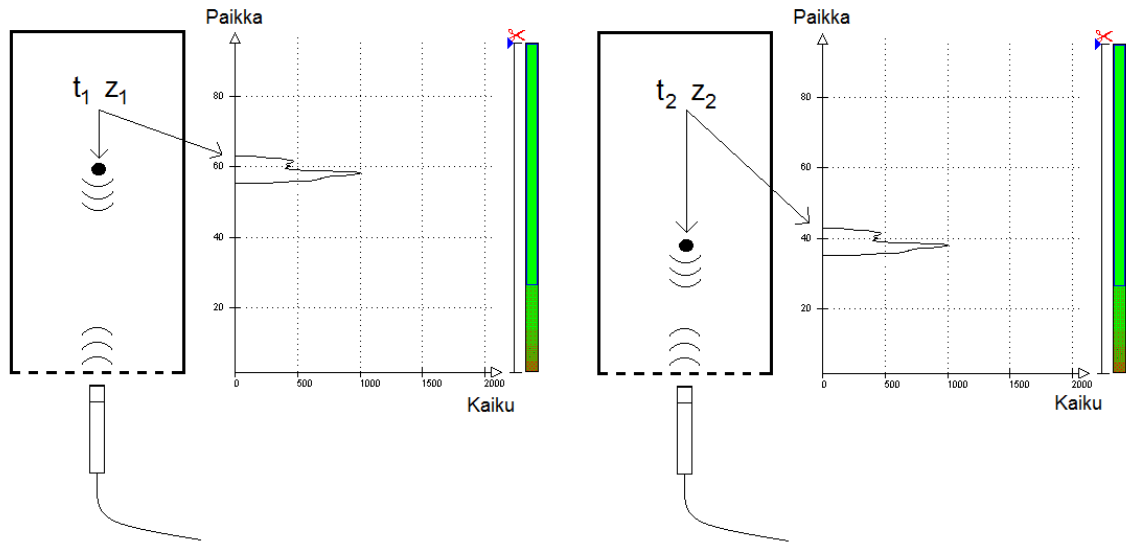
Kuvassa 7 on havainnollistettu mittauksen toimintaa yhden mitattavan kohteen tapauksessa. Siinä on esitetty tilanne kahden peräkkäisen ultraäänipulssin aikana sekä mitattavan kohteen että kaikuprofiilin kannalta. Sama kohde tuottaa aina yksilöllisen kaikuprofiilin, jonka avulla se voidaan tunnistaa ja määrittää sen paikan muutos pulssien välillä. Kun pulssien välillä kulunut aika on tiedossa, saadaan kohteen nopeus määritettyä [19]. Mikäli mitattavia kohteita on useita, voidaan seurata kunkin muodostamia kaikuprofiileja erikseen ja näin ollen määrittää nopeudet monelle kohteelle yhtä aikaa.

Menetelmän etuna onkin monien kohteiden nopeuden määrittäminen samanaikaisesti. Näin saadaan avaruudellista tietoa nopeuksista eli voidaan muodostaa nopeusprofiili tutkittavasta tapahtumasta. Käyttämällä useampia antureita yhtä aikaa voidaan nopeudelle määrittää kaksi tai kolme komponenttia. Toisin sanottuna voidaan tutkia kaksi- tai kolmiulotteista liikettä [20].

#### 4.3.4 Kohteen paikan määrittäminen

Kohteen paikka eli etäisyys ultraäänianturista saadaan määritettyä hyvin helposti. Laite mittaa ajan, joka kuluu pulssin lähettämisestä kaiun vastaanottamiseen. Kun äänen nopeus anturin ja kohteen välillä olevassa aineessa on tiedossa, saadaan kohteen paikka laskettua näiden tulona. Koska ultraäänipulssi kulkee välimatkan edestakaisin, pitää saatu tulos vielä jakaa kahdella. Paikka voidaan laskea yhtälöllä (16) [19]

$$z_n = \frac{ct_n}{2}, \tag{16}$$



Kuva 7: Havainnollistus yksittäisen kohteen paikan ja nopeuden määrittämisestä pulssitetun ultraäänin avulla. Kuvissa  $z$  tarkoittaa kohteen paikkaa ja  $t$  aikaa joka ultraäänellä kestää kulkea kohteeseen ja kaikua sieltä takaisin anturiin. Kuvat esittävät tilanteen muuttumista kahden peräkkäisen pulssin välillä. Kohde aiheuttaa yksilöllisen piikin kaikuprofiiliin, jonka avulla se voidaan tunnistaa.

missä  $z_n$  on kohteen paikka ja  $t_n$  tätä paikkaa vastaava pulssin lähetyksestä kaiun vastaanottamiseen kulunut aika ja  $c$  äänennopeus väliaineessa.

#### 4.3.5 Kohteen nopeuden määrittäminen

Nopeuden määrittämistä varten tarvitsee tietää, kuinka paljon kohteen paikka muuttuu ja missä ajassa. Paikan muutos kahden peräkkäisen pulssin välillä saadaan laskettua kertomalla kohteen nopeus pulssien lähetyksen välissä kuluneella ajalla. Toisaalta se voidaan laskea myös yhtälön (16) avulla. Kuva 7 havainnollistaa tilannetta ja merkintöjä käytännössä. Saadaan siis yhtälö

$$z_2 - z_1 = vt_{PRF} = \frac{ct_2}{2} - \frac{ct_1}{2} = \frac{1}{2}c(t_2 - t_1), \quad (17)$$

jossa  $z_1$  ja  $z_2$  kertovat kohteen paikan ja  $t_1$  ja  $t_2$  ajan joka ultraäänellä kestää kulkea kohteeseen ja kaikua sieltä takaisin anturiin. Kohteen nopeus on  $v$  ja äänen nopeus väliaineessa  $c$  sekä  $t_{PRF}$  kahden peräkkäisen pulssin lähetyksen välillä kulunut aika.



Koska tässä työssä mitataan nopeutta suoraan antureita kohti, ei kulmakorjausta tarvitse ottaa huomioon. Ratkaisemalla yhtälöstä (17) kohteen nopeus saadaan

$$v = \frac{c(t_2 - t_1)}{2t_{PRF}}. \quad (18)$$

Koska ultraäänipulsseja lähetetään tiheään tahtiin, ehtivät mitattavat kohteet liikkua niiden välillä hyvin lyhyitä matkoja. Näin ollen aikaero  $t_2 - t_1$  jää erittäin pieneksi ja on suuruudeltaan yleensä mikrosekuntien luokkaa. Koska ajan muutos on näin pieni, on järkevää käyttää sen tilalla mitatun kaiun vaihesiirtoa [19]. Yhtälö vaihesiirrolle sekä lähetystaajuuden  $f_e$  että pulssien lähetyksen välillä kuluvan ajan  $t_{PRF}$  funktiona saadaan

$$\delta = \omega t = 2\pi f_d t_{PRF} = 2\pi f_e (t_2 - t_1) \implies t_2 - t_1 = \frac{\delta}{2\pi f_e}, \quad (19)$$

missä  $f_d$  on Dopplerin siirtymää vastaavaa taajuus. Se kertoo käytännössä sen, kuinka paljon kohteen paikka on muuttunut kahden peräkkäisen pulssin välillä.

Sijoittamalla yhtälöstä (19) ratkaistun aikaeron ja vaihesiirron yhtälöön (18) saadaan

$$v = \frac{c \frac{\delta}{2\pi f_e}}{2t_{PRF}} = \frac{c\delta}{4\pi f_e t_{PRF}} = \frac{c 2\pi f_d t_{PRF}}{4\pi f_e t_{PRF}}.$$

Supistamalla ylimääräiset termit pois saadaan nopeudelle lopullinen yhtälö

$$v = \frac{c f_d}{2 f_e}. \quad (20)$$

Yhtälö (20) on sama, joka saataisiin, jos nopeus johdettaisiin käyttäen Dopplerin yhtälöä. On kuitenkin olennaista muistaa, että ilmiö tämän taustalla ei ole sama [19].

#### 4.3.6 Menetelmän rajoitukset

Pulssitetun ultraäänen käyttö asettaa mittaamiselle omat rajoituksensa. Pulssintoistotaajuus määrää suoraan sen, kuinka kaukana olevien kohteiden nopeuksia voidaan mitata. Jokaisen lähetetyn pulssin kaiku pitää ehtiä mitata ennen seuraavan pulssin lähetystä, jotta kaiut eivät mene sekaisin keskenään. Näin ollen suuremmilla mittaussyvyyksillä joudutaan käyttämään matalampaa pulssintoistotaajuutta ja mittauksen aikaresoluutio on heikompi. Yhtälömuodossa suurin mittaussyvyys voidaan ilmaista

$$z_{max} = \frac{t_{PRFC}}{2}. \quad (21)$$

Suurin mitattava nopeus voidaan ratkaista Nyquistin teoreeman avulla, jonka mukaan mitattavasta signaalista pitää ottaa näytteitä vähintään kaksi kertaa niin suurella taajuudella kuin mitattavassa signaalissa esiintyvä suurin taajuus on [16]. Käytännössä tämän voi ymmärtää siten, että mitä nopeampia muutoksia halutaan tutkia, sitä tarkkaavaisempi pitää olla. Tätä soveltamalla saadaan ratkaistua suurimmalle mitattavalle nopeudelle yhtälö. Sijoittamalla yhtälöön (20) Dopplerin siirtymää vastaavaa tajuus kaksinkertaisena ja esittämällä se pulssintoistoajan avulla saadaan

$$v_{max} = \frac{c}{4t_{PRF}f_e}. \quad (22)$$

Kertomalla yhtälöt (21) ja (22) keskenään saadaan suurimman mitattavan nopeuden ja mittaussyvyuden välinen riippuvuus selville ja se on muotoa

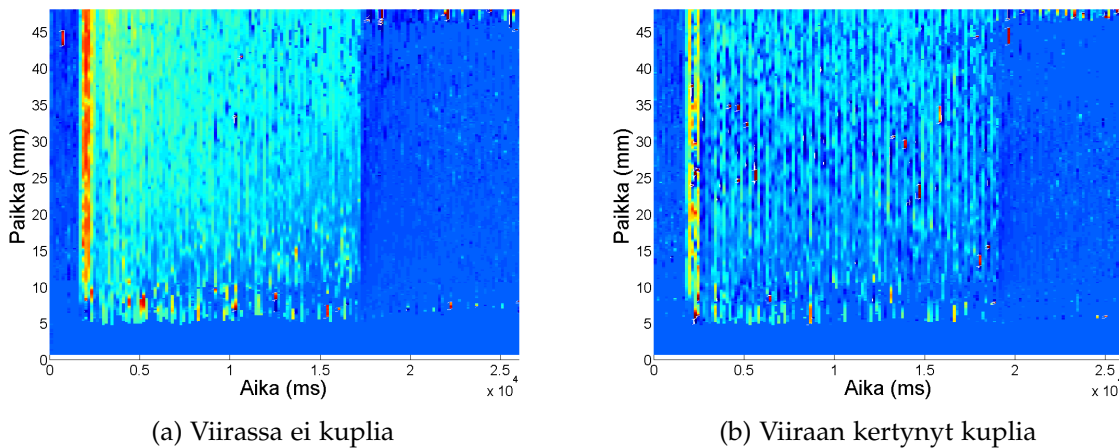
$$z_{max}v_{max} = \frac{c^2}{8f_e}. \quad (23)$$

Voidaan todeta, että mittaussyvyuden ja käytössä olevan nopeusskaalan välillä joudutaan aina tekemään kompromissi. Molempia ei voi saada suuriksi yhtä aikaa vaan toisen kasvattaminen heikentää aina toista.

## 5 Testimittaukset ja havaitut ongelmat

### 5.1 Ilmakuplat ja niiden aiheuttamat ongelmat

Suurimmaksi mittausta haittaavaksi tekijäksi havaittiin hyvin pian laitteistoon pääsevä ilma. Viiran alle kertyi nopeasti paljon ilmaa, joka pilasi nopeuden mittauksen ultraäänellä. Ilmakuplat hajottavat ultraääniaaltoja tehokkaasti [21][s.602] ja näin ollen kuitujen nopeuden mittaaminen epäonnistuu. Käytännössä tämä näkyi niin, että mikäli ultraäänianturin edessä oli suurempi, selvästi silmin havaittava kupla, minkäänlaista nopeusprofiilia ei saatu mitattua. Mikäli viiraan kertyi hyvin pieniä, juuri ja juuri silmin havaittavia kuplia harsoksi, alkoi mittausten laatu heiketä voimakkaasti. Nopeusprofiili saatiin mitattua, mutta se ei ollut läheskään yhtä siisti ja sisälsi paljon enemmän nolladataa kuin ilman kuplaharsoa. Kuvassa 8 on havainnollistettu mitatun datan heikkenemistä pienten ilmakuplien vaikutuksesta.



Kuva 8: Vertailukuvat viiraan kertyneiden pienten ilmakuplien vaikutuksesta nopeuskentän mittaamiseen ultraäänellä. Kuvassa 8a ultraäänianturin tuottama nopeuskenttä juuri kuplista puhdistetun viiran läpi mitattuna ja kuvassa 8b saman anturin tuottama nopeuskenttä kymmenen suotautusta myöhemmin.

### 5.2 Häiriöt paineen mittauksessa

Painekäyrään ja nopeuskenttään havaittiin ilmestyvän jokaisen mittauksen aluksi terävä ja nopea vaihtelu ylös ja alas heti pohjaventtiilin avaamisen jälkeen. Tämän pääteltiin johtuvan paineen muutoksista suotautumislaitteen putken sisällä. Kun kuitususpension pinta lähtee laskeutumaan, syntyy putken sisälle alipaine, koska ilmaa ei ehdi virrata sisään samaa tahtia. Alipaineen kasvaessa riittävän suureksi, se imaisee putken sisälle

ylipaineen, joka puolestaan painaa suspensiota alaspäin. Näin ollen putkessa oleva kuitususpensio käyttäytyy värähtelevän jousen tavoin mittauksen alkuvaiheessa. Ilmiö tasaantuu hyvin nopeasti mittauksen alettua, mutta on selvästi havaittavissa.

