



Lämpisymittauksen kehitys

Valmet Technologies Oy

Santeri Kuokkanen

OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2025

Konetekniikka
Tuotekehitys

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Konetekniikka
Tuotekehitys

KUOKKANEN, SANTERI
Läpäisymittauksen Kehitys

Opinnäytetyö 39 sivua, joista liitteitä 0 sivua
Toukokuu 2025

Opinnäytetyössä tutkittiin työkalun läpäisymittausta. Työn tilaajana toimi Valmet Technologies Oy. Tutkimusongelmana oli nykyisen mittaustavan parantaminen tai kokonaan uuden laitteiston kehittäminen läpäisymittausta varten. Käytössä oleva mittauslaitteisto käytti alipaineistettua ilmaa ja oli herkkä virheille. Opinnäytetyössä tutkittiin erilaisia mittaustapoja paineelle ja virtaukselle, jotta saataisiin hyvä käsitys kehitystyön etenemisestä ja siinä käytettävistä komponenteista. Mittauksessa keskeinen muutoksen kohde koettiin olevan siinä käytettävä väliaine. Sen täytyi olla enemmän prosessissa käytössä olevan aineen kaltaista, jotta tulokset olisivat merkityksellisiä. Väliaineeksi valikoitui vesi, jolla mittaamista alettiin tutkimaan.

Opinnäytetyötä varten rakennettiin täysin uusi mittauslaitteisto Valmetin Yrittäjänkadun tehtaalle Tampereelle. Mittauslaitteisto käytti väliaineena vettä, jota johdettaisiin työkalun läpi ja mitattaisiin sen virtausta ja painetta. Mittausjärjestely käytti vedensyöttönä vesijohtovettä ja laitteisto rakennettiin helppokäyttöiseksi ja siirrettäväksi. Mittauslaitteiston mittauspuolelle kiinnitettiin testisuuttimia, joilla simuloitiin prosessissa käytettäviä työkaluja. Mittauslaitteiston tuloksia verrattiin edelliseen alipainemittaukseen ja tehtiin päätelmät sen käytettävyydestä.

Jatkokehitystä laitteistolle jäätin kaipaamaan, jotta sitä voitaisiin testata prosessissa käytössä olevilla työkaluilla. Mittauspään suunnittelu tähän tarkoitukseen jäi suurimmaksi kehityskohteeksi. Vedensyötön voimakkuus ja paine olivat myös haasteena, koska teollisuuskiinteistön vesijohdosta ei saatu tasaista virtausta muiden käyttäjien vuoksi. Tästä johtuen suljettu systeemi voisi antaa tasaisempia tuloksia.

Asiasanat: läpäisymittaus, virtausmittaus, tuotekehitys, mittaaminen

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Mechanical Engineering
Product Development

KUOKKANEN, SANTERI:
Development of Permeability Measurement

Bachelor's thesis 39 pages, appendices 0 pages
May 2025

This bachelor's thesis focuses on permeability measurement in a tooling application. The purpose was to develop an entirely new measurement method or improve the one currently in use. This thesis was commissioned by Valmet Technologies Oy. The current permeability meter uses vacuum as a working principle to measure flow through the surface. This method was not accurate enough due to air leaks and the meter being too sensitive.

The first research subject was different pressure and flow measurement methods to see which one would fit this project the best. The objective was to determine the most suitable element for the measurement. A decision was made to carry out measurements using water. The meter was built using general parts used in water piping to make the system easy to build, maintain and upgrade. The system included a pressure controller, a flow meter, a pressure meter and a ball valve. The other end of the system was connected to a water supply and the other to the test nozzle. The test nozzle was used to simulate the tooling application used in the manufacturing process. Water was fed through these nozzles, and the pressure and flow rates were documented.

The future of this project is still unsure, but development is necessary. The test nozzle needs to be updated to fit the tooling application better. Currently this nozzle application only simulates the results and does not fully validate the results with the process application.

Key words: permeability measurement, flow measurement, product development

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	TYÖN TARKOITUS JA TILAAJA	7
	2.1 Valmet Technologies Oy	7
	2.1.1 Historia	7
	2.1.2 Nykytila ja tulevaisuuden strategia	7
	2.2 Työn tarkoitus.....	8
3	TEORIA	9
	3.1 Tuotekehitysprosessi	9
	3.2 Virtausmittaus	11
	3.2.1 Virtausmittauksen teoriaa	11
	3.2.2 Virtausmittaustyytit	12
	3.3 Painemittaus	16
	3.3.1 Painemittaustyytit	17
4	MITTAUKSEN KEHITYS	20
	4.1 Alkutilanne	20
	4.2 Mittauksen kehitystyö.....	20
	4.3 Mittauslaitteisto	22
	4.3.1 Virtausmittaus.....	23
	4.3.2 Paineensäätö ja mittaus	24
	4.4 Mittauslaitteiston kokoonpano.....	26
5	TULOKSET	28
	5.1 Vertailumittaukset.....	28
	5.2 Laitteiston testaus	29
	5.3 Vesimittaus	31
6	POHDINTA	36
	6.1 Projektin kulku ja haasteet	36
	6.2 Jatkokehitys	37
	LÄHTEET.....	38

1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan läpäisymittauksen kehitystä Valmetin tuotannossa olevissa työkaluissa. Läpäisymittausta täytyy kehittää sen nykyisen epätarkkuuden vuoksi. Olemassa olevassa mittaustavassa raja-arvot ovat liian lähellä toisiaan, eikä se sisällä tarvittavaa tarkkuutta. Nykyinen mittaustapa perustuu alipaineeseen ja on herkkä vuodoille, täten tulokset voivat olla epäluotettavia. Mittaustavassa käytettävä väliaine on myös tärkeä tarkastelun kohde. Tässä opinnäytetyössä perehdytään mittaamiseen veden avulla ilman sijaan.

Teoriaosiossa perehdytään tuotekehitysprosessiin tarkemmin ja sen lisäksi pohditaan eri mittaustapoja, joita tässä opinnäytetyössä voitaisiin hyödyntää. Mittaustavoista käydään läpi virtaus- ja painemittausta sekä niihin liittyviä sovelluksia. Mahdollisista mittaustavoista valitaan parhaat tämän opinnäytetyön tarkoitukseen. Lopulta tarkoituksena on rakentaa mittaamiseen sopiva laitteisto, jotta päästään vertaamaan tuloksia ja tekemään loppupäätelmät mittaamiseen käytettävän väliaineen valinnasta tulevaisuutta varten. Tämän lisäksi laaditaan mahdollinen jatkosuunnitelma mittauksen jatkokehitystä varten.

Tässä opinnäytetyössä noudatan Hyvän tieteellisen käytännön (HTK) periaatteita. HTK:n periaatteita ovat luotettavuus, rehellisyys, arvostus ja vastuunkanto. (Tutkimuseettinen neuvottelukunta, 2023, s.11).

2 TYÖN TARKOITUS JA TILAAJA

2.1 Valmet Technologies Oy

2.1.1 Historia

Valmetin historia ulottuu 1750-luvulle saakka, jolloin Viaporiin perustettiin allas-
telakka, joka siirtyi Suomen valtion ja osaksi Valmetin omistukseen. Palvelut-
liiketoimintalinjaan nykyisin kuuluva Tamfelt perustettiin vuonna 1797. Tamfelt kes-
kittyi tekstiilien valmistukseen. 1800-luvulla on perustettu useita yrityksiä, jotka
ovat nykyisin osa Valmetia. 1900-luvun puolessa välissä useita Suomen valtion
metallitehtaita yhdistyi, josta syntyi vuonna 1951 yritys nimeltä Valmet Oy. (Val-
met n.d)

Valmet aloitti valmistamaan paperikoneita 1950- luvun alussa ja keskittyi yhä
vahvemmin paperikoneisiin ja niiden teknologiaan. Samalla se luopui laivojen-,
kiskokaluston-, hissien-, ja traktoreiden valmistuksesta. Valmet osti ruotsalaisen
Karlstads Mekaniska Werkstad-nimisen yrityksen vuonna 1986 sekä Tampella
Papertech Oy:n vuonna 1992. Vuonna 1999 Valmet Oyj ja Metso Oyj sulautuivat
ja yhteinen nimi muutettiin Metso Oyj:ksi. Vuonna 2013 päätettiin, että yhtiöt jae-
taan kahdeksi eri yhtiöksi, Valmetiksi ja Metsoksi. Valmetin liiketoiminnaksi jäivät
sellu, paperi sekä voimantuotanto. (Valmet n.d)

2.1.2 Nykytila ja tulevaisuuden strategia

Valmet on nykyään maailman johtavia yrityksiä prosessiteknologiassa, automaa-
tioratkaisuissa sekä palveluissa liittyen sellu-, paperi-, ja energiateollisuuteen.
Valmetilla on vahva kansainvälinen asema ja toimintoja lähes jokaisessa maan-
osassa. Suurimpia toimialueita ovat EMEA ja Pohjois-Amerikka. Valmet työllistää
yli 19 000 työntekijää maailmanlaajuisesti. Kuviossa 1 on esitetty Valmetin stra-
tegiaa tulevaisuutta kohti. Valmet panostaa vahvasti kestävään kehitykseen ja
palveluiden tuottamiseen asiakkailleen. (Valmet n.d)



Kuvio 1. Valmetin tie eteenpäin (Valmet n.d)

2.2 Työn tarkoitus

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää parempaa mittaustapaa työkalujen läpäisyarvojen mittaamiseen joko olemassa olevan mittarin tilalle tai kehittää kyseistä mittaria. Olemassa olevan mittaustavan raja-arvot olivat liian lähellä toisiaan, mikä vaikeuttaa työkalun laadunvarmistusta. Työkalun toimintavarmuuden kannalta olisi tärkeää, että mittauksien raja-arvoihin saataisiin lisää skaalaa, jotta arvoista saataisiin enemmän irti. Mittarin herkkyys ilmavuodoille on myös iso haaste nykyisellään. Lisäksi keskeisenä tavoitteena opinnäytetyön aikana on selvittää mittaamiseen parhaiten soveltuva väliaine. Nykyisin käytössä olevan ilman sijasta lähdettiin testaamaan veden käyttöä mittauksessa. Kiinnostuksen kohteena oli tulosten eroavaisuudet suhteessa vertailumittauksiin. Mittaustuloksissa oli tärkeää verrata paineen ja virtauksen arvoja edelliseen mittaustapaan ja tutkia onko väliaineiden kesken korrelaatiota.

