

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

1D-lämpötilajakauman mittaaminen valokuidulla HIPE- koelaitteiston vesisäiliössä

1D temperature distribution measuring in the HIPE test
facility water tank with fiber optic cable

Työn tarkastaja: TkT Elina Hujala

Työn ohjausryhmä: DI Joonas Telkkä, DI Lauri Pyy, DI Eetu Kotro,

Ins. Kimmo Tielinen ja DI Antti Räsänen

Lappeenranta 20.5.2020

Santeri Kinnunen

TIIVISTELMÄ

Opiskelijan nimi: Santeri Kinnunen

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyön ohjausryhmä: DI Joonas Telkkä, DI Lauri Pyy, DI Eetu Kotro,
Ins. Kimmo Tielinen ja DI Antti Räsänen

Kandidaatintyö 2020

40 sivua, 21 kuvaa, 2 taulukkoa ja 2 liitettä

Hakusanat: Valokuitu, 1D-lämpötilajakaumamittaus, HIPE-koelaitteisto

Tässä työssä valokuidulla mitataan 1D-lämpötilajakaumaa sekä kerrotaan mihin valokuitumittaustapa perustuu ja kuinka se toimii. Työssä tehdään kokeellisia jatkomittauksia Joonas Telkän LUT-yliopiston ydintekniikan laboratoriossa tekemille PASI-valokuitumittauksille. Työn mittausten tavoitteena on tutkia, kuinka tarkasti valokuidulla voidaan mitata lämpötilaa verrattuna termoelementteihin. Työssä määritetään myös kokeellisesti, kuinka teräskapillaariputkeen asetetun valokuidun mutkat vaikuttavat mittaustarkkuuteen, kun valokuitu ei pääse laajenemaan vapaasti.

Tässä työssä LUT-yliopiston ydintekniikan laboratoriossa HIPE-koelaitteistossa tehtyjen kokeiden mittaustulokset antoivat paljon toisistaan poikkeavia tuloksia, riippuen valokuidun asennosta. Valokuitujen mittaamat lämpötilat vaihtelevat riippuen siitä, kuinka syvällä vedessä ne ovat, vaikka referenssimittauksena käytetyt termoelementit mittasivat tasaista lämpötilaa. Valokuidun taittaminen mutkille ei antanut nähtävillä olevaa tulosta siitä, että se vaikuttaisi lämpötilamittaukseen. Kuitenkin mittauksiin tulee virhettä eri tekijöistä, kuten valokuidun tärinästä. Valokuitumittauksen tarkkuus mittausten perusteella näyttää olevan noin kolmen asteen luokkaa, mutta valokuitumittaus eroaa termoelementtimittauksista jopa enemmän. Vaikuttaisi siltä, ettei valokuidulla pysty mittaamaan lämpötilaa yhtä tarkasti kuin esimerkiksi termoelementeillä.

Työssä pyritään antamaan lähtökohta siihen, miten valokuidulla kannattaa mitata lämpötilaa ja millaisiin mittausvirheisiin tulee varautua. Valokuitumittausta voisi testata tulevaisuudessa esimerkiksi säiliössä, jonka lämpötilaa nostetaan ja samalla mitataan lämpötilaa suoralla valokuidulla ja termoelementeillä, kuten aiemmissa PASI-mittauksissa. Tällöin voitaisiin saada lisää tietoa siitä, miksi PASI-mittauksissa tulokset vaihtelivat niin suuresti.

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä

Sisällysluettelo

Lyhenneluettelo	4
1 Johdanto	5
2 Lämpötilajakauman mittaaminen valokuidulla	7
2.1 Fysikaaliset ilmiöt ja valokuitu mittaustavat.....	7
2.2 Työssä käytetty mittalaitteisto.....	10
2.3 Rajoitteet valokuitumittauksissa.....	11
3 Sovellukset	13
4 Mittausjärjestelyt	15
4.1 PASIn mittausjärjestely ja mittaukset	15
4.2 Mittausjärjestelyt ja -laitteisto HIPEssä	16
4.2.1 Kolmen valokuidun mittaukset	18
4.2.2 Usean mutkan valokuitumittaukset.....	21
5 Mittaustulokset	23
5.1 Kolmen valokuidun mittaus	24
5.1.1 Ensimmäinen mittaus kuumalla ja kylmällä vedellä.....	24
5.1.2 Uusi mittaus kylmällä ja kuumalla vedellä	29
5.2 Usean mutkan valokuitumittaus	33
5.3 Tulosten analysointi	35
6 Yhteenveto	39
Lähdeluettelo	41
Liite 1. Mittaustekniikkojen ominaisuuksia	
Liite 2. Mittaustulosten keskiarvolämpötila kuvaajat	

LYHENNELUETTELO

BOTDA	Brillouin Optical Time-Domain Analysis
BOTDR	Brillouin Optical Time-Domain Reflectometry
COTDR	Coherent Optical Time-Domain Reflectometer
DAS	Distributed Acoustic Sensing
FBG	Fiber Bragg Gratings
HIPE	Horizontal and Inclined Pipe flow Experiments
OFDR	Optical Frequency-Domain Reflectometry
OTDR	Optical Time-Domain Reflectometry
POTDR	Polarization Optical Time-Domain Reflectometry

1 JOHDANTO

Tässä työssä tehdään kokeellisia mittauksia valokuidulla LUT-yliopiston ydintekniikan laboratoriossa HIPE-koelaitteistossa (Horizontal and Inclined Pipe flow Experiments). Mittauksia tehdään eri pituisilla ja eri asennoissa olevilla valokuiduilla. Valokuidulla on mahdollista mitata venymää ja lämpötilaa sekä myös hieman harvinaisemmin käytettyä värähtelyä erilaisissa sovelluksissa. Tässä työssä käsitellään ainoastaan lämpötilan mittaamista valokuidulla. Työssä käydään aluksi läpi, mihin mittaustapa perustuu, kuinka se toimii sekä millaisen mittalaitteiston siihen tarvitsee. Lisäksi käydään läpi rajoitteita, joita valokuidulla mitattaessa tulee huomioida sekä sovelluksia, joissa mittaustekniikkaa on jo aiemmin käytetty. Työssä suunnitellaan kaksi eri mittaussovellusta ja mitataan niillä 1D-lämpötilajakaumat. Mittauksilla pyritään saamaan tuloksia, joista selviäisi, mitä rajoitteita valokuitumittauksella on sekä miten mutkat vaikuttavat mittaustuloksiin.

Valokuitumittaus perustuu valon sirontaan. Valokuituun ammutaan laservaloa ja osa siitä siroaa valokuidussa takaisinpäin. Takaisinsironta voi olla Rayleigh-, Brillouin- tai Raman-sirontaa. Sironnasta pystytään tulkitsemaan valokuidussa tapahtuvia muutoksia, kuten lämpötilan muutosta tai venymää. Lähtökohtaisesti lämpötilaa mitattaessa valokuidulla mitataan lämpötilan muutosta jo valmiiksi tunnetusta lämpötilasta. Tässä työssä lähtöarvona sekä vertailulämpötiloina on pidetty termoelementtien mittaamia lämpötiloja.

Suurin kiinnostuksen kohde työssä on saada tuloksia mittausten avulla siitä, kuinka valokuidussa olevat mutkat vaikuttavat mittaustulosten tarkkuuteen. Myös valokuitumittauksen toimintatavan selvittäminen on keskeisessä osassa työtä, jotta valokuidun toimintaa pystyy ymmärtämään paremmin. Tämä työ on tehty osana kansallisen ydinturvallisuustutkimusohjelman SAFIR2022 (The Finnish Research Programme on Nuclear Power Plant Safety 2019-2022) IDEAL-projektia (Infrastructure development at LUT safety research laboratory), jonka tavoitteena on kehittää ja ylläpitää kokeellista termohydrauliikan tutkimusinfrastruktuuria LUT-yliopiston ydinturvallisuustutkimuslaboratoriossa. IDEAL-projektin yhtenä tavoitteena on

edistyksellisten mittausmenetelmien hankinta, käyttöönotto ja kehitys. Tämän työn lähtökohtana on LUT-yliopiston ydintekniikan tutkimuslaboratoriossa tehty ensimmäinen valokuitumittaus liittyen IDEAL-projektiin. Kyseisessä ensimmäisessä lämpötilamittauksessa lämpötilat erosivat suuresti termoelementtimittauksiin verrattuna. Tästä heräsi useita kysymyksiä siitä, mistä nämä virheet johtuivat. Tämän takia mittauksia haluttiin yksinkertaistaa ja tehdä useampia mittauksia, joiden perusteella voidaan tutkia, mistä mahdolliset erot valokuitu- ja termoelementtimittausten välillä johtuivat.

Tämän työn mittausjärjestelyissä käytetään HIPE-koelaitteiston vesisäiliötä, johon saadaan tehtyä isotermiset olosuhteet laskemalla vesi säiliön pohjalle, jolloin lämpötila tasoittuu hyvin. Tällöin valokuitumittauksen pitäisi pystyä näyttämään tasaista lämpötilaa koko valokuidun pituudelta. Mittauksia tehdään kahdella eri koejärjestelyllä, joista ensimmäisessä on käytössä kolme eri valokuitua: suora valokuitu sekä yhden U-mutkan ja kahden U-mutkan valokuidut. Toisessa mittauksessa käytetään yhtä pitkää valokuitua, joka taitetaan kuudelle U-mutkalle. Tässä työssä tehdään yhteensä kuusi mittausta, ensimmäisellä koejärjestelyllä neljä ja toisella kaksi mittausta. Mittauksissa oli käytettävissä yhden, kahden ja viiden metrin pituisia valokuituja, mutta tämän työn mittauksissa käytetään vain viiden metrin pituisia valokuituja. Valokuidun loppupäästä käytetään vain tarvittavan pituinen osa ja ylimääräinen valokuitu jätetään säilytyskelalle. Mittauksissa on käytössä Luna ODiSI 6100 -laitteisto, joka käyttää OFDR:ää eli optisen taajuusalueen reflektiometriä (Optical Frequency-Domain Reflectometry) venymän ja lämpötilan mittaamisessa. OFDR-mittaus perustuu Rayleigh-sirontaan. Mittaustuloksista tehdään havainnollistavia kuvaajia, joista nähdään, millä tavalla lämpötilat vaihtelevat valokuidun eri kohdissa.

2 LÄMPÖTILAJAKAUMAN MITTAAMINEN VALOKUIDULLA

Tässä luvussa käydään läpi valokuidussa tapahtuvia fysikaalisia ilmiöitä sekä sitä, kuinka valokuidulla voidaan mitata lämpötilaa ja mihin mittaustapa perustuu. Luvussa esitetään myös työssä käytetty mittalaitteisto sekä rajoitteita, jotka tulee huomioida valokuidulla mitattaessa.

2.1 Fysikaaliset ilmiöt ja valokuitu mittaustavat

Lämpötilajakauman mittaaminen valokuidulla perustuu laservalon sirontaan. Valokuidussa tapahtuvaa takaisinsirontaa pystytään analysoimaan, kun ymmärretään, millä tavalla laservalo siroaa valokuidussa. Tällä hetkellä on saatavilla useita eri tapoja mitata lämpötilaa valokuidulla. Eri tekniikat perustuvat Rayleigh-, Brillouin- ja Raman-sirontoihin. (Gifford et al. 2005.)

Yksi valokuitumittaustapa on niin kutsuttu FBG (Fiber Bragg Gratings), jossa valokuituun tehdään Braggin hiloja. Tällöin valokuidun ytimeen tehdään valmistusvaiheessa ohuita hiloja, joista valoa heijastuu takaisinpäin hilaa vastaavalla aallonpituudella. Hilat sijoitetaan tasaisin välein valokuidun ytimeen. Valokuidun lämpötilan tai venymän muutos muuttaa hilojen taitekerrointa, jolloin hilasta siroavan valon aallonpituus muuttuu. Tämän muutoksen perusteella voidaan selvittää valokuidun venymän tai lämpötilan muutos ja verrata sitä jo tiedettyihin lähtöarvoihin. (Ounoufriou et al. 2013, 2-5.)

Kun laservaloa ammutaan valokuituun, osa valosta siroaa takaisin Rayleigh-, Brillouin- ja Raman-sirontana. Jos valokuidun lämpötila tai venymä muuttuu, se aiheuttaa siroavaan valoon muutoksen. Muutoksen avulla pystytään laskemaan muuttunut lämpötila tai venymä. Lämpötilan tai venymän paikkatieto saadaan laskettua valonnopeuden aikaviiveen avulla. Tätä paikkatiedon tarkkuutta kutsutaan tilalliseksi resoluutioksi. (Bao & Chen 2012, 3.)

Laservalopulssin leveydellä määritettyä tilallista resoluutiota käytetään yleisesti Rayleigh-, Brillouin- tai Raman-sirontaan perustuvassa OTDR-valokuitumittaustavassa (Optical Time-Domain Reflectometry). Jos OTDR-mittaustavalla yritetään mitata suurella tilallisella resoluutiolla, kaistanleveys mittalaitteistossa tulisi olla kymmenien gigahertsien luokkaa, jolloin mittalaitteisto olisi erittäin kallis ja monimutkainen. (Bao & Chen 2012, 4, 18.)

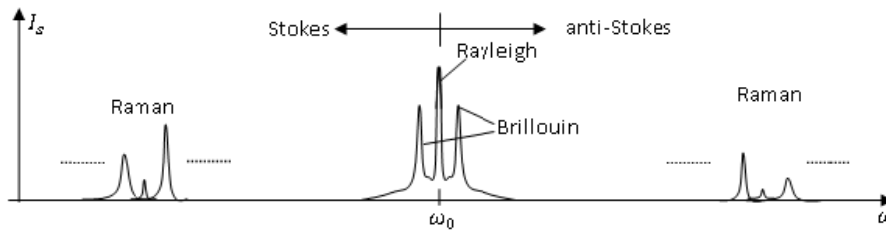
Valokuitumittaus voidaan toteuttaa myös valon taajuuteen perustuvalla OFDR-valokuitumittaustavalla, jossa käytetään yleisesti Rayleigh- tai Raman-sirontaa. Tekniikassa käytetään laseria, jonka valontaajuutta voidaan muuttaa ja skannata haluttu taajuusalue. Skannatusta taajuusalueesta voidaan Fourier-muunnoksen avulla saavuttaa jopa alle millimetrin tilallinen resoluutio. Tilallinen resoluutio riippuu käytettävissä olevan laservalon taajuudesta. Suuremmalla laservalon taajuudella tilallista resoluutiota saadaan lyhyemmäksi. Laservalon koherentti pituus kuitenkin rajoittaa mitattavan valokuidun pituutta alle 100 metriin. (Bao & Chen 2012, 4.) Rayleigh-sironta on itsessään riippumaton lämpötilasta ja rasituksesta. OFDR-mittaustapa perustuu siihen, että valokuidun lämpötilan tai venymän muuttuessa myös valokuidun mittauspituus muuttuu. Muuttunutta pituutta voidaan verrata paikallisoskillaattorin kiinteään referenssipituuteen interferometrissä, jolloin saadaan vaihe-erot indeksivaihtelun kautta. Eli mittaustavassa mitataan aluksi Rayleigh-sironta ja käytetään sitä referenssinä muuttuneen valokuidun Rayleigh-sirontaan. Valokuidun mittauspituus muuttuu, kun lämpötila muuttuu, jolloin myös Rayleigh-sironta muuttuu. (Bao & Chen 2012, 18-19.) Tässä työssä käytettävä Luna ODiSI 6100 -mittalaitteisto käyttää edellä kuvattua OFDR-mittaustapaa (Luna Innovation Inc. 2018).

Valokuitu on epähomogeeninen, joten sirontaa syntyy mikro- tai makroskooppisista vaihteluista valokuidun materiaalin tiheydessä, koostumuksessa tai rakenteessa. Molekyylien satunnainen järjestys aiheuttaa tiheysvaihteluita valokuidussa ja siten vaikuttaa taitekertoimeen. Nämä aiheuttavat Rayleigh-sirontaa. (Bao & Chen 2012, 5.)

Brillouin-sirontaan vaikuttaa vastakkaisiin suuntiin liikkuvien ääniaaltojen sironta (Bao & Chen 2012, 8). Isoille lämpötila- ja venymävaihteluille Brillouin-sirontaan perustuva OTDR-mittaustapa on parempi, koska se käyttää Brillouin-piikin taajuussiirtoa lämpötilan tai venymän mittaamiseen. Se perustuu tiheyden vaihtelun aiheuttamaan äänennopeuden muutokseen. Lisäksi Brillouin-sirontaa käyttävät OTDR-mittausjärjestelmät voivat saavuttaa yli 100 kilometrin mittauspituuden. (Bao & Chen 2012, 21.)

Raman-sironta syntyy valokuidussa tapahtuvien molekyylien värähtelystä (Bao & Chen 2012, 5). Raman-sirontaan perustuvalla OTDR-valokuitumittauksella suurin tilallinen resoluutio, joka voidaan saavuttaa, on 0,24 metriä, valokuidun pituudella 135 metriä ja lämpötilaresoluutiolla 2,5 °C. Rajoitteet johtuvat heikosta Raman-sironnasta. (Bao & Chen 2012, 13.) Raman-sironnan spektri on terahertsien luokkaa, kun taas Brillouin-sironnan spektri on megahertsien luokkaa. Tästä syystä Brillouin-sirontaa käyttävät mittalaitteet mittaavat taajuusmuutosta ja Raman-sirontaa käyttävät mittalaitteet mittaavat laservalon tehoa laajalla taajuusalueella. (Bao & Chen 2012, 21-22.) Liitteessä 1 on esitetty taulukko, johon on koottu eri mittaustapojen ominaisuuksia (Bao & Chen 2012, 31).

