



Tekninen loppuraportti: CEMIS-UURA, TP3 Mittaustekniikka, Vajaatäytteen putken virtausmittaus

Kirjoittajat: Sari Kuure
Mika Huovinen
Timo Kananen

Luottamuksellisuus: VTT Public

Versio: 9.10.2025

Raportin nimi CEMIS-UURA TP3 Mittaustekniikka: Vajaatäyhteisen putken virtausmittaus	
Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot	Asiakkaan viite
Projektin nimi CEMIS-UURA Uudet digitaaliset ratkaisut Kainuun biotalouden ja kiertotalouden sekä mittaustekniikan haasteiden ratkaisuun	Projektin numero/lyhytnimi UURA
Raportin laatija(t) Sari Kuure, Mika Huovinen, Timo Kananen	Sivujen/liitesivujen lukumäärä 16/0
Avainsanat Ultraäänivirtausmittaus, vaihe-eromittaus	Raportin numero VTT-R-00457-25
Tiivistelmä Raportissa kuvataan CEMIS-UURA -hankkeen VTT MIKES Kajaanin osuus, joka liittyy työpakettiin 3: Mittaustekniikka. VTT MIKESin tavoitteena oli kehittää ultraäänivirtausmittaustekniikkaa veden virtausmittaukseen ensin täysissä, teollisuuden kokoluokan putkissa ja jatkokehittää menetelmää vajaatäyhteisen putken virtausmittauksiin ja selvittää mitä muita mittaustekniikoita siihen täytyy yhdistää, jotta virtaus saadaan mitattua luotettavasti. Hankkeessa toteutettiin ultraääneen perustuva, putken ulkopintaan kiinnitettävä clamp-on ultraäänivirtausmittari nestevirtaukseen. Mittauksissa käytettiin referenssilaitteistona VTT MIKES Kajaanin nestevirtauslaboratorion D500-laitteiston DN150-kokoista mittauslinjaa, jossa on referenssimittareina kaksi magneettista virtausmittaria. Menetelmää on testattu vedellä täydessä, paineisessa putkessa. Ultraäänivirtauslaitteistolle on tehty alustava mittausepävarmuusanalyysi, jossa on määritetty mittauksen suurimmat epävarmuuskomponentit, niiden suuruus ja vaikutus kokonaisepävarmuuteen sekä yhdistetty laajennettu epävarmuus. Vajaatäyhteisen putken testimittauksissa tutkittiin ultraäänisignaalin käyttäytymistä vajaatäyhteisessä putkessa ilman veden virtausta.	
Luottamuksellisuus	VTT Public
Kajaanissa 31.10.2025 Laatija Sari Kuure Tutkija	Tarkastaja Richard Högström Tutkimustiimin johtaja
VTT:n yhteystiedot sari.kuure@vtt.fi	
<i>VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.</i>	

Hyväksyminen

TEKNOLOGIAN TUTKIMUSKESKUS VTT OY

Päivämäärä:

Allekirjoitus:

Högström
Richard
912901706

Digitally signed by Högström Richard
912901706
DN: cn=Högström Richard 912901706,
o=Teknologian tutkimuskeskus VTT,
email=richard.hogstrom@vtt.fi
Reason: I am approving this document
Date: 2025.10.31 16:07:51 +0200

Nimi:

Asema:

Sisällysluettelo

1. Johdanto	4
2. Tavoite	4
3. Ultraäänen vaihe-eroon perustuva virtausmittaus	4
3.1 Mittausperiaate	4
3.2 Mittausgeometria	5
4. Mittauslaitteisto	6
4.1 Elektroniikka ja ultraäänianturit	6
4.2 Ilmaisutapa	7
4.3 Mittausohjelma.....	8
5. Mittaukset ja tulokset.....	9
5.1 Referenssilaitteisto.....	9
5.2 Täyden putken virtausmittaukset.....	9
5.2.1 Tulokset	9
5.3 Vajaatäyteen putken testimittaukset	11
5.3.1 Tulokset	12
6. Tulosten tarkastelu	14
6.1 Epävarmuusanalyysi	14
7. Johtopäätökset.....	15
Lähteet	16

1. Johdanto

CEMIS UURA-hanke eli ”Uudet ja digitaaliset ratkaisut Kainuun biotalouden- ja kiertotalouden sekä mittaustekniikan haasteiden ratkaisuun” on osa CEMIS-kehittämishjelmaa 2022–2024 ja se keskittyy Kainuun alueen elinkeinoelämästä tunnistettujen haasteiden ratkaisemiseen yhteiskehittämisen keinoin soveltaen käytäntöön uusia ja/tai vaihtoehtoisia teknologioita. UURA-hankkeeseen osallistuivat VTT MIKESin lisäksi koordinaattorina toiminut Oulun yliopiston Mittaustekniikan yksikkö MITY sekä Kajaanin ammattikorkeakoulu KAMK.

VTT:llä on aiemmin kehitetty ultraäänivirtausmittausmenetelmä ilman virtausmittaukseen. Menetelmää on onnistuneesti testattu myös vesivirtaukseen pienessä (DN15) putkikoossa. VTT MIKESin osuus hankkeesta liittyi ultraäänivirtausmittauksen kehittämiseen ensin täysissä, paineellisissa putkissa ja edelleen kohti vajaatäyhteisen putken virtausmittauksia. Kajaanissa VTT MIKES:llä on nestevirtauslaboratorio, jossa pystytään testaamaan erilaisia nestevirtausmittareita useilla laitteistoilla.

