

Simo-Pekka Pennanen

**OPETUSLABORATORION VIRTAAUSPROFIILIN  
MITTAUSLAITTEISTO**

**OPETUSLABORATORION VIRTAUSPROFIILIN  
MITTAUSLAITTEISTO**

Simo-Pekka Pennanen  
Opinnäytetyö  
Kevät 2018  
Energiatekniikan tutkinto-ohjelma  
Oulun ammattikorkeakoulu

# TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu  
Energiatekniikan tutkinto-ohjelma

---

Tekijä(t): Simo-Pekka Pennanen  
Opinnäytetyön nimi: Opetuslaboratorion virtausprofiilin mittauslaitteisto  
Työn ohjaaja(t): Veli-Matti Mäkelä ja Jukka Ylikunnari  
Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2018  
Sivumäärä: 32 + 2 liitettä

---

Työ tehtiin Oulun ammattikorkeakoululle. Tavoitteena oli suunnitella opetuslaboratorion virtausprofiilin mittauslaitteisto, jolla pystyy mittaamaan virtausprofiilin eri profiilihäiriöiden jälkeen. Lopuksi laitteistosta oli tarkoitus piirtää 3D-esimerkkilaitteisto.

Suunnittelu lähti liikkeelle etsimällä mahdollinen virtausprofiilin mittausmenetelmä, jolla virtausprofiili oli mahdollista mitata. Tähän valikoitui laser doppler -nopeusmittausmenetelmä, koska sitä oli käytetty samanlaisissa laitteistoissa ennenkin. Tämä vaati paljon tiedonhakua kyseisestä mittausmenetelmästä niin kirjallisuudesta kuin tieteellisistä julkaisuista. Kun tutkimisen ja lukemisen jälkeen kuva hahmottui, alkoi 3D-piirtäminen esimerkkilaitteistosta. Esimerkkilaitteiston maksimikooksi oli annettu 3 m x 1,5 m x 1,5 m. Tämän lisäksi esimerkkilaitteistoon piti mitoittaa pumppu ja pohtia erilaisia profiilihäiriöitä.

Esimerkkilaitteiston suunnittelu tehtiin Vertex G4Plant -ohjelmalla. Laitteiston kooksi tuli 3 m x 1 m x 1 m. Laitteisto koostui kahdesta tasosta. Pöydän tasolle tuli läpinäkyvästä putkesta mahdollisimman paljon mittausaluetta, jonka lävitse laseri mittaa virtausprofiilia. Putkiston kokoluokaksi tuli DN40. Profiilihäiriö ja profiilikorjain tuli pöytätasolle ennen mittausaluetta. Profiilihäiriötä pystyi vaihtamaan laipparakenteen ansiosta. Pohjatasolle tuli pumppu ja vesitankki. Pumpun mitoitusta helpotti putkiston yksinkertaisuus. Laseri asennettaisiin kolmiakseliseen ohjausyksikköön, jolla pystyy mittaamaan koko mittausalueen matkalta.

---

Asiasanat: virtausprofiili, profiilihäiriö, mittauslaitteisto, laseri, esimerkkilaitteisto

## ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences  
Degree programme, Energy Technology

---

Author(s): Simo-Pekka Pennanen

Title of thesis: Designing Velocity Profile Measurement System for Educational Usage

Supervisor(s): Veli-Matti Mäkelä ja Jukka Ylikunnari

Term and year when the thesis was submitted: Spring 2018

Pages: 32 + 2 appendices

---

This thesis was done for Oulu University of Applied Sciences. Subject of this thesis was designing velocity profile measurement system for educational usage. Objective was to design a system where one could measure velocity profile after induced profile disturbance, this induced profile disturbance could be a valve or other pipe fittings. This disturbed velocity profile could be then demonstrated to students and show how long it takes from profile to recover. There was also 3D designed an example of this measurement system.

Design process began with a search for technique which could measure velocity profile. Laser-doppler velocimetry was chosen for this, because it has been used before to measure velocity profile. This system required lots of reading books about the subject and scientific papers. Once there was a picture how the system would work and could be build the 3D design of a example measurement system began. Maximum dimension ware given which ware 3 m wide, 1,5 m high and 1,5 m deep. Design also included choosing right pump for the system and what kind of profile disturbance devices could be used.

Example measurement system was designed using Vertex 4GPlant software. Final dimension ware 3 m wide, 1 m high and 1 m deep. System consisted workbench where laser, measurement section and disturbance source ware. Under workbench there ware pump and water tank. Measurement section was clear pipe almost 2 m long and nominal pipe sizes was DN40. Piping was designed so that disturbance source could be changed and before the source there is flow condition section also. Laser would be positioned on 3 axis movement system so that velocity profile could be measured along the measurement section.

---

Keywords: velocity profile, profile disturbance, laser-doppler velocimetry

## **ALKULAUSE**

Haluan kiittää Veli-Matti Mäkelää ja Jukka Ylikunnaria opinnäytetyön aiheesta ja ohjauksesta, sekä Timo Kiviahdetta 3D-ohjelman tuesta ja Pirjo Siipolaa opintojen loppuvaiheen ohjauksesta.

Oulussa 16.5.2018

Simo-Pekka Pennanen

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
ALKULAUSE	5
SISÄLLYS	6
1 JOHDANTO	7
2 VIRTAUSTEKNIikka	8
2.1 Virtausprofiili	8
2.2 Laminaarinen virtausprofiili	9
2.3 Turbulenttinen virtausprofiili	9
3 NOPEUDEN MITTAUS LASERIA KÄYTTÄMÄLLÄ	11
3.1 Laser doppler -nopeusmittaus	11
3.2 Double beam -lasermittauksen toimintaperiaate	12
3.3 Mittausalue	13
3.4 Partikkelit	14
3.5 Signaalin prosessointi	15
3.6 2D- ja 3D-lasermittaus	16
4 ESIMERKKILAITTEISTO	19
4.1 Lähtötiedot	19
4.2 Suunnittelu	19
4.3 Laitteisto	21
4.4 Profiilihäiriöt	24
4.5 Laser ja ohjaus	25
4.6 Turvallisuus	25
4.7 Mittauksesta	27
4.8 Valmistaja	28
5 YHTEENVETO	29
LÄHTEET	30
LIITE 1 Pumpun L-40A/2 datalehti	
LIITE 2 Pumpun L-32A/2 datalehti	

# 1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä on tarkoitus suunnitella Oulun ammattikorkeakoululle (Oamk) virtausprofiilin mittauslaitteisto, jolla voi mitata erilaisten profiilihäiriöiden aiheuttamaa virtausprofiilin muutosta. Virtausprofiilin mittaamisella voidaan selvittää, miten fluidi käyttäytyy putkessam, mitä virtaukselle tapahtuu erilaisten profiilihäiriöiden jälkeen ja kauanko virtauksella kestää palautua häiriöistä.

Lähtökohtana oli, että rakenteesta tulisi suljettu vesikierto, johon voisi vaihtaa erilaisia profiilihäiriöitä. Rankenteelle oli suunniteltu tila, jonka koko on 3 m x 1,5 m x 1,5 m. Virtausprofiilia olisi mahdollista mitata mahdollisimman pitkältä matkalta. Mittauslaitteisto olisi liikuteltava yksikkö laboratoriossa.

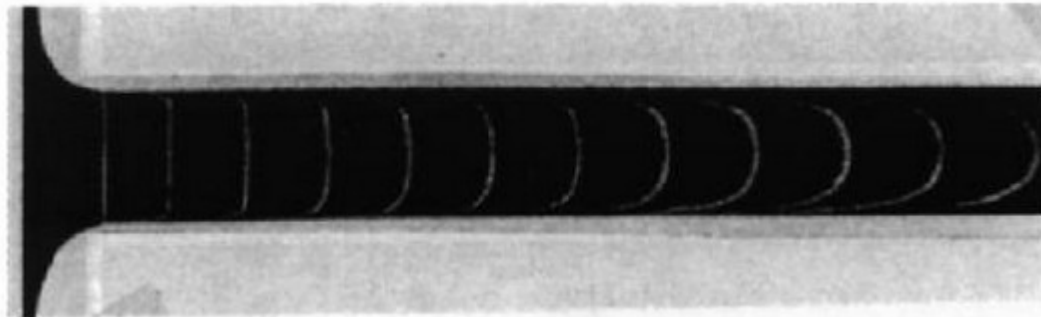
Suunnittelun lisäksi piti etsiä virtausprofiilin mittaamiseen soveltuva laitteisto ja selvittää, miten erilaiset virtausprofiilihäiriöt saisi sopimaan vesikiertoon. Lisäksi tuli selvittää ja laskea sopiva pumppu ja 3D-suunnitella esimerkkilaitteisto.

## 2 VIRTAUSTEKNIikka

Virtaustekniikka on tieteen ala, jossa tutkitaan materiaalien ominaisuuksia, kun materiaali on neste- tai kaasumuodossa, ja niiden liike- ja energiavirtauksia (1, s. 3). Putkivirtauksen kannalta keskeisimpiä fluidin ominaisuuksia ovat tiheys ja viskositeetti. Nämä ominaisuudet muuttuvat lämpötilan ja paineen muuttuessa (1, s. 53 - 54). Nesteillä lämpötilan muutos tiheyteen vaikuttaa enemmän kuin paine. Tämän takia voidaan ajatella, että tiheys on vain lämpötilasta riippuvainen (1, s. 30). Viskositeetti on vain lämpötilasta riippuvainen niin nesteellä kuin kaasulla (1, s. 54).

### 2.1 Virtausprofiili

Putkistossa virtaavan fluidin viskositeetti aiheuttaa fluidin sisällä nopeuden muutoksen, joka riippuu fluidin etäisyydestä putken seinämään. Tämä nopeuden muutos ja seinämän etäisyyden suhde muodostaa virtaukselle virtausprofiilin. (1, s. 37.) Kuvassa 1 nähdään virtausprofiilin kehitys.



KUVA 1. Laminaarisen virtauksen kehitys (2, s. 113)

Virtausta putkissa voidaan yleensä pitää joko laminaarisena tai turbulenttisenä. Tämä riippuu dimensiottoman Reynolds-luvun suuruudesta, joka on nimetty Osborner Reynoldsin mukaan. Reynolds-luvun kaava on esitetty kaavassa 1. (1, s. 360.)

$$Re_D = \frac{\rho v D}{\mu}$$

KAAVA 1

$Re_D$  = Reynolds luku

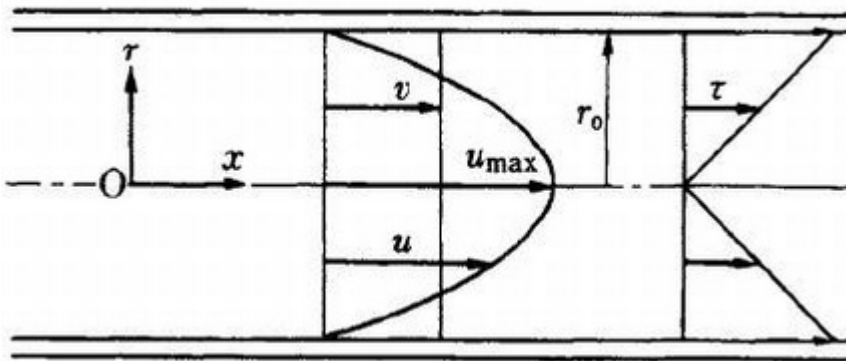
$\rho$  = tiheys (Kg/m<sup>3</sup>)



- $v$  = virtausnopeus (m/s)
- $D$  = putken halkaisija (m)
- $\mu$  = dynaaminen viskositeetti (Pa\*s)

## 2.2 Laminaarinen virtausprofiili

Putkivirtauksessa fluidia voidaan pitää laminaarisena, kun sen Re-luku on alle 2000 - 2300. Laminaarisessa virtauksessa fluidi etenee tasaisissa nopeustasoissa ja sisäinen sekoittuminen on hidasta. (1, s. 367.) Kuvassa 2 on laminaarinen virtausprofiili.