Tällainen käytös ei selvästikään kuulu tutkittavaan ilmiöön ja siitä aiheutuu ainakin kahdenlaisia ongelmia. Käytetty teoreettinen malli ei soviu siihen millään tavalla, mikä haittaa tulosten käsittelyä. Lisäksi paineen vaihtelu aiheuttaa mitattuihin nopeuksiin paljon suuremmat huippuarvot kuin mitä suotautuksessa oikeasti esiintyy. Näin ollen nopeutta mitattaessa joudutaan käyttämään paljon suurempaa skaalaa kuin todellisuudessa tarvittaisiin ja mittaustarkkuus kärsii.

### **5.3 Pinnankorkeuden vaihtelut**

Tavoitteena on saada suotautukset keskenään mahdollisimman samanlaisiksi, jotta dataa voitaisiin kerätä tekemällä useita vastaavia mittauksia ja lopuksi keskiarvoistaa saadut tulokset. Näin ollen kaikkien suotautusten pitäisi kestää yhtä kauan ja alkaa sekä päättyä aina samoihin pisteisiin. Suotautusten vastaavuutta ajan ja paikan suhteen voidaan tutkia piirtämällä samaan kuvaan useamman mittauksen pinnankorkeudet ajan funktiona. Tällaisesta kuvaajasta on helppo nähdä, kuinka tarkasti laitteisto pystyy toistamaan mittauksia. Parhaassa tapauksessa kaikki saadut käyrät menisivät tietenkin aivan päällekkäin.

Aloituspinnankorkeuden havaittiin vaihtelevan jopa yli senttimetrillä eri mittausten välillä. Ongelma korostui, mikäli suotautuksessa haluttiin tehdä pysäytyksiä. Näin suurien erojen takia mittaukset eivät vaikuttaneet erityisen hyvin toistettavilta.

### **5.4 Kuitujen määrä**

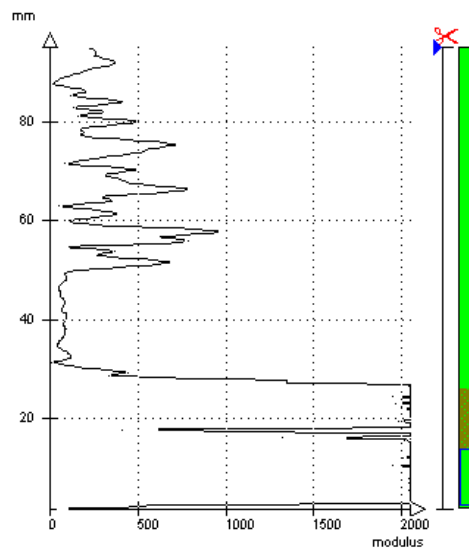
Testisuotautuksia tehtiin eri määrillä kuituja parhaan koostumuksen selvittämiseksi mittauksia varten. Kuitumassoja kokeiltiin väliltä 10-35 grammaa ja parhaaksi määräksi valikoitui 15 grammaa. Suuremmilla kuitumäärillä ultraääni heikkeni niin paljon, että nopeuden mittaus kauempana viirasta hankaloitui. Yli viiden senttimetrin päässä viirasta alkoi nopeuskenttään ilmestyä selvästi nolladataa, kun kuituja käytettiin 25-35 grammaa. Pienillä massoilla taas kuitukakku jäi ohueksi ja viiran lähellä havaitta-

vien pienten nopeuksien mittaaminen hankaloitui. Nämä pienet nopeudet sisältävät käytetyn mallin kannalta olennaista tietoa, joten kuitujen määrää piti lisätä.

## 5.5 Ultraääni-Dopplerin säätöjen rajoittuneisuus

Käyttäjän kannalta DOP2000 laitteen säädöt eivät tarjoa kaikilta osin riittävästi vaikuttamisen mahdollisuuksia. Yksi hyvin rajoittava tekijä on, ettei multipleksausta käytettäessä voi tehdä asetuksia anturikohtaisesti vaan kaikki anturit mittaavat täsmälleen samoilla asetuksilla. Suurin osa asetuksista on tällaisessa tilanteessa tarkoituskin pitää samoina, mutta vahvistusprofiilia olisi hyvä voida säätää anturikohtaisesti. Kaikki anturit ovat aina hieman erilaisia ja käytettäessä useaa anturia on todennäköistä, että jonkun vastaanottama kaikuprofiili on merkittävästi heikompi tai voimakkaampi kuin muiden. Näin ollen joudutaan tekemään kompromisseja kaikuprofiilin vahvistuksen säädössä ja joku, tai jotkut, antureista saavat liikaa tai liian vähän kaikua.

Laitteelta kaipaisi myös enemmän vahvistusta mitatulle kaikuprofiilille. Tämä helpottaisi ainakin 8 megahertsin antureilla tehtäviä mittauksia ja mahdollistaisi laadukkaamman datan keruun kauempana antureista. Suurempi vahvistus auttaisi myös heikommin kaikua saavien anturien kanssa mitattaessa.



Kuva 9: Esimerkki kaikuprofiilin säätämisen ongelmista. Oikean laidan vihreään vahvistuspalkkiin määritetty tumma alue ei heikennä kaikua omalta kohdaltaan vaan selvästi ylempää.

Vahvistusprofiilin säätö ei käyttäydy niin kuin voisi olettaa. Tätä on havainnollistettu

kuvassa 9. Kuten kuvasta voidaan todeta, vahvistuspalkkiin määritellyt vahvistusalueet eivät vaikuta omalle kohdalleen kaikuprofiilissa kuten pitäisi. Kaiken lisäksi tämä poikkeama riippuu siitä, missä kohtaa vahvistuspalkkia liikutaan. Yläpäässä palkkia virhettä tuntuu olevan enemmän kuin alapäässä. Vahvistusalueiden koon, paikan ja voimakkuuden säätäminen tapahtuu vielä portaittain, mikä saattaa hankaloittaa halutunlaisen vahvistusprofiilin muodostusta. Vahvistuspalkkien rajakohdat voivat jäädä selvästikin näkymään lopullisessa nopeusprofiilissa, koska niitä on vaikea sovittaa tarkasti yhteen.

Toinen säätö, jonka käytöksessä on epäloogisuutta, on mittauksen aloituspisteen määrittäminen. Mikäli aloituspisteeksi määrättiin vaikka viisi millimetriä, saattoi kaikuprofiili mennä nolleen monta kertaa pidemmältä matkalta. Näin ollen havaittiin parhaimmaksi pitää aloituspisteen vain mahdollisimman pienenä, ettei se haittaisi mittausta. Mittaus tuottaa näin ollen turhaa dataa esimerkiksi viiran alla tapahtuvista asioista, mutta ne voidaan leikata pois myöhemmin.

## 6 Mittauslaitteistoon tehdyt parannukset

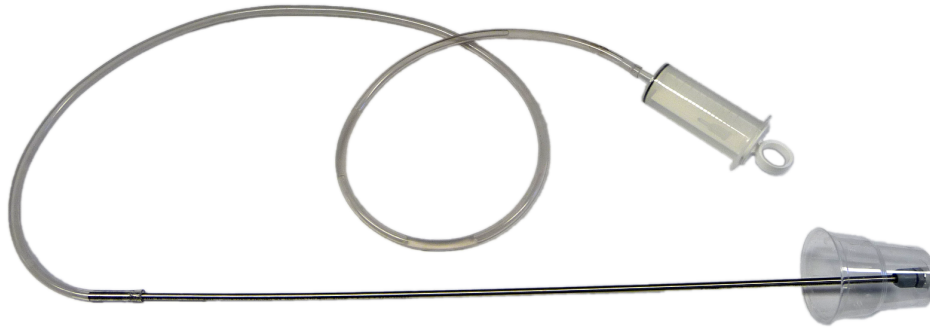
### 6.1 Veden seisottaminen ja laitteiston ilmaaminen

Suurimmaksi haitaksi mittausten kannalta todettiin siis ilma, jota päätyi laitteistoon eniten vesijohtoveden mukana. Tähän ongelmaan ratkaisuna mittauksessa käytettävä vesi laskettiin lämpimänä 500 litran tankkiin, jossa sen annettiin seisoa yön yli. Seisottamisen aikana vedessä oleva ilma poistui ja nousi pintaan, mikä oli helppo havaita myös paljaalla silmällä. Mittaukseen tarvittava vesi pumpattiin suotautumislaitteeseen tankin pohjalta.

Seuraavaksi suotautumislaitteen vesisäiliöstä löydettiin suuri ilmatasku, josta kuplia pääsi nousemaan viiran alle aina vedenpintaa nostettaessa ja laskettaessa. Ainoaksi keinoksi tämän ongelman poistoon todettiin taskun ilmaaminen aina ennen mittauksia. Ilmaukseen käytettiin suihkuvesipumppua, johon oli kiinnitetty letku ilman imemistä varten. Vedenpinta nostettiin suotautumislaitteessa viiratelineen alapinnan tasolle siten, että viirateline ja suotautumisputki olivat poissa paikaltaan. Tämän jälkeen tasku imettiin tyhjäksi ilmasta ja laitteisto koottiin. Mittauksia tehdessä piti muistaa olla laskematta veden pintaa liian paljon viiran alle, jotta tasku pysyi ilmattuna.

Laitteiston tiivisteiden havaittiin vuotavan rungon, viiratelineen ja suotautusputken välistä. Tiivisteet olivat hyvin kovettuneita ja ne päätettiin vaihtaa uusiin ja pehmeämpiin versioihin. Väliin laitettiin vaseliinia tiiveyden varmistamiseksi. Laitteesta löytyi myös vuotava sauma, joka tiivistettiin silikonilla. Näillä toimenpiteillä välit saatiin hyvin tiiveiksi ja kaikenlainen vuotaminen loppui.

Laitetta täytettäessä vedellä ilmaa jää aina aluksi jonkin verran viiran alle ja se pitää poistaa sieltä ennen mittausten aloittamista. Tätä tarkoitusta varten rakennettiin yksinkertainen imuri suuresta muoviruiskusta, letkusta ja ohuesta teräsputkesta. Ruiskulla pystyttiin näin imemään letkun ja teräsputken avulla ilmakuplat viiran läpi yläkautta suotautusputken ollessa paikoillaan. Teräsputken päähän kiinnitettiin vielä kirkkaasta muovista valmistettu kertakäyttömuki, jonka avulla viira oli mahdollista nähdä ja kuplat poistaa myös mittausten välillä kun laitteessa oli kuitususpensiota. Rakennettu imuri on esitetty kuvassa 10.



Kuva 10: Kuplien poistamiseen viiran alta rakennettu imuri.

## 6.2 Ilmalukon rakentaminen

Yhdeksi ilman lähteeksi havaittiin myös pohjaventtiilin avaaminen. Venttiilin jälkeen vesi johdettiin ulos laitteesta lyhyen, suoraan alaspäin osoittavan putken kautta. Näin ollen venttiilin ulkopuolella oli aina ilmaa odottamassa ja venttiilin auettua sitä pääsi nousemaan laitteen vesisäiliöön ja sitä kautta viiran alle.

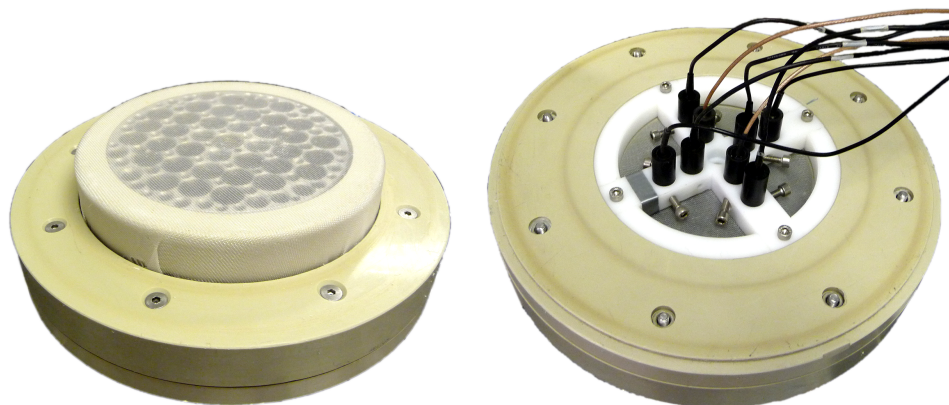
Tähän ongelmaan ratkaisuksi rakennettiin pohjaventtiiliin letkusta ilmalukko. Letku kiinnitettiin pohjaventtiiliin, minkä jälkeen sillä tehtiin silmukka 50 cm pohjaventtiilin tason yläpuolella ennen kuin vesi johdettiin viemäriin. Tämä takasi sen, että pohjaventtiilin molemmilla puolilla on aina vettä ennen avaamista eikä ilmaa pääse nousemaan laitteeseen.

Ilmalukosta on mittauksen kannalta muutakin hyötyä. Siellä oleva vesi luo vastapaineen joka hidastaa laitteen tyhjenemistä ja näin ollen suotautumisen nopeutta saadaan rajoitettua. Samasta syystä pohjaventtiilin auettua suotautuminen alkaa rauhallisemmin ja tämä vähentää paineen mittauksessa havaittuja häiriöitä. Letkun avulla saatiin myös laitteesta ulos tuleva vesi johdettua suoraan ja siististi lattiakaivoon. Tämä mukavoittaa työskentelyä, kun vesi ei leviä pitkin lattiaa ja mittaajan ei tarvitse käyttää kumisaappaita tehdessään mittauksia.

## 6.3 Toisen viiran asennus

Ilmakuplista on haittaa mittaukselle vain, jos ne pääsevät anturien eteen häiritsemään ultraäänen kulkua. Kuten aiemmin oli huomattu viirakangas on niin tiheään punottua, että ilmakuplat kertyvät sen alle eivätkä onnistu läpäisemään sitä pelkän nosteen vaikutuksesta. Tämän takia päädyttiin asentamaan toinen viira varsinaisen alapuolelle,





(a) Viirakehikko yläpuolelta

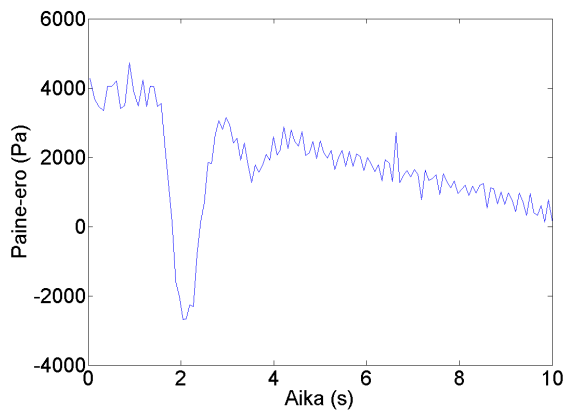
(b) Viirakehikko alapuolelta

Kuva 11: Viira ja viirakehikko sekä ylä- että alapuolelta. Kuvassa 11a näkyy viira jolla suotautuminen tapahtuu. Kuvassa 11b on viirakehikko alapuolelta ja siinä näkyy anturiteline sekä ilmakuplien pyydystämistä varten kiinnitetty alempi viira.

