

Miika Leinonen

VIRTAVEDEN VIRTAUSNOPEUSMITTARIN SUUNNITTELU

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Ilari Laine
12 2021

TIIVISTELMÄ

Miika Leinonen : Virtaveden virtausnopeusmittarin suunnittelu
Tampereen yliopisto
Teknisten tieteiden kandidaattiohjelma
Kandidaatintyö
Joulukuu 2021

Tässä työssä suunnitellaan virtaveden virtausnopeusmittari. Virtaveden eli painovoiman vaikutuksesta virtaavan veden mittaus on ajankohtaista, koska ilmaston lämpeneminen aiheuttaa muutoksia vesistöihin. Virtausnopeutta mitataan mm. joen virtaaman, eli ajan suhteen joen poikkipinta-alan läpi kulkeman tilavuuden, selvittämiseksi. Virtausnopeutta voidaan tarvita myös jalostamattomassa muodossa. Suunniteltava laite perustuu Pitot-putkeen, ja työssä arvioidaan, voiko se olla vaihtoehto nykyisille mittalaitteille. Pitot-putken historia alkaa virtaveden virtausnopeuden mittaamisesta, mutta nykyisin sitä käytetään nopeusmittarina esimerkiksi lentokoneessa tai formula-autossa. Pitot-putken katoamiselle sen alkuperäisestä käyttötarkoituksesta ei löytynyt selkeää syytä.

Työn kirjallisuuskatsauksessa kerättiin tietoa Pitot-putkesta, muista mittalaitteista, virtavedestä ja sen mittaamisesta. Mittalaitteen suunnittelu tehtiin Pahl et. al. systemaattisen lähestymistavan tuotekehitysmetodin mukaan. Lopputuloksena saatiin CAD-malli uudenlaisesta Pitot-putkeen perustuvasta virtausnopeusmittarista. Vaikka suunnitellun mittalaitteen Pitot-putken rakenne on paljolti samanlainen Henry Darcyn vuoden 1858 version kanssa, työn mittalaitteessa on myös uusia elementtejä. Yksi niistä on kelluva mitta-asteikko, joka poistaa tarpeen perinteisesti käytetylle staattiselle putkelle. Toinen on järjestelmä, joka sulkee veden Pitot-putkeen ja lukitsee mitta-asteikon luotettavan mittaustulos saamiseksi.

Pitot-putken rajoite on sen koko, koska mitä suurempi virtausnopeuden mittaustulos halutaan, sitä pidempi putken täytyy olla. Työssä suunnitellulla mittalaitteella voidaan mitata virtausnopeuksia välillä 0–3,7 m/s, mikä riittää useimpiin käyttökohteisiin. Toinen Pitot-putkelle ominainen rajoite on, että mitta-asteikkoa ei voida esittää nopeutena, koska silloin merkintöjen välit eivät ole koko matkalta samanpituiset. Jatkotutkimuksena tehtäisiin prototyyppi, jotta mittalaitteen ominaisuuksia voitaisiin luotettavasti arvioida.

Avainsanat: Pitot-putki, Tuotekehitys, Systemaattinen lähestymistapa, Virtausnopeus

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Miika Leinonen : Designing a flow velocity meter for open channel flow
Bachelor's thesis
Tampere University
Bachelor's Programme in Engineering Sciences
December 2021

In this thesis a flow velocity meter is designed. Measuring open channel flow velocity is relevant because of climate change's effects on watercourse. Open channel flow velocity is measured to calculate its flow. Flow velocity can also be used in different applications on its own. The history of Pitot-tube starts with measuring of open channel flow velocity but nowadays it is used as a velocity meter for example in aircrafts or formula cars. The reason its disappearance in the original application could not be found. The measuring device designed in this thesis is based on a Pitot-tube. It will be evaluated if the meter could be an alternative to currently used current velocity meters.

In the literary review of the thesis, information was gathered on Pitot-tube, other meters, open channel flow, and the measuring of it. The design process was made according to Pahl et. al. systematic approach. A CAD-model of a new kind of current meter based on Pitot-tube was made as result. Even though structure of the Pitot-tube is similar to that of Henry Darcy's 1858 version, there are new features. One of them is a floating scale which erases the need for the traditionally used static tube. Another is a system that traps the water to the tube and locks in the floating scale in order to get a reliable reading.

Pitot tube's constraint is its size because the larger the measuring range is the taller the tube is. The meter has a measuring range of 0 – 3,7 m/s which is enough for most applications. Another one of Pitot-tube's restrictions is that the scale can't be represented by velocity because then the distances between the markings aren't the same all the way through. A prototype should be made as further research to reliably evaluate its features.

Keywords: Pitot-tube, Engineering Design, Systematic Approach, Flow Velocity

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. TEORIA	3
2.1 Virtaveden virtausnopeuden mittalaitteet.....	3
2.1.1 Nykyiset mittalaitteet	3
2.1.2 Pitot-putki.....	4
2.2 Virtaveden fysiikka	5
2.3 Pitot-putken yhtälön johtaminen	6
3. TUTKIMUSMENETELMÄ	9
4. SUUNNITTELU.....	10
4.1 Laitteen vaatimukset	10
4.2 Käsitteellinen suunnittelu	11
4.2.1 Kokonaistoiminto ja osatoiminnot.....	11
4.2.2 Alitoimintojen toimintaperiaatteet ja niiden yhdistäminen.....	12
4.2.3 Konseptin valinta.....	14
4.3 Todellisen mallin suunnittelu	16
4.4 Yksityiskohtainen suunnittelu	16
5 LOPULLINEN SUUNNITTELU	18
5.1 Lopullisen tuotteen esittely	18
5.2 Mittaustapahtuma.....	21
5.3 Mittalaitteen arviointi ja vertailu	21
5.4 Mittalaitteen vertailu vaatimuksiin.....	22
6 YHTEENVETO.....	23
LÄHTEET	24

LYHENTEET JA MERKINNÄT

CAD	engl. Computer Aided Design
a	Kiihtyvyys
A	Poikkipinta-ala
C_v	Pitot-putken kokeellinen vakio
g	Putoamiskiihtyvyys
H	Putoamiskorkeus
h	Putoamiskorkeus
m	Metri
p	Paine
p_t	Stagnaatiopaine
p_s	Staattinen paine
p_d	Dynaaminen paine
Q	Virtaama
ρ	Tiheys
s	Sekunti
v	Virtausnopeus
z	Korkeus

1. JOHDANTO

Luonnollisessa tai keinotekoisessa vesiuomassa painovoiman vaikutuksesta virtaavan veden eli virtaveden (open channel flow) virtausnopeuden mittaamiselle on edelleen suuri tarve, vaikka sitä on mitattu jo 1700-luvulla [1, s. 14]. Mittausdataa on hyödynnetty mm. rakentamiseen, vesistön hydrologian ja ekologian tutkimiseen, keinokasteluun, energiantuotantoon ja teollisuuteen [2, s. 3]. Nykyisin mittaamistarvetta kasvattavat ilmastonmuutoksen takia muuttuvat vesistöt [2, s. 1–2]. On tärkeää saada laadukasta dataa virtavedestä, jotta ilmastonmuutoksen seurauksia, kuten tuhoisia tulvia ja puhtaan juomaveden pulaa voitaisiin ehkäistä.

Uusimmat mittausvälineet perustuvat esimerkiksi propelleihin tai sähkömagnetismiin [2, s. 25–33]. Pitot-putki on Henri Pitotin vuonna 1736 keksimä ontto L-kirjaimen muotoinen lasiputki, jolla saadaan selvitettyä veden virtausnopeus mittaamalla putken sisällä olevan vesipilarin korkeutta [1, s. 15]. Korkeutta voidaan verrata vesipilarin korkeuteen staattisessa putkessa, joka on suora ja ontto putki. Vertailusta saadaan huomioitua veden hydrostaattinen paine, mikä on erityisen tärkeää mittauskohteissa, joissa ei vaikuta normaali-ilmanpaine. Pitot-putki alun perin suunniteltiin virtaveden virtausnopeuden mittaamiselle [1, s. 14]. Nykyään Pitot-putkea käytetään esimerkiksi lentokoneissa ja Formula 1 -autossa nopeuden mittaamiseen [1, s. 14] [3, s. 16] [4, s. 8]. Almeidan ja Souzan [5, s. 1] mukaan Pitot-putki voisi olla vaihtoehtoinen mittari virtaveden mittaamiselle ja siitä pitäisi kehittää virtaveden virtausnopeusmittareita. Mittalaitteiden täytyy olla edullisia, koska vesistöntutkimukseen ei ole ollut paljon resursseja [2, s. 4]. Pitot-putkella, yksinkertaisen rakenteensa takia, on mahdollisuus olla edullinen vaihtoehto.