Kuvassa 1 on esitetty luonnollinen sirontaspektri kiinteälle aineelle. Kun valokuituun ammutaan tietyn taajuista laservaloa, Rayleigh-sironnan taajuus pysyy samana, kuin valokuituun lähetetyn valon taajuus. Tämä johtuu siitä, että valokuituun ei siirry energiaa. Rayleigh-sirontaa kutsutaankin siksi elastiseksi sironnaksi. Sen sijaan Brillouin- ja Raman-sironnan taajuudet muuttuvat joko pienemmiksi (Stokes) tai suuremmiksi (anti-Stokes). Brillouin- ja Raman-sironnoissa energiaa siirtyy valokuituun, eli myös taajuus muuttuu. Siksi niitä kutsutaan epäelastisiksi sironnoiksi. (Bao & Chen 2012, 5-6.)



Kuva 1. Luonnollinen sirontaspektri kiinteälle aineelle (Bao & Chen 2012, 6).

Kuvassa 1 tulee huomioida, että sirontaspektri on esitetty taajuuden funktiona. Joissakin lähteissä sirontaspektri on esitetty aallonpituuden funktiona, jolloin Stokes ja anti-Stokes alueet kääntyvät toisinpäin, koska taajuuden kasvaessa aallon pituus pienenee. Valolle voidaan olettaa vakionopeus. Kuvasta 1 huomataan myös, että Raman-sironnan intensiteetti on pienempi kuin Rayleigh- ja Brillouin-sirontojen.

OTDR- ja OFDR-mittaustekniikoista on kehitetty myös uudenlaisia mittaustekniikoita, joita ovat COTDR (Coherent Optical Time-Domain Reflectometry), POTDR (Polarization Optical Time-Domain Reflectometry), BOTDR (Brillouin Optical Time-Domain Reflectometry) ja BOTDA (Brillouin Optical Time-Domain Analysis) (Bao & Chen 2012, 2-3). Tässä työssä näihin muihin mittaustekniikoihin ei ole kuitenkaan perehdytty enempää.

2.2 Työssä käytetty mittalaitteisto

Tässä työssä on käytetty Luna ODiSI 6100 -mittalaitteistoa, joka käyttää Rayleigh-sirontaan perustuvaa OFDR-mittaustapaa (Luna Innovation Inc. 2018). Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että valokuituun on ammuttu laserpulssia, jonka aallonpituus on suuri, jolloin saavutetaan pieni tilallinen resoluutio, mikä on ominaista tälle mittaustavalle. Tässä työssä käytettiin 0,65 mm:n tilallista resoluutiota, mutta mittalaitteella olisi voinut mitata myös 1,3 ja 2,6 mm:n tilallisella resoluutiolla. Tällä kyseisellä mittaustavalla suurin mittauspituus rajoittuu noin 35 metrin pituiseen valokuituun (Bao & Chen 2012, 31). Mittaustaajuus kyseisellä laitteella ja käytetyllä

tilallisella resoluutiolla on 40 Hz. Kuvassa 2 on esitetty käytetty mittalaitteisto. Mittaustulokset pystytään tallentamaan Luna ODiSI- ohjelmalla.



Kuva 2. Mittauksissa käytetty mittalaitteisto. Alimmaisena on mittauslaite, keskellä on kolmen eri valokuidun jatkokuidut ja niiden päällä jatkokuidun muuntomoduuli.

2.3 Rajoitteet valokuitumittauksissa

Valokuitumittauksille tulee vastaan useita rajoitteita, mutta suurinta osaa niiden vaikutuksista pystytään pienentämään tai jopa poistamaan kokonaan oikeanlaisella valokuidun asettelulla. Kosteus pystyy vaikuttamaan joihinkin valokuituihin, mutta sen vaikutus voidaan poistaa esimerkiksi asettamalla valokuitu muoviseen kapillaariputkeen. Samalla tavalla toimii myös teräsputki, joka myös suojaa ja tukee valokuitua rakenteellisesti. Kapillaariputkien ja teräsputkien käyttö kuitenkin hidastaa lämpötilan muutoksen nopeutta, mutta nostavat valokuidun lämmönkestoa. Valokuidun värähtely

vaikuttaa myös Raman-sirontaan, joten ilman minkäänlaista tukemista valokuitu saattaa heilua ja siten synnyttää suuremman kohinan tuloksiin. (Lomperski et al. 2016, 3.)

Mittausten toistettavuuteen vaikuttaa Lisowskin (2015) kokeiden perusteella valokuidun päällyste. Lisowskin mittauksissa oli käytössä polyimidi-, kulta- ja CuBall kupariseos -päällysteisiä valokuituja sekä paljaita valokuituja. Kokeiden perusteella mitausten toistettavuuden havaittiin olevan suhteellisen vakaa. Kokeista havaittiin myös, että kun päällystetty valokuitu altistettiin ensimmäisen kerran kuumalle, se ”hehkuttui”, jolloin päällysteen jäännösjännite pieneni. Tällöin myös toistettavuus vaikutti parantuneen, kunhan käyttölämpötila ei ylittänyt tätä hehkutuslämpötilaa. Paljaalla valokuidulla kyseistä hehkutusilmiötä ei havaittu, vaan mitaustulokset pysyivät vakaina. (Lisowski et al. 2015, 6.)

Dynaamiset virheet, kuten sensorin heiluminen ja värähtely ovat yksi suurimpia ongelmia valokuitumittauksissa. Käytössä on usein pitkiä valokuituja, jolloin myös valokuidun värähtelyä on hankalaa estää. Tämä rajoittaa usein pitkien antureiden käyttöä. Dynaamisia virheitä pystytään kuitenkin vähentämään lyhentämällä sensoria, pidentämällä mittausresoluutiota (gage length) tai tukemalla sensoria esimerkiksi teräsputkella. Staattinen virhe, eli venymä aiheuttaa mitausten suunnittelussa ongelmia, jopa silloin kun valokuitu on asennettu teräskapillaariputkeen. Esimerkiksi jos teräskapillaariputkea lämmitetään, voi sen lämpölaajeneminen vaikuttaa valokuituun. (Lomperski et al. 2017, 208.)

Valokuitumittauksessa taaraus täytyy suorittaa paikan päällä asennuksen ja valokuidun käsittelyn jälkeen, jotta valokuidun liike ja staattiset jännitykset eivät vaikuta mittauksen tarkkuuteen ja häiriön suuruuteen (Lomperski et al. 2016, 2). Taarauksella tarkoitetaan lämpötilanäyttämän tasoittamista samaksi esimerkiksi termoelementin kanssa. Valokuidun taaraus voidaan tehdä yhdelläkin termoelementillä, mutta silloin yksi piste antaa alkuarvon koko valokuidun pituudelle. Taarauksen tarkkuuta voi tietenkin parantaa lisäämällä termoelementtien määrää, mutta se ei poista kokonaan valokuitu- ja termoelementtimittausten eroa. (Lomperski et al. 2017, 208-209.)

3 SOVELLUKSET

Valokuitu lämpötilamittaustekniikkaa käytetään sovelluksissa, joissa halutaan mitata lämpötilanmuutoksia lyhyillä tai pitkillä matkoilla. Kuitenkin siten, ettei tarkkuudella välttämättä ole suurta merkitystä, vaan mittausten mielenkiinto on mahdollisissa lämpötilavaihteluissa. Tällöin pystytään toteamaan esimerkiksi vuotoja, vikoja, paloturvallisuusriskejä tai tulipaloja. Lisäksi mielenkiintoisia sovelluskohteita ovat 2D- ja 3D-lämpötilajakaumien muodostaminen sekä ydintekniikassa käytetyt sovellukset.

Rayleigh-sirontaan perustuvaa valokuitumittausta on käytetty polttokattilan lämpötilanmittaamiseen 850 °C:seen asti, nestemäisen heliumin lämpötilanmittaamiseen -268,15 °C:seen asti sekä tasoanturina nestemäisessä natriumissa. (Lomperski et al. 2016, 2.) Öljylähteiden lämpötilanmittauksessa on käytetty Rayleigh-sirontaan perustuvaa OTDR-valokuitumittaustekniikkaa, joka mahdollistaa pitkien matkojen mittauksen pidemmällä tilallisella resoluutiolla. Yleensä lämpötiloja ei ole kuitenkaan tarpeellista mitata hyvällä tarkkuudella, vaan niitä verrataan aikaisemmin mitattuihin öljylähteen lämpötiloihin. Öljylähteissä valokuitua käytetään yleisimmin vuotojen havaitsemiseen. (Smolen & Spek 2003, 28-29.)

Virtakaapeleiden lämpötilan mittaamiseen valokuituja on käytetty useissa eri sovelluksissa. Mahdollisia sovelluskohteita ovat esimerkiksi maakaapelit ja meren pohjaan asennettavat kaapelit, kuten Tanskan ja Norjan välille merenpohjaan asennettu virtakaapeli. Tähän virtakaapeliin on asennettu myös DAS-valokuitu (Distributed Acoustic Sensing). (Erdmann et al. 2019, 1-6.) DAS-mittaustekniikkaa perustuu COTDR-mittaustekniikkaan (Liehr et al. 2018). Virtakaapeleihin asennetuilla valokuiduilla pystytään tarkkailemaan mahdollisia vikoja reaaliajassa sekä mahdollisesti säätämään kaapeleiden kapasiteettia lämpötilan mukaan. Tekniikkaa voidaan hyödyntää yksinkertaisissa sähkösiirtoverkoissa. Cho'n (2014) tutkimuksessa kehitettiin ja testattiin maanalaisen jakelujärjestelmän älykästä kaapelinvalvontajärjestelmää. Tämä kyseinen kaapelinvalvontajärjestelmä on tarkoitus ottaa käyttöön todellisessa maanalaisessa sähkönjakeluverkossa. (Cho et al. 2014.)

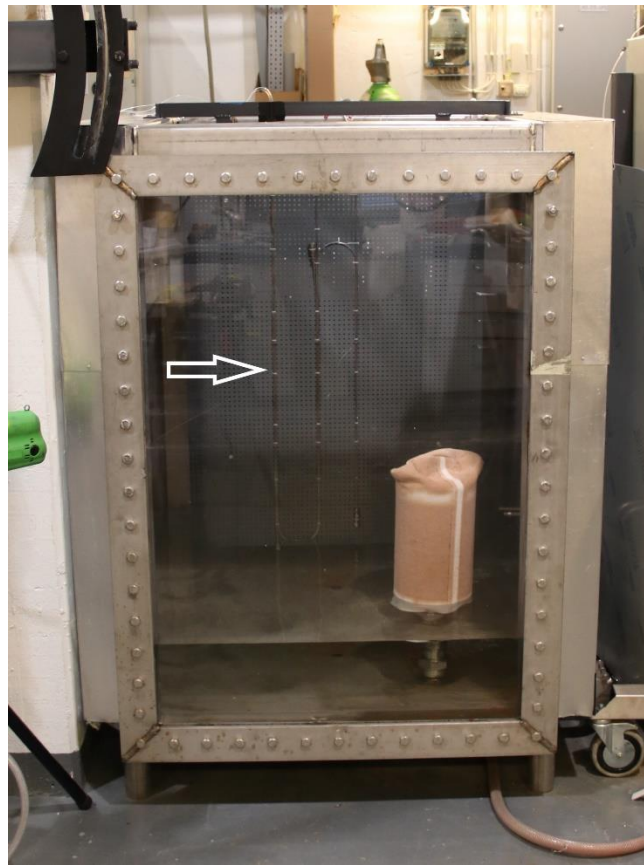
Putkilinjoissa valokuitua käytetään venymän ja lämpötilanmittaamiseen. Kumpikin mittausta antaa tärkeää tietoa putkilinjan kunnosta ja mahdollisista vuotokohdista. Oikeanlaisella tekniikalla Brillouin- ja Raman-sirontoihin perustuvalla valokuitumittauksella on mahdollista mitata ja tarkkailla 60-300 kilometrin pituisia putkilinjoja käytön aikana. Esimerkiksi Italiassa vanhaan kaasuputkeen asennettiin kolme eri valokuitua mittaamaan lämpötilaa ja venymää. Mittaustuloksista on havaittavissa lämpötilapoikkeama kohdalla, jota jäähdytettiin hiilidioksidilla. (Inaudi, Glisic 2007.)

2D-lämpötilajakaumien muodostamisessa valokuidun käyttämisestä voi olla hyötyä, sillä se mahdollistaa useiden tuhansien mittapisteiden samanaikaisen mittaamisen, kestää hyvin lämpöä ja toimii myös läpinäkyvissä nesteissä ja kaasuissa (Lomperski et al. 2016, 2). Lomperski työryhmineen on kokeillut myös 3D-lämpötilajakaumien muodostamista valokuidulla. Tätä testattiin putkinipuilla, mutta todettiin, että 3D-lämpötilajakauman muodostaminen on haastavaa, sillä valokuitua on haastavaa tukea siten, ettei se alkaisi värähtelemään ilmavirrassa. Tässä tulee vastaan hyvin helposti valokuitujen rajoitteet, kuten dynaamiset ja staattiset virheet. (Lomperski et al. 2017.)

Ydintekniikassa valokuitumittaustekniikasta on kiinnostuttu erityisesti reaktorisuojarakennuksien, ydinjätevarastojen ja reaktorien primääripiirien tarkkailemisen parantamiseksi. Suurin ongelma ydintekniikassa on ionisoiva säteily, joka aiheuttaa valokuidun vaimennuksen lisääntymistä. (Fernandez et al. 2006, 3.) Tätä ongelmaa voidaan kuitenkin korjata kahdella erilaisella menetelmällä. Ensimmäinen korjausmenetelmä perustuu valokuidun viereen sijoitettujen termoelementtien mittaamiin lämpötiloihin. Tämä menetelmä vaatii kuitenkin lähestulkoon tasaisen säteilyannoksen ja lämpötilan. Toinen tapa korjata mittausta on asettaa valokuitu kulkemaan kahteen kertaan saman säteilyalueen läpi, mahdollisimman lähekkäin toisiaan. Tällöin voidaan olettaa, että vaimennus on yhtä suuri kaikilla valokuidun kohdilla. Säteilyn aiheuttaman vaimennuksen suuruus pystytään nyt laskemaan valokuidun eri kohdissa ja korjaamaan lämpötila oikeaksi. (Takada et al. 1998, 548-550.)

4 MITTAUSJÄRJESTELYT

Tässä työssä tehdyt mittaukset suoritettiin LUT-yliopiston ydintekniikan tutkimuslaboratoriossa. Käytössä oli aiemmissa virtausmittauksissa käytetyn HIPE-koelaitteiston vesisäiliö, joka on esitetty kuvassa 3. HIPE-koelaitteistolla on mahdollista visualisoida kaksifaasivirtauksia käyttäen ilmaa ja vettä (Ylönen 2015).



Kuva 3. Vesisäiliö, reikälevy ja teräskapillaariputket. Kapillaariputket on merkitty nuolella.

4.1 PASIn mittausjärjestely ja mittaukset

Ennen tämän työn toteuttamista LUT-yliopiston ydintekniikan laboratoriossa on kerran aiemmin mitattu lämpötilaa valokuitumittaustekniikalla. Kyseisessä mittauksessa lämpötilaa mitattiin PASI-koelaitteiston vesialtaassa. Tällöin valokuitu oli sijoitettu metalliverkkoon kiinteästi teräskapillaariputken sisälle. Valokuitua suojaava

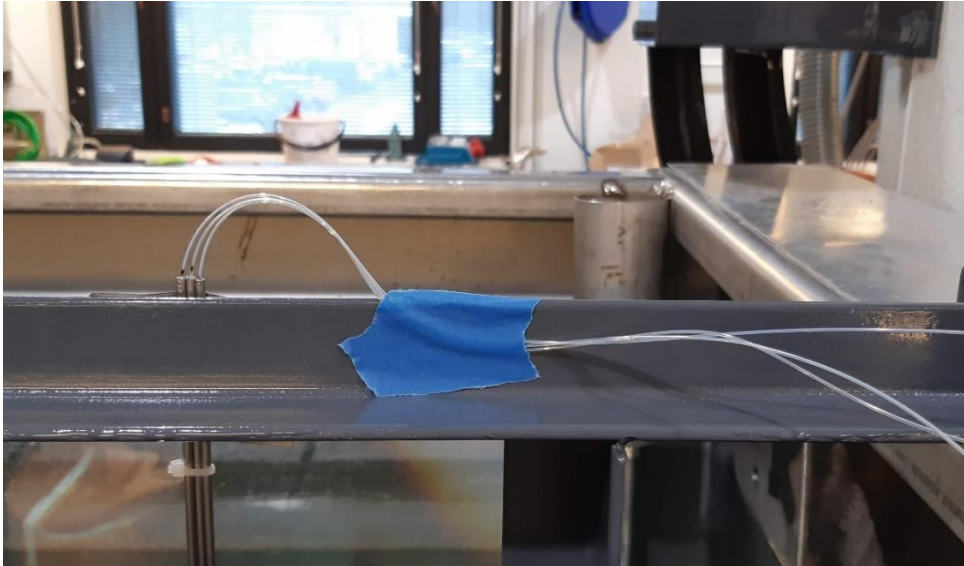
kapillaariputki oli taivutettu useille mutkille. Kapillaariputkeen oli kiinnitetty kolme termoelementtiä, joiden sijainti valokuidussa testattiin lämmittämällä kapillaariputkea kolvilla juuri termoelementtien kohdalta. Tällöin valokuidun mittaamaan lämpötilajakaumaan tuli termoelementin sijaintitieto. Termoelementit sijaittivat metalliverkon eri kohdissa ja eri korkeuksilla. Ensimmäinen termoelementti oli suoralla osuudella, ennen ensimmäistä mutkaa. Toinen termoelementti oli melkein keskellä valokuitua useamman mutkan jälkeen ja kolmas termoelementti ennen kahta viimeistä mutkaa.

