

Timo Ekström

# DTS-mittalaitteen käyttöönotto energiakaivoissa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Talotekniikka

Insinöörityö

6.11.2017

Tekijä Otsikko  Sivumäärä Aika	Timo Ekström DTS-mittalaitteen käyttöönotto energiakaivoissa 32 sivua + 1 liite 6.11.2017
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	talotekniikka
Ammatillinen pääaine	LVI, suunnittelupainotteinen
Ohjaaja	yliopettaja Aki Valkeapää
<p>Insinööriyössä oli tavoitteena tuottaa ohje DTS-mittalaitteen käyttöönottoon, esitellä DTS-mittalaitteen toimintaa ja sen toiminnan periaatteita, sekä dokumentoida mittauskaapelien asennus työssä esiteltävään rakenteilla olevaan kohteeseen.</p> <p>Energiakaivojen toiminnan seuraaminen on tärkeää niiden toimivuuden varmistamiseksi. Energiakaivojen seurantatapoja on erilaisia, joista tässä työssä keskityttiin DTS-mittaukseen, eli distributed thermal sensing – mittaukseen. Mittaustapa saa nimensä sen kyvystä mitata lämpötilaa koko sensorina toimivan valokuidun matkalta, mikä on hyödyksi energiakaivojen lämpötilajakauman ja sen eri kerrosten toiminnan selvittämisessä ja seuraamisessa.</p> <p>DTS-mittauksen ymmärtäminen vaatii taustojen ymmärtämistä sekä energiakaivoista, että valokuiduista ja valon ominaisuuksista. Tässä työssä näitä osa-alueita käydään läpi sekä yleisestä näkökulmasta että mittalaitteen käytön näkökulmasta.</p> <p>Osana tätä työtä tuotettiin ohje DTS-mittalaitteen käyttöönottoon, jota voidaan hyödyntää opetus ja tutkimuskäytössä. Itse ohje tehtiin lyhyenä ja mahdollisimman helposti seurattavana kokonaisuutena. Tämän lisäksi työssä käydään erikseen tarkemmin läpi jokainen käyttöönoton vaihe työn tekstiosassa, sekä laitteen kalibrointiin ja sen tarkkuuteen vaikuttavat tekijät.</p>	
Avainsanat	energiakaivo, DTS-mittaus

Author Title	Timo Ekström Deployment of a DTS-measuring device in an energy well system
Number of Pages Date	32 pages + 1 appendix 6 November 2017
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Building Services Engineering
Specialisation option	HVAC Engineering, Design orientation
Instructor	Aki Valkeapää, Principal lecturer
<p>The purpose of this bachelor's thesis was to produce a manual for the initial configuration of a distributed temperature sensing (DTS) measuring device in an energy well environment, introduce the operation principles of DTS technology and energy wells, and explain the benefits of measuring the temperature of an energy well. The cable installation of an energy well was performed and documented as part of the final year project.</p> <p>Since it is important to understand the principles of energy wells and DTS measurement to operate a DTS measuring device properly, the principles were introduced in the thesis. The thesis included a short and easy-to-follow manual for the initial configuration and calibration of a DTS measuring device. Additionally, a more in-depth look of all the parameters was given in the main text.</p> <p>The manual is aimed to be used in educational situations to aid both the teachers and the students of Metropolia University of Applied Sciences to perform test measurements with the energy well that was installed during the making of this thesis. This whole project can also be used as a starting point for further studies that will be performed with the same energy well system.</p>	
Keywords	energy well, DTS-measurement

## Sisällys

### Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Energiakaivot	2
2.1	Geoenergia	2
2.2	Energiakaivojen rakenne ja toiminta	3
2.3	Energiakaivojen suunnittelu	5
2.4	Energiakaivojen mittaustavat	6
3	DTS-mittaus	7
3.1	Mittalaite	7
3.2	Kuitutyypit ja niiden ominaisuudet	8
3.3	Takaisinsironta	11
3.4	Mittauksen teoreettiset lähtökohdat	14
3.5	Teoreettista tarkastelua	17
4	Kaapeliasennukset ja niiden dokumentointi	18
4.1	Kohde	18
4.2	Mittausjärjestelyt	19
4.3	Kaapelinlasku	20
5	DTS-laitteen käyttöönotto	22
5.1	Acquisition time, kalibrointitiedon keruu-aika	23
5.2	Length correction, Stokes ja anti-stokes käyrien kohdistaminen	24
5.3	Measurement range, mittausalueen pituus	26
5.4	Differential loss configuration, vaimennuseroavaisuuksien huomiointi	27
5.5	Temperature offset, lämpötilan kohdistus	27
5.6	Spatial averaging, pehmennysväli	28
5.7	Measurement time, mittausaika	28
5.8	Repetition time, mittauksen toistoväli	29
6	Yhteenveto	30
	Lähteet	31

Liitteet

Liite 1

Sensornet Halo DTS, käyttöönotto-ohje

## 1 Johdanto

Energiakaivolla kerätään energiaa maasta, jolloin kaivoa ympäröivä maa viilenee. Kaivojen väärä mitoitus voi johtaa maaperän lämpötilan laskuun, jolloin kaivosta lämpöä ottavan lämpöpumpun hyötysuhde pienenee. Kaivoa ympäröivän maaperän viileneminen voi johtaa erilaisiin ongelmiin lämmönkeruusyhteisöissä. Se voi esimerkiksi laskea saatavaa lämpötehoa ja aiheuttaa keruuputkien jäätymisen. Energiakaivosta saatavan energian määrä on riippuvainen muun muassa maaperän lämmönjohtavuudesta, kaivon syvyydestä, virtaavasta pohjavedestä, keruuputkistosta sekä lämmönkeruunesteestä.

Maaperän lämmönjohtavuutta on mahdollista selvittää jo energiakaivojen suunnitteluvaiheessa termisellä vastetestillä eli TRT-mittauksella. TRT-mittauksessa porataan koe-reikä alueelle, jonne kaivo halutaan rakentaa. TRT-mittauksesta saadaan määritettyä maaperän lämmönjohtokyky, kaivon keskilämpötila sekä kaivossa esiintyvä vastus. Näistä tiedoista määritetään kaivojen mahdollinen lukumäärä sekä optimaalinen syvyys. TRT-mittaus ei kuitenkaan anna tietoa varsinaisen käytön aikaisesta toiminnasta energiakaivossa ja sen ympäristössä, eikä myöskään tietoa lämmön jakautumisesta kaivon syvyydelle. [1]

Energiakaivojen toiminnan käytönaikaiseen tarkkailuun voidaan käyttää niin kutsuttua DTS-mittausta (distributed thermal sensing). DTS-mittaus on optinen mittaustapa, joka perustuu valon takaisin sirontaan optisessa lasikuitukaapelissa. [2] DTS-mittauksessa käytettävä lasikuitukaapeli toimii lineaarisena sensorina koko pituudeltaan ja mahdollistaa näin energiakaivon lämpötilan mittaamisen samanaikaisesti koko kaivon syvyydeltä, sekä lämpötilojen tarkastelun etäisyysarvoa kohden mittauksessa käytettävien väleiden. DTS-tekniikalla voidaan tarkkailla energiakaivon lämpötilojen ja lämpötilajakauman muuttumista esimerkiksi kuukausitasolla.

DTS-mittausta voidaan energiakaivojen lämpötilan tarkkailun lisäksi hyödyntää esimerkiksi pitkien tunneleiden vuotoputkien tarkkailussa, jossa putken alle asennettava lasikuitukaapelilla havaitaan lämpötilan muuttuminen ja näin mahdolliset vuodot. Tekniikkaa, johon DTS-mittaus perustuu, on käytetty perinteisemmin venymän tai rasituksen mittaamiseen esimerkiksi suurissa pato-rakennelmissa, tutkittaessa lentokoneiden sii-

pien kestävyyttä sekä mahdollisten vikojen havaitsemisessa suurissa sähkö- ja tiedon- siirtolinjoissa [3]. Samaa tekniikkaa käytetään myös öljy- ja kaasuteollisuudessa, jossa menetelmän sähköttömyydestä sekä lasikuitukaapelin luonnollisista ominaisuuksista on hyötyä [4]. Kaikissa näissä tilanteissa hyödynnetään mittaustekniikan kykyä havaita ja paikantaa muutoksia mitattavassa suureessa etäisyyden funktiona.

Tämä opinnäytetyö tehdään Metropolian ammattikorkeakoululle osana tutkimus- ja ope- tuskäyttöön tarkoitetun energiakaivon asennusta Metropolian Myllypuron kampukselle. Opinnäytetyön tavoite on perehtyä DTS-mittaamisen periaatteisiin, tuottaa lyhyehkö ja helppokäyttöinen ohjeistus yhden kaupallisen DTS-mittalaitteen (Sensornet Halo DTS) käyttöönottoon sekä dokumentoida kaivon tehtävä kaapeliasennus.

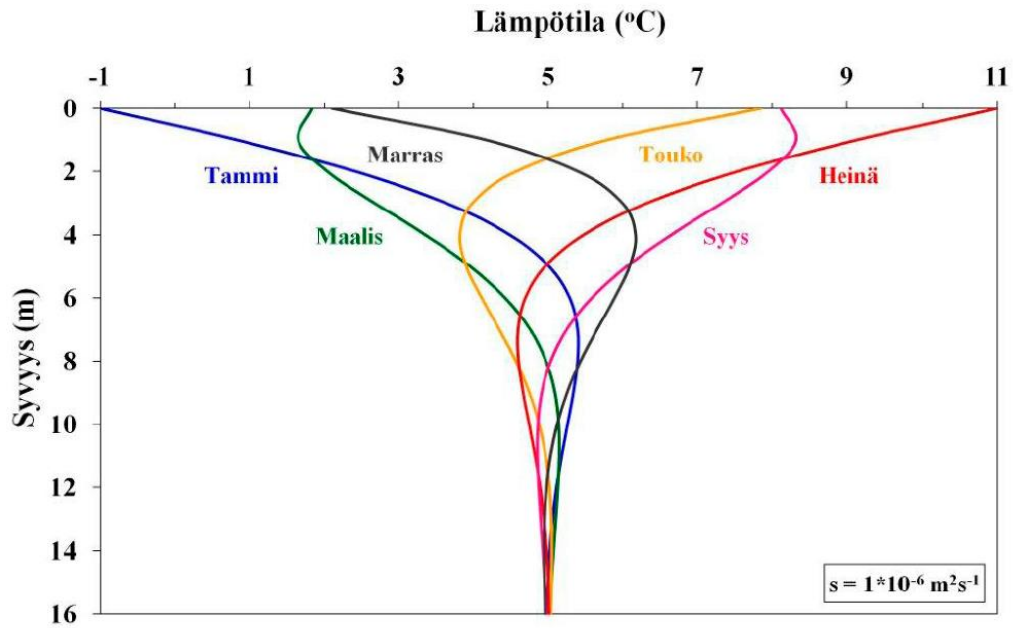
Tässä työssä käydään ensin läpi tarvittavat taustat DTS-mittaamisen periaatteiden ym- märtämiseksi, minkä jälkeen perehdytään tarkemmin koekaivon DTS-mittalaitteeseen, kaivon kaapeliasennukseen ja mittalaitteen käyttöönotto-ohjeeseen.

## **2 Energiakaivot**

Ennen siirtymistä DTS-mittaamiseen on syytä tutustua mittauksen kohteeseen. Tässä luvussa käydään läpi energiakaivoihin liittyvää teoriaa ja taustaa sekä syitä siihen, miksi energiakaivojen lämpötilakäyttäytymistä halutaan seurata.

### **2.1 Geoenergia**

Geoenergia on maahan varastoitunutta maan ytimeistä ja auringosta peräisin olevaa energiaa. Geoenergiasta mielenkiintoisen energiamuodon tekee se, että sitä on saata- villa lähes kaikkialla ja sen hyödyntäminen on perinteisiin energiamuotoihin (öljy, kauko- lämpö ja sähkö) verrattuna vähäpäästöisempää. Maanpinnan lämpötila pysyy tasaisena ympäri vuoden noin 10–16 metrin syvyydestä alaspäin [5, s. 8], mikä tekee geoenergi- asta tasaisen energianlähteen myös läpi vuoden. Maanpinnan kuukausittaiset lämpötilan vaihtelut on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Maaperän lämpötilan vaihtelu kaukaisittain [5, s. 8].