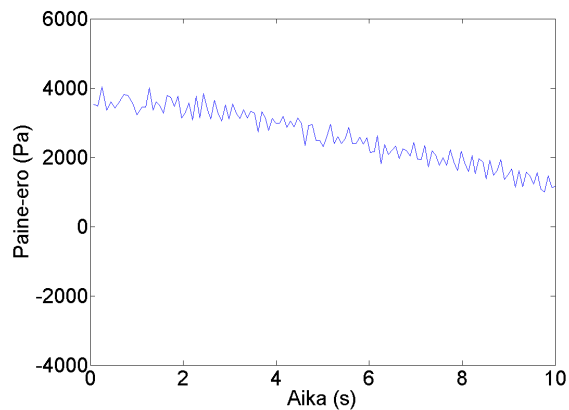
minkä tarkoituksena on estää ilmakuplien pääsy antureille asti. Uusi viira kiinnitettiin anturitelineeseen niin, että sen ja varsinaisen viiran väliin jäi muutama sentti tilaa. Tähän välitilaan ei ilmaa pitäisi päästä mistään vuotamaan, joten kaikki mahdollisesti veden mukana tai venttiileistä tulevat kuplat jäivät sen alle. Ultraääniantureita varten uuteen viiraan tehtiin reiät ja anturien juuret tiivistettiin o-renkailla. Kuvassa 11 on esitetty viirakehikko ja siihen kiinnitetty anturiteline ylä- ja alapuolelta.

#### 6.4 Kuristusventtiilin lisäys

Paineen mittauksessa ilmenneiden häiriöiden poistamiseksi pohjaventtiilin perään asennettiin käsikäyttöinen venttiili, jolla voidaan säätää veden virtausnopeutta suotautumisen aikana. Näin ollen voidaan korvausilmaventtiili pitää täysin auki, jolloin putkeen ei pääse syntymään paineen vaihteluita ja jousimainen käytös jää mittauksen alusta pois. Koska paineilmalla avattava pohjaventtiili aukeaa aina täysin auki, oli aiemmin suotautumisen nopeutta säädettävä kuristamalla korvausilmaventtiiliä. Mikäli se oli täysin auki, tapahtui suotautuminen liian nopeasti. Kun asennettua käsikäyttöistä kuristusventtiiliä avattiin noin  $50^\circ$ , saatiin suotautuminen tapahtumaan sopivalla nopeudella. Kuvassa 12 on esitetty paineen käytös ennen ja jälkeen kuristusventtiilin asennuksen.



(a) Paine-ero ilman kuristusventtiiliä



(b) Paine-ero kuristusventtiilin kanssa

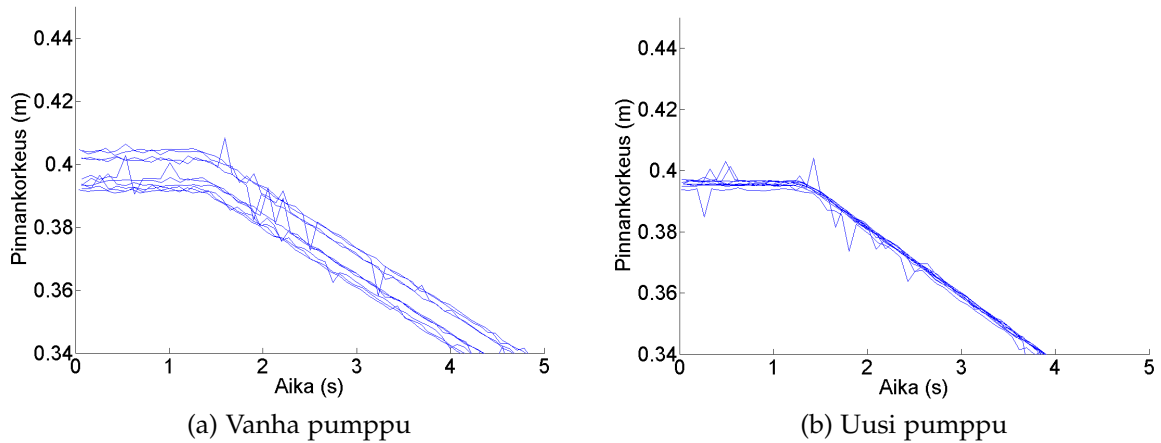
Kuva 12: Vertailukuvat paine-erosta suotautuksen alussa ennen ja jälkeen kuristusventtiilin asennuksen. Kuristusventtiilillä saatiin suotautumisen nopeus rajoitettua halutuksi ja korvausilmaventtiili voitiin pitää täysin auki. Näin päästiin eroon kuvassa 12a näkyvästä putkeen syntyvän alipaineen aiheuttamasta piikistä.

## 6.5 Pumpun vaihtaminen

Suurimmaksi syylliseksi suotautuksen aloituspinnankorkeuden vaihteluihin havaittiin tankista suotautumislaitteeseen vettä siirtävä pumppu. Se oli liian suuritehoinen käyttötarkoitukseen nähden ja nosti veden pintaa epätasaisesti sykäyksittäin. Tavoitteena oli saada pinta nousemaan putkessa hitaasti ja tasaisesti, jotta pinnankorkeusanturi saisi sen paikan määritettyä tarkemmin ja pinta saataisiin pysähtymään aina samaan paikkaan.

Ongelma päätettiin ratkaista hankkimalla paremmin käyttötarkoitukseen sopiva pumppu. Valinta kohdistui ROYAL RDP 3530 malliseen uppopumppuun, jonka teho on 350 W ja suurin nostokorkeus 5 metriä. Uppopumppu todettiin parhaaksi vaihtoehdoksi asennuksen helppouden ja niiden hyvän saatavuuden takia. Pumppu upotettiin tankkiin, jossa vettä seisotettiin ja se laitettiin pumppaamaan vettä Y-haaraan, josta toinen reitti johti suotautumislaitteeseen ja toinen palasi ohikiertona takaisin tankkiin. Näin ollen pumppu sai pyöriä koko ajan ja vettä saatiin laitteistoon aina tarvittaessa.

Pumpun vaihtamisen havaittiin auttavan todella paljon pinnankorkeudessa tapahtuviin vaihteluihin. Pinta saatiin nousemaan putkessa rauhallisesti ja tasaisesti kuten oli tavoitteenakin. Parannuksen pystyy havaitsemaan kuvasta 13 jossa on koottu pinnankorkeuden vaihteluita uudella ja vanhalla pumpulla. Hajonnan voidaan sanoa pienentyneen noin yhteen kolmasosaan.



Kuva 13: Pinnankorkeuksien vaihtelut ennen ja jälkeen pumpun vaihdon. Kuvassa 13a on kymmenen mittauksen pinnankorkeudet vanhalla ja kuvassa 13b kymmenen mittauksen pinnankorkeudet uudella pumpulla. Kuvaajat on piirretty suoraan pinnankorkeusanturin tuottamasta datasta ja sen takia niissä näkyy teräviä piikkejä. Ne ovat pinnankorkeusanturin tuottamia häiriöitä, jotka suodatettiin pois ennen datan käyttöä.

Pumpun vaihtamisella päästiin myös lähes kokonaan eroon viiran alle kertyneistä hyvin pienistä ilmakuplista. Tähän syynä on varmasti se, että nyt pumppu ja letkuliitokset sijaitsevat veden alla, jolloin ilmaa ei pääse vuotamaan mistään. Lisäksi ohikierron takia pumppu voi käydä koko ajan toisin kuin aiemmin käytetty pumppu.

## 6.6 4 MHz:n ja 8 MHz:n anturien käyttäminen nopeuskentän muodostuksessa

Käytettävissä olleilla 4 MHz:n ja 8 MHz:n antureilla on molemmilla omat hyvät ja huonot puolet mittauksen kannalta. Suuremmalla taajuudella saadaan tarkempia tuloksia, mutta suuremman taajuuden ultraääni ei kanna kuitumassassa yhtä kauas kuin pienemmän. Näin ollen päädyttiin järjestämään mittaus niin, että molempien antureiden hyvät puolet saadaan käyttöön. 8 MHz:n antureilla mitattiin viiran lähialuetta ja siinä esiintyviä pieniä nopeuksia. Tämä alue on mallin sovittamisen kannalta erittäin olennainen ja siitä on tärkeää saada mahdollisimman tarkkaa tietoa. Mittaamalla 8 MHz:n antureilla läheltä viiraa saatiin käyttöön niiden tarjoama hyvä tarkkuus mutta, ei jouduttu kärsimään huonosta kantomatkasta. 4 MHz:n antureilla puolestaan mitattiin kauempana viirasta esiintyviä suuria nopeuksia. Tällä tavoin voitiin hyödyntää niiden tarjoama suurempi kantomatka. Mallin kannalta heikompi mittaustarkkuus ei ole tällä alueella suuri ongelma, joten 4 MHz:n anturit soveltuivat tähän käyttöön hyvin.

## 7 Suotautumismittaukset

### 7.1 Mittausten suorittaminen käytännössä

Mittausten suorittamista varten ultraäänianturit asetettiin 6,7 millimetrin päähän viirasta. Näin anturien lähialue, jossa mittaaminen on epätarkempaa, jää viiran alle ja varsinaiset tulokset saadaan mitattua optimaalisemmalla kaukoalueella. Antureiden kohdistaminen tapahtui tarkoitusta varten rakennetulla välaysmitalla, jonka paksuus oli 6,7 millimetriä. Tämä asetettiin viiran ja anturin väliin ja anturikehikko laitettiin paikalleen. Tämän jälkeen anturi kiinnitettiin kehikkoon niin, että sen ja viiran väliin mahtui jäämään vain välaysmitta. Kun anturi oli kiinnitetty kehikkoon, voitiin kehikko irroittaa viiratelineestä ja siirtää välaysmitta seuraavan anturin kohdalle. Tällä tavalla kohdistettiin neljä anturia ja loput neljä saatiin samaan tasoon näiden kanssa asettamalla kohdistettujen anturien kärjet tasaista pöydän pintaa vasten ja säätämällä loput anturit myös pöydänpinnan tasoon.

Viiran paikan antureihin nähden näkee myös ultraääni-Dopplerin näytöltä kaikuprofiilin kuvaajasta. Ultraääni kaikuu viirasta voimakkaasti, mikä näkyy terävänä piikkinä kaikuprofiilissa. Asiaa tutkittiin tarkemmin laittamalla suotautusputken varren päähän kiinnitetty pleksilevy ja liikuttamalla sitä edestakaisin. Tällöin kaikuprofiilissa havaittiin samaan tahtiin liikkuva piikki. Kun levy laskettiin viiraan kiinni, sen aiheuttama piikki yhtyi täydellisesti viiran aiheuttamaan piikkiin. Näin voitiin todentaa aiemmin havaitun piikin todella johtuvan viirasta.

Mittauksia tehtiin kuudelle erilaiselle suotautukselle, joista kullekin mitattiin kymmenen mahdollisimman identtistä toistoa. Näillä toistoilla kerättyä dataa keskiarvoistamalla muodostettiin kyseistä suotautusta esittävät kuvaajat. Ensiksi mittaukset tehtiin normaalille suotautukselle, jossa puukuitususpension pinnan annettiin laskea annetusta lähtökorkeudesta ennalta määrättyyn loppukorkeuteen. Muissa tapauksissa suotautuminen pysäytettiin puolivälissä eri mittaisiksi ajoiksi.

Kussakin mittauksessa pinnan lähtökorkeudeksi putkessa asetettiin 400 millimetriä ja loppukorkeudeksi 200 millimetriä. Pysäytykset määritettiin joka kerta 300 millimetrin korkeuteen. Jokaisen suotautuksen jälkeen saadusta datasta piirrettiin pinnankorkeuden ja paine-eron kuvaajat sekä nopeuskenttä. Pinnankorkeudet koottiin koko mittauksen ajan samaan kuvaajaan, jonka avulla voitiin valvoa mittauksien toistetta-

vuotta. Mikäli yksittäisen toiston pinnankorkeudet poikkesivat merkittävästi aloituksen, pysäytyksen tai lopetuksen kohdalla muista, tehtiin toisto uudestaan. Käytetyllä laitteistolla havaittiin pinnankorkeuksien olevan mahdollista saada asettumaan noin kahden millimetrin sisään toisistaan. Tätä suuremmat erot tulkittiin epäonnistuneiksi mittauksiksi.

Nopeuskentät tarkastettiin jokaisen toiston jälkeen, jotta voitiin olla varma datan tasalaatuisuudesta. Mikäli nopeuskentän havaittiin eroavan merkittävästi aiemmin mitatuista, hylättiin kyseinen toisto ja se tehtiin uudestaan. Mahdolliset erot nopeuskentissä johtuivat tuntemattomista satunnaisista tekijöistä, jotka saattoivat haitata muutamaa prosenttia mittauksista. Yleisempi ongelma oli viiraan kertyneet ilmakuplat, joita välillä ilmestyi kaikista korjaustoimenpiteistä huolimatta. Näistä pääsi kuitenkin helposti eroon imuroimalla ne viiran läpi.

