

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

LUT School of Energy Systems

LUT Kone

BK10A0402 Kandidaatintyö

KAUPALLISTEN VÄSYMISEN MONITOROINTILAITTEIDEN VERTAILU

COMPARISON OF COMMERCIAL FATIGUE MONITORING DEVICES

Lappeenrannassa 30.10.2018

Jaani Mäntynen

Tarkastaja TkT Timo Björk

Ohjaaja TkT Timo Björk

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT Energiajärjestelmät
LUT Kone

Jaani Mäntynen

Kaupallisten väsymisen monitorointilaitteiden vertailu

Kandidaatintyö

2018

26 sivua, 2 kuvaa ja 4 taulukkoa

Tarkastaja: TkT Timo Björk

Ohjaaja: TkT Timo Björk

Hakusanat: datalogger, tallennin, tallentava jatkuva seuranta, rakenteellinen väsyminen, monitorointi, reaaliaikainen rakenteen kunnan monitorointi, ReFaMo

Tutkimuksessa tehtiin kirjallisuusselvitys kaupallisista väsymisen monitorointiin soveltuvista laitteista Lappeenrannan teknillisen yliopiston teräsrakenteille. Kiinnostus rakenteiden, koneiden ja suunnitteluprosessien optimointia kohtaan on kasvavaa. Tutkimuskohteiden tarkka kunnan määrittäminen ja hallinta antavat tärkeää informaatiota tuotteesta suunnittelijoista aina käyttäjille asti.

Väsyminen on ilmiönä vaikeasti ennustettava ja tässä työssä esitellään nykyisiä sekä tulevaisuuden kaupallisia ratkaisuja rakenteellisen väsymisen seurantaan. Kaupallisten tuotteiden toimintatapa käsitellään kategorioittain ja lopuksi suoritetaan vertailua laitteiden ominaisuuksien sekä hinnan perusteella.

Kaupalliset mittalaitemarkkinat ovat kilpailuja ja tuotteen ostajan on tehtävä valinta oman budjettinsa ja tarpeidensa perusteella. Kaupallisten markkinoiden laitteet kategorioitiin seuraavasti: dataloggerit ja tallentava jatkuva seuranta. Reaaliaikainen elinkaaritilan seuranta käsittää kehityksessä olevia tuotteita, jotka antavat tietoa tuotteen käyttäjälle jäljellä olevasta käyttöiästä.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
LUT School of Energy Systems
LUT Mechanical Engineering

Jaani Mäntynen

Comparison of commercial fatigue monitoring devices

Bachelor's thesis

2018

26 pages, 2 figures and 4 tables

Examiner: D. Sc. (Tech.) Timo Björk

Supervisor: D. Sc. (Tech.) Timo Björk

Keywords: datalogger, recorder, continuous recording tracking, structural fatigue, monitoring, Real-time structural health monitoring, ReFaMo

The study is a literature report of commercial fatigue monitoring equipment for Lappeenranta University of Technology steel structures. Interest in optimizing structures, machines and design processes is growing. The accurate health management and control gives important information all the way from designers to the users.

Fatigues as a phenomenon is difficult to predict and, in this thesis, current and future commercial solutions for structural health monitoring are presented. The way of operation of categorized commercial products is presented and comparison between equipment is made based on the features and prices.

The commercial measuring equipment market is competitive, and the buyer of the product must make a choice based on their own budget and demand. Categorization in commercial market was made as follows: dataloggers and continuous recording tracking. Real-time monitoring of life-cycle state includes products that provide information of products remaining lifetime to the user.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

LYHENNELUETTELO

1	JOHDANTO	6
1.1	Tutkimusongelma ja kysymykset	6
1.2	Tutkimuksen tavoitteet.....	7
1.3	Tutkimuksen rajaus.....	7
2	VÄSYMINEN	8
3	RAKENTEELLISEN VÄSYMISEN MONITOROINTI	10
3.1	Dataloggerit	11
3.2	Tallentava jatkuva seuranta	13
3.3	Reaaliaikainen jatkuva elinkaaritilan seuranta.....	14
4	KAUPALLISET MONITOROINTILAITTEET	17
4.1	Dataloggereiden vertailu	17
4.2	Tallentimien vertailu	20
5	TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET	22
	LÄHTEET	24

LYHENNELUETTELO

ADC	Analog to Digital Converter (analoginen digitaaliseksi)
CAF	Corrosion Assisted Fatigue (korroosion avustama väsyminen)
CVM	Comparative Vacuum Monitoring (suhteellisen imun monitorointi)
D/A	Digital to Analog (digitaalinen analogiseksi)
ReFaMo	Real-time Fatigue Monitoring (reaaliaikainen väsymisen monitorointi)

1 JOHDANTO

Nykypäivänä ja varsinkin tulevaisuudessa, koneita ja rakenteita suunniteltaessa pyritään optimoimaan suunnittelu- ja valmistusprosessi siten, että syntyvä tuote täyttää kaikki sille asetetut laatuksiteerit mahdollisimman kustannustehokkaasti. Kustannustehokkuuden näkökulmasta asiakas ei maksa ylilaaadusta ja toiminnan kannattavuutta pyritään nostamaan suunnittelu- ja valmistuskustannusten vähentyessä. (Björk 2017a, s. 11)

Koneita ja rakenteita suunnitellessa yksi merkittävimmistä kriteereistä on tuotteen kestoikä. Tuotteen eliniän ennustettavuus ei ole pelkästään suunnittelijaa kiinnostava tieto uusia ja parempia tuotteita suunniteltaessa, vaan se kiinnostaa myös itse käyttäjää, omistajaa ja henkilöitä, jotka vastaavat huolloista ja hankinnoista. Tästä syystä ollaan kiinnostuneita tutkittavaan kohteeseen kohdistuvista hetkellisistä rasituksista, jäljellä olevasta kestoikästä sekä kuormitusten tilastollisuudesta. (ReFaMo 2018, s. 1)

1.1 Tutkimusongelma ja kysymykset

Tuotteen elinkaaren ennustaminen ja sen hallinta ovat monimutkaisia prosesseja, koska tuotteiden käyttökohteet ja –tavat vaihtelevat aina tapauskohtaisesti (ReFaMo 2018, s. 2). Rakenteellinen väsyminen on ennalta arvaamaton ja monesti merkittävin vauriokriteeri, mutta kulumista ja korroosiota ei sovi unohtaa (Milella 2012, s. 1). Rakenteen tai koneen ennenaikaisella vaurioitumisella on usein merkittäviä seuraamuksia, joka puolestaan lisää käyttäjien kiinnostusta rakenteellisen väsymisen monitorointiin, jonka perusteella myös tätä tutkimusta lähdettiin tekemään (ReFaMo 2018, s. 1). Tässä kandidaatintyössä vastataan seuraaviin aihealueelle keskeisiin kysymyksiin:

- Miksi rakenteellinen väsyminen on merkittävä tekijä koneen tai rakenteen eliniälle?
- Mitä ennenaikaisesta vaurioitumisesta voi seurata?
- Millaisia ratkaisuja kuluttajamarkkinoilla on tarjota rakenteellisen väsymisen monitorointiin?
- Miten erilaiset monitorointimenetelmät eroavat toisistaan?