Tämän työn tavoitteena on suunnitella Pitot-putkeen perustuva laite virtaveden virtausnopeuden mittaamiseen. Työssä pyritään vastaamaan seuraaviin kysymyksiin:

1. Minkälaisia mittausvälineitä virtaveden virtausnopeuteen on olemassa?
2. Miten Pitot-putki toimii?
3. Voiko Pitot-putkeen perustuva virtaveden virtausnopeusmittari olla vaihtoehto käytössä oleville laitteille?

Työ etenee tutkimuskysymyksien käsittelyllä. Luvussa 2 vastataan ensimmäiseen kysymykseen kirjallisuuskatsauksella, jonka lopputuloksena saadaan käsitys erilaisista laitteista. Myös toiseen tutkimuskysymykseen vastataan toisessa luvussa kirjallisuuskatsauksella, joka kattaa Pitot-putken kehityksen ja sen toimintaperiaatteen. Sen lopputuloksena saadaan katsaus Pitot-putken toimintaan ja valmiudet suunnitteluvaiheeseen. Kolmannessa luvussa esitellään Pahl et al. Engineering Design: A Systematic Approach -kirjaan perustuva tuotekehitysmetodi. Kolmanteen tutkimuskysymykseen vastataan neljännessä luvussa suunnittelemalla laite tuotekehitysmetodin mukaan. Suunnittelutyön lopputuloksena ja samalla koko työn lopputuloksena saadaan valmis luvussa viisi esiteltävä CAD-malli mittarista, jonka perusteella voitaisiin aloittaa tuotanto. Luvussa 6 arvioidaan suunnitellun laitteen käyttökelpoisuutta sekä hyviä ja huonoja puolia.

Virtausnopeuden havaitseminen rajataan Pitot-putkeen. Laitetta tullaan käyttämään nopeus-pinta-alamittauksessa, eli virtaveden virtaaman mittamenetelmään, jossa mitataan virtaveden uoman poikkipinta-ala ja virtausnopeus useissa poikkipinnan pisteissä [2, s. 12]. Nopeus-pinta-alamittaus sopii parhaiten Pitot-putken kaltaiselle laitteelle, joka mittaa nopeutta tietyistä pisteistä. Tässä työssä ei tutkita poikkipinta-alan mittaamisen käytetyjä menetelmiä.

2. TEORIA

Tässä luvussa käsitellään virtaveden virtausnopeusmittareita sekä virtaveden fysiikkaa. Lopuksi johdetaan Pitot-putkelle yhtälö, jolla saadaan selville virtausnopeus vesipilarin korkeudesta putkessa.

2.1 Virtaveden virtausnopeuden mittalaitteet

Tässä työssä suunniteltava laite soveltuu nopeus-pinta-alamittaukseen. Nopeus-pinta-alamittauksessa virtaveden virtaama lasketaan kaavalla $Q = v * A$, missä v on nopeus ja A virtaveden poikkipinta-ala. Kaavassa käytetty v on monissa samaan poikkipinnan pisteissä mitattuiden nopeuksien keskiarvo. [2, s. 12]

2.1.1 Nykyiset mittalaitteet

On olemassa monenlaisia laitteita, joilla mitataan virtaveden virtausnopeutta. Tässä aluvussa esitellään niistä suunniteltavan laitteen kanssa samanlaiseen käyttötarkoitukseen, eli nopeus-pinta-alamittaukseen, soveltuvia laitteita. Mittalaitteiden anturit perustuvat esimerkiksi propelleihin, ultraääneen tai sähkömagneettiseen säteilyyn. [2, s. 25–33]. Propellantureissa lasketaan virtausnopeuden aiheuttamat propellin tekemät kierrokset tietyllä aikavälillä [2, s. 26]. Ultraäänianturi lähettää ääniaaltoja, jotka osuvat virtavedessä liikkuvaan partikkeliin tai kuplaan. Takaisintulevasta aallosta voidaan Dopplerin ilmiön perusteella laskea virtausnopeus. [2, s. 30] Sähkömagneettinen anturi perustuu Faradayn induktiolakiin. Veden liike aiheuttaa potentiaalieron, jonka signaali vahvistetaan ja sitten esitetään päätteestä mittaajalle. [2, s. 32]



Kuva 1: a) Propellimittalaite [6] b) Sähkömagneettinen mittalaite [7]

Mittalaitteissa anturit ovat kiinnitettynä sauvaan tai kaapeliin [2, s. 26]. Sauvan pituus on usein säädettävä, ja siinä on mitta-asteikko mittaussyvyyden selvittämiseksi, koska nopeus-pinta-alamittauksessa on tiedettävä, mistä pisteestä virtausnopeutta mitataan. [2, s. 9]. Kaapelia puolestaan voidaan käyttää silloin, kun virtausnopeutta mitataan syvältä. Mittaustulos voidaan saada digitaalisesti anturiin kiinnitetystä päätelaitteesta (Kuva 1b) tai analogisesti, esimerkiksi laskemalla äänimerkkejä, jotka kuuluvat joka kerta, kun propelli pyörii kierroksen [7].

2.1.2 Pitot-putki

Henri Pitot keksi Pitot-putken vuonna 1733. Hän suunnitteli laitteen Seine-joen virtausnopeuden mittaamiseen. [4, s. 25] Aluksi Pitot-putki oli vain L-kirjaimen muotoinen avoin ja ontto putki, jonka sisälle tullut neste nousi putkessa ylöspäin. Veden virtausnopeus laskettiin nestepilareiden korkeuserosta Pitot-putken ja staattisen putken välillä. [1, s. 15] Henry Darcy (1803–1858) kehitti putken käytettävyyttä muun muassa johtamalla sille yhtälön [1, s. 16]. Brownin [1, s. 22] mukaan Darcyn uudistukset tekivät Pitot-putkesta tarkemman ja helppokäyttöisemmän, mikä mahdollisti sen laajemman käytön. Pitot-putkea käytetään nykyään paljon nopeusmittareissa lentokoneissa ja muissa kulkuneuvoissa, mutta virtaveden mittaamisessa sen käyttö on lähes olematonta [1, s. 14].

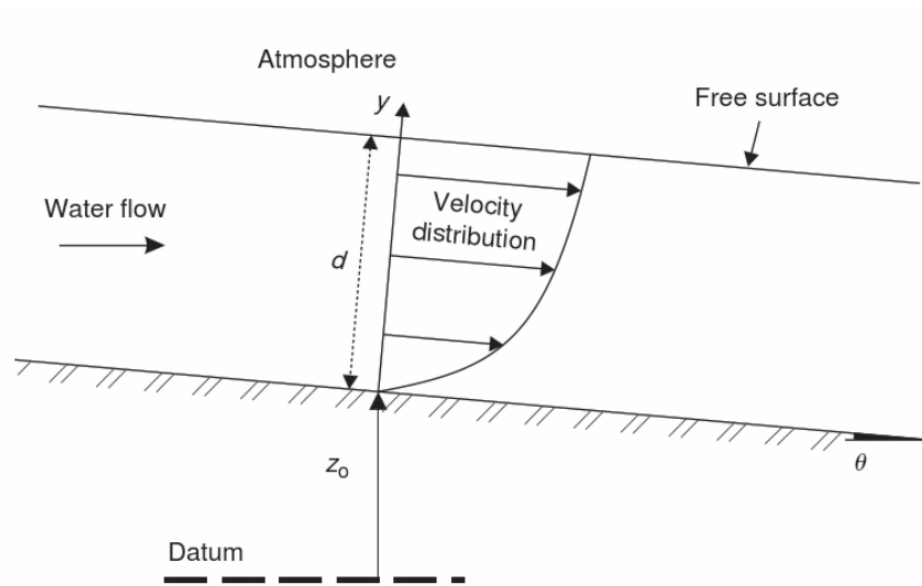


Kuva 2: Pitot-putki pienlentokoneen siivessä [8]

Kuvassa 2 näkyy Pitot-putki pienlentokoneen siivessä. Pitot-putken sisääntuloaukko on sen kärjen päässä, ja staattisen putken sisääntuloaukko kärjen sivussa. Kun Pitot-putkella mitataan kaasun nopeutta, korkeuspilarin sijasta nopeus saadaan paine-erosta Pitot-putken ja staattisen putken välillä. Muuten rakenne on periaatteessa samanlainen.