## 7.2 Tulosten käsittely

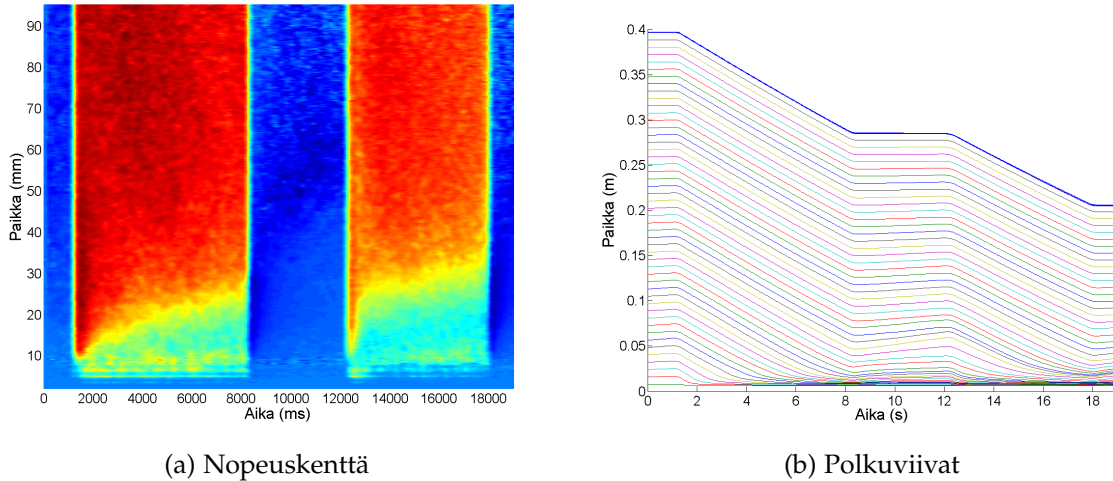
Mittauksesta saadaan tuloksena nopeuskenttä eli kuitukerrosten nopeudet eri syvyyksillä ajan funktiona. Lisäksi saadaan veden paine viiralla ja pinnankorkeus ajan funktiona, jonka perusteella voidaan laskea kokonaisvuo. Näiden tietojen avulla lasketaan kuitukerroksille polkuviivat, kuitujen ja veden tilavuusosuudet paikan suhteen ja kuituverkoston rakennepaine käyttäen kappaleessa 3 annettuja malliyhtälöitä.

Kaikki mittausdatan käsittely ja kuvaajien piirtäminen suoritetaan MATLABilla, joka on The MathWorks-yhtiön ylläpitämä numeeriseen laskentaan tarkoitettu ohjelmisto ja siinä käytettävä ohjelmointikieli [22]. Datan käsittelyä varten on käytössä Arttu Miettisen kirjoittama ohjelma. Kustakin erilaisesta suodatuksesta muodostetaan ensin keskiarvoistettu ja suodatettu nopeuskenttä ja ratkaistaan termi  $a$  permeabiliteetin laskemista varten. Tämän jälkeen nopeuskentästä lasketaan ja piirretään kuitukerrosten polkuviivat ajan funktiona. Rakennepaineen arvot piirretään muutamalle kuitukerrokselle kuitujen tilavuusosuuden funktiona. Seuraavaksi käydään läpi mittausdatan käsittely vaihe vaiheelta.

1. Mitatusta nopeuskentästä lasketaan kuitukerroksille polkuviivat suodatuksen aikana. Laskeminen tapahtuu yhtälöllä

$$\frac{dz_s^i}{dt} = \tilde{u}_s(t, z_s^i). \quad (24)$$

Polkuviivat saadaan nopeuskentästä numeerisesti integroimalla. Kuvassa 14 on esimerkkinä eräs mitattu nopeuskenttä ja siitä lasketut polkuviivat.



Kuva 14: Eräs mitattu nopeuskenttä ja siitä numeerisesti integroimalla saadut polkuviivat kuitukerroksille.

2. Lasketaan kullekin kuitukerrokselle logaritminen jännitys yhtälöllä (15).
3. Logaritmissen jännityksen avulla lasketaan tilavuusosuudet kuiduille ja vedelle kullakin kuitukerroksella yhtälön (14) ja tiedon  $\phi_f = 1 - \phi_s$  avulla.
4. Saatuja tilavuusosuuksia käytetään suotautuvassa massassa vallitsevan kokonaispaineen ratkaisemiseen. Kokonaispainelle  $p_T$  saadaan yhtälö laskemalla yhteen yhtälöt (4) ja (5) jolloin saadaan

$$\frac{\partial}{\partial z} p_T = \frac{\partial}{\partial z} (\tilde{p}_f + p_s) = -(\phi_f \tilde{\rho}_f + \phi_s \tilde{\rho}_s)g = -\rho g \quad (25)$$

missä  $\rho$  on kuitususpension kokonaistiheys. Kokonaispaine saadaan tästä integroimalla pinnalta viiralle ja käyttämällä reunaehtoa jonka mukaan kokonaispaine pinnalla on 0. Tämä johtuu siitä, että kaikki mitatut paineet on suhteutettu ilmanpaineeseen.

5. Lasketaan kokonaisvuo  $q_T$  mittauksesta saadun pinnankorkeusdatan avulla. Veden nopeus voidaan tämän jälkeen ratkaista yhtälöstä (9) ja laskea saadun kokonaisvuon avulla.
6. Lasketaan yhtälöä (6) käyttäen termi  $D$ . Tähän tarvitaan edellisessä kohdassa ratkaistu veden nopeus ja kuitujen nopeus, joka saadaan suoraan mitatusta nopeuskentästä. Lisäksi tarvitaan permeabiliteetti  $k$ . Tätä varten pitää selvittää kaavassa (7) esiintyvä termi  $a$ . Se voidaan ratkaista sovittamalla teoreettisesti laskettu paine viiralla mitattuun paineeseen.
7. Ratkaistaan veden paine integroimalla yhtälöä (4) pinnalta viiralle ja käyttämällä reunaehtoa jonka mukaan veden paine pinnalla on 0.
8. Koska kokonaispaine ja veden paine on saatu ratkaistua, voidaan rakennepainetta laskea Terzaghin periaatteella  $p_s = p_T - \tilde{p}_f$ .

### 7.3 Mittauksissa käytetyt ultraääni-Dopplerin asetukset

Mittauksissa ultraääni-Dopplerille käytetyt asetukset on listattu taulukkoon 1. Neljän- ja kahdeksan megahertsin antureille käytettiin samoja asetuksia kahta poikkeusta lukuunottamatta. Pulssintoistotaajuudet erosivat toisistaan, sillä eri antureilla mitattiin eri kohtia nopeuskentästä ja näin ollen eri suuruisia nopeuksia.

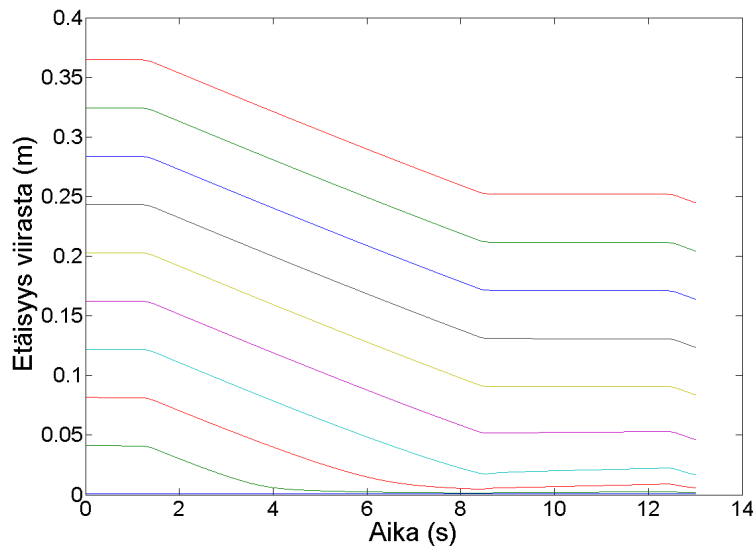
Taulukko 1: Mittauksissa ultraääni-Dopplerille käytetyt asetukset. Pulssintoistotaajuus ja porttien lukumäärä riippuvat anturin taajuudesta, joten ne on ilmoitettu molemmille antureille erikseen.

Asetus	Käytetty arvo
PRF 8 MHz	917 Hz
PRF 4 MHz	500 Hz
Pulssipaketin pituus	8
Emissiot profiilia kohden	8
Lähetysteho	Keskitaso
Herkkyys	Korkea
Porttien lukumäärä 8 MHz	169
Porttien lukumäärä 4 MHz	500
Mittauksen aloituspiste	1,5 mm
Resoluutio	0,19 mm
Nopeuskaala	2

Toinen eroava asetus oli porttien lukumäärä. Kahdeksan megahertsin antureilla mitattiin nopeuskentästä viiran lähellä oleva alue noin kolmeen senttimetriin asti. Neljän megahertsin antureilla puolestaan mitattiin nopeuksia kauempana viirasta lähes kymmenen senttimetrin etäisyyteen asti.

#### 7.4 Mittausdatan käyttäminen mallinnuksessa

Mallin avulla muodostetaan polkuviivat ja rakennepainekäyrät kuitukerroksille teoreettisesti annettujen lähtötietojen pohjalta. Mallille annetaan mitatusta pinnankorkeusdatasta saatu kokonaisvuo  $q_T$ , mittauksesta sovittamalla saatu Kuwabaran permeabiliteettifunktiossa esiintyvä termi  $a$  ja kuitujen määrä suotautuksessa. Lisäksi annetaan mittausdataan sovittamalla saadut, yhtälössä (11) esiintyvät termit  $E_i$  ja  $\lambda_i$ . Tämän jälkeen polkuviivat voidaan mallintaa integroimalla yhtälöä (8) ajan suhteen lähtötilanteesta eteenpäin. Kuvassa 15 on esitetty eräälle suotautukselle mallinnetut polkuviivat. Saatujen polkuviivojen avulla voidaan laskea rakennepainne. Ensin lasketaan yhtälöllä (15) logaritminen jännitys ja sen jälkeen kuitujen tilavuusosuus yhtälöllä (14). Tämän jälkeen voidaan laskea rakennepainne yhtälöllä (13).



Kuva 15: Esimerkki mallinnetuista polkuviivoista.



## 8 Tulokset

### 8.1 Kuituanalyysin tulokset

Ennen varsinaisten mittausten tekoa haluttiin selvittää, voiko samaa kuitususpensiota käyttää useissa suotautuksissa peräkkäin vai muuttuvatko sen ominaisuuden merkittävästi suotautusten myötä. Tätä varten toimitettiin näytteet aivan uudesta ja useita kertoja testimittauksissa suotautetusta kuitususpensiosta analysoitaviksi. Eniten kiinnosti muutokset suspension sisältämässä hienoaineen osuudessa. Mikäli tällaiset hyvin pienet kuitujen osat pääsisivät kulkemaan viiran läpi ja näin poistumaan suspensiosta, voisi sen käytös muuttua useiden suotautusten seurauksena.

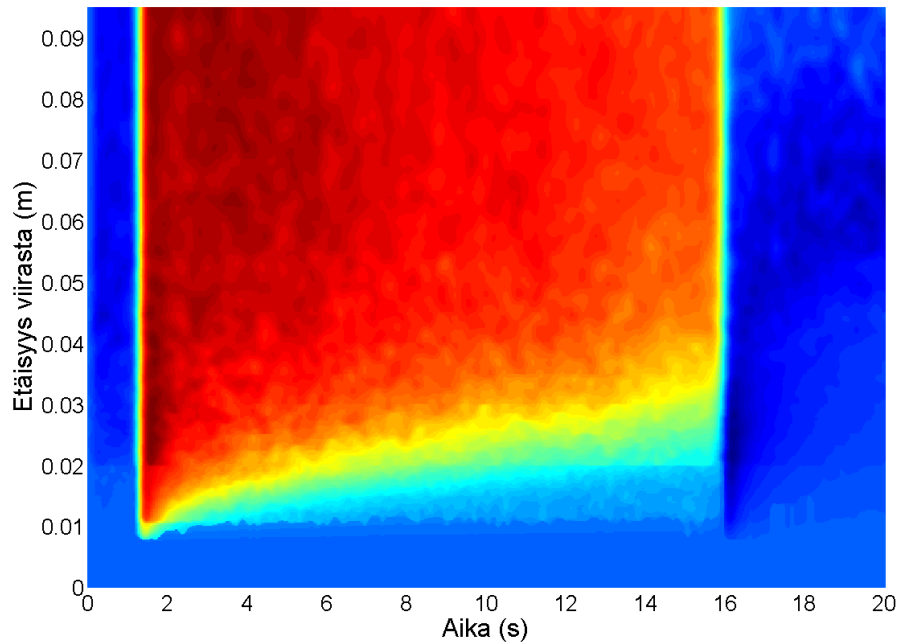
Tulokset osoittivat hienoaineen pitoisuuden laskeneen vain noin kolme prosenttiyksikköä useiden kymmenien suotautusten seurauksena. Suurempien kuitujen osuudet olivat muuttuneet vieläkin vähemmän tai eivät juuri ollenkaan. Koska mittauksissaan ei huomattu mitään eroa suspension käytöksessä toistojen lisääntyessä, pääteltiin samaa suspensiota voitavan käyttää useissa perättäisissä suotautuksissa.

Kuwabaran permeabiliteettifunktiota varten ratkaistiin termi  $a$  kullekin suotautukselle erikseen sovittamalla mallin antama paine viiralla mitattuun paineeseen. Saadut arvot on esitetty taulukossa 2. Kuituanalyysin mukaan tutkittavassa suspensiossa esiintyi kuituja, joiden säteet vaihtelivat välillä 10-17  $\mu\text{m}$ . Taulukossa 2 esitetyt termin  $a$  arvot osuvat pääosin tälle välille. Tämä on luonnollista sillä Kuwabaran permeabiliteettifunktio on johdettu sylinterin muotoisista kappaleista koostuvalle huokoiselle aineelle. Kuituverkoston voidaan ajatella olevan kohtuullisen lähellä tällaista.