1.2 Tutkimuksen tavoitteet

Tässä tutkimuksessa tehdään kirjallisuusselvitys kaupallisista väsymisen monitorointilaitteista, käydään läpi keskeisimmät erot eri mittalaitetyyppien välillä ja käsitellään väsymisilmiötä yleisellä tasolla. Tavoitteena on siis kartoittaa, minkälaisia rakenteellisen väsymisen monitorointiin tarkoitettuja tai soveltuvia laitteita on saatavilla kaupallisilla markkinoilla ja vertailla niitä ominaisuuksien, hinnan ja rajoitteiden perusteella.

Tutkimuksen tavoitteena on tehdä kattava selvitys rakenteellisen väsymisen seurantaan soveltuvasta laitteistosta ja selvittää motiivit rakenteellisen väsymisen seurantaan. Työssä tehdään pienimuotoinen vertailu kaupallisilta markkinoilta löytyvien laitteiden välillä ja käydään myös läpi aihealueen tulevaisuuden näkymiä ja kehityssuuntaa.

1.3 Tutkimuksen rajaus

Tutkimus rajataan monitorointilaitteiston osalta yleisessä tiedossa oleviin ratkaisuihin ja menetelmiin. Toisin sanoen kaupalliset markkinat ovat yksi rajoittavista tekijöistä. Monitorointivaihtoehdot rajataan dataloggereihin, tallentavaan jatkuvaan seurantaan, reaaliaikaiseen jatkuvaan elinkaaritilan seurantaan, joista viimeisin käsittelee kehityksessä olevia kiinnostavia ratkaisuja tuotteiden elinkaaren reaaliaikaiseen hallintaan. Tehdään myös mahdollisimman kattava vertailu markkinoilta saatavan laitteiston välillä, kuitenkin rajaten vertailtavien tuotteiden määrää suuren tarjonnan vuoksi.

Rakenteellisen väsymisen ollessa tutkittavan aiheen perusteella erittäin tärkeä ilmiö käsitellään se yleisellä tasolla. Tutkimuksen tavoitteena ja tarkoituksena ei kuitenkaan ole tutkia rakenteellista väsymistä, mutta sen ollessa suurin rakenteen tai koneen vaurioon johtaneista ilmiöistä, käsitellään sitä lyhyesti. Väsymisestä johtuvaa vaurioitumisilmiötä tarkastellaan mahdollisten seuraamusten näkökulmasta.

2 VÄSYMINEN

Tässä kappaleessa käydään väsymisilmiö lyhyesti läpi yleisellä tasolla, ja sitä käsitellään tuotteen suunnittelua ja käyttöä silmällä pitäen. Tarkoituksena on samalla selvittää motiiveja rakenteellisen väsymisen seurantaan ja tutkintaan. Materiaalin rakenteellinen väsyminen on yleisimpiä syitä tuotteiden vaurioitumiseen ja syy haluan tutkia erilaisiin rakenteisiin kohdistunutta rasitusta (ReFaMo 2018, s. 1). Kuormitusten tunnistamisen tarve kasvaa jatkuvasti (ReFaMo 2018, s. 2) ja on todennäköinen syy siihen, että markkinoilla vaikuttavat tuotevalmistajat tarjoavat laajan kirjon erilaisia monitorointiin soveltuvia laitteita. Laitteilla voidaan monitoroida tuotteen eliniän kannalta oleellisia rasituksia ja muutoksia rakenteessa, joka on myös perusta tälle kandidaatintyölle.

Väsymisilmiö on tiedostettu jo pari sataa vuotta ja sitä on pitkään tutkittu insinöörien ja suunnittelijoiden toimesta. Väsymismurtuma ja lopulta rakenteen pettäminen johtuu toistuvasta kuormituksen vaihtelusta jo materiaalin myötö- ja murtolujuutta pienemmillä jännityksen arvoilla. Vaihtelevan kuormituksen aiheuttamassa vauriossa, eli väsymisessä, ratkaisevat tekijät ajan sijaan ovat kuormituskertojen määrä ja voimakkuus (Björk 2017b, s. 2). Väsyminen on yleisin syy rakenteen vaurioitumiseen vuosittain ja sillä voi olla pahimmassa tapauksessa katastrofaaliset seuraukset (Milella 2012, s. 1).

Rakenteellinen väsyminen on ilmiö, joka tulee ottaa huomioon käytännössä kaikilla rakenne- ja koneenosilla, joihin kohdistuu vaihtelevaa kuormitusta. Sillat, tuulimyllyt, turbiinien siivet, koneiden akselit ja lentoteollisuus ovat erinomaisia esimerkkejä siitä, missä rakenteen kunnan seurannasta hyödytään (Björk 2017b, s. 2). Rakenteellinen väsyminen tulee ottaa huomioon energiatehokkaampia ja kevyempiä rakenteita suunnitellessa (ReFaMo 2018, s. 2).

Käytännön esimerkkinä voidaan käyttää metsätyökoneen puomin vauriota, jonka tapahtuessa enneaikaisesti ja ennakoimattomasti koituu omistajalle tai yrittäjälle merkittäviä kustannuksia työn keskeytymisen johdosta. Edellinen esimerkki on esimerkeistä lievempi, koska toinen ääripää voisi olla sillan sortuminen, joka pahimmassa tapauksessa vaatii ihmishenkiä ja aiheuttaa suuria rahallisia kustannuksia. Edellä olevien esimerkkien

tilalle voidaan soveltaa käytännössä mitä tahansa vaihtelevan kuormituksen alaista tuotetta, jossa väsymismurtuma on mahdollinen.