KUVA 2. Laminaarinen virtausprofiili (3, s. 92)

Kuvasta 2 nähdään myös, että leikkausjännitys  $\tau$  pienenee, mitä kauempana seinämästä ollaan. Laminaariselle virtauksella voidaan laskea virtausnopeus profiilissa kaavalla 2. (1, s. 369.)

$$u(r) = u_{max} \left( 1 - \left( \frac{r}{r_0} \right)^2 \right)$$

KAAVA 2

$u(r)$  = virtauksen nopeus (m/s)

$u_{max}$  = virtauksen maksiminopeus (m/s)

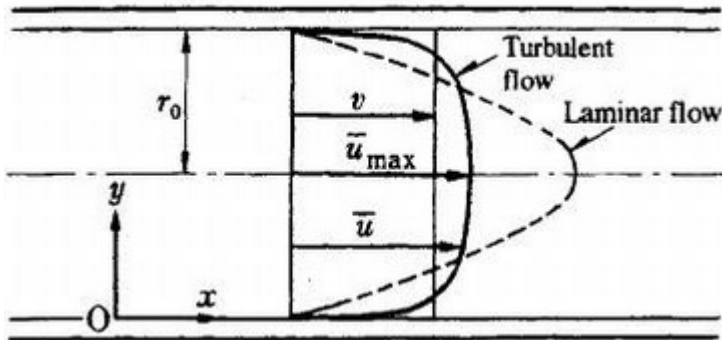
$r_0$  = putken säde (m)

$r$  = etäisyys keskeltä putkea (m)

## 2.3 Turbulenttinen virtausprofiili

Virtaus muuttuu turbulenttiseksi, kun Re-luku on suurempi kuin 3000. Turbulenttisessa virtauksessa ei enää ole tasaisia nopeustasoja, vaan virtaus muuttuu kaoottiseksi ja virtaus on hyvin sekoittuvaa. Kaoottisuuden takia

turbulenttisen virtauksen mallintaminen on vaikeampaa kuin laminaarisen virtauksen. Tämän takia mallintamiseen käytetään empiirisesti tutkittuja kaavoja ja metodeja. (1, s. 371.) Kuvasta 3 nähdään, että virtausprofiilin muoto on muuttunut, kun virtaus on turbulentista.



KUVA 3. Turbulenttinen virtausprofiili (3, s. 101)

Turbulenttiselle virtaukselle voidaan arvioida virtausnopeus profiilissa kaavalla 3 (4, s. 101).

$$\frac{u}{u_{max}} = \left(\frac{y}{r_0}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (0 \leq y \leq r_0)$$

KAAVA 3

$y$  = etäisyys putken seinästä (m)

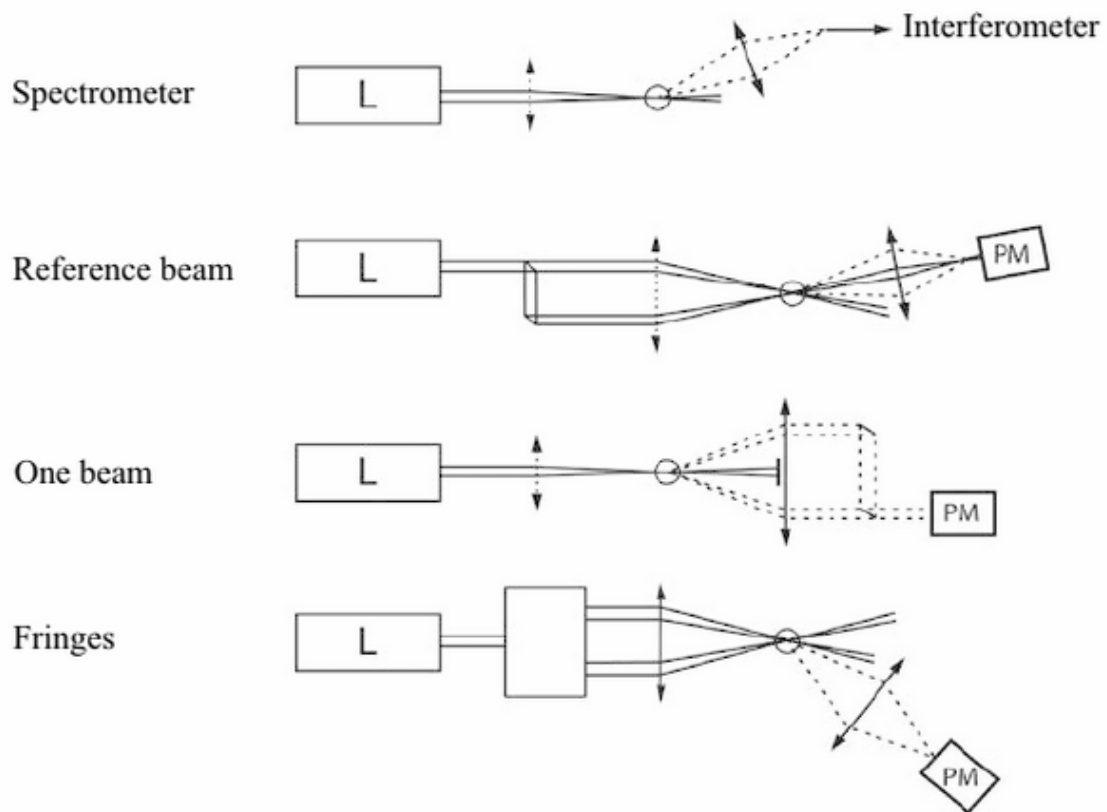
$n$  = reynolds luvusta riippuva muuttuja (m)

Kaavassa 3 muuttuja  $n$  riippuu virtauksen Reynoldsin luvusta. Tälle on esitetty erilaisia lukuja tietyillä Reynolds luvuilla. Yleisimmin  $n$  on 7, kun  $Re = 1 \times 10^5$ . (4, s. 101.)

### 3 NOPEUDEN MITTAUS LASERIA KÄYTTÄMÄLLÄ

#### 3.1 Laser doppler -nopeusmittaus

Laser doppler -nopeusmittaus on optinen mittaustekniikka, jolla voi mitata virtaavan nesteen nopeuksia (5, s. 16). Se käyttää laserin valoa, virtauksessa olevia partikkeleita ja doppler-ilmiötä nopeuden mittaamiseen (1, s. 483). Ensimmäisiä mittauksia tällä menetelmällä tehtiin vuonna 1964, kun Yeh ja Cumminsin mittasivat laminaarisen putkivirtauksen (6, s. 8). Kuvassa 4 on erilaisia laserasetelmia.

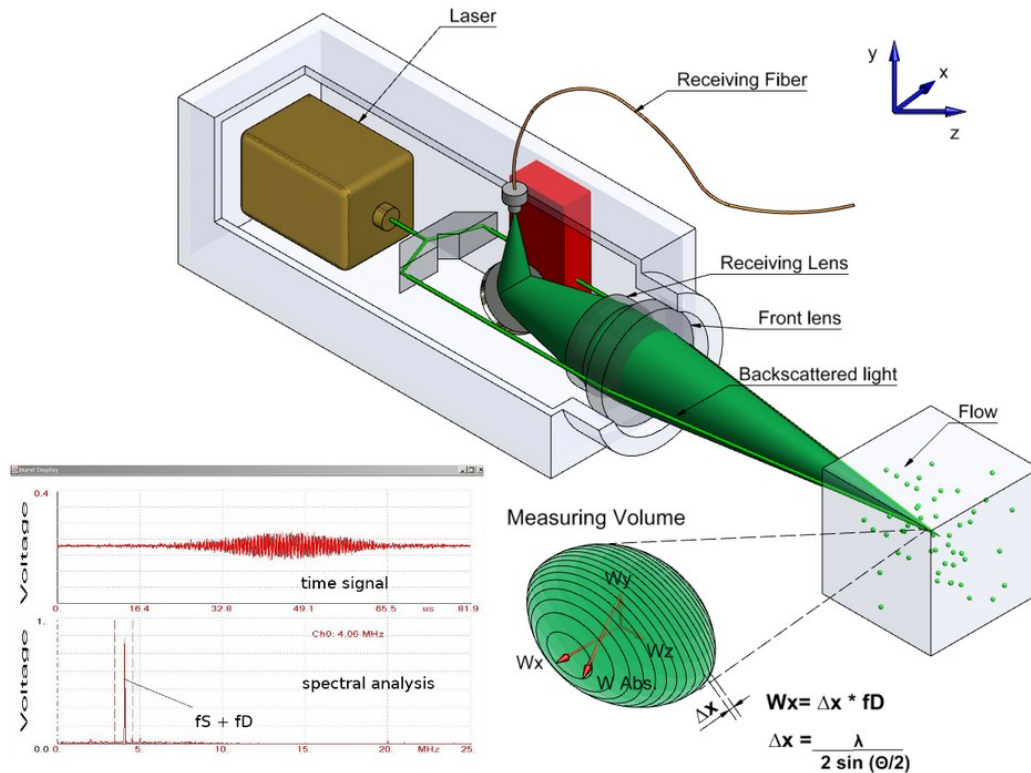


KUVA 4. Laserille erilaisia optisia asetelmia (7, s. 37 © ISTE Ltd 2012)

Kuvassa 4 oleva Fringes on yleisin asetelma (5, s. 19). Seuraavissa luvuissa keskitytään tähän asetelmaan.

### 3.2 Double beam -lasermittauksen toimintaperiaate

Laite koostu laseryksiköstä, joka lähettää lasersäteen tietyllä aallonpituudella. Laser jaetaan kahteen säteeseen laitteen sisällä olevilla linsseillä. Nämä kaksi lasersädettä ohjataan kohdistavaan linssiin, joka kohdistaa lasersäteet ristiin tietyn matkan päässä (Kuva 5). Kuvassa 5 nähdään laserin rakenne ja sen tuottama mittausalue.



