Niko Remo

Hydrauliikka-asetelman väsymislujuus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Insinöörityö

10.1.2023

Tiivistelmä

Tekijä:	Niko Remo
Otsikko:	Hydrauliikka-asetelman väsymislujuus
Sivumäärä:	26 sivua + 2 liitettä
Aika:	10.1.2023
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Ammatillinen pääaine:	Koneensuunnittelu
Ohjaajat:	Yliopettaja Jyrki Kullaa Lehtori Heikki Paavilainen

---

Tämän insinöörityön tarkoituksena oli tarkastella Metropolia Ammattikorkeakoulu Oy:n asiakkaan hydraulista asetelmaa. Tarkastelun kohteena oli asetelman väsymiskestävyys oletetun eliniän aikana, joka oli nopeutettu tätä testiä varten. Tämä työ käsittelee pääasiassa asetelman rasitusten selvittämistä venymäliuskoilla testin aikana, mutta ottaa myös kantaa asetelmassa havaittuihin poikkeamiin.

Työssä käsitellään venymän ja jännityksen perusteita sekä venymäliuskojen toimintaperiaatetta. Varsinkin venymäliuskoja on saatavilla jokaiseen käyttötarkoitukseen, ja sopivan valitseminen vaikuttaa koko mittauksen lopputulokseen. Venymien ja jännitysten yhteisvaikutuksia tutkitaan teoriatasolla, ja miten niitä voidaan hyödyntää tämän työn tuloksissa.

Testipenkkiä ja sen suunnittelu- sekä valmistusprosessia arvioitiin tämän insinöörityön aikana.

Työn lopputulosta on vaikea arvioida, onko se täysin asiakkaan toiveiden mukainen. Asiakkaan oikeiden tarpeiden selvittämisen tärkeys korostui tätä työtä suorittaessa. Työ suoritettiin kuitenkin asiakkaan toiveiden mukaisesti, ja täydennyksiä tehtiin matkan varrella.

Tuloksena työstä syntyi asiakkaalle raportti, jossa käsitellään mitattuja venymiä, ja niistä on suodatettu suurimmat venymät, ja laskettu näistä jännitykset.

Avainsanat: venymäliuska, väsyminen, hydrauliikka, lujuusoppi

Abstract

Author:	Niko Remo
Title:	Fatigue strength of a hydraulic assembly
Number of Pages:	26 pages + 2 appendices
Date:	10 January 2023
Degree:	Bachelor of Engineering
Degree Programme:	Mechanical engineering
Professional Major:	Machine design
Supervisors:	Jyrki Kullaa, Principal Lecturer
	Heikki Paavilainen, Lecturer

The thesis is based on a research project conducted by the Metropolia University of Applied Sciences. The project consisted of a fatigue test performed on the customers hydraulic assembly. The test was sped up with idle time removed and the frequency of pressure build-up doubled. This thesis focuses mostly on measuring the strains and stresses together with observed quality deviations of the assembly.

The work discusses the basics of strain and stress and the operation principle of strain gauges. Strain gauges are available for every purpose and choosing the right one affects the result of the entire measurement. The combined effects of strains and stresses are studied at a theoretical level, and how they can be utilized in the results of this work.

The test bench and its design and manufacturing process were evaluated during this thesis.

It was difficult to assess the result of the work, whether it fully met the customer's wishes. Communication, the needs of the client and the person performing the work did not become sufficiently clear during the work. However, the work was conducted in accordance with the customer's wishes, and modifications were made along the way.

As a result of the work, a report was created for the customer. The report discusses the measured strains and calculated stresses.

Keywords: strain gauge, hydraulics, fatigue, strength of materials

Sisällys

1 Johdanto 1

2 Venymä ja jännitys 2

3 Venymän mittaus 4

3.1 Liuskan rakenne 6
3.2 Wheatstonen silta 7
3.3 Mittalaite 10
3.4 Mittatarkkuus ja mittavirheet 10

4 Testipenkki 11

4.1 Testipenkin valmistaminen 12
4.2 Heräte 14
4.3 Mittauskohdan valinta 16
4.4 Liuskojen asentaminen 16

5 Tulokset 18

5.1 Tulosten käsittely 20
5.2 Työsyklit 21
5.3 Rainflow-menetelmä 22
5.4 Tiedon luotettavuus 23
5.5 Havainnot 23

6 Yhteenveto 24

Lähteet 26

Liitteet

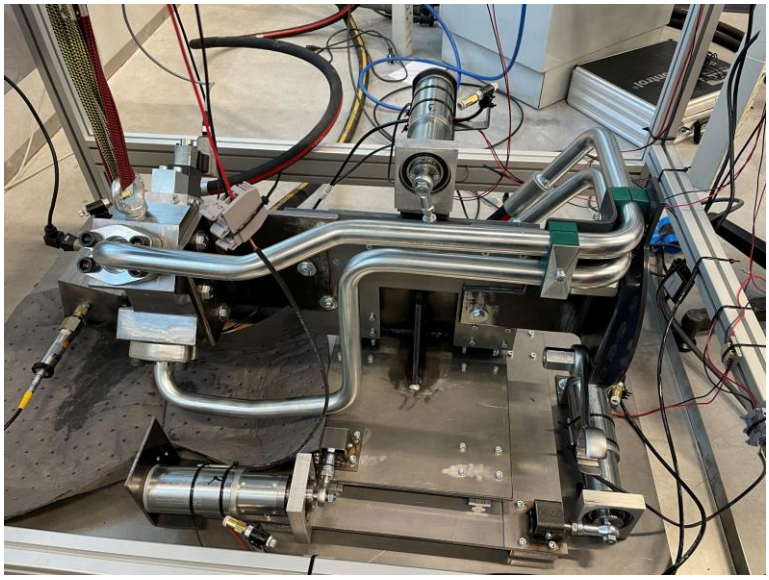
Liite 1: DIN 2413-3 mukainen laskentakaava putken työpaineelle

Liite 2: HBM:n laskentakaavat

1 Johdanto

Hydrauliikassa hyödynnetään paineistetun nesteen kokoon puristumattomuutta, jonka avulla voidaan siirtää suuria määriä energiaa. Tämä kuitenkin rasittaa kaikkia paineen alaisia komponentteja. Tämä rasitus voi olla esimerkiksi väsymistä, eli myötörajan alapuolella tapahtuvaa materiaalin pysyvää muodonmuutosta.