Rakenteellisen väsymisen aiheuttamien vaurioiden ollessa yleisimpiä tuotteiden ennenaikaisten kierrätyksen syitä ei sovi unohtaa korroosiota ja kulumista. Nämä seikat tulee ottaa myös huomioon suunnitteluprosessissa ja tuotetta käyttäessä, mutta tässä kandidaatintyössä ei tämän enempää kyseisiä aiheita käsitellä. Lisäyksenä tosin voidaan mainita korroosion avustama väsyminen, eli CAF, jossa kaksi rakenteen vaurioon johtavaa ilmiötä yhdistetään. Lopputuloksena on ennalta arvaamaton ja tuhoisa ilmiö. (Milella 2012, s. 1)

3 RAKENTEELLISEN VÄSYMISEN MONITOROINTI

Rakenteellisen väsymisen monitorointiin ei ole vielä tiettävästi kehitetty kaupallista laitetta, joka antaisi suoraa tietoa käyttäjälle tuotteen sen hetkisestä kestoiästä reaaliajassa. Kuormituksen väsyttävyyden tutkiminen ja laskenta ei ole uusi asia ja sen määrittämiseen on olemassa vakiintuneita käytäntöjä kuten Rainflow –menetelmä sekä Palmgren-Miner –akkumulaatio. Oikeilla alkutiedoilla ja jälkianalyysin avulla voidaan laskea vaihtelevan kuormituksen vaikutus tuotteen elinikään, mutta jälkianalyysimenetelmiä käytettäessä menetetään kyseisen tiedon reaaliaikaisuus. (ReFaMo 2018, s. 2)

Vaikka Rainflow –menetelmä on vakiintunut tutkimuksissa, sitä ei voida käyttää sellaisenaan reaaliaikaisessa laskennassa ennen kuin tiedostetaan tutkittavan kohteen jännitys-aika -historia kokonaisuudessaan. Ongelma on siinä, että muodostettavan jännitys-rasitus -kuvaajan pisteet eivät välttämättä muodosta suljettuja looppeja, jännitysvaihteluiden ollessa sattuman varaisia. Reaaliaikaista laskentaa varten on kehitetty Rainflowhun perustuvia algoritmeja laskentaohjelmille. (Marsh et al. 2015)

Jälkianalyysiä varten tärkeiden kuormitusten tallentamiseen on kehitetty vuosien saatossa useampia ratkaisuja, jotka eroavat toisistaan toimintatapansa ja edistyneisyytensä perusteella. Yhdistävänä tekijänä kyseisillä laitteilla on se, että pystytään mittaamaan ja havaitsemaan samoja ilmiöitä, kuten esimerkiksi rakenteeseen kohdistuvia kuormituksen vaihteluja, lämpötilan muutosta tai kiihtyvyyttä. Edellä mainittujen esimerkkien lisäksi on myös lukuisia muita suureita, joita kyseisillä laitteilla voidaan mitata ja mittavien arvojen valinta tehdään sen perusteella, minkälaista tietoa kohteesta halutaan kerätä. Toisin sanoen laitteet ovat usein monipuolisia ja käyttökohde ei välttämättä ole sidottu yhden tietyn ongelman ratkaisuun. Nykyiset mittalaitteet vaihtelevat aina in-situ, eli in position, dataloggereista järjestelmiin, joiden mittaamaa dataa voidaan seurata ja käsitellä reaaliaikaisesti.

Tulevaisuudessa näemme todennäköisesti kehittyneitä ratkaisuja, jotka antavat monipuolisempaa, ja tuotteen kannalta elintärkeää informaatiota käyttäjälle reaaliajassa. Ideaalinen tilanne olisi järjestelmä, joka kertoisi käyttäjälle reaaliajassa tuotteessa jäljellä

olevan käyttöön, eli toisin sanoen kyseinen laite ei pelkästään mittaisi esimerkiksi kuormitusvaihteluja, vaan prosessoisi saatua dataa pidemmälle. Tällä hetkellä saatavissa olevat monitorit keräävät tietoa tutkittavasta kohteesta jälkianalysointia varten. Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa menossa olevassa ReFaMo –hankkeessa, eli Real-time Fatigue Monitoring, tarkoituksena on kehittää järjestelmä, joka antaisi tarkkaa tietoa tuotteen elinkaartilasta reaaliajassa (ReFaMo 2018, s. 2). ReFaMo ja muita kiinnostavia kehitysideoita käsitellään vielä tarkemmin myöhemmin tässä työssä.

Kappale on jaettu kolmeen alaotsikkoon, ja dataloggereiden sekä tallentavan jatkuvan seurannan osalta se tarkoittaa sitä, että käydään läpi saatavilla olevia laitetyppejä ja niiden toimintaperiaatetta suuren tarjonnan vuoksi yleisemmällä tasolla. Reaaliaikaisen jatkuvan elinkaartilän seurannan laitteista käydään läpi yrityskohtaisia kehityshankkeita tai projekteja seuraavista syistä: Nykyään ja varsinkin tulevaisuudessa ollaan kiinnostuneita mittalaitteista, jotka eivät pelkästään tallenna antureilta saatavaa tietoa jälkianalyysia varten, sekä kehitteillä olevien laitteiden määrä on huomattavasti rajallisempi verrattuna muihin Data Acquisition -menetelmiin, eli tiedon hankinta -menetelmiin. Reaaliajassa toimivien elinkaarenhallintaan kykenevien laitteiden osuus on samalla katsaus siihen, mitä tulevaisuudessa kaupallisilla markkinoilla on mahdollisesti tarjolla.

3.1 Dataloggerit

Data logging, eli datan kirjaus, on satoja vuosia vanha prosessi, jossa kerätään tietoa kokeesta, kokeilusta tai kohteesta. Aikana ennen nykyaikaista teknologiaa mittaukset tehtiin käsin käyttäen analogisia mittausmenetelmiä ja kirjattiin ylös käyttäen paperia ja kynää. Nykyaikaisten halpojen ja tehokkaiden mikro-ohjainten tullessa markkinoille on siirrytty käyttämään pelkästään mikropiirejä käyttäviä datan kirjaus -menetelmiä. (Ibrahim 2008, s. 397)

Dataloggerit ovat akkukäyttöisiä, pieniä ja helposti siirrettäviä elektronisia laitteita, joita käytetään fyysisen datan keräämiseen ja säilöntään. Loggerit keräävät datansa tutkimuskohteesta käyttäen ulkoisia antureita ja mitattu data voi olla esimerkiksi painetta, lämpötilaa, virtausta, jännitettä, tehoa tai mitä tahansa fyysisiä, kemikaalisia tai sähköisiä parametreja. Dataloggerit perustuvat yleensä tietokoneisiin tai digitaalisiin prosessoreihin.

(Ibrahim 2008, s. 397) Kuvassa 1 Omegan stand-alone dataloggeri, jolla mitataan venymäliuska-antureilta sisään tulevaa signaalia esimerkiksi silloissa.



Kuva 1. Omega OM-CP-BRIDGE101A datalogger (Bridge/Strain Gage Data Logger 2018).