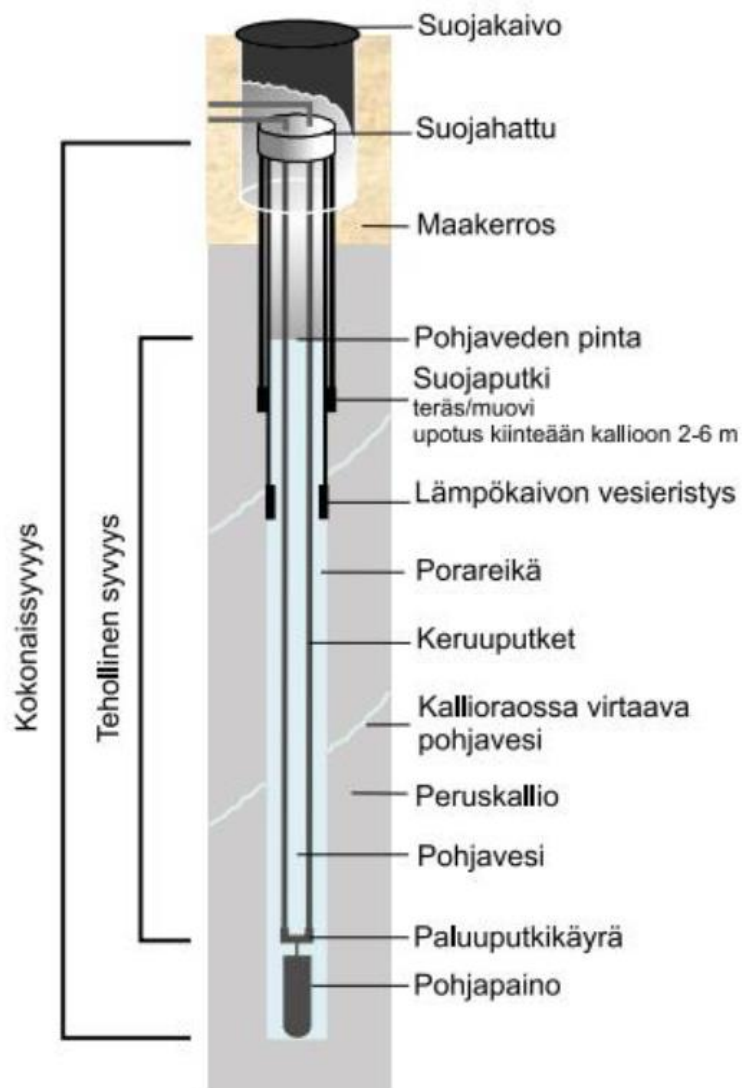
Geoenergijärjestelmällä on mahdollista tuottaa jopa viisinkertainen määrä energiaa järjestelmän itse kuluttamaan energiaan verrattuna [5, s. 11–14].

Geoenergiaa on mahdollista hyödyntää kahdella tavalla: maakeruupiirillä tai energiakaivoilla. Tässä työssä esitellään tarkemmin vain energiakaivoja, joissa DTS-mittausta on mahdollista hyödyntää.

## 2.2 Energiakaivojen rakenne ja toiminta

Energiakaivo koostuu yleensä noin 120–300 metriä syvään reikään asennettavasta keruuputkistosta, sekä maakerroksen osalta reikää suojaavasta suojaputkesta. Keruuputkisto upotetaan kallioreiässä pohjaveteen, mikä on oleellinen osa kaivon toimintaa ja lämmön siirtymistä. Kaivon pohjaveden alapuolista osaa kutsutaan kaivon teholliseksi syvyydeksi. Energiakaivon tyypillinen rakenne näkyy kuvassa 2.





Kuva 2. Energiakaivon rakenne [6, s. 35]

Suomessa energiakaivot toteutetaan suljettuina systeeminä tyypillisesti yhdellä keruuputkistolla (U-putki), mutta kahden U-putken järjestelmä sekä koaksaali-putkijärjestelmät ovat myös mahdollisia ratkaisuja. Kaivon toimintaa on mahdollista tehostaa esimerkiksi kasvattamalla putkipinta-alaa ja pitämällä putket kaivossa mahdollisimman erillään toisistaan.

### 2.3 Energiakaivojen suunnittelu

Energiakaivojen suunnittelun tavoitteena on kestävästi toimiva energiakaivo tai monen kaivon energiakenttä. Huolellinen suunnittelu vaatii kaivon lähialueen kallioperän ominaisuuksien perusteellista tuntemista. Pahimmassa tapauksessa väärin suunnitellun tai käytetyn energiakaivon energiantuotanto voi tyrehtyä kokonaan maaperän kylmenemisen vuoksi. Lisäksi jäätyvä kaivo voi vahingoittaa lämmönkeruuputkistoa ja päästää lämmönkeruunestettä vuotamaan ympäristöön. Jäätyminen myös hidastaa virtausta kaivossa, jolloin lämmön siirtyminen heikkenee edelleen. Jäätyneet kaivot ei sulata helposti ja kerran jäätyneet kaivot todennäköisesti jäätyvät uudelleen.

Maaperän kylmeneminen johtuu aina pohjimmiltaan siitä, että maasta otettava teho on maan latautumistehoa suurempi. Tällaiseen tilanteeseen voivat johtaa esimerkiksi usean kaivon sijoittaminen liian lähelle toisiaan tai liian matalaksi jäänyt kaivo. Kaivon toimintaa voidaan tarkkailla seuraamalla sen lämpötilakehitystä ajan kuluessa. [5, s. 13; 7.]

Oikein mitoitetuissa kaivossa keruunesteen lämpötila pysyy riittävän korkealla tasolla. Tällöin myös lämpöpumpun lämpökerroin pysyy hyvänä, mikä taas vaikuttaa suoraan käyttökustannuksiin.

Suunnitteluvaiheessa kaivon tavoiteltava maksimisyvyys määritetään muun muassa seuraavista tekijöistä:

- Rakennuksen energiantarve
- Mitoitetaanko kaivo osa- vai täysteholle?
- Onko käytössä täydentävä lämmitysjärjestelmä?
- Kallioperän ominaisuudet
- Kivilajien ominaisuudet
- Alueen lämpötilataso
- Maapeitteen paksuus
- Pohjaveden pinnan korkeus.

Yksinkertaistettuna energiakaivosta saatava teoreettinen jatkuva lämpöteho voidaan laskea kaavalla 1. [7, s. 29]

$$Q = \frac{2\pi\lambda H(T_0 - T_b)}{\ln\left(\frac{H}{d}\right)} \quad (1)$$

jossa H on kaivon syvyys

$T_0$  on maanpinnan keskimääräinen lämpötila

$T_b$  on keruunesteen keskimääräinen lämpötila

d on kaivon halkaisija

## 2.4 Energiakaivojen mittaustavat

Energiakaivoja voidaan pääsääntöisesti tutkia kahdella eri tavalla: TRT- ja DTS-mittauksella.

TRT-mittauksella voidaan selvittää maaperän termiset ominaisuudet syöttämällä lämpöä koereikään tai varsinaiseen kaivoon ja tarkkailemalla, kuinka hyvin kallioperä vastaanottaa lämpöä. Mitä parempi lämmönjohtavuus kaivossa on, sitä paremmin lämpötilan nousu siinä tasoittuu. TRT-mittaus tehdään usein jo energiakaivon suunnitteluvaiheessa [8], sillä sen tulosten perusteella voidaan tarkemmin suunnitella ja mitoittaa energiakaivo. TRT-mittauksen tuloksista saadaan tulkittua kaivon tehollinen lämmönjohtavuus (W/mK), sekä kaivon lämpövastus (mK/W). Arvot ovat kaivoa ympäröivän maaperän keskiarvoja, jotka sisältävät mahdolliset pohjaveden liikkeen vaikutukset sekä huomioivat kaivon konfiguraation. TRT-mittauksessa saatetaan huomata ennakkotiedoista poikkeavia asioita, kuten kivilajin vaihtuminen syvemmällä kaivossa. TRT-mittauksesta saatujen tietojen pohjalta voidaan myös mallintaa energiakaivo tarkempaa tarkastelua varten. [7, s. 35–40.]

DTS-mittauksessa voidaan optisella kuidulla mitata ja seurata pidempiaikaisesti kaivon lämpötilaa. DTS-mittauksista voidaan myös käyttää TRT-mittauksen yhteydessä paikantamaan pohjaveden virtausta energiakaivossa. DTS-mittaukseen tutustutaan tarkemmin seuraavassa kappaleessa.

### 3 DTS-mittaus

DTS-mittaus eli distributed thermal sensing saa nimensä sen kyvystä havaita muutoksia lämpötilassa koko mittauksessa käytettävän optisen kuidun matkalla. Se perustuu samoihin periaatteisiin kuin valokaapelitutka eli OTDR (Optical Time Domain Reflectometer), jota käytetään laajalti tiedonsiirtoon käytettävien valokaapelien ominaisuuksien, kuten vaimenemisen, sijaintikohtaiseen mittaamiseen. [9]

OTDR- ja DTS -mittaukset perustuvat siis molemmat valon etenemiseen ja käyttäytymiseen optisessa kuidussa. Seuraavissa kappaleissa käydään läpi tarkemmin DTS-mittauksen taustalla olevia ilmiöitä ja mittausmenetelmän periaatteita.

#### 3.1 Mittalaite

DTS-mittaukseen tarkoitettuja mittalaitteita ja mittalaittejärjestelmiä on markkinoilla kohtuullisesti. Tässä opinnäytetyössä käytössä oli Sensornet Halo DTS -mittalaite (kuva 3), joka on tarkoitettu teollisuuden mittaus- ja monitorointikäyttöön. Seuraavissa luvuissa käsiteltävät mittauksen periaatteet pätevät kuitenkin lähes kaikkiin mittalaitteisiin. Halo DTS:n käyttöliittymänä on Windows ja laitteessa on valmiiksi asennettuina kaikki mittaukseen ja monitorointiin tarvittavat sovellukset ja sensorit. Työssä käytetyssä mallissa on neljä erillistä kanavaa, jotka mahdollistavat monenlaisia mittausjärjestelyjä.

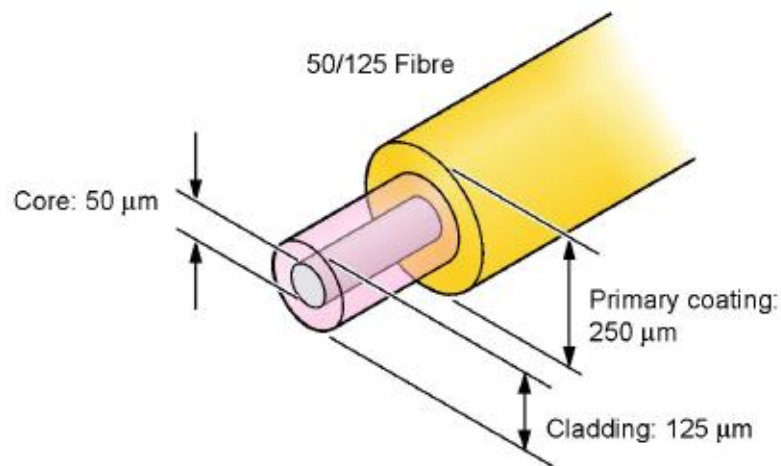


Kuva 3. Sensornet Halo DTS

### 3.2 Kuitutyypit ja niiden ominaisuudet

DTS-mittalaite sisältää laser-lähtetimen ja sensorit palaavan valon vastaanottoon. Näiden lisäksi mittaamiseen tarvitaan reitti, jota pitkin valo pääsee kulkemaan mitattavassa kohteessa. Tätä virkaa mittausjärjestelmässä hoitaa optinen valokuitukaapeli.