Valokuidun mittaamat lämpötilat olivat aluksi ensimmäisen termoelementin kohdalla tarkkoja. Kun altaan lämpötila nousi, ero valokuitumittauksen ja termoelementin välillä kasvoi lämpötilan funktiona. Mittauksen lopussa valokuidun mittaama lämpötila oli 20 °C suurempi kuin termoelementin mittaama lämpötila. Kuitenkin viimeisessä termoelementtimittapisteessä, joka oli usean mutkan takana, lämpötilat näyttivät koko ajan melkein samaa kuin valokuidun mittaamat lämpötilat. Mittausten tulokset eivät olleet täysin luotettavia. Yksittäisellä koejärjestelyllä ei pystytty selvittämään, miksi valokuitumittaukset eivät näyttäneet termoelementtien kanssa yhteneviä lämpötiloja. Mahdollisia vaikuttavia tekijöitä olivat kapillaariputken mutkat, jotka mahdollisesti estivät valokuitua laajenemasta aiheuttaen mittaustuloksiin staattista mittausrvirhettä.

4.2 Mittausjärjestelyt ja -laitteisto HIPEssä

Tässä työssä tehdyissä koejärjestelyissä oli tarkoituksena saada tuloksia ja selvittää, kuinka valokuidun mutkat ja värinä vaikuttavat lämpötilamittaukseen. PASI-mittauksissa ei saatu mitattua tarkkoja lämpötiloja, minkä takia mittauksia haluttiin yksinkertaistaa ja tutkia, mistä mahdolliset virheet johtuivat. Mittalaitteistona toimi Luna ODiSI 6100 -laitteisto ja käytettävissä oli viiden metrin pituisia valokuituja. Valokuidut olivat ohuissa teflonsuojaputkissa, jotka laitettiin ohuiden teräskapillaariputkien sisälle. Kapillaariputkien tarkoituksena oli suojata ja tukea valokuituja mittausten aikana vesisäiliössä. Kaikki mittaukset otettiin, kun säiliö oli täynnä vettä ja isotermisessä tilassa.

Kuvassa 4 näkyy ensimmäisen kolmen valokuidun mittauksen teflonsuojaputket, joiden sisällä valokuidut ovat. Teflonsuojaputket menevät teräskapillaariputkiin.



Kuva 4. Valokuidut teflonsuojaputkissa ja teräskapillaariputkissa.

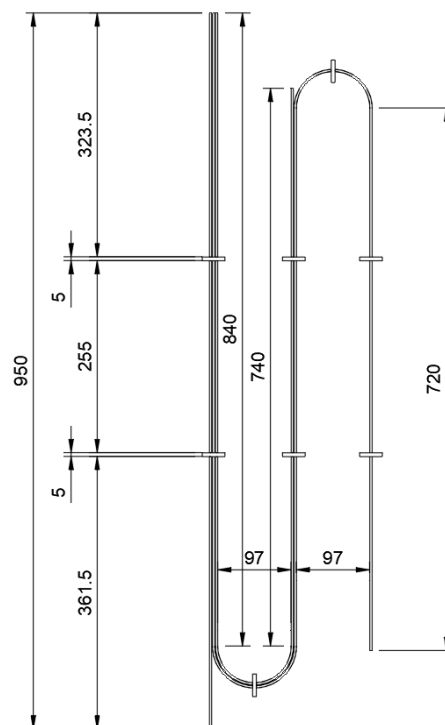
HIPE-koelaitteistosta oli käytössä vesisäiliö, johon tehtiin tukeva reikälevy valokuituja varten. Koelaitteiston säiliö sekä sen sisällä olevaan reikälevyyn kiinnitetyt kapillaariputket on esitetty aiemmin kuvassa 3. Alla olevassa taulukossa 1 on esitetty tämän työn mittausjärjestelyt, joita kuvataan tarkemmin seuraavissa alaluvuissa.

Taulukko 1. Mittausjärjestelyt tässä työssä.

1. mittausjärjestely	2. mittausjärjestely
Taaraus	Taaraus
Kuuma vesi (3 valokuitua)	Kuuma vesi (1 valokuitu)
<i>Tärisytys</i>	Kylmä vesi (1 valokuitu)
Kylmä vesi (3 valokuitua)	
Taaraus	
Uusi kylmä vesi (3 valokuitua)	
Uusi kuuma vesi (3 valokuitua)	

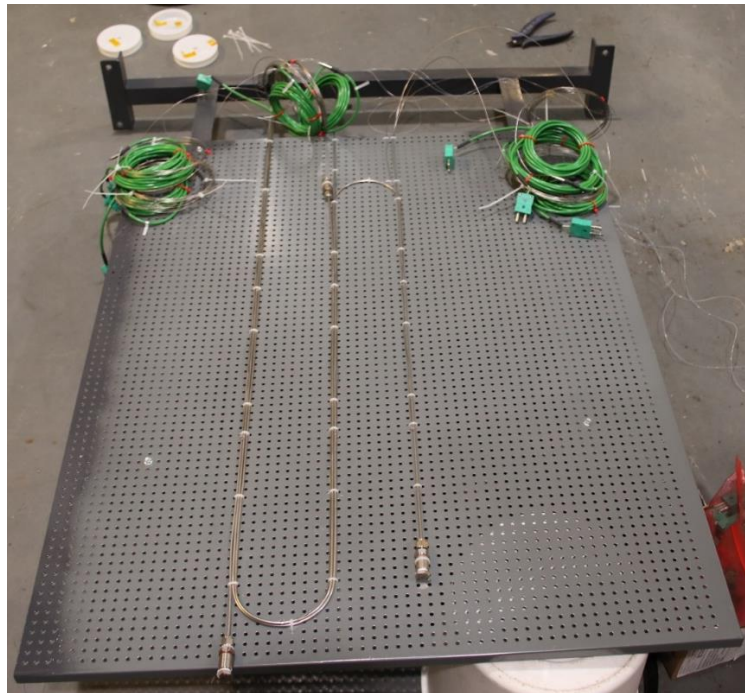
4.2.1 Kolmen valokuidun mittaukset

Ensimmäisellä mittausjärjestelyllä tehtiin yhteensä neljä mittausta kolmella valokuidulla ja kahdeksalla termoelementillä. Tässä mittausjärjestelyssä reikälevyn pintaan kiinnitettiin kolme eri valokuitua omiin kapillaariputkiin, joiden halkaisija on 3 mm. Kaikki käytetyt valokuidut olivat 5 metrin pituisia ja valokuidusta käytettiin mittauksissa loppupäätä. Valokuitu täytyi suojata kapillaariputkella vedessä. Halusimme myös, että valokuidun aivan loppuosa olisi veden sisällä, eikä vapaana ilmassa. Ensimmäinen valokuitu oli sijoitettu suorana vesisäiliöön. Toisen valokuidun kapillaariputki oli käännetty U-mutkalle 97 mm:n kääntöhalkaisijalla ja valokuidun pää nousi melkein veden pintaan asti. Kolmas valokuitu käännettiin vielä toiselle samanlaiselle U-mutkalle. Kuvassa 5 on esitelty mittausjärjestely. Kapillaariputket oli kiinnitetty reikälevyyn nippusiteillä ja termoelementit oli kiinnitetty nippusiteiden alle.



Kuva 5. Ensimmäisen mittauksen valokuitujen ja termoelementtien mittausalue. Kolme kapillaariputkea ja niiden sisällä olevat valokuidut olivat mittausjärjestelyssä veden alla kuvan mukaisesti. Ohuet suorakaiteet kuvaavat termoelementtien sijainteja.

Referenssinä mittauksissa käytettiin kahdeksaa termoelementtimittausta. Termoelementit oli sijoitettu putkien suorille osuuksille kahdelle eri korkeudelle sekä U-mutkiin, jotta pystyttiin toteamaan hyvin säiliön isotermissyys. Kuvassa 5 esitetyt suorakaiteet kuvaavat termoelementtien sijainteja. Valokuituun termoelementtien sijainnit määritettiin samalla tavalla kuin PASI-mittauksissa, eli valokuitua lämmitettiin kolvilla termoelementin kohdalta. Termoelementtien mittaamaa lämpötilaa verrattiin mittausten aikana myös tarkkuuskalibrointilaitteeseen, jolloin termoelementtimittauksissa ei huomattu eroa. Kuvassa 6 on esitetty reikälevy, kapillaariputket, termoelementtien johtoja sekä valokuidut teflonsuojaputkissa.



Kuva 6. Säiliössä oleva reikälevy, johon kapillaariputket kiinnitettiin. Näiden putkien sisällä valokuidut olivat teflonsuojaputkissa.

Valokuidun mittauspisteiden etäisyydet, eli tilallinen resoluutio oli 0,65 mm, joka oli kyseisen mittalaitteiston paras erottelukyky. Kolmea valokuitua käytettäessä mittaustaajuus oli 13,3 Hz. Yhdellä valokuidulla mitattaessa pystyy saavuttamaan 40 Hz:n mittaustaajuuden. Valokuituihin määritettiin myös mittauksen aloituskohdaksi reikälevyn yläreuna, jolloin valokuidun alkuosa pystyttiin helpommin erottelemaan pois

mittausalueesta. Seuraavaksi kuvataan neljän ensimmäisen mittauksen toteutus ensimmäisellä mittausjärjestelyllä.

Aluksi kuvassa 4 esitetty HIPEn vesisäiliö täytettiin vesijohtoverkosta tulevalla vedellä. Säiliön täytyttyä termoelementeistä saatiin veden keskilämpötilaksi 19,4 °C. Säiliö jätettiin tämän jälkeen tasoittumaan yön yli noin 20 tunnin ajaksi. Tasoittumisen jälkeen veden keskilämpötila oli 18,9 °C. Kerrostuneisuutta vesisäiliöön ei syntynyt, eli säiliössä pystyttiin oletamaan olevan isoterminen olosuhde. Tätä arvoa pidettiin tarpeeksi tarkkana siihen, että valokuidut pystyttiin taaraamaan tähän lämpötilaan ja huomioimaan kyseinen lämpötila LUNA-mittausohjelmaan (LUNA OD6 SW v1.6.4). Jokaisessa taarauksessa ja mittauksessa pystyttiin toteamaan säiliön olevan isotermissä tilassa. Taarauksella tarkoitetaan lämpötilanäyttämän korjausta mittausohjelmaan eli siirretään oletusarvo termoelementtien mittaamaan keskilämpötilaan. Valokuidut näyttävät suhteellista lämpötilan muutosta ja mittausohjelmassa lämpötilan oletuslähtöarvona on 0 °C. Taarauksen jälkeen valokuidun mittaamat lämpötilat vastaavat termoelementtien mittaamiin lämpötiloihin samoissa mittauskohdissa.

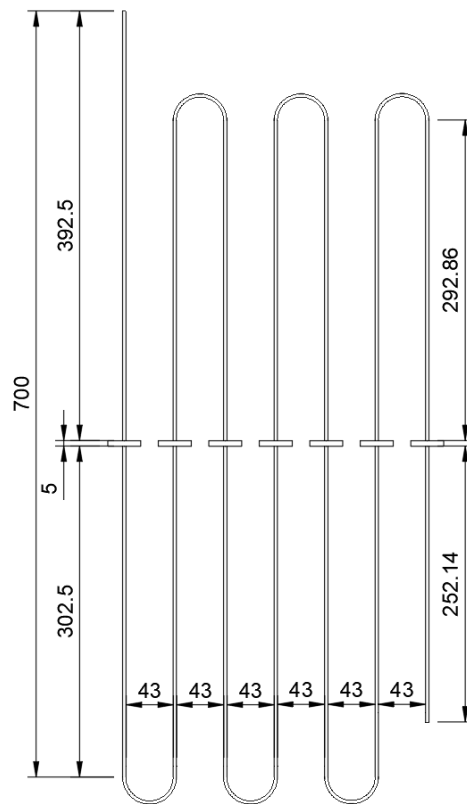
Taarauksen jälkeen säiliö tyhjennettiin ja täytettiin kuumalla vedellä. Tämän jälkeen valokuiduilla ja termoelementeillä otettiin lyhyt, noin 10 sekunnin mittaus. Veden keskilämpötila oli tällöin termoelementeillä mitattuna 50,9 °C. Tämän jälkeen reikälevyä tärisytettiin kepillä ja samanaikaisesti mitattiin lämpötilaa valokuiduilla ja termoelementeillä. Tärinän aikana osa mittauksista katosi välillä kokonaan ja niihin tuli myös suuria virhepiikkejä. Tässä oli siis kyseessä dynaamisen virheen aiheuttama ongelma, jota haluttiin testata tärisyttämällä reikälevyä. Seuraavaksi säiliö tyhjennettiin aivan tyhjäksi ja täytettiin niin kylmällä vedellä kuin vesijohtoverkosta saatiin. Täydestä säiliöstä otettiin toinen mittaus valokuiduilla ja termoelementeillä. Keskilämpötila säiliössä oli termoelementeillä mitattuna 11,2 °C.

Nämä valokuitumittaukset päätettiin ottaa vielä uudestaan, että tulee varmuus siitä, vaikuttiko valokuitujen tärisyttäminen tuloksiin. Uudessa mittauksessa valokuidut taarattiin uudelleen termoelementtien keskilämpötilan mukaan 15,2 °C:ssa vedessä.

Tämän jälkeen mitattiin ensin kylmän veden mittausta, jossa veden keskilämpötilaksi mitattiin termoelementeillä 9,9 °C ja seuraavaksi kuumalla vedellä, jolloin säiliön keskilämpötila termoelementeillä mitattuna oli 50,6 °C.

4.2.2 Usean mutkan valokuitumittaukset

Lomperskin (2017) tekemässä kokeessa käytetyn valokuidun minimi kääntösäde on ollut kyseisen valokuidun toimittajan mukaan 10 mm. Kokeen tekijöillä on ollut käytössä 10-15 mm kääntösäteellä olevia valokuituja yli vuoden, eikä mittauksissa ole huomattu ongelmia. (Lomperski et al. 2017, 204.) Tässä työssä tehtyjen mittausten tarkoituksena oli tutkia, kuinka paljon useat mutkat vaikuttavat mitattuun lämpötila-arvoon ja kuinka jyrkälle mutkalle valokuidut voi laittaa. Toisessa mittauksessa yksi viiden metrin valokuitu oli teflonsuojaputkessa, joka laitettiin 3 mm:n teräskapillaariputkeen. Kapillaariputki taitettiin kuudelle mutkalle 43 mm:n kääntöhalkaisijalla ja kiinnitettiin reikälevyyn nippusiteillä. Mutkien tarkoituksena oli havainnollistaa mahdollisten tulevien mittaussovellusten monimutkaisia muotoja esimerkiksi putkilinjojen sisällä. Valokuitua ei saatu kokonaan teräsputken sisälle, minkä takia se tuettiin säiliön ulkopuolelle siten, ettei tärinä tai heilunta vaikuttanut siihen. Termoelementit laitettiin keskelle valokuidun suoraa osuutta. Kuvassa 7 on esitelty kyseinen mittausjärjestely ja kuvassa olevat suorakaiteet kuvaavat termoelementtien sijainteja.



Kuva 7. Toisen mittauksen valokuidun ja termoelementtien mittausalue. Ohuet suorakaiteet kuvaavat termoelementtien sijainteja.

Mittausten alussa valokuitu taarattiin 14,4 °C:n vedessä. Tämän jälkeen otettiin mittaus kuumalla ja kylmällä vedellä samalla tavalla kuin aiemmin.

5 MITTAUSTULOKSET

Mittauksista saatiin jokaiselle valokuidulle oma lämpötila, tiettyinä ajanhetkenä valokuidun pituuden funktiona. Kaikkien termoelementtien mittaamat lämpötilat saatiin ajanfunktiona. Termoelementtien mittaamat lämpötilat olivat yksittäisiä pisteitä valokuidussa, jotka oli aiemmin määritetty valokuituun. Valokuitujen mittausdatasta nähtiin kyseiset pisteet, jolloin termoelementtien mittaamia lämpötiloja voitiin verrata kyseisen valokuidun pisteen mittaamaan lämpötilaan.

Valokuitujen mittausdatasta tehtiin kuvaajia, joissa on valokuitujen jokaisen mittapisteen mittaamien lämpötilojen keskiarvot mittauksen ajalta sekä näiden lämpötilakeskiarvojen keskihajonta termoelementtien kohdalta. Tällöin pystytään vertaamaan, onko valokuitujen mittaamat lämpötilat samat kuin termoelementtien mittaamat lämpötilat. Valokuiduilla otettiin mittauksia, kun säiliö oli täynnä vettä. Termoelementti- ja valokuitumittausten ajanhetket pystyttiin määrittämään samaksi. Taulukossa 2 on esitetty tämän työn mittaukset sekä valokuitujen nimitykset, joita on käytetty myös tässä tulosluvussa esitetyissä kuvaajissa.

Taulukko 2. Ensimmäinen ja toinen mittausjärjestely sekä valokuitumittaukset.

