



Antti Sivonen

HBM-tiedonkeruujärjestelmän käyttöönotto mekaanisessa testauksessa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja automaatiotekniikka

Insinöörityö

21.4.2024

Tiivistelmä

| | |
|-----------------------|--|
| Tekijä: | Antti Sivonen |
| Otsikko: | HBM-tiedonkeruujärjestelmän käyttöönotto mekaanisessa testauksessa |
| Sivumäärä: | 34 sivua |
| Aika: | 21.4.2024 |
| Tutkinto: | Insinööri (AMK) |
| Tutkinto-ohjelma: | Sähkö- ja automaatiotekniikka |
| Ammatillinen pääaine: | Automaatiotekniikka |
| Ohjaajat: | Lehtori Tuomas Leppänen Asiantuntija Tuomas Teräsvuori |

Tässä opinnäytetyössä otettiin käyttöön uusi HBM:n tiedonkeruujärjestelmä Eurofins Expert Service Oy:n mekaanisessa testauksessa. Uusi laitteisto koostui QuantumX MX840B -mittausvahvistimesta ja Catman-mittausohjelmistosta.

Työssä esiteltiin paitsi uusi laitteisto, myös jo olemassa oleva laitteisto, jonka kanssa uusi järjestelmä yhteensovitettiin. Olemassa oleva laitteisto sisälsi servohydraulisia aineenkoestuskoneita ja sylintereitä sekä erilaisia voiman, siirtymän ja lämpötilan mittaamiseen käytettäviä antureita. Työssä käytiin läpi laitteiston toimintaperiaatteet ja konfigurointi uuteen järjestelmään. Olemassa olevat anturit lisättiin uuden mittausohjelmiston anturitietokantaan ja anturien liittämiseksi mittausvahvistimeen tehtiin so-piva adapteri.

Uuden tiedonkeruujärjestelmän toimintaa testattiin käytännössä lasikuituvahvisteisen putken vetolujuuskokeissa soveltaen ASTM D2290-00 -standardia. Kokeissa käytettiin MTS-aineenkoestuskonetta. Koekappaleen venymän mittaukseen käytettiin venymäliuska-antureita ja lämpötilan seurantaan termoparia ja PT100-anturia.

Lopputuloksena todettiin uuden järjestelmän soveltuvan hyvin mekaanisen testauksen mittaustarpeisiin mahdollistaen luotettavan ja nopean tiedonkeruun ja helpottavan mittausdatan jälkikäsitteilyä.

Avainsanat: tiedonkeruujärjestelmä, mittausvahvistin, mittausohjelmisto, mekaaninen testaus

Abstract

Author: Antti Sivonen
Title: Implementation of the HBM data acquisition system in mechanical testing
Number of Pages: 34 pages
Date: 21 April 2024

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Electrical and Automation Engineering
Professional Major: Automation Engineering
Supervisors: Tuomas Leppänen, Senior Lecturer
Tuomas Teräsvuori, Expert

In this thesis work, the new HBM data acquisition system was implemented in the mechanical testing department of Eurofins Expert Service Oy. The new hardware consisted of a QuantumX MX840B measurement amplifier and Catman measurement software.

The work concerned not only the new hardware, but also the existing hardware with which the new system was coordinated. The existing equipment included servo-hydraulic material testing machines and cylinders, as well as various sensors for force, displacement, and temperature measurement. The work covered the principles of operation and configuration of the equipment for the new system. Existing sensors were added to the sensor database of the new measurement software and a suitable adapter was made to connect the sensors to the measurement amplifier.

The new data acquisition system was tested in practice in tensile strength tests on fiberglass reinforced pipe using the ASTM D2290-00 standard. An MTS material testing machine was used for the tests. Strain gauges were used to measure the elongation of the specimen and a thermocouple and PT100 sensor were used to monitor the temperature.

As a result, a new HBM data acquisition system was implemented and was found to be well suited to the measurement needs of mechanical testing, enabling reliable and fast data collection and facilitating post-processing of the measurement data.

Keywords: data acquisition system, measurement amplifier, measurement software, mechanical testing

Sisällys

Lyhenteet

| | | |
|-----|---|----|
| 1 | Johdanto | 1 |
| 2 | Uusi laitteisto | 2 |
| 2.1 | Tiedonkeruujärjestelmä | 2 |
| 2.2 | QuantumX MX840B-mittausvahvistin | 3 |
| 2.3 | Catman-mittausohjelmisto | 7 |
| 3 | Olemassa oleva laitteisto | 8 |
| 3.1 | Instron-ohjausyksikkö ja toimilaitteet | 8 |
| 3.2 | Venymäliuska-anturit | 11 |
| 3.3 | Voima-anturit | 13 |
| 3.4 | Siirtymäanturit | 14 |
| 3.5 | Lämpötila-anturit | 16 |
| 4 | Tiedonkeruujärjestelmän toteutus | 17 |
| 4.1 | HBM QuantumX MX840B -mittausvahvistimen konfigurointi | 17 |
| 4.2 | Yhdistäminen olemassa olevaan laitteistoon | 18 |
| 4.3 | Catman-mittausohjelmiston konfigurointi | 22 |
| 5 | Järjestelmän testaus | 26 |
| 6 | Yhteenveto | 31 |
| | Lähteet | 33 |

Lyhenteet

- ADC: *Analog-to-digital converter*. Analogiadigitaalimuunnin, joka muuttaa analogisen signaalin digitaaliseen muotoon.
- CAN *Controller Area Network*. Väyläprotokolla, jota käytetään yleisesti autoteollisuuden sovelluksissa.
- DAS: *Data Acquisition System*. Tiedonkeruujärjestelmä.
- DAQ: *Data Acquisition*. Prosessi, jossa fysikaalisia suureita mitataan ja muunnetaan digitaaliseen muotoon tietokoneella käsiteltäväksi.
- DHCP *Dynamic Host Configuration Protocol*. Verkkoprotokolla IP-osoitteiden automaattiseen määrittämiseen.
- HBM: *Hottinger Baldwin Messtechnik*. Saksalainen mittauslaitevalmistaja.
- MMI: *Man-Machine Interface*. Käyttöpaneeli.
- mV/V: Anturin mittausignaali, millivolttia per voltti.
- TEDs *Transducer Electronic Data Sheet*. Mikrosiru, joka sisältää anturin oleelliset tiedot automaattiseen konfigurointiin.

1 Johdanto

Opinnäytetyön tavoitteena on ottaa käyttöön Eurofins Expert Services Oy:n mekaanisessa testauksessa käytettävä uusi tiedonkeruujärjestelmä. Tiedonkeruujärjestelmän päivityksellä saavutetaan suurempi näytteenottotaajuus ja toimintavarmuus, sillä vanhalle järjestelmälle ei ole enää saatavilla valmistajan tuotetukea. Uutta tiedonkeruujärjestelmää voidaan käyttää myös suurta näytteenottotaajuutta vaativissa dynaamisissa testeissä. Lisäksi uusi tiedonkeruujärjestelmä soveltuu kompaktin kokonsa ansiosta paremmin kenttätestaukseen ja asiakkaiden tiloissa tehtäviin testeihin.

Uusi järjestelmä on yhteensovitettava testauslaboratoriossa käytössä olevan vanhan laitteiston kanssa. Olemassa oleva laitteisto koostuu muun muassa siirtymä- ja voima-antureista sekä erilaisista aineenkoestuskoneista ja servohydraulisista sylintereistä.

Eurofins Expert Services Oy on yli sadan asiantuntijan yritys, jolla on toimipisteet Espoossa ja Vihdissä. Yritys tarjoaa riippumattomia ja puolueettomia testaus-, tarkastus- ja sertifiointipalveluita. Eurofins Expert Services Oy on osa kansainvälistä Eurofins-verkostoa, jolla on noin 900 laboratoriota 61 maassa.

[1.]

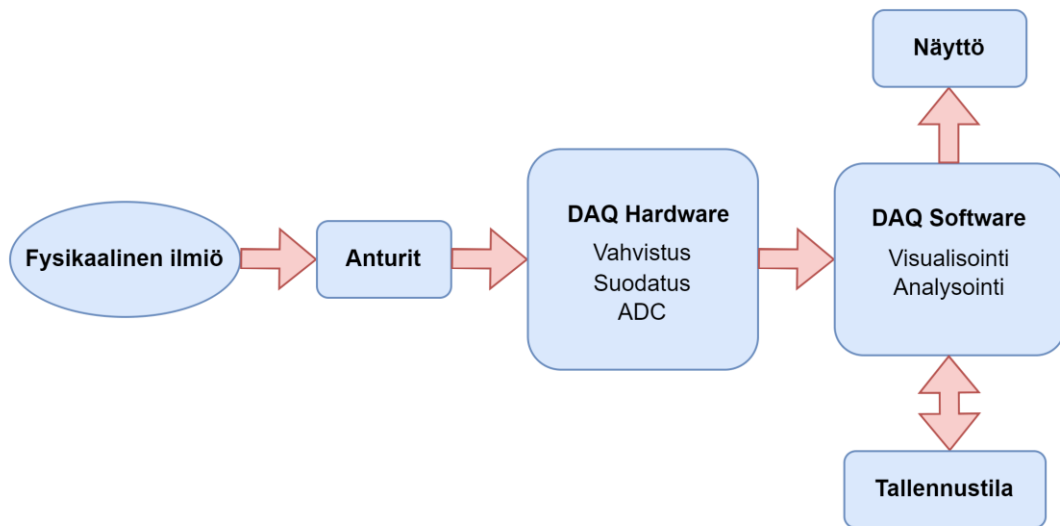
2 Uusi laitteisto

2.1 Tiedonkeruujärjestelmä

Tiedonkeruujärjestelmän uusi laitteisto koostuu HBM:n QuantumX MX840B -mittausvahvistimesta ja Catman-mittausohjelmistosta. HBM:n tuotteet ovat osa saksalaista mittauslaitevalmistaja Hottinger, Brüel & Kjæria (HBK).

Tiedonkeruu tai datan hankinta, DAQ (Data Acquisition), viittaa prosessiin, jossa fyysisiä suureita, kuten siirtymää, voimaa, lämpötilaa, virtaa tai muita muuttujia, mitataan ja muunnetaan digitaaliseen muotoon tietokoneella käsiteltäväksi. Mittaukseen tarvittava laitteisto eli DAQ-järjestelmä koostuu yleensä antureista, jotka keräävät fyysisiä signaaleja, mittausvahvistimesta, joka muuntaa ne digitaaliseen muotoon, sekä tietokoneohjelmistosta, joka hallinnoi tiedonkeruuta ja analysoi dataa. Mittausvahvistimesta puhuttaessa voidaan käyttää nimitystä DAQ hardware ja tietokoneohjelmistosta nimitystä DAQ software. DAQ-järjestelmästä antureineen ja DAQ-laitteineen käytetään usein kirjainyhdistelmää DAS (Data Acquisition System).

Anturit muuntavat mitattavan fyysisen ilmiön, kuten siirtymän sähköiseksi signaaliksi. Mittausvahvistin muuntaa signaalin tietokoneella käsiteltävään muotoon. Se vahvistaa ja suodattaa anturisignaalin ja muuntaa analogisen signaalin digitaaliseen muotoon A/D-muuntimella, toisin sanoen ADC:lla (Analog-to-digital converter). Kun mittaussignaali on muunnettu digitaaliseen muotoon, se voidaan visualisoida, tallentaa ja analysoida tietokoneohjelmiston avulla. [2, s. 1–3; 3.] Kuvassa 1 on havainnollistettu tiedonkeruujärjestelmän rakenne.



Kuva 1. Tyypillisen DAQ-järjestelmän lohkokaavio.













2.2 QuantumX MX840B -mittausvahvistin

MX840B-mittausvahvistin (kuva 2) on osa HBM:n QuantumX-tuoteperhettä. Tuoteperheeseen kuuluu erilaisia mittausmoduuleita, jotka tarjoavat monipuoliset mahdollisuudet signaalien keräämiseen eri antureilta ja laitteistoilta. Näihin kuuluvat muun muassa moduulit jännitteen, virran, vääntövoiman, lämpötilan ja kiihtyvyyden mittauksiin. QuantumX-moduulit ovat skaalautuvia, mikä tarkoittaa, että niitä voidaan hajauttaa tarpeen mukaan lisäämällä ja yhdistämällä moduuleita ja kanavia. Ne tarjoavat myös monipuoliset liitännämahdollisuudet erityyppisille antureille ja mittalaitteille. HBM:n oman Catman-ohjelmiston lisäksi QuantumX-laitteita voidaan liittää yhdistää muihin ohjelmistoalustoihin, kuten LabView, Visual Studio.NET, DASYlab. [4.]