Dataloggerit mittaavat ja tallentavat tietoa niin sanotun sample raten mukaan, eli mittaustiheyden perusteella. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että loggeri tallentaa antureilta saadun arvon sille määritettyinä ajankohtina ja esimerkiksi lämpötilaa tai pidemmissä mittausjaksoissa mitattaessa päivitystaajuus voidaan asettaa todella pieneksi. Tästä poiketen osa loggereista pystyy myös tallentamaan tietoa intervallin keskeltä, mikäli mittakohteessa tapahtuu äkillisiä tai hälytysrajan ylittäviä muutoksia. (Introduction to Data Logging Systems 2018) Jatkuvassa seurannassa käytettäviin tallentimiin verrattuna dataloggereiden päivitystaajuus on pienempi, koska laitteen koko ja sen myötä rajallinen tallennuskapasiteetti on yksi rajoittavista tekijöistä. Harvemmillä mittausväleillä pystytään pidentämään laitteen itsenäistä käyttöaika. (Size, Speed/Memory 2018)

Dataloggereiden tyypit vaihtelevat itsenäisesti toimivista stand-alone laitteista ja langatonta yhteyttä hyödyntävistä online -sovelluksista mittalaitteisiin, jotka ovat suorassa reaaliaikaisessa yhteydessä tietokoneeseen, jolla tuloksia tallennetaan tai niitä luetaan. Offline-periaatteella toimivan stand-alone loggerin mittausjakson jälkeen tallennettu data

siirretään sitä lukevalle päätteelle, kuten tietokoneelle. Stand-alone loggerit käyttävät sisäistä muistia mitattujen arvojen tallennukseen ja laite voidaan sijoittaa minne tahansa, kunhan laite soveltuu kyseisiin olosuhteisiin. Online –versiossa logger on varustettu lähettimellä, jolloin mittadata voidaan lukea etänä joko tietokoneelta tai muulta päätteeltä. (Ibrahim 2008, s. 397) Rakenteellisen väsymisen näkökulmasta dataloggereiden tallentama informaatio vaatii jälkianalysointia muilla tavoilla, mikäli halutaan tutkia tuotteessa jäljellä olevaa käyttöikää.

3.2 Tallentava jatkuva seuranta

Tallentavalla jatkuvalla seurannalla tarkoitetaan erilaisia tallentimia, jotka esittävät antureilta sisään tulevan signaalin arvot ajan suhteen. Perusajatus tallentavien laitteiden taustalla on sama kuin muilla, eli dokumentoida tai analysoida kiinnostavia ilmiöitä ja tapahtumia, mutta toimintatapa kuitenkin eroaa dataloggereista. (Data Acquisition Systems 2018) Kuvassa 2 Omegan tarjoamia kosketusnäytöllisiä tallentimia, joita ei ole rajattu pelkästään venymien mittaukseen.



Kuva 2. Omega RD1000/2000/3000 (Touch Screen Paperless Recorders with Expandable I/O 2018).

Jatkuvassa tallentavassa seurannassa laite tallentaa, esimerkiksi venymäliuska-anturilta, saatavia arvoja tiheällä sample ratella, jonka tuloksena on yhtenäinen jatkuva viiva. Tiheän päivitystaajuuden huono puoli on juuri siinä, että käyttäjä saattaa käydä läpi pitkiä pätkiä tallennetta, jossa on pelkästään suoraa viivaa, mikäli antureiden input, eli sisään tuleva signaali, ei muutu ollenkaan. Paperillisissa laitteissa tämä tarkoittaa ylimääräistä paperin käyttöä, josta voidaan päätellä, että kyseinen laite soveltuu huonosti kohteisiin, jossa muutokset tapahtuvat todella hitaasti tai niitä ei juuri ole. (Introduction to Data Logging Systems 2018) Toisaalta yhtenäisestä tallenteesta voidaan havaita pienetkin muutokset.

Tallentimia on saatavilla useampaa tyyppiä ja suurin osa tallentimista toimii ADC -periaatteella, eli ne muuttavat analogisen signaalin digitaalseksi, mutta saatavilla on myös D/A laitteita, jotka muuttavat digitaalisen signaalin analogiseksi. Eroavaisuudet eivät lopu tähän ja saatavilla on paperille piirtäviä ja paperittomia versioita. Markkinoilla on saatavilla myös langattomia ja helposti siirrettäviä laitteita, jotka hyödyntävät erilaisia langattomia tiedonsiirto -tekniikoita, kuten bluetoothia, jolloin laite on mahdollista yhdistää esimerkiksi puhelimeen tai tablettiin. Lisäksi USB:llä tai suoraan tietokoneeseen kytkettäviä mikropiirejä on saatavilla. Tallentimet, aivan kuten dataloggeritkin, antavat käyttäjälle dataa, jota voidaan hyödyntää tuotteen elinikää laskettaessa jälkianalyysien avulla.

Mainitsemisen arvoisia laitteita tutkittavan kohteen rasiustien taltioimiseen ovat Sensuronin ja HBM:n valmistamat ratkaisut. Sensuron tarjoaa laitetta lentoteollisuuteen, jonka anturit hyödyntävät kuituoptiikkaa, jolla voidaan mitata muun muassa lämpötilaa, venymää, kuormaa, jännitystä ja 3D-muotoa rakenteesta jälkianalysointia varten reaaliajassa (Aerospace 2018). Edellä mainitun lisäksi HBM tarjoaa järjestelmää aina antureista ohjelmistoon saakka, jossa hyödynnetään kuitua tiedonsiirtoon antureilta moduuliin (HBM 2018). Kuidun käyttö tiedonsiirrossa mahdollistaa erittäin nopeat siirtonopeudet (Valokuitu 2018).

3.3 Reaaliaikainen jatkuva elinkaaritilan seuranta

Reaaliaikainen jatkuva elinkaaritilan seuranta on yksi kiinnostavimmista rakenteellisen väsymisen monitorointitavoista tämän kandidaatintyön näkökulmasta ja myös yksi pääsivistä miksi tutkimusta lähdettiin alun perin tekemään. Reaaliajassa toimivien laitteiden luokittelu tietyn toimintatavan mukaan ei ole yhtä helppoa kuin dataloggereilla ja perinteisimmillä

tallentimilla. Tämä ei tarkoita sitä, että edellä mainitut laitteet toimisivat kaikki samalla periaatteella. Dataloggereita ja tallentimia löytyy myös reaaliajassa toimivia, joka tuo omat haasteensa tämän kappaleen aiheen rajaukseen. Tässä kappaleessa käsitellään laiteprojekteja ja -hankkeita, jotka poikkeavat toimintaperiaatteensa perusteella ja kykenevät jonkinasteiseen jälkianalysointiin reaaliajassa. Yksinkertaisimmillaan tutkimuskohteesta saadaan arvoja venymäliuska-anturien välityksellä ja erot laitteissa ilmenevät vasta jälkikäsitelyprosessin myöhemmässä vaiheessa.

Jotta laitetta voidaan kutsua reaaliajassa toimivaksi, täytyy sen muuntaa antureista saatava signaali käyttökelpoiseen muotoon tietyssä aikaikkunassa laitteen käyttäjälle. Suoritusajat voidaan kategorioida vielä tarkemmiksi käyttökohteen mukaisesti ja tätä tietoa voidaan myös soveltaa muihinkin elektronisiin laitteisiin. (Jian 2016, s. 3-4) Tässä tutkimuksessa reaaliaikaisuudella tarkoitetaan sitä, että kommunikaatio laitteen ja käyttäjän välillä on viiveetöntä tai viive on käytännön kannalta merkityksetön.