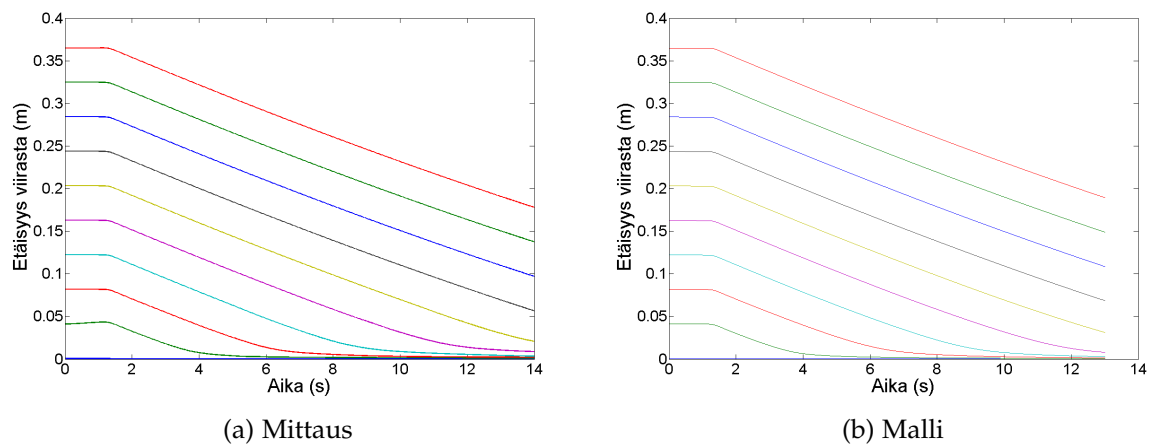
Taulukko 2: Permeabiliteetin ratkaisemista varten määritetyt termin  $a$  arvot kullekin suotautukselle.

Pysäytyksen pituus suotautuksessa (s)	Termin $a$ arvot ( $\mu\text{m}$ )
Ei pysäytystä	10,3
2	21,0
4	10,8
8	16,9
12	22,3
Pitkä pysäytys	11,7

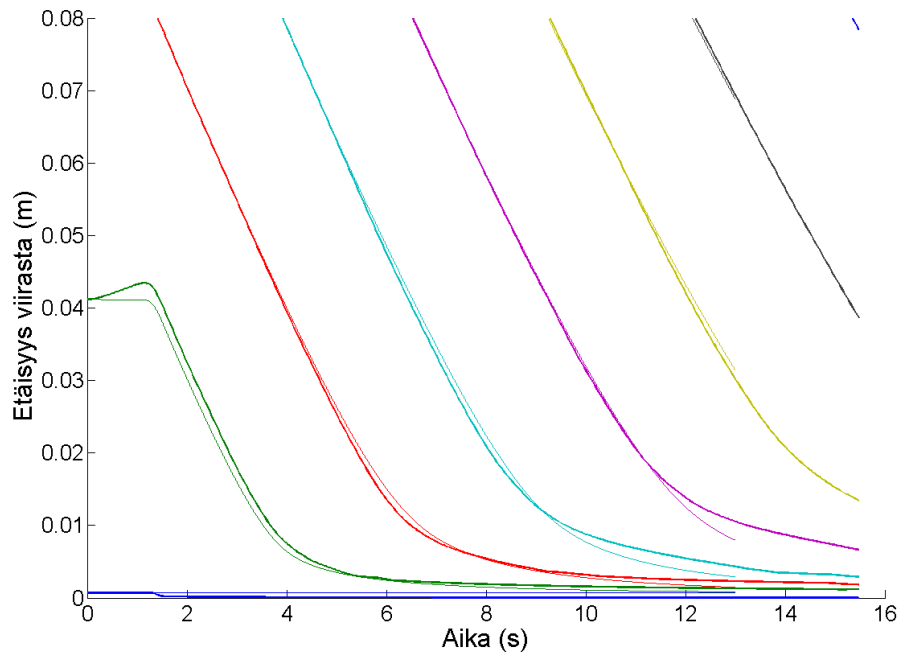
## 8.2 Suotautuminen ilman pysäytystä



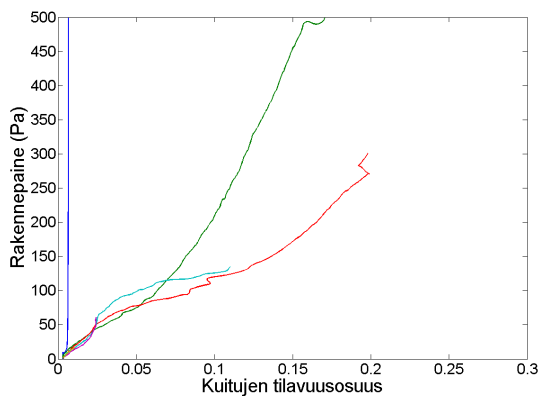
Kuva 16: Mittausdatasta muodostettu nopeuskenttä kuitukerroksille suotautumisen aikana. Kuvaaja on kolmiulotteinen ja se esittää suotautumisessa esiintyneet kuitukerrosten nopeudet eri etäisyyksillä viirasta ajan funktiona. Punainen väri kuvaa suurta ja sininen pientä nopeutta. Kuvaaja on kymmenen peräkkäisen suotautuksen keskiarvo ja sitä varten mittausdataa on suodatettu siistimmäksi ja siitä on poistettu viiran aiheuttamat häiriöt.



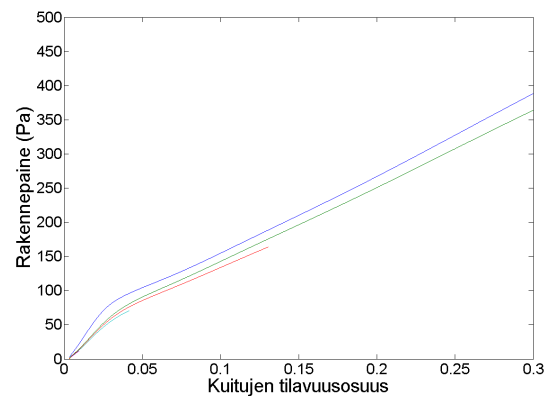
Kuva 17: Kuvassa 17a on esitetty mittausdatasta ja kuvassa 17b mallin avulla lasketut polkuvivat eli kuitukerrosten paikat ajan funktiona.



Kuva 18: Mittausdatasta ja mallilla lasketut polkuviivat samassa kuvassa suurennettuna. Paksut käyrät on saatu mittauksesta ja ohuet mallin avulla.



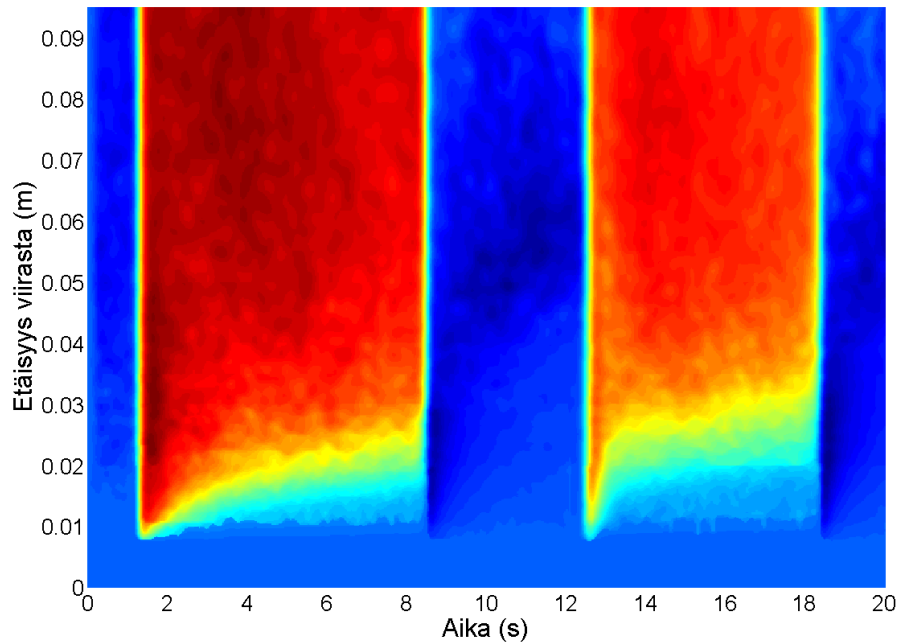
(a) Mittaus



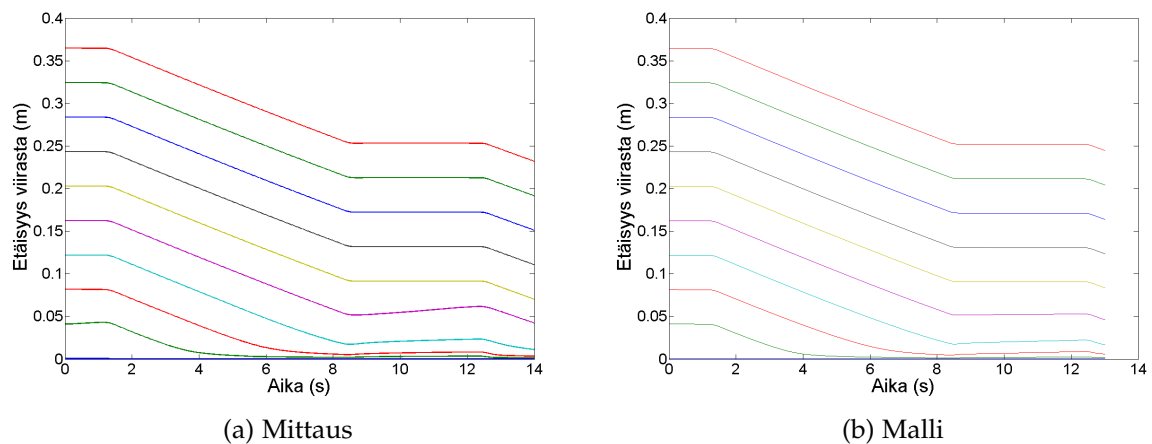
(b) Malli

Kuva 19: Kuvassa 19a on esitetty mittausdatasta ja kuvassa 19b lineaarista viskoelastista mallia käyttäen lasketut rakennepaineen arvot eri kuitukerroksille kuitujen tilavuusosuuden funktiona. Mallintamalla saatu rakennepaine vastaa käytökseltään mitattua. Rakennepaineen määrittäminen kokeellisesti hyvin lähellä viiraa on epäonnistunut, mikä voidaan todeta kuvan 19a sinisestä käyrästä.

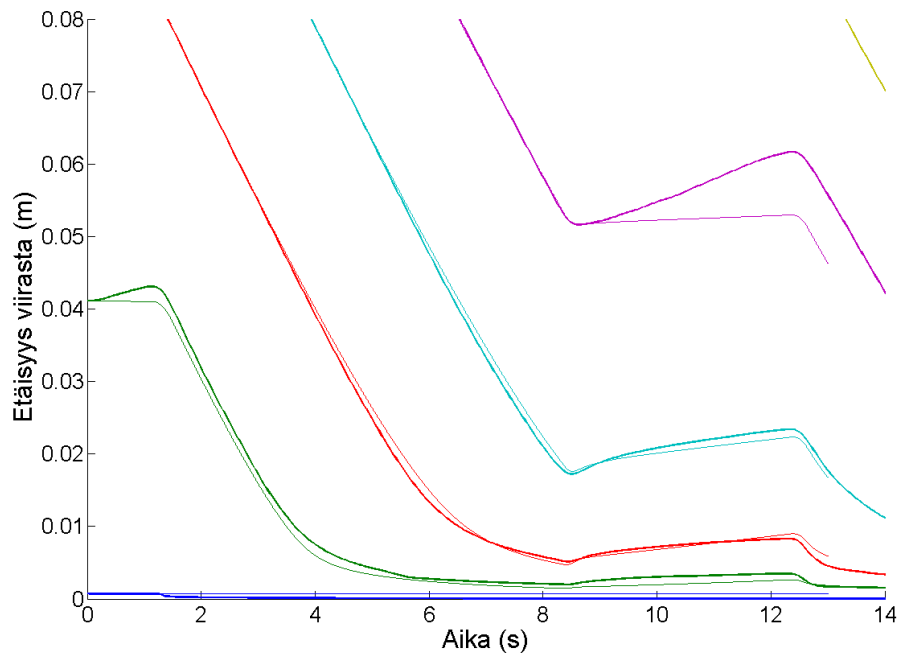
### 8.3 Suotautuminen 4 sekunnin pysäytyksellä



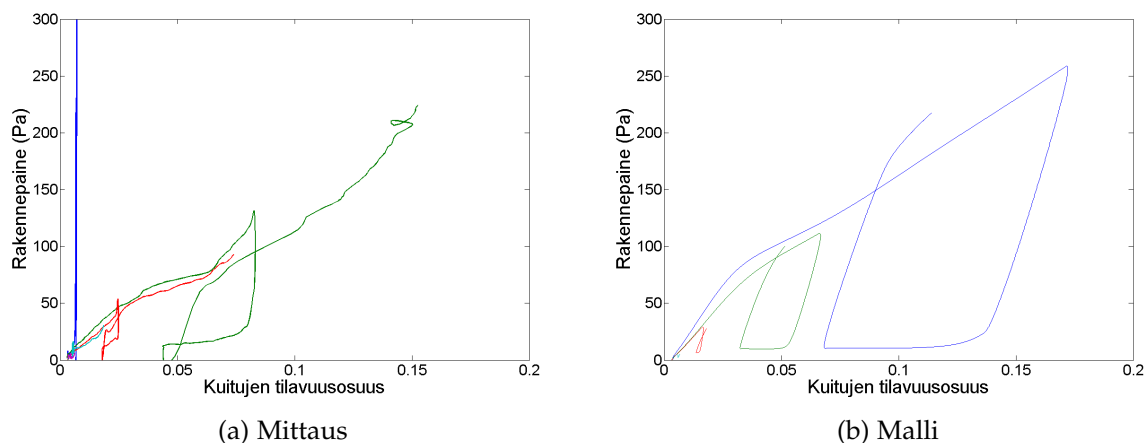
Kuva 20: Mittausdatasta muodostettu nopeuskenttä kuitukerroksille suotautumisen aikana. Kuvaaja on kolmiulotteinen ja se esittää suotautumisessa esiintyneet kuitukerrosten nopeudet eri etäisyyksillä viirasta ajan funktiona. Punainen väri kuvaa suurta ja sininen pientä nopeutta. Kuvaaja on kymmenen peräkkäisen suotautuksen keskiarvo ja sitä varten mittausdataa on suodatettu siistimmäksi ja siitä on poistettu viiran aiheuttamat häiriöt.



Kuva 21: Kuvassa 21a on esitetty mittausdatasta ja kuvassa 21b mallin avulla lasketut polkuvivat eli kuitukerrosten paikat ajan funktiona.