3 TEORIA

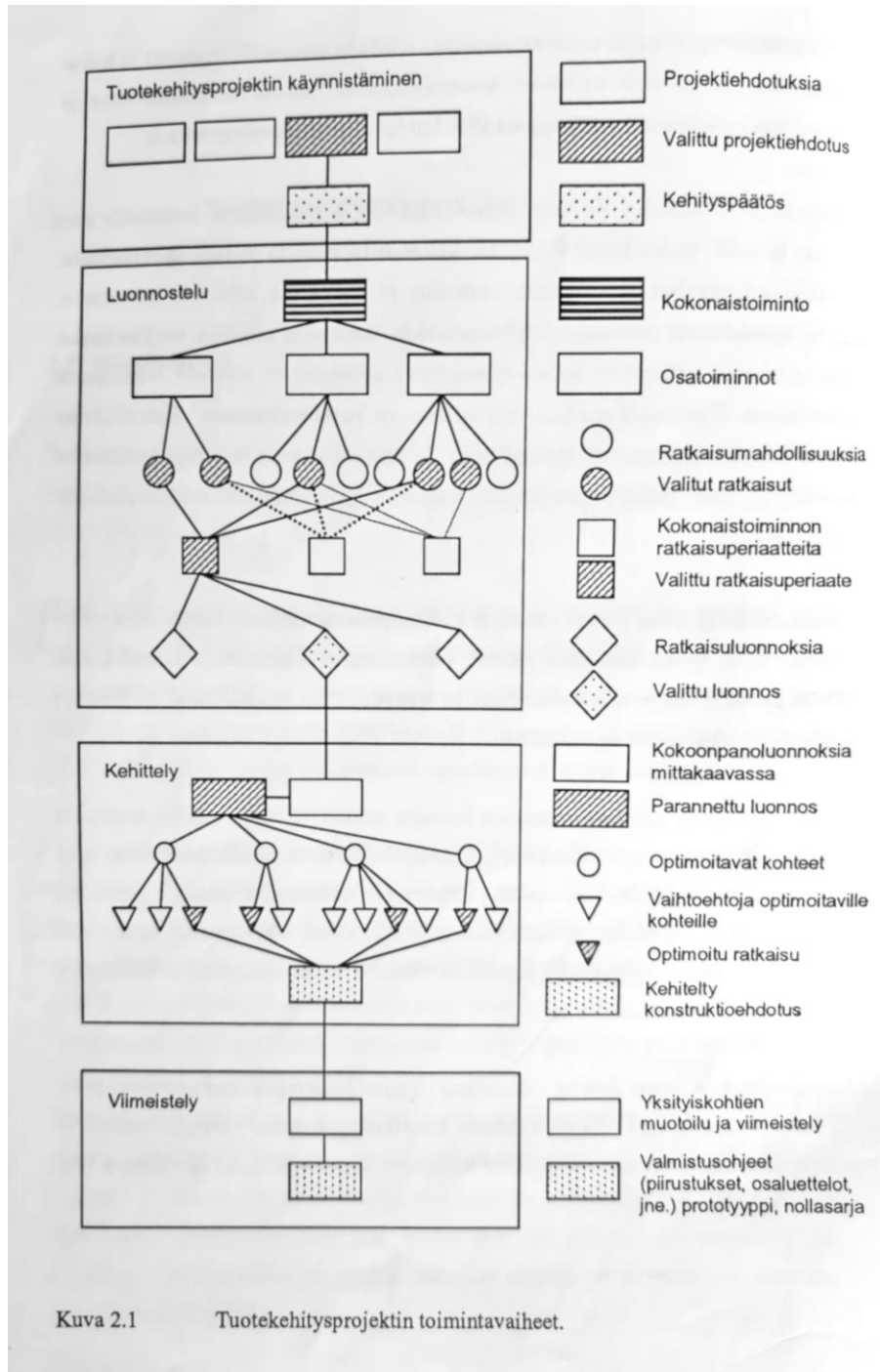
3.1 Tuotekehitysprosessi

Tuotekehityksellä voidaan tarkoittaa täysin uuden tuotteen suunnittelua tai jo olemassa olevan tuotteen kehittämistä paremmaksi. Tuotekehityksen kohteena voi olla tuotteen teknisen toimivuuden parantaminen tai valmistamiseen liittyvien kustannuksien alentaminen. (Jokinen 2001, s.10). Tuotekehitysprosessi voidaan jakaa yleisesti ottaen neljään eri vaiheeseen: käynnistäminen, luonnostelu, kehittäminen ja viimeistely (kuvio 2). Käynnistämisvaiheeseen sisältyy projektin kannalta oleellisten taustatietojen selvittäminen sekä mahdollisten kustannuksien ja tuottojen laskenta. (Jokinen 2001, s.14).

Luonnosteluvaiheessa tuotteelle asetetaan vaatimukset ja tavoitteet, joiden mukaan edetään. Tämä vaihe etenee seuraavaksi yleistämisellä, jossa pyritään irtautumaan tuotteen tehtävästä ja etsiä ratkaisuja laajemmalla. Lisäksi luonnosteluvaiheessa etsitään tuotteen suurimmat ongelmat ja tuotteen kokonaistoiminto. Kokonaistoiminto jaetaan osatoiminnoiksi, joille aletaan etsimään ratkaisuja. Näitä yhdistelemällä pyritään löytämään ratkaisu kokonaistoiminnolle. Ratkaisusta syntyy ratkaisuluonnoksia, joita arvioidaan huolellisesti parhaan ratkaisun löytämiseksi. (Jokinen 2001, s.14-15).

Kolmas vaihe, eli kehittämisvaihe jatkaa siitä mihin edeltävissä vaiheissa jäätiin. Kehittämisvaiheessa luodaan kokoonpanoluonnos, jonka avulla voidaan havaita tuotteen heikkoja kohtia, joihin pyritään löytämään ratkaisuja. Tuotteen kannalta oleellisimmat osat, kuten esimerkiksi hinta ja rakenne, optimoidaan. Jos vaatimukset saadaan täytettyä, voidaan siirtyä eteenpäin. Jos epäkohtia vielä havaitaan, siirrytään takaisin ratkaisuluonnoksiin. (Jokinen 2001, s.15)

Viimeinen vaihe on viimeistely, jossa laaditaan käyttö- ja huolto-ohjeet sekä työpiirustukset ja osaluettelot. Näiden jälkeen voidaan valmistaa mahdollisia prototyyppisiä tai nollasarjoja, joilla voidaan testata tuotteen toimivuutta ennen lopullisen tuotteen rakentamista. Tämän vaiheen jälkeen voidaan tehdä päätökset tuotannon aloittamisesta tai löydetyn ratkaisun käyttöönotosta. (Jokinen 2001, s.17)



Kuva 2.1 Tuotekehitysprojektin toimintavaiheet.

Kuvio 2. Tuotekehitysprojektin vaiheet (Jokinen 2001, s.16)

3.2 Virtausmittaus

Opinnäytetyön kehitystyössä oli tarpeellista selvittää tarvittavat mittaustavat sekä niiden hyödyt ja haasteet mittauksiin, joita tulitisiin suorittamaan. Mittauksista työssä käytettäväksi soveltui virtausmittaus sekä painemittaus, joilla väliaineen läpäisyä työkalun läpi voitiin todeta. Väliaineena oli alun perin tarkoitus käyttää vettä, ilmaa tai prosessissa käytettävää ainetta, joten mittauksen täytyi olla tarkka monelle eri aineelle. Tätä varten täytyi selvittää mittaustavat, jotka toimivat universaalisti lähes joka väliaineelle ja tarkentaa valinta opinnäytetyön edetessä ratkaisuvaiheeseen. Ratkaisuvaiheessa valittiin yksi väliaine, jonka ympärille mittaustaitteistoa alettiin rakentamaan.

3.2.1 Virtausmittauksen teoriaa

Virtausmittauksella tarkoitetaan tilavuus- tai massavirran mittaamista tietyn poikkileikkauksen läpi, esimerkiksi avonaisen kanavan tai putken läpi. Tällainen määrittäminen on hyödyllinen useissa prosesseissa, kun tarvitsee tietää esimerkiksi käytetyn kemikaalin määrä tai veden laskutus tietyn kulutuksen mukaan. Virtausta mitataan useimmiten yksiköillä m^3/h , t/h tai l/min . Virtauksen määrä voidaan määrittää, kun tiedetään putken tai kanavan poikkipinta-ala. Virtausnopeudesta saadaan tilavuusvirta V kaavalla 1. Virtauksen nopeutta voidaan kuvata esimerkiksi yksiköllä m/s . (Pihkala 2004, s.59) Tässä opinnäytetyössä tarvittava virtauksen yksikkö on l/min .

$$V = vA \quad (1)$$

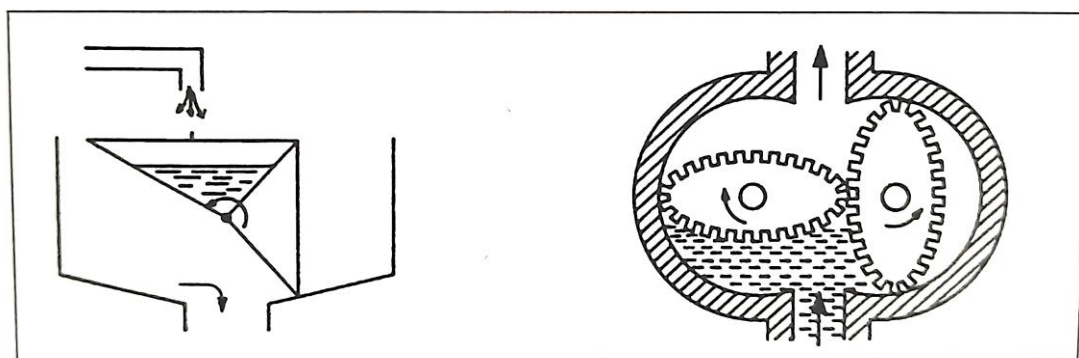
Putken sisällä kulkevan nesteen virtausprofiili riippuu täysin putkiston muodosta ja sen koosta. Yleensä putkessa olevan mutkan kohdalla virtausnopeus suurenee mutkan ulkoreunan puolelta. Virtausnopeus on myös suurempi putken keskiosalla verrattuna putken reunoille, koska putken kitkavaikutus hidastaa nesteen virtausta. Useat virtausmittarit tarvitsevat putkessa suoraa osuutta ennen mittausta ja sen jälkeen, jotta virtaus on mahdollisimman tasaista, jolloin saadaan tarkempi mittaus. Jos tämä ei ole mahdollista, voidaan putken sisään tehdä virtauksen oikaisija, esimerkiksi ohjauslevy. Virtausta mitattaessa täytyy myös ottaa

huomioon anturin aiheuttama painehäviö putkessa. Suurin häviö syntyy putken sisälle asetettavista antureista. Lisäksi on olemassa putken ulkopuolelle asennettavia antureita, jotka eivät häiritse putken sisällä virtaavaa nestettä. (Pihkala 2004, s.60)