Kuva 2. QuantumX MX840B -mittausvahvistin.

QuantumX MX840B on yleiskäyttöinen, kahdeksankanavainen mittausvahvistin, joka tukee 17 erilasta anturitekniologiaa, kuten puoli- tai täyssiltavenymääntureita, pietsosähköisiä ja pietsoresistiivisiä antureita, termopareja ja induktiivisia puoli- tai täyssilta-antureita. Jokainen kanava sisältää 24-bittisen A/D-muuntimen, jopa 40 kilohertsin näytteenottotaajuuden sekä aktiivisen alipäästösuodattimen. Kaikki kanavat on sähköisesti eristetty toisistaan. Riippuen käytettävästä anturitekniologiasta vahvistimen tarkkuus on 0,005–0,1 %:n luokkaa. Aktiivisten anturien käyttöön MX840B tuottaa 5–24 V:n (DC) syöttöjännitteen. [5; 6, s. 1.] Kuvassa 3 on esitetty vahvistimen tukemia anturitekniologioita.

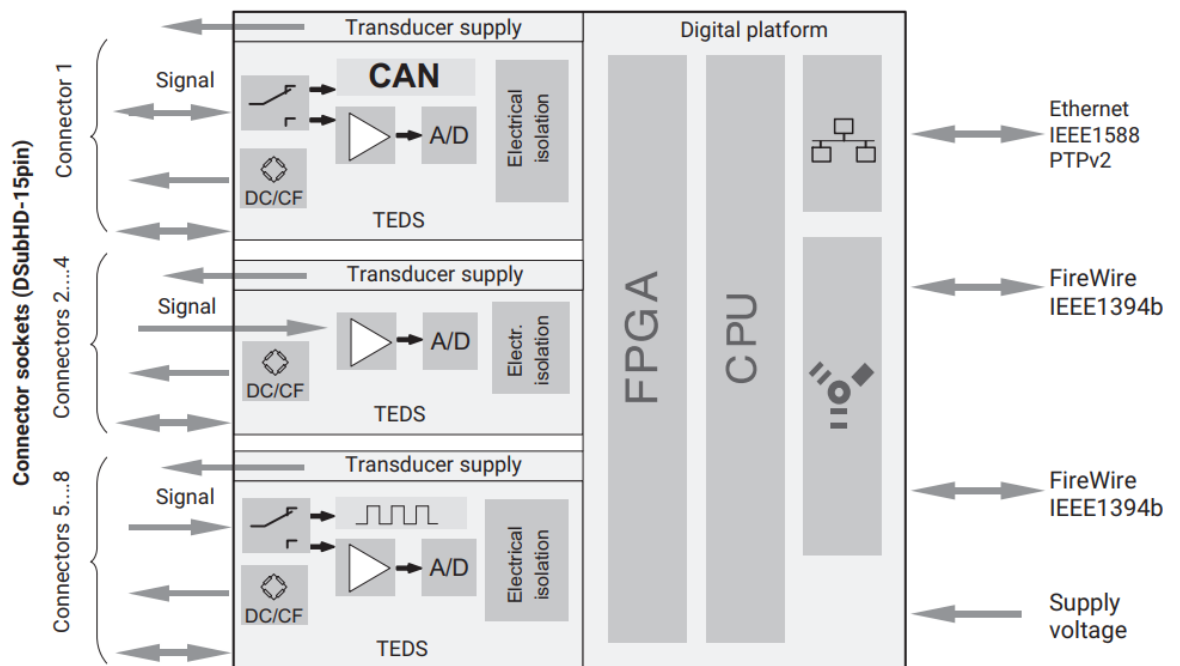
| Transducer technologies | |
|---|---|
|  | SG half or full bridge (DC or CF with 4.8 kHz) |
|  | Current-fed piezoelectric transducers (IEPE/ICP®) |
|  | Piezoresistive full bridge |
|  | Resistance thermometers (Pt100, Pt1000) |
|  | Thermocouples (types K, N, R, S, T, B, E, J, C) |
|  | Ohmic resistor |
|  | Potentiometric transducers |
|  | Inductive half or full bridge, LVDT |
|  | Voltage (± 100 mV, ± 10 and ± 60 V) |
|  | Current (0/4...20 mA) |
|  | Channel 5-8, in addition: Frequency, pulse counter, rotary encoder (incremental with/without index), SSI |
|  | MX840B channel 1, in addition: High speed CAN (ISO 11898, read 128 signals, transmit 7 channels) Sensor supply: 5...24 V, 0.7 W (module: 2 W) |

Kuva 3. QuantumX MX840B:n tukemia anturitekniologioita [7, s. 10].

Kanavapaikalla 1 on normaalin anturiliitännän lisäksi tulevan tai lähtevän signaalin liitännämahdollisuus CAN-väylälle. CAN-väylä (Controller Area Network) on protokolla, jota käytetään yleisesti autoteollisuuden sovelluksissa [8].

Kanavapaikoilla 2–4 on normaalit anturiliitännät ja paikoilla 5–8 lisäksi muun muassa taajuusmittaus, pulssilaskuri ja pyörimisliikkeen enkooderi. Kaikkien kahdeksan kanavan liitännään käytetään SUBHD15-liitintä. Lisäksi kaikkiin anturiliittämiin on mahdollista lisätä HBM:n TEDs-mikrosiru. Antureissa voi olla myös valmiiksi integroitu TEDs. TEDs (Transducer Electronic Data Sheet) sisältää kaiken tarvittavan tiedon anturista eikä vaadi erillistä konfigurointia mittausjärjestelmään vaan on heti käyttövalmis liitännän jälkeen.

Muita liitintävaihtoehtoja ovat Ethernet-väylä tietokoneen tai HBM:n tiedonkeruumoduulin liitännään sekä kaksi FireWire IEEE1394b -sarjaväylää. FireWire IEEE1394b -väylän kautta mittausvahvistin voidaan liittää muihin moduuleihin osaksi hajautettua järjestelmää. [6, s. 1–2.] Kuvassa 4 on lohkokaavio QuantumX MX840B:n väylistä ja anturiliitännöistä.

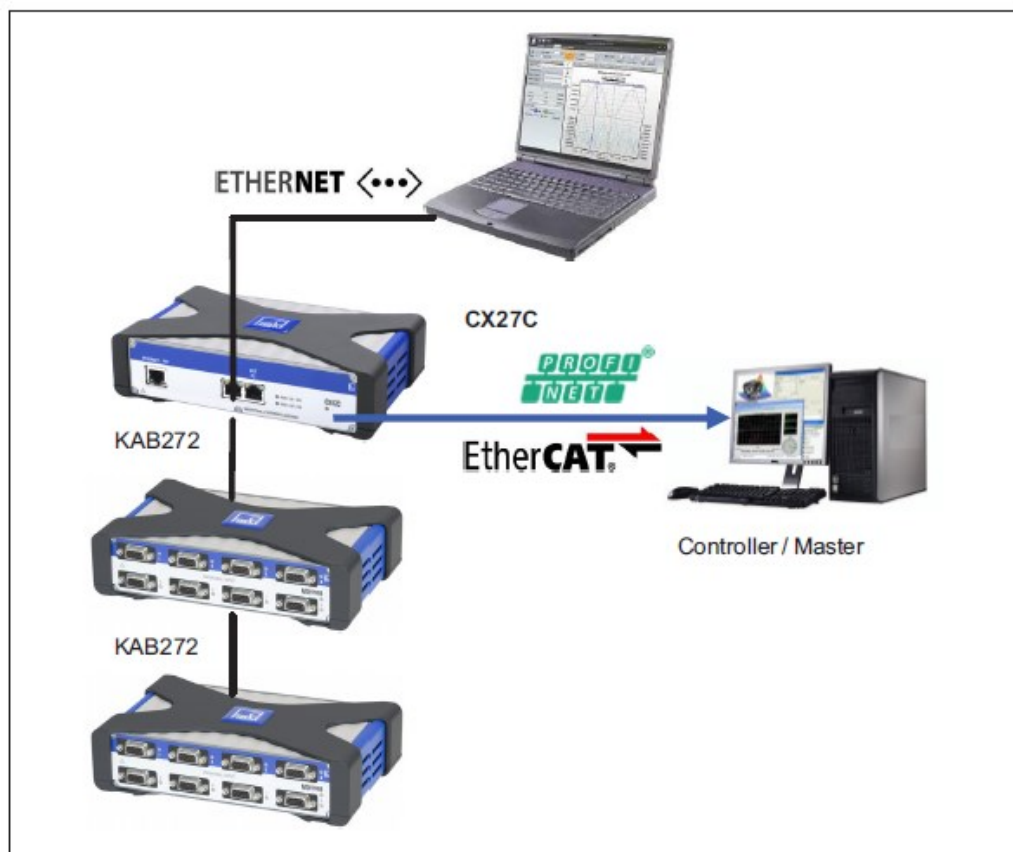


Kuva 4. QuantumX MX840B:n lohkokaavio [6, s. 1].

Mittausvahvistinten lisäksi QuantumX-tuoteperheeseen kuuluu CX22B-W Data Recorder ja CX27C Gateway Module.

CX22B-W Data Recorderia käytettäessä DAQ-järjestelmään ei tarvitse liittää tietokonetta vaan tiedonkeruu, analysointi ja tallennus onnistuu CX22B-W:llä ja esimerkiksi kosketusnäytöllä. CX22B-W Data Recorderia voidaan käyttää keskitetysti tai hajautetussa järjestelmässä yhdessä muiden HBM:n mittausmoduulien ja jopa tuhannen mittauskanavan järjestelmässä. [4.]

CX27C Gateway Module mahdollistaa reaaliaikaisen tiedonsiirron QuantumX-järjestelmästä muihin järjestelmiin, kuten automaatiojärjestelmiin tai pilvipalveluihin. Tämä voidaan toteuttaa rinnakkain Ethernet-väylän kanssa EtherCAT- tai PROFINET IRT -kenttäväylien kautta, kuten kuvassa 5 on havainnollistettu. [9, s. 72.] Tämä moduuli tarjoaa monipuoliset liitännäismahdollisuudet ja joustavuuden integraatiossa erilaisiin ympäristöihin ja järjestelmiin. Se lisää QuantumX-järjestelmän käyttömahdollisuuksia laajentamalla sen kykyä kommunikoida muiden laitteiden ja järjestelmien kanssa.



Kuva 5. Rinnakkainen tiedonsiirto Ethernet-väylän ja kenttäväylien välityksellä [9, s. 72].

2.3 Catman-mittausohjelmisto

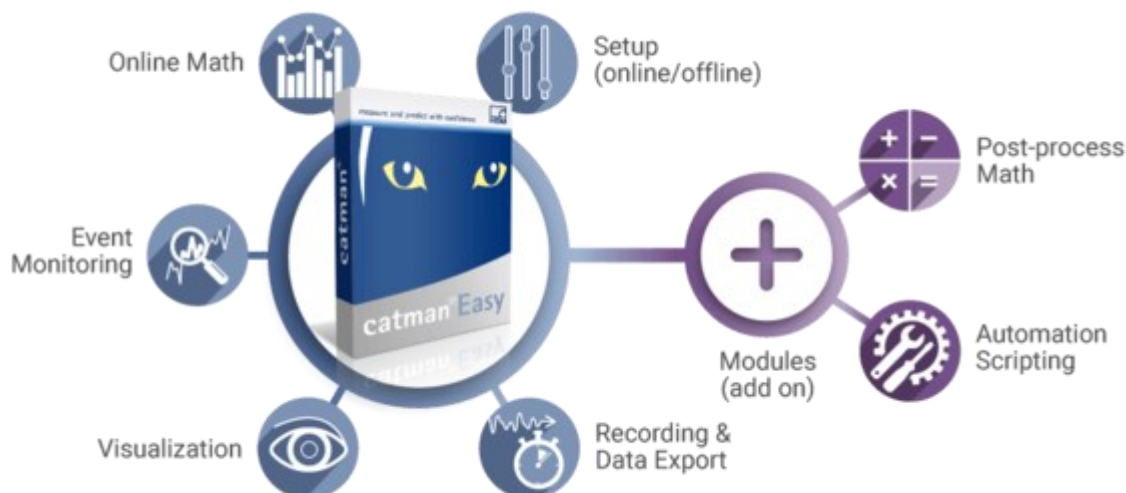
HBM:n Catman-ohjelmisto soveltuu HBM:n tiedonkeruulaitteiston, kuten QuantumX-mittausvahvistimen, kanssa käytettäväksi. Ohjelmisto tarjoaa monipuolisen ja helppokäyttöisen käyttöliittymän mittausdatan keräämiseen, visualisointiin ja analysointiin ja kykenee mittausdatan keräämiseen jopa 20 000 kanavalta.