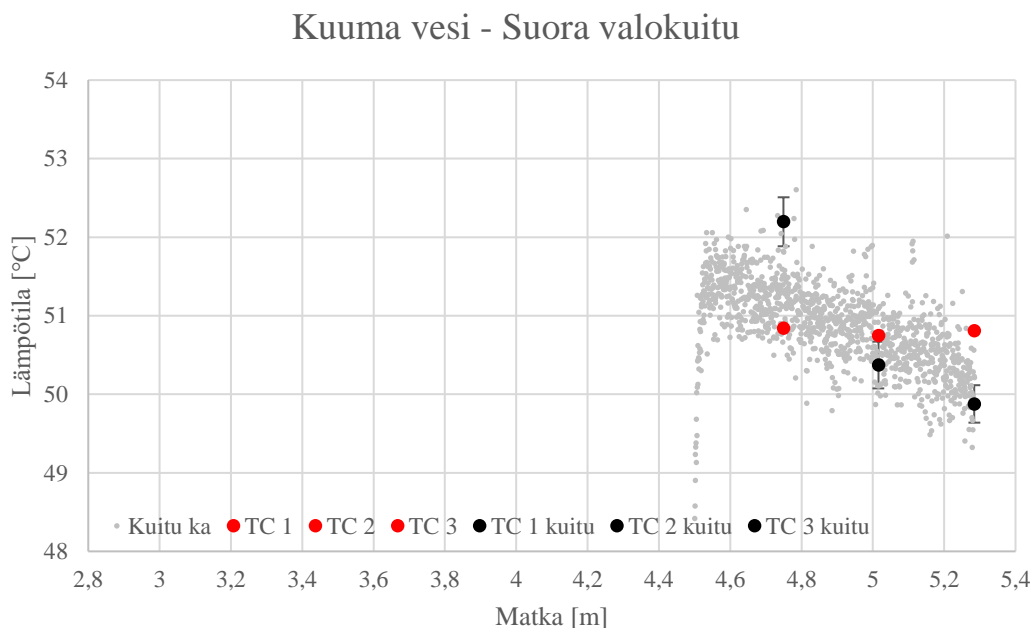
1. mittausjärjestely		2. mittausjärjestely	
	Valokuitumittaus		Valokuitumittaus
Kuuma vesi	Suora Yhden U-mutkan Kahden U-mutkan	Kuuma vesi	Kuuden U-mutkan
Kylmä vesi	Suora Yhden U-mutkan Kahden U-mutkan	Kylmä vesi	Kuuden U-mutkan
Uusi kylmä vesi	Suora Yhden U-mutkan Kahden U-mutkan		
Uusi kuuma vesi	Suora Yhden U-mutkan Kahden U-mutkan		

5.1 Kolmen valokuidun mittaus

Ensimmäisessä mittauksessa mitattiin ensin kuumaa ja sen jälkeen kylmää vettä. Reikälevy ja valokuituja tärisytettiin, kun säiliössä oli kuumaa vettä ennen kylmän veden mittausta. Tästä syystä koe toistettiin uudella taarauksella ja otettiin uusi mittaus ilman tärisytystä, tällä kertaa ensin kylmällä ja sen jälkeen vielä kuumalla vedellä.

5.1.1 Ensimmäinen mittaus kuumalla ja kylmällä vedellä

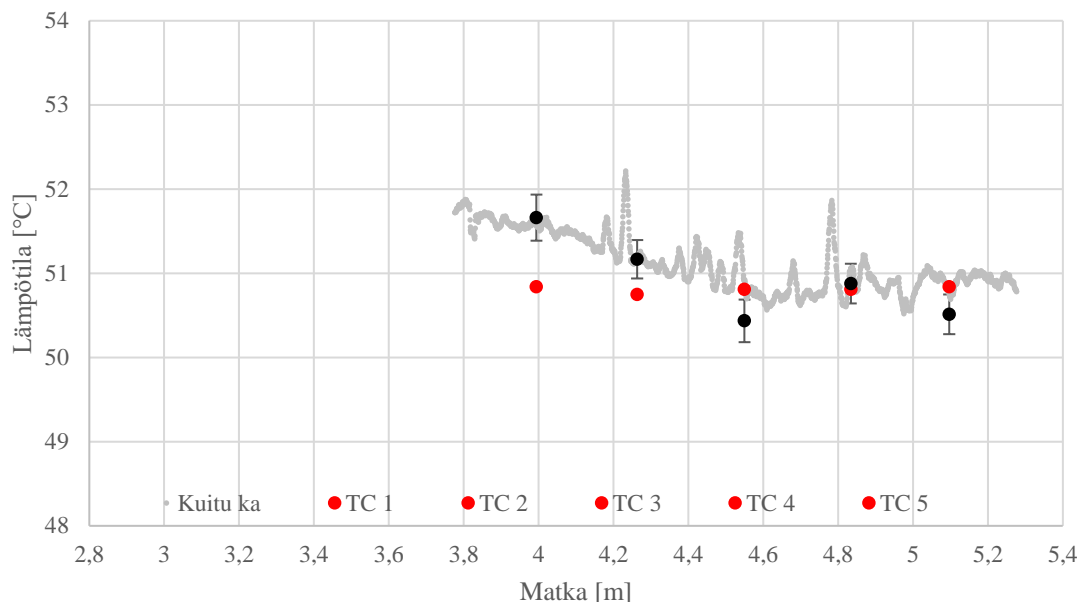
Ensimmäisessä mittauksessa säiliö täytettiin kuumalla vedellä. Käytössä oli kolme viiden metrin valokuitua, joten jokaisen valokuidun mittausdatasta piirrettiin omat kuvaajat. Jokaisen valokuidun mittaukset otettiin samanaikaisesti samoissa olosuhteissa. Kuvassa 8 on esitetty suoran valokuidun mittausajan keskiarvolämpötilat pituuden funktiona.



Kuva 8. Suoran valokuidun kuumaa vettä ensimmäinen mittaus. Harmaalla on merkitty valokuidun mittaamien lämpötilojen keskiarvot eri valokuidun kohdissa, punaisella termoelementtien mittaamat lämpötilat valokuidun tietyissä pisteissä ja mustilla valokuidun keskiarvolämpötilat ja keskihajonnat termoelementtien kohdilla.

Kuvassa 8 harmaat pisteet kuvaavat valokuidulla otetun mittauksen lämpötilojen keskiarvoja pituuden funktiona. Mittapistettä valokuiduissa oli 0,65 mm:n välein ja mittaustaajuus oli 13,3 Hz. Kaikissa seuraavissa kuvissa 9-21 kyseiset harmaat pisteet ovat liukuvia keskiarvoja, jolloin kuvaajista saatiin huomattavasti selkeämpiä. Punaiset pisteet kuvaavat kaikissa kuvaajissa termoelementtien mittaamaa aikakeskiarvoistettua lämpötilaa samalla ajanhetkellä, kun valokuitujen mittaukset otettiin. Termoelementtien mittaamisissa lämpötiloissa ei ollut huomattavissa heiluntaa. Mustat pisteet kuvaavat juuri termoelementin valokuidun kohdan mittaamien lämpötilojen keskiarvoa ja keskihajontaa, ei liukuvaa keskiarvoa. Kuten kuvasta 8 voi huomata, valokuidun mittaamat lämpötilat heiluvat paljon termoelementtimittausten ympärillä. Kiinnostavaa oli myös se, että valokuidun aivan loppupäässä lämpötilat olivat pienempiä kuin valokuidun alussa. Kuvassa 9 U-mutka oli TC 3 kohdalla. Tässä valokuidussa oli enemmän häiriötä valokuidun mittaamisissa lämpötiloissa kuin kuvassa 8, mutta myös TC 4 termoelementtimittaus osui valokuitumittauksen keskihajontaan.

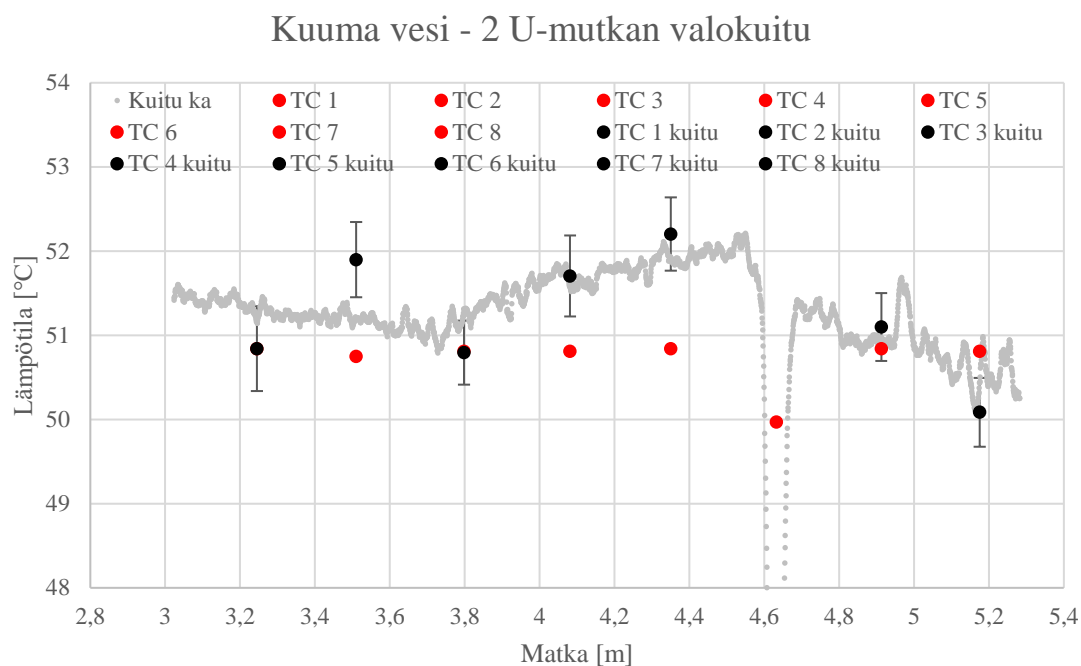
Kuuma vesi - U-mutka-valokuitu



Kuva 9. U-mutka-valokuidun kuuman veden ensimmäinen mittaus. Harmailla pisteillä on nyt kuvattu mittausajan lämpötilojen keskiarvojen liukuvia keskiarvoja, punaisella termoelementtien mittaamat aikakeskiarvoistetut lämpötilat valokuidun tietyssä pisteessä ja mustilla valokuidun keskiarvolämpötilat ja keskihajonnat termoelementtien kohdilla. Mustat pisteet eivät ole liukuvia keskiarvoja.

Kuvasta 9 alkaen tulee huomioida, että harmaat pisteet ovat nyt valokuidun mittauspisteiden keskiarvolämpötilojen liukuvia keskiarvoja. Liukuvaan keskiarvoon on otettu 10 keskiarvolämpötilaa kyseisen pisteen molemmilta puolilta. Kaikista mittauksista tehtiin tämä keskiarvoistus jälkeen päin. Ainoastaan kuvassa 8 on esitetty esimerkkinä kaikki valokuidun mittapisteiden keskiarvot mittausajalta sekä liitteessä 2 on esitetty kaikkien mittauksen keskiarvokuvaajat. Tässä luvussa esitetyt liukuvan keskiarvon kuvaajat on tehty liitteessä 2 esitettyjen kuvaajien keskiarvolämpötilojen avulla.

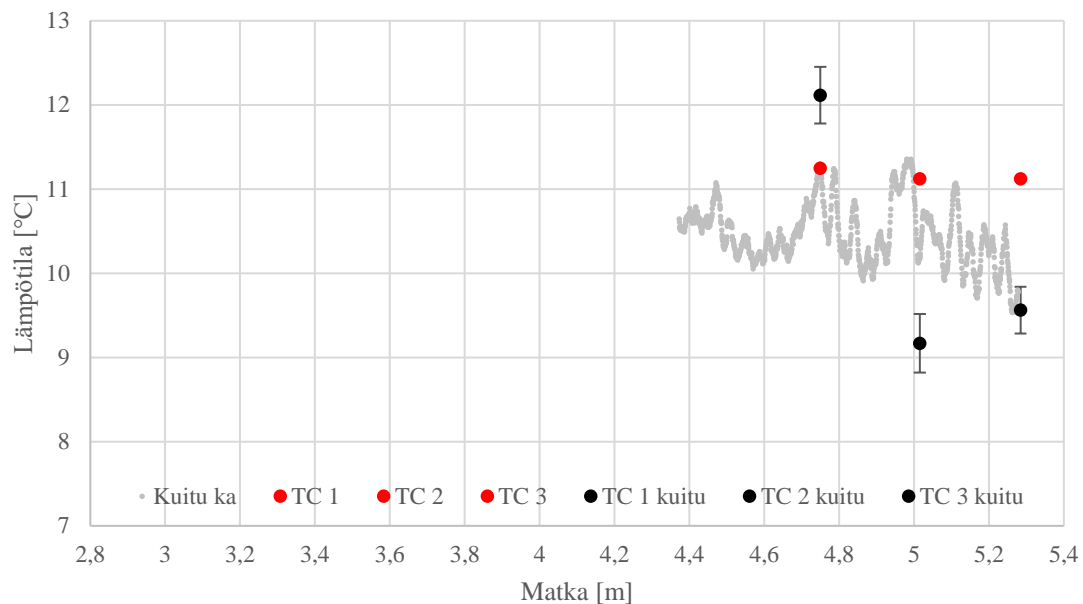
Kuvassa 10 TC 6 lämpötila oli pienempi kuin muiden termoelementtimittausten. Tämä johtui siitä, että vesiraja oli juuri ylittänyt TC 6 kohdan, kun mittaus otettiin. Mittauksessa tapahtui siltä osin virhe, että olisi pitänyt odottaa hieman, ennen kuin mittaus otettiin. Tästäkin syystä kyseinen mittaus uusittiin.



Kuva 10. Kahden U-mutkan valokuidun kuuman veden ensimmäinen mittaus. Liukuva keskiarvokuvaaja.

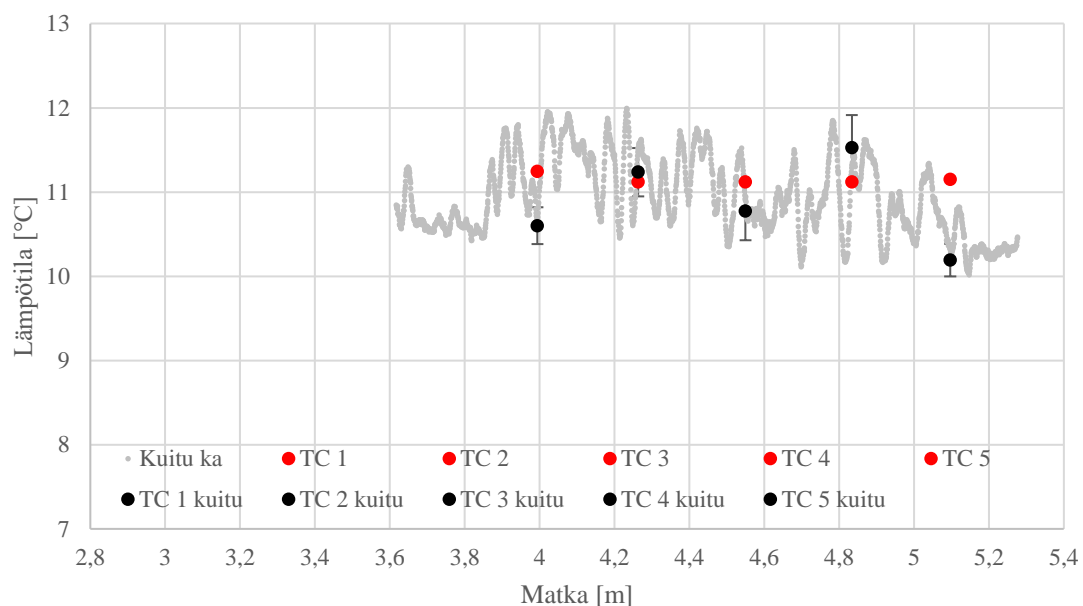
Kuvassa 10 mutkat olivat termoelementtien 3 ja 6 kohdilla. Pääsiallinen syy mittausten uusimiselle oli reikälevyn ja valokuitujen heiluttaminen ensimmäisen kuuman veden mittauksen ottamisen jälkeen. Heilutuksen aikana valokuitumittaukset eivät välillä mitanneet ollenkaan ja häiriö kasvoi suuremmaksi. Otimme vielä mittauksen kylmällä vedellä, jotta saisimme vertailuarvoja siitä, miten heiluttaminen vaikuttaa kylmän veden mittaustuloksiin ja että voisimme havainnollistaa valokuidun mahdollisia lämpölaajenemisesta aiheutuvia virheitä. Säiliön tyhjennys ja uudelleen täyttäminen kylmällä vedellä pyrittiin toteuttamaan mahdollisimman nopeasti. Mittausten välille jäi kuitenkin noin tunnin väli. Kuvissa 11, 12 ja 13 on esitetty kylmän veden ensimmäisten mittausten liukuvat keskiarvolämpötila kuvaajat.

Kylmä vesi - Suora valokuitu



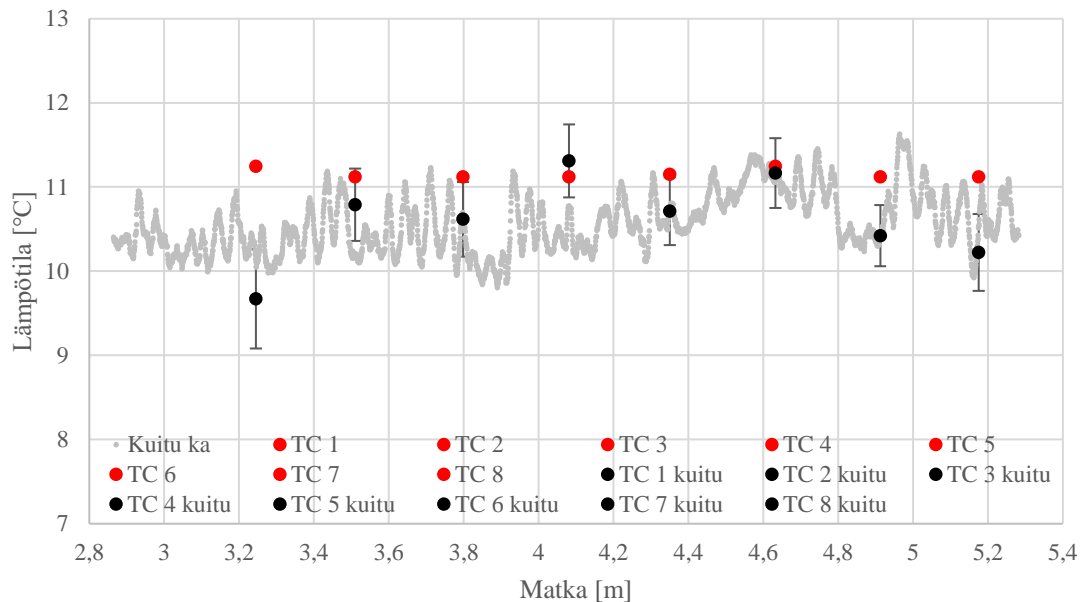
Kuva 11. Suoran valokuidun kylmän veden ensimmäinen mittaus. Liukuva keskiarvokuvaaja.