Kuva 22: Mittausdatasta ja mallilla lasketut polkuviivat samassa kuvassa suurennettuna. Paksut käyrät on saatu mittauksesta ja ohuet mallin avulla. Kuvaajasta nähdään mallin mukailevan tarkasti mittausta violettiä polkuviivaa lukuunottamatta. Tässä tapauksessa on syytä epäillä virheen aiheutuneen mittauksesta, sillä kyseisen viivan käytös eroaa muista mitatuista polkuviivoista. Tämä voidaan todeta kuvasta 21a. Violetin polkuviivan kuvaama kuitukerros näyttäisi mittauksen mukaan nousevan merkittävästi ylöspäin pysäytyksen aikana, mikä ei käytännössä ole mahdollista.



Kuva 23: Kuvassa 23a on esitetty mittausdatasta ja kuvassa 23b lineaarisella viskoelastisella mallilla lasketut rakennepaineen arvot eri kuitukerroksille kuitujen tilavuusosuuden funktiona. Kuvaajien muodostamat silmukat aiheutuvat suotautuksen pysäyttämistä, koska silloin kuitukerroksia kokoonpuristava virtaus lakkaa ja rakennepaine pienenee. Suotautumisen jatkuessa rakennepaine nousee jälleen ja kuvaajaan muodostuu silmukka. Kuvaajia vertaamalla voidaan todeta mallin jäljittelevän rakennepaineen käytöstä. Rakennepaineen määrittäminen mittausdatasta hyvin lähellä viiraa on epäonnistunut, kuten voidaan nähdä kuvaajan 23a sinisestä käyrästä.

## 9 Johtopäätökset

Työn päätavoitteena oli mittauslaitteiston parantaminen datan keruuta varten. Lähtötilanteessa laitteella oli vaikeata saada edes yksittäisestä suotautuksesta mitattua siistiä nopeuskenttää ja useamman nopeuskentän mittaaminen peräkkäin onnistuneesti oli täysin mahdotonta. Laitteistolle tehtiin useita parannuksia mittausta haitanneiden ilmapuotojen estämiseksi ja mittausten toistettavuuden parantamiseksi. Näiden jälkeen laitteistolla pystyi mittaamaan luotettavasti koko päivän ilman suurempia toimenpiteitä eikä epäonnistuneita mittauksia tullut kuin satunnaisesti.

Parannetulla laitteistolla tehtiin mittaussarja, jonka tarkoituksena oli testata laitteen toimintaa datan keruussa ja saada materiaalia teoreettisen mallin toiminnan tutkimiseen ja kehittämiseen. Mittauksia tehtiin kuudelle erilaiselle suotautukselle. Mittausten toistettavuus oli kaikissa tilanteissa hyvä ja tuloksena saatiin siisti nopeuskenttä riippumatta siitä, pysäytettiinkö suotautuminen ja kuinka pitkäksi aikaa. Mittaaminen ja datan keruu sujui vaivattomasti ja tulokset saatiin ensimmäisellä yrittämällä.

Vaikka teoreettista mallia kokeiltiin useampaan suotautukseen, ei sen toimivuudesta voida tämän perusteella sanoa kovinkaan paljoa. Tutkitut suotautukset olivat samoja joista mallille määritettiin parametrit, joten on odotettavaakin, että mallin antamat tulokset mukailevat tarkasti mittauksia. Saatujen tulosten perusteella voidaan todeta, ettei mallissa itsessään ole vikaa ja sitä kannattaa kokeilla myös muunlaisissa tilanteissa.

Kokonaisuutena työtä voidaan pitää onnistuneena. Asetetut tavoitteet täyttyivät kaikilta osin eikä varsinaisia takaiskuja koettu. Päätavoitteena ollut mittauslaitteiston parantaminen onnistui erittäin hyvin ja laitteisto saatiin sellaiseen kuntoon, että datan keruu onnistuu tehokkaasti. Teoreettista mallia päästiin myös vertaamaan käytäntöön ja se toimi odotetunlaisesti. Mikäli mallia tahdotaan kehittää eteenpäin, pitäisi seuravaksi selvittää, kuinka rakennepaineen mallinnusta voitaisiin tarkentaa ja miksi mallin tuottamat polkuviihat eivät mukaile kaikkia suotautuksia yhtä tarkasti. Näiden asioiden selvittäminen vaatii lisää mittauksia erilaisista suotautuksista ja niitä pääsee mahdollisesti joku toinen tekemään tulevaisuudessa.

## Viitteet

- [1] Martin A. Hubbe, John A. Heitmann, *Review of Factors Affecting the Release of Water From Cellulosic Fibers During Paper Manufacture* (Review Article, North Carolina State University 2007)
- [2] VTT Research Notes 2428, *Rheological materials in process industry* (2008)
- [3] Hanjiang Xu, *Measurement of fiber suspension flow and forming jet velocity profile by pulsed ultrasonic doppler velocimetry* (Doctoral Thesis, The Institute of Paper Science and Technology Atlanta, Georgia, 2003)
- [4] Frank M. White, *Fluid Mechanics Sixth Edition* (McGraw-Hill, New York, 2008)
- [5] Alan Van Heuvelen, *Physics: a General Introduction second edition* (Little, Brown & Company, Canada, 1986)
- [6] *Studies of the Sheet-Forming Process, Forming Thin Mats of Wood Fibers at High Rates* (Project 2348, Institute of Paper Chemistry, Appleton, Wisconsin, 1964)
- [7] Markku Kataja, Pekka Hirsilä, *Preliminary results from application of ultrasound anemometry for measuring filtration of fibre suspension* (Jyväskylä, 2001)
- [8] Christopher E. Brennen, *Fundamentals of Multiphase Flow* (Cambridge University Press, California, 2005)
- [9] K. Hiltunen, A. Jäsberg, S. Kallio, H. Karema, M. Kataja, A. Koponen, M. Manninen & V. Taivassalo, *Multiphase flow Dynamics, Theory and Numerics* (VTT Technical Research Centre of Finland, Helsinki, 2009)
- [10] Jacob Bear, *Dynamics of Fluids in Porous Media* (American Elsevier Pub. Co., New York, 1972)
- [11] Kyriacos A. Athanasiou, Roman M. Natoli, *Introduction to Continuum Biomechanics* (Morgan & Claypool, 2008)
- [12] Faith A. Morrison, *Understanding Rheology* (Oxford University Press, New York, 2001)
- [13] Tzikang Chen, *Determining a Prony Series for a Viscoelastic Material From Time Varying Strain Data* (U.S. Army Research Laboratory Vehicle Technology Directorate Langley Research Center, Hampton, Virginia, 2000)

- [14] Arbind Kumar Singh, *Mechanics of Solids* (Asoke K. Ghosh, New Delhi, 2007)
- [15] <http://sine.ni.com/np/app/main/p/docid/nav-104/lang/fi/fmid/1762/> (12.2.2013)
- [16] DOP2000 User's manual Model 2032 8-4-2-1-0.6 MHz, Version: 1.02 Rev:1.1, Signal Processing S.A. Switzerland, 2000
- [17] <http://www.signal-processing.com/transducers.php> (15.11.2012)
- [18] Young & Freedman, *University Physics 11th Edition* (Addison Wesley, San Francisco, 2004)
- [19] [http://www.signal-processing.com/intro\\_udv.html](http://www.signal-processing.com/intro_udv.html) (15.11.2012)
- [20] [http://www.signal-processing.com/intro\\_udvmd.html](http://www.signal-processing.com/intro_udvmd.html) (15.11.2012)
- [21] Sandro Longo, *The effects of air bubbles on ultrasound velocity measurements* (Springer Verlag, Italy, 2006)
- [22] <http://www.mathworks.se/products/matlab/> (12.2.2013)

## Liitteet

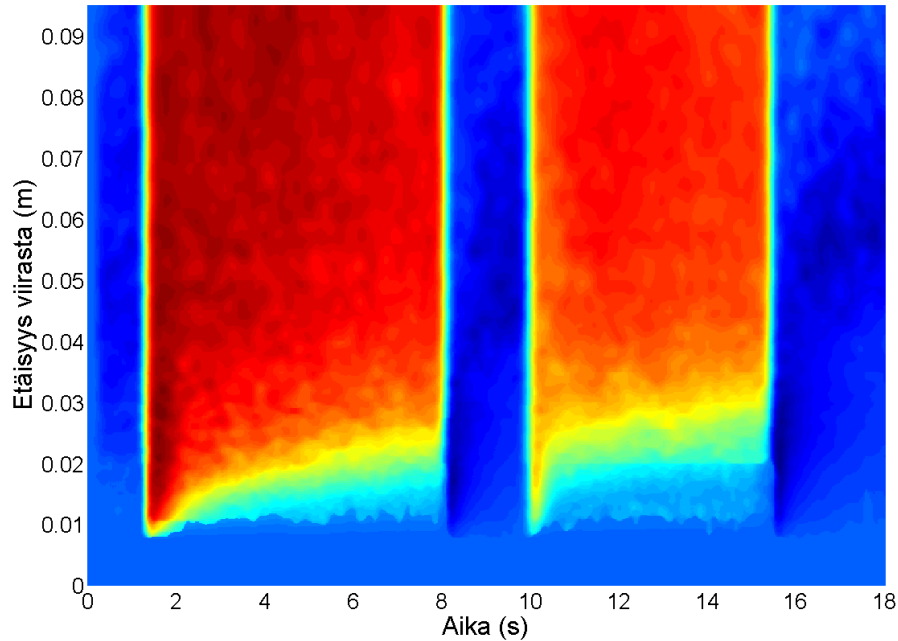
Liite 1: Tulokset muista suotautuksista

Liite 2: Mittausdata ja kuituanalyysin tulokset

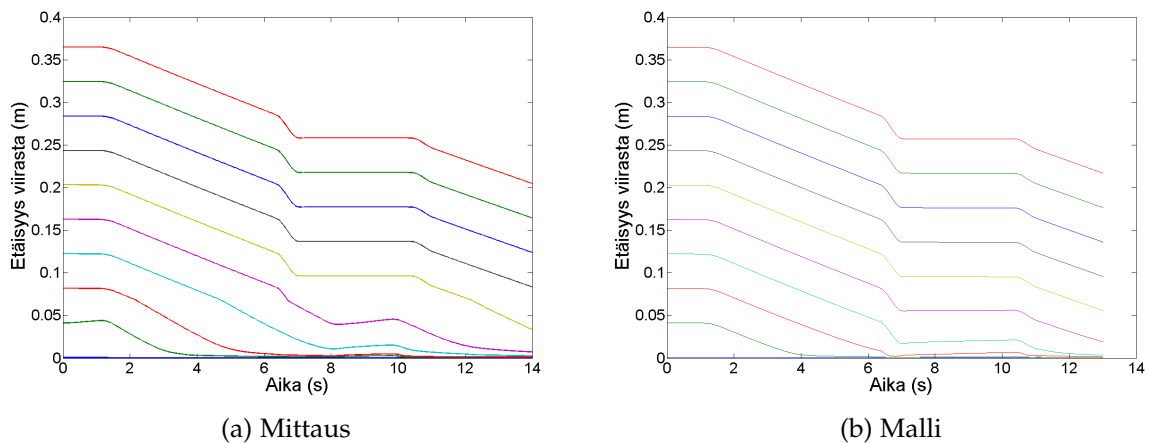


# LIITE 1: Tulokset muista suotautuksista

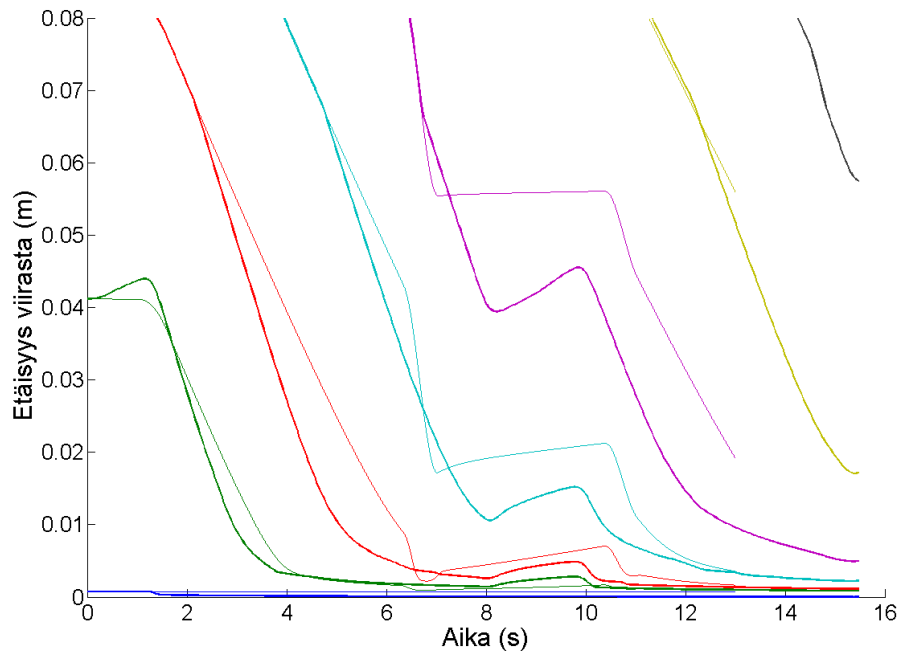
## 1 Suotautuminen 2 sekunnin pysäytyksellä



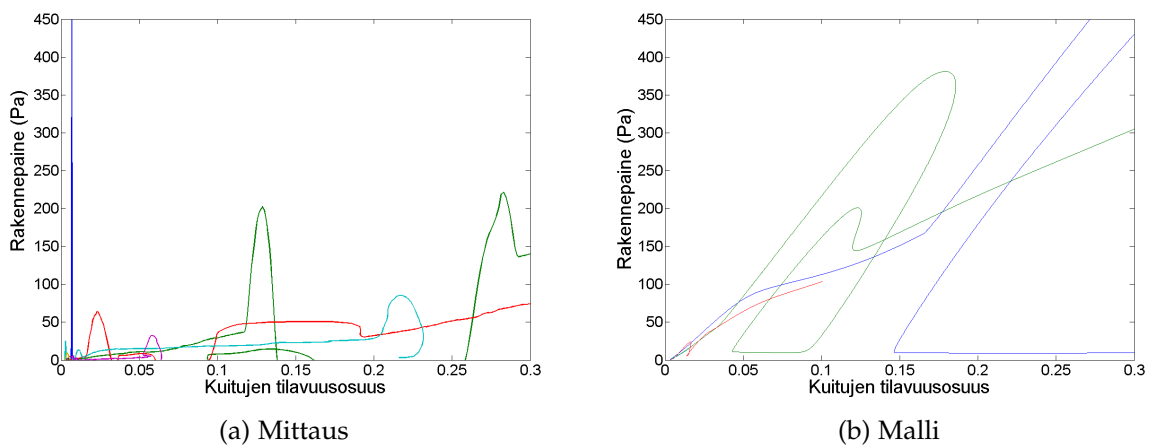
Kuva 1: Mittausdatasta muodostettu nopeuskenttä kuitukerroksille suotautumisen aikana. Kuvaaja on kolmiulotteinen ja se esittää suotautumisessa esiintyneet kuitukerrosten nopeudet eri etäisyyksillä viirasta ajan funktiona. Punainen väri kuvaa suurta ja sininen pientä nopeutta. Kuvaaja on kymmenen peräkkäisen suotautuksen keskiarvo ja sitä varten mittausdataa on suodatettu siistimmäksi ja siitä on poistettu viiran aiheuttamat häiriöt.