Catman-ohjelmistolla voidaan helposti konfiguroida mittauskanavia, asettaa mitausten aloitus- ja lopetuspisteitä sekä tallentaa ja hallinnoida kerättyä dataa. Ohjelmisto tarjoaa myös reaaliaikaisen näkymän mitaustietoihin erilaisten näyttöjen välityksellä, mikä mahdollistaa monitoroinnin ja nopean reagoinnin mahdollisiin muutoksiin mittausympäristössä. Lisäksi Catman sisältää erilaisia työkaluja ja toimintoja datan jatkokäsittelyyn ja analysointiin. Käyttäjät voivat suorittaa erilaisia laskutoimituksia, kuten tilastollisia analyysejä, trendianalyysejä ja signaalinkäsittelyä, suoraan Catman-ohjelmistossa. Tämä mahdollistaa tarkemman datan analysoinnin ja havainnollistamisen. Catman-ohjelmistolla on myös mahdollista luoda automaattiraportteja ja tulosteita, joiden avulla voidaan vaivattomasti jakaa mitaustuloksia.

Ohjelmisto sisältää valmiin anturitietokannan paitsi HBM:n omille antureille, myös muille yleisille anturityypeille. Lisäksi on mahdollista luoda oma anturitietokanta. Kanavien konfigurointi on helppoa raahaamalla anturit anturitietokannasta halutuille kanavapaikoille. Mittausdataa voidaan prosessoida myös reaaliaikaisesti lisäämällä laskentakanavia. Catman tarjoaa lukuisia datan visualisointimahdollisuuksia, kuten kuvaajia, analogisia ja digitaalisia näyttöjä, sekä mittausdatan kanssa synkronoidun videokuvauksen. Ohjelmaan on mahdollista lisätä hälytysnäyttöjä, ja hälytystapahtumat on mahdollista välittää myös sähköpostitse.

Catman-ohjelmistoon saa myös etäyhteyden verkkoselaimen välityksellä. Ohjelmistosta on tarjolla kolme eri lisenssiversiota erilaisilla lisäominaisuuksilla. Kevyin versio on Catman Easy, jonka ominaisuuksia on esitetty kuvassa 6.

Catman AP -versiossa on lisäominaisuutena muun muassa videokuvan lisääminen. Catman PostProcess on jälkikäsittelyohjelma mittausdatan käsittelyyn. [10.]



Kuva 6. Catman Easyn ominaisuuksia [10].

3 Olemassa oleva laitteisto

Mekaanisessa testauksessa käytettävä laitteisto koostuu erilaisista aineenkoestuskoneista ja irtosylintereistä ohjausyksikköineen, joissa on integroitu voiman ja siirtymän mittaus. Voimaa voidaan tuottaa myös yksinkertaisilla hydraulisylintereillä ja hydraulipumpuilla, jolloin voiman mittaamiseen käytetään erillistä voima-anturia. Dynaamisiin veto- ja puristuskokeisiin soveltuvilla aineenkoestuskoneilla voima-alue on 200N – 2000kN ja hydraulisylintereillä tehtävissä staattisissa kokeissa 10N – 9000kN. Lisäksi testikokoonpanoon lisätään usein muita ulkoisia antureita, kuten siirtymäantureita, venymäliuskoja ja lämpötilaantureita.

3.1 Instron-ohjausyksikkö ja toimilaitteet

Ohjausyksikkö koostuu Instronin Labtronic 8800 -ohjaimesta ja Labtronic 8800 -käyttöpaneelistä eli MMI:sta (Man-Machine Interface). Ohjausyksiköllä voidaan

ohjata paitsi Instronin, myös muiden valmistajien toimilaitteita, kuten servohydraulisia aineenkoestuskoneita ja sylintereitä. Käyttöpaneelin avulla voidaan myös asettaa testille haluttuja turvarajoja, kuten voima- ja siirtymäraajat. Kuvassa 7 on ohjausyksikön ohjain ja käyttöpaneeli.



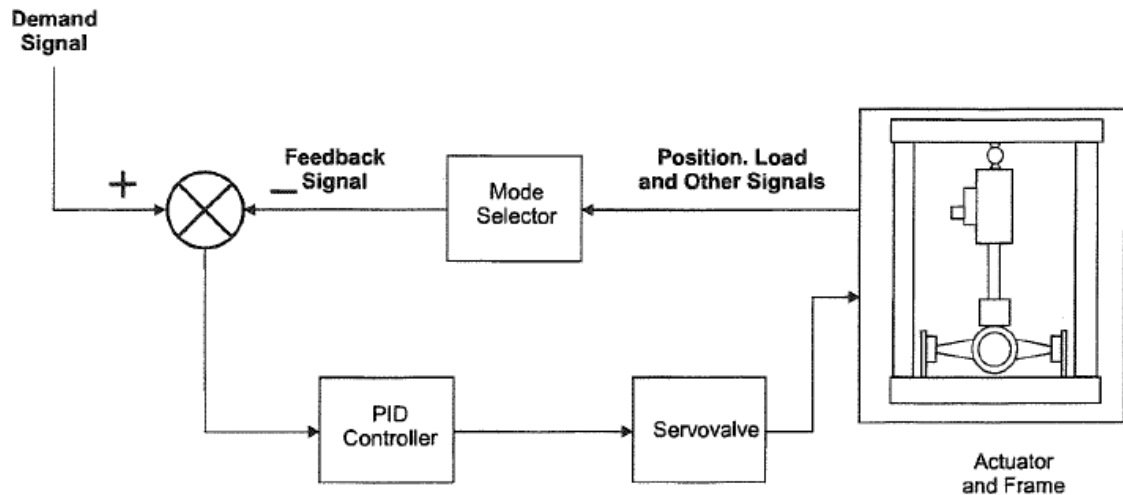
Kuva 7. Labtronic 8800 -ohjain ja -käyttöpaneeli [11; 12].

Aineenkoestuskoneet koostuvat toimilaitteesta eli sylinteristä sekä voima- ja liikeantureista, jotka ovat kiinteänä osana runkoa. Kuvassa 8 on tyypillinen Instronin servohydraulinen aineenkoestuskone, jonka liikuteltavassa yläpalkissa on voima-anturi. Rungon alaosassa on hydraulisylinteri ja siirtymää mittaava anturi. Voima-anturissa ja sylinterissä on lisäksi hydrauliset leuat koekappaleen tartuntaan.



Kuva 8. Instron 8802 -aineenkoestukone [13].

Kaksitoimisella servohydraulisella toimilaitteella voidaan tehdä staattisia kuormituskokeita, kuten veto- ja puristustestejä, sekä dynaamisia väsytykokeita. Servoventtiilin avulla toimilaitetta voidaan ohjata voima- tai liikeohjattuna tarkasti ohjausyksikön säätöpiirin avulla. Takaisinkytketyssä säätöpiirissä haluttua ohjaussignaalia ja toimilaitteelta tulevaa mitattua signaalia, kuten toimilaitteen sijaintitietoa, verrataan jatkuvasti. Tavoitearvon ja mitatun arvon poikkeamaa korjataan PID-säätimellä (Proportional-Integral-Derivate Controller) ja korjattu ohjaussignaali syötetään servoventtiilille, joka ohjaa toimilaitetta. [14, s. 14.] Aineenkoestuskoneen takaisinkytketyn säätöpiirin toiminta on havainnollistettu kuvassa 9.



Kuva 9. Aineenkoestuskoneen takaisinkytketty säätöpiiri [14, s. 14].

3.2 Venymäliuska-anturit

Venymäliuska-anturit ovat joustavia, hyvin ohuita metallikalvoja, jotka muuttavat muotoaan ja pituuttaan ulkoisen kuormituksen vaikutuksesta. Metallikalvo muodostaa ohuen johdinverkon, ja sen päistä lähtee erikseen juotettavat tai valmiiksi kiinnitetyt mittausjohtimet. Venymäliuskoja käytetään yleisesti voimien, jännitysten ja taipumien mittaamiseen erilaisissa sovelluksissa, kuten rakenteiden kuormitustesteissä, paineen mittauksessa ja voima-antureissa. Kun venymäliuskaa venytetään tai puristetaan, sen pituus ja muoto muuttuvat, mikä aiheuttaa metallikalvon ominaisresistanssin muutoksen. Tämä resistanssin muutos voidaan mitata, ja se on suoraan verrannollinen liuskan venymään. Venymäliuskoilla on liuskavakio, jonka suuruus riippuu metallikalvon materiaalista. Resistanssin ja venymän suhde on kuvattu yhtälössä 1 [17, s. 2].

$$\frac{\Delta R}{R} = K_s \times \varepsilon \quad (1)$$

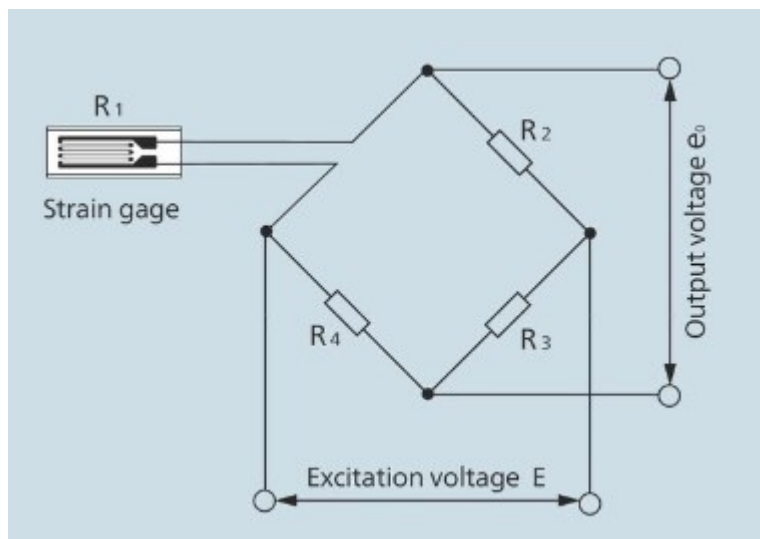
R on liuskan ominaisresistanssi

ΔR on resistanssin muutos

K_s on liuskavakio

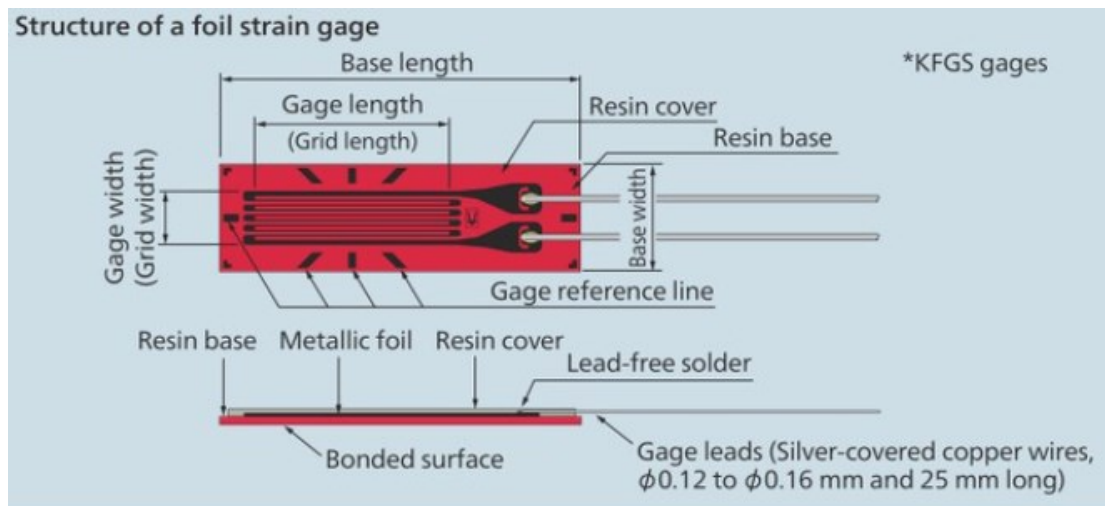
ε on venymä.