Kylmä vesi - U-mutka-valokuitu



Kuva 12. U-mutka-valokuidun kylmän veden ensimmäinen mittaus. Liukuva keskiarvokuvaaja.

Kylmä vesi - 2 U-mutkan valokuitu



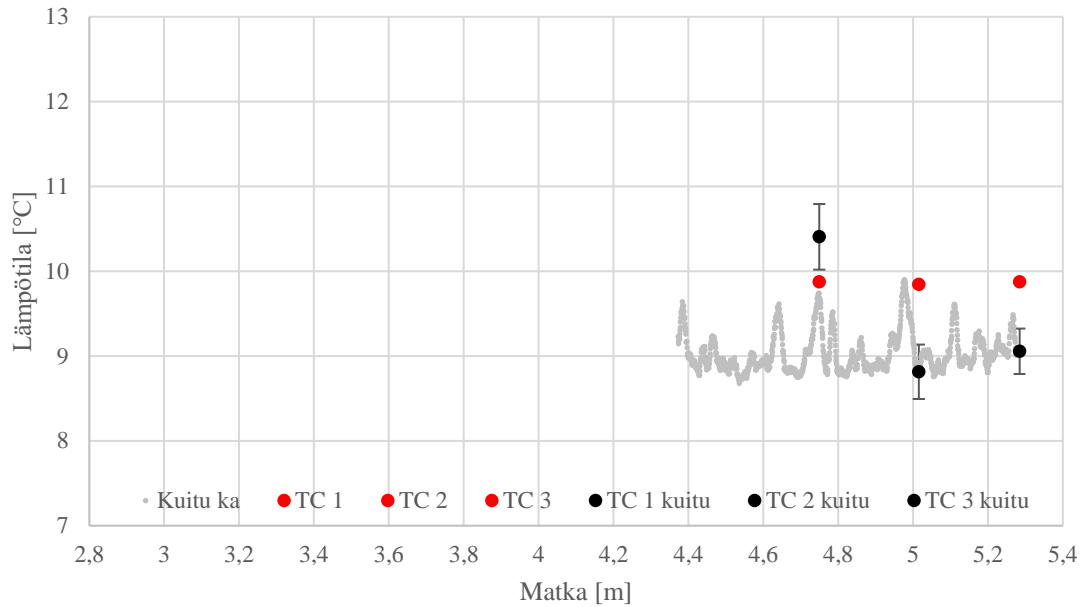
Kuva 13. Kahden U-mutkan valokuidun kuuman veden ensimmäinen mittaus. Liukuva keskiarvokuvaaja.

Kuvista 11, 12 ja 13 voi huomata, että hajonta valokuidun mittaamisissa lämpötiloissa oli kasvanut. Tämä saattoi johtua siitä, kun valokuituja tärisytettiin, ne muuttivat hieman asentoaan, jolloin mittaustulokset muuttuivat. Toinen mahdollinen syy hajonnan kasvamiselle oli lämpötilan muutos kuumasta kylmään, jolloin valokuitu oli voinut venyä ja kutistua.

5.1.2 Uusi mittaus kylmällä ja kuumalla vedellä

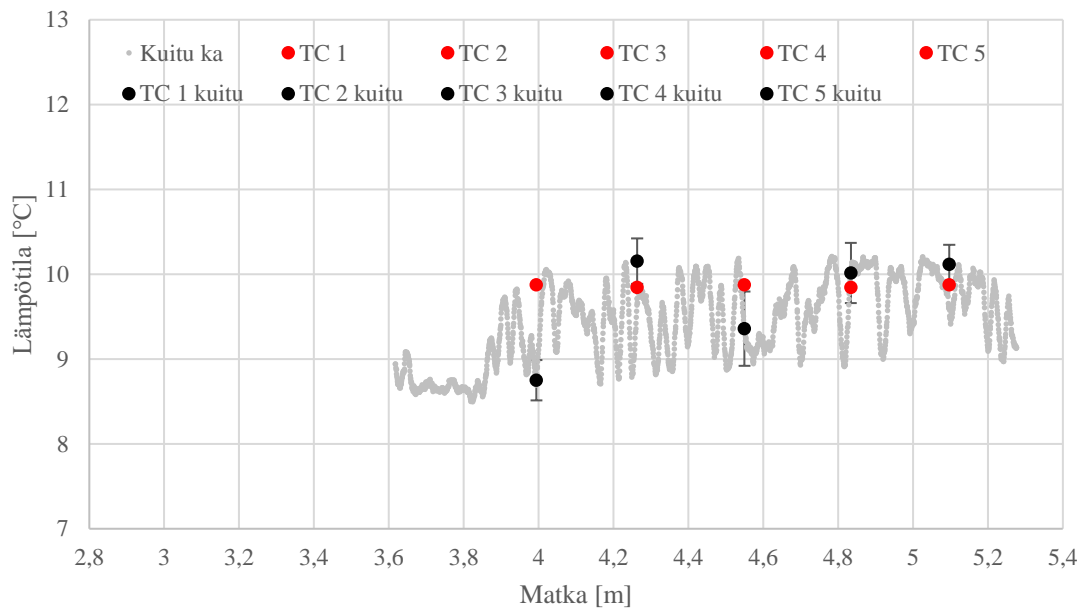
Seuraavaksi mittaukset toistettiin uudestaan samalla koejärjestelyllä ilman tärisytystä. Valokuidut taarattiin uudelleen, jonka jälkeen otettiin ensin kylmän veden mittaus ja sitten kuuman. Mittauksista tehtiin samanlaiset liukuvat keskiarvokuvaajat kuin aiemminkin, että niitä voisi vertailla paremmin keskenään. Kuvissa 14, 15 ja 16 on esitetty uuden kylmän veden mittauksen mittaustulokset.

Kylmä vesi uusi mittaus - Suora valokuitu



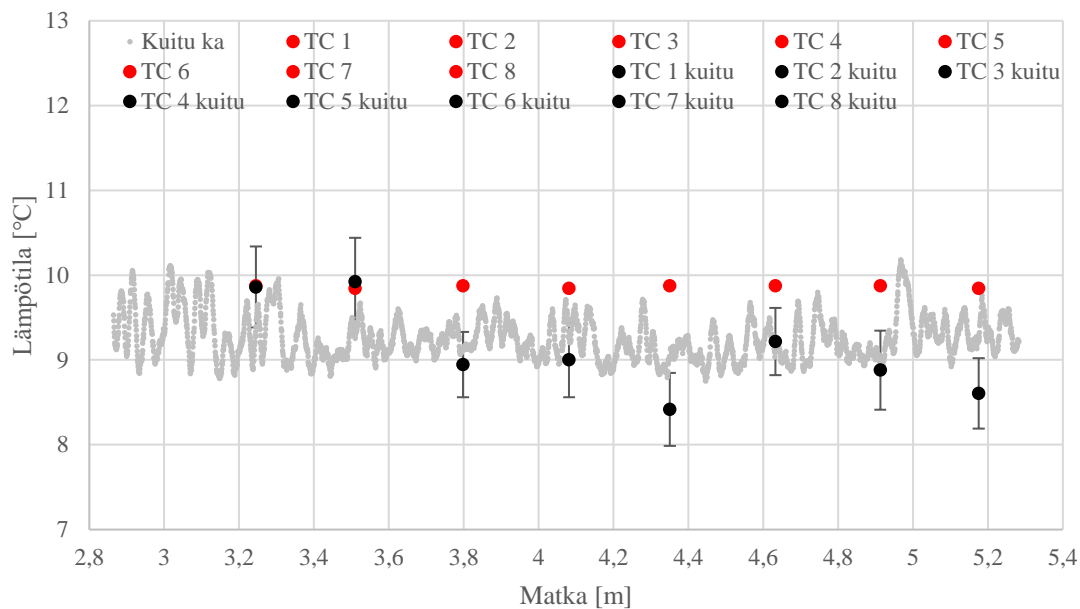
Kuva 14. Suoran valokuidun kylmän veden uusi mittaus. Liukuva keskiarvokuvaaja.

Kylmä vesi uusi mittaus - U-mutka-valokuitu



Kuva 15. U-mutka-valokuidun kylmän veden uusi mittaus. Liukuva keskiarvokuvaaja.

Kylmä vesi uusi mittaus - 2 U-mutkan valokuitu

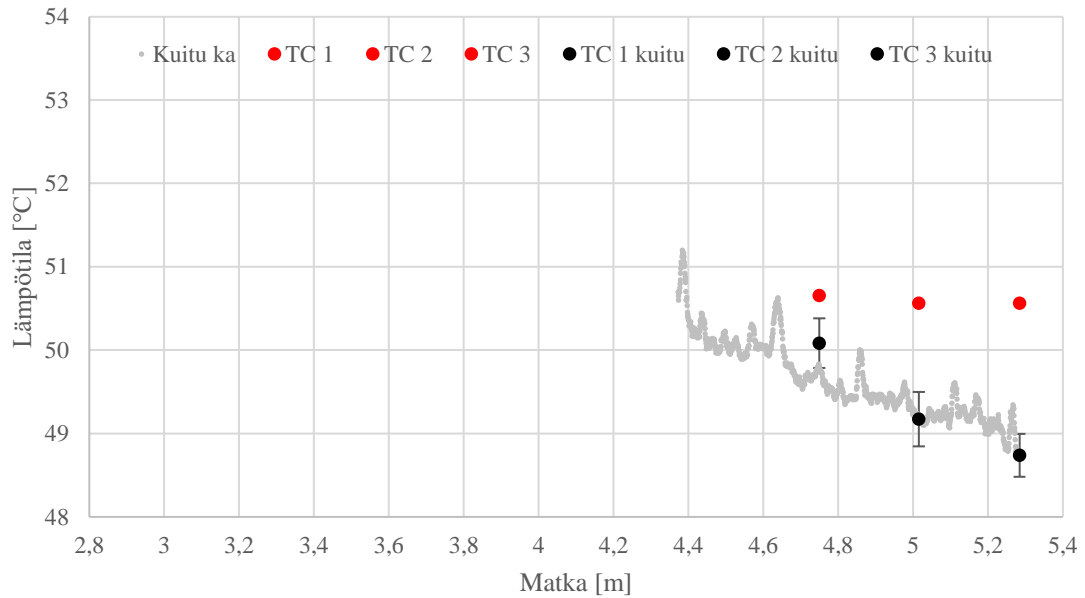


Kuva 16. Kahden U-mutkan valokuidun kylmän veden uusi mittaus. Liukuva keskiarvokuvaaja.

Kuten kuvaajista voi huomata, tulokset vaihtelivat paljon termoelementtien mittaamista lämpötiloista. Joissain kohdissa valokuidun mittaamat keskiarvot ja -hajonnat, eli kuvien mustat pisteet, olivat kuitenkin osuneet hyvin termoelementtimittauksiin.

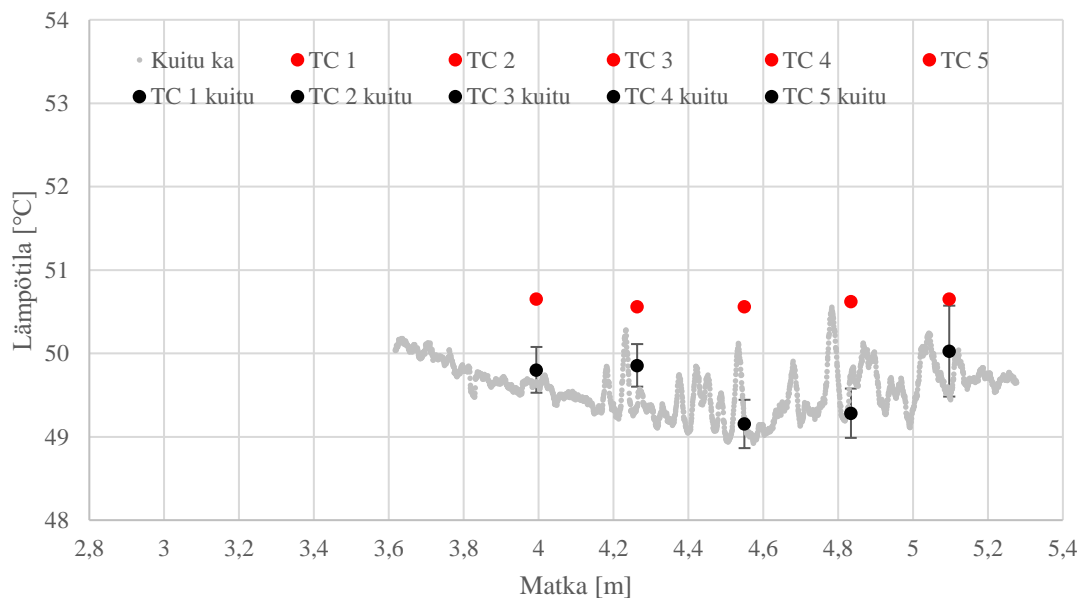
Seuraavaksi mitattiin vielä uusi kuuman veden mittaus ilman tärisytystä. Kuvissa 17, 18 ja 19 on esitetty kyseisten mittausten kuvaajat, jotka tehtiin samalla tavalla kuin aiemmatkin.

Kuuma vesi uusi mittaus - Suora valokuitu

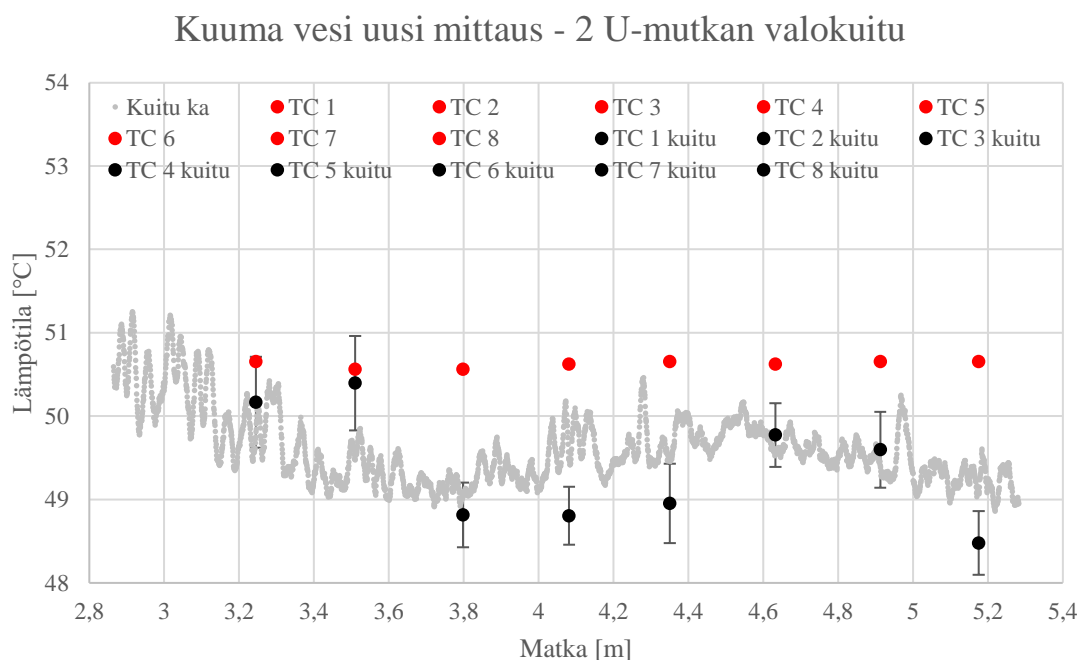


Kuva 17. Suoran valokuidun kuumen veden uusi mittaus. Liukuva keskiarvokuvaaja.

Kuuma vesi uusi mittaus - U-mutka-valokuitu



Kuva 18. U-mutka-valokuidun kuumen veden uusi mittaus. Liukuva keskiarvokuvaaja.