3.2.2 Virtausmittaustyypit

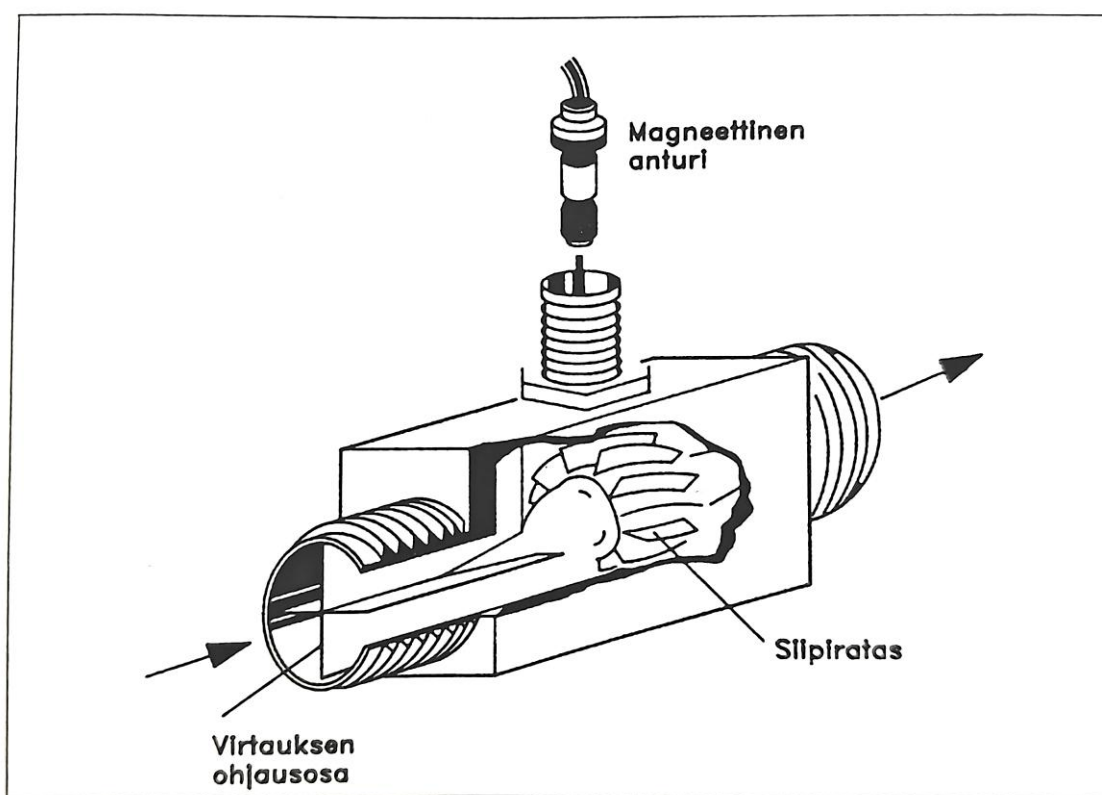
Anturityyppejä virtausmittaukseen on useita. Karkeasti eroteltuna on olemassa mekaaniset mittarit, paine-eroon perustuvat mittarit sekä coriolis-voimaan perustuvat mittarit että pyörrevirtaukseen perustuva mittausta. Lisäksi putken ulkoisia mittaustapoja on induktiivinen mittausta sekä akustiset ja optiset menetelmät. Mittarin valintaan voi vaikuttaa asennuskohde, jossa täytyy ottaa huomioon mahdolliset mittausta häiritsevät tekijät, kuten värinä tai putkiston rakenne. Lisäksi valintaan vaikuttavat mitattava aine, mittarin hinta ja vaatimukset, kuten virtausmäärä.

Mekaanisia mittareita ovat esimerkiksi tilavuuslaskurit. Näissä antureissa virtaus kulkee mittauksen läpi tietyn suuruisena määränä, josta voidaan laskea läpi virtauksen aineen volyyymi. Kuviossa 3 on esitetty ns. kippilaskuri vasemmalla ja soikioratasmittari oikealla. Kippilaskurissa oleva mittauskammio täyttyy ja tyhjenee kippaamalla sivulle, josta aiheutuu yksi pulssi. Soikioratasmittarissa on tietyn tilavuuksinen kammio, jonka täytyessä rattaat pyörähtävät ja kammio tyhjenee. Virtaus saadaan rattaiden pyörimisliikkeestä. Tilavuuslaskureilla saadaan tarkkoja tuloksia jo hyvin pienillä virtauksilla, mutta ne tuottavat paljon painehäviötä sekä vaativat hyvin puhdasta nestettä toimiakseen. (Pihkala 2004, s.61; Lanasa & Upp 2014 s.201.)



Kuvio 3. Tilavuuslaskureita (Pihkala 2004, s.61)

Muita mekaanisia mittaustapoja ovat esimerkiksi siipipyörälaskuri, turbiinimittari sekä rotametri. Siipipyörälaskuri ja turbiinimittari perustuvat pyörimisnopeuden mittaamiseen. Rotametri on ns. muuttuva-aukkoinen virtausmittari. Siipipyörälaskurissa on nimensä mukaisesti siipiratas, joka on sijoitettu kammioon, josta aine virtaa läpi. Siipipyörä pyörii virtausnopeuden mukaan. Tämä on yleisin vesimittareissa käytetty mittaustapa. Turbiinimittarissa on myös samankaltainen siipiratas, mutta sen pyörimistä mitataan induktiivisesti turbiinin siipiin sijoitettujen magneettien tuottaman magneettikentän vaihtelun avulla. (Pihkala 2004 s.63) Kuviossa 4 nähdään turbiinimittarin toimintaperiaate. Siipipyörä on sijoitettu kohtisuoraan virtaukseen nähden, toisin kuin siipipyörälaskurissa.



Kuvio 4. Turbiinimittari (Pihkala 2004 s.63)

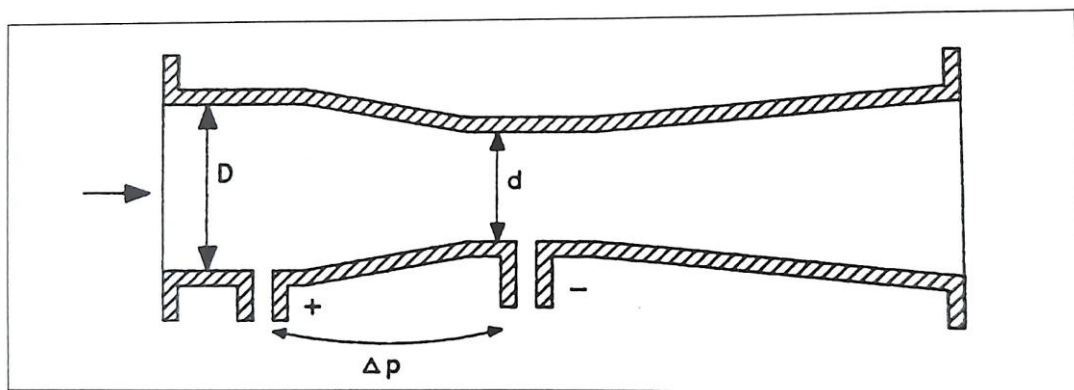
Rotametri perustuu putken sisään sijoitettuun uimuriin, joka asettuu eri korkeuksille ohi virtaavan aineen paine-eron avulla. Uimuri nousee ylemmäs paine-eron voimalla, mutta samalla virtausaukko suurenee ja paine-ero laskee. Uimuri pysyy näin tarkasti paikallaan. Rotametri asennetaan pystysuoraan putkeen. (Pihkala 2004, s.64)

Paine-eroon perustuvia mittauksia on useita, mutta yleisimmin ne perustuvat virtauksen kuristamiseen tavalla tai toisella. Kuristuselimen kummaltakin puolelta

mitataan painetta ja näiden paine-ero on suoraan verrannollinen virtauksen neliöön, kuten kaavassa 2 on esitetty.

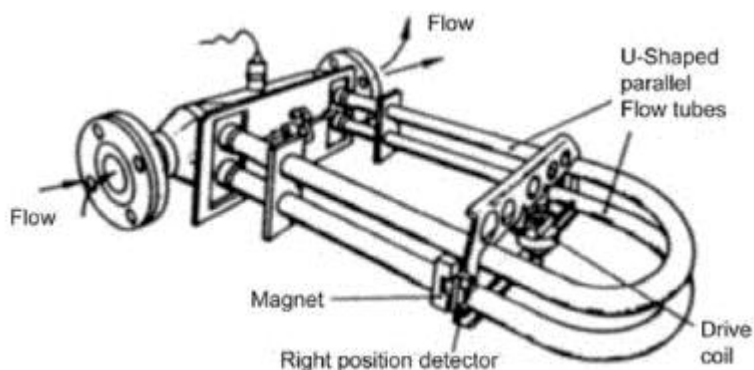
$$V = k\sqrt{\Delta p} \quad (2)$$

Kuristuselimillä on erilaisia, mutta kaikki toimivat samalla periaatteella. Yleisimmät ovat mitta- ja segmenttilaippa, mitta- ja venturisuutin. Venturisuuttimessa on näistä vaihtoehdoista pienin painehäviö, mutta se on huomattavasti kalliimpi, kuin muut kuristuselimet. Kuviossa 5 nähdään venturiputken rakenne.



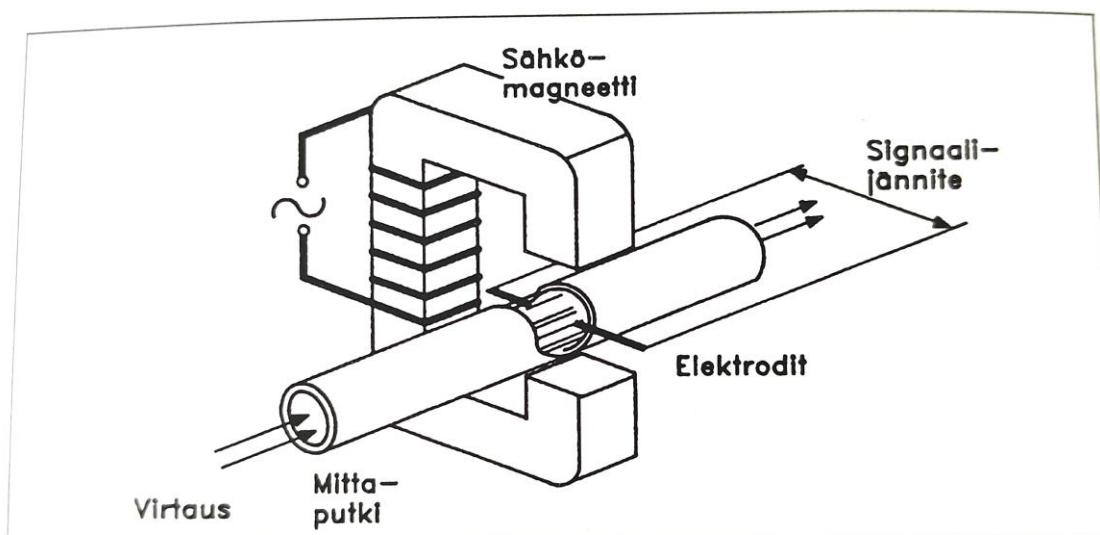
Kuvio 5. Venturiputken rakenne (Pihkala 2004, s.72)

Coriolis-voimaan perustuva mittaus (kuvio 6), perustuu massan mittaukseen. Laitetta tärisytetään vakiotaaajuudella, jolloin virtaavan aineen inertia tuottaa vaiheeron, jota pystytään mittamaan. Massavirtaa voidaan mitata jo hyvin pienestä määrästä virtausta (20 g/h). Laite on erittäin monikäyttöinen ja sillä voidaan mitata lähes minkä tahansa kaasun ja nesteen virtausta tarkasti. (Pihkala 2004, s.75) Mittauksen heikkoutena voidaan pitää mittauksesta tulevaa värinää, joka täytyy ottaa huomioon. Putkisto pitää suunnitella niin, ettei värinä pääse vaikuttamaan muihin mittauksiin. (Latasa & Upp 2014, s.190)