2.2 Virtaveden fysiikka

Virtavesi (open channel flow) on nimitys vesivirralle, joka virtaa luonnollisessa tai keino-tekaisessa vesiuomassa painovoiman vaikutuksesta. Virtavedessä vesi on kosketuksissa ilmaan, joka on normaali-ilmanpaineessa. [9, s. 6–8] Virtaveteen ei siis lukeudu suljetuissa putkissa virtaava vesi. Virtavesi on usein turbulenttista, eli veden nopeus ja suunta muuttuvat nopeasti ajan suhteen. Turbulenttisuuteen vaikuttavat uoman epätasaisuuden aiheuttamat häiriöt, virtausnopeus ja veden viskositeetti. [9, sanasto] Turbulenssi vaikeuttaa virtausnopeuden mittaamista, koska silloin virtausnopeuden suuruus ei ole vakio, jolloin lukema heittelee koko ajan. Virtaaman selvittämiseksi nopeus-pinta-alamittauksessa mittauspisteet pitää valita niin, että virtausnopeusjakauma tulee huomioidua.

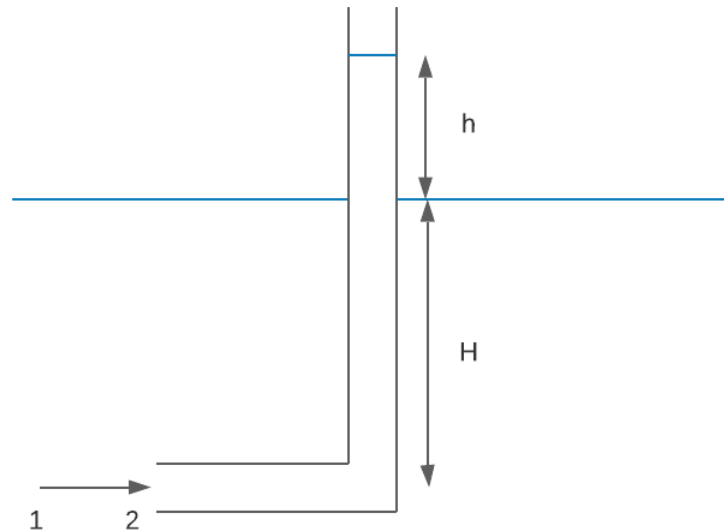


Kuva 3: Virtaveden virtausnopeuden jakauma [9, s. 7]

Kuvassa 3 esitetyssä virtausnopeuden jakaumassa on havainnollistettu, että pohjaa lähestyessä virtausnopeus pienenee pohjan aiheuttaman kitkan takia. Lisäksi pohjassa voi olla epäsäännöllinen pinnanmuoto, mikä aiheuttaa häiriöitä virtaan, jolloin virrasta tulee turbulenttista.

2.3 Pitot-putken yhtälön johtaminen

Tässä aliluvussa johdetaan yhtälö, jonka avulla saadaan ratkaistua virtausnopeus nestepilarin korkeudesta Pitot-putkessa. Tässä työssä suunniteltavassa laitteessa käytetään yksinkertaista Pitot-putkea eli sellaista, jossa ei mitata hydrostaattista painetta erikseen. Kuvassa 4 on esitettyä yksinkertainen Pitot-putki.



Kuva 4: Yksinkertainen Pitot-putki

Pitot-putken sisääntuloaukossa vaikuttaa stagnaatiopaine

$$p_t = p_s + p_d, \quad (1)$$

missä p_s on hydrostaattinen paine ja p_d on dynaaminen paine [10, s. 212]. Dynaaminen paine on virtausnopeuden aiheuttama ja sen suuruudesta saadaan selville veden virtausnopeus. Hydrostaattinen paine aiheuttaa nesteen painovoima. Virtavedessä hydrostaattisen paineen suuruus vedenpinnassa on nolla. Kun vesi ei virtaa, Pitot-putkessa olevan vesipilarin korkeus on samassa tasossa kuin mitattavan kohteen vedenpinta. Vedden virratessa putken vedenpinnan ja virtaveden pinnan korkeuseroon vaikuttaa siis vain dynaaminen paine.

Pitot-putken yhtälön johtamiseen käytetään Bernoullin yhtälöä:

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2, \quad (2)$$

missä p_1 ja p_2 ovat virtaavan veden paine, v_1 ja v_2 veden virtausnopeus ja z_1 ja z_2 korkeus kuvan 3 pisteissä 1 ja 2. Pisteet 1 ja 2 ovat samalla korkeudella: $z_1 = z_2$. Pisteessä 2 nopeus on nolla, $v_2 = 0$. Nyt saadaan yhtälö muotoon

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g}. \quad (2)$$

Termi $\frac{p_1}{\rho g}$ voidaan merkitä kuvan 3 putouskorkeudella H ja $\frac{p_2}{\rho g}$ putouskorkeudella $H + h$.

Saadaan yhtälö

$$H + \frac{v_1^2}{2g} = H + h. \quad (3)$$

Ratkaistaan v_1

$$v_1 = \sqrt{2gh}. \quad (4)$$

Koska kyseessä on teoreettinen nopeus, jossa ei oteta huomioon kitka- ja kertahäviöitä, kerrotaan yhtälön (4) oikea puoli kertoimella C_v

$$v_1 = C_v \sqrt{2gh}. \quad (5)$$

C_v on kokeellinen vakio, johon vaikuttaa mm. Pitot-putken suuttimen muoto [5, s. 16]. Darcyn Pitot-putkessa se oli 0,84 [1, s. 18].

3. TUTKIMUSMENETELMÄ

Tässä luvussa esitetään mittalaitteen suunnitteluun käytettävä tuotekehitysmetodi. Metodi on Pahl et. al. kirjan Engineering Design: A Systematic Approach. Kyseinen kirja on yksi suosituimmista tuotekehityksen kirjoista [11, s. 34].

Kirja esittelee systemaattisen lähestymistavan (systematic approach), joka perustuu systeemiteoriaan (systems theory). Systeemiteorian mukaan tekninen laite (technical artefact) voidaan esittää systeeminä, joka koostuu osista, jotka ovat riippuvaisia toisistaan. Systemaattisessa lähestymistavassa Pahlin et. al. mukaan systeemiä lähestytään ennalta määritetyillä vaiheilla, joista jokaiseen kuuluu analyysiä ja synteisiä. [12, s. 15]

Systemaattinen lähestymistapa voidaan jakaa neljään vaiheeseen.

1. Esisuunnittelu ja tehtävän selkeyttäminen (Planning and Task Clarification)

Tässä vaiheessa kerätään tietoa tuotteen vaatimuksista ja rajoitteista. Lopputuloksena on vaatimuslista tuotteelle. Vaatimukset tulee olla sellaisessa muodossa, että lopullisesta tuotteesta voidaan mitata, ovatko ne toteutuneet. [12, s. 145–146]

2. Käsitteellinen suunnittelu (Conceptual Design)

Käsitteellisessä suunnittelussa ensimmäiseksi tunnistetaan tuotteen ydintoiminto, joka jaetaan alitoimintoihin. Niille kehitetään useita toimintaperiaatteita, joista keskenään yhteensopivat vaihtoehdot yhdistetään konseptin, eli periaatteellisen kokonaisrakenteen, vaihtoehdoiksi. Kokonaisista rakenteista valitaan paras arvioimalla niitä edellisen vaiheen vaatimuslistan perusteella. Vaiheen lopputuloksena saadaan konsepti. [12, s. 159–161]

3. Todellinen suunnittelu (Embodiment Design)

Edellisen vaiheen konseptia kehitetään konkreettisemmaksi rakenteeksi teknisten ja taloudellisten kriteerien mukaan. Tämän vaiheen lopputuloksena saadaan tuotteen lopullinen layout (definitive layout), jossa määritetään, miten komponentit ovat aseteltu ja miten ne ovat yhteydessä toisiinsa. [12, s. 227–229]

4. Yksityiskohtainen suunnittelu (Detail Design)

Yksityiskohtainen suunnittelu toteutetaan tässä työssä vajavaisena. CAD-mallinnetaan ja pääpiirteittäin mitoitetaan mittalaite. Normaalisti tämän vaiheen jälkeen tuote olisi valmiina tuotantoon [12, s. 132].

4. SUUNNITTELU

Suunnitteluvaihe tehdään luvussa 3 esitetyn systemaattisen lähestymistavan tuotekehitysmetodin mukaan. Jokaisessa aliluvussa käsitellään yksi tuotekehitysmetodin vaihe.