Kuva 2: Kuvassa 2a on esitetty mittausdatasta ja kuvassa 2b mallin avulla lasketut polkuvivat eli kuitukerrosten paikat ajan funktiona.

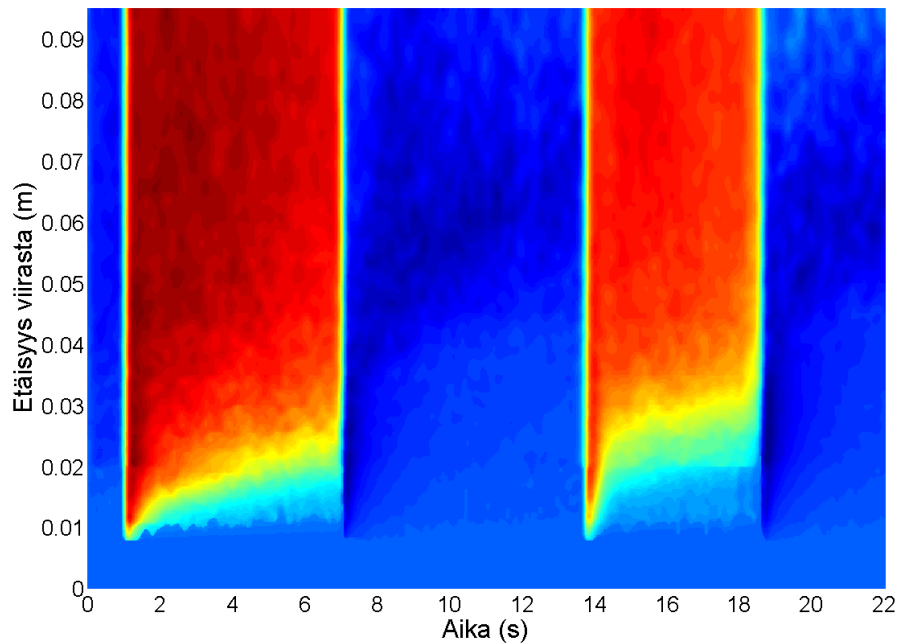


Kuva 3: Mittausdatasta ja mallilla lasketut polkuviivat samassa kuvassa suurennettuna. Paksut käyrät on saatu mittauksesta ja ohuet mallin avulla.

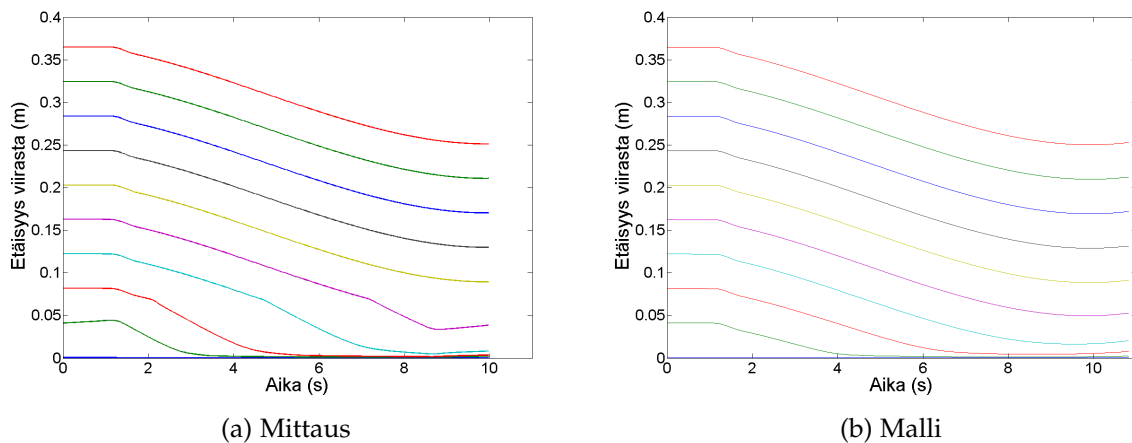


Kuva 4: Kuvassa 4a on esitetty mittausdatasta ja kuvassa 4b lineaarista viskoelastista mallia käyttäen lasketut rakennepaineen arvot eri kuitukerroksille kuitujen tilavuusosuuden funktiona. Kuvaaaja vertaamalla nähdään, että rakennepaineen mallintaminen on onnistunut huonosti tämän mittauksen tapauksessa. Tosin mitattu rakennepaine käyttäytyy myös hyvin kummallisesti, joten mittauksen voisi tuomita rakennepaineen osalta epäonnistuneeksi.

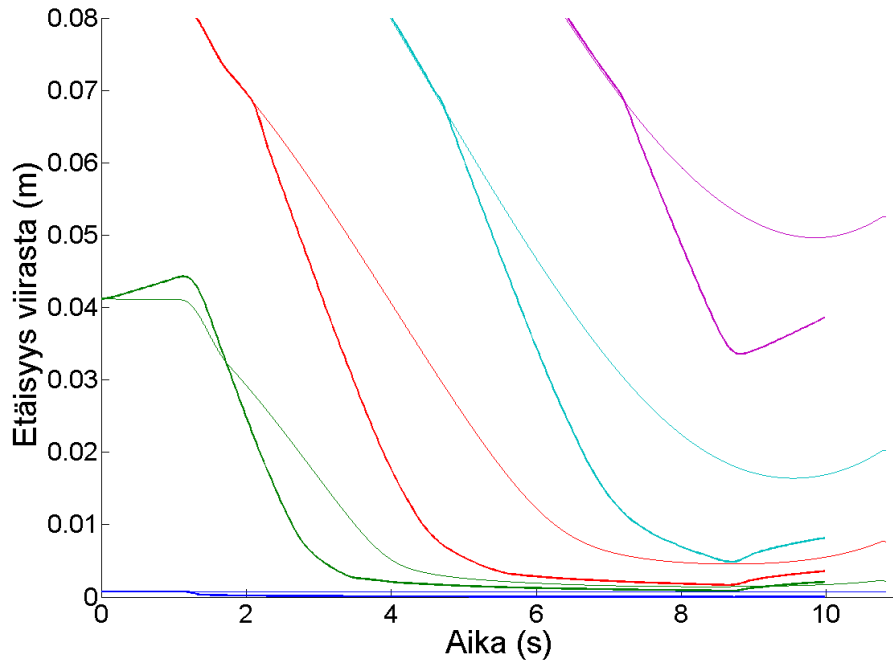
## 2 Suotautuminen 8 sekunnin pysäytyksellä



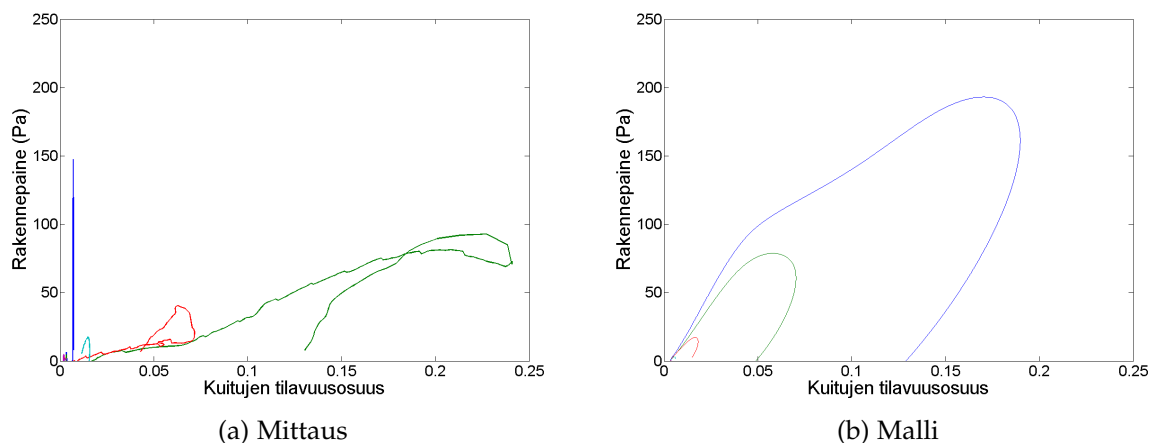
Kuva 5: Mittausdatasta muodostettu nopeuskenttä kuitukerroksille suotautumisen aikana. Kuvaaja on kolmiulotteinen ja se esittää suotautumisessa esiintyneet kuitukerrosten nopeudet eri etäisyyksillä viirasta ajan funktiona. Punainen väri kuvaa suurta ja sininen pientä nopeutta. Kuvaaja on kymmenen peräkkäisen suotautuksen keskiarvo ja sitä varten mittausdataa on suodatettu siistimmäksi ja siitä on poistettu viiran aiheuttamat häiriöt.



Kuva 6: Kuvassa 6a on esitetty mittausdatasta ja kuvassa 6b mallin avulla lasketut polkuviivat eli kuitukerrosten paikat ajan funktiona.

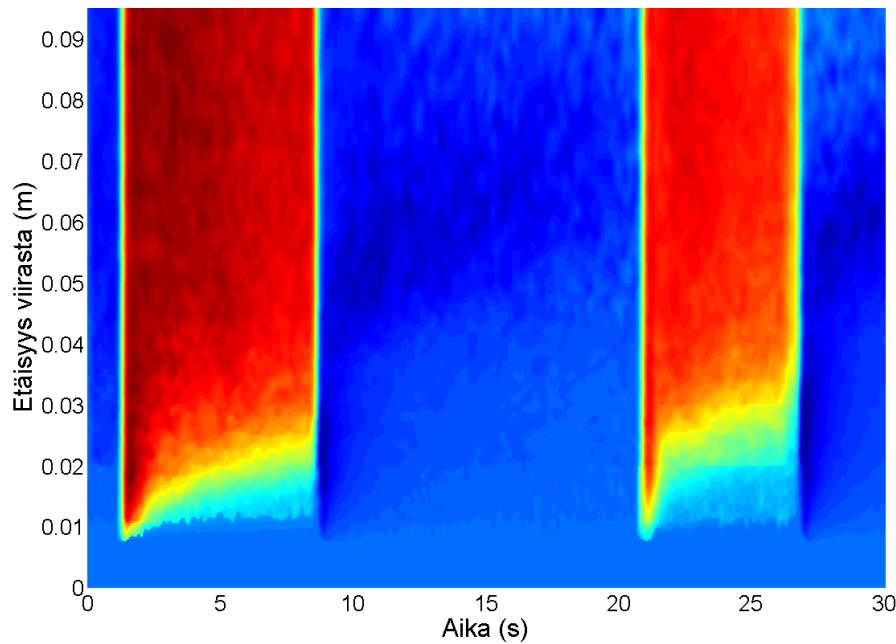


Kuva 7: Mittausdatasta ja mallilla lasketut polkuviivat samassa kuvassa suurennettuna. Paksut käyrät on saatu mittauksesta ja ohuet mallin avulla.

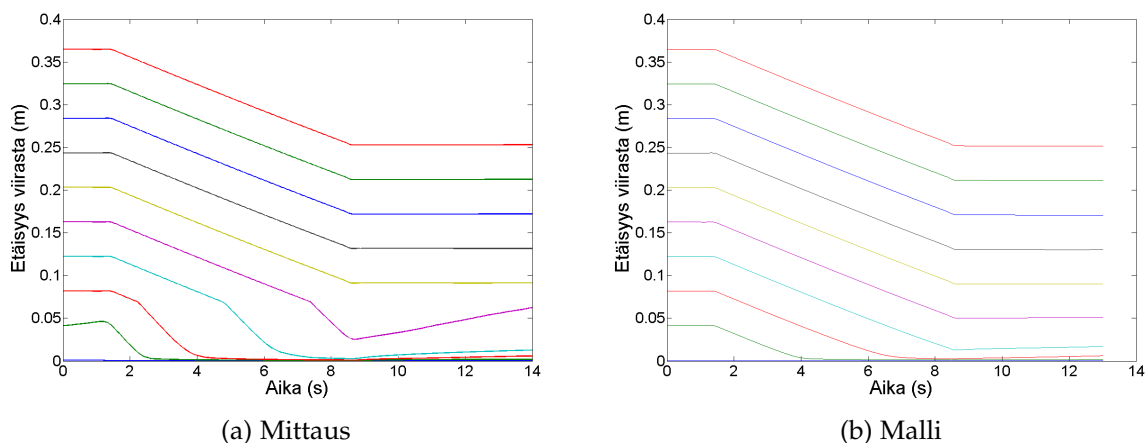


Kuva 8: Kuvassa 8a on esitetty mittausdatasta ja kuvassa 8b lineaarista viskoelastista mallia käyttäen lasketut rakennepaineen arvot eri kuitukerroksille kuitujen tilavuusosuuden funktiona. Punaisesta ja vihreästä käyrästä voidaan todeta mallin mukailevan rakennepaineen käytöstä kohtalaisesti. Rakennepaineen määrittäminen mittausdatasta hyvin lähellä viiraa on epäonnistunut, kuten voidaan nähdä kuvaajan 8a sinisestä käyrästä.