KUVA 5. Mittalaitteen toiminta (8, Lupa saatu ILA GmbH)

Mittausalueessa on merkitty virtauksen nopeuskomponentit. Lisäksi kuvasta nähdään virtauksesta tuotettu signaali ja siihen tehty spektrianalyysi. Laite voi koostua vielä valoa vastaanottavasta yksiköistä, tai joissain tapauksissa tämä voi olla erillinen yksikkö. Vastaanotetusta valosta muodostuva signaali lähetetään prosessointiyksikköön. Laseryksikkö voi olla laserdiodi, argon- tai He-Ne-laser. Lasertyyppi riippuu tarvittavasta tehosta ja etäisyydestä (7, s. 56, 58).

### 3.3 Mittausalue

Kun lasersäteet kohtaavat tietyssä kohdassa virtausta, ne muodostavat häiriökuvion, jota kutsutaan mitta-alueeksi. Häiriökuvio muodostuu vaaleista ja tummista raidoista. Virtauksen nopeuden selvittämisessä pitää tietää raitojen välinen matka (1, s. 483). Kaava 4 voidaan johtaa optiikkateorian avulla (1, s. 483; 7, s. 41).

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2n \sin\left(\frac{\Theta}{2}\right)} \quad \text{KAAVA 4}$$

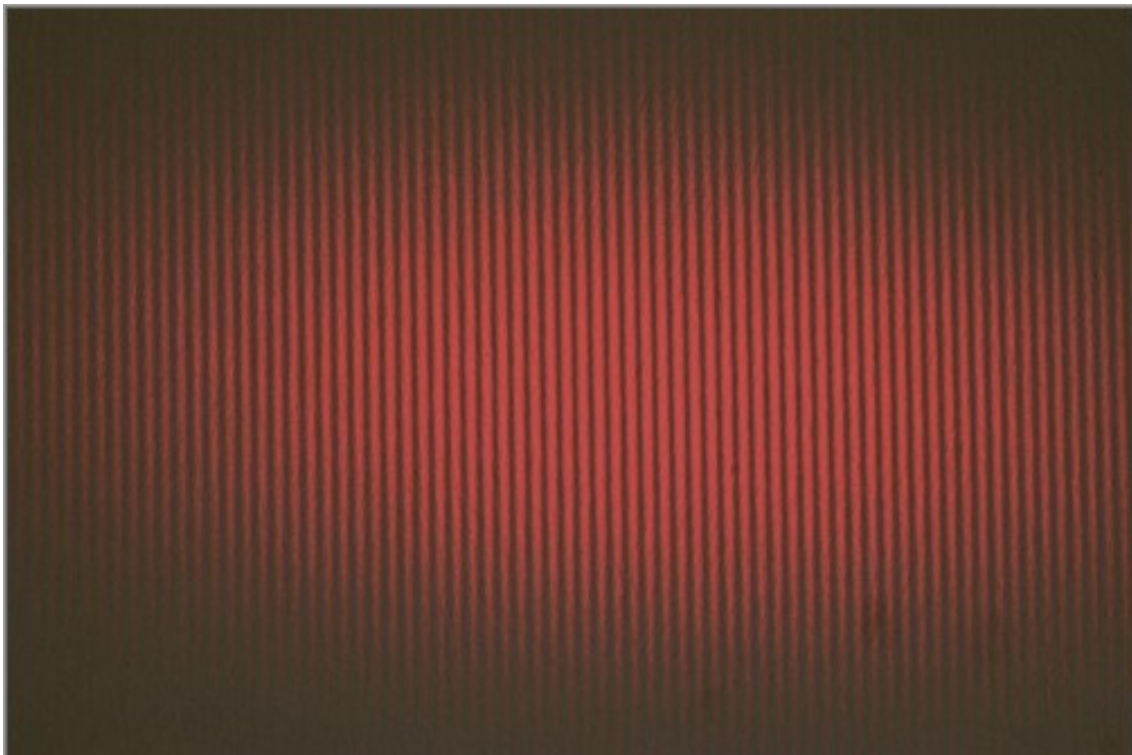
$\Delta x$  = raitojen välinen matka (m)

$\lambda$  = aallonpituus (m)

$\Theta$  = kahden laser säteen kulma

$n$  = taitekerroin

Kaavassa 4 taitekerroin  $n$  on ilmassa 1 ja vedessä 1.33. Joissain tilanteissa voi olla mahdollista, että raitojen välinen matka joudutaan mittaamaan tai laskemaan, koska taitekerroin on saattanut muuttua. (7, s. 42.)



KUVA 6. Tarkempi kuva häiriökuvioista (8, Lupa saatu ILA GmbH)

Mittausalue voidaan tehdä myös liikkuvaksi. Häiriökuvion liikkuvuus saadaan aikaan, kun kahdella lasersäteellä on hieman eri taajuus niin, että häiriökuvio pysyy. Tämän avulla saadaan korjattua virtauksessa tapahtuvia erikoistilanteita. Kun kahdella partikkelilla on liike vastakkaisiin suuntiin samalla nopeudella ja samassa virtaustasossa, on paikallaan olevalla mittausalueella signaali molemmille sama. Kun mittausalue liikkuu virtausta vastaan tasaisella nopeudella, saadaan partikkeleiden suunnat selvitettyä. Samalla saadaan korjattua tilanne, jossa partikkeli liikkuu raitojen myötäisesti. Hyvin turbulenttisissa virtauksissa ainoastaan liikkuva mittausalue antaa varman mittaustuloksen. (7, s. 48 - 51.)

### **3.4 Partikkelit**

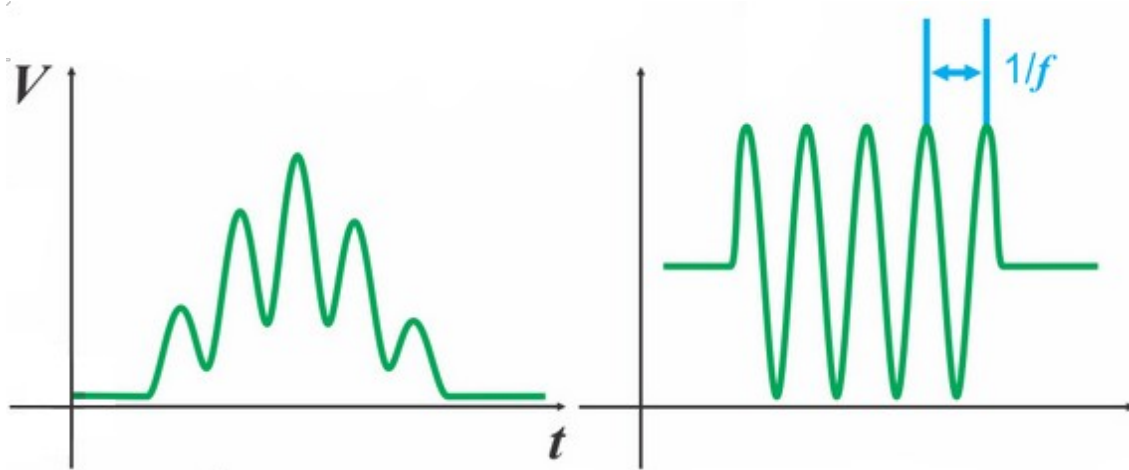
Virtauksessa täytyy olla pieniä partikkeleita, jotka heijastavat valoa, koska mittaus perustuu näiden partikkelien nopeuksiin. Virtauksessa olevien partikkelien täytyy liikkua samalla nopeudella kuin virtaava fluidi. Niiden täytyy olla tarpeeksi pieniä ja tiheydeltään lähellä fluidia (1, s 483). Partikkelien koon ja heijastuksen määrän takia voi tulla ongelmia, koska liian pieni partikkeli ei heijasta tarpeeksi valoa ja liian suuri ei seuraa virtausta tarpeeksi hyvin. Lisäksi nopeuden kasvaessa partikkelien kokoa pitää pienentää (9, s. 283).

Partikkelit liikkuvat virtauksessa oikein, kun virtauksessa ei tapahdu suuria virtausnopeuden muutoksia. Kun suuria virtausnopeuseroja tapahtuu niin partikkelit saattavat vastata nopeuden muutokseen viiveellä. Näin voi käydä pyörteitä aiheuttavissa kohdissa. (9, s. 297.)

Vedelle ei välttämättä tarvitse partikkelien valmistamiseen erityislaitteistoa. Joskus vedessä on tarpeeksi epäpuhtauksia signaalin tuottamiseen (10). Valmistajilta löytyy erilaisia laitteistoja partikkelien tuottamiseen. Tuotettujen partikkelien pitää olla tasalaatuista, jotta valoa heijastuu tasaisesti. Yleensä partikkeleihin liittyvät ongelmat ovat laitoskohtaisia ja ongelmilta vältytään opitun tiedon kautta (9 s. 292, 296).

### 3.5 Signaalin prosessointi

Kun virtaavassa nesteessä oleva partikkeli virtaa mittausalueen lävitse, se samalla heijastaa takaisin lasereiden tuottamaa valoa. Osa tästä valosta päätyy fotoilmaisimeen (1, s. 483). Fotoilmaisimelta tuleva signaali syötetään ali- ja ylipäästösuodattimille. Näin signaalista suodatetaan matalat taajuudet, optiikan ja elektroniikan aiheuttamat häiriöt signaalille (7, s. 88).



KUVA 7. Fotoilmaisimen signaali, oikealla suodatettu signaali (10, Lupa saatu MSE, Inc.)

Nykyaikaisin menetelmä suodatetun signaalin prosessointiin on FFT, fast fourier transform. Menetelmä alkoi yleistyä 1990-luvulla, kun tietokoneet kehittyivät tarpeeksi tehokkaiksi ja samalla niiden koko pieneni. FFT mahdollistaa koko signaalin käytön, jolloin saadaan enemmän tietoa signaalista. Näin tulokset ovat tarkempia ja kohinan vaikutus pienempi (7, s. 91 - 92). Kuvasta 5 nähdään signaalille tehty analysointi. Analysoinnissa vahvin taajuus näkyy piikkinä kuvaajassa.

Kuvasta 5 saadaan kaava 5, jolla voidaan laskea virtaukselle nopeus, kun prosessoidusta signaalista saadaan sen taajuus ja häiriökuvion välimatka tiedetään.

$$v = \Delta x * f$$

KAAVA 5

$v$  = virtauksen nopeus (m/s)

$\Delta x$  = raitojen välinen matka (m/s)

$f$  = signaalin taajuus (Hz)

Kuvassa 8 on Artium:in LDV-laitteisto, joka sisältää laserin, signaalin prosessointiyksikön ja datankäsittelytietokoneen. Tietokoneen mukana tulee erikoistunut ohjelmisto laserlaitteistolle.(11.)