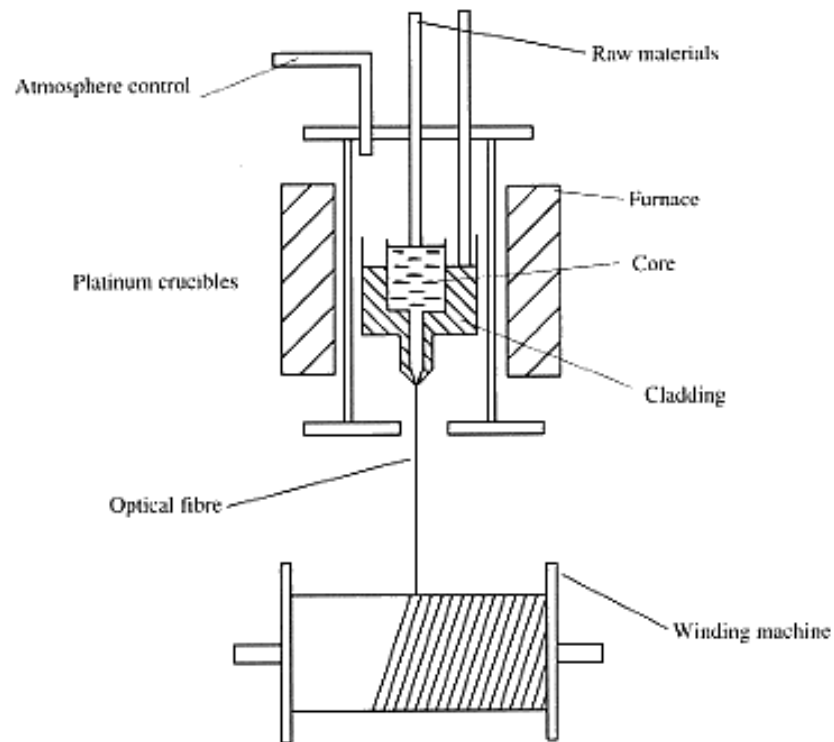
Optiset kuidut tehdään useimmiten päällystetystä piidioksidista ( $\text{SiO}_2$ ), eli kvartsista, jota voidaan tarpeen mukaan kyllästää esimerkiksi germaniumilla (Ge) taittokertoimien muokkaamiseksi. Piidioksidista valmistetut kuidut tarjoavat hyvän tiedonsiirron useilla aallonpituuksilla, ja ne ovat siksi toimivia monissa sovelluksissa. [10]



Kuva 4. Optinen kuitu 50/125 µm [11, s. 15]

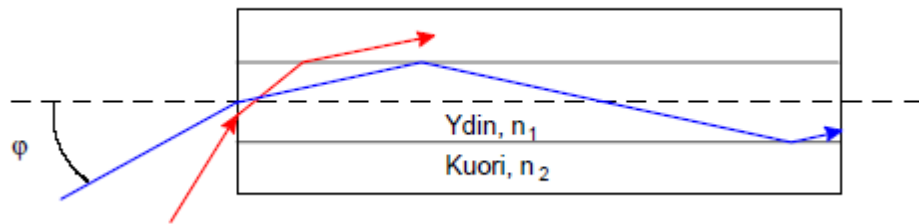
Kuten kuvassa 4 on esitetty, optinen kuitu koostuu ytimestä, ydintä ympäröivästä kuoresta sekä suojaavasta pinnoitteesta.

Optinen kuitu valmistetaan tyypillisesti sulattamalla ontto kaasuseoksella täytetty lasiputki ja venyttämällä siitä vaadittuun halkaisijan kokoon (kuva 5).



Kuva 5. Optisen kuidun valmistusprosessi [10]

Optisessa kuidussa ydin ja sitä ympäröivä kuori omaavat eri taitekertoimen. Kun kuituun tulevan valon kulma on tarpeeksi pieni, tapahtuu ytimen ja kuoren välisessä pinnassa kokonaisheijastus, jonka seurauksena valo pääsee etenemään kuidussa. Valon heijastuminen kuidussa on esitetty kuvassa 6. [11, s.16; 12, s. 17] Tyypilliset taitekertoimet eli refraktioindeksit kuiduissa ovat noin 1,47 kuidun ytimelle ( $n_1$ ) ja noin 1,46 sitä ympäröivälle kerrokselle ( $n_2$ ). Näillä arvoilla kokonaisheijastus tapahtuu 83,3 asteen kulmassa. [13, luku 2, s. 7.]



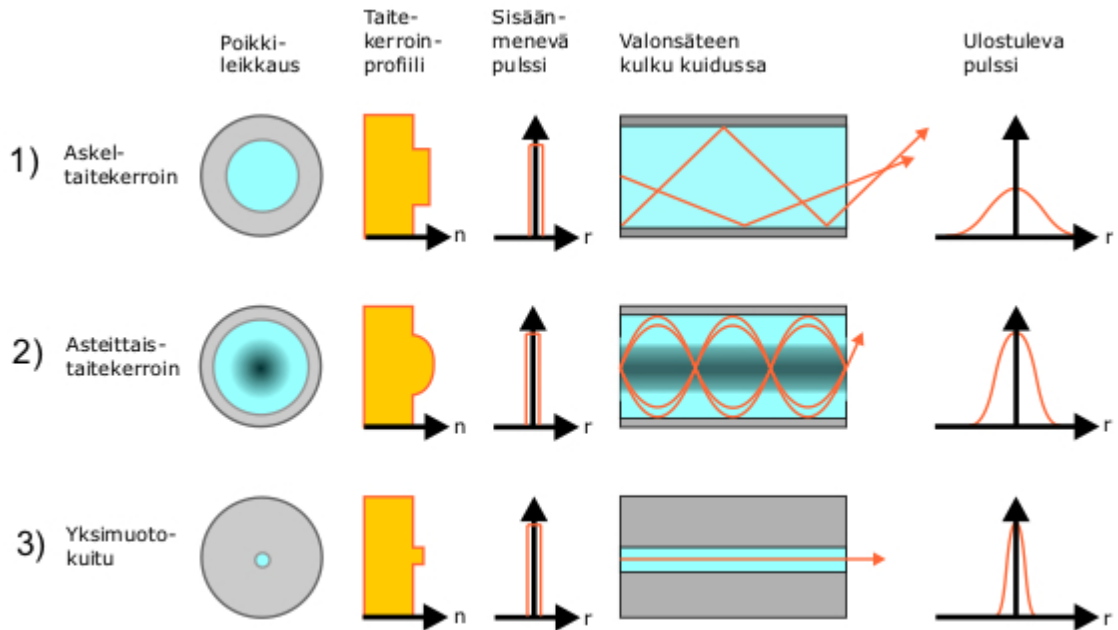
Kuva 6. Valon heijastuminen kuidussa. [12, s. 17]

Optiset kuidut jaetaan kahteen pääryhmään: monimuotokuituihin ja yksimuotokuituihin. Monimuotokuiduissa ydin on käytetyn valon aallonpituutta huomattavasti suurempi, ja siitä johtuen kuidussa etenee monta eri muotoa. Muoto tarkoittaa tässä yhteydessä matemaattista ja fysikaalista esitystapaa elektromagneettisten aaltojen etenemiseen väliaineessa. Kaikessa yksinkertaisuudessaan muoto voidaan kuvailla mahdollisena reittinä, jota valo voi kuidussa edetä. Monimuotokuiduissa valolla on siis monta mahdollista kulureittiä kuidun päästä toiseen.

Monimuotokuiduissa käytetyt ytimen halkaisijat ovat yleisimmin 50, 62,5 ja 100  $\mu\text{m}$  ja niitä on kahta päätyyppiä: askeltaitekertoiminen ja asteittaistekertoiminen kuitu. Askeltaidussa taitekerroin kuoren ja ytimen rajapinnassa muuttuu äkillisesti, kun taas asteittaiskuidussa se muuttuu asteittain pienemmäksi ytimestä kuorta kohti kuljettaessa. Monimuotokuiduissa kukin säde etenee eri kulmissa, minkä seurauksena jokaisella säteellä on eripituinen matka kuljettavanaan. [13, luku 5, s. 3.] Tästä syntyy muotodispersiota, jonka seurauksena signaali levenee ja osa valotehosta häviää, kuten kuvasta 7 havaitaan. [12, s.17–20]

Yleisimmin monimuotokuiduista puhuttaessa on kyse asteittaisen taitekertoimen omaavasta kuidusta. Vaikka askeltaitekertoiminen kuitu on jokseenkin helppo valmistaa verrattuna asteittaiskuituun, käytetään sitä lähinnä erittäin lyhyissä tiedonsiirtomatkoissa huonojen siirto-ominaisuuksiensa takia.

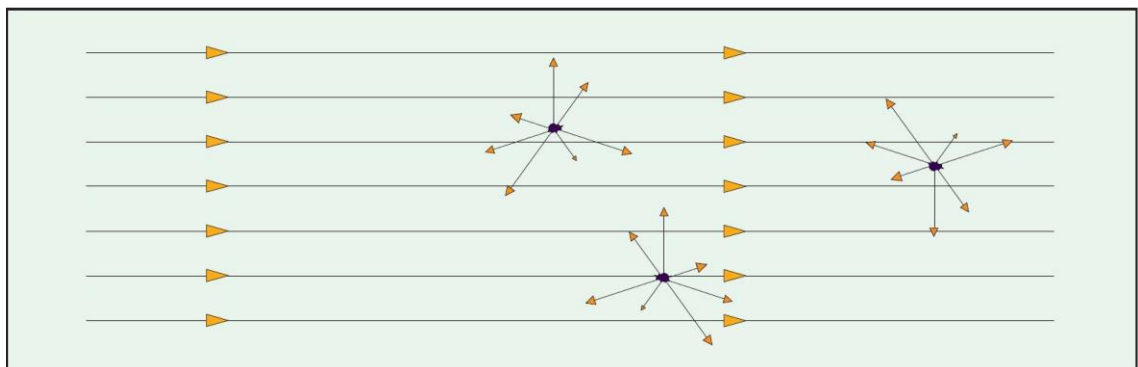
Yksimuotokuiduissa valo etenee vain yhtenä muotona kuidussa käytettävän pienemmän ytimen takia. Ytimen halkaisijat ovat yksimuotokuiduissa tyypillisesti alle 10  $\mu\text{m}$ .



Kuva 7. Valon käyttäytyminen erityyppisissä valokuiduissa [14, s. 12]

### 3.3 Takaisinsironta

Kun valo etenee optisessa kuidussa, se on vuorovaikutuksessa kuidun materiaalin, eli yleisesti lasin, kanssa. Lasin amorfisuudesta johtuen sen tiheys ei pysy tasaisena läpi aineen. Niinpä valon liikkuessa aineen läpi, osa valonsäteistä pääsee suoraan sen lävitse, mutta pieni osa osuu aineessa tiheämpiin kohtiin ja muuttaa etenemissuuntaansa eli siroaa. Osa etenevästä valosta siroaa takaisin, tässä tapauksessa mittalaitteelle, jossa sitä havainnoidaan. Valon siroamista on havainnollistettu kuvassa 8.



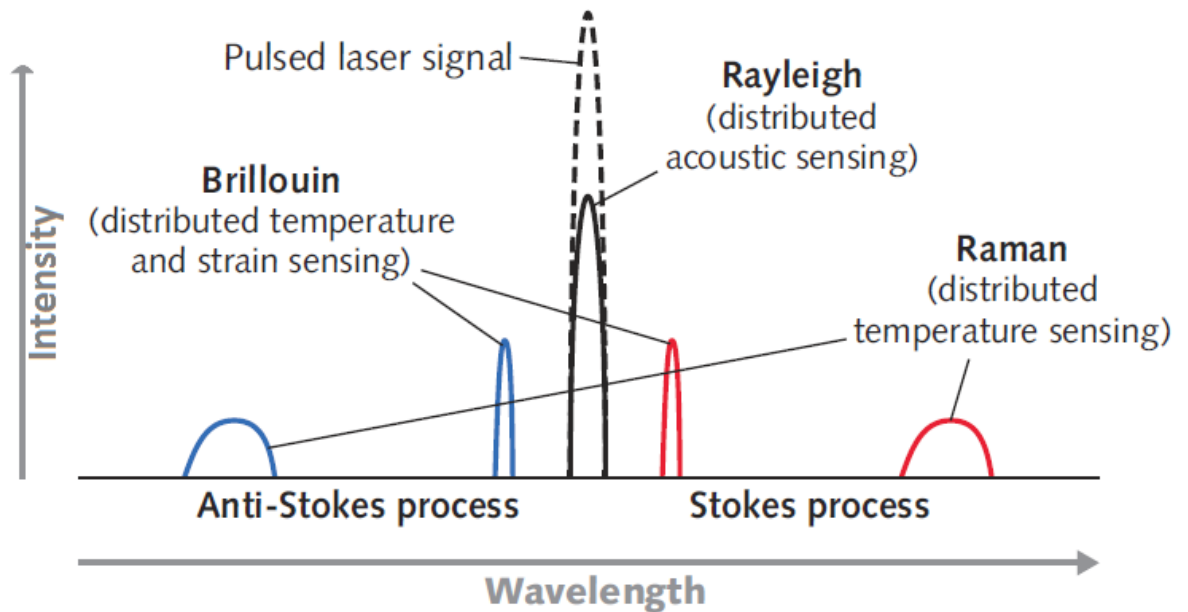
Kuva 8. Valon siroaminen kuidussa [13, luku 2, s. 7].