Kuten aiemmin työssä mainittiin, markkinoilla ei ole valmiita kaupallistettuja monitorointi ratkaisuja reaaliaikaiseen eliniän ja käytön rasittavuuden määrittämiseen ja niin kutsuttujen reaaliajassa toimivien loggereiden ja tallentimien idea on mahdollisuus lukea mittadataa reaaliajassa. Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa kehitteillä olevan ReFaMo -hankkeen tarkoituksena on kaupallistaa hintakilpailukykyinen mittalaite, jolla tuotteen käyttäjän on mahdollista seurata tuotteen elinikää vaihtelevan rasituksen alaisena reaaliaikaisesti, joko paikan päällä tai etänä (ReFaMo 2018, s. 1). Myös hetkellisen rasituksen visualisoinnilla käyttäjä voi opetella käyttämään tuotetta mahdollisimman tehokkaasti ja säästeliäästi (ReFaMo 2018, s. 5). Tieto koneen tai rakenteen tarkasta senhetkisestä kunnosta auttaa käyttäjää suunnittelemaan korjaavat toimenpiteet tilanteeseen, jossa huollosta aiheutuu mahdollisimman vähän häiriötä. Kyseistä tietoa voidaan hyödyntää missä tahansa, mutta erinomaisena esimerkkinä toimii prosessiteollisuus.

Comparative Vacuum Monitoring, eli CVM, on Structural Monitoring Systems:in kehittämä tekniikka rakenteeseen syntyvän särön tunnistamiseen. Periaate menetelmän taustalla on anturi, joka sijoitetaan rakenteen kohtaan, jossa särö todennäköisimmin syntyy. Anturissa on kahdenlaisia pieniä kanavia, joista toisessa kulkee ilmaa ja toisessa on jatkuva imu. Särön syntyessä ilma- ja imukanavan välille, havaitaan vuoto virtausmittarin avulla. (How

Comparative Vacuum Monitoring works 2018) Materiaalin väsyminen ja lopulta hajoaminen johtuu toistuvien kuormitusten aiheuttamasta säröytymisestä rakenteessa (Schijve 2003, s. 1). CVM ei suoranaisesti kerro tuotteen elinkaartilasta mitään, mutta pienenkin särön syntymisen havainnointi voi antaa potentiaalisesti tärkeää informaatiota käyttäjälle suoraan tai jälkianalyysiä varten. CVM on kehitetty laboratoriotestausta ja käyttöä varten, sekä sitä testataan ilmailuteollisuudessa (Continuous Monitoring 2018).

4 KAUPALLISET MONITOROINTILAITTEET

Tässä kappaleessa vertaillaan markkinoilta löytyviä laitteita teknisten tietojen avulla ja se on jaettu alaotsikoihin samalla periaatteella kuin kappale ”Rakenteellisen väsymisen monitorointi”. Vertailtavat laitteet ovat dataloggereita tai tallentimia, ja vertailu tapahtuu saman kategorian tuotteiden välillä. Reaaliaikaisen jatkuvan elinkaartilän seurannasta ei tehdä vertailua, koska markkinoilla ei ole vielä laitteita, jotka antaisivat reaaliaikaista informaatiota tuotteen elinkaartilasta käyttäjälle ja mahdollisesti kehitteillä olevien laitteiden tekniset tiedot eivät ole vielä saatavilla. Vertailtavien laitteiden määrää on jouduttu rajaamaan suuren tarjonnan vuoksi ja jokainen vertailussa oleva laite tukee myös venymän mittausta siksi, että venymän arvot ovat kiinnostavia rakenteen eliniän määrittämisen kannalta.

4.1 Dataloggereiden vertailu

Vertailuun valittiin neljä laitetta, joista kolme ovat hieman yksinkertaisempia ominaisuuksien perusteella sekä yksi edistyneempi ja sen myötä kalliimpi laite. Seuraavalta sivulta löytyvistä taulukoista 1 ja 2 löytyvät vertailussa käytettävien laitteiden tekniset tiedot. Vertailtavat kohdat valittiin sen perusteella, mihin mahdollinen kuluttaja kiinnittää todennäköisesti ensimmäisenä huomiota ja lähtee karsimaan vaihtoehtoja laitteen valintaprosessissa. Selvennykseksi käydään läpi muutama käsite ja sama listaus pätee myös tallentimien vertailuun (Tips on Buying a Data Logger 2018):

- Mittausalue kertoo välin, jolla olevia anturien arvoja luetaan.
- Resoluutio määrittää pienimmän arvojen muutoksen, jonka laite havaitsee.
- Tarkkuus puolestaan kertoo mittausten tarkkuuden.

Taulukko 1. Vertailtavat dataloggerit (OM-CP-BRIDGE-101A 2018) (MadgeTech 2018) (Newsteo 2018) (OM-DAQXL 2018).

Merkki/malli	Hinta	Käyttökohde	Sample rate	Mittausalue	Resoluutio	Tarkkuus	Muisti	Käyttöolosuhteet	Toiminta
Omega OM-CP-BRIDGE-101A	530\$	Sillat, venymän mittaus	4Hz–1krt/vrk	±30mV	1µV	±0.01%	1 000 000 tallennetta	-20–80°C lämpötila, saatavilla suoja vedelle	- Akku käyttöinen - Stand-alone - Tietokoneeseen yhdistettynä, voidaan monitoroida reaaliajassa
Madgetech BRIDGE120-10MV	549\$	Sillat, venymän mittaus	20Hz–valittava	±15mV	1µV	±0.25%	32 767 tallennetta	-40–80°C	- Akku käyttöinen - Stand-alone - USB yhteydellä tietokoneeseen
Newsteo LGJ3D	-	Sillat, venymän mittaus	Max. 7Hz	±50mV	16bit	-	32 768 tallennetta	-40–85°C	- Akku käyttöinen - Toimii myös itsenäisesti muistin rajoissa, kytkettävissä tietokoneeseen radioyhteyden kautta (900m)
Omega OM-DAQXL-1-EW-NA	1995\$	Monikäyttöinen, sisääntulot ohjelmoitava, toimii myös venymän mittaukseen	125Hz–1krt/vrk	-Säädettävä -Min. ±50mV	-	±0.1%	-32GB SD kortti -32GB USB asema -1GB sisäinen	0–50°C	-Akku käyttöinen, toimii myös stand alone -Kosketusnäyttö ja voidaan seurata reaaliajassa -8 analogista kanavaa -WiFi

Taulukko 2. Vertailtavien dataloggereiden fyysiset ominaisuudet (OM-CP-BRIDGE-101A 2018) (MadgeTech 2018) (Newsteo 2018) (OM-DAQXL 2018).