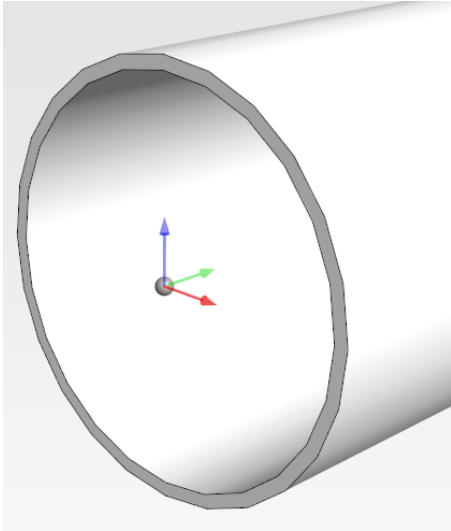


KUVA 8. LDV laitteisto (11, Lupa saatu Artium Technologies, Inc.)

### 3.6 2D- ja 3D-lasermittaus

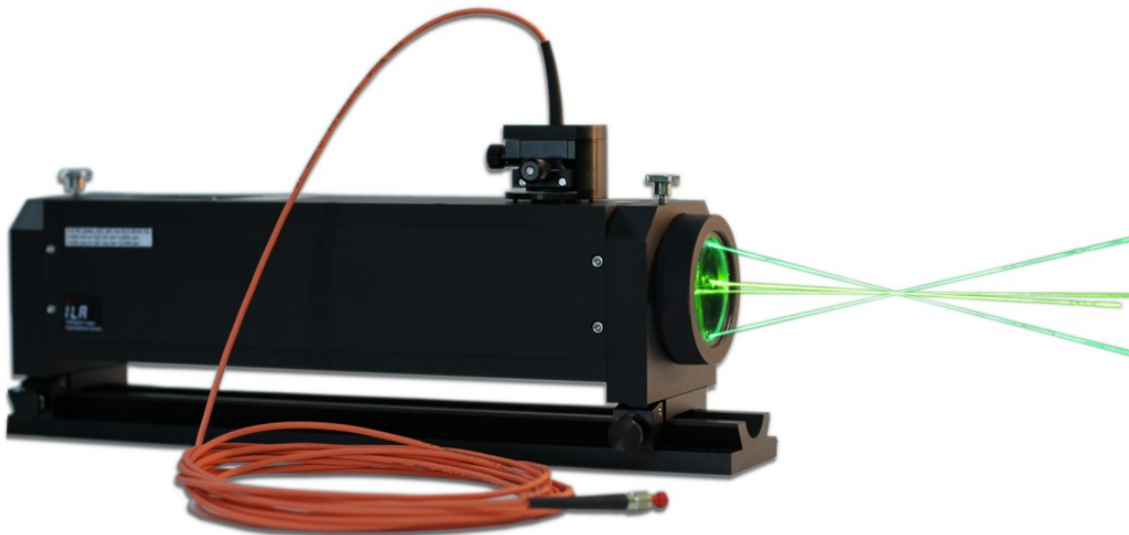
Virtauksessa olevalla partikkelilla voi olla eri nopeuskomponentteja x, y ja z suuntien mukaan. Näistä kutakin komponenttia voidaan mitata yhdellä lasersädeparilla. Yksinkertaisimmillaan nopeuden mittaus onnistuu yhdellä lasersädeparilla. Tätä kutustaan 1D-lasermittaukseksi. Lisäämällä lasereita saadaan loputkin nopeuskomponentit mitattua. (7, s. 68) Kuvassa 9 näkyy partikkelin mahdolliset nopeus suunnat.





*KUVA 9. Partikkelin akselit*

Yleisin tapa 2D-lasermittaukseen on käyttää kahta eri lasersädeparia, joilla on eri aallonpituus. Hyvänä ominaisuutena on, että eriävät aallonpituudet eivät häiritse toisiaan ja mittausalueen raidoitusta voi liikuttaa laserkohtaisesti (7, s. 70). 2D-lasersysteemi voidaan rakentaa joko kahdella erillisellä 1D-laserilla tai yhdellä laseryksiköllä, johon on integroitu kaksi laseria. Kuvassa 10 on integroitu laseryksikkö.

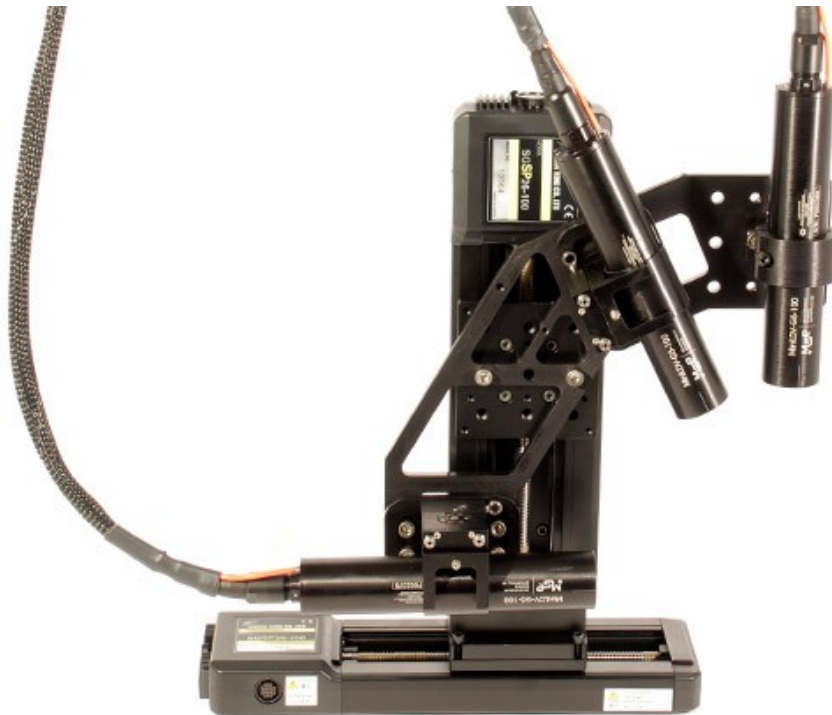


*KUVA 10. 2D-Laser (12, Lupa saatu ILA GmbH)*

3D-nopeusmittaus on parhaiten onnistunut häiriökuviotyypisellä asetelmalla. 3D-systeemit voidaan toteuttaa joko 2- tai 3 -laserilla. Kahden laserin systeemeissä on kaksi väriä, joista toisessa on 3 sädettä ja toisessa 2 sädettä.

Tässä tapauksessa pitää erottaa kaksi vihreää sädettä niin, että saadaan 3 mittausta. Tämä voidaan tehdä polarisaatiolla tai häiriökuvion liikkeellä. Tässä ongelmaksi syntyy vihreiden säteiden häiriöt toisiinsa. Kolmella laserilla mittaus onnistuu käyttämällä kolmea eri väriä, kaksi sädettä väriä kohden. Näin mittausalueeseen tulee kolme häiriökuviota. Näistä toteutuksista molempia on käytetty, ja niiden toteutustyyli vaihtelevat. (7, s. 73 - 74.)

Kuvassa 11 on Measurement Science Enterprise, Inc.:n 3D miniLDV -rakenne, johon on sijoitettu kolme miniLDV-laseria. Laserit on kiinnitetty liikkuvaan ohjausyksikköön. (13.)



*KUVA 11. 3D-laserasetelma (13, Lupa saatu MSE, Inc.)*

## 4 ESIMERKKILAITTEISTO

### 4.1 Lähtötiedot

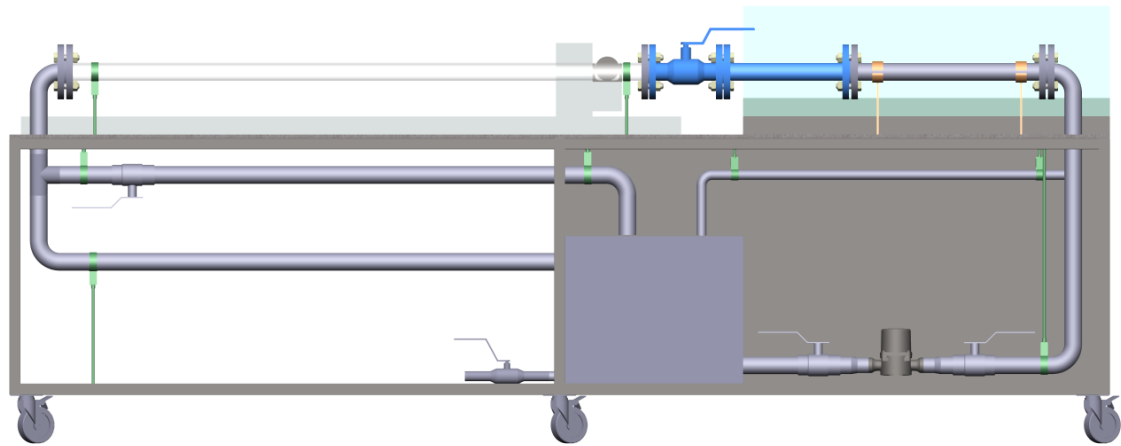
Lähtötietoihin oli annettu laitteistolle käytettävä tila, joka on 3 m leveä, 1,5 m korkea ja 1,5 m syvä. Tähän tilaan suunniteltiin virtausprofiilin mittaussympäristö. Ympäristö koostuu pumpusta, joka pyörittää vesikiertoa, putkistosta, johon on mahdollisuus vaihtaa virtausprofiili häiriöitä, venttiileistä, antureista ja virtausprofiilia mittaavasta laitteesta.

### 4.2 Suunnittelu

Ensimmäisenä oli löydettävä mittausmenetelmä, jolla voisi mitata virtausprofiilia. Erilaisista vaihtoehtoista valikoitui laser-doppler -nopeusmittausmenetelmä. Laserlaitteiston koko annettuun tilaan on sopiva. Putkivirtauksen virtausprofiilin mittaamista on samanlaisella menetelmällä tehty ennenkin (14).

Ohjausyksikön kanssa mittalaitetta voisi liikuttaa pitkin putkistoa, jolloin saadaan tuloksia eri kohdista putkistoa. Laserlaitteistojen valmistajilta löytyi lasereita ja laitteita, jotka sopisivat esimerkkilaitteistoon.

Putkiston kokoluokaksi valittiin DN40. Tähän valintaan vaikutti venttiilien yms. komponenttien painon nousu, kun putkikokoluokkaa suurennetaan. Virtausprofiilin häiriöitä on voitava vaihtaa helposti. Lisäksi käytettävää mittausmenetelmää on kokeiltu 24 mm:n putkella, jossa oli 3 mm:n seinämän paksuus ja 40mm:n sisähalkasijaltaan olevalla putkella (14; 15). Mittausalueen putki on läpinäkyvää akryyliputkea, jotta lasersäde pääsee virtaukseen. Putkeen pitäisi tehdä kierteet ulkopinnalle, johon tulisi kierreilaipat. Putkiston muut osat on tehty ruostumattomasta teräksestä, jotta putkisto ei pääse ruostumaan varastoinnin aikana. Kuvassa 12 näkyy putkiston rakenne.