Suurin osa takaisin siroavasta valosta palaa samalla taajuudella, ja on niin kutsuttua rayleigh-sirontaa. Rayleigh-sironta aiheuttaa muun muassa taivaan sinisyyden ja aurin-gonlaskujen kauniin värin, jotka johtuvat valon siroamisesta ilman molekyyliin. DTS-mittauksessa väliaineena toimii ilman sijasta optisen kuidun lasi.

Rayleigh-sironnassa kuidussa etenevän valon energia ei muutu sironnan seurauksena, mikä tarkoittaa sitä, että rayleigh-sironta palaa takaisin mittalaitteelle samalla aallonpituudella kuin lähtevä valo. Rayleigh-sironta on palaavista sironnoista voimakkain ja sitä käytetään joskus DTS-mittauksessa kalibrointiin. Yleisemmin rayleigh-sironta on käytössä tiedonsiirtopuolella OTDR-menetelmän yhteydessä esimerkiksi kuitujen laatutarkkailussa. Tällaisessa tarkkailussa saadaan tietoa kuidun matkalla tapahtuvasta vaimenemisesta ja kuituliitosten toimivuudesta. Tällainen kuidun kunnon tarkastus voidaan tehdä myös DTS-järjestelmissä kuidun toimivuuden varmistamiseksi. [15, s. 1–3.]

Rayleigh-sironnan lisäksi kuidussa tapahtuu myös kahta muun tyyppistä sirontaa: raman-sirontaa ja brillouin-sirontaa. Raman- ja Brillouin-sironnoissa molekyyli, johon fotoni osuu, voi joko vastaanottaa tai luovuttaa energiaa fotonille. Samalla fotonin taajuus ja aallonpituus suurenee tai pienenee vastaavasti. Raman- ja brillouin-sirontojen yhteydessä näitä tapahtumia kutsutaan stokes- ja anti-stokes-sironnoiksi. Stokes-sironnassa etenevän valon aallonpituus siis kasvaa ja anti-stokes-sironnassa aallonpituus pienenee. Tutkittaessa raman-sirontaa on rayleigh- ja brillouin sironnat helppo suodattaa pois aallonpituuksien erojen ansiosta. [15, s. 6] Eri sirontatyyppit on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. Takaisinsironnan spektri [16, s. 83].

Lämpötilan mittaus tapahtuu DTS-mittalaitteessa raman-sironnan avulla. DTS-mittalaite mittaa sekä stokes-, että anti-stokes-sirontaa. Näistä anti-stokes-sironta on erittäin herkkä lämpötilan muutoksille. Voimakkaampi palaava anti-stokes-signaali tarkoittaa korkeampaa lämpötilaa mittauskohdassa. Stokes-sironnan voimakkuus puolestaan ei riipu lämpötilasta. DTS-mittalaite käyttää stokes- ja anti-stokes-sirontojen suhdetta määrittääkseen lämpötilan mitattavassa kohdassa. Käyttämällä juuri näiden sirontojen keskenäistä suhdetta saadaan tuloksena lämpötilatieto, joka ei riipu kuituun lähetettävän valon intensiteetistä. [17, s. 2.]

DTS-mittalaitteen kuituun lähettämä laserpulssi on useimmiten pituudeltaan 800–1600 nanometrin välillä. Mitattavien raman sironnan stokes ja anti-stokes osien aallonpituus on noin 40 nanometriä alkuperäisen pulssin aallonpituuden molemmin puolin. Jos siis mittalaite käyttää esimerkiksi 1 064 nanometrin aallonpituutta, ovat nämä raman sironnan osat suunnilleen aallonpituuksilla 1 024 nm ja 1 104 nm. Tätä suhdetta ei kuitenkaan voi suoraan käyttää, sillä taitekertoimet kuiduissa vaihtelevat käytetyn aallonpituuden mukaan. Mittalaitteen onkin näin laskettava tarkka stokes- ja anti-stokes-suhde. [15, s. 8.]

Tätä voidaan havainnollistaa seuraavalla kaavalla [18, s. 2]:

$$\frac{I_a}{I_s} = \frac{(\gamma_0 + \gamma_k)^4}{(\gamma_0 - \gamma_k)^4} \exp\left(-\frac{hc\gamma_k}{KT}\right) \quad (2)$$

jossa

- $I_a$  on anti-Stokes-kaistan intensiteetti
- $I_s$  on Stokes-kaistan intensiteetti
- $\gamma_0$  on takaisin siroutuneiden valoaaltojen määrä
- $\gamma_k$  on valoaaltojen siirtymän määrä
- T on lämpötila (K)
- K on Boltzmanin vakio  $1,380658 * 10^{-23} J/K$
- h on Planckin vakio  $6,626076 * 10^{-34} Js$
- c on valon nopeus.

Muutokset optista kuitua ympäröivässä lämpötilassa aiheuttavat siis muutoksen anti-stokes-sironnassa ja samalla stokes- ja anti-stokes-suhde muuttuu. Mitattujen sirontojen etäisyys mittalaitteesta määritetään ajasta, joka valolla kestää matkata sirontakohtaan ja sieltä takaisin mittalaitteelle. Näin saadaan tietää lämpötila optisessa kuidussa tietyllä etäisyydellä mittarista.

Tiedonsiirrossa raman- ja brillouin sironnat ovat niin kutsuttuja epälineaarisia ilmiöitä, jotka pyritään kuiduissa minimoimaan. Näitä tiedonsiirrossa haitallisia ilmiöitä on kuitenkin opittu käyttämään hyväksi mittausmenetelmissä.

### 3.4 Mittauksen teoreettiset lähtökohdat

DTS-mittaaminen tapahtuu siis lähettämällä lasrepulsseja optiseen kuituun ja tulkitsemalla takaisin siroavia signaaleja.

Valon kulkiessa kuidun sisään se hidastuu jonkin verran. Tämä hidastuminen on riippuvainen kuidun refraktioindeksistä. Valon nopeus kuidussa ( $v$ ) taas on riippuvainen valon nopeudesta tyhjiössä ( $c$ ), ja kuidun refraktioindeksistä kaavan 3 mukaisesti.

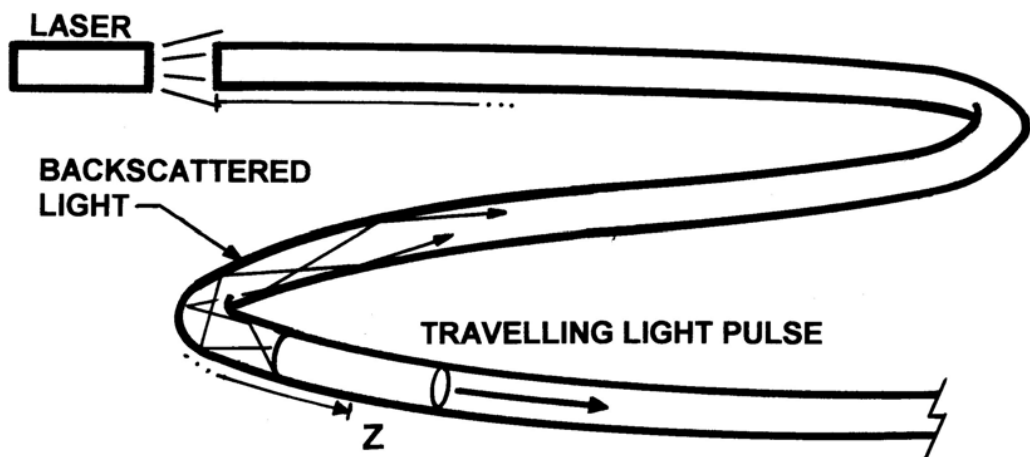
Käyttämällä refraktioindeksille yleisenä lasin arvona 1,5 saadaan valon nopeudeksi kuidussa noin  $2 * 10^8$  m/s.

$$v = \frac{c}{n} = \frac{3 \cdot 10^8}{1,5} = 2 * 10^8 \text{ m/s} \quad (3)$$

Tyypillisen laserpulssin ajallinen kesto on noin kymmenen nanosekunnin luokkaa. Kymmenen nanosekunnin pulssin pituus esimerkin kuidussa (refraktioindeksi 1,5) saadaan kertomalla valon nopeus kuidussa pulssin kestoajalla kaavan 4 mukaisesti.

$$\text{Pulssin pituus} = \frac{3 \cdot 10^8}{1,5} \text{ m/s} * (10 * 10^{-9}) \text{ s} = 2 \text{ m} \quad (4)$$

Tämä kahden metrin mittainen pulssi voidaan ajatella kuidun läpi liikkuvana sensorina (kuva 10). Tästä sensorista palaa takaisin sirontaa, josta voidaan tulkita lämpötiloja koko kuidun matkalta.



Kuva 10. Laserpulssi optisessa kuidussa [15, luku 2 s. 2].

Valon edetessä kuidussa pisteeseen  $z$  on takaisin siroavan valon kuljettava sama matka takaisin mittalaitteelle. Näin valon kokonaismatkaksi tulee  $2z$ . Valon nopeuden kuidussa

ollessa  $v$  on olemassa aika  $t$ , jonka kuluttua palaavan pulssin voi vastaanottaa. Tämä aika voidaan laskea kaavalla 5.

$$t = \frac{2z}{v} \quad (5)$$

Näin yhden metrin mittaustarkkuuteen vaadittava aikaväli on kaavan 6 mukainen.

$$\Delta t = \frac{2\Delta z}{v} = \frac{2 \cdot 2}{2 \cdot 10^8} = 20^{-8} = 20 \text{ ns} \quad (6)$$

Näin ollen mittalaitteen tulee kyetä tarjoamaan 20 nanosekunnin ”aikaikkuna” pulssin vastaanottoon oikealla hetkellä. Tätä kutsutaan mittauksen näytteenottotarkkuudeksi (sampling resolution).

Yksi huomioon otettava asia DTS-mittauksessa on laserpulssien toistoväli. Kuidussa ei voi missään tilanteessa olla samanaikaisesti kahta laserpulssia yhtä aikaa. Muutoin saatavaa dataa on mahdotonta analysoida. Näin ollen valon on matkattava kuidun päähän ja siroavan valon matkattava takaisin mittalaitteelle ennen seuraavan pulssin lähettämistä. Toisin sanoen pienin mahdollinen väli laserpulssien lähettämiseen on se aika, joka valolla kestää matkata kuidun päähän ja takaisin. Jos kuidun pituus on esimerkiksi 3 000 m ja kuidun refraktioindeksi 1,5, saadaan pulssien aikaväliksi seuraavaa:

$$\text{Pulssien aikaväli} = \frac{2 \cdot 3000}{2 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = 3 \cdot 10^{-5} \text{ s} \quad (7)$$

Tämä vastaa 33 000:ta pulssia sekunnissa. Käytännössä pulssien määrä on aina huomattavasti pienempi, tyypillisesti 4 000–10 000 välillä. Tämä johtuu mittalaitteiden tiedonkäsittelyn hitaudesta.

Kuten yllä mainitaan, 20 nanosekunnin ”tiedonkeräysikkuna” vastaa kahden metrin valopulssia kaapelissa. Mittalaitteen on toistettava pulssin lähetys ja vastaanotto useita kertoja saadakseen kerätyksi tarpeeksi merkittävää dataa. Esimerkiksi mittalaite, jonka toistoväli on 4 000 kertaa sekunnissa, vaatii viiden minuutin mittaustapahtuman (1 200 000 pulssia), saavuttaakseen yhden asteen tarkkuuden 10 000 metrin kaapelissa. [15, luku 2, s. 1–11.]

### 3.5 Teoreettista tarkastelua

Jotta DTS-mittalaitteesta saadaan luotettavaa data ulos, on järjestelmä kalibroitava huolellisesti. Kalibroinnin tärkein tehtävä on korjata mittaussignaalin vaimentumaa ja läpötilakäyrän siirtymää. Kalibrointi on suositeltavaa tehdä erikseen jokaista erillistä mittaus-tapahtumaa kohden, sillä muutokset olosuhteissa vaikuttavat laitteen mittauskykyyn. [19, s. 2.]

Signaalin vaimentumisen määrä DTS-järjestelmissä vaihtelee suuresti tapauskohtaisesti. Vaimentumisen vaihtelut johtuvat pääosin erilaisten kaapeleiden ominaisuuksista, järjestelmässä olevista kaapeli-liitoksista ja kuituhitsauksista sekä kuitujen mahdollisista venymistä ja taitoksista. [19, s. 2–3.] Näin ollen jokainen mittaustilanne on lähtökohtaisesti aina erilainen, ja pidempien mittaus tapahtumien aikana kalibroinnin paikkansapitävyys on syytä tarkistaa tietyin välein.