2. Tavoite

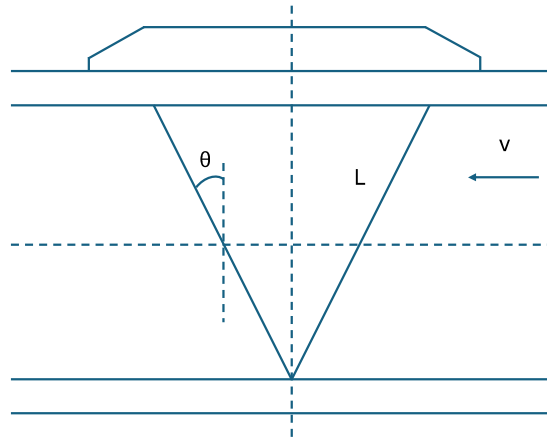
VTT MIKESin tavoitteena hankkeessa oli kehittää vajaatäyhteisen putken nestevirtauksen luotettavia mittauksia ultraäänivirtausmenetelmällä. Ultraäänimittaus on hyvin yleinen virtausmittausteknologia, jota käytetään paljon esimerkiksi teollisuuden eri prosesseissa täysissä putkissa. Tässä hankkeessa oli tavoitteena kehittää ultraäänivirtausmittaustekniikkaa veden virtausmittaukseen ensin täysissä, teollisuuden kokoluokan putkissa ja sitten jatkokehittää menetelmää vajaatäyhteisen putken virtausmittauksiin sekä selvittää mitä muita mittaustekniikoita siihen täytyy yhdistää, jotta virtaus saadaan mitattua luotettavasti.

3. Ultraäänen vaihe-eroon perustuva virtausmittaus

Hankkeessa toteutettiin ultraääneen perustuva, putken ulkopintaan kiinnitettävä clamp-on ultraäänivirtausmittari nestevirtaukseen. Menetelmää on testattu vedellä täydessä, paineisessa putkessa (paine ~2,5 bar).

3.1 Mittausperiaate

Virtausmittaus perustuu ultraääniaallon kuluaikaeroon edettäessä myötävirtaan ja vastavirtaan. Mittaus on toteutettu kahdella anturilla, joilla on kiinteä etäisyys. Virtauksen ollessa 0 litraa/s, kuluaika ylä- ja alavirtaan on sama ja kuluaikaeroa ei ole. Käytettäessä kahta anturia mittaus ei vaadi erillistä nollausta. Tilavuusvirran ja mitatun vaihe-eron (kuluaikaeron) välillä on todettu lineaarinen riippuvuus. Mittausperiaate on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Ultraäänimittauksen mittausperiaate.

Nestevirtauksen aiheuttama vaihe-ero (kulkuaikaero) ylä- ja alavirtaan voidaan ilmaista kaavalla (1):

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi fL}{c_1 - v \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)} - \frac{4\pi fL}{c_1 + v \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)}, \quad (1)$$

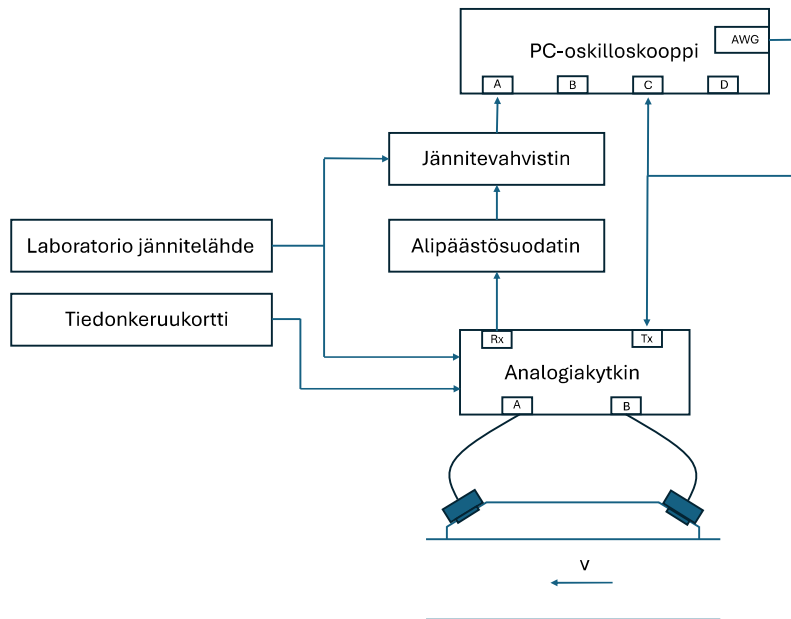
missä $\Delta\varphi$ on vaihe-ero radiaaneina, f lähteen taajuus, L akustinen polku putken yli, c_1 väliaineen äänennopeus, v virtausnopeus ja θ tulokulma. [1]

3.2 Mittausgeometria

Mittausgeometria määräytyy mitattavan putkikoon (tässä hankkeessa DN150), putken materiaalin sekä antureiden kiinnitysmateriaalin mukaan. Mittauksissa käytetty mekaaninen kiinnitys on valmistettu koneistamalla polyasetali- eli POM-muovista, jossa poikittaisaallon äänennopeus on 2430 m/s. Anturit on kiinnitetty sopivalla pikaliimalla POM-muoviin. Nestevirtausputken halkaisija on DN150 ja materiaali on teräs (materiaalissa 304L poikittaisaallon äänennopeus 3070 m/s ja pitkittäisaallon äänennopeus 5790 m/s). Antureiden mekaaninen kiinnitys on esitetty kuvassa 2.



beyond the obvious



Kuva 3. Mittausjärjestely.

Taulukko 1. Virtausmittauksessa käytetyt komponentit

Ultraäänianturit	Audiowell US00072
PC-oskilloskooppi	PicoScope 5444D MSO
Jännitevahvistin	Femto HVA-10M-60-F
Alipäästösuodatin	Thorlabs EF507
Jännitelähde	Mastech HY3005D-2
Analogiakytkin	Analog Devices EVAL-ADG5436FEBZ
Labview-sovellus	National Instruments Labview 2022 Q3 32-bit
Tiedonkeruukortti	National Instruments USB-6351