Kuvio 6. Coriolismittaus (Lanasa & Upp 2014 s.188)

Magneettiset mittaukset (kuvio 7) perustuvat mitattavan aineen sähkönjohtavuuteen ja magneettiseen käämiin, joka luodaan sähkömagneetilla putken ympärille. Mittauksen etuna on monikäyttöisyys, sillä magneettisella mittaustavalla voidaan mitata aineita, jotka eivät ole esimerkiksi täysin nestettä, vaan sisältävät kiinteitä aineita. Mittarilla pystytään mittamaan kaikkia tiheyksiä, eikä mittari aiheuta painehäviötä, koska mittaus on täysin putken ulkopuolinen. Mittaustavan huonoja puolia ovat mittaustavan kallis asennus- ja käyttöhintaa sekä se, ettei kaasuja pystytä mittamaan. Lisäksi aineen täytyy olla sähköä johtavaa, jotta mittaus pystyy sitä lukemaan. (Lanasa & Upp 2014, s.191)



Kuvio 7. Magneettinen virtausmittaus. (Pihkala 2004, s.76)

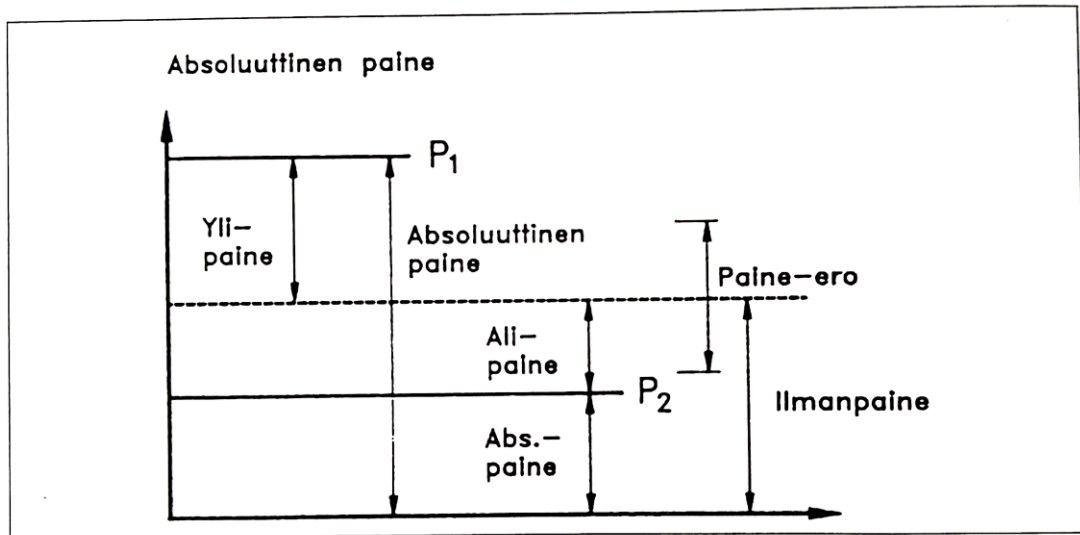
3.3 Painemittaus

Paineen mittaus on yksi yleisimmistä mittauksista prosessiteollisuudessa ja erityäin tarpeellinen myös tässä opinnäytetyössä. Tärkeä mittauskohde on hydrostaattinen paine, joka tarkoittaa nesteessä vaikuttavaa painetta. Opinnäytetyössä rakennettavaa laitteistoa varten tarvitsee saada aikaan vakioaine, joten painetta täytyy pystyä säätelemään ja tarkkailemaan. Tätä varten täytyy selvittää parhaat vaihtoehdot paineen mittaamiseen ja säätöön.

Paineen yksikkönä SI- järjestelmässä käytetään pascalia, jonka lyhenne on Pa. Yleisesti käytössä on myös yksiköt bar ja psi. Käytännön sovelluksissa paineet ovat yleensä satoja tuhansia pascaleita, joten käytössä on yleisimmin yksiköt MPa ja KPa, eli megapascal ja kilopascal. Paine itsessään määritellään voimaksi pinta-alaa kohden (kaava 3).

$$p = \frac{F}{A} \quad (3)$$

Paineen lajeja on monia erilaisia. Absoluuttinen paine vertautuu nollapaineeseen, josta voidaan puhua myös tyhjiönä. Absoluuttisessa nollapaineessa ei esiinny molekyylien törmäilyä. Yleensä paineesta puhuttaessa tarkoitetaan ilmanpainetta. Ilmanpaine on yleisimmin noin 1 bar. Ilmanpainetta pidetään yleensä vertailukohtana painemittauksessa. Sen ylittävää osuutta kutsutaan ylipaineeksi, kun taas alittavaa alipaineeksi. Tässä opinnäytetyöprojektissa mitataan ylipainetta. Yleensä mitattu paine on suhteellinen paine, eli paine-ero mitattavan aineen ja ilmanpaineen välillä. Kuviossa 8 näkyy, mitä absoluuttinen paine tarkoittaa verrattuna ilmanpaineeseen.

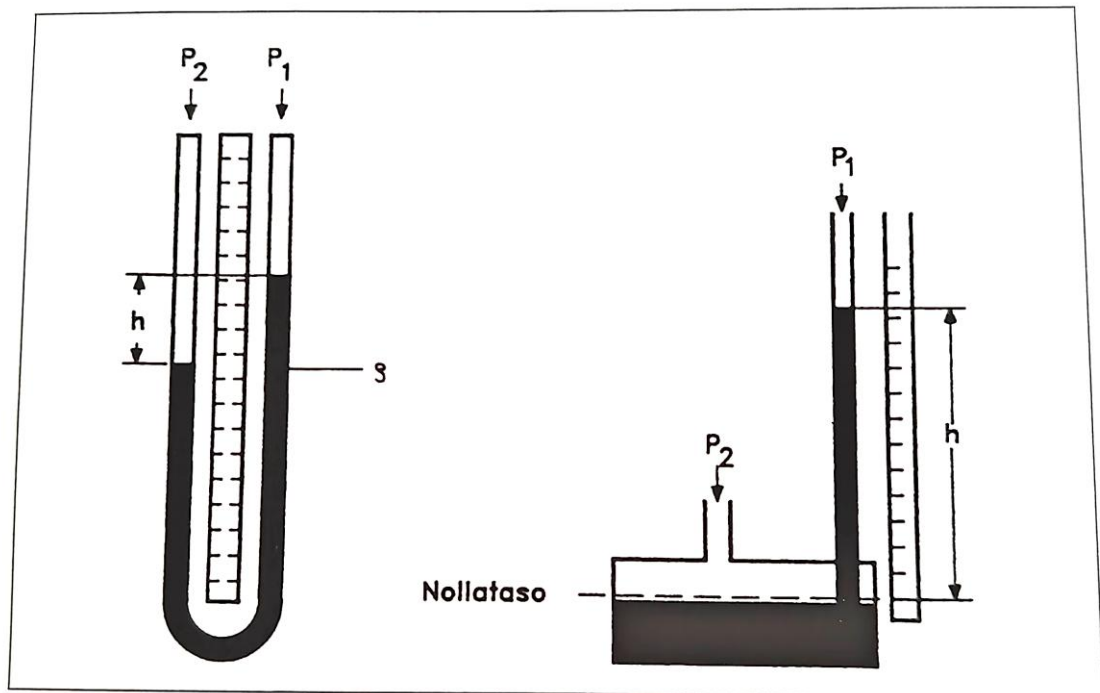


Kuvio 8. Paineen lajit (Pihkala 2004, s.20)

3.3.1 Painemittaustyypit

Painetta voidaan mitata useilla eri sovelluksilla. Yleisiä mittaustapoja ovat neste-täytteiset anturit, joustavilla elimillä mittaaminen ja sähköiset menetelmät. Neste-täytteisiä antureita ovat esimerkiksi U-putkimanometrit, joissa on U-kirjaimen muotoinen putki täytettynä nesteellä. Kun putken molempiin päihin vaikuttaa sama paine, on nestepatsas yhtä korkealla kummallakin puolella. Kuvioista 9 nähdään U-putkimanometrin toimintaperiaate.

Paine-ero paineiden 1 ja 2 välillä muuttaa nestepatsaiden korkeutta, jolloin niistä voidaan lukea suoraan paine-eroa. Jos toiseen päähän vaikuttaa pelkkä ilmanpaine, voidaan lukea yli- tai alipainetta. Kuviossa 9 on esitetty myös yksipatsasmanometri, jonka toimintaperiaate on samanlainen, mutta toinen puoli on korvattu suuremmalla säiliöllä ja lukema otetaan ainoastaan yhdestä pinnankorkeudesta. Toinen pää sulkemalla ja putki kokonaan täyttämällä, voidaan U-putkimanometrillä mitata myös absoluuttista painetta. Nämä mittaustekniikat ovat nykyisin harvinaisia, sillä mittaustekniikat ovat kehittyneet roimasti. (Pihkala 2004, s.21)



Kuvio 9. U-putki- ja yksipatsasmanometri (Pihkala 2004, s.21)

Edelleen laajasti käytössä oleva paineen mittaamiseen käytetty tapa on joustavilla elimillä mittaaminen, eli paineen muuttaminen voimaksi tai liikkeeksi. Esimerkkinä tästä voidaan käyttää ns. bourdonkaarta. Bourdonkaari on pieni putki, joka laajenee ja oikenee paineen kasvaessa. Tällöin saadaan yksinkertaisesti muutettua paine liikkeeksi. Bourdonkaaren liike on siis verrannollinen paineeseen. Yleensä tämän kaltaisissa mittareissa on käytössä vipu- tai hammasvälitys, joka on yhteydessä suoraan mittarin osoittimeen. (Pihkala 2004, s.23-24.) Tämän kaltaisissa mittareissa etuna on helppo asennus ja käyttö. Mittari ei tarvitse sähköä toimiakseen ja sillä saadaan tarkkoja tuloksia. Mittari on myös hankintakustannuksiltaan hyvin edullinen.

Painetta voidaan mitata myös sähköisillä menetelmillä. Sähköisiä menetelmiä voidaan hyödyntää myös perinteisissä mekaanisissa mittauksissa käyttämällä muuntimia, esimerkiksi liikkeestä tai voimasta sähköiseksi viestiksi. Tämä mahdollistaa datan tarkemman käsittelyn ja mittarien etäluennan, jolloin prosessinvalvonta helpottuu huomattavasti. Liikkeestä sähköiseksi viestiksi pystytään muuntamaan mittaustuloksia esimerkiksi venymäliuska-, pietsoresistiivisistä- tai kapasitiivisista antureista. Venymäliuska asennetaan tutkittavaan pintaan kiinni ja liuskassa oleva lanka venyy. Venyessään sen resistanssi kasvaa. Mittauksia voidaan tehdä esimerkiksi joustavien mittauselimien pinnasta. Yleensä liuskoja

asennetaan useita, jolloin osa venyy ja osa puristuu kasaan. Näin voidaan sähköistää perinteisiä mittaustapoja. (Pihkala 2004, s.28-29.)