4.1 Laitteen vaatimukset

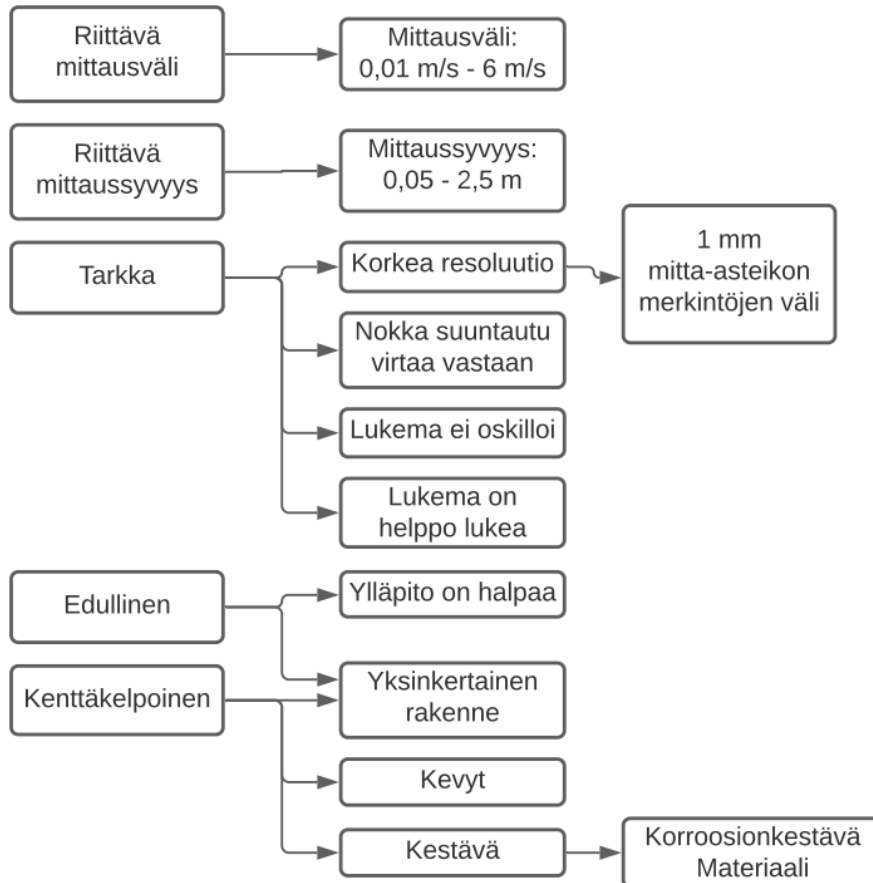
Ensimmäinen suunnitteluvaihe on vaatimusten listaus. Pahl et. al. mukaan vaatimusten keräys voidaan tehdä laatimalla käyttökuvauksia tuotteesta. [12, s. 152] Taulukossa 1 on listattu mahdollisia käyttökohteita, kohteen syvyys tai mittasyvyys ja siinä virtaavan veden virtausnopeus.

Taulukko 1: Mittalaitteen mahdollisia käyttökohteita

Kohde	Syvyys tai mit- taussyvyys (m)	Nopeus (m/s)	Lähde
East fork river, Wyoming, Yhdysvallat	0,25–1,60	0,49–1,22	[13, s. 98]
Gumangyo, Korean niemi- maa	2,5	0,4–0,9	[14, s. 5985–5987]
Helsingin purot	0,05–0,23	0–0,32	[15, s. 30]
Kokemäenjoki		0,01–1	[16, s. 16– 20]
Tenojoki	1	0,7–1,8	[17]
Tenon subarktiset purot	0–0,34	0,3–0,9	[18, s. 68]
Vanha uoma, Kiskonjoki (tulva)		5–6	[19, s. 27]
Tavikoski, Valtimonjoki	0–1	0,5–1	[20, s. 58]
Tourujoen uoma	0–0,4	2,5–3	[21, s. 18]

Taulukossa 1 esitetyistä käyttökuvauksista huomataan, että mitattava nopeus on 0,03 m/s – 6 m/s ja mittaussyvyys on 0,05–2,5 m. Laite ei voi olla liian iso, koska sen pitää soveltuva kenttäkäyttöön, eli sitä pitää pystyä käyttämään ulkotiloissa muuttuvissa olo-

suhteissa. Mittalaitteen muita vaatimuksista, ovat tarkkuus ja helppokäyttöisyys. Vaatimukset on muutettava sellaiseen muotoon, että valmiista tuotteesta voi mahdollisimman yksiselitteisesti saada selville, ovatko ne toteutuneet. Kuvassa 5 on esitetty lopulliset vaatimukset tuotteelle.



Kuva 5: Vaatimuslista

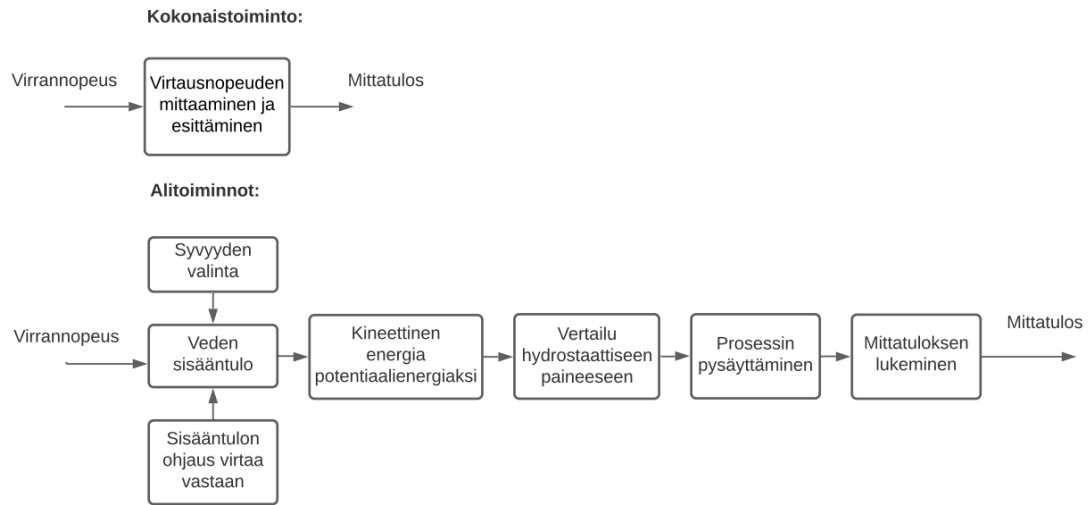
4.2 Käsitteellinen suunnittelu

Käsitteellisen suunnittelun vaihe jaetaan kahdeksi aliluvuksi. Ensimmäisessä jaetaan laitteen kokonaistoiminto (overall function) alitoiminnoiksi, ja toisessa kehitetään niille useita toimintaperiaatteita.

4.2.1 Kokonaistoiminto ja osatoiminnot

Laitteen kokonaistoiminto voidaan selvittää pohtimalla, mitkä ovat prosessin sisääntulo, ulostulo ja toiminto, mikä muuttaa sisääntulon ja ulostuloksi. Kokonaistoiminto voidaan

esittää lohkokaaaviolla, kuten kuvassa 6 näkyy, jossa on esitetty tässä työssä suunniteltavan laitteen kokonaistoiminto. Laitteen sisääntulo on veden virtausnopeus, ulostulo on mittaustulos ja kokonaistoiminto on virtausnopeuden mittaaminen ja esittäminen.



Kuva 6: Lohkokaaviot systeemin toiminnoista

Kuvassa 6 on esitetty kokonaistoiminnon lisäksi alitoiminnot. Kokonaistoiminto jaetaan alitoimintoihin laajentamalla lohkokaaviota, siten että sisääntulo ja ulostulo pysyvät samana.

4.2.2 Alitoimintojen toimintaperiaatteet ja niiden yhdistäminen

Taulukossa 2 luetellaan jokaiselle alitoiminnolle kolme toimintaperiaatetta. Toimintaperiaatteet ovat valittu muun muassa kirjallisuuskatsauksesta saatujen tietojen perusteella.

Taulukko 2: Alitoimintojen toimintaperiaatteiden vaihtoehdot

	1. vaihtoehto	2. vaihtoehto	3. vaihtoehto
Veden sisääntulo	Lieriö	Kavennettu	Kavennettu ja pyörästetty
Kineettinen energia potentiaalienergiaksi	Kokonaan läpinäkyvä Pitot-putki	Pitot-putki, jossa metallinen alaosa ja läpinäkyvä yläosa	Pitot-putki, jonka paksuus vaihtelee
Syvyyden valinta	Tukisauvan mitta-asteikko	Virtaveden pinnasta mitta-asteikolla	Hydrostaattinen paine
Sisääntulon ohjaus virtaa vastaan	Siivillä putken takana kahdessa tasossa	Kädellä ohjattava ilman siipiä	Siivillä yhdessä tasossa
Vertailu hydrostaattiseen paineeseen	Kelluva asteikko raiteilla	Staattinen putki	Painemittari
Prosessin pysäyttäminen toimielin	Nuppi	Kahva	Liipaisin
Prosessin pysäyttämisen voimansiirto	Vaijeri	Kiinteä akseli	Ketju
Prosessin pysäyttämisen Pitot-putkessa	Kuristusventtiili	Kuulaventtiili	Luistiventtiili
Mittaustuloksen lukeminen	Veden korkeudesta putkessa	Painemittareista	Veden korkeuden erotuksesta putkissa

Käsitteellisen suunnittelun seuraavassa vaiheessa luodaan useita konseptin eli periaatteellisen kokonaisrakenteen vaihtoehtoja yhdistämällä toimintaperiaatteita. Joissain alitoimintojen toimintaperiaatteissa on yksi selkeästi paras vaihtoehto.