Työssä tarkastellaan Metropolia Ammattikorkeakoulu Oy:n asiakasyrityksen suunnittelemaa hydraulista asetelmaa, jossa epäillään väsymismurtumavaaraa putken vapaasti liikkuvassa päädyssä, jossa putki yhtyy letkuihin. Mitattava kohta on alla olevassa kuvassa 1 oikeassa reunassa, ylemmän vihreän tukiosan yläpuolella. Koe suoritettiin keväällä 2022 Metropolia Ammattikorkeakoulun tutkimuskeskuksessa. Tässä työssä tutkitaan väsymisen mahdollisia vaikutuksia testiputkistoon. Tavoitteena oli tuottaa asiakkaalle merkityksellistä tietoa uuden tuotteen kestävyydestä. Tätä tietoa olivat fyysinen rasituskoe, jota varten aiemmin mainittu testipenkki rakennettiin. Testattava asetelma oli valmistettu sarjatuotannon mukaisella valmistustavalla, ja edusti lopputuotetta.



Kuva 1. Hydraulinen asetelma testipenkissä

2 Venymä ja jännitys

Venymän perusmuotoinen käsite on pituuden muutos alkuperäisestä pituudesta. Tämä voidaan ilmaista yhtälöllä

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} \tag{1}$$

- ε on venymä
- L_0 on kappaleen alkuperäinen mitta
- L on uusi mitta
- ΔL on pituuden muutoksen määrä.

Venymällä ei ole yksikköä.

Kappaleen pituuden muuttuessa siihen useimmiten kohdistetaan ulkoinen tai sisäinen voima, joka aiheuttaa jännityksiä. Jännitys voidaan määritellä seuraavasta kaavasta

$$\sigma = \frac{F}{A} \tag{2}$$

- σ on normaalijännitys (Pa)
- F on pinta-alaan kohdistuva normaalivoima (N)
- A on pinta-ala (mm^2).

Jännityksen suuruuteen siis vaikuttaa voiman suuruus ja pinta-alan koko. Pennala toteaa, että jännitys on suoraan verrannollinen venymään. Tämä pätee kuitenkin materiaalin elastisella alueella, jossa voidaan käyttää Hooken lakia. Tällä alueella aine pysyy kimmoisena, jolloin se pyrkii palautumaan alkuperäiseen muotoonsa kuorman poistuttua. Hooken laki voidaan lausua seuraavasti: [1, s. 25.]

$$\sigma = E\varepsilon \tag{3}$$

- σ on normaalijännitys (Pa)
- E on materiaalin kimmokerroin (GPa)
- ε on venymä

Useimmille materiaaleille on määritelty joko myötöraja R_e tai niin kutsuttu venymäraja $R_{p0.2}$. Myötörajalla tarkoitetaan jännitystä, jonka ylittyessä materiaaliin jää pysyviä muodonmuutoksia. $R_{p0.2}$-raja tarkoittaa sitä, että tällä jännityksen arvolla materiaaliin jää pysyvä 0,2 % venymä. [1, s. 22.]

Myötörajaa käytetään silloin, kun materiaalilla on selkeä raja, jossa se rupeaa myötämään. Kaikilla materiaaleilla tätä ei ole, kuten joillain alumiineilla. Tässä tapauksessa materiaalin kestävyyttä arvioidaan venymärajalla.

Venytyksessä kappaleeseen kohdistuu vetävä voima. Materiaali, jossa on positiivinen Poissonin vakio, pitenee voiman vaikutussuunnassa ja kapenee poikittaissuunnassa. Puristus toimii päinvastoin venytyksestä. Kun kappaleeseen kohdistetaan puristava voima, kappaleen pituus lyhenee voiman vaikutussuunnassa ja levenee poikittaissuunnassa. Väännössä kappaleeseen vaikuttava voima pyrkii kiertämään kappaletta vaikuttavan momentin akselin ympäri.

Harvoissa tapauksissa voimat vaikuttavat kappaleisiin yksin, ja niihin kohdistuu näiden yhdistelmä. Vaikuttavien voimien selvittäminen muuttuu tässä kohtaa merkittävästi vaikeammaksi. Useimmat voimien vaikutusmallit on tehty toimimaan yhden vaikuttavan voiman vaikuttaessa kappaleeseen. Näitä ovat yleisimmät staattisen rakenteen määrittämisen mallit, kuten Wöhler-käyrä ja Smithin piirros. [1, s. 361.]

Materiaalien vaurioituminen tapahtuu materiaalityypistä, kuormituksesta ja lämpötilasta riippuen monella eri tavalla. Suuren, yhtäkkisen kuormituksen vuoksi kappale voi hajota katastrofaalisesti, tai se voi pienen, jatkuvan kuormituksen takia lopulta väsyä.