Merkki/malli	Ulkoiset mitat	Paino	Linkki tuotteeseen
Omega OM-CP-BRIDGE-101A	36mm x 64mm x 16mm (ilman suojaa), 62mm x 93mm x 25mm (vesisuojaalla)	24g (ilman suojaa), 140g (suojaalla)	https://www.omega.com/das/pdf/OM-CP-BRIDGE101A.pdf
Madgetech BRIDGE120-10MV	20mm x 42mm x 68mm	60g	https://www.instrumart.com/assets/bridge120-Datasheet.pdf
Newsteo LGJ3D	98mm x 64mm x 34mm	250g	https://www.newsteo.com/en/datalogger/any-sensor-datalogger/gauge-bridge-datalogger/
Omega OM-DAQXL-1-EW-NA	286mm x 152,4mm x 63,5mm	1130g	https://www.omega.com/pptst/OM-DAQXL.html

Edelliseltä sivulta löytyvissä taulukoissa 1 ja 2 on esitelty valittujen laitteiden valitut tekniset tiedot. Osasta laitteita ei ollut saatavilla kaikkia tietoja, mutta puutteiden ollessa kuitenkin pieniä voidaan muodostaa havainnollistava kuvaus laitteista sekä niiden kyvyistä. Mitat ja paino ovat monesti loggeria valittaessa merkityksellinen tekijä ja se tulee ottaa myös huomioon. Resoluutio on suurimmassa osassa laitteita, jotka tukevat venymäliuska-antureita, ilmoitettu mikrovoltteina tai bitteinä. Venymäliuska-anturin toiminta perustuu anturissa olevan johteen muodon muutokseen, toisin sanoen metallijohteen pidentyessä myös resistanssi pienenee ja mittalaite havaitsee muutoksen inputsignaalisissa (Principle of Working of Strain Gauges 2016). Bittisellä resoluutiolla puolestaan voidaan ilmoittaa, kuinka monta eri arvoa voidaan mitta-alueelta rekisteröidä. 16-bittisellä järjestelmällä tämä tarkoittaa 2^{16} :tta arvoa, joka on yhtä kuin 65 536 arvoa. Suurempi resoluutio tarkoittaa muutoksen herkemmin havaitsevaa laitetta, mutta tulee kuitenkin ottaa huomioon, että suuri resoluutio ei tarkoita automaattisesti tarkempaa laitetta. Vertailtavien laitteiden tarkkuus on ilmoitettu prosenteissa.

Taulukon 1 ensimmäiset kolme laitetta edustavat edullisempia ja yksinkertaisempia laitteita, joiden pääasiallinen käyttö on venymien monitoroinnissa. Omegan ja Madgetechin laitteista on saatavilla samaan hintaan eri mitta-alueella toimivia versioita, mutta vertailuun valittiin pienimmällä mitta-alueella toimivat versiot, joka on myös yleensä se tarkin mitta-alue jo ilmoitetun tarkkuuden perusteella. Omegalta saatava kalliimpi OM-DAQXL-1EW-NA sisältää säädettävän mitta-alueen ja laitetta ei ole rajoitettu pelkästään venymän mittaukseen. Kalliimmassa mallissa on myös enemmän sisääntulokanavia ja lisähinnasta analogisten inputtien määrä voidaan tuplata 16:een. Laitteiden sample ratet ovat melko lähellä toisiaan pois lukien tiheimpään näytteenottoon kykenevä OM-DAQXL. Jokaisessa laitteessa on myös säätömahdollisuus mittaustiheyttä varten, ja tiheämpi antaa tietysti tarkempaa tietoa erityisesti kohteesta, jossa muutoksia tapahtuu nopeasti.

Muistin osalta on ilmoitettu laitteiden optimaalinen tilanne ja pitkät käyttöajat edellyttävät pientä sample ratea. Toisin sanoen kohteissa, joissa käytetään harvinta mahdollista sample ratea, on mahdollista päästä ilmoitettuihin lukuihin, kunnes muisti on täynnä tai akku tyhjä. Kalliimpaa kosketusnäytöllistä OM-DAQXL-1EW-NA:ta ei ole tarkoitettu pitkäaikaiseen stand-alone loggaukseen sen akkukeston ollessa vain pienimmillään muutamia tunteja

(Battery Life 2018). Muut vaihtoehdot puolestaan kykenevät pitkiinkin stand-alone mittaussjaksoihin.

Kaikkia laitteita on mahdollista seurata reaaliajassa tietokoneeseen yhdistettynä, mutta Newsteo LGJ3D ja Omegan OM-DAQXL kykenevät myös etäseurantaan. Newsteossa kommunikointiin tietokoneen ja loggerin välillä käytetään radioyhteyttä ja Omegassa puolestaan Ethernetia tai WiFiä laitteiden varustelutilanteen mukaisesti. Hintojen osalta ei ole tehty valuuttamuunnoksia, muuttuvien valuuttakurssien johdosta.

4.2 Tallentimien vertailu

Tallentimien osalta päädyttiin vertailemaan kolmea eri vaihtoehtoa, jotka eroavat melkoisesti toisistaan ominaisuuksien sekä hinnan osalta. Tekniset tiedot on esitetty samalla tavalla kuten dataloggereidenkin vertailussa. Tekniset tiedot löytyvät alla olevista taulukoista 3 ja 4.

Taulukko 3. Vertailtavat tallentimet (RD1000 2018) (NI 9235 2018) (USB-1808 2018).

Merkki/malli	Hinta	Käyttökohde	Sample rate	Mittausalue	Resoluutio	Tarkkuus	Muisti	Käyttöolosuhteet	Toiminta
Omega RD1003	1810\$	Pystyy monitoroimaan eri sovelluksia, soveltuu venymän mittaukseen	Analogisella sisääntulolla 10Hz	$\pm 122\text{mV} - \pm 50.6\text{V}$	Analogisella kortilla 24bit	$\pm 0.05\%$	SD - korttipai kka	Käyttölämpötila 0–50°C	- 4.3" kosketusnäyttö - Valinnaisella ohjelmalla reaaliaikainen seuranta mahdollista - Sisältää 3 kanavaisen analogisen kortin - Ethernet
National Instruments NI-9235	1900\$	Moduuli analogisilla sisääntuloilla venymän mittaukseen	10000Hz	$\pm 29.4\text{mV/V}$ - Heräte max. 2V	24bit	Kalibroidulla laitteella jopa $\pm 0.02\%$	-	Käyttölämpötila -40–70°C	- Vaatii oman ohjaimen ja ohjelman, jotka nostavat laitteiston hintaa - 8 analogista sisääntuloa
USB-1808	699\$	Tietokoneeseen liitettävä moduuli analogisilla sisääntuloilla	50000Hz – 0.023Hz	$\pm 5\text{V} - \pm 10\text{V}$	18bit	-	-	Käyttölämpötila 0–55°C	- 8 analogista sisääntuloa - Tietokoneeseen USB:llä liitettävä moduuli - Sisältää ohjelman käyttöön, yhteensopiva useamman kanssa

Taulukko 4. Vertailtavien tallentimien fyysiset ominaisuudet (RD1000 2018) (NI 9235 2018) (USB-1808 2018).