Veden sisääntulo toteutetaan nokalla, joka on kavennettu sisäänottoreikää kohti. Tämä muoto vähentää mittaustuloksen heittelyä eniten [1, s. 19].

Virtauksen kineettinen energia muutetaan potentiaalienergiaksi putkella, jonka alkuosa on metallinen ja suora osa läpinäkyvä. Tämä rakenne valittiin, koska venttiiliin asti laite saattaa kolhiintua ja kärki on helpompi muotoilla metallista.

Taulukko 3: Konseptin vaihtoehdot

	1. vaihtoehto	2. vaihtoehto	3. vaihtoehto
Veden sisääntulo	Kavennettu ja pyörästetty	Kavennettu ja pyörästetty	Kavennettu ja pyörästetty
Kineettinen energia potentiaali-energiaksi	Pitot-putki, jossa metallinen alaosa ja läpinäkyvä yläosa	Pitot-putki, jossa metallinen alaosa ja läpinäkyvä yläosa	Pitot-putki, jossa metallinen alaosa ja läpinäkyvä yläosa
Syvyiden valinta	Hydrostaattinen paine	Pohjaan asettava keppi	Pohjaan asettava keppi
Sisääntulon ohjaus	Siivillä vain yhdessä tasossa	Siivillä vain yhdessä tasossa	Kädellä ohjattava ilman siipiä
Vertailu hydrostaattiseen paineeseen	Staattinen putki ja painemittarit	Kelluva asteikko raiteilla	Kelluva asteikko raiteilla
Prosessin pysäyttäminen	Nuppi	Liipaisin	Kahva
Prosessin pysäyttäminen voimansiirto	Vaijeri	Vaijeri	Kiinteä akseli
Prosessin pysäyttäminen Pitot-putkessa	Kuristusventtiili	Luistiventtiili	Kuulaventtiili
Mittaustuloksen lukeminen	Painemittareista	Veden korkeudesta putkessa	Veden korkeudesta putkessa

Muut toimintaperiaatteet valitaan toistensa kanssa yhteensopivien kanssa samaan konseptin vaihtoehtoon. Nämä vaihtoehdot ovat esitetty taulukossa 3.

4.2.3 Konseptin valinta

Valitaan kolmesta vaihtoehdosta paras arvioimalla niitä vaatimuslistasta saatujen kriteerien perusteella. Vaatimuslistasta saadaan viisi kriteeriä. Vaatimuslistan kohdat riittävä mittaussyvyyden ja mittausvälin laajuus yhdistetään 'Monissa olosuhteissa toimiva' -kriteeriksi. Muita kriteerejä ovat helppokäyttöisyys, edullisuus tarkkuus ja kestävyys.

Laitteelle annetaan arvosana yhdestä kolmeen kunkin kriteerin perusteella. Mitä korkeampi arvosana sitä parempi tuote on kriteerin perusteella.

Helppokäyttöisyydessä Vaihtoehto 1 on huonoin, koska virtausnopeus ja mittaussyvyys eivät ole suoraan luettavissa, vaan ne pitää laskea erikseen. Lisäksi staattinen putki ja painemittarit lisäävät massaa. Myös syvyys on hankala mitata, koska se pitää

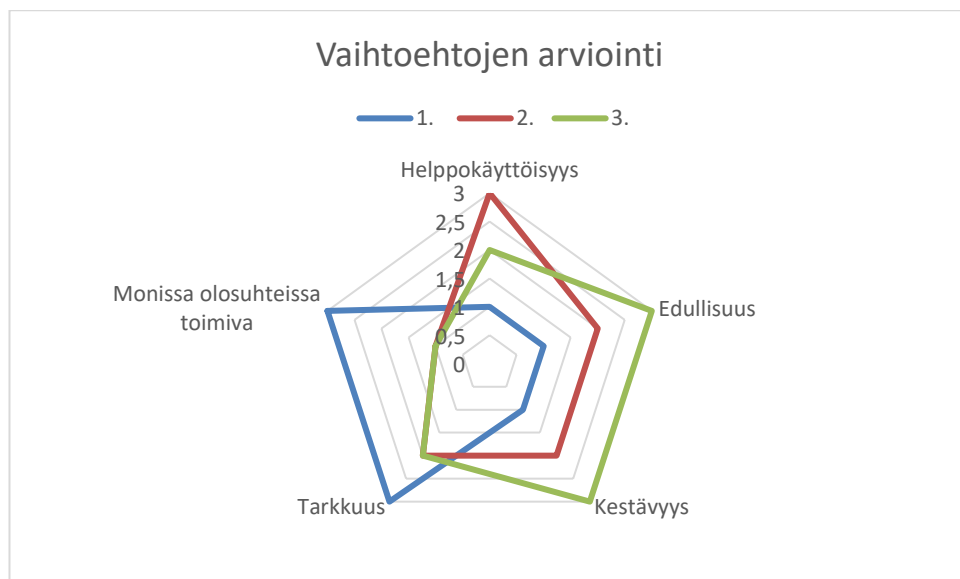
laskea erikseen painemittarin lukemasta. Vaihtoehto 2 on hieman parempi kuin vaihtoehto 3, koska sulkiessa liipaisimen puristusliikkeessä laite on helpompi pitää paikallaan kuin kahvalla.

Edullisuudessa vaihtoehdon 1 painemittarit ja staattinen putki lisäävät kustannuksia. Vaihtoehdon 3 yksinkertaisempi voimansiirto tekevät siitä edullisemmän kuin vaihtoehto 2:n.

Kestävyydessä samat tekijät kuin 'edullisuus'-kriteerissä, eli komponenttien määrä ja voimansiirron yksinkertaisuus, erottavat vaihtoehdot toisistaan.

Tarkkuudessa vaihtoehto 1 on parempi kuin muut, koska painemittareista saadaan tarkempi tulos kuin veden korkeuden lukemisesta putkesta. Vaihtoehdossa 1 ei myöskään tarvitse lukita kelluvaa mitta-asteikkoa. Lukitseminen saattaa lisätä epätarkkuutta. Vaihtoehdon 1 ja vaihtoehdon 2 välillä ei ole eroja tarkkuudessa.

Useimmissa olosuhteissa toimiva on vaihtoehto 1, koska sillä voidaan helposti mitata kaikista taulukon 1 mittauspaikoista. Vaihtoehdossa 1 ja vaihtoehdossa 2 pystytään mitata vain sellaisissa paikoissa, jossa tanko ylettää pohjaan asti. Toisaalta vaihtoehdon 1 tapauksessa ei voida mitata syvemältä niin, että laite olisi kokonaan pinnan alla. Lisäksi sillä on vaikeampi mitata matalia virtavesiä, jotka luultavasti olisivat useimmiten käyttökohteina.



Kuva 7: Konseptin vaihtoehtojen arviointi

Kuvassa 7 esitetään arvioinnin lopputulos. Valitaan vaihtoehto 3, joka sai yhteensä 10 pistettä. Muut saivat 9 pistettä.

4.3 Todellisen mallin suunnittelu

Todellisen mallin suunnittelussa aiemman vaiheen lopputuloksena saadun konseptin osat sovitetaan yhteen ja niiden järjestys (layout) laitteessa valitaan.

Mittalaitteessa on runko, johon kaikki osat kiinnittyvät. Pitot-putken metallinen L-mutka ja läpinäkyvän suoran putken väliin kiinnitetään kuulaventtiili kierteillä. Pitot-putkeen on lisäkappaleita, jotka voidaan kiinnittää kierteillä, jotta myös syvältä voidaan mitata mittavälin korkeimpia virtausnopeuksia.