Pietsyresistiivinen anturi toimii venymäliuskan tavoin, mutta resistanssi muuttuu anturin sisällä olevan piikalvoon syntyvän jännityksen ansiosta, eikä venymän, kuten venymäliuskassa. Pietsyresistiivinen anturi on huomattavasti herkempi lämmön vaikutukselle, joka on huomioitava mittausta tehdessä. Kapasitiivinen anturi taas perustuu anturin sisässä olevaan mittauskammioon, jonne johdetaan mitattavat paineet. Välitysnesteenä paineille toimii silikoniöljy, joka vaikuttaa kammion välissä olevaan kalvoon. Tämän kalvon liikkeestä saadaan kapasitanssin muutos, josta voidaan lukea paine. (Pihkala 2004, s.30-31.)

4 MITTAUKSEN KEHITYS

4.1 Alkutilanne

Nykyisessä mittaustavassa käytetään alipainetta hyödyksi läpäisyn mittaamiseen. Tässä mittaustavassa on heikkouksia, joita lähdettiin kehittämään, kuten mittauspään tiivistys työkalun pintaa vasten. Huono tiiveys johtaa ilmavuotoon, joka vääristää tulosta huomattavasti. Tämän heikkouden takia ei pystytä mittaamaan luotettavasti koko työkalun alueelta. Mittarin herkkyys on siis nykyisen mittaustalaitteiston suurin ongelma. Tärkein selvitettävä asia oli mittauksessa käytettävä väliaine, joka vaikuttaa mittauksen toteutustapaan, siihen vaadittaviin tiloihin ja mittaustapoihin.

4.2 Mittauksen kehitystyö

Kehitystyö alkoi vierailulla demotehtaalle, jossa tuotantoprosessiin tutustuttiin. Sen jälkeen Jokisen (2001) tuotekehitysprosessin mukaisesti alkoi luonnosteluvaihe, jossa selvitettiin laitteiston vaatimuksia ja kokonaistoimintoa. Kokonaistoimintona täytyi olla läpäisymittaus ja siihen käytettävän väliaineen valinta.

Uutta mittaria kehitettäessä suunnittelutyöhön kuului vaatimusten määrittely. Vaatimusten perusteena on laitteiston toiminnallisuus kokonais- ja osatoimintojen täyttämiseksi. Vaatimusmäärittelyn kautta päästiin kiinni osatoimintoihin. Vaatimuksiin vastaavat ratkaisut on taulukoitu taulukossa 1. Lisäksi vaatimusten tärkeys määriteltiin kolmeen eri kategoriaan: suuri, keskiverto ja matala. Näin saatiin keskittyä oleellisiin ratkaisuihin.

Taulukko 1. Vaatimusmäärittely

Vaatimus	Ratkaisu	Tärkeys
Virtauksen määrittely	Mekaaninen virtausmittari, turbii-nimittari, vortex-mittari, magneetti-mittari	Suuri
Paineen säätö ja tasaus	Paineenalennusventtiili, painemittari	Suuri
Mittatarkkuus	+ -1% mittaustuloksesta	Suuri
Rakenne	Mahdollisimman yksinkertainen, kupariputki, pöytäasennus	Keskiverto
Kustannus	Komponenttien valinta, laitteiston rakenne	Matala
Käytettävyys	Yksinkertainen	Keskiverto

Taulukossa 1 käsitelty vaatimusmäärittely osoittaa, että kaikista tärkeintä laitteistolle on mittaustarkkuus. Komponenttien valinnassa tärkeäksi osoittautuu virtauksen tarkka mittaus ja paineen säätö tasaiseen arvoon. Mittauslaitteiston täytyy myös olla mahdollisimman yksinkertainen ja kustannustehokas, jotta mahdollinen kehitystyö ja laitteiston huolto on helppoa. Yksinkertainen laitteisto tuottaa helposti toistettavia mittaustuloksia, kun se on helppokäyttöinen. Lisäksi laitteiston suunnittelussa tuli huomioida rajallinen aikataulu. Rajallisen aikataulun takia laitteiston rakentamisessa oli hyödynnettävä komponentteja, jotka olivat helposti tai nopeasti saatavilla ja rakennettavissa. Näiden voitaisiin sanoa olleen laitteiston osatoimintoja.

Tämän jälkeen alettiin pohtimaan laitteiston suunnittelua. Luonnosteluvaiheessa kehiteltiin kaksi eri ratkaisumahdollisuutta. Ensimmäinen ratkaisu yhdisti alipaineen ja vedellä tehtävän mittauksen. Tässä oli tarkoituksena tuottaa alipaine työkalun läpi ja samalla syöttää vettä, joka imettäisiin työkalun läpi ja mitattaisiin virtaus. Tämä ratkaisu hylättiin kokonaan tarkemman tarkastelun jälkeen. Järjestely ei olisi tuottanut vertailukelpoisia tuloksia ja olisi ollut liian monimutkainen. Tästä johtuen toinen ratkaisu oli se, jota tässä opinnäytetyössä alettiin lopulta kehittämään. Tämän ratkaisun koettiin täyttävän vaatimukset paremmin yksinkertaisemmalla rakenteella. Kun ratkaisu oli valittu, voitiin siirtyä kehittämissä vaiheeseen.

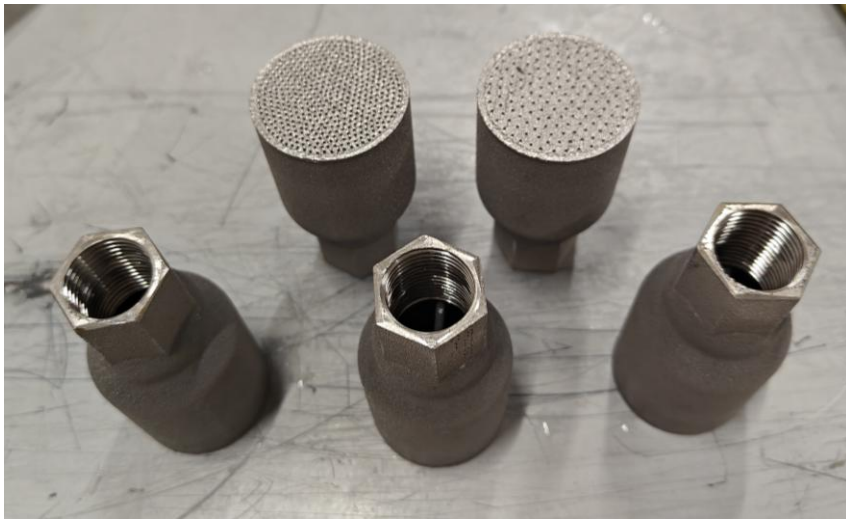
(Jokinen 2001), jossa alettiin laatia kokoonpanoluonnoksia. Kun oli saatu kehitettyä jatkojalostukseen kelpaava idea, alettiin toteuttaa sen rakentamista.

Laitteiston suunnittelu jatkui tarjouspyynnöillä alihankkijoilta. Mittarista pyydettiin tarjoukset kahdesta eri paikasta yhteensä kolmesta eri mittarista. Lopulliseen valintaan vaikutti liitettävyyden ja helppokäyttöisyyden lisäksi mittarin hinta. Putki-osat muuhun laitteistoon tilattiin suoraan vertailematta useita toimittajia. Tärkeintä oli, että osat saataisiin yhdestä paikasta samalla tilauksella ajan säästämiseksi ja tilauksen sujuvoittamiseksi. Tässä vaiheessa projektin aikataulu oli jo tiukka, joten tilauksen toimitusaika oli erittäin isossa roolissa ja vaikutti lopulliseen valintaan.

4.3 Mittauslaitteisto

Mittauslaitteistossa päätettiin käyttää kupariputkea ja messinkiliittimiä niiden helpon saatavuuden vuoksi. Laitteistossa käytettävä vesi johdettiin normaalista al-lashanasta muutososan ja letkun avulla. Laitteistossa käytettiin paineenalennus-venttiiliä, jolla saatiin paine vakioksi. Mittauslaitteiston putkikooksi päätettiin ½” (15), jolla saataisiin riittävä virtaus. Putki on silti tarpeeksi pieni halkaisijaltaan, ettei paine laske liiaksi. Saatavuus ½” kokoisilla osilla on myös hyvä, jolloin toimitusaika oli suhteellisen lyhyt. Laitteisto koostui suoran mittausosuuden lisäksi letkusta, jolla laitteistoon liitettiin mittauspää ja vedensyöttö. Letkujen kiinnitys toteutettiin vedensyötön päässä pikaliittimellä ja mittauspäässä kierteisellä letkunipalla, johon mitattava testikappale voitiin kiinnittää tiiviisti.

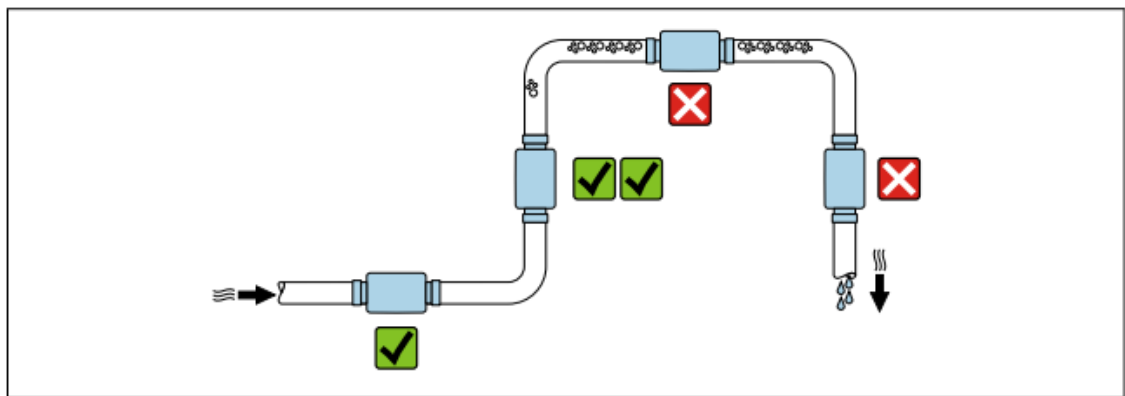
Testikappaleena käytettiin rei’itettyjä suuttimia, jotka olivat jokainen eri perforaatioasteella eli reikien määrä ja niiden suhde suljettuun pintaan vaihteli suuttimien välillä (kuva 1). Suuttimiin tehtiin kierteet, jotta kiinnitys saatiin lujaksi ja tiiviiksi. Lisäksi kappaleiden vaihtaminen oli kierteiden ansiosta helppoa. Näihin testisuuttimiin tehtiin myöhemmin opinnäytetyössä mainittavat vertailumittaukset, jotta eroa voitiin tulkita eri mittaustapojen välillä.



Kuva 1. Rei'itettyjä suutinpäitä (Kuva: Santeri Kuokkanen)

4.3.1 Virtausmittaus

Virtauksen mittaamiseen valittiin Endress+Hauserilta Picomag- sähkömagneettinen virtausmittari. Mittarin valintaa tuki mittaustarkeys, joka on $\pm 0.8\%$ mittaus- tuloksesta. Mittari oli helposti liitettävä kierteisiin putkiosiin, joka helpotti yksinker- taisen laitteiston suunnittelua. Mittarin tarkkuuden kannalta olisi ollut parempi, että putki olisi ollut pystysuorassa, mutta laitteiston rakennettavuuden takia mit- tari asennettiin vaakaosuudelle. Kuviossa 10 nähdään valmistajan määrittelemät hyväksyttävät asennuspaikat Picomag-mittarille.