Virheet materiaalin rakenteessa voivat myös olla ratkaisevia tekijöitä lopullisen murtumisen tapahtumaketjussa. Lujuusopin perusteissa kuvataan, että väsymisen alkamispiste ja reitti on helposti nähtävissä murtuneesta metallipinnasta. Väsymisen alkamispisteestä lähtee vuosirengasmaiset kuviot, ja materiaali heikkenee jatkuvasti. Materiaalin saavuttaessa pisteen, jossa se ei enää kykene kannattelemaan sille asetettua kuormaa, murtuu se äkillisesti. [1, s. 344.]

3 Venymän mittaus

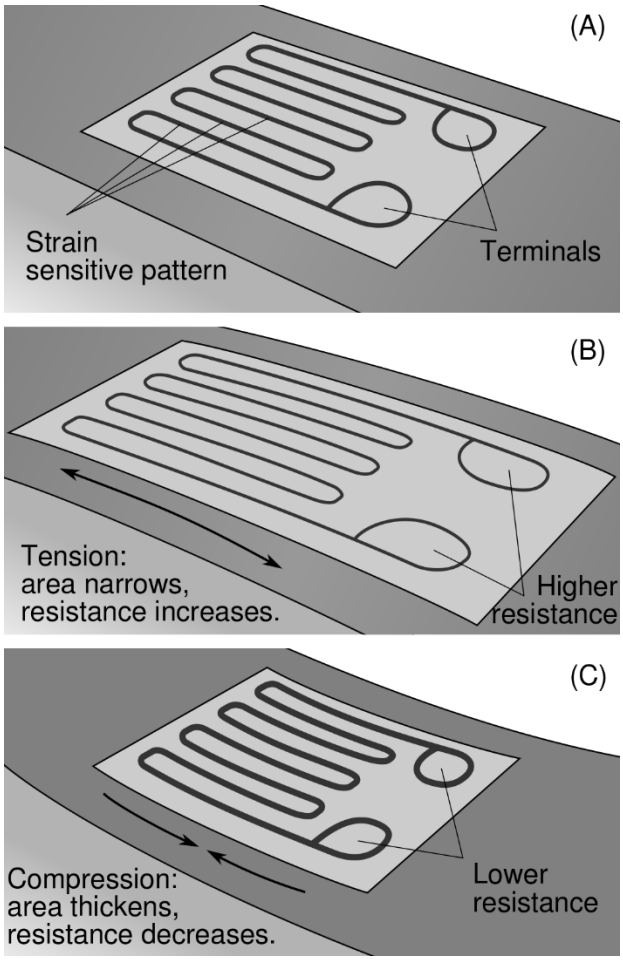
Venymäliuskat ovat kehittyneet merkittävästi viimeisinä vuosikymmeninä. Ensimmäinen venymäliuskaa muistuttava rakenne oli enemmänkin heiluri, joka kykeni osoittamaan hyvin pienen muutoksen rakenteen pituudessa. Tyypillinen suhde venymään oli noin 1:1000.

Mekaanisen mittalaitteen huono puoli tuli kuitenkin nopeasti selväksi: laite ei soveltunut nopeasti liikkuvien kohteiden venymien mittaamiseen, ja laitteen koko määritti pienimmän mitattavan alueen koon. Tuli selväksi, että sähköinen mittalaite olisi seuraava askel venymien mittauksessa. [2, s. 2.]

Venymäliuskoja (strain gauge) on saatavilla useita erilaisia malleja ja konfiguraatioita lähes jokaiseen mittaustarpeeseen. Niillä voidaan tehdä tutkivaa työtä, kuten selvittää pääjännitykset ja niiden suunnat tuntemattomassa tapauksessa, taikka suorittaa kunnonvalvontaa esimerkiksi silloissa. Pitkillä matkoilla voidaan hyödyntää myös optisia tuotteita, kuten lasereita, joissa voidaan mitata esimerkiksi säteen matka-aikaa.

Venymäliuskojen perusperiaatteena on mitata liuskan muodonmuutosta, jossa liuskan hila muuttaa muotoaan, ja sen resistanssi muuttuu. Tämä resistanssin muutos voidaan mitata liuskan yli jännitteen avulla. Muodonmuutokset aiheuttavat kappaleissa jännityksiä, jotka voidaan johtaa mitatuista venymistä. [3, s. 6.]

Alla olevasta kuvasta 2 voidaan havaita venymäliuskan mittahilan muodonmuutoksesta johtuva vastuksen muutos. Kohdassa (A) liuska on venymättömässä tilassaan. Kohdassa (B) liuskan mittahila on venynyt, ja liuskan hilan elementit venyvät ja ohentuvat, jolloin vastus kasvaa. Vastaavasti kohdassa (C) venymäliuskan mittahila on puristinut kasaan, jolloin vastus pienenee mittahilan yli mitatessa.



Kuva 2. Venymäliuskan muodonmuutos [4]

Liuskalla mitattu resistanssin muutos mitataan ja vahvistetaan, jonka jälkeen venymäksi muunnettua tietoa voidaan tulkita. Useimmat venymäliuskat toimivat 120–1000 Ohmin vastuksella.

Venymäliuskoja käytetään keskimäärin maksimissaan 3000 µm/m venymien mittaamiseen. Suurempien venymien mittaamisessa aletaan havaita poikkeamaa laskennallisen ja mitatun venymän välillä. Tähän vaikuttavat jo liuskan kiinnitystapa ja kiinnityksen laatu ja liuskan hilan materiaalien vaikutus venymästä aiheutuvaan lämpötilan muutokseen. Näitä ei voida pitää suurilla venymillä merkityksettöminä. [2, s. 69.]