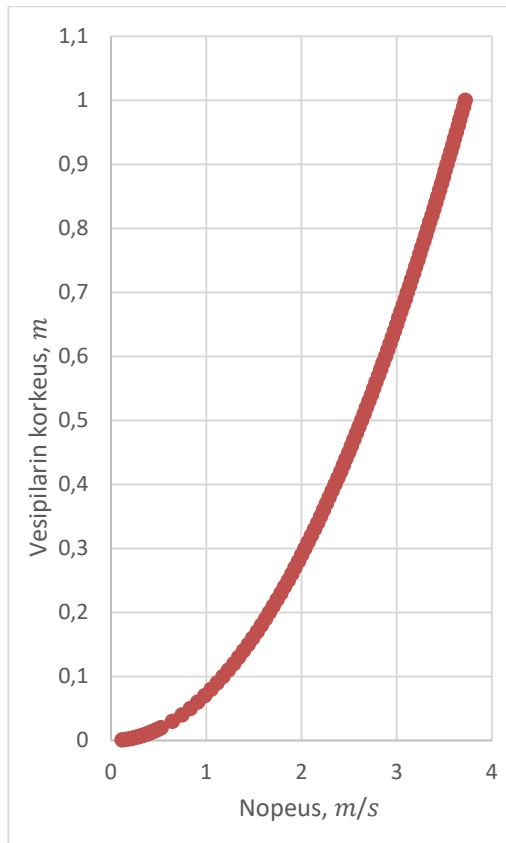
Kahva, joka sulkee venttiilin ja lukitsee mitta-asteikon, kiinnitetään lukitusakseliin siten, että ne ovat kiinteästi yhdessä. Rungossa on aukko, johon akseliin kiinnitetyssä kahvassa oleva luistin liu'utetaan, jotta kahva pysyisi paikallaan ääriasennossa. Akselista lähtee jäykkä kanki, joka on kiinnitettynä venttiilin kahvaan. Kanki kulkee venttiilin kahvan lävitse vapaasti. Akseli on kiinnitettynä samalla tavalla ruuviin, joka lukitsee mitta-asteikon. Mitta-asteikko on putken ja rungon välissä. Mitta-asteikko on kiinnitettynä rungossa olevalla raiteella.

Rungon takana on pohjaan asettava sauva. Sauvan varressa on mitta-asteikko, josta voi lukea etäisyyden pohjan ja Pitot-putken sisääntulon välillä. Keppi on kiinnitettynä runkoon ruuvattavilla kiinnittimillä, jotta rungon, ja samalla Pitot-putken mittaussyvyyttä, voidaan muuttaa.

4.4 Yksityiskohtainen suunnittelu

Tässä luvussa mitoitetaan mittalaite. Mitoitusvaiheessa ei mitoiteta tarkasti koko laitetta, vaan mittauksen osalta tärkeimmät komponentit, eli Pitot-putki, mitta-asteikko ja tukikeppi.

Aloitetaan laitteen mitoitus selvittämällä, kuinka korkea Pitot-putken pitää olla, jotta sillä voidaan mitata vaatimusten mukaista virtausnopeuksia. Kuvassa 8 esitetään vesipilarin korkeus virtausnopeuden funktiona. Käyrä saadaan luvussa 2 johdetulla kaavalla (5).



Kuva 8: Vesipilarin korkeus nopeuden funktiona

Annetaan Pitot-putken pituudeksi 1 m, koska sitä korkeammasta Pitot-putkesta tulisi liian suuri ja sen takia epäkäytännöllinen. Metrin pituisella Pitot-putkella saadaan mitattua virtausnopeuksia 3,7 m/s asti, mikä täyttää suurimman osan Taulukossa 1 luetelluista mahdollisten käyttökohteiden virtausnopeuksista. Käyrästä ja kaavasta huomataan, että kyseessä on potenssifunktio. Valitaan mitta-asteikon suureeksi vesipilarin korkeus.

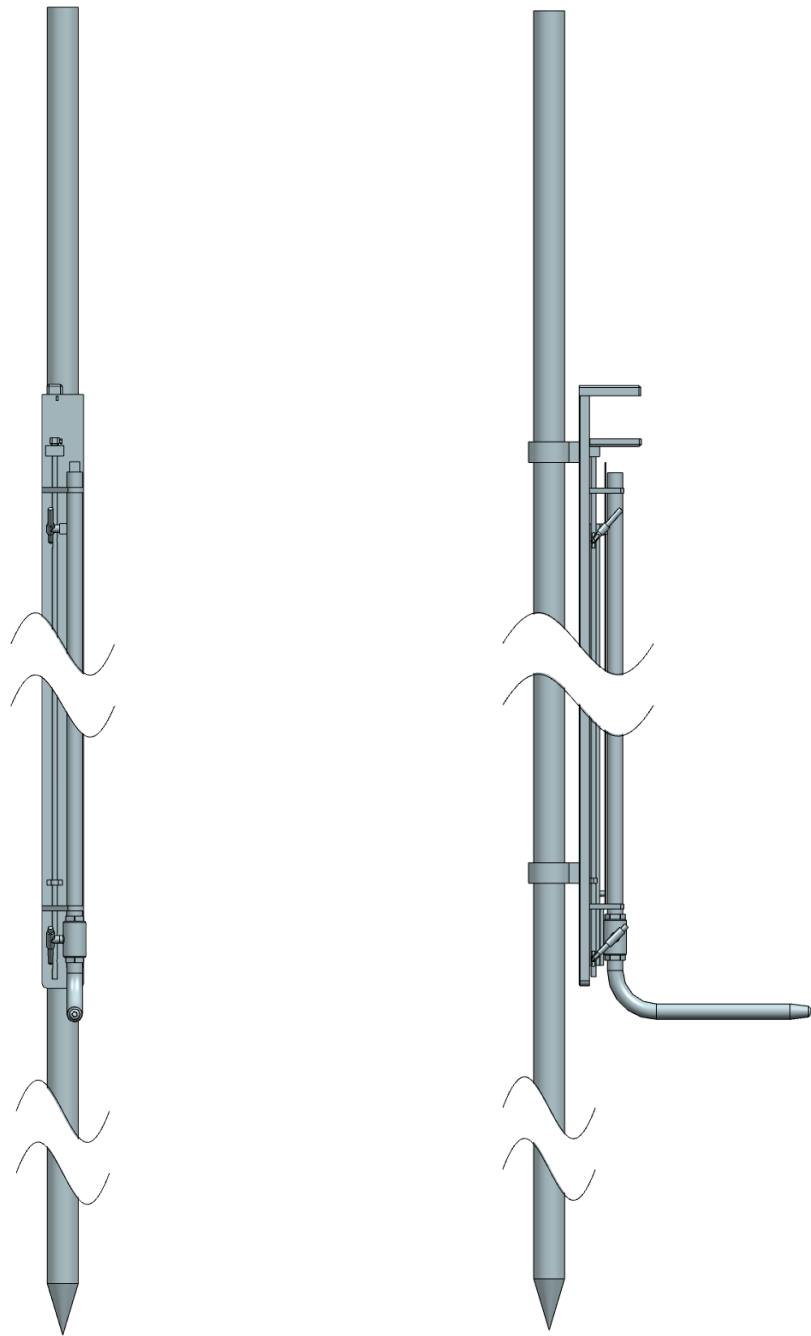
Putken sisähalkaisijat mitoitetaan samalla tavalla kuin Darcyn Pitot-putkessa. Sisääntulon halkaisijaksi annetaan 5 mm ja muun putken sisähalkaisijaksi 10 mm. Venttiilin alapuolelle tulevia Pitot-putken lisäputkia mitoiksi annetaan 25 cm, 50 cm ja 1 m. Jotta pientä lisäputkea voidaan käyttää, annetaan tukiputkelle korkeudeksi 2 m. Tukiputki on kahdessa osassa, jotka kiinnitetään kierteillä yhteen.

5 LOPULLINEN SUUNNITTELU

Tässä luvussa esitellään CAD-malli mittalaitteesta. Sen ominaisuuksia arvioidaan yleisesti ja verrataan muihin mittalaitteisiin sekä sille asetettuihin vaatimuksiin. Lisäksi mittalaitteen mittaustapahtuma selostetaan vaiheittain.

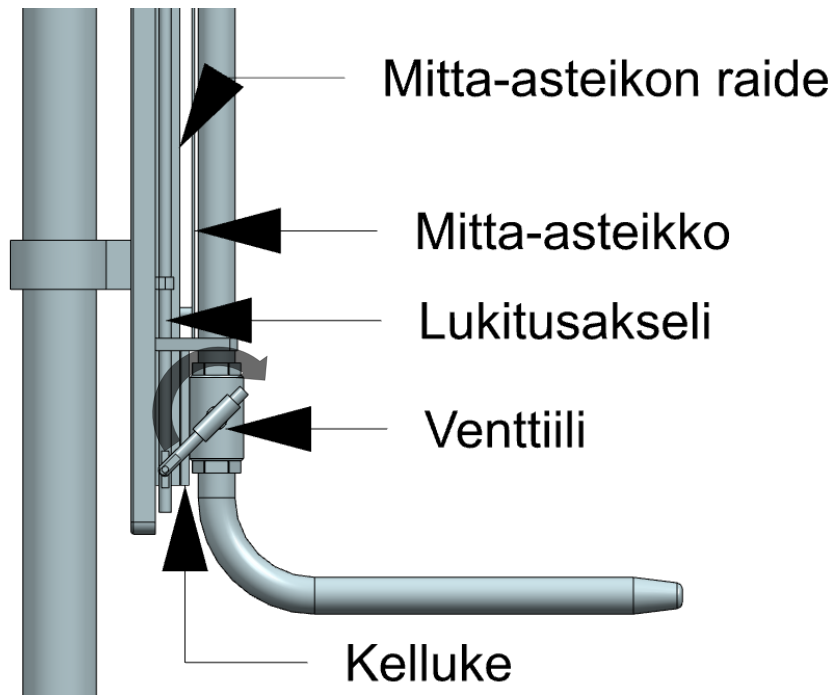
5.1 Lopullisen tuotteen esittely

CAD-malli tehtiin Siemens NX-ohjelmalla. Kuvan 9 malli on tehty luvun 4.4 mittojen mukaan. Muut mitat määritettiin niin, että ne ovat yhteensopivia mitoitettujen kappaleiden kanssa.