Venymäliuskojen käyttö perustuu Wheatstonen siltakytkentään, joka on menetelmä vastuksen resistanssin muutoksen mittaamiseen. Wheatstonen siltakytkennällä resistanssin muutos saadaan muunnettua jännitteensignaaliksi. Alkuperäisessä Wheatstonen siltakytkennässä on kolme tunnettua vastusta ja yksi tuntematon, mitattava vastus. Alkutilanteessa tulo- ja lähtöjännitteen jännite-ero on nolla ja vastukset ovat tasapainotilassa. Kun mitattavan vastuksen resistanssin muutos häiritsee tasapainotilaa, muuttuu myös ulostulojännite. [17, s. 3–4; 18, s. 501.] Venymäliuskat voidaan kytkeä Wheatstonen siltaan neljännes, puoli- tai täyssiltakytkentänä. Kuvan 10 neljännesosasiltakytkennässä on yksi venymäliuska, puolisiltakytkennässä kaksi liuskaa ja täyssiltakytkennässä neljä liuskaa.



Kuva 10. Venymäliuskan neljännesosasiltakytkentä [17, s. 3].

Venymäliuskoja on eri muotoisia ja kokoisia riippuen käyttötarkoituksesta. Kuvassa 11 on esitetty Kyowan valmistama yleiskäyttöinen KFGS-venymäliuska, jonka hartzialustan ja pinnoitteen välissä on kupari-nikkeliseoksesta valmistettu metallikalvo, jossa on valmiiksi liitetyt johtimet. [17, s. 2–4.]

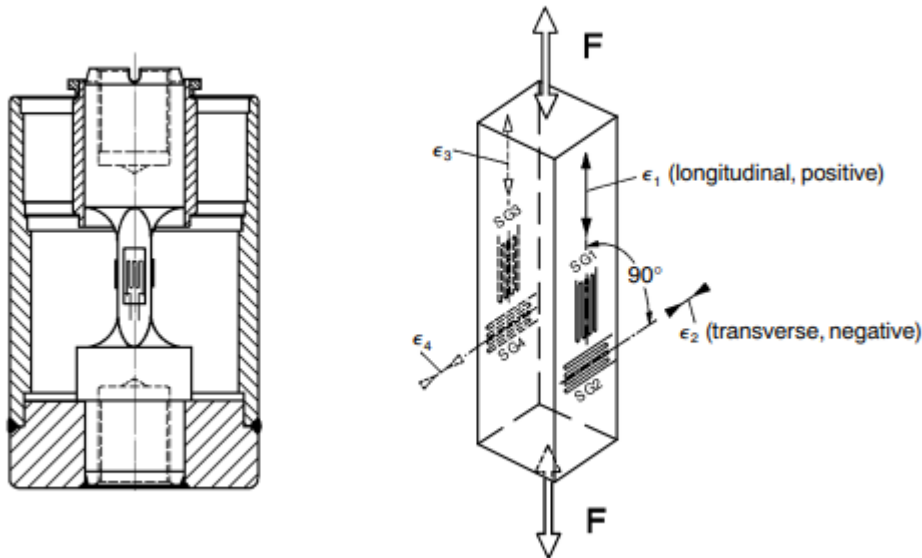


Kuva 11. KFGS-venymäliuskan rakenne [17, s. 2].

3.3 Voima-anturit

Käytössä olevat voima-anturit ovat venymäliuskamittaukseen perustuvia veto- tai puristusvoimaa mittaavia antureita sekä yhdistettyjä veto-puristusantureita. Voima-anturin sisällä on elastinen elementti, johon on kiinnitetty tyypillisesti neljä venymäliuskaa Wheatstonen täyssiltakytkennällä. Täyssiltakytkennällä saadaan aikaan lämpötilankompensointi, jolloin lämpötilan aiheuttamat muodonmuutokset eivät vaikuta mittaussignaaliin. Elastinen elementti valmistetaan materiaalista, jolla on korkea elastinen muodonmuutoskyky, eli materiaali sallii suhteellisen suuren venymän palautuen kuitenkin alkuperäiseen muotoonsa, kun jännitys poistetaan. Tyypillisesti elastisen elementin materiaalina käytetään jousiterästä, kupari-berylliumseosta tai alumiinia.

Kuvassa 12 on esimerkki veto-puristusanturin rakenteesta ja venymäliuskojen sijoittelusta elastiseen elementtiin. Anturin keskellä on paksu pyöreä tanko, johon voima kohdistuu. Elastisena elementtinä on ohennus tangon keskialueella, johon on kiinnitetty venymäliuskat. Puristusvoimalla mittaussignaali on negatiivinen ja vetovoimalla positiivinen. [19, s. 11–25.]



Kuva 12. Esimerkki voima-anturin rakenteesta [19, s. 12].

3.4 Siirtymäanturit

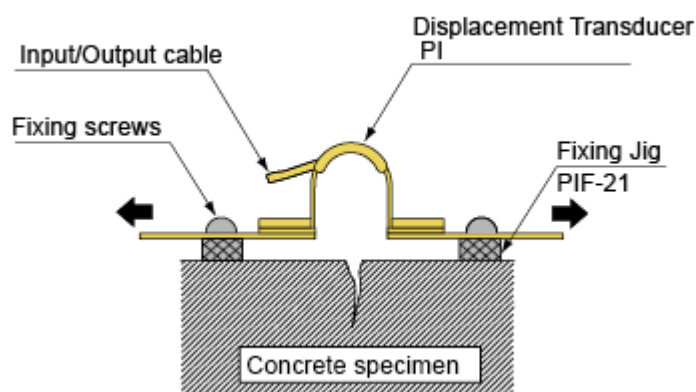
Olemassa olevista siirtymäantureista valtaosa on HBM:n induktiivisia siirtymäantureita, jotka soveltuvat useisiin mekaanisen testauksen testaussovelluksiin. Lisäksi käytössä on venymäliuskapohjaisia halkeamanmittausantureita ja venymän mittaukseen käytettäviä DD1-antureita.

Induktiivinen siirtymäanturi toimii hyödyntämällä muutoksia sähkömagneettisessa kentässä, kun metallinen anturin kara lähestyy tai etäännyy anturin käämistä. Anturin rungossa on käämi, jonka läpi kulkee vaihtovirta, luoden siten magneettikentän. Kun metallinen kara tulee magneettikenttään, se aiheuttaa impedanssin ja resistanssin muutoksen käämissä. Tätä sähköistä muutosta mitataan suhteessa anturin karan siirtymään. HBM:n induktiivissa siirtymäantureissa nimellinen syöttöjännite on 2,5 V ja nimellinen maksimiarvo ulostulosignaalielle eli nimellisherkkyyys on 80 mV/V. Anturien mittaus perustuu neljännesosasiltaan, joka on sisäisesti laajennettu täyssiltakytkennäksi. Anturit voidaan konfiguroida mittalaitteistoon täyssiltana tai puolisiltana. [15.] Kuvassa 13 on erityyppisiä HBM:n induktiivisia siirtymäantureita.



Kuva 13. HBM:n induktiivisia siirtymäantureita [15].

Venymäliuskeriaatteella toimivissa siirtymäantureissa, kuten HBM:n DD1-venymänmittausanturissa ja kuvan 14 TML:n (Tokyo Measuring Instruments Lab) halkeaman mittaukseen käytettävässä PI-anturissa, siirtymää mitataan joustavaan teräslevyyn kiinnitettyjen venymäliuskojen avulla. Kun teräslevy taipuu, venymäliuskojen resistanssi muuttuu suhteessa taipumaan. PI-anturien nimellisherkyys on 2 tai 2,5 mV/V riippuen anturityypistä [16].



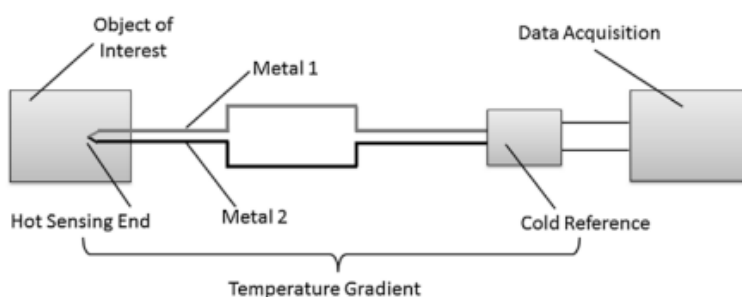
Kuva 14. PI-anturin käyttö betonikappaleen halkeaman mittauksessa [16].

3.5 Lämpötila-anturit

Yleisimmin käytettävät lämpötila-anturit ovat PT100-vastuslämpötila-anturi ja termopari, josta käytetään myös nimitystä termoelementti. Termoparin lämpötilan mittausalue aina -200 °C :sta yli 2000 °C :seen. PT100-anturin mittaustarkkuus on parempi, mutta mittausalue ei ole yhtä laaja. [20, s. 1–2.]

PT100-anturi perustuu resistanssin mittaukseen, ja sen materiaalina käytetään platinaa, jonka resistanssin muutos on hyvin lineaarinen suhteessa lämpötilan muutokseen. Lämpötilan ollessa nolla celsiusastetta on resistanssi sata ohmia ja resistanssin muutos lämpötilan funktiona on $0,39\ \Omega / 1\text{ °C}$. Tarkkaan anturin resistanssin mittaamiseen käytetään neljän johtimen kytkentää, jolloin minimoidaan johtojen ja liitosten aiheuttamat resistanssivaikutukset. [20, s. 6, 65–66; 21.]

Termoparit koostuvat kahdesta eri metalliseoksista valmistetusta langasta, joiden päät hitsataan tai juotetaan yhteen tuntopääksi. Lankojen toiset päät muodostavat kylmän vertailuliitoksen. Kun tuntopään ja kylmäliitoksen välille syntyy lämpötilaero, syntyy Seebeckin ilmiön mukaisesti liitosten välille jännite. Jännitteen muutos on lineaarinen suhteessa lämpötilan muutokseen. Jännitteen muutoksen suuruus suhteessa lämpötilan muutokseen riippuu termopareissa käytettyjen lankojen materiaalista. [20, s. 6.] Kuvassa 15 on esitetty termoparin rakenne. Yksi yleisesti käytetyistä termopareista on K-tyypin termopari, jonka langat on valmistettu chromelistä (NiCr), joka on nikkelin ja kromin seos, ja alumelista (NiAl), nikkelin ja alumiinin seoksesta.



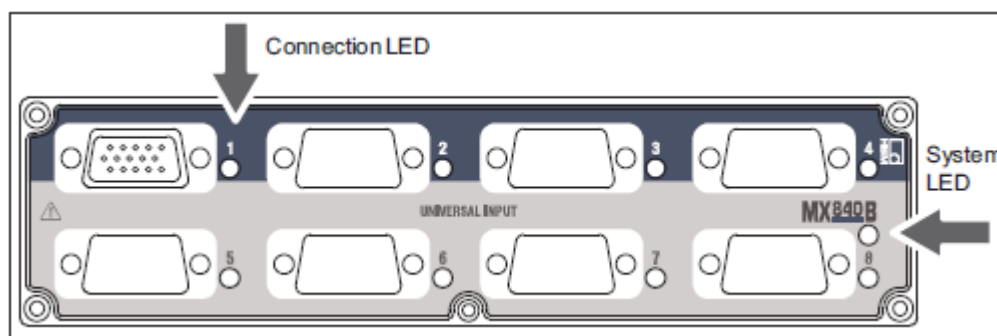
Kuva 15. Termoparin rakenne [20, s. 7].