KUVA 12. Putkisto

Pumpun valintaan vaikuttavista tekijöistä merkittävimmät ovat profiilihäiriön aiheuttama painehäviö ja virtausnopeus. Maksimivirtausnopeudeksi suunniteltiin 2m/s ja profiilihäiriölle varattiin 100 kPa painehäviötä. Putkiston aiheuttama virtausvastus ja mutkien kertavastukset ovat hyvin pienet verrattuna profiilihäiriön varattuun painehäviöön. Tämän takia virtausvastus ja kertavastukset voidaan jättää huomioimatta. Pumpun mitoitukseen pitää laskea tarvittava nostokorkeus ja tilavuusvirtaus.

Pumpun tilavuusvirtaus saadaan laskettua kaavalla 6.

$$q_v = A * v \quad \text{KAAVA 6}$$

$q_v$  = tilavuusvirta (m<sup>3</sup>/s)

$A$  = putken poikkipinta-ala (m<sup>2</sup>)

$v$  = virtausnopeus (m/s)

Kaavaan 6 tarvitaan putken poikkipinta-ala. DN40-putken halkaisija on 48,3 mm ja seinämänpaksuutena käytetään 1,6 mm:ä. Poikkipinta-ala saadaan laskettua kaavalla 7

$$A = \pi * \left( \frac{D - 2 * s}{2} \right)^2 \quad \text{KAAVA 7}$$

$D$  = putken halkaisija (m)

$s$  = putken seinämän paksuus (m)

Kaavalla 7 poikkipinta-alaksi saatiin 0,0015975 m<sup>2</sup>. Näin tilavuusvirraksi tulee 0,003195m<sup>3</sup>/s ja litroina 3,195 l/s.

Profiilihäiriön painehäviö voidaan muuttaa kaavalla 8 metreiksi.

$$H = \frac{\Delta P}{\rho * g} \quad \text{KAAVA 8}$$

$H$  = painehäviö metreinä (m)

$\Delta P$  = painehäviö (Pa)

$\rho$  = tiheys (Kg/m<sup>3</sup>)

$g$  = putoamiskiihtyvyys 9,81 (m/s<sup>2</sup>)

Tiheytenä käytetään pumpattavan nesteen tiheyttä, joka tässä tapauksessa vedelle on 20 °C:ssa 998 Kg/m<sup>3</sup> (1, s 648). Painehäviö metreinä on 10,21 m.

Näillä arvoilla pumpuksi sopisi Kolmeks Oy:n L-40A/2 110Ø juoksupyörällä, jolloin nostokorkeus on noin 12,5 m, tai L-32A/2 105Ø juoksupyörällä, jolla nostokorkeus on noin 11 m. Liitteissä 1 ja 2 on pumppujen pumppukäyrät, joista saadaan nostokorkeudet selville. L-32A/2-pumpulla on parempi hyötysuhde, mutta putkikoko vaihtuu pienemmäksi. Pumppua ohjataan taajuusmuuntajalla, jonka avulla voidaan muuttaa virtauksen määrää.

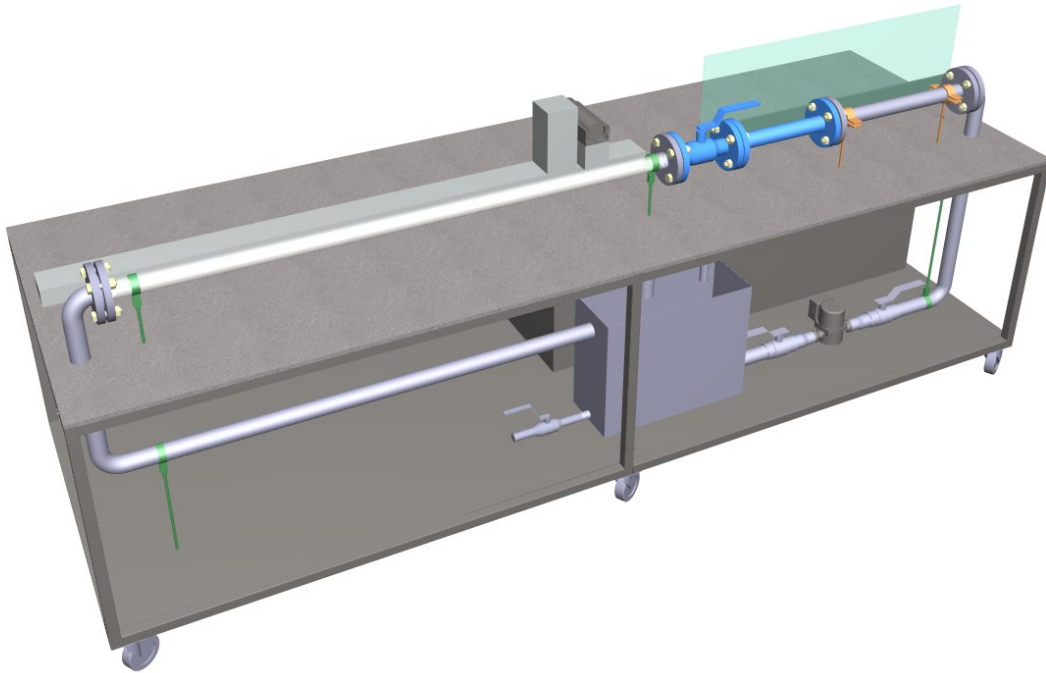
Virtaukselle Reynolds-luku saadaan laskettua kaavalla 1. Kaavaan käytetään edellä mainittua tiheyttä ja dynaamiseksi viskositeetiksi 20°C 1\*10<sup>-3</sup> N\*s/m<sup>2</sup> (1, s 648). Reynolds-luvuksi saatiin 89117,6, joten virtaus on turbulentista.

### 4.3 Laitteisto

Laitteiston kooksi tuli 3 m x 1m x 1m. Tähän kokonaisuuteen mahtuu mittausaluetta noin 2m, virtaushäiriöille on varattu 0,5 m tilaa ja saman verran profiilikorjaimelle. Ilman profiilikorjainta profiilihäiriöille olisi mahdollista saada 1m tilaa. Lisäksi olisi tilat tietokoneille, työpisteelle, laserohjaukselle ja mahdolliselle varastolle, tarvikkeille, osille, tms.

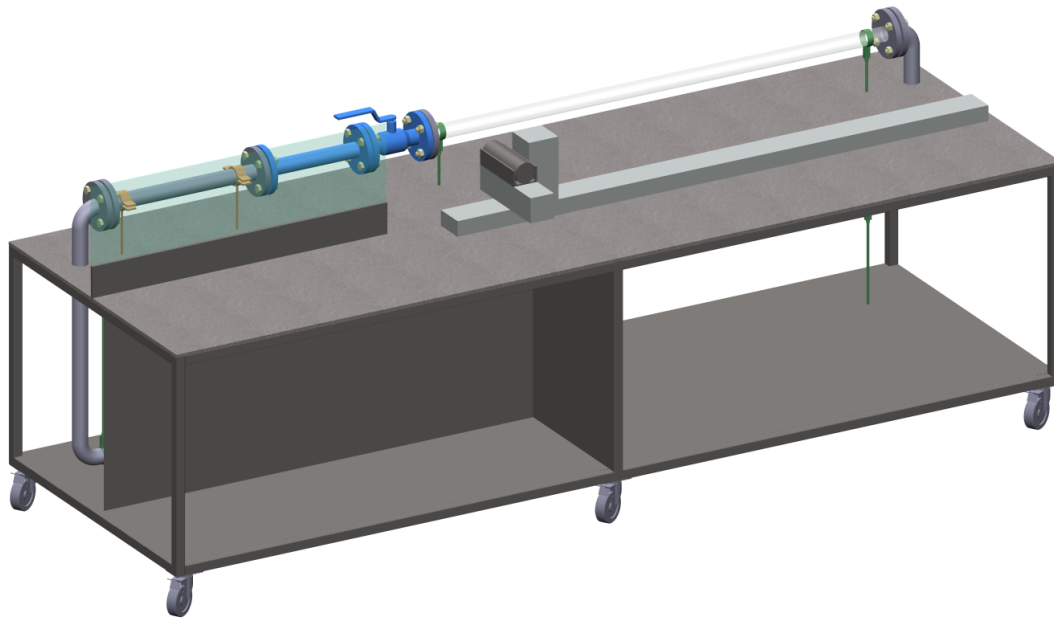
Vertex G4Plant -ohjelmalla suunniteltiin esimerkkilaitteiston 3D kuvat. Ohjelma sisälsi valmiita osia venttiileille ja putkiosille, jotka helpottivat suunnittelutyötä.

Kuvaan 12 ja 13 on merkattu virtausprofiilin häiriölähde sinisellä. Ennen sitä on virtausprofiilin korjain.



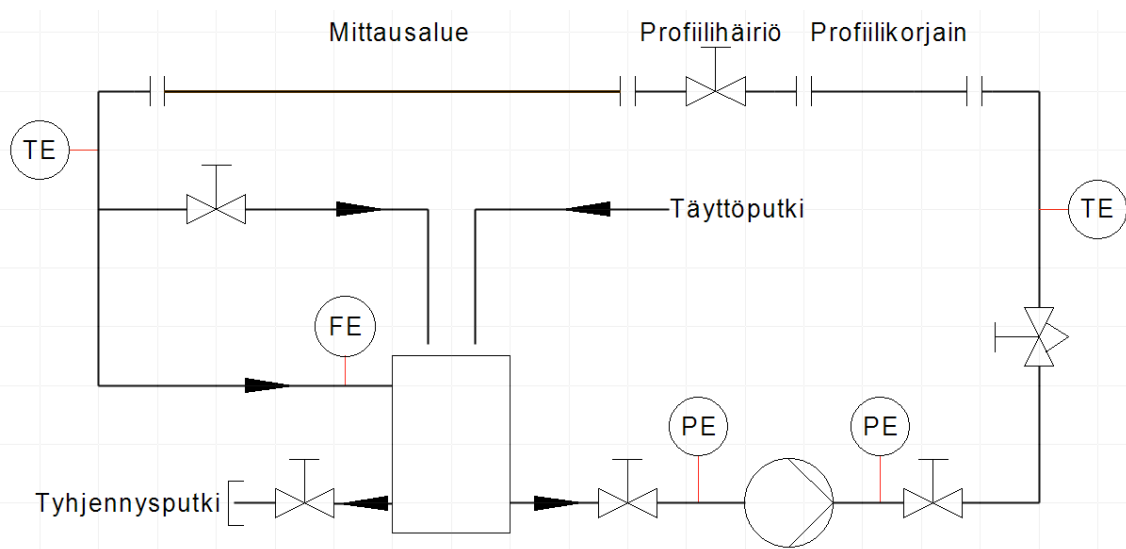
*KUVA 13. Yleiskuva laitteistosta*

Laitteisto suunniteltiin niin, että sitä olisi mahdollisuus liikutella, joten pohjaan laitettiin pyörät ja oma vesisäiliö. Työpöydän ja putkistojen väliin laitettiin roiskesuojauslevy, koska profiilihäiriötä vaihdettaessa on mahdollisuus vesiroiskeille. Kuvassa 14 on näkymä toiselta puolelta laitteistoa, jossa näkyy tilat työpisteelle ja tietokoneille.