4.2 Ilmaisutapa

PC-oskilloskoopilla mitatuista signaalien aaltomuodoista voidaan määrittää ultraääniaallon kulkuaikaero eli vaihe-ero kaavan (2) mukaisesti

$$\varphi = 2\pi ft \quad , \quad (2)$$

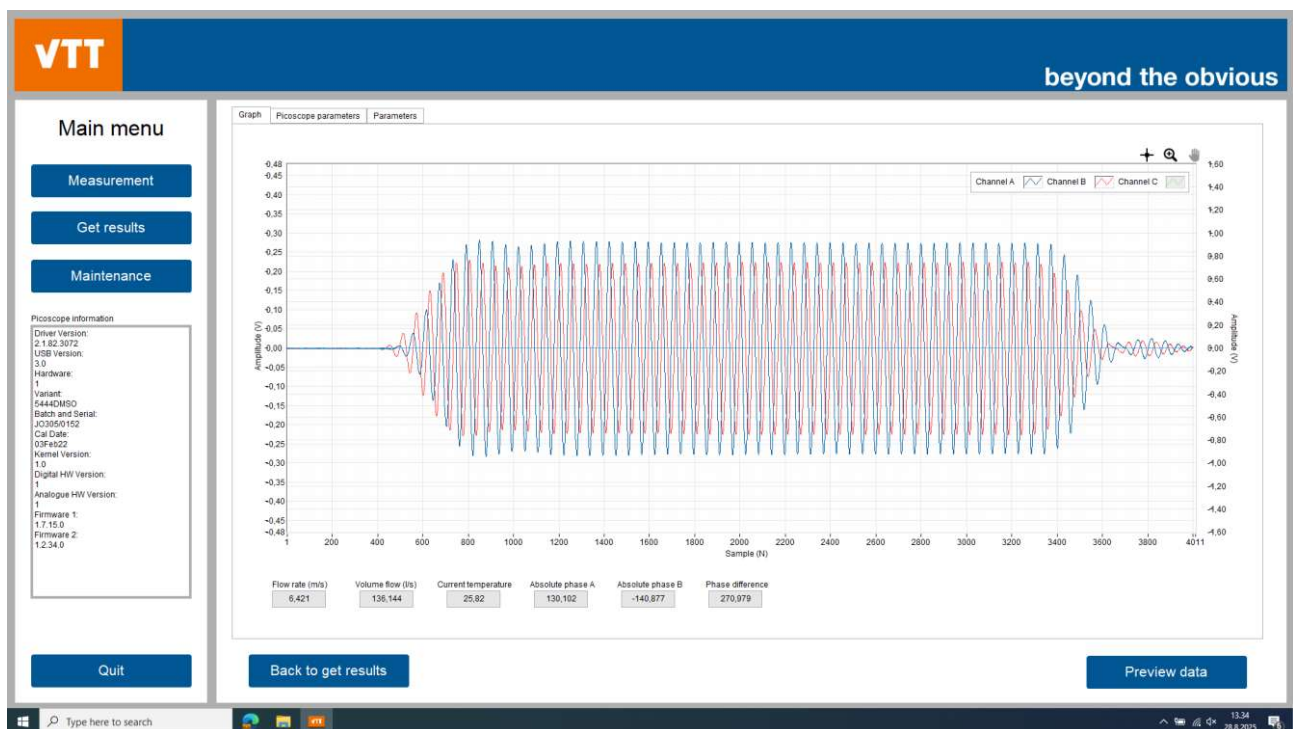
jossa φ on vaihe radiaaneina, f lähteen taajuus ja t kulkuaika. Mittauksissa vaihe-ero on määritetty käyttäen yleisesti tunnettua lukitusvahvistinperiaatetta (lock-in-amplifier) [2]. Lukitusvahvistin on toteutettu ohjelmallisesti Labview-ohjelmointikielellä. Vastaavasti kulkuaikaero voidaan määrittää

aaltomuodosta hyödyntäen yleisesti tunnettua ristikorrelaatiomenetelmää, joka kertoo aaltomuotojen välisestä kulkuajakerosta, ei absoluuttisesta kulkuajasta.

Vastaanotettua signaalin keskiarvostetaan. Mittauksissa on käytetty 1000 mittauksen keskiarvoa, joka käytetyllä mittausohjelmalla vastaa ajallisesti noin yhtä minuuttia. Teoreettisen rajan keskiarvostuksen nopeudelle määrää edellisen lähteen vaimenemiseen kuluva aika. Teoriassa voidaan lähettää noin 100 ultraäänilähetettä sekunnissa, ilman että peräkkäisistä lähteistä syntyvät kaiut alkavat häiritsemään toisiaan.

4.3 Mittausohjelma

Mittausohjelma toteutettiin Labview-ohjelmointikielellä. Koska mittausohjelma on avoin, voidaan tarvittaessa mittausohjelmaa muuttaa esimerkiksi ilmaisutavan mittausparametrien osalta. Mittausohjelma ohjaa PC-oskilloskooppiä ja mahdollistaa oskilloskoopin parametrisoinnin. Mittausohjelmaan toteutettiin tarvittavat ilmaisualgoritmit sekä riittävä määrä näkymiä, joista voidaan tarkastella ilmaisun välivaiheita. Ohjelma tallentaa tuloksia ja käytettyjä mittausparametreja paikalliseen MySQL-tietokantaan. Mittausohjelma hakee referenssilaitteistoa ohjaavan ohjaus-PC:n tietokannasta tarvittavan lämpötilatiedon mittauksesta. Mitta-PC on samassa lähiverkossa referenssinormaalia käyttävän ohjaus-PC:n kanssa.



Kuva 4. Mittausohjelman käyttöliittymä.

5. Mittaukset ja tulokset

5.1 Referenssilaitteisto

Mittauksissa käytettiin referenssilaitteistona VTT MIKES Kajaanin nestevirtauslaboratorion D500-laitteiston DN150-kokoista mittauslinjaa, jossa on referenssimittareina kaksi magneettista virtausmittaria (Endress+Hauser Promag W ja Krohne Optiflux 4000). Mittauslinjassa voidaan mitata tilavuusvirtauksia n. 170 l/s asti ja sen mittausepävarmuus on 0,3 %. Referenssilaitteiston mittaustuloksista tallennetaan mm. referenssimittareiden keräämät pulssit, virtaviestitieto 0,1 sekunnin välein sekä laitteiston lämpötila- ja painetiedot.