Pääasiallinen kalibrointimenetelmä DTS-mittalaitteelle on jonkin mittakaapelin osuuden sijoittaminen tunnettuihin, vakaisiin olosuhteisiin. Käytännössä tämä tarkoittaa kaapelivyyhtien tai kokonaisen kelan asettamista jää-vesihauteeseen tai referenssiuuniin. Laitteen kalibrointi tapahtuu käyttöönoton yhteydessä lämpötilakäyrää muuttavilla parametreilla, joilla voidaan säätää koko käyrän absoluuttista arvoa tai käyrän kulmaa.

Yksipäisen kaapelin kalibrointi voidaan suorittaa esimerkiksi tarkastelemalla kahta erillistä kohtaa käyrällä, joiden vastaava kaapelin kohta on tiedetyssä lämpötilassa. Nämä kohdat tasaamalla kalibroidaan järjestelmässä syntyvät signaalin vaimentumat. Jos järjestelmässä on käytetty useita kaapeleita toisiinsa liitettynä, on jokainen kaapeliosuus kalibroitava erikseen. Askel-luontoiset vaimentumat tulee lisätä manuaalisesti kalibrointivaiheessa. U-kaapelin käyttö helpottaa kalibrointia huomattavasti, sillä mittalaite pystyy mittaamaan kaapelia molemmista suunnista ja voi näin käyttää saamaansa dataa automaattiseen vaimenemisen korjaukseen.

Koska DTS-mittalaite laskee lämpötilalle keskiarvon tietyin välein, on kalibrointiin syytä käyttää vähintään 10 kertainen määrä kaapelia mittauksen näytteenottoväliin nähden. Kalibroinnissa on käytettävä referenssilämpömittareita absoluuttisen lämpötilan varmistamiseksi. Luotettavin tapa pitää laite kalibroituna on pitää yksi osuus kaapelista jatkuvasti tasaisissa kalibrointiolosuhteissa, jolloin muutokset laitteen toiminnassa voidaan korjata heti.

Kalibroinnissa on otettava huomioon erilaiset laitteeseen ja koko järjestelmään vaikuttavat häiriöt. Laitteesta eteenpäin lähtiessään signaali on noin ensimmäiset 100 kaapelimetriä itse mittalaitteesta tulevien häiriöiden vaikutuksen alla. Sama pätee myös palaavaan kaapeliin, jossa viimeinen 100 metriä voidaan sulkea pois kalibroinnista häiriöherkkyytensä takia. [19, s. 3.]

Johtuen fysikaalisesta ilmiöstä, johon mittaus perustuu, on DTS-mittalaite luonnostaan yleisesti hyvin herkkä häiriöille. Tämä johtuu siitä, että vain murto-osa kuituun kulkevasta valosta heijastuu takaisin ja heijastusten signaalivahvuudet ovat hyvin pieniä. Häiriöherkkyyteen on kuitenkin mahdollista vaikuttaa esimerkiksi lisäämällä mittausaikaa. Tämä antaa laitteelle aikaa kerryttää dataa useammasta laserpulsista, mikä johtaa luotettavampiin tuloksiin. [15, luku 2, s. 5.]

## **4 Kaapeli-asennukset ja niiden dokumentointi**

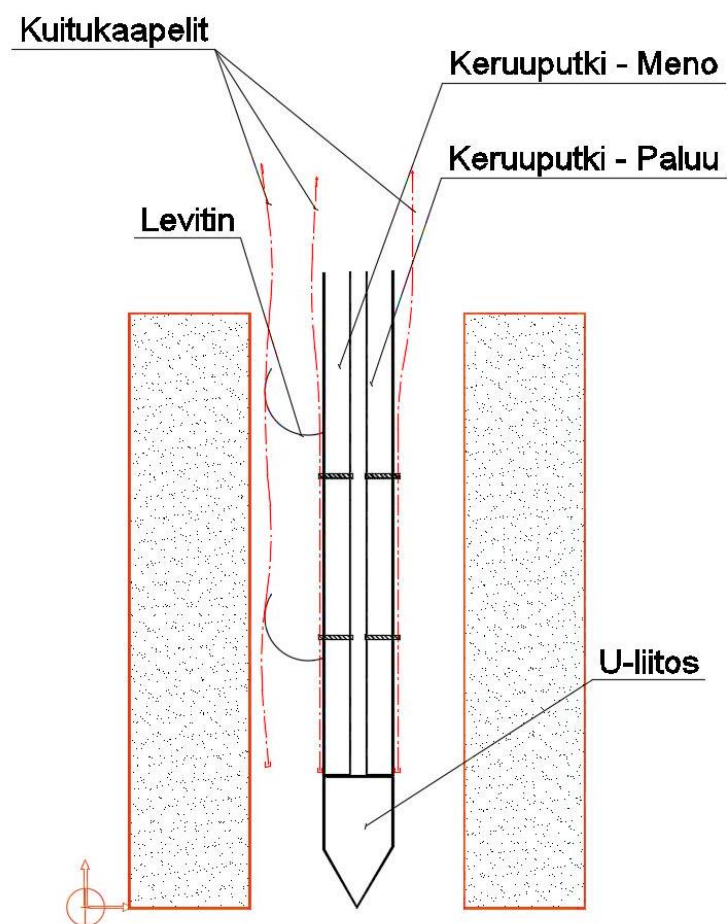
Osana tätä opinnäytetyötä seurattiin Metropolian tilaaman, koe- ja opetuskäyttöön tulevan energiakaivon asennusta sekä DTS-mittalaitteen käyttöönottoa tämän kaivon mitaamiseen ja monitorointiin.

### **4.1 Kohde**

Tutkimus- ja opetuskäyttöön tuleva energiakaivo asennettiin Metropolian Myllypuron kampukselle, tuleviin LVI-laboratorion tiloihin. Myllypuron kampus oli tämän opinnäytetyön teon aikana vielä rakennusvaiheessa, eikä kaivon valmistumista mittauskuntoon pystytty seuraamaan loppuun asti. Seuraavissa luvuissa kerrotaan keruuputkiston ja kuitukaapelien asennuksesta, sekä niin paljon mittauskonfiguraatiosta, kuin tämän opinnäytetyön tekovaiheessa on tiedossa.

## 4.2 Mittausjärjestelyt

Käyttökohteensa takia kaivosta haluttiin saada ulos mahdollisimman monipuolista dataa. Näin ollen kaapeleiden määrää mietittäessä Metropolian sekä GTK:n edustajat päätyivät viiden kuitukaapelin käyttämiseen kaivossa. Kolme kaapeleista asennettiin mittaamaan kaivoa keruuputkien ulkopuolelta ja kaksi keruuputkien sisältä. Ulkopuoliset kaapelit sijoitettiin keruuputken meno- sekä paluupuolelle ja kolmas kaapeli kaivon seinämää vasten mittaamaan sen lämpötilakäyttäytymistä. Ulkoiset kaapelit ja keruuputket on esitetty kuvassa 11.

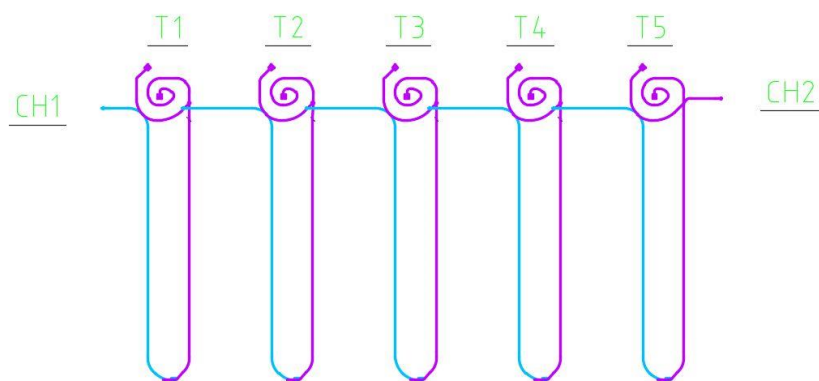


Kuva 11. Ulkoisten kaapelien asennuseriaate.

Myllypuron kampuksen kaivon mittauskonfiguraatio voisi olla esimerkiksi kuvan 12 mukainen. Ajatuksena on liittää kuidut kuituhitsauksilla tai liittimillä ja muodostaa ketju, joka mahdollistaa kuitujen samanaikaisen mittaamisen. Kaikki viisi käytössä olevaa kaapelia



veisivät näin yhdessä kanavat 1 ja 2. Koska mittalaite on nelikanavainen ja yksi kaapeliyhdistelmä vie kaksi kanavaa, voidaan kaapeleiden yhdistäminen jakaa esimerkiksi keruuputken sisäisiin ja ulkoisiin kaapeleihin. Kaapeleiden yläpään jäävää kierukkaa (T1... T5, kuva 12) voidaan käyttää kalibrointiin.



Kuva 12. Mahdollinen mittausjärjestely.

#### 4.3 Kaapelinlasku

Kaapeleiden asennus suoritettiin Metropolian Myllypuron kampuksella 05.04.2017. Asennukseen osallistuivat Geotekniikan tutkimuskeskus GTK, joka toimitti kuitukaapelit ja asensi ne keruuputkistoon, sekä GreenHeat Urakointi, joka toimitti keruuputken. Keruuputki toimitettiin 2 x 230 metrin kelana, jossa toisessa päässä oli meno- ja paluuputkia yhdistävä U-liitos valmiiksi asennettuna. Käytetty keruuputki eli kollektori näkyy kuvassa 13. Kollektorin putkityyppi on MuoviTech Ø40 2x 230m Pe100 PN10.



Kuva 13. Keruuputki ja kuitukaapelin kiinnitys.

Greenheat oli porannut kaivon jo huomattavasti keruuputkien ja kaapeleiden asennusta aiemmin, joka saattaa joissain tilanteissa aiheuttaa kaivon paikallisia umpeutumia. Tämä kaivo oli kuitenkin pysynyt kohtuullisen hyvin auki, eikä keruuputken laskussa ollut suurempia ongelmia ennen kaivon viimeisiä kymmeniä metrejä. Pohjalla olleen tukkeuman takia kaivo päätettiin jättää noin 10 metriä vajaaksi suunnitellusta pituudesta. Kaivon jääminen vajaaksi ei ole kovinkaan epätavallista, sillä kaivon seinämiltä sortuva ja mureneva aines kerääntyy kaivon pohjalle.

Kaapeleiden asennus suoritettiin aikatauluista ja työmaan keskeneräisyydestä johtuen kahdessa osassa: ensin asennettiin ulkoiset kaapelit (3 kpl) ja myöhempään asennuskertaan jätettiin keruuputkien sisäiset kaapelit. Ulkoiset kaapelit näkyvät kuvassa 14. Kuvassa on esitetty myös kaivon seinämää monitoroivan kuitukaapelin levitys kaivon seinää vasten. Levitys tehtiin taipuisalla muoviputkella, joka kiinnitettiin kaapeleiden tavoin nippusiteillä keruuputkiin.



Kuva 14. Kaapeleiden laskeminen.