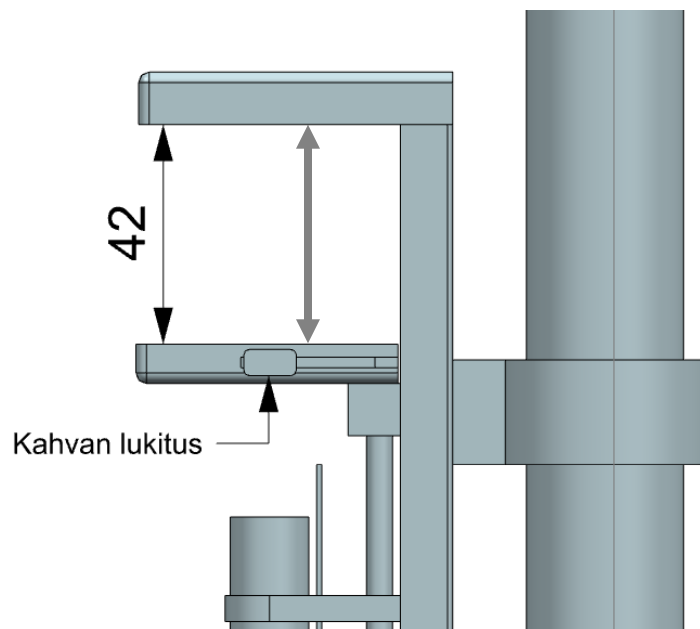
Kuva 9: Työssä suunniteltu virtausnopeusmittari

Akseli liikkuu ja muuttaa kammien avulla lineaarisen liikkeen pyörimisliikkeeksi, joka pyörittää venttiiliin ja mitta-asteikon sulkevat ruuvit. Kun venttiili suljetaan, se pyörii kuvan 10 nuolen osoittamaan suuntaan. Pitot-putken kärki on pitkällä edessä, jotta muut osat eivät vaikuttaisi mittaustulokseen. Mitta-asteikko on alustalla, joka pitää mitta-asteikon liikkeen suorana. Mitta-asteikon alla on kelluke, joka pitää mitta-asteikon nollakohdan samassa tasossa kuin vedenpinta. (Kuva 10)



Kuva 10: Virtausnopeusmittarin alaosa

Lukituskahva on 4,2 cm päässä yläkahvasta. Kahvassa oleva luistin liu'utetaan rungossa olevaan reikään, jotta akseli pysyisi paikallaan yläasennossa. Ala-asennossa kahva pysähtyy runkoon kiinnitettyyn kappaleeseen. Kuvan 11 tilanteessa kahva on ala-asennossa. Alempi kahva liikkuu harmaan nuolen verran ylöspäin yläasentoon siirtyessä.



Kuva 11: Lukitusjärjestelmän kahva

Mittalaitteen räjäytyskuva on esitetty liitteessä 1. Räjäytyskuvassa mittalaitteen komponentit havainnollistetaan erillään.

5.2 Mittaustapahtuma

Tässä aliluvussa kuvataan mittaustapahtuma vaiheittain. Mittaustapahtuma voidaan jakaa kolmeen vaiheeseen: paikan valinta, mittaus ja tuloksen lukeminen.

Vaihe 1: Paikan valinta

Ensin kahlataan virtaveteen ja valitaan haluttu mittauspaikka. Tukisauva asetetaan joen pohjaan. Tukisauvan kiinnityskappaleiden ruuvit löysätään. Pitot-putken kärki asetetaan haluttuun syvyyteen sen rungossa olevan mitta-asteikon avulla. Lopuksi kiinnityskappaleiden ruuvit kiristetään.

Vaihe 2: Mittaus

Mittaja seisoo putken takana tai sen sivussa, jotta virtaus ei häiriinny ja muuta mittaus-tulosta. Virtausnopeusmittari suunnataan virtaa vastaan. Kun vesi on asettunut paikoil-leen putkessa, mittaja vetää alemman kahvan ylöspäin, mikä sulkee veden putkeen ja mitta-asteikon paikoilleen. Kahva lukitaan yläasentoon liu'uttamalla luistimen rungossa olevaan reikään.

Vaihe 3: Tuloksen lukeminen

Mittaustulos luetaan mitta-asteikolta siltä kohdalta, jossa vesipilarin pinta on. Mittaajan tulee lukea mittaustulos siten, että hänen silmänsä ovat samalla tasolla kuin vesipilarin pinta virheellisten tulosten välttämiseksi.

5.3 Mittalaitteen arviointi ja vertailu

Tämän mittalaitteen kanssa samankaltaisin virtaveden virtausnopeusmittari on Darcyn versio Pitot-putkesta. Vaikka Darcy ratkaisi alkuperäisen Pitot putken heikkouksia, tämän työn mittarissa on ainakin teoreettisia parannuksia. Staattista putkea ei ole, mikä tekee laitteesta kevyemmän ja helpompikäyttöisen. Lukitusjärjestelmän aktivointi kahvalla on nopeampi mekanismi verrattuna Darcyn versioon, jossa venttiili suljetaan pyörittämällä nuppia. Kahva ei myöskään aiheuta mittalaitteelle sellaista kuormitusta, joka saattaisi ohjata Pitot-putken kärkeä pois päin virrasta.

Lukitusjärjestelmän toimivuus voidaan kyseenalaistaa, koska sama akseli sulkee sekä venttiilin että mitta-asteikon lukitsevan ruuvin, mikä aiheuttaa ennalta määritetyn liikera-dan kahdelle eri ruuville. Toisaalta mitta-asteikon ruuvin kulmanopeus on pienempi kuin venttiilin ruuvin kulmanopeus lukitsemisen loppuvaiheessa, mikä saattaa tehdä lukitus-järjestelmien yhteensovittamisessa helpompaa.

Kellukkeen toimivuus on melko epävarmaa tässä vaiheessa, sillä ilman testejä ei voida olla varmoja, olisivatko mitta-asteikon liikettä vastustavat voimat vakiosuuruiset ja siten mitta-asteikon nollakohta aina veden pinnalla. Vastusvoimiin voi vaikuttaa myös mitta-asteikon raiteiden likaantuminen.

Muihin kuin Pitot-putkeen perustuviin mittalaitteisiin vertailu on vaikeaa. Pitot-putki on halpa ja yksinkertainen verrattuna muihin mittalaitteisiin [1, s. 14] [5, s. 2]. Muissa mittalaitteissa on suurempi mittausväli, mutta sille ei ole tarpeellinen ominaisuus, jos mitattava virtausnopeus ei ole niin suuri. Käytössä olevilla mittauslaitteilla on se etu, että niiden toimivuudesta voidaan olla varmoja. Kuten muissakin virtausnopeusmittareissa, mittalaitteen vedenalaisten osien likaantuminen voi olla ongelma.

Laitteen analogisuuden vahvuuksia ovat laitteen halvemmat tuotanto- ja korjauskustannukset. Laite on myös edullisempi, koska siinä ei ole kalliita komponentteja, kuten sähkömagneettisia antureita. Haittana on pieni mittausväli ja koosta, massasta sekä mitaustuloksen lukemisesta johtuva vaikeakäyttöisyys.

5.4 Mittalaitteen vertailu vaatimuksiin

Tässä aliluvussa verrataan mittalaitteen ominaisuuksia kuvan 5 vaatimuksiin. Mittalaite vastasi osin sille asetettuja vaatimuksia. Mittausväli on melkein vaatimuslistan mukainen.

Laitteella pystytään mittaamaan virtausnopeuksia välillä 0–3,7 m/s, mikä ei täytä vaatimusta 0–5 m/s. Mittausväli riittää silti useimpiin taulukon 1 käyttökohteisiin.

Mittalaitteella voidaan mitata noin 1,5 metrin syvyyteen asti, mikä ei täytä vaatimuksia. Jos mittalaite olisi suurempi, siitä tulisi epäkäytännöllinen. Toisaalta harvalla muullakaan mittalaitteella voidaan mitata niin syvältä.