KUVA 14. Laitteiston toinenpuoli

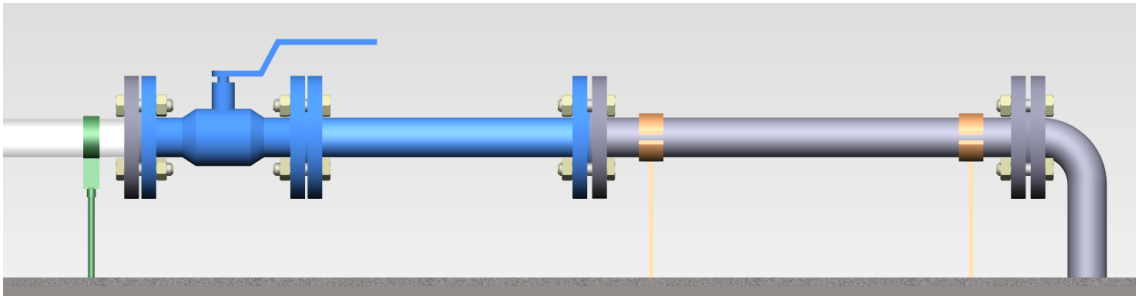
Laitteistoon asennetaan kaksi lämpötila-anturia, meno- ja paluuputkiin. Näillä seurataan veden mahdollista lämpenemistä pumpun takia. Lisäksi Re -luvun laskemiseen tarvitaan veden lämpötila. Paluuputkeen asennetaan ultraäänivirtausmittari mahdollisimman kauas viimeisestä mutkasta. Pumpua ennen ja sen jälkeen asennetaan paineen mittausta, jonka avulla voidaan mitata pumpun nostokorkeus. Kuvasta 15 nähdään anturien sijoituskohdat, tankin täyttö-, tyhjennysputket ja mittausalueen tyhjennysputki. PI-kaavio on piirretty Vertex G4Plant -ohjelmalla.



KUVA 15. Laitteiston PI-kaavio

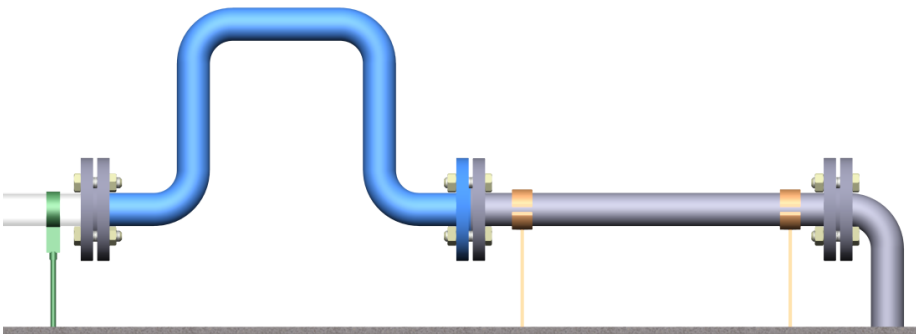
#### 4.4 Profiilihäiriöt

Laitteistoon asennettavia profiilihäiriöitä olisivat erilaiset venttiilit, putkiosista rakennettavat häiriöt, lianerottimet, virtausanturit, ja anturitaskut. Mahdollisia venttiileitä olisivat pallo-, läppä-, istukka- ja takaiskuventtiilit. Eri profiilihäiriöitä saadaan aikaan myös sulkemalla venttiilit osittain kiinni. Kuvassa 16 on esitelty esimerkkiasetelma palloventtiilistä. Venttiileille tulee jatkopala profiilikorjaimen jälkeen.



KUVA 16. Profiilihäiriönä palloventtiili

Putkimutkat aiheuttavat virtausprofiiliin häiriöitä. Putkimutkista voidaan rakentaa erilaisia asetelmia aiheuttamaan profiilihäiriöitä. Yhdistelemällä erilaisia putkiosia saadaan rakennettua monimutkaisempia häiriöitä (kuva 17).



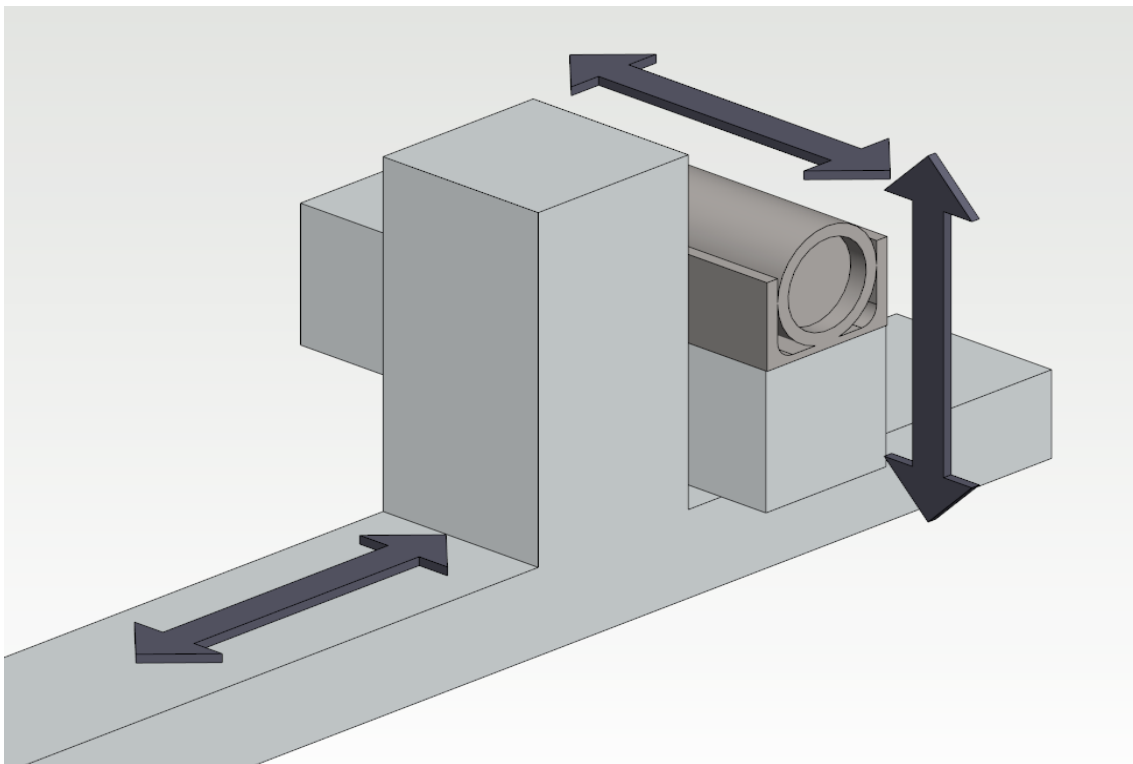
KUVA 17. Profiilihäiriö putkimutkista

Profiilikorjaimen tarkoitus on rauhoittaa virtaus niin, että virtauksen profiili olisi mahdollisimman hyvälaatuinen ennen tulevaa profiilihäiriötä. Tällä minimoidaan mutkien ja pumpun aiheuttamat häiriöt (16). Näin virtaukseen aiheutunut profiilihäiriö olisi tapahtunut ainoastaan asetetusta profiilihäiriöstä. Kuvassa 16 ja 17 profiilikorjain on ennen sinisellä olevaa profiilihäiriötä.



#### 4.5 Laser ja ohjaus

Laseriksi tulisi joko 1D- tai 2D-lasermalli. Helpon 2D-lasermittaus onnistuu asentamalla yksi laseryksikkö, johon on integroitu kaksi laseria. Laser asennettaisiin kolmeakseliseen ohjausyksikköön, jota voisi ohjata tietokoneella. Ohjauksen ansiosta virtausta voisi mitata koko läpinäkyvän putken matkalta ja poikkipinnalta. Kuvassa 18 on havainnointikuva mahdollisesta laserohjauksesta. Kuvaan on nuolin merkitty laserin liikkuvuus pituus-, syvyys- ja korkeussuunnissa.



KUVA 18. Laserohjaus

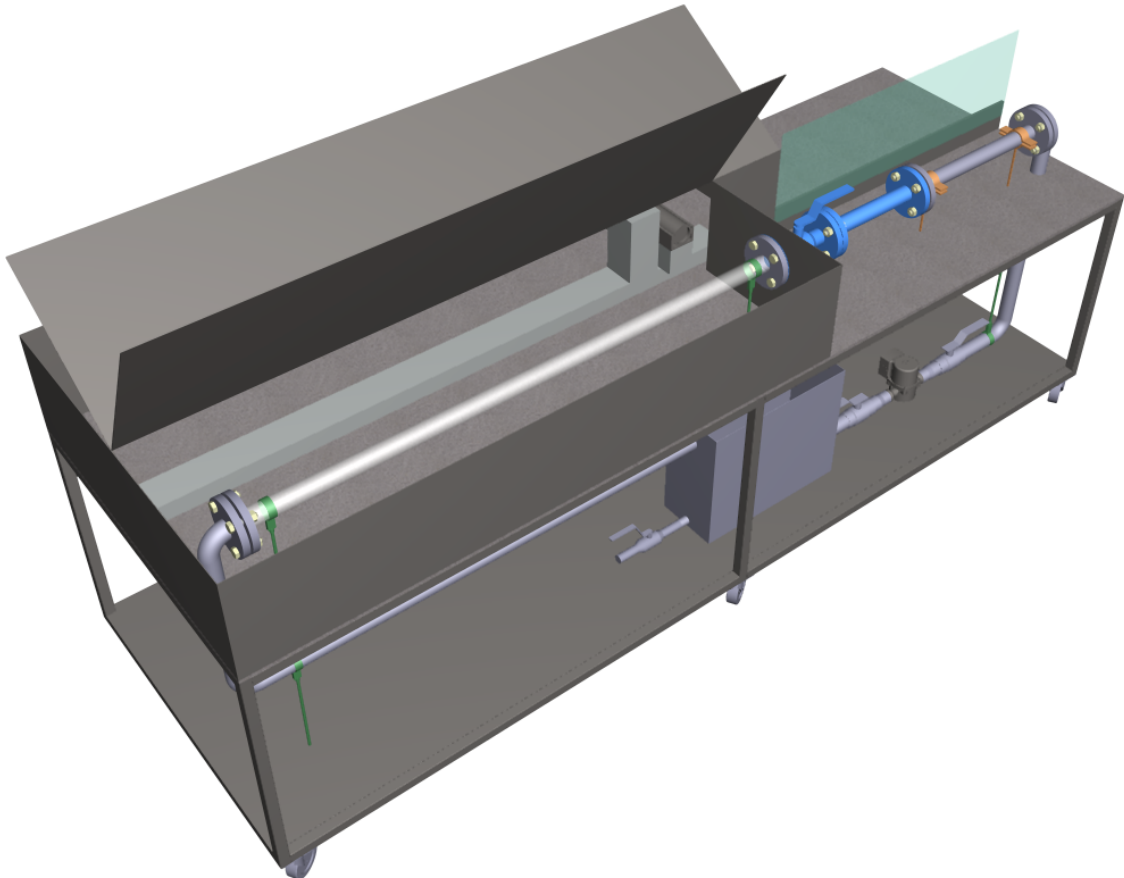
#### 4.6 Turvallisuus

Lasereille on jaettu erilaiset turvallisuusluokat. Turvallisuusluokat ovat 1, 1M, 1C, 2, 2M, 3R, 3B ja 4. Mitä tehokkaampi laser on, sitä suurempi on sen vaarallisuusluokka. (17.) Kun tutkittiin eri valmistajien laserlaitteita, niiden vaarallisuusluokka asettui luokkaan 3B tai 4.