## 5 DTS-laitteen käyttöönotto

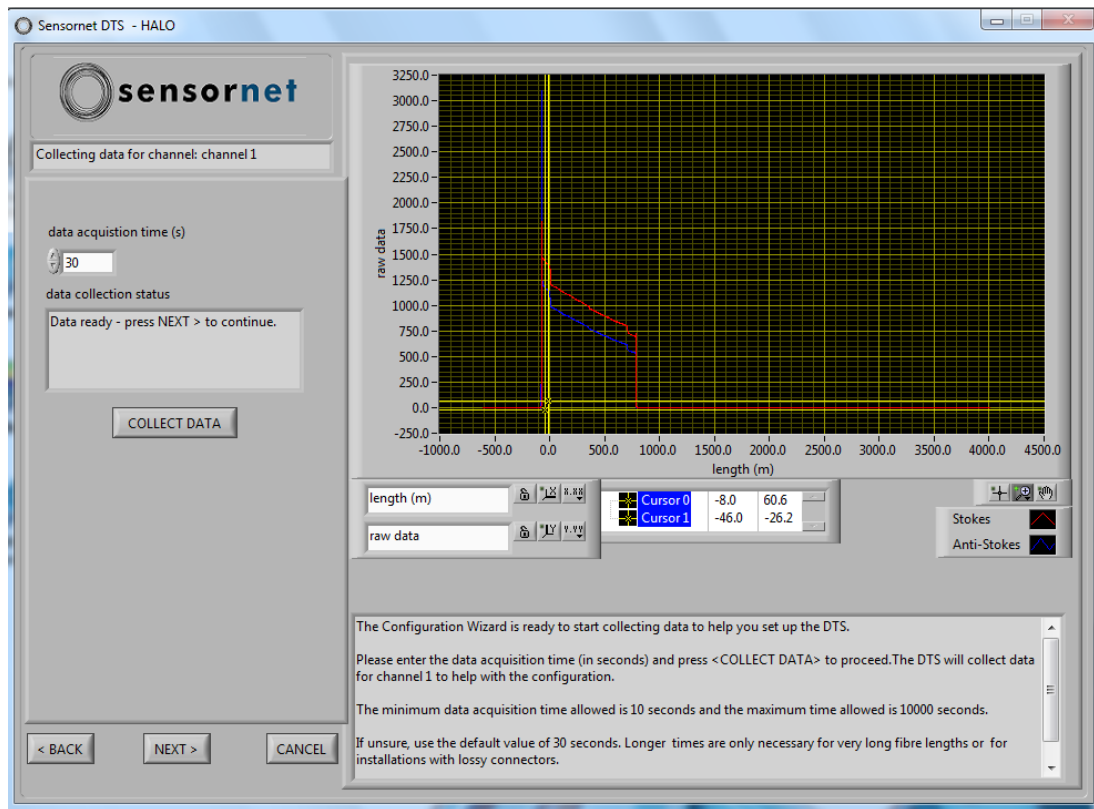
Osana tätä opinnäytetyötä laadittiin ohje Sensornet Halo DTS -mittalaitteen käyttöönottoon. Tavoitteena oli luoda selkeä ja helppokäyttöinen ohjeistus mittalaitteen käyttöönottoon, jota sekä opettajat että oppilaat voisivat hyödyntää opetustilanteissa. Varsinainen ohje on esitetty työn lopussa liitteenä 1.

Ohjeessa käydään läpi käyttöönotto vaihe vaiheelta yksiselitteisesti ja lyhyesti. Seuraavassa luvussa perehdytään tarkemmin käyttöönoton aikana muokattaviin asetuksiin ja parametreihin, joilla laite saadaan parhaaseen mahdolliseen toimintakuntoon. Asetusten vaiheet esitellään siinä järjestyksessä, jossa ne Halo DTS -ohjelmiston (Configuration Wizard) käytön aikana tulevat esille. Nämä huomiot laitteen asetuksista pätevät pääosin vain tässä opinnäytetyössä tarkemmin käsitellylle Halo DTS -mittalaitteelle ja molemmista päistä mitattavalle kuiduille (double-ended fibre).

### 5.1 Acquisition time, kalibrointitiedon keruu-aika

Käyttöönottoasetusten aluksi Halo DTS -mittalaite suorittaa koemittauksen, jossa se kerää käytettävältä kuitureitiltä dataa kohdistusasetuksia ja kalibrointia varten. Koemittaukselle on asetettava tiedonkeruu-aika, joka määrää, kuinka pitkällä aikavälillä laite tätä dataa kerää. Koemittauksen keston voi valita väliltä 10 sekunnista 10 000 sekuntiin. Oletuksena laite käyttää 30 sekunnin mittausaika. Koemittauksen tiedonkeruu-aika vaikuttaa koko tulevaan käyttöönotto-prosessin ja kalibroinnin tarkkuuteen, joten se tulee valita huolella. Kuitenkin 30 sekunnin keruu-aika on useimmissa tapauksissa riittävä, ja pidempää aikaa tarvitaan vain erittäin pitkillä kaapelivedoilla tai huonokuntoista liittimiä ja kaapelia käytettäessä. Kun sopiva aika on valittu, suoritetaan datan keräys (kuva 15). Laite tallentaa datan asetustapahtuman ajaksi ja siirtyy käyttöönoton seuraavaan vaiheeseen.

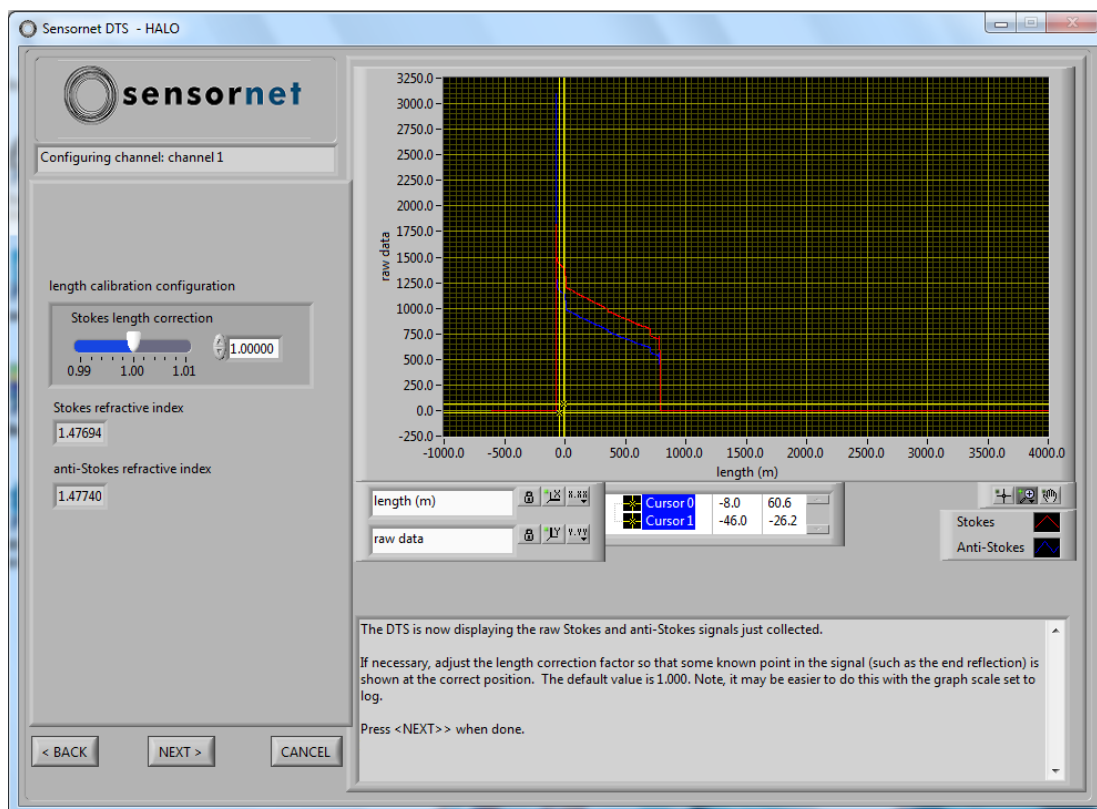
Kun mittatilanteessa on käytössä molemmista päistä mitattava kuitu (double-ended fibre), kerää laite myös paluusignaalin dataa erikseen myöhemmässä asetusten vaiheessa.



Kuva 15. Kalibroitiedon keräys -ikkuna.

## 5.2 Length correction, stokes- ja anti-stokes-käyrien kohdistaminen

Seuraavana vaiheena laitteen käyttöönotossa on pituusarvojen kalibrointi. Laite ottaa signaalin vaimenemisen ja kuidussa tapahtuvan dispersioon huomioon korjauskertoimella, sekä erillisillä stokes ja anti-stokes refraktioindekseillä.



Kuva 16. Pituusarvojen kalibrointi -ikkuna.

Kuvassa 16 esitetyn ikkunan vasemmassa laidassa olevasta liukuvalikosta siirretään stokes-käyrä oikeaan kohtaan, niin että tunnettu piste stokes-käyrässä sijaitsee tunnetussa pisteessä pituusakselilla. Koska asennetun kaapelin pituus on lähes poikkeuksetta tiedossa, voidaan kohdistukseen käyttää esimerkiksi kyseistä kaapelin pituutta ja stokes-käyrän loppuheitastusta tai käyrän pystysuoraa laskua sen lopussa.

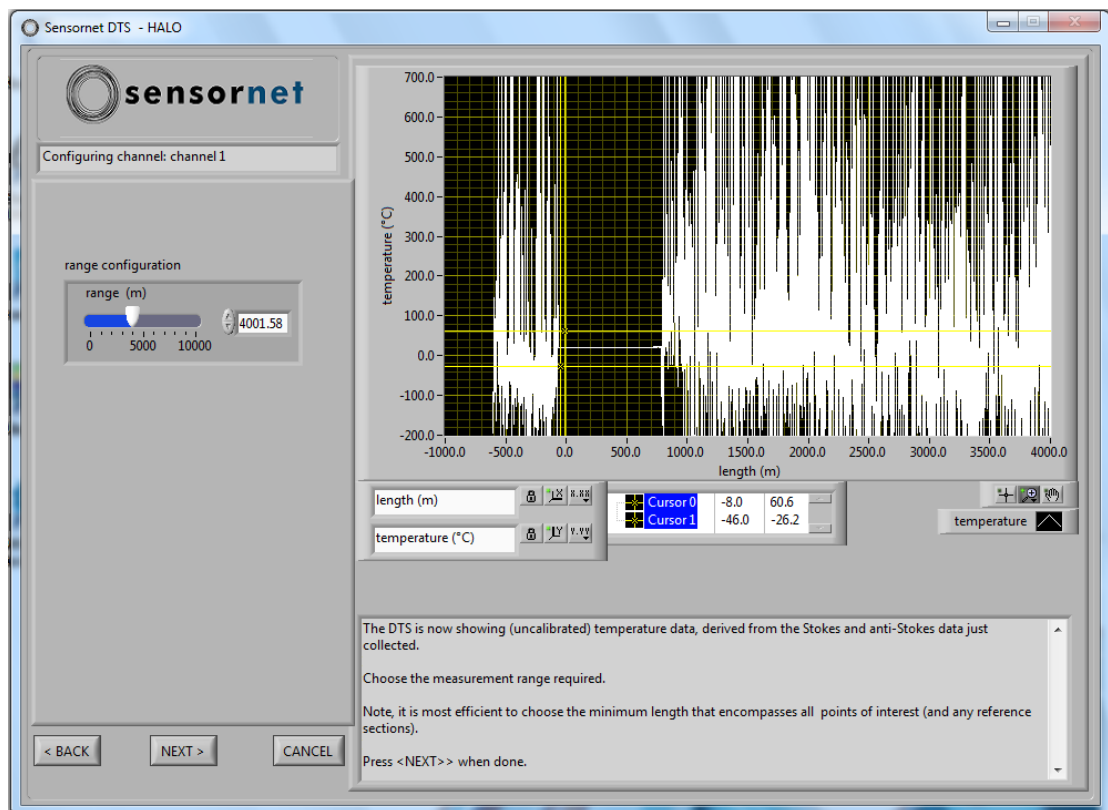
Mittalaite käyttää matkan mittaamiseen optisen kuidun sisäisten taitekertoimien painotettua keskiarvoa (effective group index of refraction eli EIOR). Tämä arvo kuvastaa valon käyttäytymistä optisessa kuidussa. Taitekertoimia on kaksi, koska stokes ja anti-stokes signaalien aallonpituus eroaa toisistaan, ja ne käyttäytyvät kuidussa eri tavalla. Halo DTS on valmiiksi kalibroitu useimmille yleisesti käytössä oleville monimuotokuiduille, mutta taitekerroin-arvot saattavat vaatia manuaalista hienosäätöä. Hienosäätöä varten on kuitenkin tunnettava käytettävä kuitu ja sen ominaisuudet hyvin.



### 5.3 Measurement range, mittausalueen pituus

Mittausalueen pituutta säätäessä rajataan mittauksesta pois kaikki turha data. Käytännössä tämä tarkoittaa mittausalueen katkaisemista kaapelin lopun pituuteen. Tällöin tarkasteltava ja tallennettava data saadaan vain laitteen liittimen ja kuidun lopun välistä. Tarve alueen asettamiselle johtuu siitä, että laitteen maksimi operointialue on kaapelipituutta huomattavasti suurempi. Sulkemalla kaapelipituuden ulkopuolelle jäävä osuus pois mittauksista saadaan mittauksesta tarkempi. Lisäksi tämä pienentää tallennettujen mittausten tiedostokokoa sekä helpottaa datan havainnointia näytöllä.

Kuvasta 17 havaitaan, että varsinainen mittausalue erottuu selvästi voimakkaiden häiriöiden keskeltä. Turha data on näin helppo sulkea pois käyttämällä ”range”-liukuvalitsinta.