4 Tiedonkeruujärjestelmän toteutus

4.1 HBM QuantumX MX840B -mittausvahvistimen konfigurointi

MX840B-mittausvahvistimen käyttöönotto ja tietokoneeseen liittäminen on helppoa. Vahvistimeen kytketään laitteen mukana toimitettavat 24 V:n virtalähde ja Ethernet-kaapeli, jolla yhdistetään vahvistin ja tietokone. Yhteyden konfigurointi tapahtuu automaattisesti, mikäli tietokoneen DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol) on asetettu aktiiviseksi verkkoasetuksissa. DHCP on verkkoprotokolla, joka määrittää automaattisesti IP-osoitteita verkkoon kytketyille laitteille [22]. DHCP:tä käytettäessä on annettava noin puoli minuuttia aikaa IP-osoitteen määrittämiselle ennen Catman-ohjelmiston käynnistämistä. Mittausvahvistimelle voidaan myös määrittää kiinteä IP-osoite, jolloin yhteyden konfigurointi tapahtuu nopeammin. [9, s. 59–66.]

Kuvan 16 MX840B-vahvistimen etupaneelin kahdeksan D-SUB-15HD-anturiliittimen vieressä on LED-valot, jotka ilmaisevat erikseen jokaisen kanavapaikan yhteyden tilan. Lisäksi kanavapaikan kahdeksan vieressä on LED-valo, joka ilmaisee järjestelmän tilan.



Kuva 16. MX840B:n etupaneeli [9, s. 84].

Taulukossa 1 on esitetty LED-valojen tilatiedot. Kanavapaikkaa 1 voidaan käyttää myös CAN-väylän liitännään, ja sille on omat tilatietonsa CAN-väylän ollessa käytössä [9, s. 84–85].

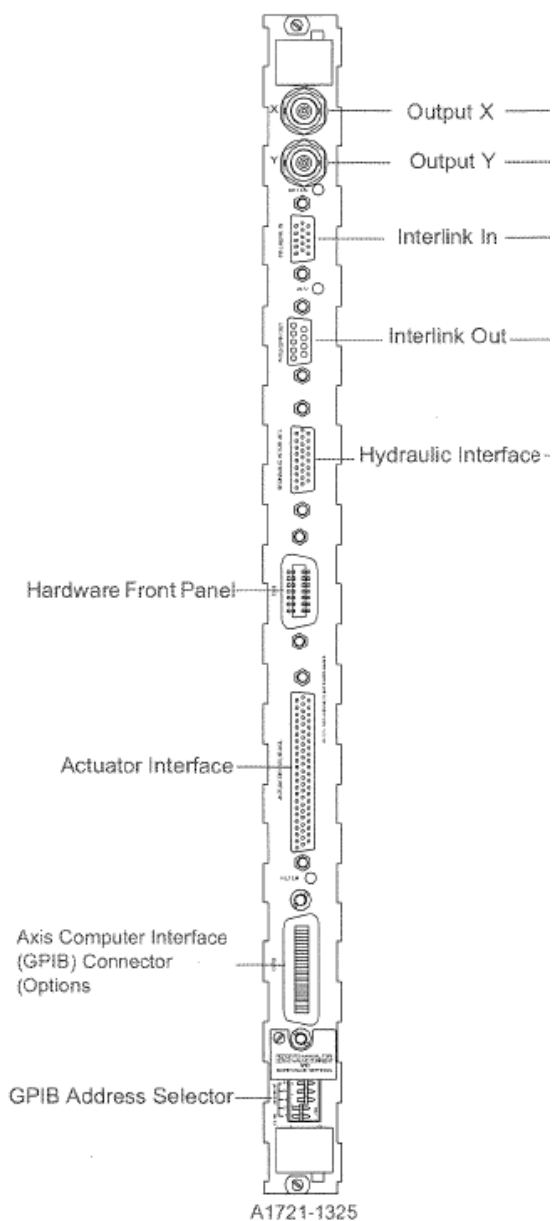
Taulukko 1. LED-valojen tilatiedot.

| Järjestelmä-LED | |
|--|---|
| Vihreä | Virheetön toiminta |
| Oranssi | Järjestelmän käynnistys menossa |
| Vilkkuva oranssi | Lataus aktiivinen, järjestelmä ei valmis |
| Punainen | Virhe |
| Liitinten LEDit | |
| Kaikki LEDit oransseja | Järjestelmän käynnistys menossa |
| Kaikki LEDit vilkkuvia oransseja | Laiteohjelmiston lataus aktiivinen, järjestelmä ei valmis |
| Oranssi | Yhteys määritetty uudelleen, anturin tunnistus käynnissä |
| Vihreä | Virheetön toiminta |
| Vilkkuva vihreä (5 s), jonka jälkeen vihreä | TEDS-data luettu |
| Vilkkuva oranssi (5 s), jonka jälkeen vihreä | Manuaalinen konfigurointi käynnissä (TEDS sivuutettu) |
| Punainen | Anturia ei yhdistetty Kanavavirhe (virheellisesti parametroitu, yhteysvirhe, virheellinen TEDS-data) |
| CAN-LED | |
| Vihreä | CAN-väylä aktivoitu, dataa voidaan vastaanottaa |
| Oranssi | CAN-väylä "VAROITUS"-tilassa, satunnaisia häiriöitä datan vastaanotossa |
| Punainen | CAN-väylä vikatilassa, dataa ei voida vastaanottaa |

4.2 Yhdistäminen olemassa olevaan laitteistoon

Yhdistettäessä MX840B-mittausvahvistin aineenkoestuskoneiden ohjaukseen käytettävään Labtronic 8800 -ohjaimen käytetään SUBHD15-BNC-adapteria. BNC-kaapeli kytketään ohjaimen X- ja Y-ulostuloihin, joista saadaan ohjaimen liitetyn toimilaitteen siirtymä- ja voima-anturien jännitesignaali. Jännitteen

suuruus on ± 10 V. Kuvassa 17 on Labtronic 8800 -ohjaimen takapaneelin kytkentärinno, jossa X- ja Y-ulostulot.



Kuva 17. Labtronic 8800 -ohjaimen liitännät [14, s. 3].

Käytössä olevien voima- ja liikeantureiden kytkentä on vanhassa järjestelmässä toteutettu Tajimin pyöreillä PRC03-liittimillä ja neljän johtimen kytkennällä. Koska antureita ja anturien jatkokaapeleita on useita satoja ja vanhaa tiedonkeruujärjestelmää käytetään edelleen rinnakkain uuden järjestelmän kanssa, vanhojen liittimien tilalle ei ole mahdollista eikä järkevää vaihtaa uuteen MX840B-

vahvistimeen sopivia SUBHD15-liittimiä. Lisäksi olemassa olevat kaapelit soveltuvat lähes kaikkiin mekaanisen testauksen antureihin, niin induktiivisiin siirtymäantureihin kuin venymäliuskapohjaisiin siirtymäantureihin sekä voima-antureihin. Näin ollen päädyttiin tekemään adapteri, jolla saadaan yhdistettyä vaivattomasti olemassa olevat anturit uuden mittausvahvistimen SUBHD15-liittimiin.

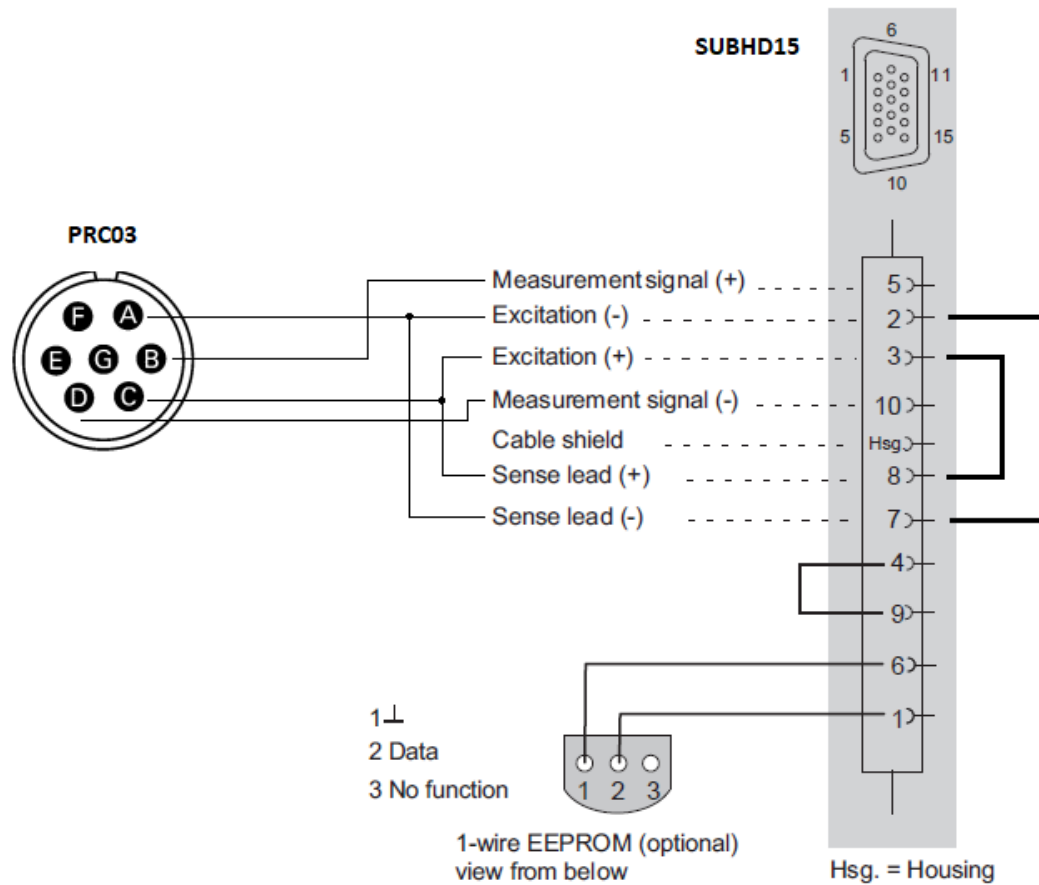
SUBHD15-PRC03-adapterit valmistettiin juottamalla liittimet noin metrin pituiseen kuusijohtimiseen kaapeliin. Kuvassa 18 on valmis adapteri, jossa on SUBHD15- ja -PRC03-liittimet sekä kaapelin johtimet juotettuna SUBHD15-liittimeen.



Kuva 18. Valmis SUBHD15-PRC03-adapteri ja johtimien juotokset.

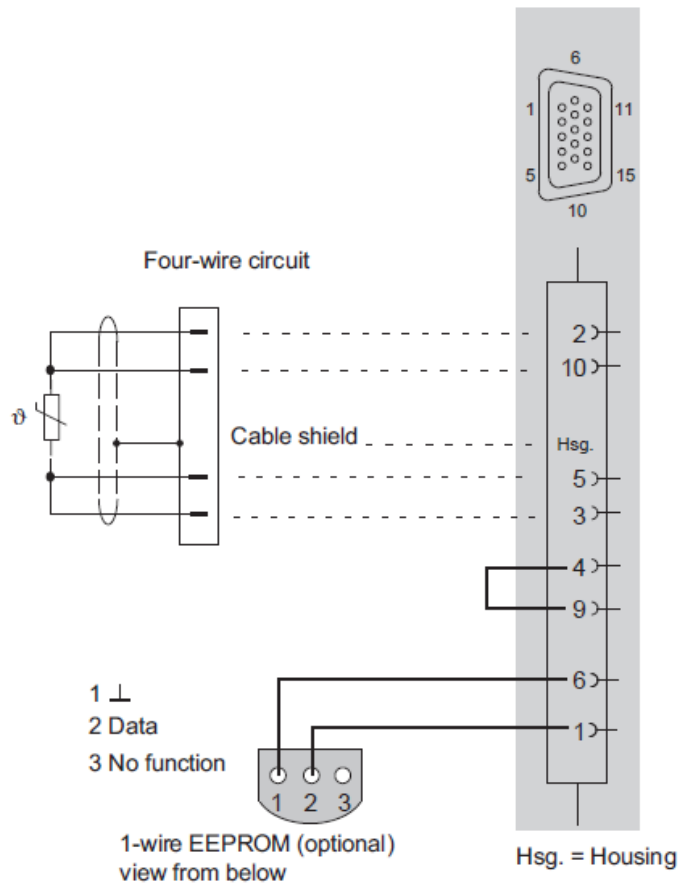
MX840B-vahvistimen ohjekirjasta ei löydy suoraa ohjeistusta SUBHD15-liittimen neljän johtimen kytkennälle, vaan kytkentä toteutettiin HBM:lta saadun ohjeistuksen mukaan, jossa muokataan kuuden johtimen täyssiltakytkentä neljälle johtimelle. Kuuden johtimen kytkennässä kaksi lisäjohdinta luo ylimääräisen piirin, joka säätää jännitettä käytettäessä pitkiä kaapelointeja. Näin ollen pitkissä kaapeloinneissa syntyvät jännitehäviöt saadaan kompensoitua ilman, että ne vaikuttavat mittaussignaaliin. Jännitehäviön kompensoinnilla voidaan käyttää jopa 300 metriä pitkiä anturikaapeleita. [23, s. 10.] Kuvassa 19 on esitetty ohjeistuksen mukainen PRC03-SUBHD15-kytkentä, jossa kuuden johtimen täyssiltakytkennän ohje on muokattu neljän johtimen kytkennäksi. Ylimääräisen

kompensointipiirin luovat Sense lead -johtimet on kytketty samaan piiriin syöttöjännitteen (Excitation) kanssa.