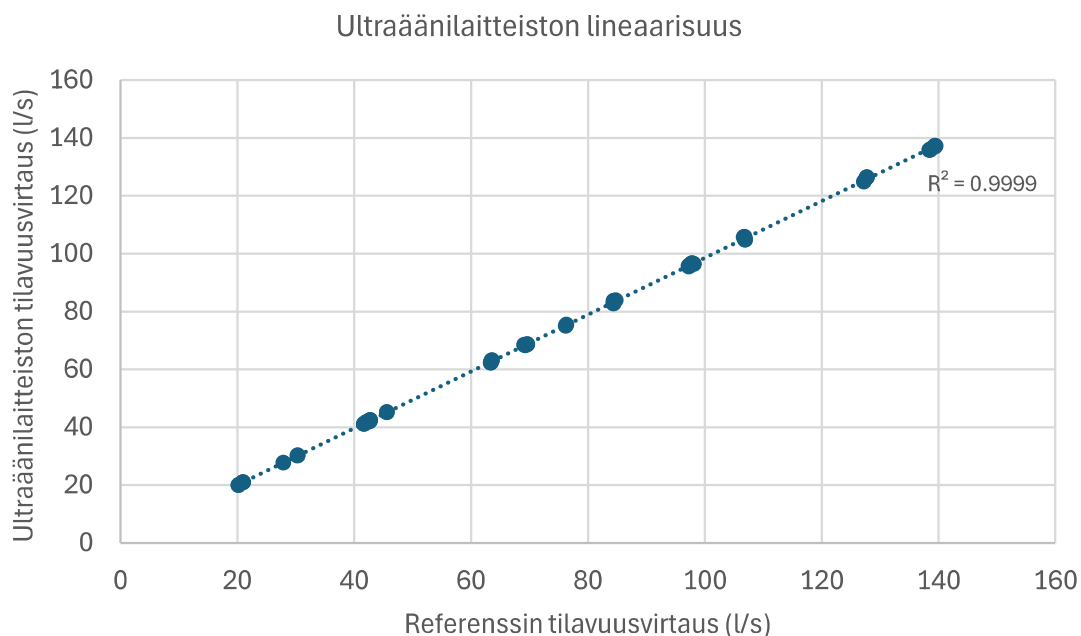
5.2 Täyden putken virtausmittaukset

Täyden, paineellisen putken mittaukset tehtiin kuudessa virtauspisteessä staattisella virtauksella putkikoossa DN150. Virtauspisteet olivat 20 l/s, 42 l/s, 63 l/s, 84 l/s, 106 l/s ja 127 l/s. Tilavuusvirtausarvot valittiin kyseisessä putkikoossa toteutuvan virtausnopeuden mukaan, jotka olivat vastaavasti noin 1 m/s, 2 m/s, 3 m/s, 4 m/s, 5 m/s ja 6 m/s.

Referenssilaitteistolla mitattiin 60 sekunnin ajan ja tulokset tallennettiin. Ultraäänilaitteiston ohjelmisto keskiarvoistaa mittaustulosta samalta ajalta. Ultraäänilaitteistolla otettiin mittauksissa talteen kaikki parametritiedot sekä mm. mitattu vaihe-ero, virtausnopeus ja tilavuusvirtaus. Mittaukset toistettiin kussakin virtauspisteessä viisi kertaa.

5.2.1 Tulokset

Ultraäänimittauslaitteiston tuottama vaihe-ero ja siitä laskettu tilavuusvirtaus on ollut hankkeen aikana tehdyissä mittauksissa hyvin lineaarinen suhteessa referenssilaitteiston tilavuusvirtaukseen. Kuvassa 5 on esitetty laitteiston päivityksen jälkeen tehtyjen mittausten lineaarisuus.

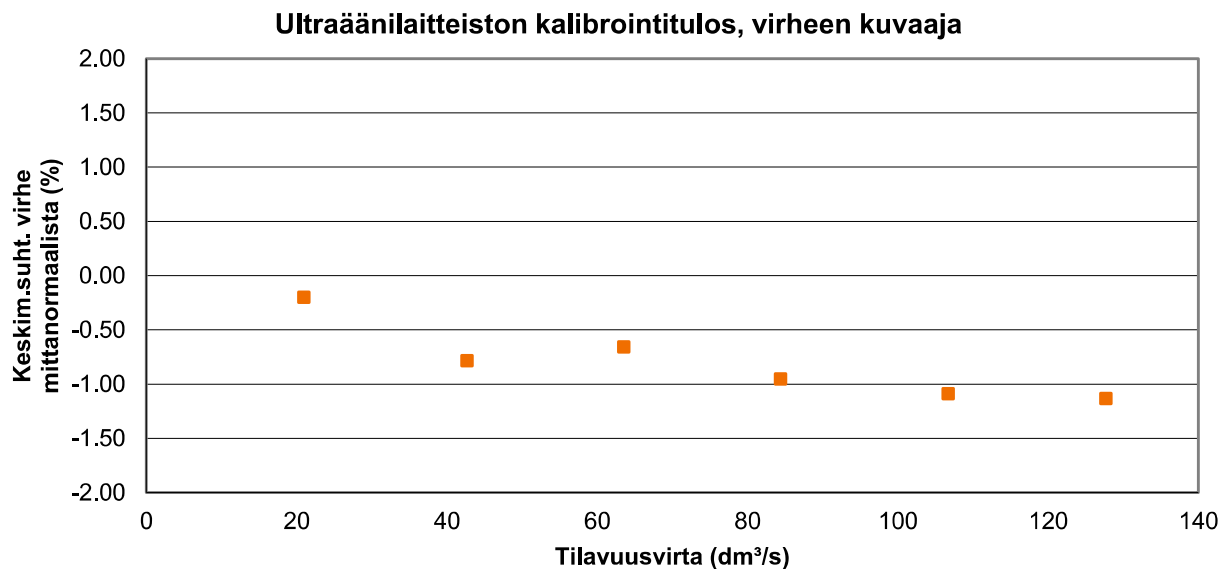


Kuva 5. Ultraäänilaitteiston lineaarisuus

Ultraäänilaitteisto kalibroitiin, jotta saatiin selville laitteiston mittausvirhe. Kalibrointi tehtiin VTT MIKESin D500-virtauslaitteistossa, jossa referenssinä oli Krohne DN150 magneettinen virtausmittari. Kalibrointi tehtiin työohjeen KLF1 mukaan soveltaen sitä tutkimuslaitteeseen. Kalibroinnin tulos on esitetty taulukossa 2 ja kuvassa 6. Kalibrointi suoritettiin vedellä kuudessa eri virtauspisteessä. Mittaukset toistettiin viisi kertaa kussakin pisteessä. Kalibroinnin aikana veden lämpötila on ollut noin 22 astetta.