Kuvio 10. Hyväksyttävät asennuspaikat virtausmittarille. (Endress+Hauser 2025)

Virtauksen mittausalue oli myös laitteistoon sopiva 0-35l/min, sillä laitteiston vesi johdettiin suoraan vesijohdosta ilman pumppua ja välissä olevaa säiliötä, joka

olisi nostanut painetta ja virtausmäärää. Mittarilla pystytään mittaamaan hyvinkin pieniä määriä kerralla, kunhan putki on vaan täynnä vettä. Se on myös kompakti kooltaan, joten asennus ei vaadi erikoisia toimenpiteitä. (Endress+Hauser 2025)

Mittari tarvitsi myös 24V syöttövirran toimiakseen. Tätä varten otettiin virransyöttö vanhasta käytössä olleesta mittauslaitteesta. Mittari oli mahdollista konfiguroida joko sisä-, tai ulkokierteellä sovelluksesta riippuen. Kuvassa 2 on esitelty mittarien ulkonäkö. Mittarissa on 1.4” näyttö, josta voidaan lukea virtaus kahden desimaalin tarkkuudella. Näyttöön saa muitakin arvoja, kuten lämpötilan tai sähkönjohtavuuden. Mittarissa oli myös mahdollisuus liittää se langattomasti puhelinsovellukseen, jolla sitä voitaisiin ohjata ja tarkkailla. (Endress+Hauser 2025).



Kuva 2. Picomag- mittari ulkokierteellä ja sisäkiertellä. (Endress+Hauser 2025)

4.3.2 Paineensäätö ja mittaus

Paineensäätöön valittiin paineenalennusventtiili, jolla saadaan säädettyä vakio-paine veden virtaukselle. Paineenalennusventtiili tulee mittauslaitteiston alkupäähän heti vedensyötön jälkeen. Paineenalennusventtiili valittiin Goetzen mallistosta koossa 1/2”, paineelle 0.5-7 bar. Venttiili tilattiin ulkokierteillä olevilla liitännöillä, kuten kuvassa 3. Venttiin mukana toimitettiin myös mittari.



Kuva 3. Paineenlennusventtiili (Goetze n.d)

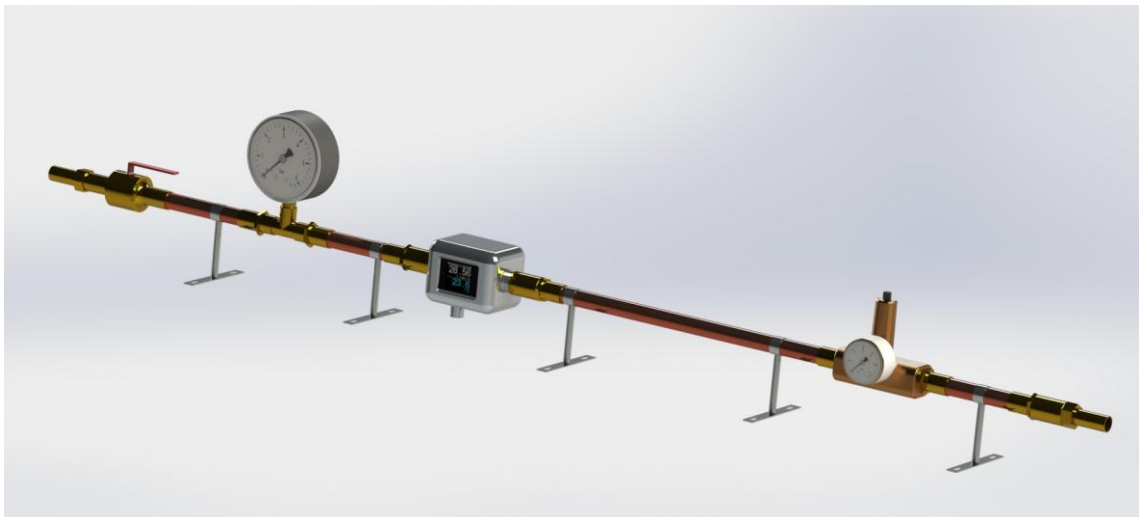
Venttiili toimii jousella, jonka voimaa säädetään venttiilin päässä olevasta säätöruuvista. Jousi painaa virtausta rajoittavaa mäntää alaspäin rajoittaen veden virtausta venttiilin läpi (Goetze n.d). Paineenmittaukseen valittiin mittariksi bourdonkaarella toimiva analoginen mittari (kuva 4). Painemittari on merkiltään WIKA, joka oli hankintakustannuksiltaan halpa ja tarkkuudeltaan 1.6% mittaustuloksesta. Mitta-alue on 0-6 bar ja asteikko 0.2 bar välein. (WIKA 2002). Mittari liitettiin laitteistoon t-yhteen avulla. Tällä tehdään mahdolliseksi mittarin helppo kiinnitys ja vaihto tarvittaessa.



Kuva 4. Laitteistossa käytetty painemittari (Onninen n.d)

4.4 Mittauslaitteiston kokoonpano

Mittauslaitteiston lopullinen kokoonpano oli hyvin yksinkertainen. Kokoonpanoluonnoksessa (kuva 5) nähdään mittauslaitteisto, josta puuttuu oikeasta reunasta letkulla toteutettava vedensyöttö ja vasemmasta reunasta mittauspää. Kokoonpanon keskellä olevalta suoralta osuudelta saadaan mittaustulokset siihen asennetuilta virtaus-, sekä painemittareilta. Laitteiston alkupäässä näkyy paineenalennusventtiili, jolla paine säädetään vakioksi. Mittausjärjestelyn loppupäähän asennettiin kuvan 6 mukainen sulkuventtiili, jolla saadaan veden virtaus helposti poikki tarvittaessa. Tämä vähentää vedenkulutusta ja helpottaa laitteiston hallittavuutta.



Kuva 5. Mittauslaitteiston kokoonpanokonsepti (Kuva: Santeri Kuokkanen)



Kuva 6. Laitteistossa käytetty sulkuventtiili (Oras n.d)

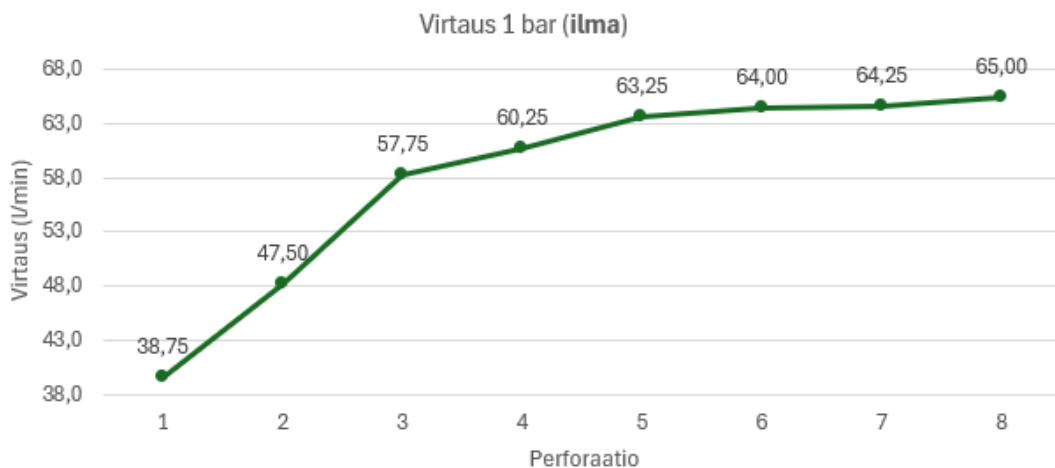
Mittauslaitteisto suunniteltiin asennettavaksi pöytätasolle joko ruuvikiinnityksellä tai ruuvipuristimella kannakkeista. Komponentit kiinnitetään toisiinsa kierteisillä putkiosilla, joten laitteiston purkaminen ja muokkaaminen on helppoa. Kannakoinnilla tuettiin putkistoon sijoitetut mittarit ja liitännät, jotta niihin ei kohdistu rasitusta. Laitteisto suunniteltiin helposti siirrettäväksi, jotta sitä voidaan käyttää lähes missä vaan. Laitteisto vaatii ainoastaan veden- ja virransyötön. Lisäksi läpivirtaavalle vedelle tarvittiin joko viemäröinti tai astia/säiliö, johon veden voi johdattaa.

5 TULOKSET

5.1 Vertailumittaukset

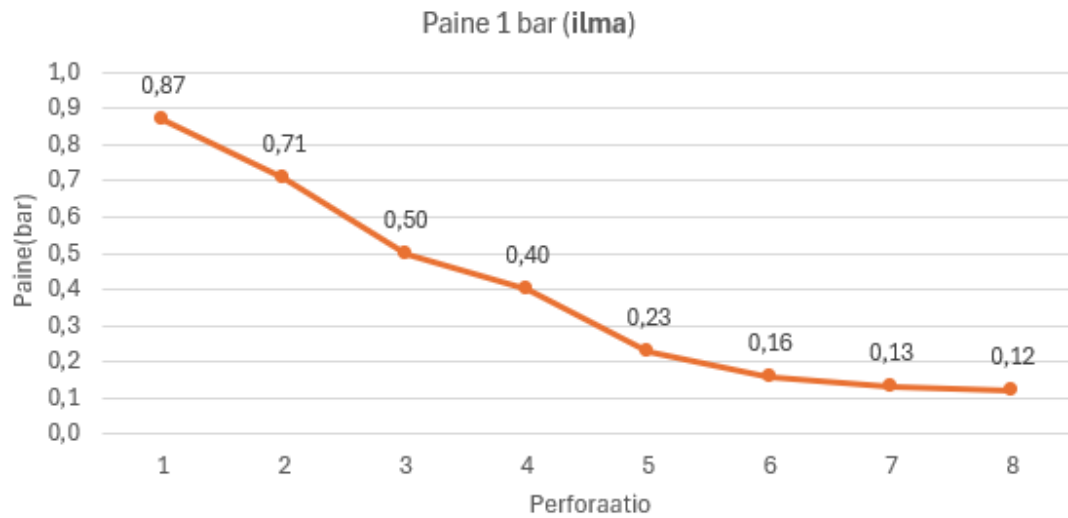
Jotta voitaisiin päätellä mittausmenetelmän toimivuutta, piti ensin saada vertailutuloksia nykyisin käytettävästä mittaustavasta. Tätä varten toteutettiin mittauksia samoille kappaleille nykyisellä mittauslaitteistolla. Mittausjärjestely päätettiin toteuttaa 5 mittauksen sarjassa, jotta saadaan selkeä kuva arvoista ja minimoidaan mittavirheen mahdollisuus. Mittaus päätettiin toteuttaa myös neljällä eri painetasolla, jotta pystyttiin tutkimaan myös paineen vaikutuksia. Aiemmin opinnäytetyössä mainitut testisuuttimet olivat käytössä ilmalla suoritettavissa vertailumittauksissa ja edelleen vedellä mitatessa.