Kuva 17. Mittausalueen asettaminen.

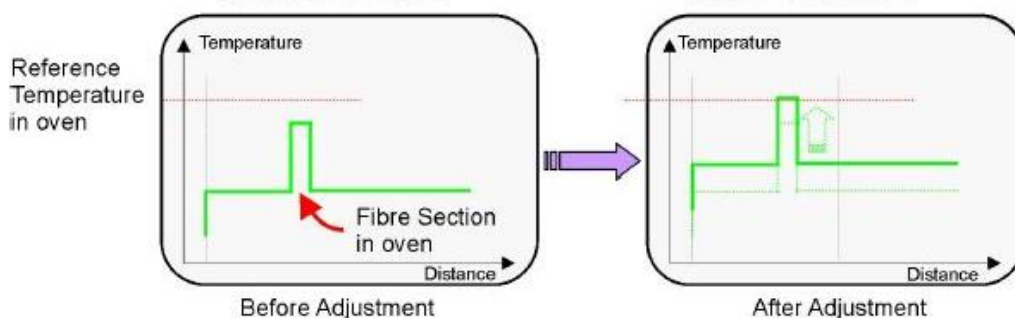
#### 5.4 Differential loss configuration, vaimennuseroavaisuuksien huomiointi

Eroavaisuudet stokes- ja anti-stokes-sirontojen vaimenemisessa optisessa kuidussa voivat aiheuttaa sirontojen suhteen vääristymistä. Tämä synnyttää tarpeen näiden eroavaisuuksien huomioimiseen mittauksessa. Molemmista päistä mitattavassa kuidussa tämä tapahtuu keräämällä kalibrointidata myös paluukanavan suunnasta, jolloin mittalaite pysyy automaattisesti sulkemaan vääristymät pois mittaustuloksista. Halo DTS käyttää eroavaisuuksien pois sulkemiseen oletusarvona asteittaista kertomisen 50/125-moni-muotokaapelin arvoja, muille kaapeleille arvoja saattaa joutua korjaamaan. [11]

#### 5.5 Temperature offset, lämpötilan kohdistus

Mittalaitteen osoittaman lämpötilan kohdistukseen on Halo DTS laitteessa kaksi parametria.

Absoluuttinen lämpötila voidaan korjata kertoimella, joka nostaa tai laskee koko käyrää yhtä aikaisesti. Tämän metodin käyttämiseen tulee kaapelimatkalta tietää vertailulämpötila tietyllä kohtaa kaapelia.



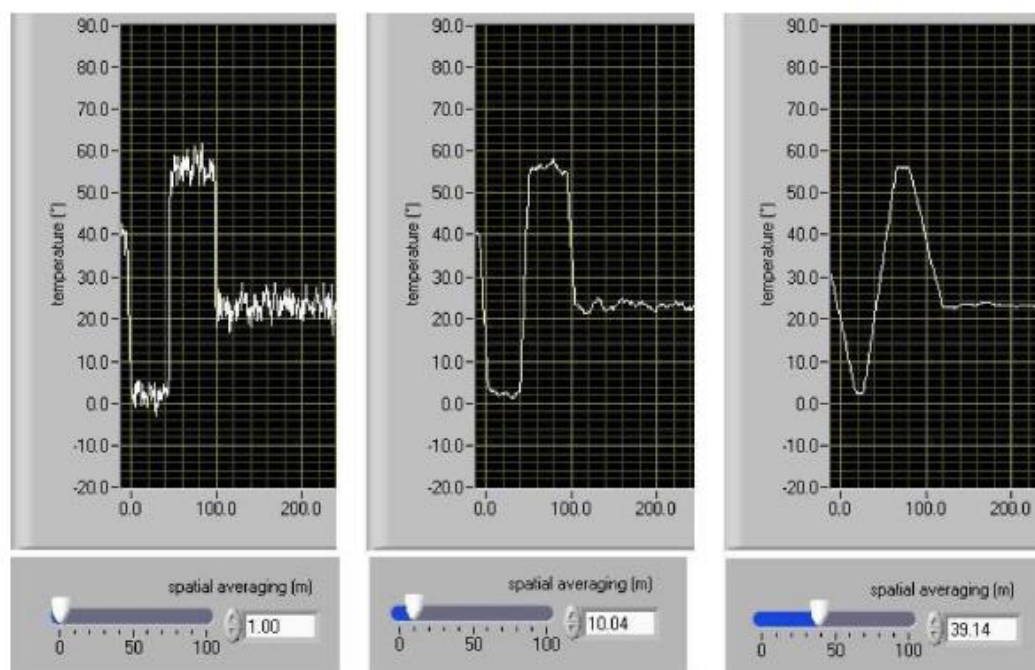
Kuva 18. Lämpötilakäyrän siirto.

Lämpötilan absoluuttista arvoa voidaan korjata myös kahden kaapelimatalla sijaitsevan samassa lämpötilassa olevan referenssikohdan perusteella (kuva 18). Molemmille referenssikohdille on tiedettävä sijainti kaapelimatalla. Referensseinä voidaan käyttää joko pistemäisiä kohtia kaapelissa tai pidempiä referenssivälejä. Näiden pisteiden lämpötila voidaan määrittää joko kertoimella tai kaapelin matkalla kalibrointiin mahdollisesti käytettävien mittarien arvoja.



## 5.6 Spatial averaging, pehmennysväli

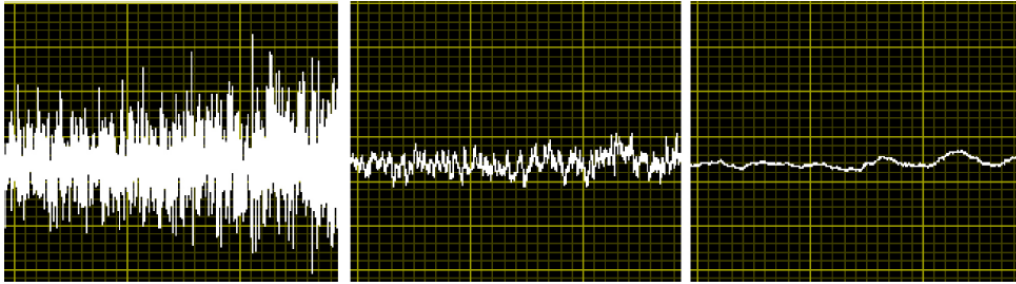
DTS-mittalaitteen antamassa mittausdatassa on parhaillakin kalibroinneilla jonkin verran sattumanvaraista vaihtelua tai häiriötä. Tämä vaihtelu voidaan tasoittaa tai pehmentää käyttämällä ”spatial averaging” -liukuvalitsinta. Tämä määrää sen matkan, jolle saadusta datasta otetaan keskiarvo. Pieni määrä pehennystä helpottaa datan havainnointia huomattavasti. Liian suuria määriä käytettäessä pehennys voi hävittää osan halutusta datasta, joten sitä on syytä käyttää kohtuudella (kuva 19).



Kuva 19. Pehmennyksen vaikutus.

## 5.7 Measurement time, mittausaika

Samassa asetusten vaiheessa pehennyksen kanssa valitaan myös varsinainen mittausaika. Mittausajan pituudella on suuri vaikutus varsinaisen mittausdatan laatuun, kuten kuva 20 osoittaa. Kaksisuuntaisessa mittauksessa (double-ended measurement) asetettu mittausaika on yhteen suuntaan tapahtuvan mittauksen aika, eli jos mittausajaksi asetetaan 15 sekuntia, kestää varsinainen mittaus 2 kertaa 15 sekuntia (meno ja paluu).

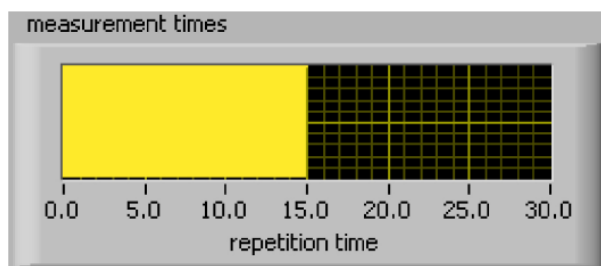


Kuva 20. Mittausvälin pidentämisen vaikutus datan laatuun.

### 5.8 Repetition time, mittauksen toistoväli

Halo DTS-mittalaitteella voi suorittaa jatkuvaa mitaamista tai vaihtoehtoisesti käyttäjä voi määrittää toistettavien mitausten määrän. Jatkuvalle mitauksella laite suorittaa mitauksen asetetuin välein ja tallentaa tiedot kovalevyille, kunnes käyttäjä pysäyttää mitaustapahtuman. Kun toistomäärä asetetaan mitausten aluksi suorittaa laite vain tämän määrän mitauksia.

Toistoajan valikosta valitaan kaksi erillistä aikaa mitaustapahtumalle: itse mitaustapahtuman kesto ja mitauksen käynnistyksen aikaväli. Jos näistä ensimmäinen on asetettu esimerkiksi 15 sekuntiin ja jälkimmäinen 30 sekuntiin, suorittaa laite 15 sekunnin pituisen mitauksen 30 sekunnin välein (kuva 21).



Kuva 21. Toistoväli ja mittausaika.

## 6 Yhteenveto

Tässä insinööriyössä esiteltiin DTS-mittaamisen periaatteita ja taustoja sekä tuotettiin käyttöönotto-ohje yhdelle mittalaitteelle. DTS-mittamiseen liittyvät periaatteet menevät vielä esiteltyä huomattavasti syvemmälle. Tässä työssä pyrittiin kuitenkin tuomaan esille tärkeimmät asiat, jotka mittalaitteen käyttäjän on hyvä ymmärtää, jotta osaa ohjata omaa tekemistään mittaustapahtuman yhteydessä. Aiheena DTS-mittaus levittyy huomattavasti talotekniikan alan ulkopuolelle, ja aiheen kokonaisvaltainen tarkastelu vaatisi syvempää tutustumista muihin aloihin, kuten materiaali- ja laser-tekniikkaan.

Työn tuloksena tuotettiin käyttöönotto-ohje opetuskäyttöön.

## Lähteet

- 1 Valitun alueen geologinen ja geofysikaalinen kenttätutkimus. Verkkodokumentti. Geologian tutkimuskeskus GTK. < <http://www.gtk.fi/asiantuntijapalvelut/energia/geoenergia/kenttatutkimus/index.html>>. Luettu 9.2.2017
- 2 Abhisek Ukil, Hubert Braendle & Peter Krippner. 2011. Distributed Temperature Sensing: Review of Technology and Applications, IEEE Sensors Journal, Sivut: 885–892 <<http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5955066/>>.
- 3 Fiber optics pressure and temperature sensors for oil and gas applications. Verkkodokumentti. Opsens Inc, <[https://opsensolutions.com/wp-content/uploads/sites/3/2015/05/OG-june2010\\_4p.pdf](https://opsensolutions.com/wp-content/uploads/sites/3/2015/05/OG-june2010_4p.pdf)>. Luettu 9.2.2017
- 4 Fiber Optic Sensing System (FOSS) monitors multiple critical parameters in real time. Verkkodokumentti. National Aeronautics and Space Administration NASA. <<https://www.nasa.gov/offices/ipp/centers/dfrc/technology/Fiber-Optic-Sensing-Suite.html>>. Luettu 9.2.2017.
- 5 Lauttamäki, Ville & Kallio, Jarmo. 2013. Tutkimusraportti 206, Geoenergiasta liiketoimintaa: perusteluja geoenergian hyödyntämiselle erilaisissa rakennuskoh-teissa. Espoo. Geologian tutkimuskeskus.
- 6 Juvonen, Janne & Lapinlampi, Toivo. 2013. Energiakaivo: Maalämmön hyödyntäminen pientaloissa. Helsinki. Ympäristöministeriö.
- 7 Huusko, Asmo. 2017. Energiakaivot ja kaivokentät, opetusmateriaali. Geologian tutkimuskeskus. Esitetty Metropolian Ammattikorkeakoulussa 3.5.2017.
- 8 TRT-mittaus. Verkkodokumentti. Rototec Oy. < <http://www.geodrill.fi/trt-mittaus/>> Luettu 13.2.2017
- 9 Fiber Effective Group Index of Refraction Values. Verkkodokumentti. Corning. < [http://www.corning.com/media/worldwide/coc/documents/Fiber/RC-Application%20Notes/AN4091\\_04-12.pdf](http://www.corning.com/media/worldwide/coc/documents/Fiber/RC-Application%20Notes/AN4091_04-12.pdf)> Luettu 25.7.2017
- 10 Optical Fibre Manufacture. Verkkodokumentti. British Glass Manufacturers' Confederation < <https://www.britglass.org.uk/optical-fibre-manufacture>> Luettu 21.7.2017
- 11 Sentinel DTS user manual. Mittalaitteen mukana toimitettu dokumentti. Sensornet Ltd.