Liuskan venyminen sen poikittaissuunnassa voi aiheuttaa virheitä mittauksiin. Santaojan mukaan kuitenkin nykyaikainen venymäliuska ei juurikaan tästä kärsi, virheen ollessa lähellä 0 % ja huonoimmillaan noin 2 %. [5, s. 349.]

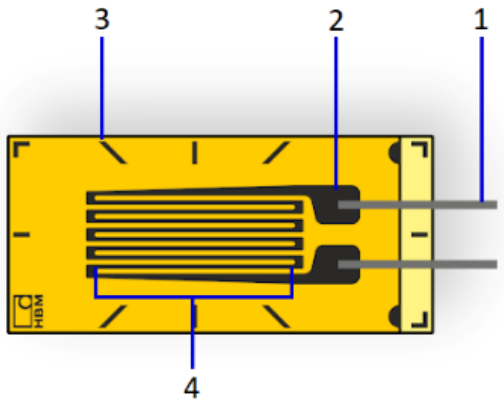
3.1 Liuskan rakenne

Nykyaikainen venymäliuska on valmistettu kantajamateriaalin päälle. Suurin osa liuskoista käyttää kantajamateriaalina polyimidiä. Haluttu liuskan muoto etsataan kantajamateriaalin päälle, yleisin tähän käytetty materiaali on konstantaani. Konstantaani on metalliseos, jossa on pääasiallisesti 55 % kuparia ja 45 % nikkeliä [5, s. 349]. Metalliseoksen resistanssi pysyy lähes muuttumattomana, jolloin se soveltuu erinomaisesti vastuksen muutoksen mittaukseen. Etsatun metallikerroksen päälle tulee vielä kolmas, suojaava kerros.

Liuskan mekaanisen venymän ja resistanssin muutoksen suhdetta kuvaa liuskavakio k. Tämä suure kertoo venymän vaikutuksesta liuskan hilan resistanssiin, joka muuttuu venymän muuttuessa. Konstantaanille liuskavakio on noin 2. [2, s. 53.]

$$k = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon} \tag{4}$$

- k on liuskavakio (yksikötön)
- ∆R on resistanssin muutos
- R on resistanssi
- ε on venymä

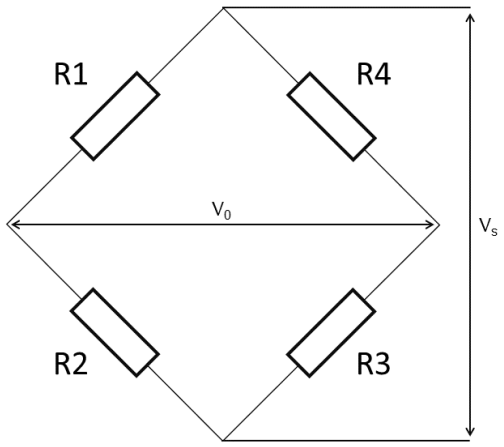


Kuva 3. Venymäliuska ja sen osat. Johtimet (1), juotosliuskat (2), kohdistusmerkit (3) ja mittahila (4) [6]

Liuskoja on saatavilla melkein mihin tahansa mittaustarkoitukseen. Yksinkertaisimmilla liuskoilla voidaan mitata yhden suunnan venymää. Monimutkaisemmilla ja useamman mittahilan liuskoilla voidaan myös mitata tuntemattomia jännityksiä, ja päätellä mitta-arvoista jännityksien suunta ja suuruus. Näitä kolmihilaisia liuskoja kutsutaan rosette-liuskoiksi.

3.2 Wheatstonen silta

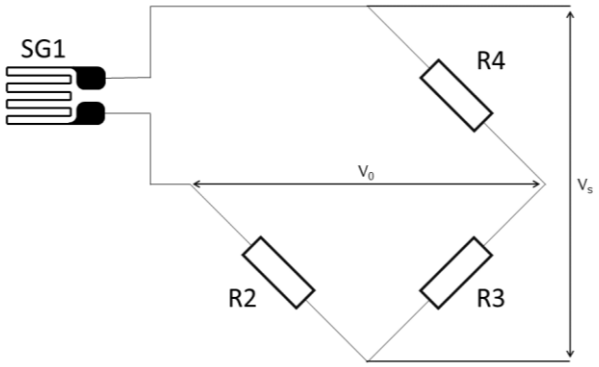
Venymäliuskojen mittaustekniikka perustuu niin kutsuttuun Wheatstonen siltaan. Tämä virtapiirin muoto mahdollistaa erittäin tarkan piirin vastuksen muutoksen mittauksen. Tyypillinen vastuksen muutos venymäliuskassa on noin 10^{-4}:stä 10^{-2} Ohmiin. [2, s. 126.]



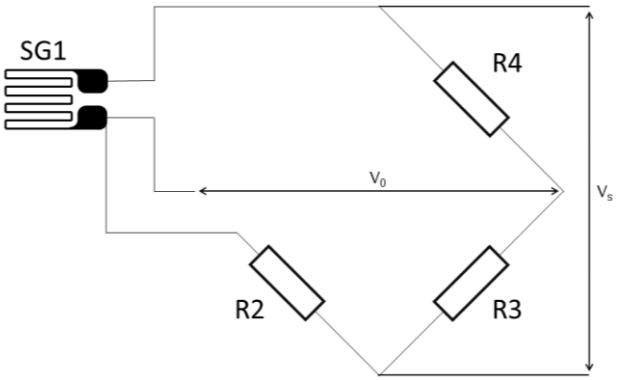
Kuva 4. Wheatstonen silta

Wheatstonen mittasillassa on neljä vastusta, joista kuvan 4 esimerkissä sillan herätejänne syötetään jännitelähteestä V_s vastusten R1 ja R4 sekä R2 ja R3 väliin. Vastaavasti jännite mitataan vastakkaisten vastusten välistä. Jos mittasilta on tasapainossa (vastusten suuruus yhtäläinen), mitattava jännite on 0. [2, s. 128.]