Taulukko 2. Ultraäänilaitteiston kalibrointitulos

Tilavuusvirta, Mittanormaali Q_N (dm ³ /s)	Mittaus- aika t (s)	Tilavuusvirta, kalibroitava laite Q_T (dm ³ /s)	Suhteellinen virhe mittanormaalista $\Delta Q/Q_N$ (%)	Mittaustulosten keskihajonta s (%)	Kalibroinnin suhteellinen epävarmuus ($k = 2$) (%)
20,95	60,00	20,91	-0,21	0,15	0,42
42,70	60,00	42,36	-0,79	0,15	0,43
63,55	60,00	63,14	-0,66	0,06	0,32
84,41	60,00	83,60	-0,96	0,05	0,32
106,72	60,00	105,55	-1,09	0,08	0,34
127,68	60,00	126,23	-1,14	0,02	0,30

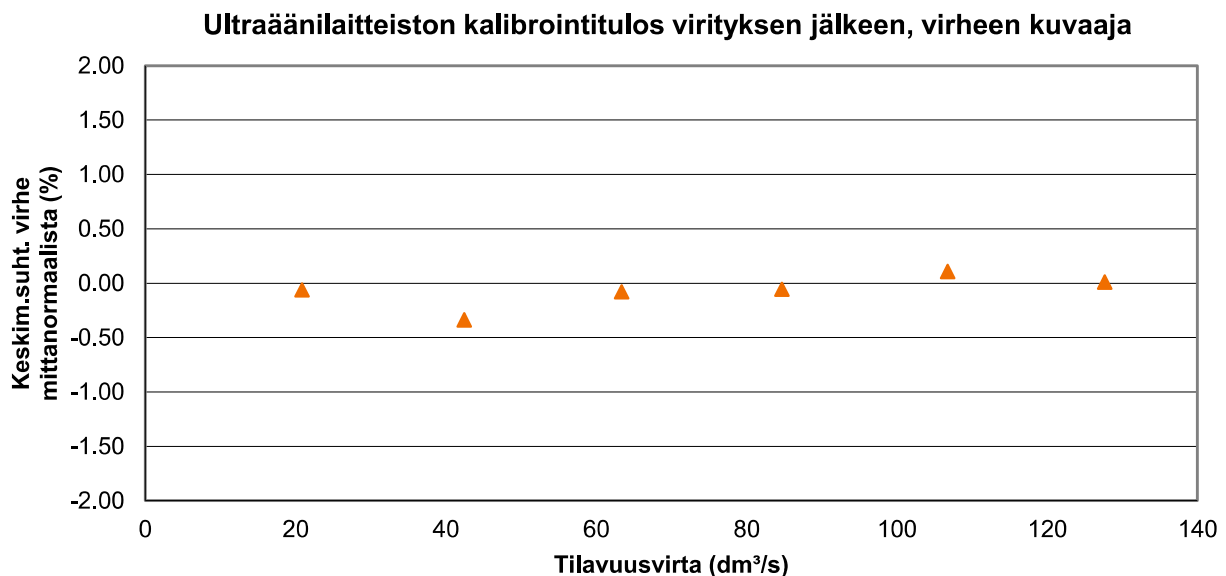


Kuva 6. Ultraäänilaitteiston kalibrointitulos

Kalibroinnin perusteella laitteisto voidaan virittää näyttämään oikein. Laitteistolle voidaan tehdä tässä vaiheessa laskennallinen viritys eli käyttää polynomisovitetta. Tämän jälkeen viritys tarkistetaan uudelleen kalibroinnilla, joka tehdään samalla tavalla kuin varsinainen kalibrointi. Tässä tapauksessa veden lämpötila on ollut noin 21 astetta. Virityksen jälkeisen kalibroinnin tulokset on esitetty taulukossa 3 ja kuvassa 7.

Taulukko 3. Ultraäänilaitteiston kalibrointitulos virityksen jälkeen

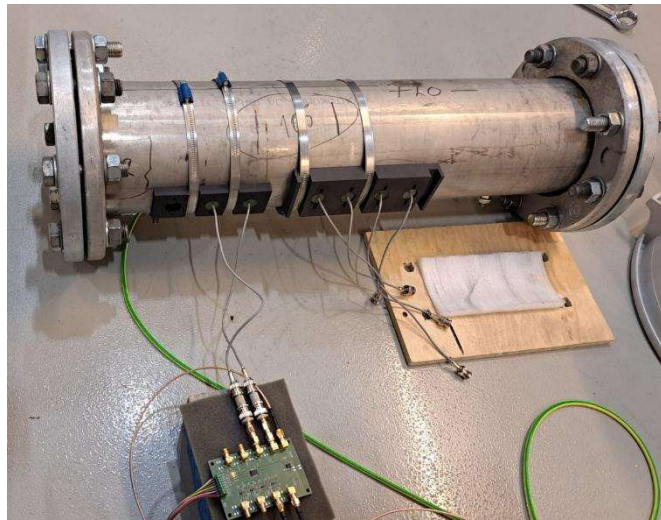
Tilavuusvirta, Mittanormaali Q_N (dm ³ /s)	Mittaus- aika t (s)	Tilavuusvirta, kalibroitava laite Q_T (dm ³ /s)	Suhteellinen virhe mittanormaalista $\Delta Q/Q_N$ (%)	Mittaustulosten keskihajonta s (%)	Kalibroinnin suhteellinen epävarmuus ($k = 2$) (%)
20,84	60,00	20,83	-0,06	0,11	0,38
42,58	60,00	42,44	-0,34	0,11	0,37
63,44	60,00	63,39	-0,08	0,12	0,39
84,73	60,00	84,68	-0,06	0,08	0,34
106,64	60,00	106,75	0,11	0,04	0,31
127,65	60,00	127,67	0,01	0,06	0,32