- 12 Valokaapelit tele- ja tietoverkoissa. 2004. Tampere. Helkama Bica 2001. 4. painoksen uusintapainos.
- 13 Nilsson-Gistvik, Stefan. 2004. Optical fibre theory for communication networks. Hudiksvall. Ericsson Cables AB.
- 14 Varimo, Lasse. 2007. Rakenteiden mittaus optisella kuitutekniikalla. Insinööriyö. Kajaanin ammattikorkeakoulu.
- 15 Smolen, James & van der Spek, Alex. 2003. A DTS primer for gas & oil production. Shell international exploration and production B.V. The Hague, Netherlands.
- 16 Wallace, John. 2016. Fibers for sensing extend their reach. Laser Focus World. Vol. 52, s. 83–87.
- 17 Selker, John. 2006. Distributed fiber-optic temperature sensing for hydrologic systems. Water Resources Research. Vol. 42.
- 18 Sakaguchi, Keiichi & Matsushima, Nuobuo. Temperature logging by the distributed temperature sensing technique during injection tests. Proceedings of world geothermal congress 2000, s. 1657–1661. Tohoku, Japan.
- 19 Selker, John & Tyler, Scott. 2009. Environmental temperature sensing using Raman spectra DTS fiber-optic methods. Water Resources Research. Vol. 4

## Sensornet Halo DTS, käyttöönotto-ohje

### Käyttöönotto-ohje

#### SENSORNET HALO DTS



#### OMINAISUUDET

Kantama	0–4 km
Kanavien lkm.	4 kpl
Näytteenottotarkkuus	2m

#### KAYTTOOLOSUHTEET

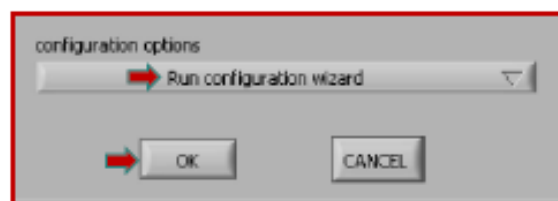
Käyttölämpötila	0°C – +40 °C
Säilytyslämpötila	-15°C – +65 °C
Kosteus	5% – 95%

#### KÄYNNISTÄMINEN

1. Käynnistä laite. Jos Sensornet DTS HALO ohjelma ei käynnisty itsestään, käynnistä se klikkaamalla kuvaketta työpöydältä. Odota päävalikon aukeamista.



2. Päävalikossa valitse "Edit configuration" muokataksesi asetuksia.
3. Valitse asetustavan alavetovalikosta vaihtoehto "Run configuration wizard" ja paina OK. Tämä käynnistää asetusohjelman.

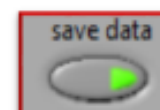


#### ASETUSTIEDOT

4. Aiemman asetustiedoston muokkaaminen: Ensimmäisessä ruudussa voit valita muokattavaksi jo aiemmin määritetyt asetukset painamalla "LOAD FILE...". Mikäli et halua muokata vanhaa asetustiedostoa, paina "NEXT >".

5. Asennusinformaation syöttäminen:

Syötä asetustiedostolle nimi kohtaan "installation". Mikäli haluat tallentaa mittaustiedot, varmista, että "save data" on päällä (valo vihreänä).

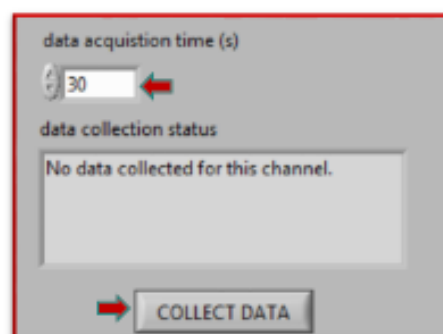


Kohtaan "notes" voit lisäksi täyttää lisätietoa mittauksesta. Kun valmis, paina "NEXT >".

## TIEDONKERUUAIKA

6. **Tiedonkeruuajan asettaminen:** Aseta tiedonkeruu aika halutuksi (30s riittävä useimmissa tapauksissa). Tiedonkeruu aika määrittää aikavälin, jonka aikana kerätystä tiedosta muodostetaan keskiarvo yhdeksi mittaustulokseksi. Kerättyä dataa käytetään asetuksissa ja kalibroinnissa.

*Pidempi tiedonkeruu aika vähentää häiriötä ja tarkentaa mittausta.*



7. **Tiedon keräys:** Tiedonkeruuajan määritettyäsi paina "COLLECT DATA". Tämä aloittaa yhden tiedonkeruuajan pituisen mittauksen. Tätä mittaustulosta käytetään laitteen kalibroinnissa. Kun tiedonkeräys on valmis paina "NEXT >".

## STOKES- JA ANTI-STOKES KÄYRIEN KOHDISTUS

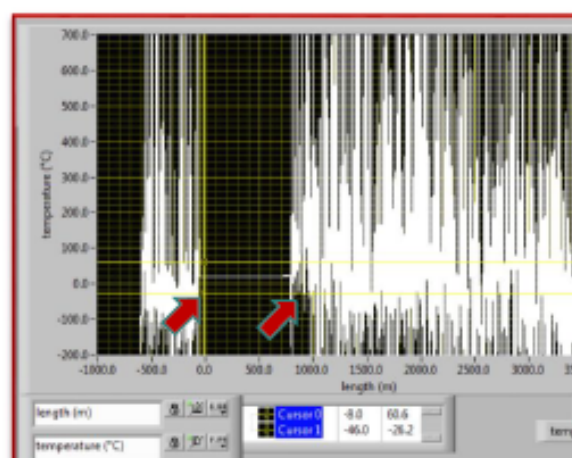
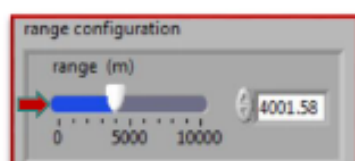
8. **Kohdistus:** Mikäli kohdan 7. mittaustulosten sininen (stokes) ja punainen (anti-stokes) käyrät eivät ole kohdikkain, on ne kohdistettava joko manuaalisesti käyttämällä "stokes length correction" -liukuvalitsinta, tai syöttämällä käytettävän kaapelin refraktiaindeksi liukuvalitsimen alapuoleisiin kenttiin.

*Kohdistukseen voi käyttää esimerkiksi mittauskäyrän alku- ja loppupään selviä huippuja.*

## MITTAUSALUEEN PITUUS

9. **Pituuden asettaminen:** Aseta haluttu mittausvälin pituus "range configuration" liukuvalikosta.

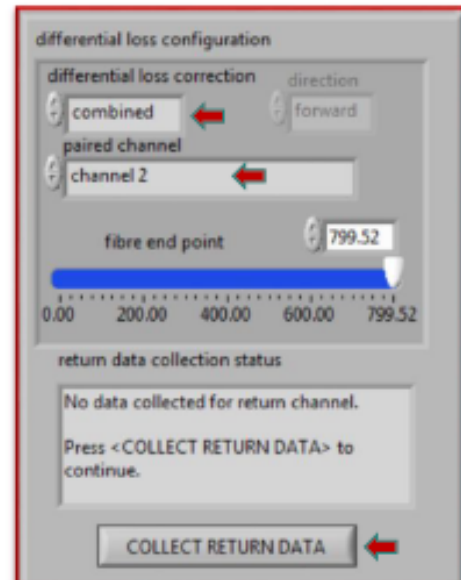
*Mittausmatka on syytä asettaa mahdollisimman pieneksi, kuitenkin niin että haluttu mittausalue pysyy näkyvässä. Tämä parantaa mittauksen tarkkuutta ja vähentää turhaa häiriötä.*





## DIFFERENTIAL LOSS CONFIGURATION KAAPELIKONFIGURAATION VALITSEMINEN

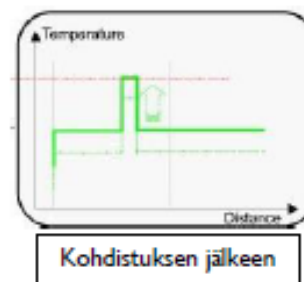
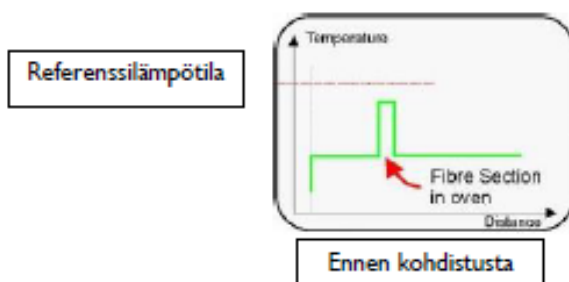
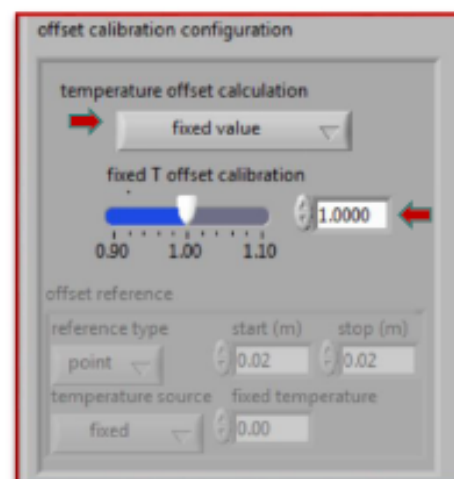
**10. Kaapelikonfiguraation valinta:** Aseta kaapelityyppi (single/combined) ensimmäisestä alavetovalikosta. Kun valitset "combined" valitse myös mihin kanavaan kaapelin toinen pää on kytketty. Tämän jälkeen paina "collect return data" kerätäksesi kalibrointidataa myös paluupuolelle.



## TEMPERATURE OFFSET, LÄMPÖTILAN KOHDISTUS

**11. Lämpötilan kohdistaminen:** Voit kohdistaa lämpötilan kahdella tavalla: korjauskertoimella tai kaapelin referenssikohdilla. Molemmissa tulee kohdistukseen käyttää tunnetussa lämpötilassa olevaa kaapelivyyhtiä (jää-vesihaude tai referenssiuuni).

*Lämpötila kohdistetaan tunnistamalla mittausdatasta referenssialue ja korjaamalla se oikeaan lämpötilaan lämpötila-akselilla.*



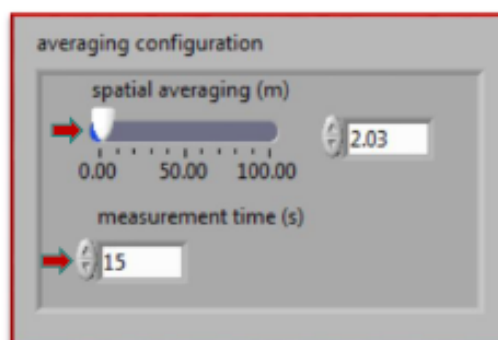


## SPATIAL AVERAGING / MEASUREMENT TIME, PEHMENNYSVÄLI JA MITTAUSAIKA

**12. Pehmennysvälin asettaminen:** Datan pehmentäminen helpottaa sen havainnointia vähentämällä häiriötä saadussa signaalissa. Liian suuri pehmennysväli voi kuitenkin vaikuttaa datan paikkaansapitävyyteen poistamalla oleellista dataa joissain kohdissa. Aseta pehmennysväli "spatial averaging" liukuvalitsimesta.

**13. Mittausajan asettaminen:** Aseta mittausaika sekunteina "measurement time" kenttään. Suurempi mittausaika parantaa huomattavasti mittaustulosten laatua.

*Kaksisuuntaisessa mittauksessa (double-ended measurement, combined- kuitutyyppi) asetetun mittausajan mukainen mittaus suoritetaan molempiin suuntiin. Näissä tapauksissa mittausaika on siis kaksinkertainen asetettuun nähden.*



## MITTAUSKEN ALOITTAMINEN

Edellä esitettyjen vaiheiden jälkeen voit aloittaa mittaamisen. Ohjelma ohjaa käyttäjän automaattisesti mittausnäkymän asetusten valmistumisen jälkeen. Pääset mittausruutuun myös aloitusvalikosta painamalla "start measurement".

Voit myös palata muokkaamaan jo tekemiäsi asetuksia kohdasta "Edit configuration".