Kun mittasiltaa käytetään venymäliuskojen kanssa, yksi tai useampi vastus korvataan vastusta vastaavalla venymäliuskalla. Tässä työssä käytettiin mittasiltana neljännessiltaa, jossa kuvan 5 tapauksessa vastus R1 korvattiin venymäliuskalla. Koska mittaus tapahtui kohonneessa lämpötilassa, mahdollinen mittavirhe minimoitiin käyttämällä kolmen johtimen kytkentää mittasillassa. Tällä tasattiin lämpötilasta johtuva resistanssin muutos. Lämpötilakompensoitu neljännessilta on esitetty kuvassa 6.



Kuva 5. Lämpötilakompensoimaton 2 johtimen venymäliuskallinen Wheatstonen silta



Kuva 6. Lämpötilakompensoitu 3 johtimen venymäliuskallinen Wheatstonen silta. Venymäliuskan toisesta juotosliuskasta on liitetty toinen johdin suoraan vastuksen R2 jalkaan. Tällä kytkennällä pyritään vähentämään mittajohtojen lämpötilamuutoksesta johtuvaa mittavirhettä.

Lämpötilan vaikutusta mittaukseen pystytään tutkimaan asentamalla samaa lämpötilaa noudattava passiivinen venymäliuska. Tämän passiivisen liuskan tarkoitus on seurata ainoastaan lämpötilan muutoksesta aiheutuvaa venymää, ja tällä voidaan vähentää lämpötilanmuutoksesta tapahtuvaa mittavirhettä. [5, s. 357.]

3.3 Mittalaite

Ilman mittalaitetta Wheatstonen mittasillasta on vaikea saada helposti tulkittavia tuloksia. Muutokset mittasillassa ovat erittäin pieniä. Nämä vahvistetaan mittalaitteen tulopiirissä, jonka jälkeen ne voidaan tulkita venymäksi kappaleessa. Mittalaitteen ja venymäliuskan väliin tarvittiin erillinen adapteri, joka sisälsi 120 Ohmin Wheatstonen sillan ja tarvittavat kytkentäkohdat neljännessillan kytkentään 3-johdin kytkennällä.

3.4 Mittatarkkuus ja mittavirheet

Venymäliuska ei itsessään toimi mittalaitteena, sillä sen tulee olla asennettuna mitattavaan kappaleeseen toimiakseen. Merkittävimmät virheet mittauksessa syntyvät yleensä:

- Mitattavasta kappaleesta (virheet kappaleessa)
- Mittalaitteesta (sähköiset komponentit, päätelaite)
- Mittaustavasta (mittalaitteiden oikea käyttötapa)
- Ympäristöstä ja sen vaikutuksista (kuten lämpötila, kosteus)
- Mittaajasta itsestään (liuskan asennus, mittaajan tulkinta)

Muutokset ja virheet mittauksissa voidaan myös kategorisoida seuraavalla tavalla:

- Suuret virheet
- Satunnaiset poikkeamat
- Systemaattiset poikkeamat [2, s. 235.]

Suuria virheitä ei yleisesti voida enää jälkeenpäin korjata mittaustuloksista pois. Suuria virheitä voivat olla esimerkiksi vääränlainen mittauslaite tai -liuska, käyttäjän tekemät virheet (virheellinen mittalaitteiden käyttö, asennusvirhe).

Satunnaisia virheitä on paljon vaikeampi saada pois mittausvirheestä. Nämä voivat olla mitä tahansa pieniä muutoksia mittalaitteessa, ympäristössä tai käyttäjässä. Yleisin tapa selvittää satunnaiset virheet ovat tehdä mittauksia riittävän monta kertaa, ja saada näistä virhemarginaali.

Systemaattisia poikkeamia ovat tunnetut virheen lähteet mittauksisessa, joita voidaan pyrkiä poistamaan, taikka ottaa huomioon mittaustuloksissa. [2, s. 235–236.]

4 Testipenkki

Testausta varten rakennettiin erillinen, Metropolia Ammattikorkeakoulun toimesta suunniteltu hydraulinen testipenkki. Tarkoituksena oli tutkia jatkuvan, vaihtelevan työpaineen ja liikkeen aiheuttaman kuormituksen vaikutusta testattavaan putkistoasetelmaan. Testaus tapahtui paineenalaisena vaihtelevan työpaineen kanssa, ennalta määrätyissä sykleissä. Tavoitteena oli simuloida asetelman käyttökohdetta, jossa työpaine ja liikkeet ovat vaihtelevia suuruudeltaan ja suunnaltaan. Lämpötila testijärjestelmässä oli noin 80 ℃. Testipenkin päätoiminta tapahtui kolmella epäkeskeisellä akselilla varustetulla sähkömoottorilla, joilla liikutettiin testattavaa putkistoa XYZ-suuntien mukaisesti. Työsykli oli määritelty etukäteen, ja kaksinkertaistettu testin nopeuttamista varten.

Testipenkkiä ohjataan testausta varten rakennetulla Beckhoff PLC-ohjelmistolla. Ohjelmisto tarkkailee testauslaitteiston erilaisia vasteita, kuten nesteen lämpötilaa ja painetta. Järjestelmä suunniteltiin toimimaan täysin ilman ihmisen valvontaa, ja ohjelmisto pysäyttää testauksen, jos havaitaan jokin vaste, joka siirtyy ennalta määrätyn asteikon ulkopuolelle.