Kuva 19. PRC03- ja SUBHD15-adapterin kytkentäohje.

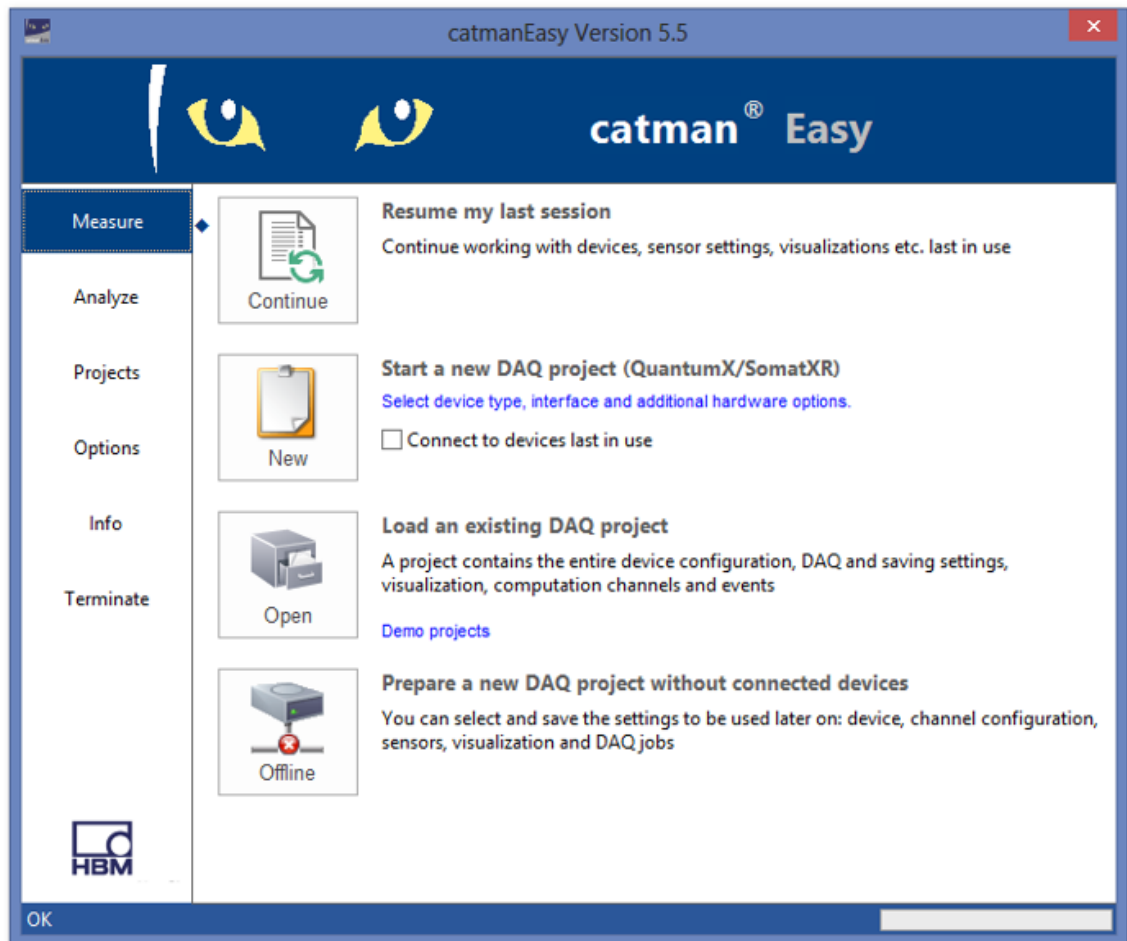
Termoparit ja PT100-lämpötila-anturit voidaan liittää mittausvahvistimen anturiliittimiin suoraan HBM:n ohjekirjan mukaan. Termopareille käytetään valmista SCM-TCK-adapteria, jossa on integroitu kylmäliitos. PT100-anturi kytketään SUBHD15-liittimeen kuvan 20 kytkentäohjeen mukaisesti.



Kuva 20. PT100-anturin kytkentä [9, s. 137].

4.3 Catman-mittausohjelmiston konfigurointi

Catman-ohjelmiston käynnistysvalikossa vaihtoehtoina ovat uuden DAQ-projektin aloitus, viimeksi käytössä olleen projektin jatkaminen, tallennetun projektin lataus tai projektin käynnistys offline-tilassa. Projektin käynnistyksen jälkeen alustetaan yhteys mittausvahvistimeen. Offline-tilassa voidaan valmistella DAQ-projekti ilman mittausvahvistimen ja antureiden kytkentää. Kuvassa 21 on esitetty Catman Easyn käynnistysvalikko.

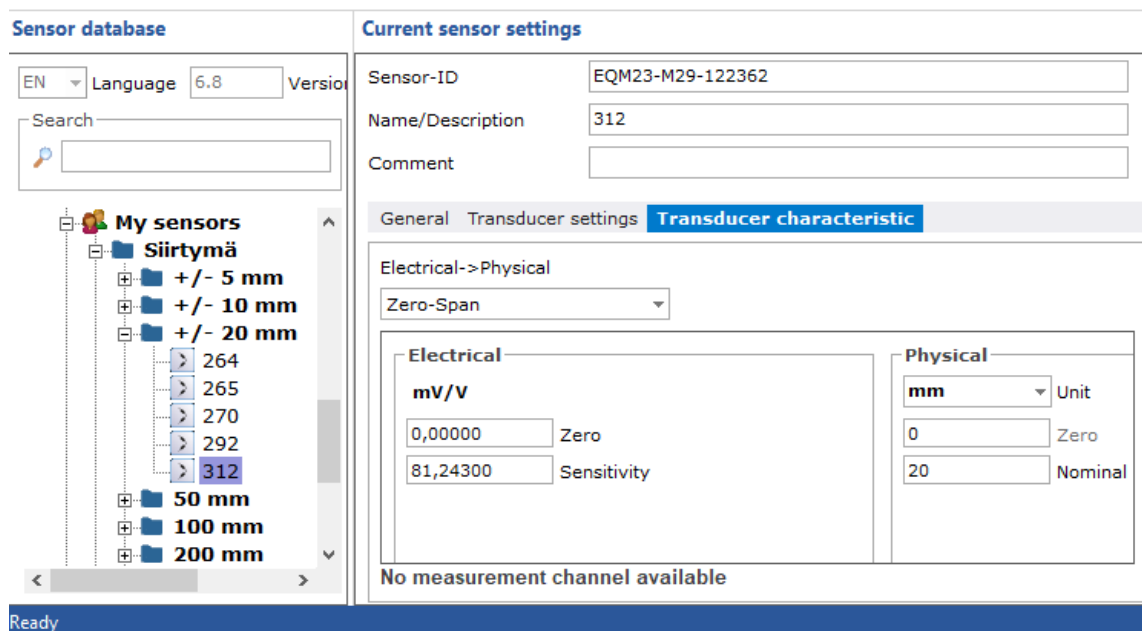


Kuva 21. Catman Easyn käynnistysvalikko [24].

Ohjelmistosta löytyy valmis anturitietokanta HBM:n antureille sekä yleisimmille anturityypeille, kuten venymäliuskoille, venymäliuska-antureille ja lämpötila-antureille. Tietokantojen pohjalta luotiin oma anturitietokanta, jossa anturit jaoteltiin kansioihin anturityypin mukaan ja alikansioihin anturin mitta-alueen mukaan. Anturien identifiointiin käytettiin samaa kolmen numeron numerotunnusta kuin vanhassa tiedonkeruujärjestelmässä sekä Eurofins Expert Services Oy:n sisäisen laiterekisterin tunnusta.

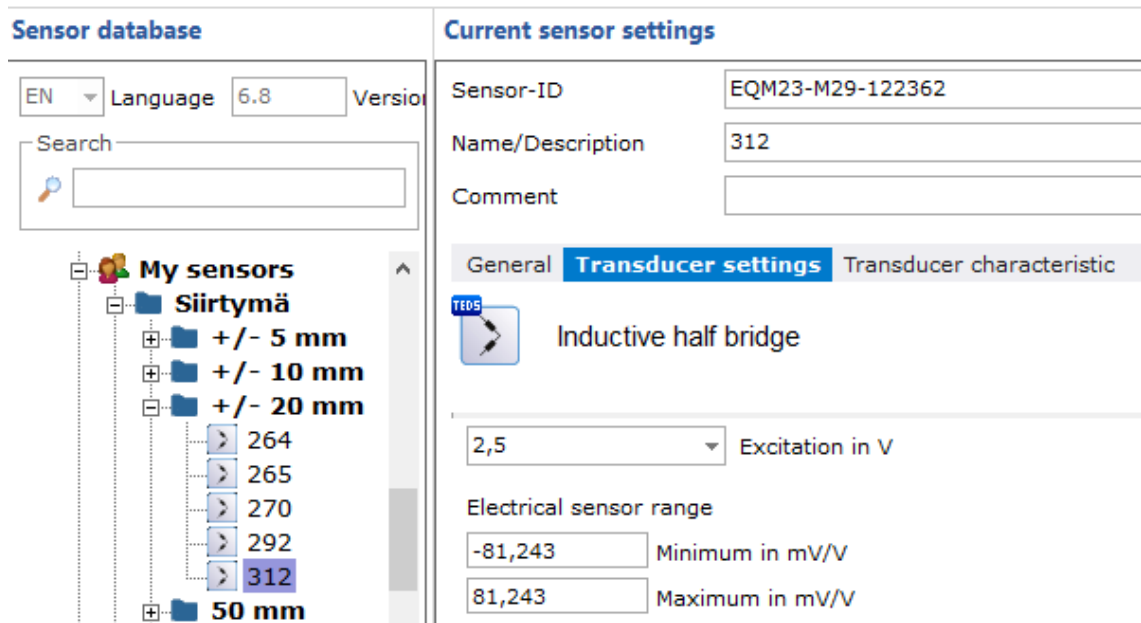
Sensor database -välilehdellä lisätään kansioita ja antureita tietokantaan. Anturin asetuksissa yleistietoihin voidaan lisätä muun muassa sarjanumero, valmistaja, anturin käyttöpaikka, kalibrointipäivämäärä ja kalibroinnin voimassaoloaika. Jokaiselle lisättävälle anturille määritellään anturikohtainen, kalibrointitodistuksesta löytyvä herkkyys eli suurinta kalibrointi-arvoa vastaava mittaussignaalin

(mV/V) arvo. Kuvan 22 esimerkissä määritellään HBM:n siirtymäanturin ominaisuudet omaan My sensors -tietokantaan. HBM:n antureille löytyy valmis tietokanta, mutta koska anturin kytkentä on toteutettu puolisiltana HBM:n tietokannan täyssillan sijaan, anturi määritellään tietokantaan induktiivisena puolisilta-anturina. Esimerkkianturin herkkyys on 81,243 mV/V ja siirtymä ± 20 mm. Siirtymän ja mittaussignaalin suhteen muuttuessa lineaarisesti voidaan määrittää kaksi pistettä, joista ensimmäinen on nollapiste ja toinen anturin suurin fyysinen lukuarvo ja sitä vastaava suurin mittaussignaali eli herkkyys. Epälineaarisesti käyttäytyvien anturien tapauksessa kalibrointi-arvot voidaan syöttää tietokantaan taulukkomuodossa, jolloin voidaan määrittää useita kalibrointipisteitä.



Kuva 22. Anturin ominaisuuksien määrittäminen [24].