Kuva 7. Ultraäänilaitteiston kalibrointitulos virityksen jälkeen

5.3 Vajaatäytteisen putken testimittaukset

Vajaatäytteisen putken testimittauksissa tutkittiin ultraäänisignaalin käyttäytymistä vajaatäytteisessä putkessa ilman veden virtausta. Testimittaukset tehtiin kahdella erilaisella anturikiinnitysversiolla: sekä suunnatuilla että suuntaamattomilla antureilla. Ultraäänianturit kiinnitettiin DN150-kokoiseen ja noin 1 metrin mittaiseen putkeen. Putken päät suljettiin levyillä ja putki täytettiin vedellä täyttöasteen ollessa noin 63 %. Veden pinnan korkeus putkessa on tällöin n. 115 mm putken ollessa vaakasuorassa. Täyden putken mittaus tehtiin putken ollessa pystyssä, jolloin anturit näkivät putken täytenä, mutta ilman ylipainetta. Vajaan putken mittaukset tehtiin putken ollessa vaakatasossa. Mittauksia tehtiin putken eri kohdista pyörittämällä putkea. Kuvassa 8 vajaatäytteisen putken mittausjärjestely.

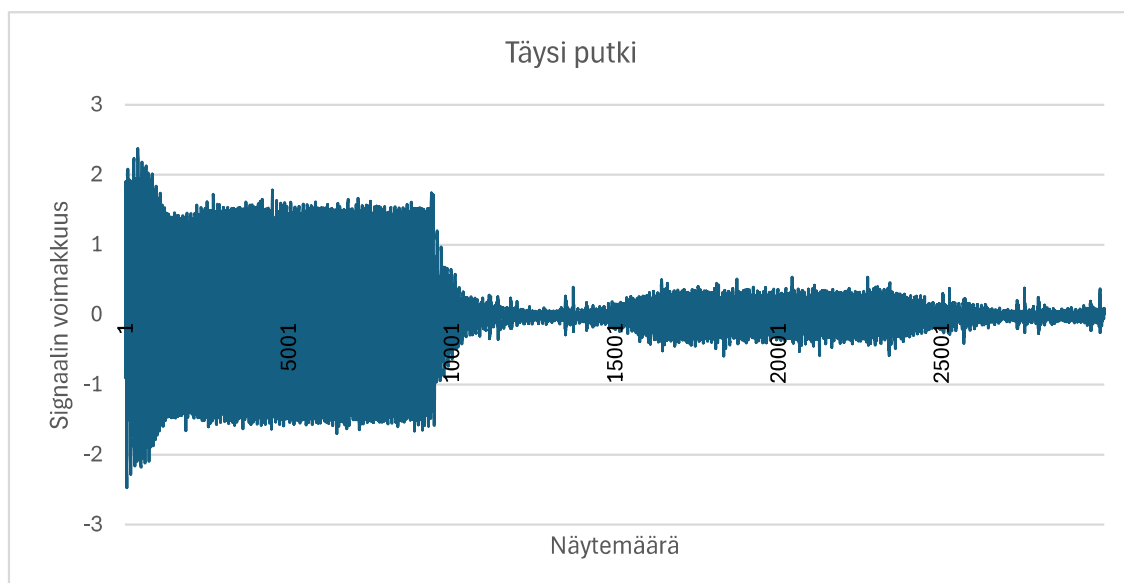


Kuva 8. Vajaatäytteisen putken testimittausjärjestely

Vajaatäytteisen putken tapauksessa on huomioitava, että putken sisällä on nyt metalli-ilma- sekä ilma-vesi-rajapintoja, jotka aiheuttava ultraäänelle erilaisia heijastumisia ja kuluaikaaeroja. Ultraäänen nopeus putkimateriaalissa on n. 3070 m/s, vedessä (20 °C) n. 1481 m/s ja ilmassa n. 340 m/s.

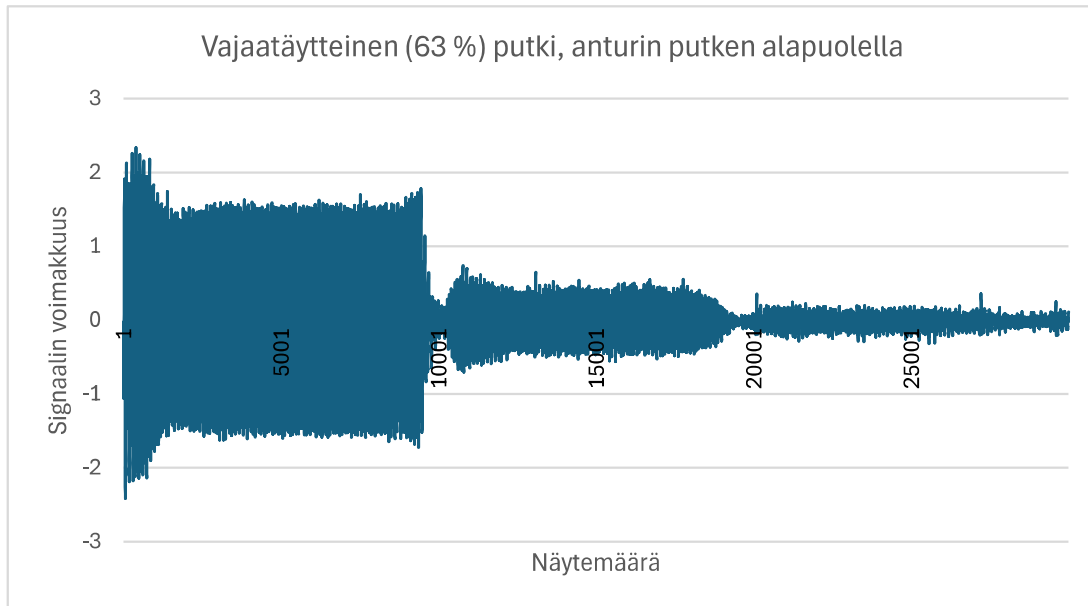
5.3.1 Tulokset

Tarkastellaan tuloksia aikatason signaalista. Kuvassa 9 on tyypillinen ultraäänisignaali aikatasossa kuvattuna, kun putki on täynnä vettä. Alkuosassa n. 10 000 (näytteeseen) saakka näkyy putken pintaa pitkin anturilta toiselle edennyt signaali selvästi voimakkaimpana. Näytteestä 10 000 lähtien on hetken hiljaista, jonka jälkeen saapuu putken sisällä nesteessä edennyt ja putken vastakkaiselta puolelta heijastunut signaali vastaanottimelle. Sekä putken pintaa pitkin että nesteessä edenneen signaalin pituus riippuu lähteen pituudesta, joka tässä mittauksessa oli 150 lähetettä. Kun putken täyttöaste on n. 63 % saadaan vastaanotettua hyvin erilaisia aikatason signaaleja riippuen siitä, mihin kohtaan putken ympärille anturit on asennettu (kuvat 10–11).