Testaukseen haluttu asetelma oli valmistettu E355-rakenneteräksestä. Putken ulkohalkaisija oli 30 mm ja seinämävahvuus oli 5 mm. Alla olevassa taulukossa on esitelty erään putkivalmistajan E355-teräksen lujuusominaisuudet. Taulukossa ilmoitettu väsymislujuus perustuu valmistajan omiin kokemuksiin, ja ei perustu standardimittaukseen. [7, s. 6.]

Taulukko 1. E355-teräksen lujuusominaisuudet [7, s. 6].

E355+N	
Myötölujuus	355 N/mm2
Murtolujuus	490 N/mm2
Väsymislujuus	265 N/mm2
Venymä murtuessa	22 %

Materiaalin kestävyyttä tässä käyttötarkoituksessa voitiin arvioida alustavasti DIN 2413-3 [9] mukaisella kaavalla. Kaavalla arvioitiin dynaamisessa kuormituksessa olevan teräsputken kestävyyttä maksimissaan 120 ℃ lämpötilassa. [7, s. 7.]

$$P = \frac{20 * K * s * c}{S * (D + s * c)} \tag{5}$$

- P on sallittu työskentelypaine (bar)
- K on väsymislujuus (MPa)
- s on putken seinämävahvuus (mm)
- c on putken seinämävahvuuden kerroin
- S on varmuuskerroin
- D on putken ulkohalkaisija (mm)

Yllä olevalla kaavalla 5 putken sallituksi työpaineeksi saadaan käyttämällä taulukon 1 lukuarvoja ja saatuja putken mittoja käyttäen 460 baaria. Tämä arvo on hieman alle kokeessa suunnitellun 500 baarin.

4.1 Testipenkin valmistaminen

Testipenkki suunniteltiin, valmistettiin ja testattiin Metropolia Ammattikorkeakoulu Oy:n opiskelijoiden toimesta. Pääasiallisesti käytetyt osat olivat osto-osia, mutta joitain erikoisempia hydrauliikan ja tuennan osia jouduttiin valmistamaan

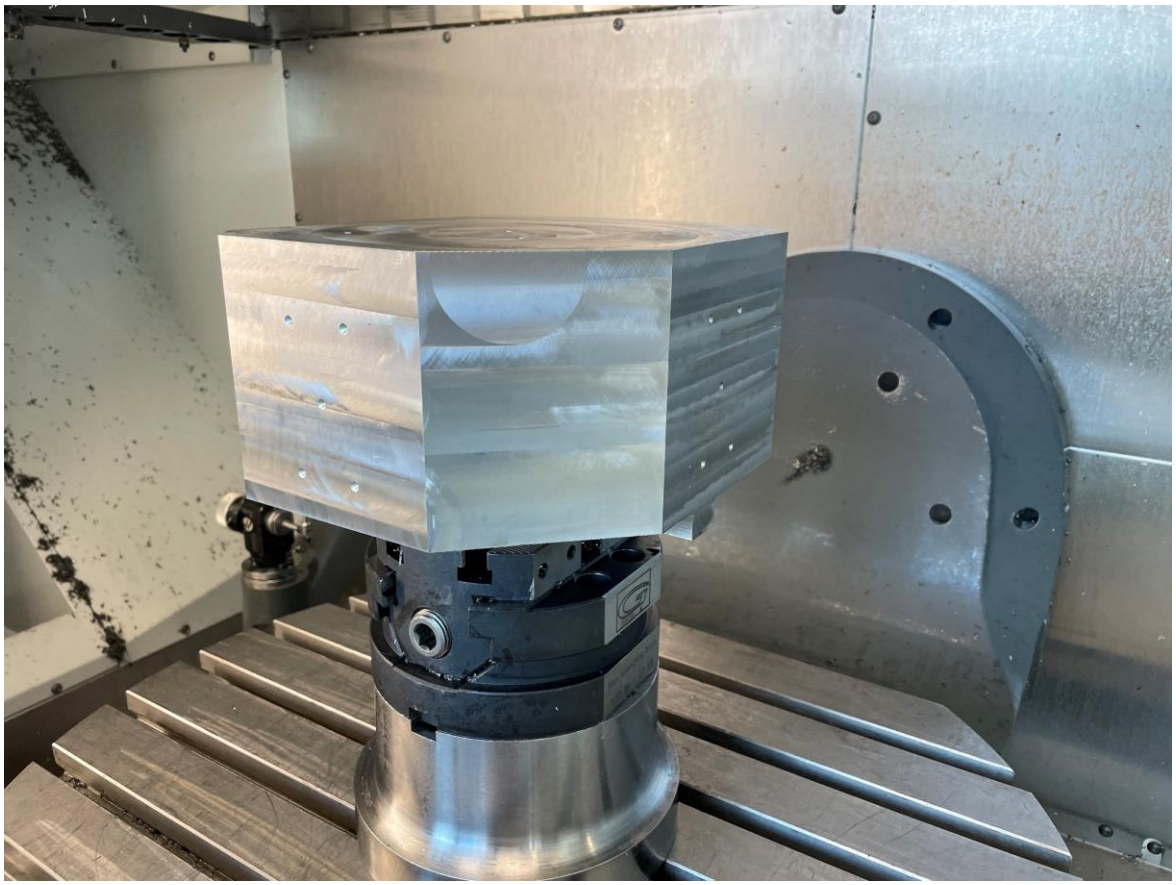
itse. Merkittävimmät itse valmistetut osat olivat hydrauliikan jakotukit sekä akseleiden tukirakenteet. Näiden teettäminen kolmannen osapuolen konepajalla olisi tullut projektille sietämättömän kalliiksi, joten opiskelijoiden omaa osaamista ja koulun konekantaa hyödynnettiin.