Luokassa 3B oleva laser aiheuttaa vaaraa silmille jopa heijastuksen kautta. Luokan 4 lasereiden maksimisäteilyteho on 500 mW. Luokan 4 lasereilla ei ole

säteilytehorajoitusta, mutta ne voivat aiheuttaa vahinkoa silmille heijastuksen kautta ja suoralla säteellä palovamman iholle. (17.)

Laitteistoon voitaisiin rakentaa kotelo laserin ja mittausalueen ympärille. Näin suojattaisiin heijastuksen aiheuttamaa vaaraa. Näin laitteiston laserluokitus olisi 1, kun lasersäde ei pääse kotelon ulkopuolelle (17). Kuvassa 19 on suunniteltu kotelo.



*Kuva 19. Laitteistoon lisätty lasersuoja*

Suojakotelo koostuisi kahdesta avattavasta luukusta. Näin ei tarvitse avata yhtä isoa luukkua kun vaihdetaan profiilihäiriötä tai pitää päästä laseriin käsiksi. Kun profiilihäiriötä vaihdetaan, joudutaan avamaan suojuoluukku, koska osa laipparakenteesta on suojan sisällä. Jotta virtausprofiilia voidaan mitata heti laipparakenteen jälkeen, on laipparakenteen oltava suojan sisällä lasersäteiden takia.

Laitteistolle pitää tehdä tyyppitarkastus, jossa määrätään laserlaitteiston laserluokka ja täyttääkö laitteisto määrätyt vaatimukset. Laitteistoon tulee

useampia merkintöjä kuten laserluokka, tyyppitarkastus, varoituskilvet, säteen lähtöaukko. Lisäksi avattavaan laitteistoon tulee varoitus laserluokan muuttumisesta. Laitteisto tulisi myös varustaa kytkinmekanismilla, jolla varmistetaan, että laitteiston laserluokka pysyy samana avattuna ja suljettuna. (18.)

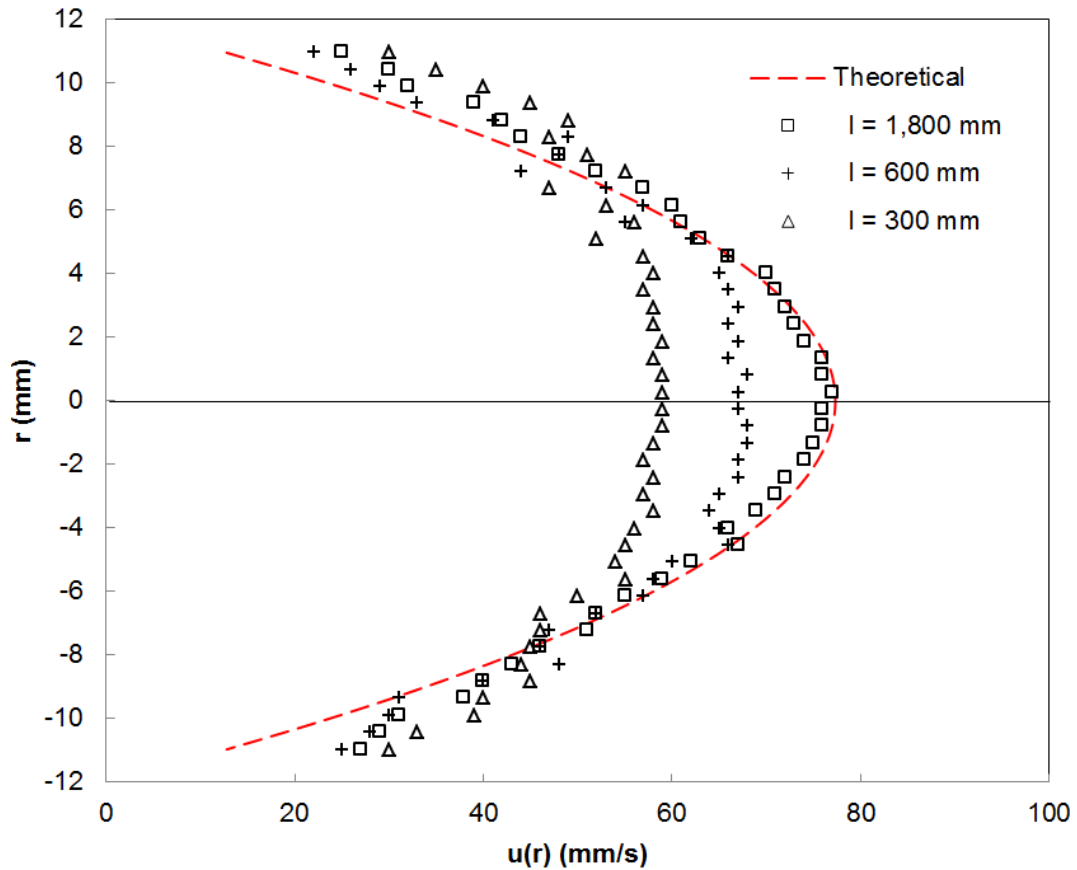
Laitteiston kanssa työskentelevien on saatava turvallisuuden takia tarpeeksi tietoa laitteesta, toiminasta, turvallisuusmerkinnöistä, suojautumisen tarpeesta ja varotoiminpiteistä. (18.)

#### **4.7 Mittauksesta**

Mittauksen tarkoituksena on selvittää virtausprofiili virtaushäiriön jälkeen. Laserin ohjauksen ansiosta virtausta voi mitata eri kohdista putkea. Näin päästään mittaaman virtausprofiilin muuttuminen ja sen palautuminen häiriöstä. Lisäksi voidaan selvittää mittauslaitteille tarvittavaa virtausprofiilin rauhoittumisetäisyyttä.

Valmistajat antavat yleensä mittauslaitteille etäisyyden, kuinka paljon suoraa putkea pitäisi olla ennen mittauslaitetta. Rauhoittumisetäisyyteen vaikuttaa mittauslaitteen tyyppi ja minkälaisen häiriön jälkeen mittauslaite asennetaan (19). Tämän etäisyyden sopivuutta voidaan demonstroida opiskelijoille.

Mittauksista tehdään 2D- tai 3D-kuvia, joissa näkyy virtauksen profiili. 2D-kuva saadaan aikaan, kun mitataan pystyakselin poikki ja tulokset visualisoidaan x- ja y-akseleille, jossa x akseli osoittaa nopeutta. Kuvassa 20 on esitelty tulokset tieteellisestä julkaisusta, jossa mitattiin laminaarisen virtausprofiilin kehittymistä laser-dopplerlaitteistolla. Julkaisussa käytettiin 1D laserlaitteistoa ja mittaukset tehtiin putken halkaisijan matkalta eri kohdista putkea. (14.)



KUVA 20. Virtausprofiili visualisointi (14, Lupa saatu IOP Publishing ja Arman Molki)

3D-kuvaaja saadaan, kun mitataan useasta kohtaa virtauksen poikkipinta-alalta. Kun mittauspisteistä on  $x$ ,  $y$  akselien tiedot ja  $z$  akselia käytetään nopeusakselinä.

#### 4.8 Valmistajia

Opinnäytetyöhön tietoa etsittäessä tuli vastaan useita valmistajia, jotka tarjosivat kokonaisia järjestelmiä laser-doppler -nopeusmittausmenetelmään. Näitä valmistajia ovat ainakin Intelligent Laser Applications GmbH, TSI Incorporated, Artium, Measurement science enterprise, Inc. ja Dante Dynamics.

## 5 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli suunnitella Oulun ammattikorkeakoululle virtausprofiilin mittauslaitteisto, jolla voi mitata erilaisten profiilihäiriön aiheuttamaa muutosta virtausprofiiliin. Mittauslaitteistolle oli annettu tilan kooksi 3 m leveä, 1,5 m korkea ja 1,5 m syvä. Laitteistoon piti etsiä mittausmenetelmä, jolla virtausprofiili voidaan mitata, suunnitella putkisto, miettiä mahdollisia profiilihäiriöitä, etsiä sopiva pumppu ja piirtää esimerkkilaitteistosta 3D-kuva.

Suunnittelu alkoi etsimällä sopiva mittausmenetelmä. Mittausmenetelmäksi valikoitui laser doppler -nopeusmittaus. Tällä mittausmenetelmällä pystyi laserin avulla mittaamaan virtausnopeuden läpinäkyvän putken lävitse. Lisäksi laserlaitteisto on sopivan kokoinen ja valmistajilta löytyi sopivia ratkaisuja. Tieteellisissä julkaisuissa on samanlaisia laserlaitteistoja käytetty virtausprofiilin mittaamiseen. Tämän mittausmenetelmän ympärille rakentui kuva siitä minkälainen laitteistosta tulisi. Tämän avulla 3D suunniteltiin esimerkkilaitteisto.

Esimerkkilaitteiston tyylisiä pumpulla pyöriviä vesikiertolaitteistoja on tieteellisissä julkaisuissa ollut, mutta nämä ovat olleet täysin kehittyneen virtausprofiilin mittaamiseen tarkoitettuja tai niitä on käytetty seinämän lähellä olevan virtauksen tutkimiseen.

Profiilihäiriöiden aiheuttamaa profiilin muutosta on tutkittu hyvin vähän jos ollenkaan. Esimerkkilaitteiston avulla tähän voisi saada lisää tietoa kuten myös siitä, kuinka hyvin laser doppler nopeusmittaus soveltuu profiilihäiriöiden mittamiseen. Esimerkkilaitteisto esiintyy kuvissa vain esimerkkinä ja lopullinen laitteisto voi poiketa tästä.