Nykyisin käytössä oleva mittalaite toimii alipaineella ja jotta se saatiin antamaan samankaltaisia, tuloksia piti mittari muuttaa ylipainekäyttöä varten. Tämän jälkeen suoritettiin mittaukset neljällä eri painetasolla: 0.5 bar, 1 bar, 1.5 bar ja 2 bar. Nämä painetasot pyrittiin saamaan myös vesimittaukseen. Kuvioissa 1 ja 2 on esitetty mittaustulokset kahdeksan eri perforaation testisuuttimilla, joista numerossa 1 on vähiten avautumaa ja suuttimessa 8 eniten. Kuviot ovat 1 bar paineella suoritetusta mittauksesta. Vapaa virtaus ylipainelaitteistolla oli 66 litraa minuutissa. Suurimman perforaatioasteen suuttimella päästään lähes vapaan virtauksen arvoihin.



Kuvio 1. Virtausmittaus ilmalla.

Painemittauksessa oli huomattavissa, että paine laskee lineaarisesti perforaation kasvaessa. Kuviossa 2 on esitetty paineen lasku eri perforaatioasteilla.



Kuvio 2. Painemittaus ilmalla

5.2 Laitteiston testaus

Ensimmäinen testi suoritettiin ainoastaan painemittauksella laitteiston rakentamisen yhteydessä. Laitteisto koepaineistettiin ja testattiin painemittareiden toiminta sekä liitosten vedenpitävyys. Tulpattuna laitteistoon saatiin 5.4 bar paine (kuva 7), jolloin voidaan todeta sen olevan vesijohdon paine, eli maksimipaine mitä laitteistolla on mahdollista saavuttaa.



Kuva 7. Vesijohdon maksimipaine (Kuva: Santeri Kuokkanen)

Pienimmän perforaation testisuuttimen kanssa mittauslaitteistoon saatiin hieman alle 2 bar painetta. Kuvassa 8 on esitetty laitteisto ilman virtausmittaria. Laitteiston modulaarisuuden takia sitä oli mahdollista testata ilman virtausmittaria. Mittaputken keskiosassa näkyy paikka virtausmittarille, joka liitettiin väliaikaisesti kiinni käyttäen muhvia. Kierteiset putkiosat mahdollistavat laitteiston helpon muuntamisen, koska komponentteja voidaan vaihtaa tai poistaa tarvittaessa.



Kuva 8. Laitteisto ilman virtausmittaria (Kuva: Santeri Kuokkanen)

Painetestauksen jälkeen siirryttiin mittaamaan myös virtauksia. Virtausmittarin saavuttua se saatiin liitettyä mittalaitteistoon ja sitä alettiin testaamaan. Lopullinen laitteisto on kuvassa 9. Laitteisto on tuettu putkikannakkeilla, jotta mittaaminen helpottuu. Virtausmittarin asennus oli yksinkertaista $\frac{1}{2}$ " liitäntöjen takia, jotka pystyttiin liittämään suoraan laitteistoon. Kaikki liitännät tiivistettiin tiivistysteipillä, jotta niistä saataisiin mahdollisimman tiiviitä. Virtausmittari asennettiin kuvassa 9 näkyvällä tavalla, jotta mahdollinen pöydällä oleva kosteus ei pääse virtajohtoon, kun liitäntä on mittarista suoraan ylöspäin.



Kuva 9. Lopullinen laitteisto (Kuva: Santeri Kuokkanen)

5.3 Vesimittaus

Vedellä mitatessa oli tiedossa, että virtausmäärät tulevat olemaan pienempiä kuin ilmatestaissa. Veden virtaama täysin vapaassa laitteistossa 2 bar paineella testatessa oli hieman yli 20 litraa minuutissa, kun ilmalla virtaus oli noin 100 litraa minuutissa. Vesimittaukset antoivat paineen suhteen hyvin samankaltaisia arvoja kuin vertailumittauksissa ilmalla varsinkin pienillä perforaatioasteilla.

Mittalaitteella saaduissa tuloksissa on mahdollisuus virheeseen. Mittalaitteiden annettu tarkkuus edellyttää mittausten tekoa täysin valmistajan ohjeiden mukaan. (Hiltunen ym., 2011, s.39). Tässä opinnäytetyössä käytettävät mittalaitteet valittiin niiden helppokäyttöisyyden takia. Mittauksissa vaikuttavana tekijänä on myös käyttäjästä aiheutuva epävarmuus. Varsinkin analogisilla mittalaitteilla on mahdollista lukea mittaria väärin. Tähän vaikuttaa muun muassa mittalaitteen asento ja kulma mistä viisaria luetaan. Nämä voivat vääristää tulosta merkittävästi. Digitaalisilla mittareilla käyttäjän vaikutus tulokseen on huomattavasti pienempi. (Hiltunen ym., 2011, s.41).

Digitaalinen mittari on tarkempi ja näyttää kolmen desimaalin tarkkuudella virtauksen arvon, joten mittaustulos otettiin suurin piirtein samalla tarkkuudella kuin analogisista mittareista sen pystyi ottamaan. Esimerkiksi painetta pystyi lukemaan 0.1 bar välein, joten virtauksen arvot luettiin myös samalla yhden desimaalin tarkkuudella. Esimerkiksi kuvasta 10 näytön lukemaksi luettaisiin 8.6 litraa minuutissa. Virtausmittarin lukeman huomattiin heittelevän noin 0.4 litran verran.

Tämän todettiin johtuvan kiinteistön muista vedenkäyttäjistä, josta johtuen vesijohdon virtaus heittelee. Analogisissa painemittareissa ei tämä vaihtelu näkynyt, joten paineessa ei kovin suuria eroja mittauksen aikana syntynyt. Virtausmittarin käytössä oli tärkeää varmistaa, että putki on täynnä vettä.



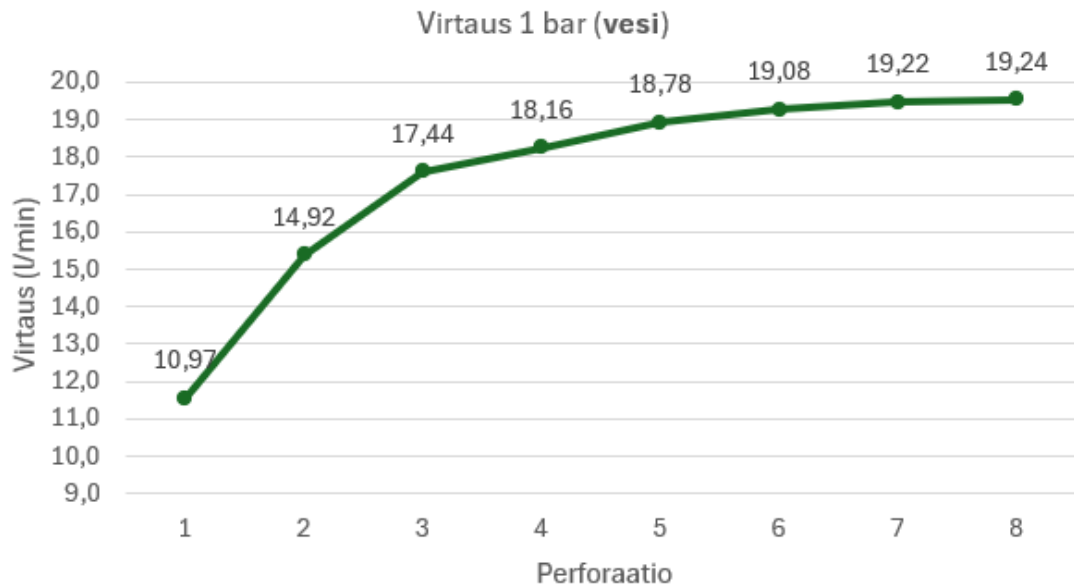
Kuva 10. Virtausmittarin näyttökonfiguraatio (Kuva: Santeri Kuokkanen)

Vesimittauksessa mitattiin virtauksen ja paineen arvoja neljällä eri syöttöpaineella. Syöttöpaine asetettiin sulkemalla palloventtiili ja säätämällä paineensäätimestä haluttu paine laitteiston sisälle. Tämän jälkeen palloventtiili avattiin ja luettiin arvot mittareista. Testisuutin tuettiin mittauksien aikana, jotta letkun kasaan painumisesta tai sen asennosta ei synny virheitä mittaukseen (kuva 11). Tämä myös helpotti testien tekemistä, kun suutin pysyi paikallaan.



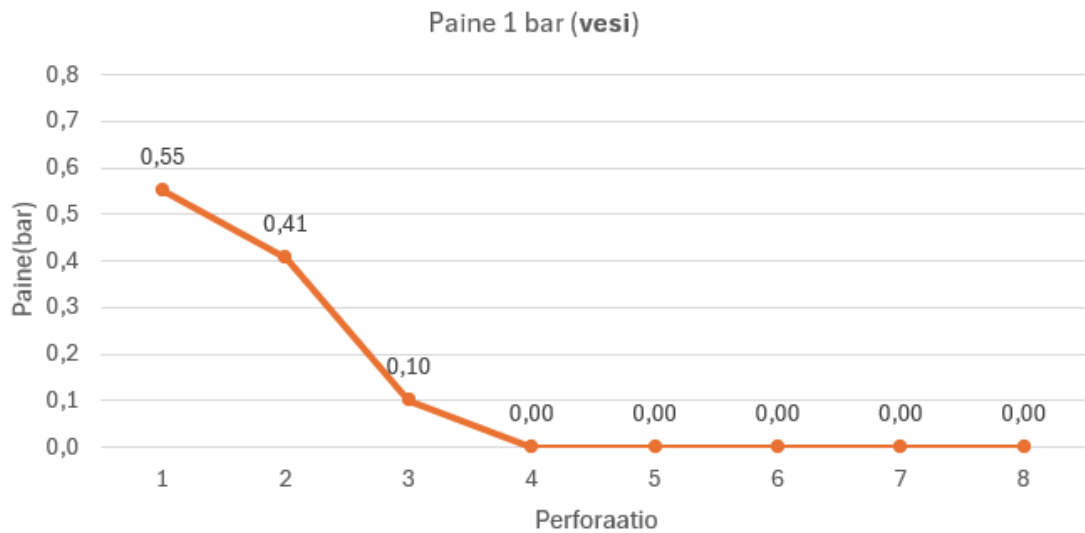
Kuva 11. Letkun kiinnitys (Kuva: Santeri Kuokkanen)

Mittauksia suoritettiin viisi kappaletta jokaiselle testisuuttimelle. Mittaukset suoritettiin samoilla painetasolla kuin vertailumittauksissa. Painetasot olivat 0.5, 1.0, 1.5 ja 2 bar. Kuvioissa 3 ja 4 on käytetty samoja testisuuttimia kuin kuvioissa 1 ja 2. Vapaasti virtaavassa tilassa 1 bar paineella laitteiston läpi saatiin virtausta 19.3 litraa minuutissa. Perforaatioasteen kasvaessa virtaus nousee lähes samaan.