Kuvassa 23 määritetään anturille Datasheetista löytyvä herätejännite (2,5 V) ja mittaussignaalin skaala. Datasheet eli tietolomake tai tekninen lomake sisältää oleelliset tiedot anturin teknisistä ominaisuuksista. Koska kyseessä on ± 20 mm:n anturi ja mittaussignaalin ollessa 81,243 mV/V nollapisteestä 20 mm positiiviseen suuntaan, on signaali $-81,243$ mV/V siirtymän ollessa -20 mm.

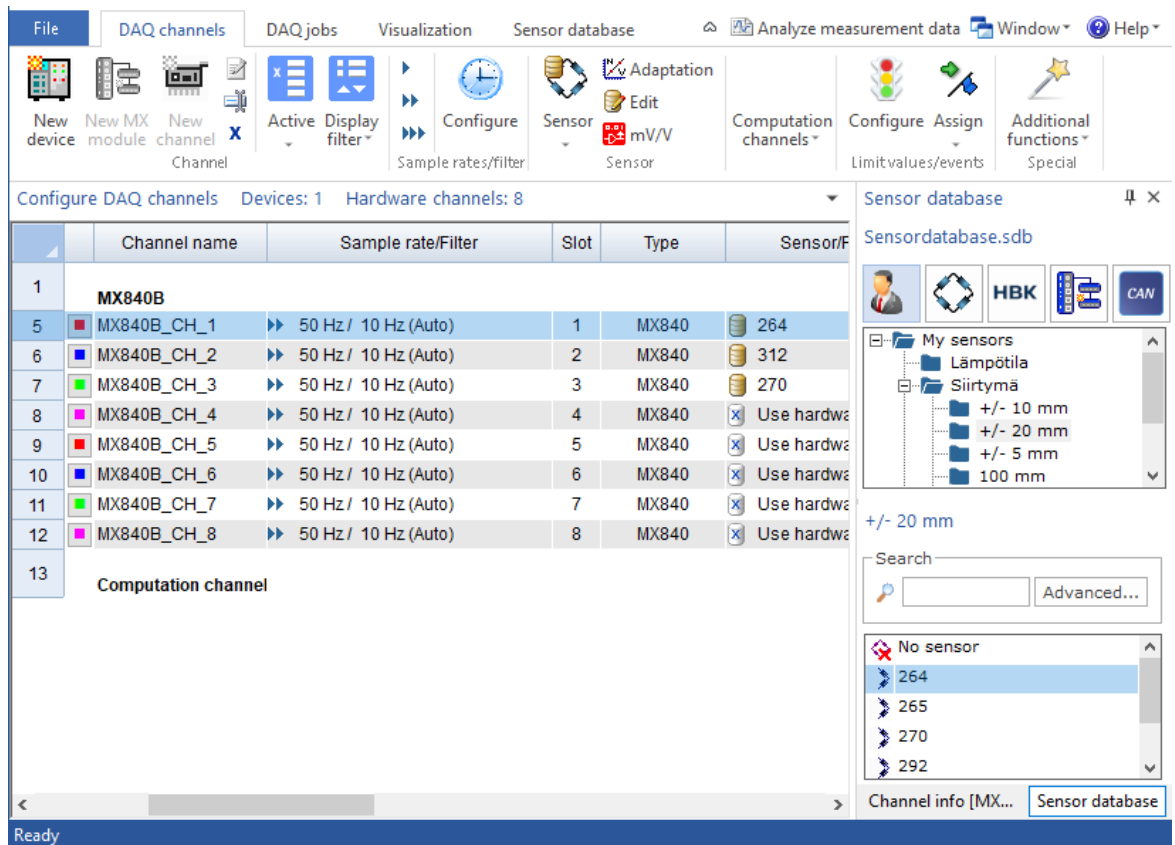


Kuva 23. Syöttöjännitteen ja mittaussignaalin skaalan määrittäminen [24].

DAQ channels -välilehdellä lisätään antureita mittausprojektiin raahaamalla halutut anturit kanavapaikoille anturietokannasta. Fyysisten kanavien lisäksi voidaan lisätä laskentakanavia esimerkiksi haluttujen anturikanavien keskiarvon mittaamiseen. Lisäksi DAQ channels -välilehdellä määritetään kanavapaikkojen näytteenottotaajuus ja taarataan kanavien mittaussignaalit.

DAQ jobs -välilehdellä määritetään muun muassa mittausdatan tallennusmuoto ja tiedonkeruun aloitus- ja lopetusehdot. Tiedonkeruun aloitus ja lopetus voidaan toteuttaa joko manuaalisesti halutun päivämäärän ja kellonajan mukaan, ajallisen keston mukaan tai halutulle kanavalle asetetun raja-arvon täytyessä.

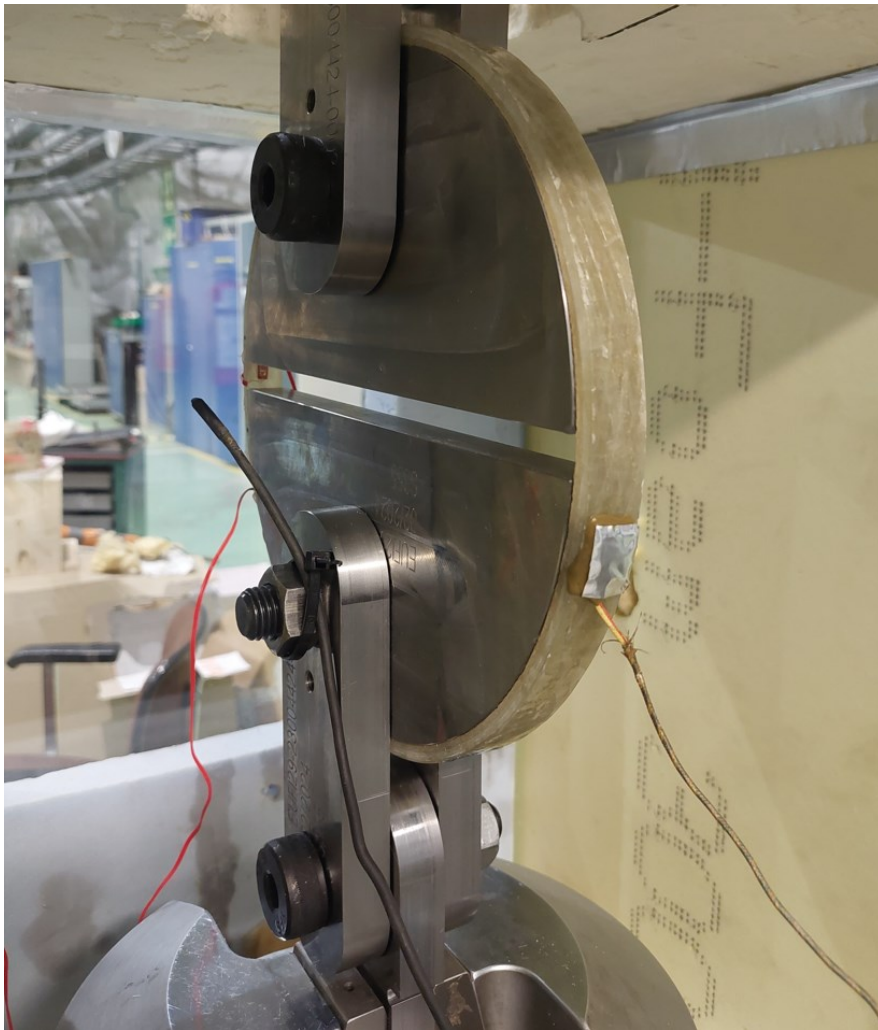
Visualization-välilehdellä lisätään näyttöpaneeleita, joihin voi lisätä erilaisia visuaalisia objekteja, kuten digitaalinäyttöjä, kuvaajia, taulukoita ja indikaattoreita, ilmaisemaan asetettujen raja-arvojen täyttymistä. Kuvassa 24 Catman Easy-DAQ projekti, jossa on aktiivisena DAQ channels -välilehti.



Kuva 24. DAQ channels -välilehti [24].

5 Järjestelmän testaus

Tiedonkeruujärjestelmää testattiin lasikuituvahvisteisen putken vetolujuuskokeissa soveltaen ASTM D2290-00 -standardia. ASTM D2290-00 standardi on testausmenetelmä muovisten tai vahvistettujen muoviputkien näennäisen ympärisuuntaisen vetolujuuden määrittämiseksi Split Disc -menetelmällä. Putkesta sahattiin 20 mm leveitä renkaita, jotka kiinnitettiin aineenkoestuskoneeseen standardin mukaisen, halkaistun kiekon muotoisen kiinnikkeen avulla. Koejärjestely on esitetty kuvassa 25.



Kuva 25. Split Disc -kokeen koejärjestely.

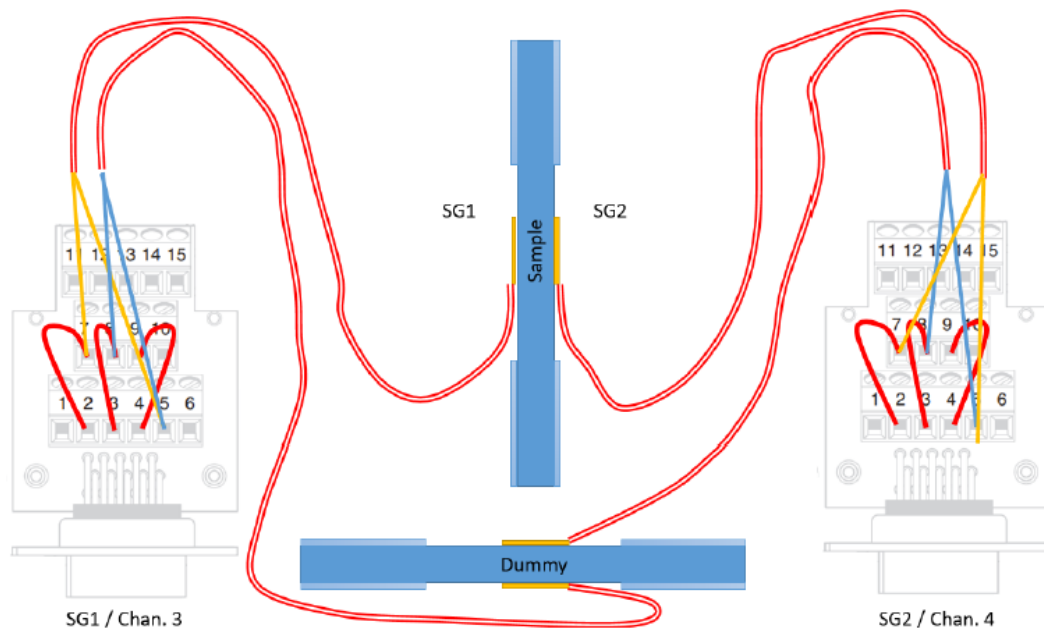
Koekappaleille määritettiin kokeissa murtovoima, murtolujuus sekä kimmomoduuli. Kimmomoduulin määrittämistä varten koekappaleisiin liimattiin renkaan sisä- ja ulkopintaan Kyowan KFGS-10-120-C1-11 L3M2R -venymäliuskat. Liuskan nimen kirjain- ja numerokoodaus on selitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Venymäliuskan numerokoodaus.

| Koodi | Selite |
|-------|-------------------------------|
| KFGS | Malli |
| 10 | Liuskan pituus |
| 120 | Resistanssi (Ω) |
| C1 | Liuskan muoto |
| 11 | Lineaarinen laajenemiskerroin |
| L3M2R | Johtimien tyyppi ja pituus |

Kokeet suoritettiin lämmitettävässä kammiossa kolmessa eri lämpötilassa: huoneenlämmössä, 45 °C:ssa ja 53 °C:ssa. Lämpötilan seuranta varten koekappaleen pintaan kiinnitettiin K-typin termopari. Ympäristön lämpötilan seurantaan käytettiin PT100-anturia. Kuvan 20 koejärjestelyssä termopari on kiinnitettyä koekappaleen ulkopintaan ja PT100-anturi koekappaleen vieressä.

Lämpötilan muutoksen aiheuttamat muodonmuutokset koekappaleessa kompensoitiin ylimääräisillä venymäliuskoilla, jotka liimattiin dummy-koekappaleeseen. Dummy-koekappale oli samanlainen, samasta putkesta sahattu rengas kuin varsinainen koekappale, ja se asetettiin vapaana samoihin olosuhteisiin koekappaleen kanssa testikammion sisälle. Kuvassa 26 on esitetty venymäliuskojen lämpötilakompensoitu puolisisiltakytkentä SUBHD15-liittimiin.