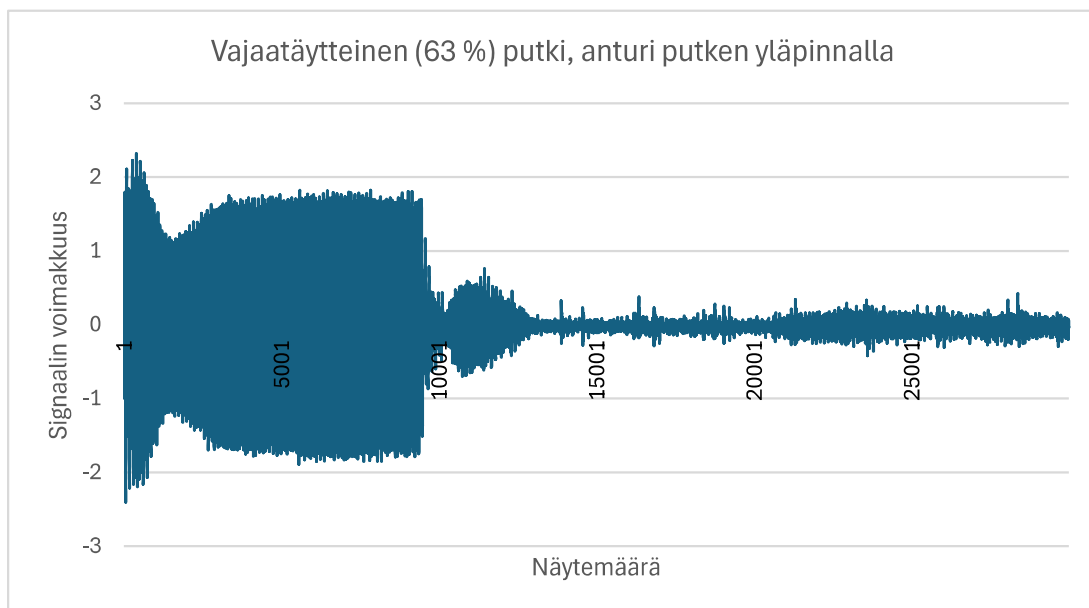


Kuva 9. Aikatason ultraäänisignaali täyden putken tapauksessa

Jos anturit asennetaan tässä tapauksessa keskelle putken sivulle, ultraäänen näkökulmasta putki on täynnä vettä ja tulos on samanlainen kuin täyden putken tapauksessa. Jos anturit on asennettu putken alapuolelle, aikatazon signaali on kuvan 10 mukainen. Kun anturit on asennettu putken yläpuolelle, aikatazon signaali on kuvan 11 mukainen. Ultraäänisignaali heijastuu nyt suurimmaksi osaksi ilman ja veden rajapinnasta ja signaalissa näkyy pintakaiun jälkeen kaiku, jonka pituus voisi olla verrannollinen veden pinnankorkeuteen putken sisällä.



Kuva 10. Aikatazon ultraäänisignaali, kun putken täyttöaste on 63 % ja anturit on asennettu putken alapuolelle.



Kuva 11. Aikatazon ultraäänisignaali, kun putken täyttöaste on 63 % ja anturit on asennettu putken yläpuolelle.

Kun anturit asennetaan 45 asteen kulmaan veden pintaan nähden joko ylä- tai alapuolelle, signaalia ei vastaanottimelle saada pintakaikua enempää. Tällöin ultraäänisignaali heijastuu ilman ja veden rajapinnasta eikä koskaan päädy vastaanottavalle anturille.

Tehdyissä testimittauksissa suunnatuilla antureilla ei saatu kunnollista ultraäänisignaalia vastaanottimelle johtuen siitä, että suuntauksella pyritään samaan signaalin heijastumiskohta tarkasti putken vastakkaiseen seinämään. Kun suunnattu signaali kohtaa putken sisällä vesi-ilma rajapinnan, signaali ei välttämättä päädy takaisin vastaanottimelle. Lisäksi veden pinnan heiluminen putken sisällä aiheuttaa ultraäänisignaaliin epävakautta. Vajaatäytteisen putken virtausmittaus voi edelleen olla mahdollista toteuttaa kyseisellä ultraäänimenetelmällä, mutta tässä tarvitaan lisätutkimuksia.

6. Tulosten tarkastelu

6.1 Epävarmuusanalyysi

Ultraäänivirtauslaitteistolle on tehty alustava mittausepävarmuusanalyysi, jossa on määritetty mittauksen suurimmat epävarmuuskomponentit, niiden suuruus ja vaikutus kokonaisepävarmuuteen sekä yhdistetty laajennettu epävarmuus.

Epävarmuusanalyysissä arvioidaan itse mittauksapahtumaa, jossa mitataan myötä- ja vastavirtaan edenneiden signaalien vaihe-eroa ja siitä johdettua tilavuusvirtaa. Malliyhtälö virtausnopeudelle v ja siitä edelleen tilavuusvirtaukselle Q täydessä, DN150-kokoisessa putkessa voidaan johtaa kaavasta (1). Tähän epävarmuuskomponenttiin vaikuttaa suurimmaksi osaksi vaihe-eromittauksen huojunta, jonka on mitattu olevan $\pm 0,3$ astetta.