## LÄHTEET

1. Elger, Donald F. - Williams, Barbara C. - Crowe, Clayton T. - Roberson, John A. 2014. Engineering fluid mechanics. 10., SI version. Hoboken (NJ): Wiley.
2. Reprinted from Introduction to Fluid Mechanics, edition 1, Yasuki Nakayama, Kazuyasu Izawa, and Robert Boucher, Flow in pipes, 111-135., 1998, with permission from Elsevier [OR APPLICABLE SOCIETY COPYRIGHT OWNER].
3. Reprinted from Introduction to Fluid Mechanics, edition 1, Yasuki Nakayama, Kazuyasu Izawa, and Robert Boucher, Flow of viscous fluid, 82-110., 1998, with permission from Elsevier [OR APPLICABLE SOCIETY COPYRIGHT OWNER].
4. Nakayama, Yasuki - Boucher, Robert - Izawa, Kazuyasu 1998. Introduction to Fluid Mechanics. Oxford: Elsevier Science & Technology.
5. Boutier, Alain 2013. Classification of Laser Velocimetry Techniques. Teoksessa Boutier, Alain (toim.). Laser Velocimetry in Fluid Mechanics. Somerset: Wiley. S. 15-31.
6. Durst, F. - Melling, A. - Whitelaw, J. H. 1976. Principles and practice of laser-doppler anemometry. London: Academic Press Inc. (London) Ltd..
7. Boutier, Alain – Most, Jean-Michel 2013. Laser Doppler Velocimetry. Teoksessa Boutier, Alain (toim.). Laser Velocimetry in Fluid Mechanics. Somerset: Wiley. S. 33-138.
8. Measurement Principle of Laser Doppler Velocimetry (LDV). ILA GmbH Saatavissa: <https://www.ila.de/ldv/measurement-principle.html> Hakupäivä 9.4.2018.
9. Boutier, Alain – Elena, Max 2013. Seeding in Laser Velocimetry. Teoksessa Boutier, Alain (toim.). Laser Velocimetry in Fluid Mechanics. Somerset: Wiley. S. 283-303.

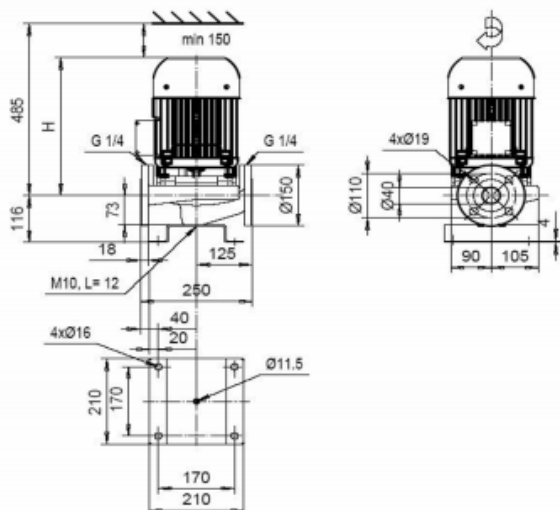
10. How an LDV/LDA works 2014. Measurement Science Enterprise, Inc. Saatavissa: <http://measurementsci.com/how-an-ldv-lda-works/> Hakupäivä 23.4.2018.
11. LDV200TRX esite 2017. Artium Technologies, Inc. Saatavissa: [http://www.artium.com/wp-content/uploads/2017/01/LDV200TRX\\_Brochure\\_Updates\\_1425\\_v5.pdf](http://www.artium.com/wp-content/uploads/2017/01/LDV200TRX_Brochure_Updates_1425_v5.pdf) Hakupäivä 27.4.2018.
12. LDV 2D probe fp50shift. ILA GmbH Saatavissa: <https://www.ila.de/ldv/ldv-probes/2d-fp50shift.html> Hakupäivä 23.4.2018.
13. 3D miniLDV 2014. Measurement Science Enterprise, Inc. Saatavissa: <http://measurementsci.com/products/3d-minildv/> Hakupäivä 27.4.2018
14. Molki, Arman – Khezzar, Lyes – Goharzadeh, Afshin 2013. Measurement of fluid velocity development in laminar pipe flow using laser Doppler velocimetry. European Journal of Physics vol. 34, nro 5. S. 1127-1134. Saatavissa: <https://doi.org/10.1088/0143-0807/34/5/1127>
15. den Tooner, J.M.J – Nieuwstadt, F.M.T. 1997. Reynolds number effects in a turbulent pipe flow for low to moderate Re. Physics of Fluids vol. 9, nro 11. S. 3398-3409. Saatavissa: <https://doi.org/10.1063/1.869451>
16. Flow Conditioning 2018. VORTAB Company Saatavissa: <http://www.vortab.com/Applications/Flow-Conditioning.asp> Hakupäivä 14.5.2018.
17. Laserluokat 2015. Säteilyturvakeskus (STUK). Saatavissa: <http://www.stuk.fi/aiheet/laserit/laserluokat> Hakupäivä 18.4.2018.
18. L 291/2008. Valtioneuvoston asetus aserlaitteista ja niiden tarkastuksesta
19. Weiss, Jeff 2016. Flow Measurement: The Truth About Upstream and Downstream Pipe Diameters. Saatavissa: <https://www.crossco.com/blog/flow-measurement-truth-about-upstream-and-downstream-pipe-diameters> Hakupäivä 7.5.2018.

20. Pumpun L-40A/2 datalehti 2017. Kolmeks Oy. Saatavissa: [www.kolmeks.fi/Download/21972/L-40A-2-50-60Hz.pdf](http://www.kolmeks.fi/Download/21972/L-40A-2-50-60Hz.pdf) Hakupäivä 4.5.2018.

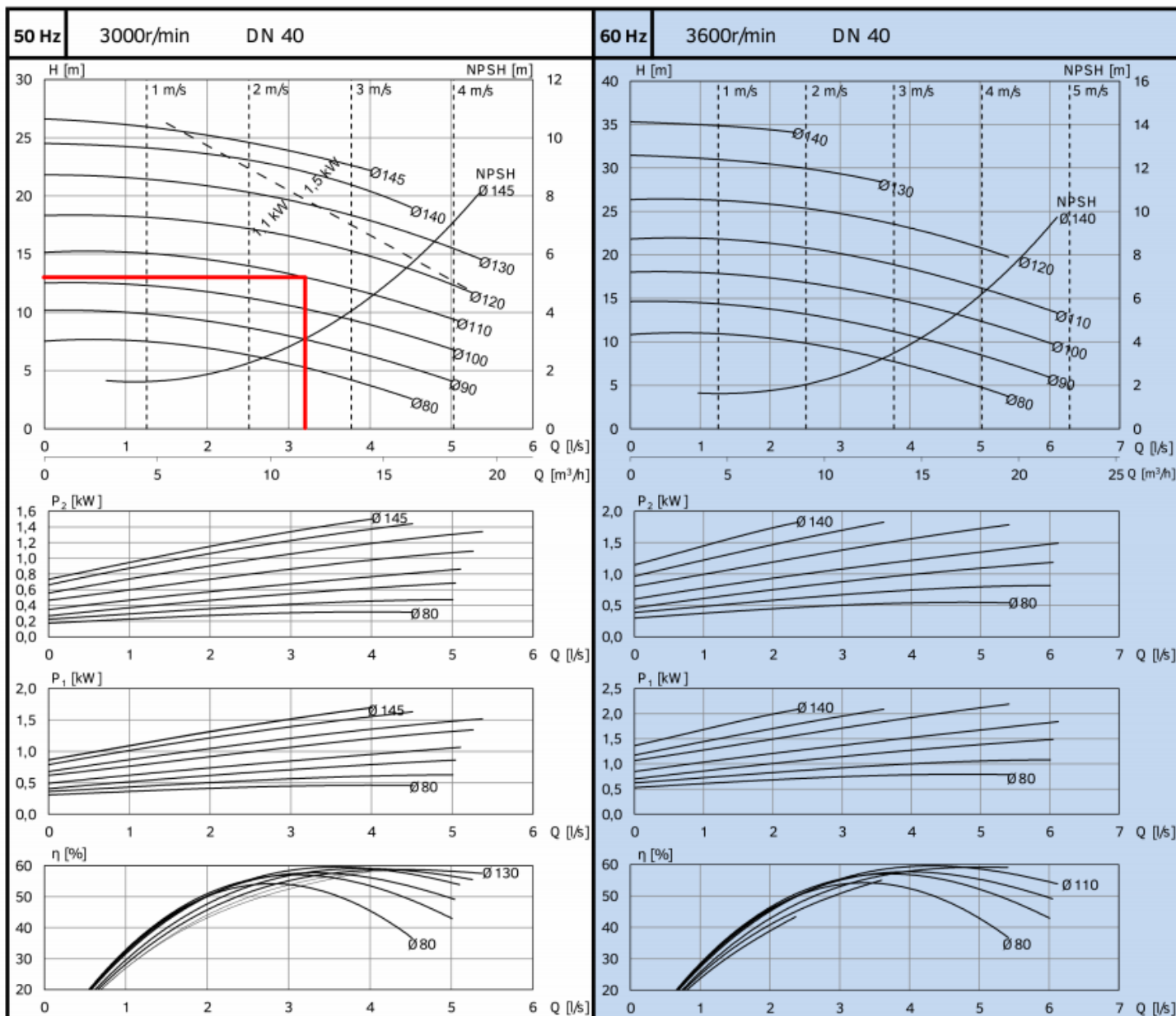
21. Pumpun L-32A/2 datalehti 2017. Kolmeks Oy. Saatavissa: [www.kolmeks.fi/Download/21970/L-32A-2-50-60Hz.pdf](http://www.kolmeks.fi/Download/21970/L-32A-2-50-60Hz.pdf) Hakupäivä 4.5.2018.



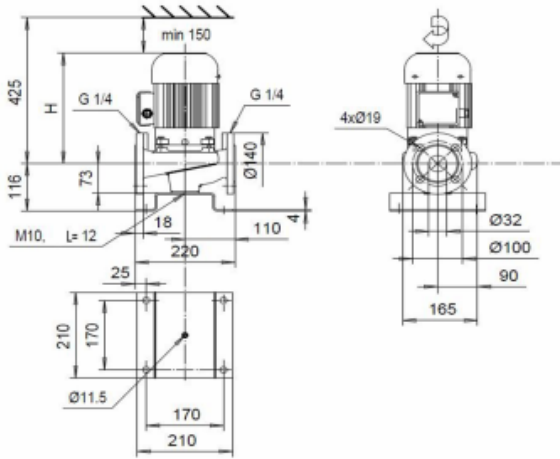
L-40A/2



50 Hz	Motor 400V	$P_{2N}$ [kW]	$I_N$ [A]	[kg]	H [mm]
	KP-80-1 N13	1,1	2,16	27	310
KP-90-1 N13	1,5	3,22	34	390	
60 Hz	Motor 380-400V (460-480V)	$P_{2N}$ [kW]	$I_N$ [A]	[kg]	H [mm]
	KP-80-1 N13	1,1 (1,3)	2,25 (2,22)	27	310
KP-90-1 N13	1,5 (1,8)	3,22 (3,41)	34	390	



L-32A/2



ZH05	Motor 400V		$P_{2N}$ [kW]	$I_N$ [A]	[kg]	H [mm]
	OP-741 N12		0,25	0,66	17	225
	KP-80-1 N12		0,65	1,39	21	330
ZH09	Motor 380-400V(460-480V)		$P_{2N}$ [kW]	$I_N$ [A]	[kg]	H [mm]
	OP-741 N12		0,25 (0,3)	0,67 (0,70)	17	225
	KP-80-1 N12		0,65 (0,75)	1,45 (1,40)	21	330
		KP-80-1 N12	1,1 (1,3)	2,25 (2,22)	24	330