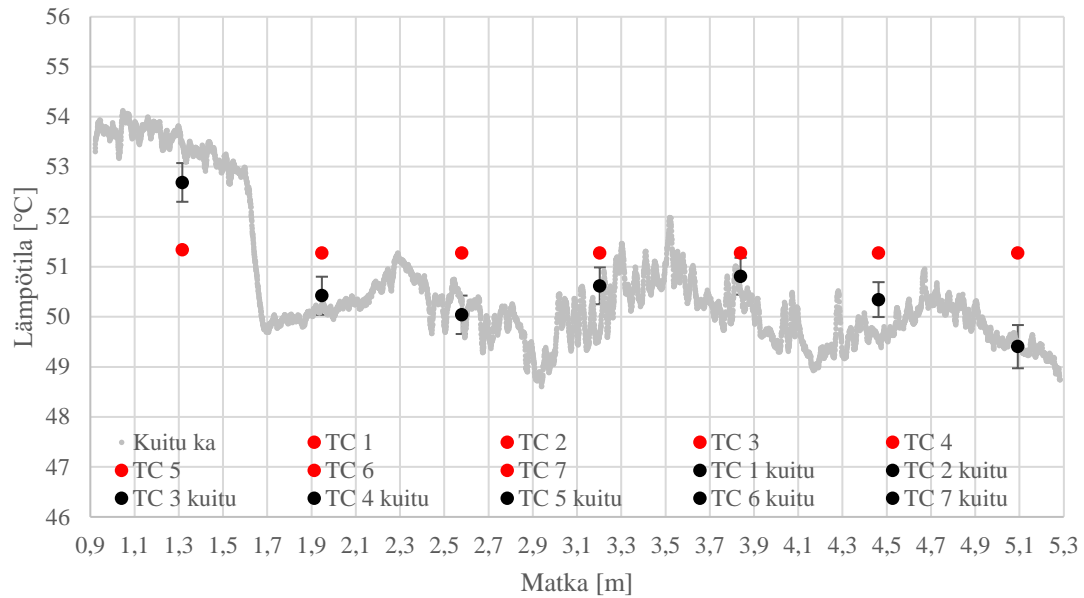


Kuva 19. Kahden U-mutkan valokuidun kuuman veden uusi mittaus. Liukuva keskiarvokuvaaja.

5.2 Usean mutkan valokuitumittaus

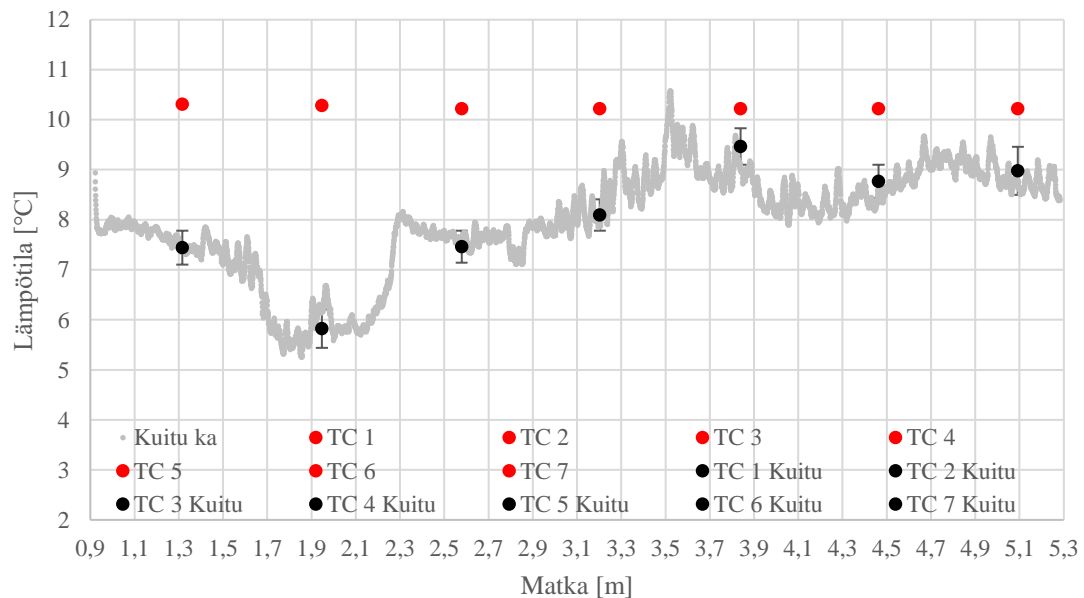
Toisella mittausjärjestelyllä tavoitteena oli tutkia, kuinka paljon useampi mutka vaikuttaa valokuidun mittaamiin lämpötiloihin. Seuraavaksi on esitelty tuloksia, jotka saatiin mitattua yhdellä viiden metrin pituisella valokuidulla, joka oli kuudella mutkalla ja käytössä oli referenssimittauksena seitsemän termoelementtiä. Aluksi otettiin kuuman veden mittaus ja sitten kylmän veden mittaus. Kuvissa 20 ja 21 on esitetty kuuman ja kylmän veden mittausten valokuidun liukuvat keskiarvot, termoelementtien aikakeskiarvoistetut lämpötilat, termoelementtien kohtien valokuidun keskiarvolämpötilat, eli kuvassa mustat pisteet sekä keskihajonnat kyseisillä kohdilla. Mutkat olivat termoelementtimittausten välissä, kuten aiemmin esitetystä kuvasta 7 voi huomata.

Kuuma vesi pitkä valokuitu



Kuva 20. Yhden pitkän valokuidun kuuman veden mittaus toisella mittausjärjestelyllä. Liukuva keskiarvokuvaaja.

Kylmä vesi pitkä valokuitu



Kuva 21. Yhden pitkän valokuidun kylmän veden mittaus toisella mittausjärjestelyllä. Liukuva keskiarvokuvaaja.

Mittauksissa ei ollut termoelementtiä aivan säiliön pohjalla ja pinnalla, jolloin ei pystytty varmistamaan sitä, onko valokuidun lämpötilojen vaihtelu termoelementtimittausten välillä johtunut veden kerrostumisesta. Tähän kiinnitettiin huomiota vasta mittausten suorittamisen jälkeen. Aiemmissa mittauksissa kerrostuneisuutta ei kuitenkaan termoelementeillä havaittu. Lisäksi irrallisella termoelementillä mitattiin lämpötilaa säiliön pohjalta ja pinnalta, jolloin lämpötila oli tasainen. Tästä mittauksesta ei kuitenkaan ole mittausdataa.

5.3 Tulosten analysointi

Tulosten analysoinnissa on käytetty apuna luvussa 5 olevia kuvaajia. Yleisesti katsottuna näyttää siltä, että valokuidun mitaamat arvot vaihtelevat termoelementtimittauksista, eivätkä näin ollen ole kovin luotettavia. Kaikki tässä luvussa läpikäytyt havainnot on tehty mittausten tulosten perusteella ja mittaustekniikan periaatteen pohjalta.

Luvussa 5 esitetyissä kuvaajissa on huonoa se, että juuri termoelementtien kohdalla olevien mustien pisteiden sijainti saattaa muuttua paljon, jos valitsee valokuidun seuraavan tai edellisen mittapisteen. Tästä syystä osa mustista pisteistä saattaa olla aivan eri kohdassa kuin muut valokuitukeskiarvolämpötilat. Mustat pisteet saattavat olla vain yksittäisiä valokuidun mittauspisteitä, jotka ovat sattumalta mitanneet jostain syystä keskiarvolämpötilan kauas muista keskiarvolämpötiloista. Liukuvat keskiarvot ovat kuitenkin hieman tasoittaneet tuloksia, jolloin pystytään paremmin keskittymään lämpötilojen liukuvien keskiarvojen havainnointiin yksittäisten mittapisteen sijaan.

Yksittäisille suuresti poikkeaville valokuitujen mittauspisteille ei löytynyt muuta selitystä kuin yksittäisen valokuidun mittapisteen sisäisen muutoksen suuruus. Tämä ilmenee kuvasta 8 sekä liitteessä 2 esitetyissä kuvaajissa, mutta muissa luvun 5 kuvaajissa sitä ei voi erottaa yhtä selvästi liukuvan keskiarvoistuksen takia. Tässä työssä havaittiin, ettei valokuidulla ehkä ole mahdollista mitata tarkkoja arvoja jokaisessa valokuidun kohdassa, koska jokainen valokuidun kohta on fyysisesti hieman erilainen ja siten sirona on

erilainen eri kohdissa. Valokuidun eri kohdat saattavat reagoida myös lämpötilan tai venymän muutokseen eri tavalla.

Mittauksissa käytetty tilallinen resoluutio voi vaikuttaa mittaustulosten kohinan suuruuteen. Lomperskin tutkimuksessa pienemmällä tilallisella resoluutiolla mittaustulosten kohina kasvaa huomattavasti verrattuna pidempään tilalliseen resoluutioon (Lomperski et al. 2016, 7). Tämä kuitenkin vaikuttaa aina mittauspisteiden lukumäärään, pienemmällä tilallisella resoluutiolla mittauspisteitä on tiheämmässä.

Mittaustuloksista on vaikea sanoa yksiselitteistä johtopäätöstä esimerkiksi mutkien vaikutuksesta, sillä mittauksia otettiin myös suoralla valokuidulla, joiden mittaustulokset vaihtelivat myös termoelementtimittauksista. Suorien valokuitujen mittaustulokset on esitetty kuvissa 8, 11, 14 ja 17. Koko valokuidun mitatulta pituudelta näissä mittauksissa hajonnaksi voidaan arvioida 1-3 °C. Ensimmäisissä mittauksissa, jotka on esitetty kuvissa 8-10 hajonta näyttäisi olevan pienempi kuin muissa mittauksissa. Tällöin valokuituja ei tärisytetty. Tärisytyksen jälkeen kuvissa 11-13 voidaan huomata, että hajonta on kasvanut noin 3 °C:een. Nämä mittaukset toistettiin uudella taarauksella ilman tärisytystä (kuvat 14-19), jolloin hajonta vaikuttaa hieman tasoittuneen, mutta se ei ole kuitenkaan samaa kuin ennen tärisytystä otetuissa mittauksissa.

Suorien valokuitujen kuuman veden mittauksissa valokuidun mitaamat lämpötilat vaikuttavat laskevan kuvissa 8 ja 17 tasaisesti valokuidun pituudella. Kuvissa 11 ja 14 lämpötilat ovat melko tasaisia koko valokuidun pituudella, kun mitattiin kylmän veden mittausta. Termoelementtimittaukset ovat pysyneet tasaisina, vaikka ne ovatkin eri korkeuksilla säiliössä, mikä poissulkee lämpötilan kerrostumisen.

Valokuitumittauksissa mitatut lämpötilat vaikuttavat olevan muutamien asteiden päässä termoelementeillä mitatuista lämpötiloista. Mittauksissa ei saatu yhtään tulosta, jossa valokuitu- ja termoelementtimittauksissa olisi ollut noin 20 °C:n ero, kuten aiemmissa PASI-mittauksissa. Tähän saattaa vaikuttaa myös se, että nyt lämpötiloja ei nostettu yhtä korkealle kuin PASI-mittauksissa. PASI-mittauksissa lämpötilamittaukset olivat

kuitenkin aivan lopussa samoja termoelementillä ja valokuidulla mitattaessa. Tällaista yhteneväisyyttä ei ole huomattavissa tässä työssä tehdyissä mittauksissa, vaikka mutkia on useita.

Voidaan huomata, että ensimmäisissä kuuman veden mittauksissa, jotka on esitetty kuvissa 8-10, valokuitujen mittaamat lämpötilat ovat keskimäärin korkeampia kuin termoelementtimittausten mittaamat lämpötilat. Kuvissa 17-19 kuuman veden mittaus toistettiin uudella taarauksella, jolloin valokuidun mittaamat lämpötilat olivat pienempiä kuin termoelementtimittausten. Ensimmäinen taaraus tehtiin 18,9 °C:n vedessä, kun taas uusissa mittauksissa 15,2 °C:n vedessä. Valokuidut mittaavat lämpötilan muutosta. Kuuman veden mittauksissa veden lämpötila on ollut kummassakin mittauksessa lähes sama termoelementtien mukaan ja kylmän veden mittauksissa lämpötila on hieman eri. Kuuman veden mittauksissa valokuitu olisi siis havainnut yhtä suuren ylöspäin olevan lämpötilan muutoksen kummassakin mittauksessa. Kylmän veden mittauksissa tämä muutos vaikuttaa myös olevan melko sama kummassakin mittauksessa. Vaikuttaa siltä, että muutos on oikeaan suuntaan ja melko tasainen riippumatta mittauskerrasta, mutta lämpötilaa ei saada mitattua tarkasti.

Mutkien vaikutuksen tutkiminen oli yksi näiden mittausten keskeisimmistä tavoitteista. Niiden epäiltiin vaikuttavan siten, ettei valokuitu pääse laajenemaan vapaasti kahden peräkkäisen mutkan välillä. Tällöin valokuituun voisi tulla jonkinlainen venymärasitus, joka mahdollisesti vaikuttaa lämpötilamittaukseen. Kuten luvussa 2.1 kerrottiin, Rayleigh-sironta on itsessään riippumaton lämpötilasta ja rasituksesta, eli ainoastaan valokuidun fyysinen muutos vaikuttaa sirontaan. Muuttunutta lämpötilaa ja venymää verrataan tässä tapauksessa aiemmin taarattuun tilaan, jolloin lämpötilan muuttuessa tuloksena saadaan lämpötilan muutos valokuidussa. Mittauksissa ei ole kuitenkaan havaittavissa yksiselitteisesti mutkien vaikutuksesta johtuvaa lämpötilan muutosta. Joitain yksittäisiä lämpötilan muutoskohtia on huomattavissa kuvissa 9, 10, 13 ja 18-21. Yhden pitkän valokuidun mittaukset on esitetty kuvissa 20 ja 21 joista mutkien vaikutus olisi ehkä selkeimmin huomattavissa. Näissä mittauksissa säiliön pohjalla ja pinnalla ei

ollut kuitenkin termoelementtiä, jolloin ei pystytä sanomaan varmasti sitä, vaikuttivatko mutkat vai veden kerrostuminen lämpötilaan. Kuvissa 20 ja 21 lämpötila muuttaa suuntansa aina mutkan jälkeen, mikä viittaisi veden kerrostumiseen. Kuvassa 20 kerrostuminen voisi olla selitys suunnanmuutokselle, mutta kuvassa 21 lämpötila ei ole aina sama, kun valokuitu on säiliön pohjalla ja pinnalla. Kuvassa 20 vastaavasti lämpötila näyttää vaihtelevan tasaisesti. Kuvissa 20 ja 21, ennen ensimmäistä mutkaa valokuitu on vapaana venymään, jolloin lämpötila on melko tasainen. Heti ensimmäisen mutkan kohdalla lämpötila tekee kuitenkin muutoksen. Lämpötila säiliössä oli mittauksen aikana oletettavasti tasainen. Mittauksen jälkeen säiliön lämpötilaa mitattiin erillisellä termoelementillä, jolloin havaittiin, että säiliön pohjalla ja pinnassa oleva veden lämpötila oli lähes sama kuin keskellä säiliötä. Tämä poissulkee sen, että muutos tulisi veden kerrostumisesta.

Yleisesti kylmällä vedellä mitattaessa mittaustulokset ovat tasaisempia kuin kuumalla vedellä mitattaessa. Tähän saattaa vaikuttaa myös se, että lämpötilanmuutos oli pienempi kuin kuuman veden mittauksissa. Oletettavasti kylmempi vesi saa valokuidun kutistumaan, kun taas kuuma vesi laajenemaan. Yksi tarkoitus mittauksissa oli se, että saataisiin mahdollisimman suuri lämpötilan vaihtelu mittausten välille kuuman ja kylmän veden mittauksissa. Tällä pyrittiin tuomaan esille juuri venymän ja kutistuman tuomia ongelmia valokuitumittauksessa.

Valokuidun laajeneminen pystyisi selittämään PASI-mittauksissa tapahtuneen virheen ainakin osittain, koska alkuosuudella mittausvirhe on voinut kasvaa lämpötilan kasvaessa, kun valokuitu ei ole päässyt laajenemaan vapaasti. Kuitenkin valokuidun loppupäässä mittaukset ovat voineet olla tasaisia, koska valokuidun loppupää on mahdollisesti päässyt laajenemaan viimeisten mutkan yli, jolloin siihen ei syntyisi rasiusta. Tämä kuitenkin vaatisi sen, että valokuidun pää ei olisi ottanut vielä kiinni tulppaukseen, joka kapillaariputkessa oli. PASI-mittauksissa lämpötilat olivat myös huomattavasti korkeampia kuin näissä mittauksissa.

6 YHTEENVETO

Tässä työssä selvitettiin, kuinka valokuidulla voidaan mitata 1D-lämpötilajakaumaa ja millaisia valokuitumittaustekniikoita on olemassa sekä saada tietoa siitä, mitkä asiat vaikuttavat valokuitumittaukseen. Työssä kerrottiin myös, missä valokuitumittauksia on käytetty ja mitä rajoitteita mittauksissa tulee ottaa huomioon. Työssä tehtiin mittauksia HIPE-koelaitteiston vesisäiliössä ja saatuja mittaustuloksia analysoitiin ja lisäksi pohdittiin, kuinka mutkalle taitettu valokuitu vaikuttaa mittaustarkkuuteen. Mittausten pohjalta pohdittiin myös, mistä mahdolliset erot valokuitu- ja termoelementtimittausten välillä johtuvat. Tässä työssä tehdyt mittaukset haluttiin rajata mahdollisimman yksinkertaisiin valokuitumittauksiin. Työn aikana tuli kuitenkin esiin muutamia jatkokehitysideoita valokuitumittauksille, joita ei kuitenkaan voitu suorittaa maailmanlaajuisen COVID-19-taudin takia. Tässä työssä tehtyjen havaintojen pohjalta on mahdollista lähteä kehittämään valokuitumittaustekniikkaa sille tarkoitettuihin sovelluksiin.

Ennen tätä työtä toteutetuissa PASI-mittauksissa mittaukset otettiin pitkällä aikavälillä, jolloin ajan kuluessa ja lämpötilan noustessa valokuitumittaus alkoi näyttää suurempaa lämpötilaa kuin termoelementit. Tässä työssä tehdyissä kokeellisissa mittauksissa mittaukset otettiin mahdollisimman tasaisissa olosuhteissa ja näin pyrittiin saamaan tarkempia tuloksia siitä, kuinka tarkasti valokuitu pystyy mittaamaan lämpötilaa verrattuna termoelementteihin.