Merkki/malli	Ulkoiset mitat	Paino	Linkki tuotteeseen
Omega RD1003	144mm x 144mm x 189mm	-	https://www.omega.com/pptst/RD1000_RD2000_RD3000.html
National Instruments NI-9235	-	158g	http://www.ni.com/pdf/manuals/377235a_02.pdf
USB-1808	127mm x 89,9mm x 35,6mm	-	https://www.microdaq.com/measurement-computing-usb-1808-daq.php

Vaikka tallentimia ja dataloggereita ei varsinaisesti keskenään tässä kappaleessa vertailla, nopealla tarkastelulla huomataan, että yleisesti sample rate on parhaimmillaan huomattavasti suurempi tallentimilla. Laitteiden resoluutiot ovat ilmoitettu biteissä ja vertailussa olevia laitteita ei ole suunniteltu pitkiin stand-alone mittaussjaksoihin. NI-9235:ttä lukuun ottamatta laitteet soveltuvat myös venymäliuska-antureiden lisäksi muiden analogisten antureiden lukemiseen. Tallentimien osalta kaikki valmistajat eivät ole ilmoittaneet fyysisiä mittoja, koska kyseinen tieto ei ole yhtä relevantti paikan päällä mittauksia tehtäessä.

Omegan ja National Instrumentsin laitteista on saatavilla eri hintaisia versioita asiakkaan tarpeiden mukaan. Lisähinnasta Omegan laitteen voi tilata jopa 48:lla input kanavalla, ja 5.6 tai 12.1 tuumaisella kosketusnäytöllä. NI-9235 on kyseisen C-sarjan kalleimpia moduuleja, mutta moduulin lisäksi toimintaan vaaditaan valinta lukuisista rungoista tai mikroprosessorillista ohjaimista. Rungon tai ohjaimen lisäksi tarjotaan myös maksullista ohjelmistoa tulosten analysointiin. NI-9235:seen suositeltu ohjelmistolisenssi nostaa laitteen hankintahintaa, kun puolestaan USB-1808 ja RD1003 sisältävät ilmaisen perusohjelman tietokoneelle.

National Instrumentsin NI-9235 on suunniteltu juuri venymien mittaukseen ja kokonaisuena järjestelmänä se on myös kaikista kallein vaihtoehdoista. Kyseisen moduulin ympärille on mahdollista rakentaa erilaisia järjestelmiä erilaisille vaatimustasoille. Kyseinen moduuli häviää ainoastaan sample ratensa osalta halvimmalle vaihtoehdolle, mutta lukuisat kustomointi mahdollisuudet antavat vapauden laitteen ostajalle mieluisen kokoonpanon rakentamiseen.

5 TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän kandidaatintyön tuloksena on selvitys rakenteellisen väsymisen mittaukseen soveltuvista laitteista sekä niiden vertailusta. Tavoitteena on esitellä kaupallisilta markkinoilla saatavissa olevat mittalaitetyypit mahdollisimman kattavasti, kuitenkin rajaten vertailtavien laitteiden määrää. Vertailuun valittujen laitteiden rajaaminen perustellaan suuren markkinatarjonnan perusteella ja vertailtavat laitteet valittiin vertailtavien ominaisuuksien perusteella. Tallentimia ja dataloggereita käsitellessä pyrittiin välttämään liiallista spesifikaatiota, mutta lopputuloksena kuitenkin saatiin kattava yleiskatsaus tuotteiden toimintamallista sekä toiminnallisuuksien eroista.

Tehdystä tutkimuksesta saadaan hyvä käsitys monitorointilaiteteknologian nykyisestä tilasta, nykypäivän sekä tulevaisuuden tarpeista ja tulevasta kehityssuunnasta. Vertailulla myös osoitetaan mitä eroavaisuuksia samassa kategoriassa kilpailevien tuotteiden välillä on eri hintaluokissa. Kuten vertailu osoittaa, dataloggereiden välillä oli hyvin paljon yhtäläisyyksiä, vaikka laitteen ympärillä olevat ominaisuudet vaihtelevat hinnan perusteella. Tallentimien väliset erot sekä niihin valittavat optiot aikaansaavat dataloggereita suurempia eroavaisuuksia saman kategorian sisällä. Laitteiden erot suorituskyvyssä ovat suurempia ja työn taustatutkimusta tehdessä huomataan, että tallenninvalmistajat tarjoavat monipuolisempia ja kustomoitavampia järjestelmiä.

Vertailun taulukointi on muodostettu kuluttajan mahdollisten kiinnostuksen kohteiden perusteella ja sen tarkoituksena on helpottaa laitteiden välistä vertailua. Lopulta tutkimuskohteeseen valittava laite valitaan sille asetettujen vaatimusten ja budjetin perusteella. Taustatutkimus osoittaa, että valinnanvaraa ja kilpailua monitorointilaitemarkkinoilta löytyy runsaasti. Tuotteen valinta on monen tekijän summa ja siksi jokaiseen käyttökohteeseen soveltuvaa laitetta on mahdotonta suositella. Valinnanvaraa löytyy aina muutaman sadan euron dataloggereista kymmenien tuhansien eurojen seurantajärjestelmiin ja lopullisen päätöksen teko jää ostajalle.

Tutkimuksen perusteella voidaan tehdä lukuisia johtopäätöksiä aihepiiristä ja sen ympäriltä. Vaikka tässä työssä vertailtavien laitteiden toiminnassa painotettiin soveltuvuutta

venymien mittaukseen, huomattiin, että suurta osaa laitteista voidaan hyödyntää myös lukuisissa muissa sovelluksissa. Tämän kandidaatintyön vertailuun valikoitui myös tuotteita, jotka ovat suunniteltu juuri venymien monitorointiin. Monitorointilaitemarkkinoilla on selkeää kilpailua ja monet laitevalmistajat pyrkivät erottumaan monipuolisuuden ja lisävarustelun avulla. Dataloggereista ja tallentimista on saatavilla hyvin yksinkertaisia laitteita, jotka samalla edustavat oman kategoriansa hintaskaalan alemmaa päätä, mutta lisäoptioiden ja ominaisuuksien määrän kasvaessa laitteiden hinta luonnollisesti kasvaa.

Dataloggereita käytetään usein etäisemmissä kohteissa, jolloin pitkistä toiminta-ajoista sekä laitteiden pienestä fyysisestä koosta on hyötyä. Tallentimia käytetään paikan päällä tehtävissä tutkimuksissa huonon stand-alone -kyvykkyyden johdosta. Loggerit ovat pääsääntöisesti huomattavasti yksinkertaisempia kuin monikanavaiset tallenninjärjestelmät. Poikkeuksia löytyy tästäkin yleistyksestä, mutta se puolestaan kertoo markkinoiden monipuolisuudesta ja kuluttajien muuttuvista tarpeista.