Arvioon on lisäksi otettu mukaan ultraäänimittarin kalibroinnin sekä polynomisovitteiden aiheuttama epävarmuus sekä mittausten toistettavuuden ja uusittavuuden aiheuttama epävarmuus. Epävarmuusarvion komponentit ja niiden suuruudet ovat esitetty taulukossa 4. Uusittavuuden aiheuttamaa komponenttia ei ole vielä toistaiseksi mitaamalla määritetty, vaan sen on tässä arvioitu olevan suurempi kuin toistettavuuskomponentin.

Taulukko 4. Ultraäänimittauksen epävarmuuskomponentit

Epävarmuuskomponentti		Mittausepävarmuus %, $k = 1$	Lisätietoa
Ultraäänimittauksen tilavuusvirta	U_{mit}	0,13	Lasketaan vaihe-eromittauksesta
Ultraäänimittauksen toistettavuus	U_{toist}	0,26	Lasketaan mittaustuloksista
Ultraäänimittauksen uusittavuus	U_{uus}	0,36	Arvio tässä vaiheessa, tullaan laskemaan mittaustuloksista
Ultraäänimittauksen kalibrointi	U_{cal}	0,18	Kalibroinnin epävarmuus
Kalibroitamisovitteiden epävarmuus	U_{fit}	0,12	Polynomisovitteiden epävarmuus

Yhdistetty standardiepävarmuus lasketaan taulukon 4 arvoista neliöllisesti summaamalla ja tulokseksi saadaan 0,51 %. Laajennettu epävarmuus ($k = 2$) on 1,02 %, joka on hyvin lähellä kaupallisten ultraäänilaitteistoiden ilmoitettua epävarmuutta.

Epävarmuuskomponenteista suurimmaksi on arvioitu tässä vaiheessa mittausten toistettavuus ja uusittavuus. Varsinaisia mittauksia laitteistolla on tehty vielä vähän, joten näitä pystytään tarkentamaan tulevaisuudessa.

7. Johtopäätökset

Hankkeen aikana kävi ilmi, että ultraäänen vaihe-eromittaukseen perustuvaa ilmavirtausmittausta ei voi suoraan siirtää nestevirtauksen mittaukseen. Kaikkia ilmenneitä haasteita ei osattu huomioida hankkeen suunnitteluvaiheessa. Suurimmat ongelmat liittyivät mittauksen nollapisteen siirtymiseen ja myöhemmin voimakkaaseen lämpötilariippuvuuteen. Ilmenneet ongelmat ratkaistiin hankkeen aikana pääasiassa muuttamalla anturigeometriaa.

Täyden putken mittauksissa ultraäänilaitteisto kalibrointiin VTT MIKESin nestevirtauslaboratoriossa ja laitteistolle laadittiin mittausepävarmuusarvio, joka sisältää epävarmuuskomponenttien määrittämisen sekä arvion komponenttien suuruudesta. Mittausepävarmuusarvion perusteella laitteiston epävarmuus on noin 1,0 % ($k = 2$), joka on myös todettu mittauksilla. Mittausten uusittavuus määritetään hankkeen jälkeen. Täyden putken mittauksissa laitteistolla saavutettu suorituskkyky on verrattavissa kaupalliseen ultraäänimittariin.

Ilmenneiden haasteiden vuoksi vajaatäytteisen putken mittaukset jäivät kokeiluasteelle. Vajaatäytteisen putken tapauksessa haastavuutena tulee olemaan anturigeometria – jos anturit ovat suunnatut, ultraääni ei etene putken sisällä eikä vastaanottimelle saada signaalia. Vajaatäytteisen putken mittaukset vaativat lisätutkimuksia.

Eroavuutena perinteisiin ultraäänivirtausmittareihin hankkeessa kehitetyssä laitteistossa on kiinteä anturigeometria. Vaikka hankkeessa oli tutkimuskohteena vain DN150-kokoluokan putki, antureille on mahdollista tehdä mitoitus ja mekaaninen kiinnitys myös erikokoisille putkille. Pienillä asennusvaatimuksilla oleva mittari voisi soveltua erilaisiin mittaushaasteisiin helppokäyttöisyytensä vuoksi.

Toistaiseksi hankkeessa kehitetty laite on käytössä vain laboratorio-olosuhteissa. Siinä käytetyt ultraäänianturit ovat edullisia nappiantureita ja elektroniikka koostuu suurimmaksi osaksi kaupallisista laitteista. Tärkein laite on PC-ohjattu oskilloskooppi, jonka avulla ultraäänisignaali tuotetaan, vastaanotetaan ja näytetään. Mikäli oskilloskoopin toiminnan sekä muun ohjauselektroniikan ja ohjelmiston voisi toteuttaa yhteen laitteeseen sulautettuna järjestelmänä, olisi mahdollista saada aikaan erillinen ultraäänimittari.

Tutkimuksen pohjana ollut ilmavirtausmittaus oli toteutettu ultraäänisignaalien vaihe-eromittauksella ja tässä hankkeessa jatkettiin samalla linjalla. Laitteistolla on mahdollisuus mitata myös ultraäänen kulkuaikaan perustuen ja käyttäen datan käsittelyssä ristikorrelaatiomenetelmää. Tulevaisuudessa on tavoitteena tutkia vaihe-eromittauksella mahdollisesti saatavia hyötyjä kulkuaikamenetelmään verrattuna mm. signaalin näytteistykseen osalta sekä mahdollisuutta yhdistää molempia menetelmiä ja näin parantaa mittauksen laatua.

Lisäksi tullaan selvittämään, kuinka edullinen kyseinen ultraäänimittari mahdollisesti olisi ja voisiko useaa mittaria käyttäen luoda esimerkiksi vesijohtoverkostoihin edullisen anturiverkon, jolla voisi seurata verkoston virtausta putken ulkopuolelta ja useasta eri paikasta ja näin saada kattavampi käsitys vesijohtoverkoston kunnosta (mm. vuotojen paikannus).

Lähdeviitteet

- [1] Zarnstorff W. C., Castillo C. A. ja Crumpton C.W 1962: A Phase-Shift Ultrasonic Flowmeter. Ire Transactions on Bio-medical Electronics Vol. 9, Iss: 3, pp 199-203.
- [2] Meade M. L. 1983, e-edition 2013: Lock-in amplifiers: principles and applications. Peter Peregrinus Ltd, London, UK.