Kuva 26. Venymäliuskojen puolisiltakytkentä lämpötilan kompensatiolla.

Catman-mittausohjelmistoon lisättiin fyysisten kanavien lisäksi laskentakanaavat 10 mm:n pituisten venymäliuskojen suhteellisen venymän määrittämiseksi. Ohjelmistossa venymäliuskojen venymä ilmaistaan mikrometreinä per metri. Laskentakanaaville määritettiin yhtälöt, joissa venymäliuskan mittauslukema kerrottiin yhtälön 2 tuloksena saadulla kertoimella.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\mu m}{10 \text{ mm}} = \frac{10^{-6} \text{ m}}{0.01 \text{ m}} = 10^{-4} = 0,0001 \quad (2)$$

ε on venymä

ΔL on pituuden muutos

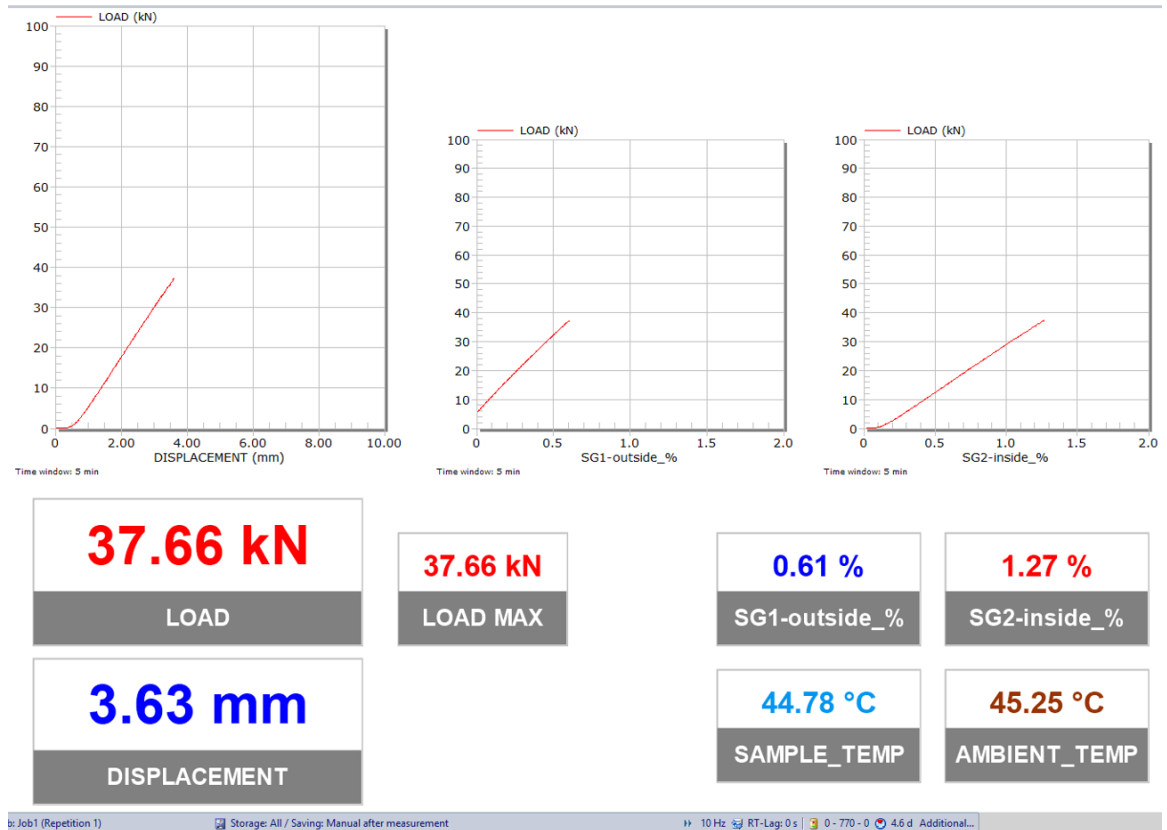
L on alkuperäinen pituus.

Kokeissa käytetty laitteisto koostui anturien lisäksi MTS 244.31 -ainekoestuskoneesta, Instronin Labtronic 8800 -ohjausyksiköstä, Catman Easy -mittausohjelmistosta sekä QuantumX MX840B -mittausvahvistimesta. MX840B:n anturikanavien konfigurointi on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Anturikanavien konfigurointi.

| Kanava | Anturi | Herkkyyks / skaala |
|--------|---------------------------------|---|
| 1 | MTS 244.31 voima | 0-10 V = 0-250 kN ± 250 kN |
| 2 | MTS 244.31 siirtymä | 0-10 V = 0-50 mm ± 50 mm |
| 3 | KFGS-venymäliuska (SG1-outside) | Resistanssi = 120 Ω Liuskavakio = 2.09 |
| 4 | KFGS-venymäliuska (SG2-outside) | Resistanssi = 120 Ω Liuskavakio = 2.09 |
| 5 | Tyhjä | - |
| 6 | Tyhjä | - |
| 7 | K-tyypin termopari | Oletusarvot |
| 8 | PT100 lämpötila-anturi | Oletusarvot |

Visualization-välilehdelle lisättiin näyttöpaneeli, johon lisättiin kokeen aikana tarpeellista, reaaliajassa seurattavaa informaatiota kuvaajien ja digitaalinäyttöjen muodossa. Paneelissa on voima-siirtymäkuvaaja aineenkoestuskoneen lineaarisen käyttäytymisen ja koekappaleeseen kohdistuvan kuormituksen seurantaan. Voima-venymäkuvaajat ilmaisevat koekappaleen venymän muutoksen suhteessa voimaan. Digitaalisilla näytöillä on tarkat voiman, siirtymän, venymien ja lämpötilojen reaaliaikaiset lukuarvot. Näyttöpaneeli on kuvassa 27.



Kuva 27. Näyttöpaneeli [24].

6 Yhteenveto

Opinnäytetyössä päivitettiin mekaanisessa testauksessa käytettävä tiedonkeruujärjestelmä. Tavoitteena oli yhteensovittaa HBM:n mittausvahvistin ja mittausohjelmisto olemassa olevan laitekannan kanssa. Uuteen laitteistoon tehtiin olemassa oleville antureille sopivat liittimet ja antureille määriteltiin uuteen järjestelmään oma anturitietokanta.

Tiedonkeruujärjestelmän toimintaa testattiin lasikuituputken vetokokeissa. Kokeiden tiedonkeruu onnistui ja näyttöjen lisäys mahdollisti reagoinnin mahdollisiin häiriöihin antureiden toiminnassa. Laskentakanavien lisääminen mittausprojektiin helpottaa mittausdatan jälkikäsitteilyä ja lisää mahdollisuuksia kokeen reaaliaikaiseen seurantaan. Uusi järjestelmä soveltuu hyvin mekaanisen testauksen tarpeisiin myös tehokkuuden ja skaalautuvuuden puolesta.

Mahdollisuus mittausdatan kanssa synkronoituun videokuvaukseen auttaa kokeessa tapahtuvien muutosten havainnointiin jälkikäteen. Lisäksi videokuvaus mahdollistaa kokeiden etäseurannan. Catman-ohjelmiston laajennusosilla on mahdollista tehostaa mittausdatan käsittelyä ja kokeiden raportointia.

Lähteet

- 1 Tietoa meistä. 2024. Verkkoaineisto. Eurofins Expert Services Oy. <<https://www.eurofins.fi/expertservices/tietoa-meistae/>>. Päivitetty 14.2.2024. Luettu 24.2.2024.
- 2 Di Paolo Emilio, Maurizio. 2013. Data Acquisition Systems, From Fundamentals to Applied Design. New York: Springer.
- 3 What is Data Acquisition (DAQ). Verkkoaineisto. imc Test & Measurement GmbH. <<https://www.imc-tm.com/blog/what-is-data-acquisition>>. Luettu 2.3.2024.
- 4 QuantumX: The Universal and Distributable Data Acquisition System. 2020. Verkkoaineisto. HBM. <<https://www.hbm.com/en/2128/quantumx-compact-universal-data-acquisition-system>>. Päivitetty 1.8.2020. Luettu 3.3.2024.
- 5 QuantumX MX840B and MX440B: 24-Bit Universal Measuring Amplifier for All Common Sensor Technologies. 2020. Verkkoaineisto. HBM. <<https://www.hbm.com/en/2129/quantumx-mx840b-8-channel-universal-amplifier/>>. Päivitetty 1.8.2020. Luettu 3.3.2024.
- 6 QuantumX MX840B Universal amplifier. 2023. Verkkoaineisto. HBM. <<https://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/B03816.pdf>>. 30.11.2023. Luettu 3.3.2024.
- 7 QuantumX: One Data Acquisition System. Unlimited Solutions. Verkkoaineisto. HBM. <<https://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/S02333.pdf>>. Luettu 3.3.2024.
- 8 Huang, Jiyong. 2023.. CAN Bus: What Is It and How Does It Work. Verkkoaineisto. EMQ Technologies. <<https://www.emqx.com/en/blog/can-bus-how-it-works-pros-and-cons>>. 22.5.2023. Luettu 3.3.2024.
- 9 QuantumX Operating Manual. 2021. Käyttöohjekirja. Darmstad: HBM.
- 10 Catman Data Acquisition Software: Connect. Measure. Visualize. Analyze. 2020. Verkkoaineisto. HBM. <<https://www.hbm.com/en/2290/catman-data-acquisition-software/>>. Päivitetty 1.8.2020. Luettu 5.3.2024.
- 11 Labtronic 8800 Controller. Verkkoaineisto. Instron. <<https://www.instron.com/en-gb/-/media/literature-library/products/2005/01/istlabtronic8800lowpdf.pdf>>. Luettu 10.3.2024.

- 12 Single Axis 8800 Series Operator's Course. Verkkoaineisto. Instron. <<https://www.instron.com/pt-br/-/media/literature-library/services/2007/04/8800-operators-course.pdf>>. Luettu 10.3.2024.
- 13 8802 SERVOHYDRAULIC FATIGUE TESTING SYSTEM. Verkkoaineisto. Instron. <<https://www.instron.com/-/media/literature-library/products/2012/10/8802-servo-hydraulic-fatigue-testing-system.pdf>>. Luettu 10.3.2024.
- 14 Labtronic 8800 Operator Panel - Operating Instructions. 2003. Käyttöohje-kirja. Instron Corporation.
- 15 How Does an Inductive Displacement Sensor Work. 2020. Verkkoaineisto. HBM. <<https://www.hbm.com/en/0236/displacement-sensors-and-displacement-transducers/>>. Päivitetty 1.8.2020. Luettu 16.3.2024.
- 16 Measuring cracks in concrete. Verkkoaineisto. TML. <<https://tml.jp/e/knowledge/transducers/displacement-example.html>>. Luettu 16.3.2024.
- 17 Kyowa Measuring Equipment. 2022. Tuotekuvasto. Tokio: Kyowa Electronic Instruments LTD.
- 18 Wilson, Jon S. 2004. Sensor Technology Handbook. Burlington: Elsevier Science & Technology.
- 19 The Route to Measurement Transducers. A Guide to the Use of the HBM K Series Foil Strain Gages and Accessories. Verkkoaineisto. HBM. <<https://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/s2304.pdf>>. Luettu 24.3.2024.
- 20 Mohan Jha, Chandra. 2015. Thermal Sensors Principles and Applications for Semiconductor Industries. New York: Springer.
- 21 Miten toimii Pt100-anturi. Verkkoaineisto. Lapp Automaatio Oy. <<https://www.epicsensors.fi/faq/miten-pt100-anturi-toimii/>>. Luettu 26.3.2024.
- 22 Mikä on DHCP? Yksinkertainen opas IP-osoitteen määrittämisen ymmärtämiseen. 2023. Verkkoaineisto. Fiberroad. <<https://fiberroad.com/fi/resources/glossary/what-is-dhcp/>>. Päivitetty 20.2.2023. Luettu 5.4.2024.
- 23 Mounting Instructions. 2021. Induktiivisten siirtymäanturien asennusohje. Darmstad: HBM.
- 24 Catman Easy. Versio 5.5. 2024. HBM.