Tämän kandidaatintyön myötä esille nousseista aiheista mielenkiintoisin on tutkimuskohteiden reaaliaikainen kunnon ja eliniän seurannan mahdollisuus. Tutkimusta tehdessä esille nousi muutamia yrityksiä ja hankkeita, joilla tarve reaaliaikaiseen elinkaaritilanseurantaan pyritään ratkaisemaan. Ensimmäiset tähän kykenevät laitteet tulevat suurella todennäköisyydellä mullistamaan kaupalliset mittalaitemarkkinat. Elinkaaritilan hallinta tuo mukanaan paljon potentiaalia rakenteiden suunnitteluun ja käyttöön. Uusia tuotteita kehittäessä, testatessa tai vanhaa parantaessa monipuolisempi informaatio tarjoaa mahdollisuuksia rakenteiden optimointiin, joka tarkoittaa energiatehokkaampia sekä toimintavarmempia tuotteita. Uudenlaisten monitorointilaitteiden avulla tämä on mahdollista. Toisaalta reaaliaikainen tieto esimerkiksi työkoneen puomin kunnosta ja käyttäjästä tarjoaa mahdollisuuden tehokkaampiin työtapoihin ja auttaa ennustamaan ja suunnittelemaan mahdollisia huoltotoimenpiteitä.

LÄHTEET

Aerospace. 2018. [Sensuronin www-sivuilla]. [Viitattu 9.5.2018]. Saatavissa: <http://www.sensuron.com/solutions/aerospace/>

Battery Life. 2018. [Omegan www-sivuilla]. [Viitattu 20.5.2018]. Saatavissa: <https://www.omega.com/pptst/OM-DAQXL.html>

Björk, T. 2017a. Teräsrakenteet 1, 1. Johdanto. S. 11.

Björk, T. 2017b. Teräsrakenteet 1, 10. Väsyminen. S. 2.

Bridge/Strain Gage Data Logger. 2018. [Omegan www-sivuilla]. [Viitattu 29.5.2018]. Saatavissa: <https://www.omega.com/pptst/OM-CP-BRIDGE101A.html>

Continuous Monitoring. 2018. [SMSsystems'n www-sivuilla]. [Viitattu 9.5.2018]. Saatavissa: <http://www.smsystems.com.au/continuous-monitoring-overview/>

Data Acquisition Systems. 2018. [www-tuotedokumentti]. Omega, 2018. [Viitattu 9.5.2018]. Saatavissa: <https://www.omega.com/techref/pdf/DASINTRO.pdf>

HBM. 2018. [HBM:n www-sivuilla]. [Viitattu 9.5.2018]. Saatavissa: <https://www.hbm.com/en/>

How Comparative Vacuum Monitoring works. 2018. [SMSsystems'n www-sivuilla]. [Viitattu 9.5.2018]. Saatavissa: <http://www.smsystems.com.au/cvm-how-it-works/>

Ibrahim, D. 2008. A Data Logger for Teaching Data Capturing and Analysis to Engineering Students. Teoksessa: Computer Applications in Engineering Education. 2010. Vol.18 (2). S. 397-405.

Introduction to Data Logging Systems. 2018. [www-tuotedokumentti]. Omega, 2018. [Viitattu 9.5.2018]. Saatavissa: <https://www.omega.com/techref/pdf/LOGGERINTRO.pdf>

Jian, K. 2016. Real-time systems. S. 3-4.

MadgeTech. 2018. [www-tuotedokumentti]. MadgeTech, 2018. [Viitattu 29.5.2018]. Saatavissa: <https://www.instrumart.com/assets/bridge120-Datasheet.pdf>

Marsh, G., Wignall, C., Thies, P.R., Barltrop, N., Incecik, A., Venugopal, V. & Johanning, L. 2015. Review and application of Rainflow residue processing techniques for accurate fatigue damage estimation. Teoksessa: International Journal of Fatigue Volume 82, Part 3. 2016. S. 757-765.

Milella, P. P. 2012. Nature and Phenomenology of Fatigue. Teoksessa: Milella, P. P. Fatigue and Corrosion in Metals. 2013. S. 1-72.

Newsteo. 2018. [www-tuotedokumentti]. Newsteo, 2018. [Viitattu 29.5.2018]. Saatavissa: <https://www.newsteo.com/en/datalogger/any-sensor-datalogger/gauge-bridge-datalogger/>

NI 9235. 2017. [www-tuotedokumentti]. National Instruments, 2017. [Viitattu 30.5.2018]. Saatavissa: http://www.ni.com/pdf/manuals/377235a_02.pdf

OM-CP-BRIDGE-101A. 2018. [www-tuotedokumentti]. Omega, 2018. [Viitattu 29.5.2018]. Saatavissa: <https://www.omega.com/das/pdf/OM-CP-BRIDGE101A.pdf>

OM-DAQXL. 2018. [www-tuotedokumentti]. Omega, 2018. [Viitattu 29.5.2018]. Saatavissa: <https://www.omega.com/das/pdf/OM-DAQXL.pdf>

Principle of Working of Strain Gauges. 2018. What are Strain Gauges and how they Work? [verkkodokumentti]. [Viitattu 20.5.2018]. Saatavissa: <https://www.brighthubengineering.com/hvac/48653-what-are-strain-gauges-and-how-they-work/>

RD1000. 2018. [www-tuotedokumentti]. Omega, 2018. [Viitattu 30.5.2018]. Saatavissa: https://www.omega.com/temperature/pdf/RD1000_RD2000_RD3000.pdf

ReFaMo. 2018. TUTKIMUSSUUNNITELMA, ReFaMo TutLi-hanke. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto. S. 1-5.

Schijve, J. 2003. Fatigue of Structures and Materials. S. 1.

Size, Speed/Memory. 2018. [Omegan www-sivuilla]. [Viitattu 9.5.2018]. Saatavissa: <https://www.omega.com/prodinfo/dataloggers.html>

Tips on Buying a Data Logger. 2018. [ONSET:n www-sivuilla]. [Viitattu 20.5.2018]. Saatavissa: <http://www.onsetcomp.com/tips-on-buying-a-data-logger>

Touch Screen Paperless Recorders with Expandable I/O. 2018. [Omegan www-sivuilla]. [Viitattu 29.5.2018]. Saatavissa: https://www.omega.com/pptst/RD1000_RD2000_RD3000.html

USB-1808. 2018. [www-tuotedokumentti]. MicroDAQ, 2018. [Viitattu 30.5.2018]. Saatavissa: <https://www.microdaq.com/measurement-computing-usb-1808-daq.php>

Valokuitu. 2018. [Finnetin www-sivuilla]. [Viitattu 29.5.2018]. Saatavissa: <https://www.finnet.fi/valokuitu/>