Rakenne koottiin 800 mm x 1200 mm EUR-lavalle, jotta koko testipenkki olisi trukilla siirrettävissä. Lavan päälle pohjarakenteeksi asennettiin 8 mm S355-teräslevy, johon leikattiin laserleikkurilla kiinnitysreiät rakenteita varten. Rakenteen letkuja varten teräslevyyn ja kuormalavaan tehtiin kolo, jotta letkut mahtuivat roikkumaan vapaasti. Testipaikalle siirrettäessä lavan alle laitettiin valumaallas, johon pystyi valumaan kaikki testilaitteessa oleva hydraulinestevuodon sattuessa.

Työstöaikaa kahteen jakotukkiin käytettiin arviolta 30 tuntia. Kappaleet olivat kooltaan ja työstettäviltä muodoiltaan kohtuullisen monimutkaisia hallittavia, ja varsinkin pääjakotukki oli suurimpia kappaleita mitä kyseisellä työstökeskuksella on koskaan valmistettu. Alkuperäisellä työstöpäällä ja sen 6 vaihdettavalla yleismallisella kovametallipalalla ei kyetty järkeviin työstöaikoihin. Kovametallipalat eivät kestäneet pitkäaikaista työstämistä palojen maksimiarvoilla.

Työtä varten hankittiin erillinen 63 mm työstöpää, jossa oli 8 vaihdettavaa teräkselle tarkoitettua kovametallipalaa. Näillä voitiin nostaa syöttönopeus 600 mm/min arvoon 2000 mm/min, jolla saatiin merkittävästi lyhennettyä tarvittavaa työstöaikaa.

Jakotukkien materiaaliksi valikoitui S355-teräs. Alumiini olisi ollut työstettävyyden kannalta parempi vaihtoehto. Testilaitteen työpaine aiheutti merkittäviä ongelmia testiputkiston kiinnittämiseen, sillä kiinnikkeiden ruuvien kierteiden kokoon ei voitu vaikuttaa. Voima kierteessä olisi ollut liian suuri, jos jakotukkina olisi käytetty alumiinia.



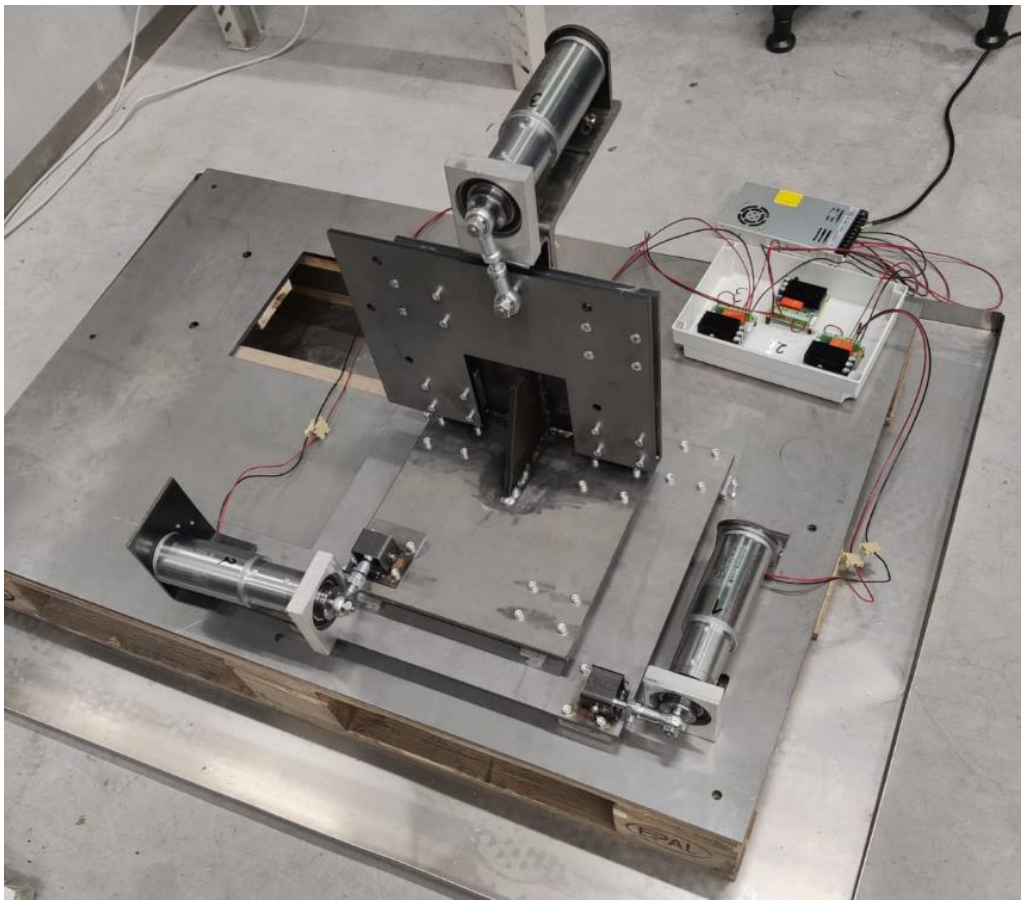
Kuva 7. Pääjakotukki koneistuskeskuksessa.