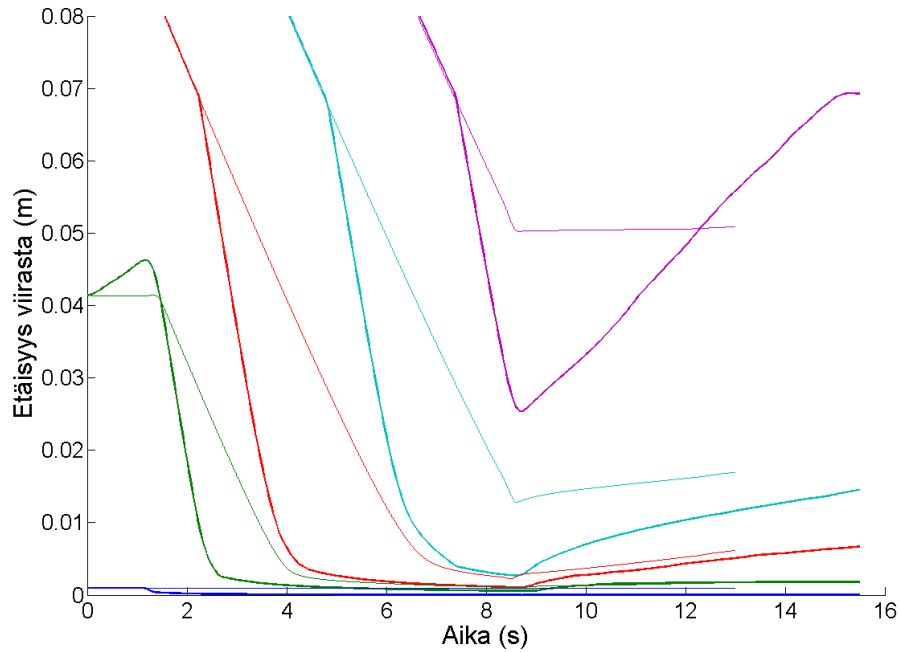
### 3 Suotautuminen 12 sekunnin pysäytyksellä



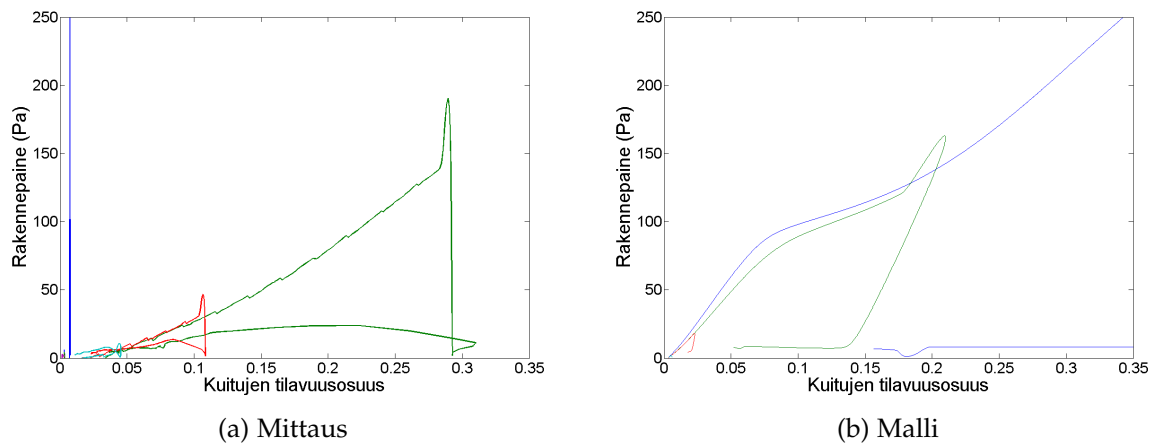
Kuva 9: Mittausdatasta muodostettu nopeuskenttä kuitukerroksille suotautumisen aikana. Kuvaaja on kolmiulotteinen ja se esittää suotautumisessa esiintyneet kuitukerrosten nopeudet eri etäisyyksillä viirasta ajan funktiona. Punainen väri kuvaa suurta ja sininen pientä nopeutta. Kuvaaja on kymmenen peräkkäisen suotautuksen keskiarvo ja sitä varten mittausdataa on suodatettu siistimmäksi ja siitä on poistettu viiran aiheuttamat häiriöt.



Kuva 10: Kuvassa 10a on esitetty mittausdatasta ja kuvassa 10b mallin avulla lasketut polkuviivat eli kuitukerrosten paikat ajan funktiona. Kuva 10a vahvistaa käsitystä siitä, että mittauksessa on jotain vikaa violetin polkuviivan tapauksessa. Kyseinen viiva nousee pysäytyksen aikana samaan tapaan kuin 4 sekunnin pysäytyksen tapauksessakin.

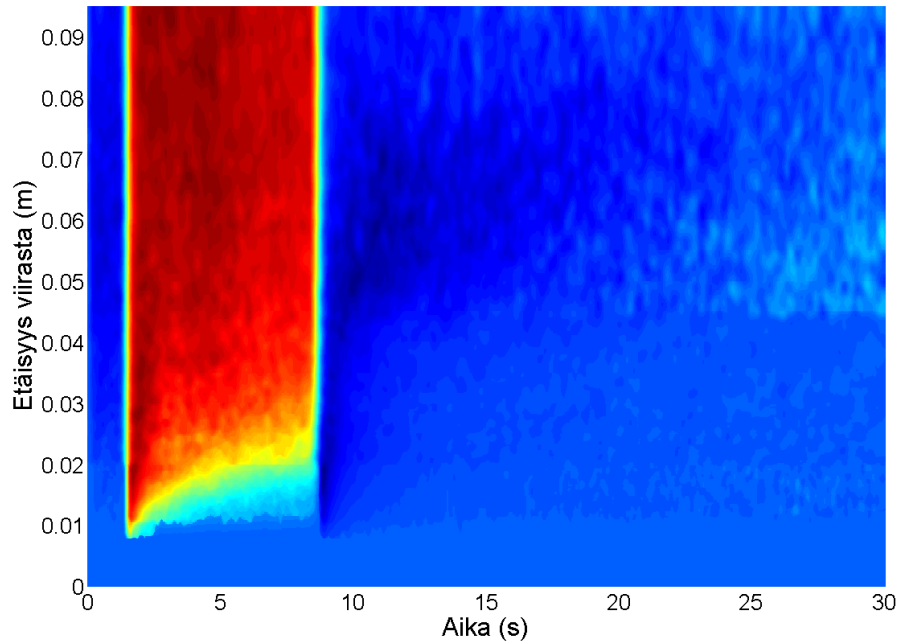


Kuva 11: Mittausdatasta ja mallilla lasketut polkuviivat samassa kuvassa suurennettuna. Paksut käyrät on saatu mittauksesta ja ohuet mallin avulla.

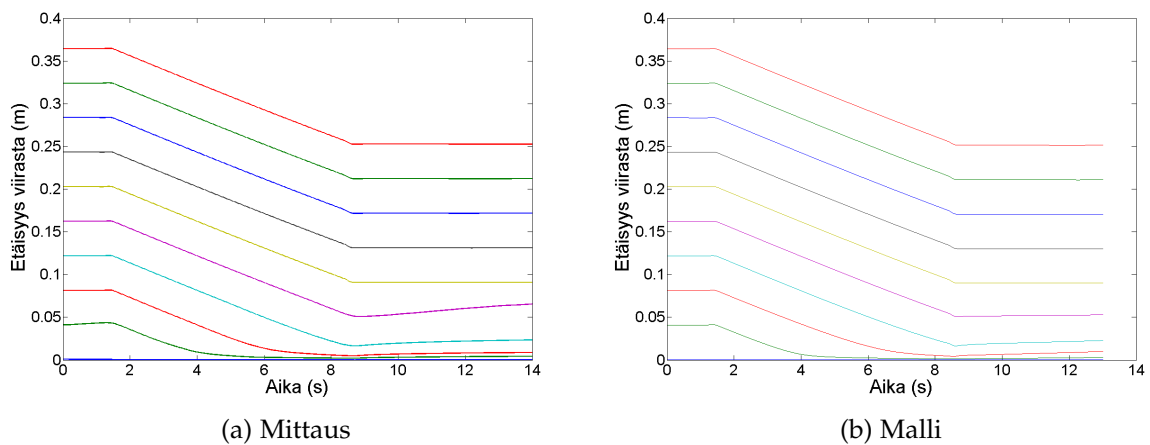


Kuva 12: Kuvassa 12a on esitetty mittausdatasta ja kuvassa 12b lineaarista viskoelastista mallia käyttäen lasketut rakennepaineen arvot eri kuitukerroksille kuitujen tilavuusosuuden funktiona. Vihreästä ja punaisesta käyrästä voidaan todeta mallin mukailevan rakennepaineen käytöstä selvästi paremmin kuin 2 ja 8 sekunnin pysäytyksillä. Rakennepaineen määrittäminen mittausdatasta hyvin lähellä viiraa on epäonnistunut, kuten voidaan nähdä kuvaajan 12a sinisestä käyrästä.

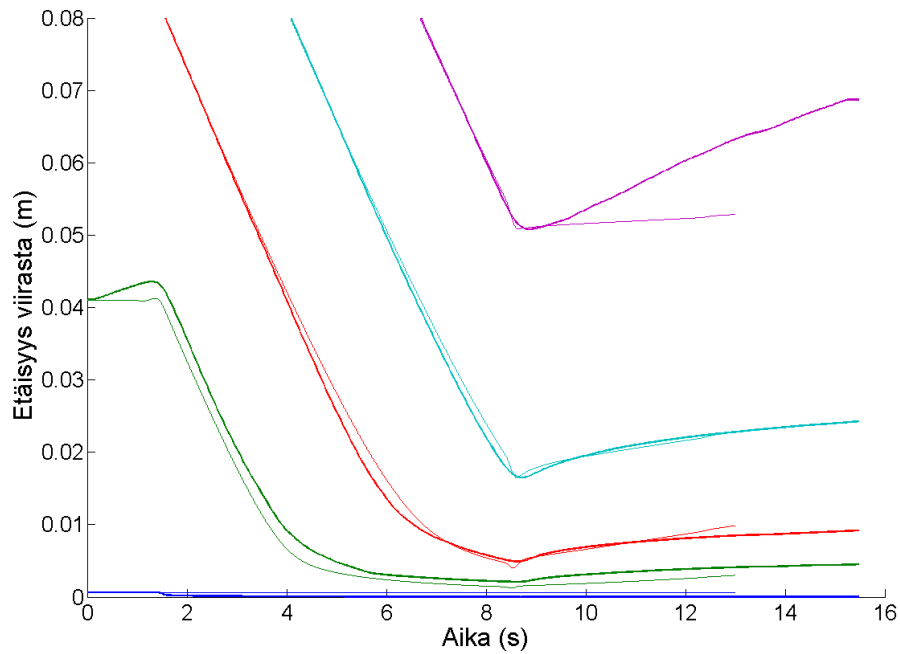
## 4 Suotautuminen pitkällä pysäytyksellä



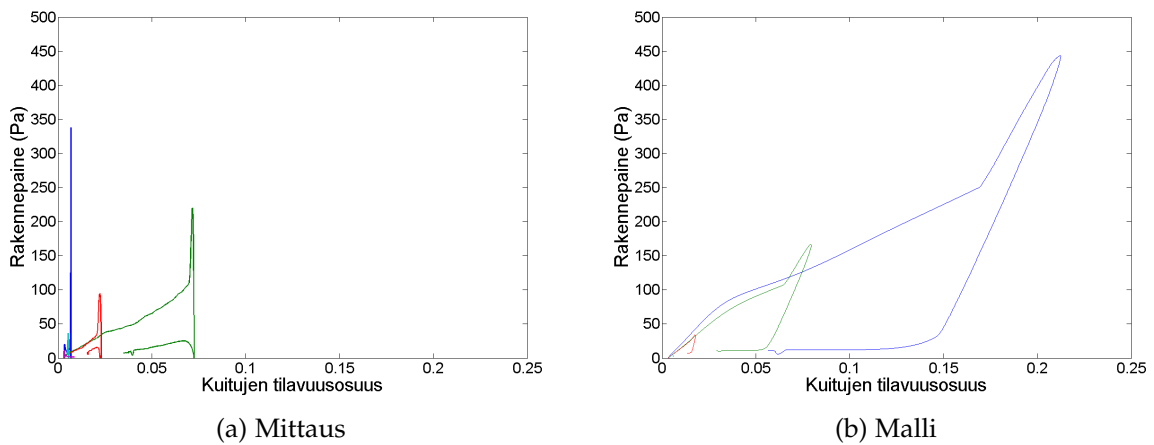
Kuva 13: Mittausdatasta muodostettu nopeuskenttä kuitukerroksille suotautumisen aikana. Kuvaaja on kolmiulotteinen ja se esittää suotautumisessa esiintyneet kuitukerrosten nopeudet eri etäisyyksillä viirasta ajan funktiona. Punainen väri kuvaa suurta ja sininen pientä nopeutta. Kuvaaja on kymmenen peräkkäisen suotautuksen keskiarvo ja sitä varten mittausdataa on suodatettu siistimmäksi ja siitä on poistettu viiran aiheuttamat häiriöt.



Kuva 14: Kuvassa 14a on esitetty mittausdatasta ja kuvassa 14b mallin avulla lasketut polkuviivat eli kuitukerrosten paikat ajan funktiona. Violetti polkuviiva käyttäytyy jälleen oudosti.



Kuva 15: Mittausdatasta ja mallilla lasketut polkuviivat samassa kuvassa suurennettuna. Paksut käyrät on saatu mittauksesta ja ohuet mallin avulla.



Kuva 16: Kuvassa 16a on esitetty mittausdatasta ja kuvassa 16b lineaarista viskoelastista mallia käyttäen lasketut rakennepaineen arvot eri kuitukerroksille kuitujen tilavuusosuuden funktiona. Malli kuvaa rakennepaineen käytöstä tässä mittauksessa melko tarkasti. Rakennepaineen määrittäminen mittausdatasta hyvin lähellä viiraa on jälleen epäonnistunut, kuten voidaan nähdä kuvaajan 16a sinisestä käyrästä.