Kaikista tässä työssä tehdyistä mittauksista voidaan sanoa, että mittaukset ovat olleet melko tasaisia, mutta myös odottamattomia virheitä mittauksissa havaittiin. Yksi tällainen virhe oli, että valokuitu vaikuttaisi mittaavan aina hieman eri lämpötilaa kuin termoelementit, mutta kuitenkin joissain kohdissa mittaukset ovat samat. Tähän ei löytynyt yksiselitteistä syytä, miksi niin käy. Vertailuarvona käytettyjä termoelementtimittauksia verrattiin myös tarkkuuskalibrointilaitteeseen, joka näytti lähes samaa lämpötilaa kuin termoelementtimittaukset. Tämä poissulkee termoelementtien mittausrvirheet.

Tässä työssä tehdyt mittaukset keskittyivät lähinnä mutkien vaikutuksen havainnointiin. Vaikka mittauksissa valokuitu oli useilla mutkilla, ei tuloksista havaittu samanlaisuuksia PASI-mittausten tuloksiin verrattuna, eli sitä, että valokuitu mittaisi loppupäässä lämpötilan oikein. Valokuitujen mittaamat lämpötilat erosivat kaikissa mittauksissa maksimissaan 3-4 °C termoelementtimittauksista. Joissain kohdissa mittaukset vastasivat hyvin termoelementtimittauksiin. Tässä työssä tehdyt mittaukset poikkeavat PASI-mittauksista siten, ettei lämpötilaa vesisäiliössä nostettu hitaasti, vaan lämpötila oli tasainen koko mittauksen ajan. Tässä työssä ei ole vertailuarvoa sille, millainen mittaustulos olisi saatu, jos lämpötilaa säiliössä olisi nostettu tasaisesti. Yksi hyvä jatkosovellustestaus voisi olla se, että mittaisi suoralla valokuidulla ja termoelementeillä lämmitettävän vesisäiliön lämpötilaa. Tällöin voisi saada tietoa siitä, kasvaako virhe lämpötilan kasvaessa.

Tässä työssä tehdyissä mittauksissa tilallisena resoluutiona oli 0,65 mm. Käytetyllä mittalaitteella olisi ollut mahdollista mitata 2,6 mm:n tilallisella resoluutiolla, jolloin mittausten kohina olisi saattanut olla pienempi. Tätä kannattaakin testata tulevilla mittauksissa, mikäli kohina vaikuttaa liian suurelta.

Lopputuloksena voi todeta, että valokuitumittaus soveltuu hyvin lämpötilan muutosten mittaamiseen, mutta tarkkuus kannattaa tarkistaa esimerkiksi termoelementeillä. Teräskapillaariputkeen asetetun valokuidun mutkat eivät näytä näiden mittausten perusteella vaikuttavan tulokseen huomattavasti. Sen sijaan lämpötilan muutoksen suuruus voi vaikuttaa valokuidun mittaaman lämpötilan virheeseen. Työn aikana ei löytynyt järkevää selitystä sille, miksi PASI-mittauksissa valokuitumittaus näytti alussa lämpötilan väärin, mutta loppupäässä oikein. Mutkien vaikutuksellekaan ei löydetty järkevää syytä, joten lisää kokeellisia mittauksia tarvitaan.

LÄHDELUETTELO

Bao X., Chen L., 2012. Recent progress in distributed fiber optic sensors.

Cho Jintae, Kim Jae-Han, Lee Hak-Ju, Kim Ju-Yong, Song Il-Keun, Choi Joon-Ho 2014. Development and improvement of an intelligent cable monitoring system for underground distribution networks using distributed temperature sensing. *Energies* 7 (2014), 1076-1094.

Erdmann M., Dix J., Ellis D., Callender G., Pilgrim J., Rogers R., Lees G., Hansen H., Lucignano T. 2019. Towards active cable reburial monitoring using distributed fiber-optic sensing over 40 km of a high voltage marine interconnector.

Fernandez A., Rodeghiero P., Brichard B., Berghmans F., 2006. Radiation-tolerant Raman distributed temperature monitoring system for large nuclear infrastructures.

Gifford D., Soller B., Wolfe M., Froggatt M., 2005. Distributed fiber-optic temperature sensing using Rayleigh backscatter.

Inaudi D., Glisic B., 2007. Distributed fiber-optic sensing for long-range monitoring of pipelines.

Liehr S., Muanenda Y., Münzenberger S., Krebber K., 2018. Wavelength-modulated C-OTDR techniques for distributed dynamic measurement.

Lisowski D., Gerardi C., Lomperski S., 2015. Thermal cycling testing of distributed fiber optic temperature sensors for high-temperature applications. *Proceeding of NURETH-16*, Chicago, U.S., August 30-September 4, 2015.

Lomperski S., Bremer N., Gerardi C., Lisowski D., 2016. Performance assessment of a 50 m-long fiber optic distributed temperature sensor in a fluid dynamics experiment.

Lomperski S., Bremer N., Gerardi C., 2017. Distributed temperature sensing inside a 19-rod bundle. *Nuclear Engineering and Design* 319:1. 201-209.

Luna Innovation Inc., 2018. Luna User's guide ODiSI 6100.

Ounoufriou A., Kalli K., Pureur D., Mugnier A., 2006. Fiber bragg gratings. Teoksessa: Springer series in optical science.

Ylönen A., 2015. HIPE 1/2015 The HIPE test facility description. Research report. Lappeenranta University of Technology. Nuclear safety research unit.

Smolen J., Alex van der Spek, 2003. Distributed temperature sensing. A DTS Primer for oil & gas production.

Takada E., Kimura A., Jensen F., Nakazawa M., 1998. Journal of nuclear science and technology: Correction techniques of radiation induced errors for Raman distributed temperature sensor and experiment at the experimental fast reactor JOYO

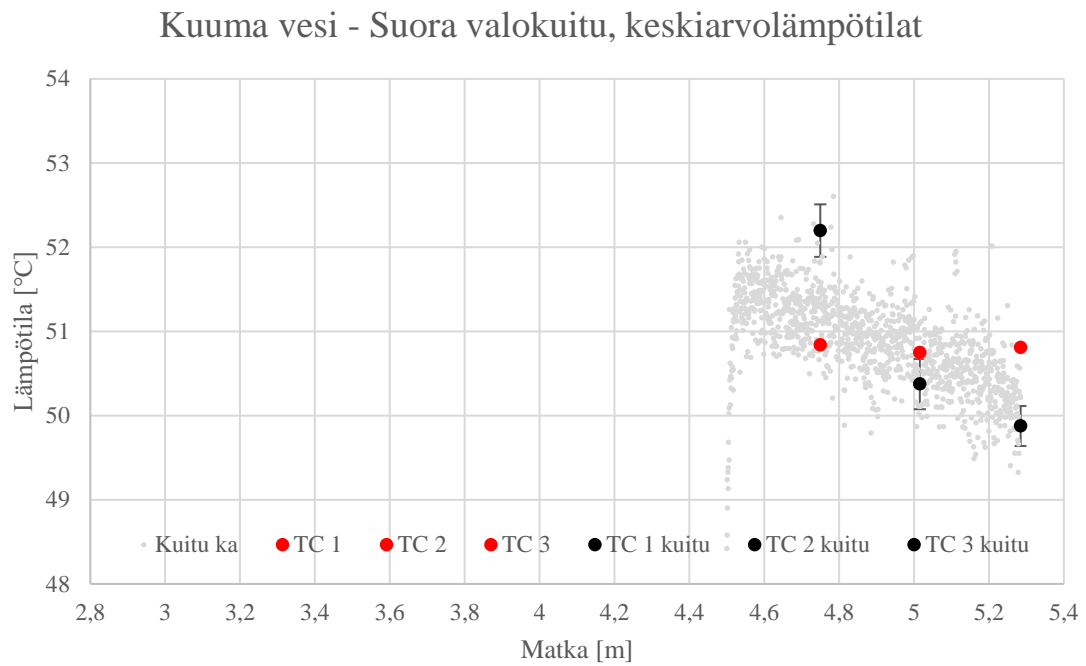
LIITE 1. MITTAUSTEKNIKKOJEN OMINAISUUKSIA

	DPP-BOTDA [91]	Brillouin Grating [105]	BOTDR [68]	Raman OTDR [30]	OFDR [3] Rayleigh	Phase OTDR [7] Rayleigh
Spatial resolution	2 cm (2 km) [32] 2 m (150 km) [93]	1–2 cm [114]	~1 m	0.4 m [30] 17 m [115]	~1 mm [10]	~0.5 m [56]
Sensing range	150–200 km	20 m	20–50 km ^a	900 m [30] 37 km [115]	~35 m [58]	1–2 km
Measurement time	2–5 min	10+ min	1–5 min	<3 min	(0.01–3) s	<1 ms
Temperature and strain	Yes	Yes	Yes	No	Yes	No
Temperature accuracy	1–2 °C [32,93]	1 °C	2–3 °C	0.8 °C [30] 3 °C [115]	0.1 °C [111]	No
Strain accuracy	20 µε	10 µε	60 µε	No	1 µε [11]	No
Dynamic measurement	yes	No	No	No	30 Hz [111]	Yes 8 kHz [116]
Calibration	Determined by fiber property	Determined by fiber property	Determined by fiber property	Relative measurement	Reference is needed for every measurement	Relative measurement
Light source requirement	Two DFB lasers [117] (frequency locking of two lasers is required)	Three lasers (frequency locking of two lasers is required)	One narrow linewidth laser	One high power laser	One narrow linewidth tuneable laser	One narrow linewidth laser
Detectors	Broadband [32]	Broadband	High sensitivity	High sensitivity	High sensitivity	High sensitivity
Detection scheme	Direct	Direct	Coherent	Direct	Coherent	Coherent [56] Direct [116]

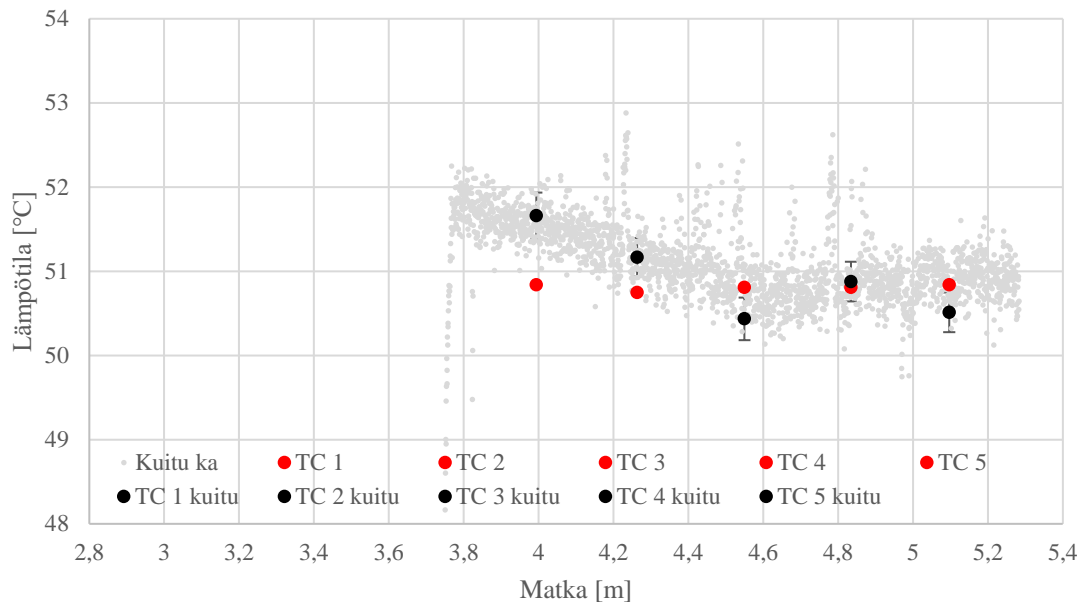
(Bao & Chen 2012, 31)

LIITE 2. MITTAUSTULOSTEN KESKIARVOLÄMPÖTILA KUVAAJAT

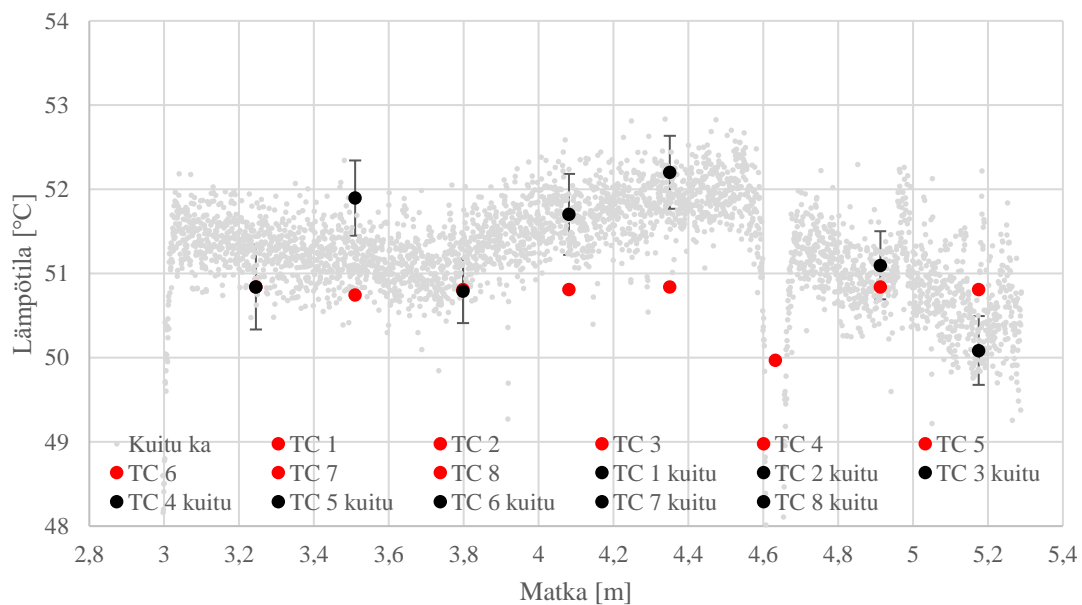
Kaikki kuvaajat ovat esitetty kronologisessa järjestyksessä.



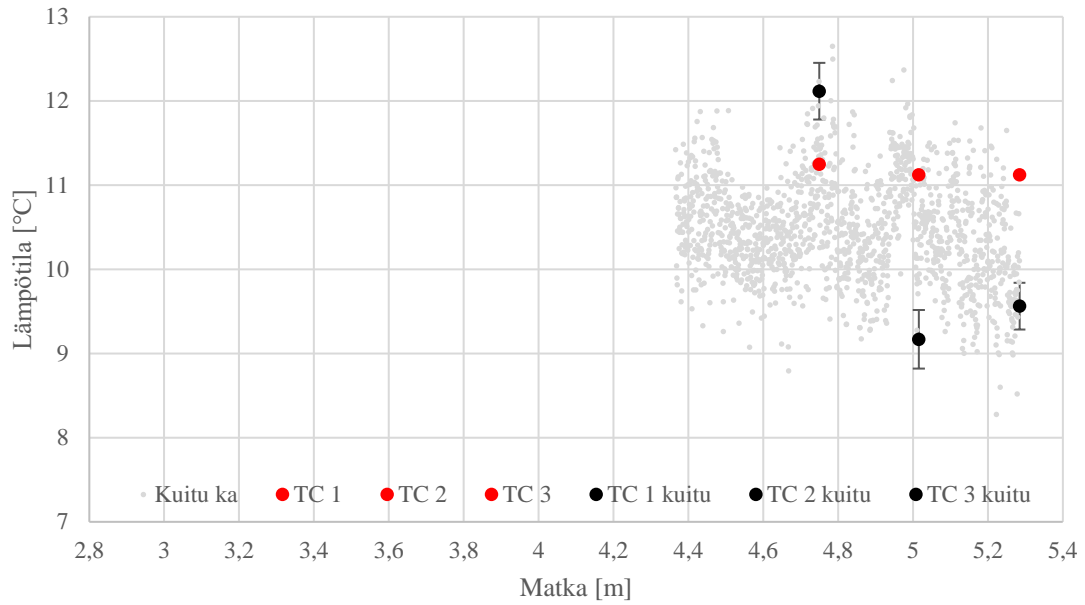
Kuuma vesi - U-mutka-valokuitu, keskiarvolämpötilat



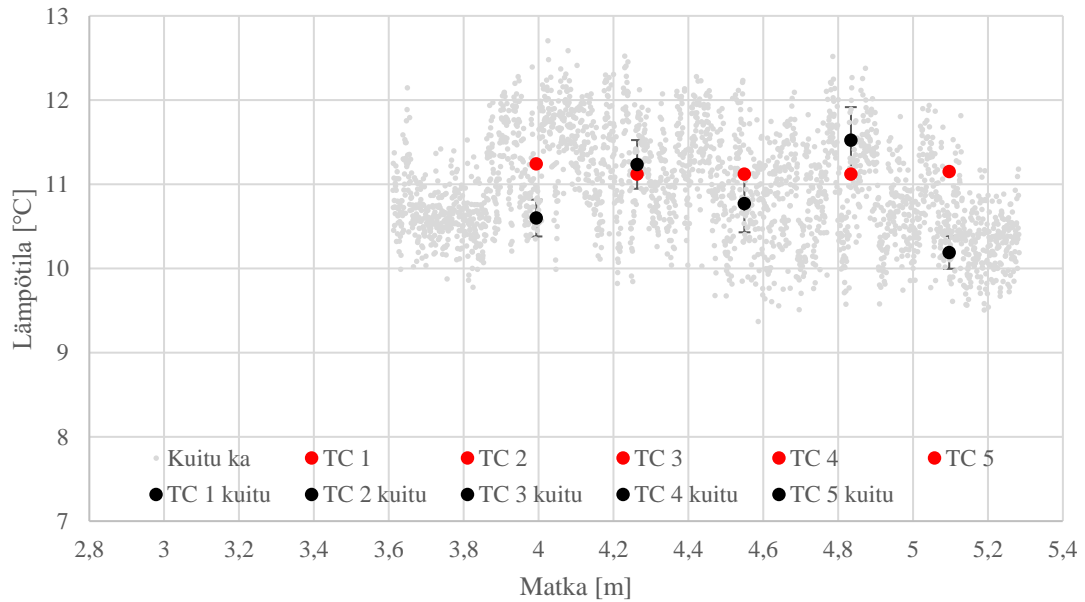
Kuuma vesi - 2 U-mutkan valokuitu, keskiarvolämpötilat