Pitot-putken kärki ohjautuu virtaa vastaan kädellä ohjaamalla. Mittalaitteesta tulisi liian vaikeakäyttöinen ja monimutkainen, jos se suuntautuisi virtaa vastaan itsestään siivekkeillä.

Lukeman oskillointia rajoitettiin Pitot-putken kärjen muodolla. Lukitusjärjestelmän avulla oskillointi voidaan pysäyttää lukitusjärjestelmän avulla mittaustuloksen lukemisen ajaksi.

Mittalaitteen edullisuudesta ei voida tehdä tarkkaa arviota, mutta sitä puoltaa yksinkertainen analoginen rakenne. Lisäksi Pitot-putki on Almeidan ja Souzan [5, s. 2] sekä Brownin [1, s. 14] mukaan edullinen mittalaite.

Lukitus akseli ja mitta-asteikko ovat luultavasti helppoiten rikkoutuvat osat. Kestävyyydestä on kuitenkin vaikeaa tehdä päätelmiä ilman testejä.

6 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli suunnitella virtaveden virtausnopeuden mittalaite, joka perustuu Pitot-putkeen. Mittalaitteelle esitettiin vaatimuksena mm. edullisuus, kenttäkäyttöön soveltuvuus ja mahdollisuus mittaukseen eri syvyyksissä ja virtausnopeuksissa.

Työn kirjallisuuskatsauksessa kerättiin tietoa Pitot-putkesta, muista mittalaitteista, virtavedestä ja sen mittaamisesta. Kirjallisuuskatsauksesta saatujen tietojen perusteella, voitiin aloittaa suunnitteluvaihe, joka tehtiin Pahl et. al. systemaattisen lähestymistavan mukaan.

Tuloksena saatiin CAD-malli Pitot-putkeen perustuvasta virtausnopeusmittarista. Virtausnopeusmittarin Pitot-putki komponentti on L-muotoinen putki. Hydrostaattinen paine mitataan yleisesti käytetyn staattisen putken sijaan kelluvalla mitta-asteikolla. Mittalukeman oskilloinnin estämiseksi mittarissa on lukitusjärjestelmä, joka sulkee samalla veden Pitot-putkeen ja mitta-asteikon paikoilleen.

Mittalaite vastasi osin sille asetettuja vaatimuksia. Sillä pystytään mittaamaan virtausnopeuksia välillä 0–3,7 m/s, mikä ei täytä vaatimusta 0–5 m/s, mutta riittää silti useimpiin käyttökohteisiin. Mittalaitteella voidaan mitata syvyyksistä noin 1,5 m asti, mikä ei täytä 2,5 m:n vaatimusta. Edullisuudesta ei voida tehdä tarkkaa arviota, mutta sitä puoltavat yksinkertainen analoginen rakenne. Kestävyyden ja mittatarkkuuden arvioimiseen tarvittaisiin lisälaskuja ja prototyyppi testien tekemiseen.

Työn rajoitteena on, että ei pystytty rakentamaan prototyyppiä, jonka toimintaa voitaisiin testata. Pitot-putkelle ominainen potenssiasteikko aiheuttaa vaikeuksia, mikä pakottaa valitsemaan mitta-asteikon suureeksi korkeuden, mistä pitää laskea erikseen virtausnopeus. Laitteen koko vaikuttaa mittausväliin, koska Pitot-putkessa virrannopeus saadaan selville vesipilarin korkeudesta sen sisällä. Mittausvälin kasvattamiseksi pitää luopua mittalaitteen käytettävyydestä. Tämä rajoite oli mahdollisesti analogisen Pitot-putken katoamisen taustalla virtaveden virtausnopeuden mittaamisessa.

Jatkotutkimuksena tehtäisiin prototyyppi laitteesta. Prototyypillä voitaisiin tehdä testejä, erityisesti kelluvan mitta-asteikkoa ja lukitusjärjestelmän toimivuudesta. Testeillä saataisiin selville mittalaitteen tarkkuus. Prototyyppiä verrattaisiin muihin mittalaitteisiin, myös erilaisiin Pitot-putken versioihin.

LÄHTEET

- [1] G.O. Brown, Henry Darcy's Perfection of the Pitot Tube, teoksessa G.O. Brown (toim.) Henry P. G. Darcy and Other Pioneers in Hydraulics. Vol. 128, 2003, s. 14–23.
- [2] R.W. Herschy, Streamflow Measurement, 3. painos, CRC Press, Boca Raton, FL 2014, 507 s.
- [3] S. Johnson & E. Schechter, Detecting Pitot Tube Obstructions, teoksessa Aerospace America 52.5, 2014, s. 16–18
- [4] G. Argentini, Pitot Tube from Euler Equations Point of View. Application to Formula 1 Cars, 2008, 10 s.
- [5] A.S. Almeida, V.C. Borges de Souza, An Alternative Method for Measuring Velocities in Open-Channel Flows: Performance Evaluation of a Pitot Tube Compared to an Acoustic Meter, Revista brasileira de recursos hídricos, 2017, Saatavissa (viitattu 17.12.2021): <https://doi.org/10.1590/2318-0331.011716099>
- [6] Global Water Portable Flow Probe, AWM Instruments, 2021, Saatavissa (viitattu 28.10.2021): <https://www.awmeasurements.com/open-channel-flow-meters/digital-water-velocity-meter>
- [7] WaterMark® USGS Model 6200 “AA” Current Meter, Forestry Suppliers, 2021, Saatavissa (viitattu 28.10.2021): https://www.forestry-suppliers.com/product_pages/products.php?mi=34011&itemnum=95000
- [8] What Does a Pitot Tube on an Aircraft Do?, NAA, 2021, Saatavissa (viitattu 14.12.2021): <https://www.naa.edu/pitot-tube/>
- [9] H. Chanson, The Hydraulics of Open Channel Flow an Introduction : Basic Principles, Sediment Motion, Hydraulic Modelling, Design of Hydraulic Structures, 2. painos, Elsevier Butterworth-Heinemann, Amsterdam, 2004, 651 s.
- [10] J.D Anderson, Fundamentals of Aerodynamics, 5. painos, McGraw-Hill New York, 2011, 1106 s.
- [11] K.M Adams, Non-Functional Requirements in Systems Analysis and Design, Springer International Publishing AG, 2015, Saatavissa (viitattu 27.12.2021): <https://doi.org/10.1007/978-3-319-18344-2>
- [12] G. Pahl, K. Wallace, L.T.M. Blessing, W. Beitz, F. Bauert, Engineering Design: A Systematic Approach, 3. painos, Springer London, Lontoo, 2013, 617 s.
- [13] V.P. Singh, C. S. P Ojha, Characteristic Velocity of Stream Bed Movement, Journal of hydrologic engineering, 2008, vol. 13(2) s. 96–100
- [14] W. Kim & C. Lee, Measurement of Velocity and Discharge of a Stream using a New Floating Rod Equipped with a GPS Receiver, teoksessa S. Starrett, World Environmental & Water Resources Congress 2009 Great Rivers, VA: American Society of Civil Engineers, Reston, 2009, 6562 s.

- [15] J. Niemelä, I. Helle and J. Jormola, Purovesistöjen merkitys kaupunkiluonnon monimuotoisuudelle, Suomen ympäristö 724, 2004, s.
- [16] R. Kirves, H. Koivusalo and T. Kokkonen, Kokemäenjoen hydraulinen mallinnus, Aalto-yliopisto, 2012, s.
- [17] H. Mansikkaniemi, Flood deposits, transport distances and roundness of loose material in the Tana River valley, Lapland, Reports from Kevo Subarctic Research Station, 1972
- [18] R. Savolainen, Vesihyönteisten esiintymiseen vaikuttavat tekijät Tenojoen subarktisisä puroissa, Pro gradu -tutkielma, Oulun yliopisto, 2015, 71 s.
- [19] J. Aho, Kiskonjoen Kosken ja Hålldamin kalatiet sekä Kosken vanhan uoman kunnostus, Ympäristötekniikan insinööritoimisto Jami Aho Oy, 2017, 37 s.
- [20] J. Rouvinen, Valtimon vesistön kalatalousselvitys, PIKES Oy, 2018, 256 s.
- [21] V. Kupiainen, M. Ahola, S. Tikkanen, K. Rantee, O. Lintinen & P. Sassi-Päkkilä, Jyväskylän Tourujoen kunnostus yleissuunnitelma, Jyväskylän kaupunki, Jyväskylä, 2018, Saatavissa (viitattu 27.12.2021): https://www.jyvaskyla.fi/sites/default/files/atoms/files/tourujoki_kunnostuksen_yleissuunnitelma.pdf

LIITE A: RÄJÄYTYSKUVA MITTALAITTEESTA