Kuvio 3. Virtauksen arvot 1 bar syöttöpaineella

Painetasot ovat ilmamittausten kaltaisia. Mitattava paine on huomattavasti pienempi kuin syöttöpaine. Perforaation kasvaessa virtaus kasvaa ja paine laskee käänteisellä tavalla. Laitteistoon asennettu painemittaus mittaa testisuuttimen vastuksesta johtuvaa painetta, jolla selittyy kuviossa 4 nähty ilmiö. Perforaation ollessa suurempi, suuttimen tuottama vastapaine on olematon. Paine laskee nopeammin nolnaan verrattaessa ilmalla suoritettuihin mittauksiin. Vedellä mitattaessa voidaan siis päätellä joko veden kulkevan paremmin testisuuttimien läpi tai ero aiheutuu mittaustavasta.



Kuvaaja 4. Paineen arvot 1 bar syöttöpaineella

Virtauksien eron huomattiin kasvavan mitä korkeampaa painetta käytettiin. Ilman läpäisy samalla paineella oli merkittävästi suurempi. Taulukossa 2 nähdään prosentuaalinen ero ilman ja veden välillä eri mittauspaineilla. Ilman virtaus on 60-80 prosenttia suurempi kuin veden. Varsinkin 1,5 ja 2 bar paineilla ero kasvaa lineaarisesti mitä suurempi perforaatioaste suuttimessa on. Veden tiheys on huomattavasti ilmaa suurempi ja sillä voidaan selittää, miksi sen virtaus pienenee ilmaan verrattuna, kun sitä syötetään kovemmalla paineella. Tätä voidaan myös selittää vesihanauksen rajoittuneisuudella. Virtausmääriä kasvattamalla tiheyden merkitys voitaisiin todentaa. Ero pysyy kuitenkin samankaltaisena pienemmillä paineilla mitattaessa.

Taulukko 2. Virtauksien prosentuaalinen ero

Perforaatio-aste	Virtauksien ero eri paineilla			
	0,5 bar	1 bar	1,5 bar	2 bar
1	-63,51	-71,69	-70,56	-72,30
2	-61,42	-68,59	-71,60	-74,20
3	-61,53	-69,80	-73,32	-77,61
4	-62,40	-69,86	-73,95	-77,94
5	-61,23	-70,31	-75,35	-78,71
6	-60,96	-70,19	-74,96	-78,86
7	-61,83	-70,09	-74,92	-78,84
8	-61,83	-70,40	-74,84	-78,68

Paineissa havaittiin mielenkiintoinen ilmiö, jossa vesimittauksella ei saatu yhtään painetta mittareille. Ilmamittauksessa paineen arvot laskivat tasaisesti. Vedellä mitatessa ensimmäisen kahden suuttimen jälkeen painetta ei saatu enää mitattua. Paineen erot prosentteina on taulukoitu taulukossa 3. Mitattujen nollapaineiden pääteltiin korreloivan virtauksiin, joissa ensimmäisen kahden suuttimen jälkeen virtaus oli lähes sama kuin täysin vapaa virtaus. Näin ollen mittauslaitteistoon ei synny vastapainetta, jota voitaisiin mitata. Voidaan siis todeta, että kun virtausmäärä nousee, paine laskee.

Taulukko 3. Mitattujen paineiden erot prosentteina

Perforaatioaste	Paineiden erot			
	0,5 bar	1 bar	1,5 bar	2 bar
1	-7,56	-36,78	-10,00	20,00
2	-18,52	-42,82	-40,00	-30,00
3	-56,90	-80,00	-73,24	-79,55
4	-100,00	-100,00	-82,46	-87,71
5	-100,00	-100,00	-100,00	-100,00
6	-100,00	-100,00	-100,00	-100,00
7	-100,00	-100,00	-100,00	-100,00
8	-100,00	-100,00	-100,00	-100,00

6 POHDINTA

6.1 Projektin kulku ja haasteet

Tuotekehitysprosessi oli mielenkiintoinen ja opettavainen. Kokonaan uuden laitteen suunnittelu ja siihen liittyvä ajatustyö oli täysin uutta käytännön tasolla. Uuden laitteiston suunnittelussa vaikeinta oli alkuun ja oikeaan suuntaan pääseminen. Ensimmäinen kokoonpanoluonnos otti aikaa suunnitella ja sen joutui hylkäämään lähes kokonaan. Sitä varten tehdystä selvitystyöstä jäi toiseen luonnokseen mittarien valinta ja veden käyttö väliaineena. Näistä lähtökohdista oli helppo lähteä uuteen suuntaan ja lopulliseen kehitysversioon päästiin suhteellisen nopeasti.

Tässä opinnäytetyössä suurin haaste oli aikataulu ja projektin käytännön osuus venyi pitkälle kevääseen. Erityisesti aloituksen kanssa oli haasteita ja projekti päästiin kunnolla aloittamaan vasta tammikuun lopulla, kun pääsin vierailemaan demotehtaalla. Tästä vierailusta sain oikean suunnan mittauksen kehitystyöhön sekä syvemmän ymmärryksen tuotteesta ja sen valmistuksesta. Oli mielenkiintoista päästä näkemään, kuinka saumatonta yhteistyö on näinkin isossa tuotekehitysprojektissa.

Opinnäytetyössä kehitetystä laitteistosta löytyi myös heikkouksia. Paineen säätö oli hankalaa pienillä paineilla mitatessa. Mittauksessa 0,5 bar paineella saatiin toistettua samankaltaisia tuloksia, mutta paineen säätö oli erittäin herkkä. Painesäätimen mittari saattoi näyttää 0,5 bar, mutta virtauksen arvo heitteli. Mittarin toistettavin alue oli 1-2 bar, jossa saatiin luotettavasti samat virtaukset ja paineet pidettyä samankaltaisena, vaikka välissä oltaisiin tehty säätöjä.

Muita heikkouksia oli virtauksen tasaisuus, jonka kanssa voi syntyä haasteita vesijohtoverkosta kiinteistössä, jossa vedelle on paljon muita käyttäjiä. Virtauksen arvoista saataisiin varmasti tarkempia suljetulla systeemillä, jossa olisi pumppu ja säiliö vedelle. Paineen mittaamisesta saisi myös tarkemman sijoittamalla painemittauksen mittapään yhteyteen, jos vain mahdollista. Lisäksi testijärjestelyn

kumpaankin päähän kiinnitettävät letkut vaikuttavat tulokseen, jos ne ovat painuneet kasaan. Tätä pyrittiin minimoimaan käyttämällä kovaa paineilmaletkua.

Opinnäytetyön alkuperäisiä tavoitteita jouduttiin yksinkertaistamaan projektin edetessä, kun aikataulu venyi. Mittauksesta jäi kokonaan pois käytännön testaus tuotannossa olevien työkalujen kanssa. Alkuperäiseen suunnitelmaan kuului myös niiden testaus, mutta se olisi vaatinut lisää kehitystyötä ja aikaisempaa aloitusta projektille. Projekti rajautui lopulta oikeastaan veden käytöksen tutkimiseen mittauksen väliaineena ja ensimmäisen testilaitteiston rakentamiseen laajemman tutkimustyön sijaan.

6.2 Jatkokehitys

Mittauslaitteiston jatkokehitys on välttämätöntä, jos halutaan testata tuotantoprosessissa käytössä olevien työkalujen läpäisyä. Nykyisellä mittaustavalla testattiin ainoastaan testisuuttimien käyttöä ja niiden ominaisuuksia. Veden käytöstä väliaineena saatiin hieman tuloksia, mutta sekin vaatii lisää testaamista, jotta voidaan tehdä lopullisia johtopäätöksiä sopivasta mittaustavasta.

Edellisessä luvussa mainitsemani suljettu systeemi voisi auttaa tulosten tarkentamisessa, kun saataisiin vakaa virtaus ja pumpulla pystyttäisiin mahdollisesti nostamaan virtausmääriä, jotta voitaisiin saada vielä vertailukelpoisempia tuloksia. Mittauslaitteisto on suunniteltu niin, että siihen voidaan vaihtaa komponentteja ja sitä on helppo muokata yksinkertaisilla ratkaisuilla. Kaikki mittarit on mitoitettu toimimaan 6 bar paineisiin asti, mutta virtausmittarilla pystytään mittaamaan ainoastaan 35 l/min asti. Virtausmittarin valinta suoritettiin nykyisille virtausmäärille ja laajempaa mittausaluetta ei ollut saatavilla 1/2” prosessiliitännöillä. Eli tulevaisuudessa ainakin virtausmittari täytyisi vaihtaa, jos halutaan lisätä virtausta huomattavasti.

Opinnäytetyön valmistuessa on vielä epävarmaa tuleeko kehitetty mittaustapa käyttöön millään tasolla ja kehitetäänkö sitä jatkossa lisää. Tuotannossa oleviin työkaluihin testilaitteistoa ei voida käyttää nykyisellään. Käyttöönotto vaatii oikeanlaisen mittauspään kehitystä, jotta mittauksesta saataisiin tiivis ja tarkka. Kehitettyä laitteistoa voidaan hyödyntää, jos mittapää saadaan tehtyä.

LÄHTEET

Endress+Hauser (2025) Operating Instructions. Picomag IO-Link Electromagnetic flowmeter. https://bdih-download.endress.com/files/DLA/005056A500261FD083C3CBFE0F481E57/BA01697DEN_0825-00.pdf

E. Hiltunen, L. Linko, S. Hemminki, M. Hägg, E. Järvenpää, P. Saarinen, S. Simonen, P. Kärhä (2011) *Laadukkaan mittaamisen perusteet*. Espoo: Metrologian neuvottelukunta ja Mittatekniikan keskus, MIKES

Goetze (n.d) Pressure reducing valves. Series 681.

Jokinen, T (2001). *Tuotekehitys*. Helsinki: Otatieto Oy

Lanasa, P.J., & Upp, E.L. (2014). *Fluid Flow Measurement: A Practical Guide to Accurate Flow Measurement*. Waltham, Massachusetts ; Oxford, England : Butterworth-Heinemann

ONNINEN (n.d) PAINEMITTARI WIKA 111.10 Ø100 0-6bar A1/2 9012591 <https://www.onninen.fi/wika-painemittari-wika-111-10--100-0-6bar-a1-2-9012591/p/AAJ567>

Oras (n.d) Palloventtiili, DN15, PN25, G1/2 <https://www.oras.com/fi/tuoteperheet/oras/palloventtiili/400015>

Pihkala, J (2004). *Prosessisuureiden Mittaustekniikka*. Helsinki: Opetushallitus

Tutkimuseettinen neuvottelukunta (2023). *Hyvä tieteellinen käytäntö ja sen loukkausepäilyjen käsitteleminen Suomessa. Tutkimuseettisen neuvottelukunnan HTK-ohje 2023*. Helsinki: Tutkimuseettinen neuvottelukunta. https://tenk.fi/sites/default/files/2023-03/HTK-ohje_2023.pdf

Valmet (n.d). Valmet Lyhyesti. Haettu 11.2.2025. <https://www.valmet.com/fi/valmet-yrityksena/>

Valmet (n.d). Valmetilla on yli 220 vuoden teollinen historia. Haettu 11.2.2025. <https://www.valmet.com/fi/valmet-yrityksena/yritys/historia/>

Valmet (n.d). Valmetin Strategia. Haettu 11.2.2025. <https://www.valmet.com/fi/valmet-yrityksena/yritys/strategia/>

WIKA (2002) Bourdon Tube Pressure Gauge Model 111.10, Radial Pressure Entry Standard Series.