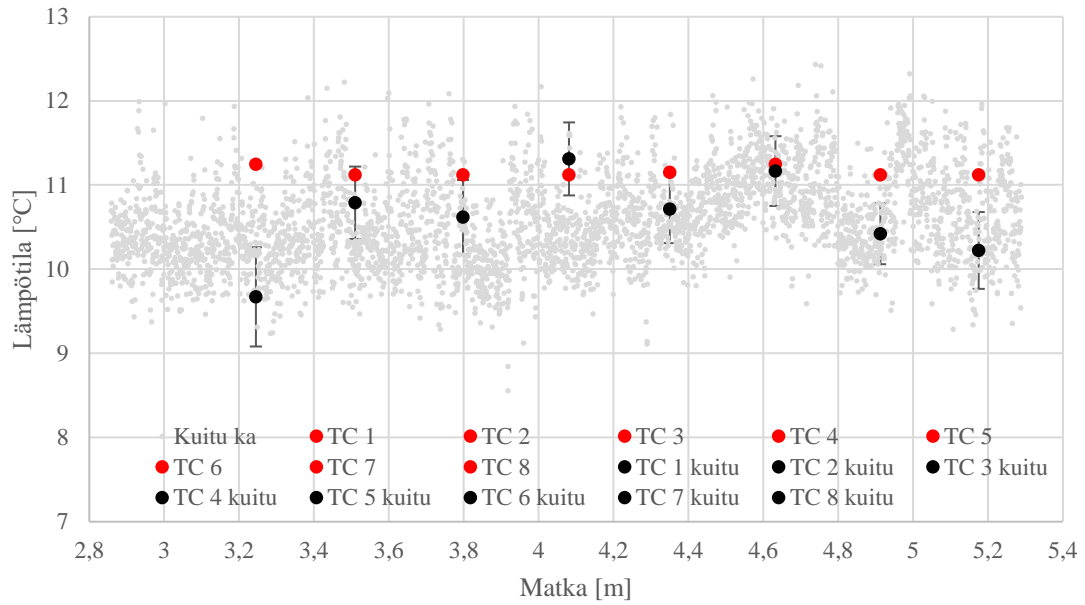
Kylmä vesi - Suora valokuitu, keskiarvolämpötilat



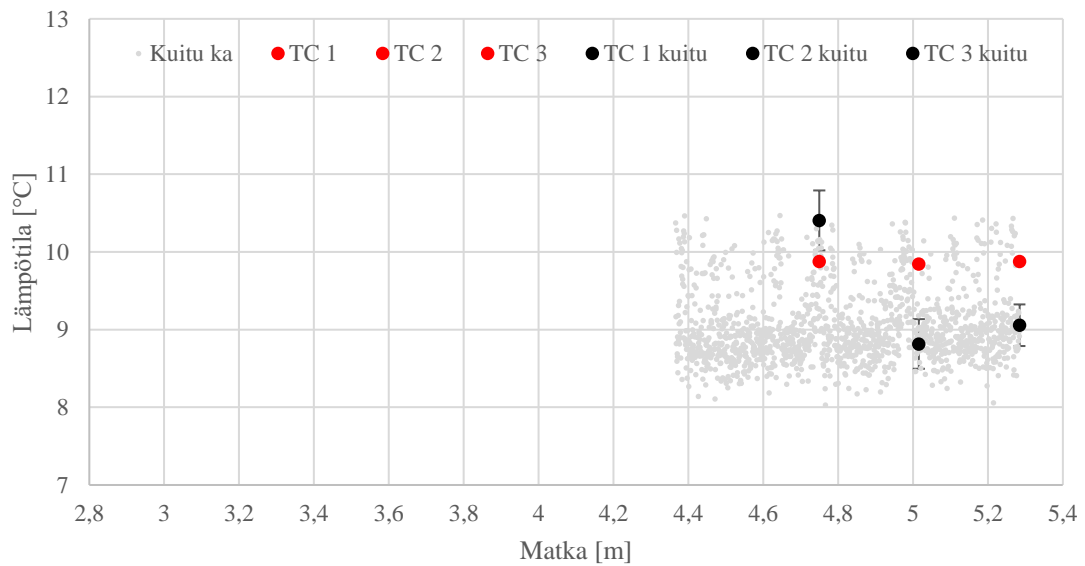
Kylmä vesi - U-mutka-valokuitu, keskiarvolämpötilat



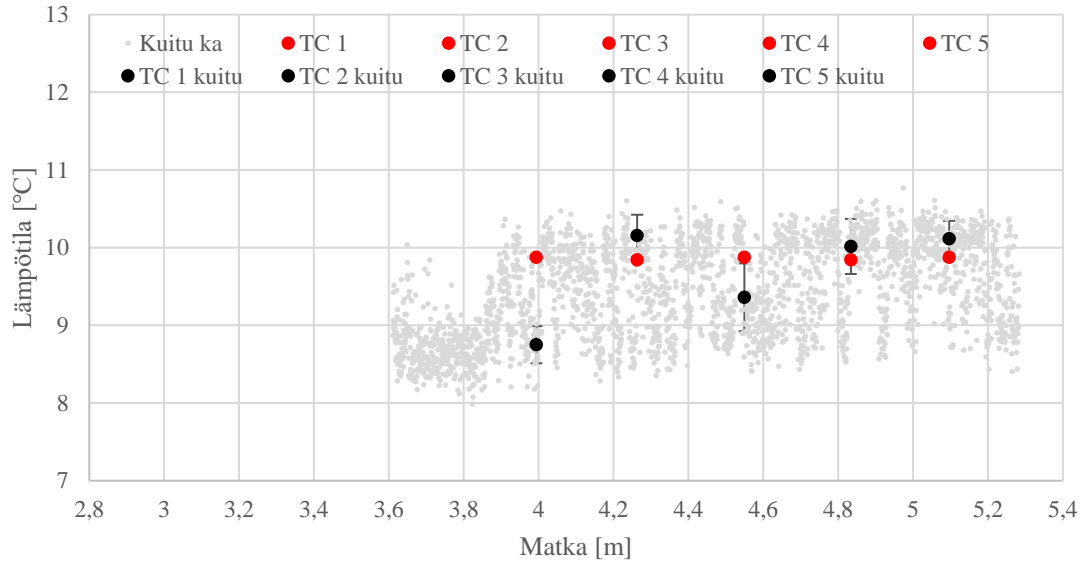
Kylmä vesi - 2 U-mutkan valokuitu, keskiarvolämpötilat



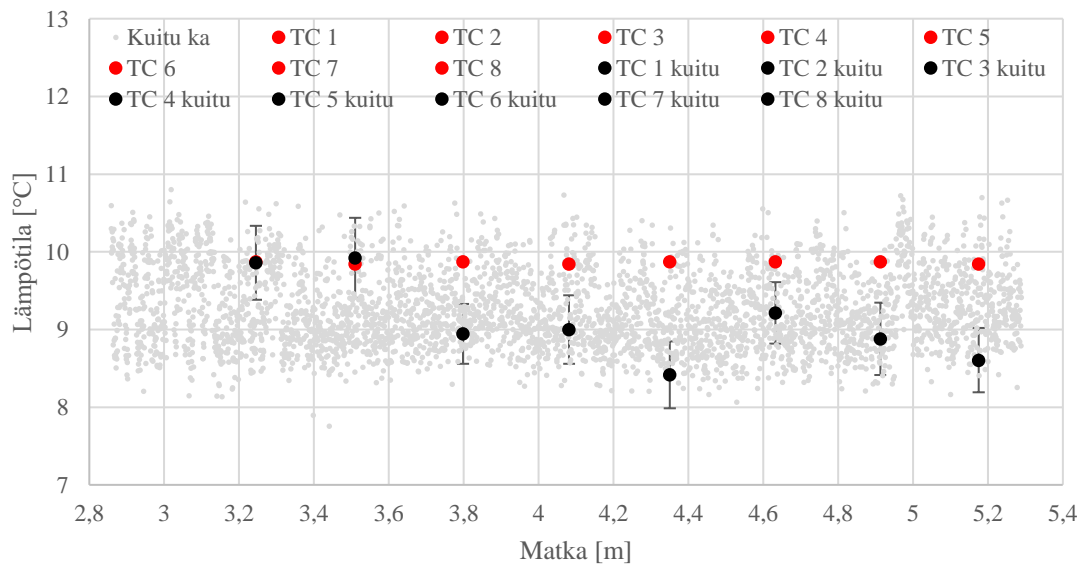
Kylmä vesi uusi mittaus - Suora valokuitu, keskiarvolämpötilat



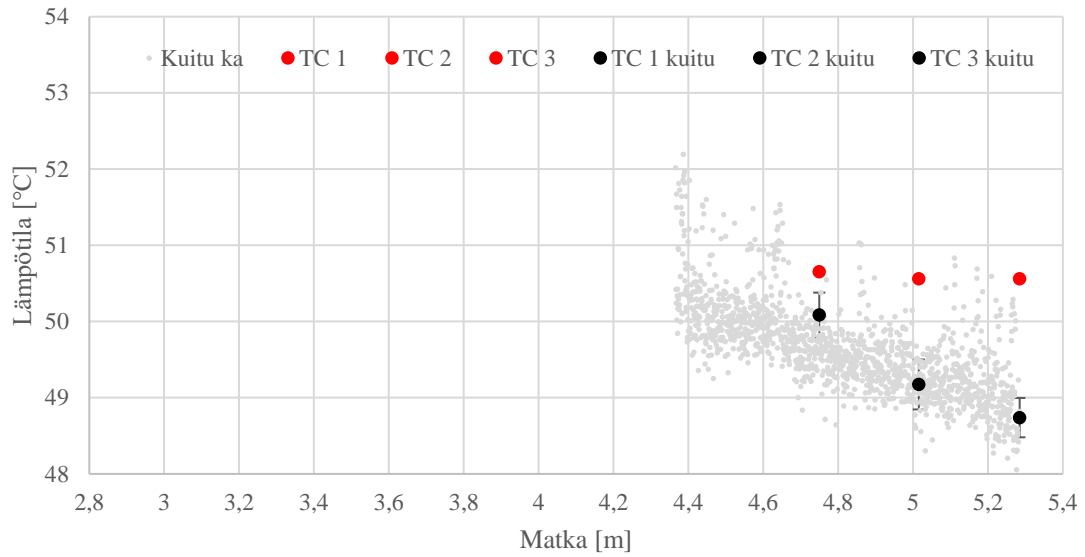
Kylmä vesi uusi mittaus - U-mutka-valokuitu, keskiarvolämpötilat



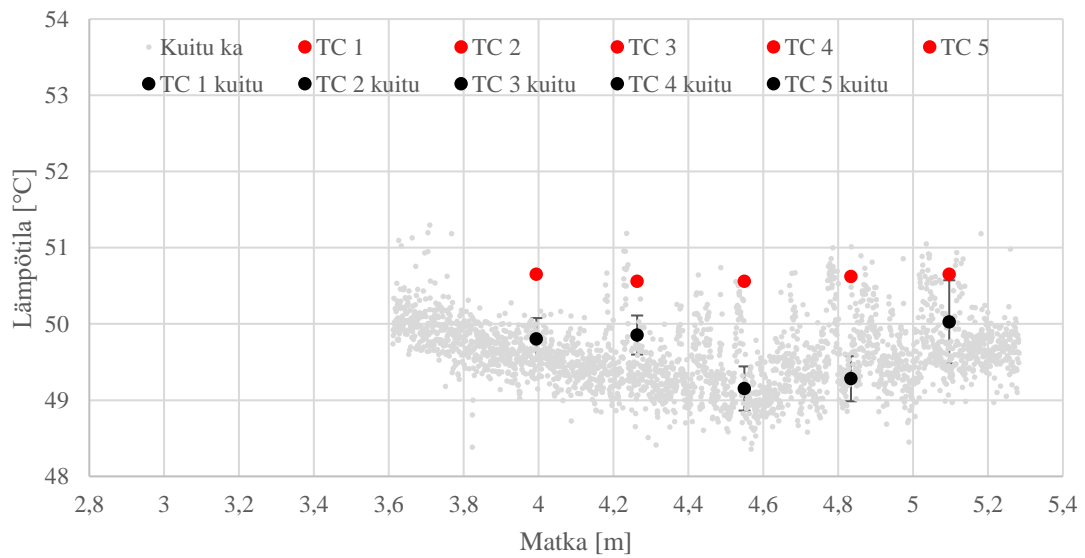
Kylmä vesi uusi mittaus - 2 U-mutkan valokuitu, keskiarvolämpötilat



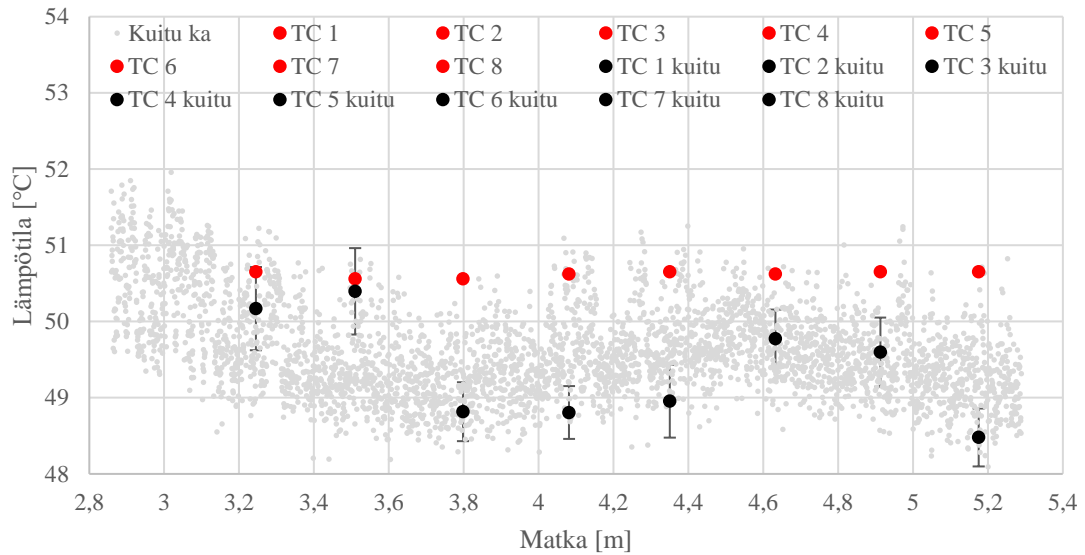
Kuuma vesi uusi mittaus - Suora valokuitu, keskiarvolämpötilat



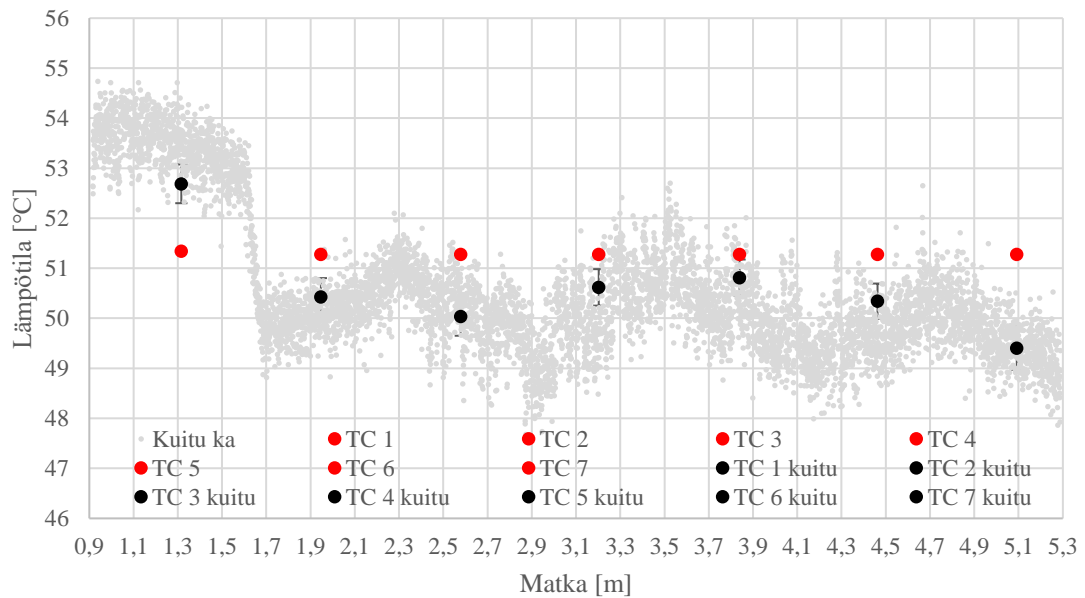
Kuuma vesi uusi mittaus - U-mutka-valokuitu, keskiarvolämpötilat



Kuuma vesi uusi mittaus - 2 U-mutkan valokuitu, keskiarvolämpötilat



Kuuma vesi pitkä valokuitu - Keskiarvolämpötilat



Kylmä vesi pitkä valokuitu - Keskiarvolämpötilat