4.2 Heräte

Kaikkien akseleiden liikematkat oli määritelty asiakkaan toimesta, ja perustui heidän omiin tutkimuksiinsa. Akseleiden tuentarakenteet valmistettiin 8 mm:n S355 rakenneteräksestä. Tukirakenteista haluttiin mahdollisimman jäykät, jotteivat ne vaikuttaisi liikaa mittaustulokseen. Tuentarakenteet pultattiin kiinni kuivavoideltuihin liukulaakereihin, jotka eivät vaatineet käytönaikaista voitelua. Alla olevassa kuvassa 8 nähdään myös testipenkkiä varten suunnitellut ja koneistetut laakerituet, joilla tuettiin moottorin akselipääty.

Akseleihin oli kiinnitetty pienet sähkömoottorit, joilla jokaista akselia kyettiin liikuttamaan itsenäisesti. Moottorit on esitetty alla olevassa kuvassa 8. Jokaisella moottorilla oli akselin päässä kiinni epäkesko, jolla saatiin muutaman millimetrin aikaiseksi. Tällä oli tarkoitus simuloida asetelmaan kohdistuvaa liikehdintää

käyttökohteessaan. Liikeradat olivat kiinteitä, ja jokaisen akselin oli tarkoitus liikkua samassa syklissä. Tämä ei kuitenkaan ollut riittävän helposti toteutettavissa. Pystyakseliin kohdistui merkittävästi enemmän rasitusta kuin muihin suuntiin, ja tämä hidasti hieman akselin liikehdintää. Tätä ei kuitenkaan koettu merkittäväksi ongelmaksi. Koko tuentarakenne oli rakennettu y-akselin päälle, alla olevassa kuvassa 8 alhaalla oikealla oleva moottori. Y-akselin päällä oli x-akseli, joka liikkui alla liikkuvan y-akselin mukana. X-akselin päällä oli viimeisenä z-akseli, joka liikkui x- ja y-akselin mukana.



Kuva 8. Liukulaakerit, tuentarakenteet ja heilutusmoottorit koottu yhteen

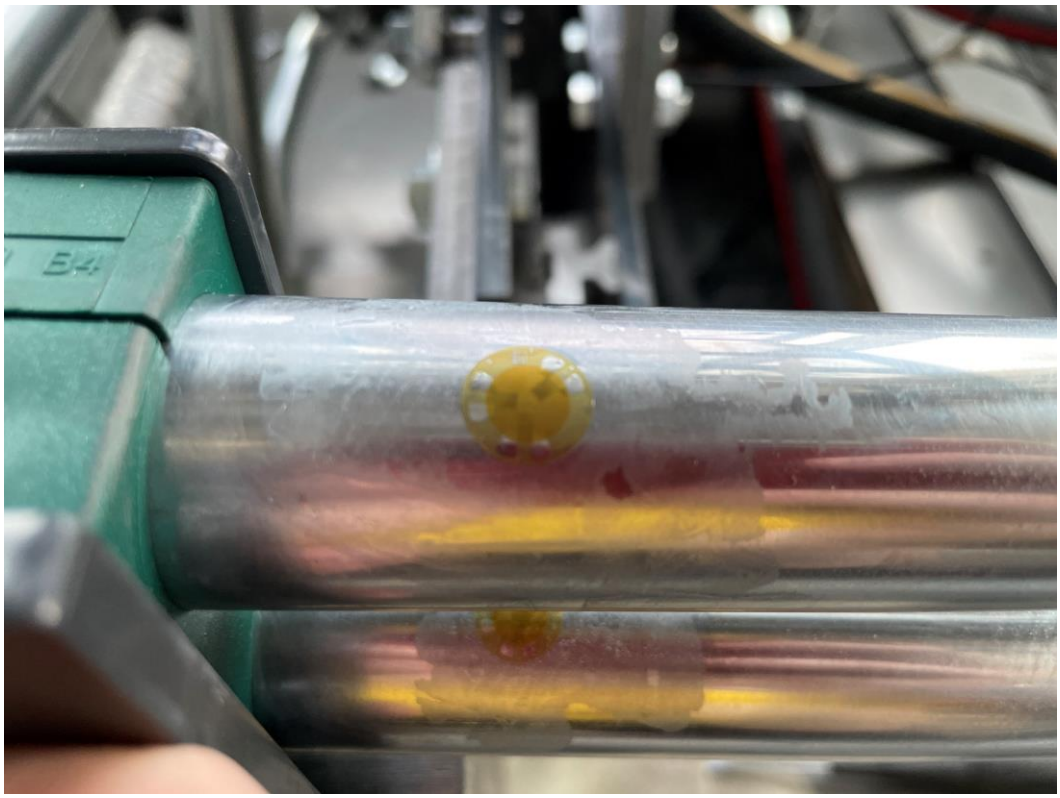
4.3 Mittauskohdan valinta

Mittauskohta määriteltiin asiakkaan toimesta. Venymäliuskat asennettiin putken vapaan päädyn kiinnikkeen viereen, jossa letkut yhdistyvät putkiin. Tässä kohdassa ilmenee asiakkaan suorittamien analyysien perusteella suurimmat jännitysvaihtelut, ja niiden suuruus ja suunta haluttiin selvittää tarkemmin.

4.4 Liuskojen asentaminen

Liuskojen asentamista varten mittauspaikka tuli valmistella huolellisesti. Ensimmäisenä putki hiottiin karkealla hiomapaperilla, jotta pinta saatiin auki. Putkeen ei ollut tarkoitus aiheuttaa itse mittapaikalle merkittäviä eroja pinnanlaatuun, joten pinta hiottiin 1000 karkeuden hiomapaperilla melkein kiiltäväksi pyörivin liikkein. Pinta tuli puhdistaa huolellisesti liuotinpohjaisella aineella, kuten esimerkiksi asetonilla. Pinnasta ei tulisi irrota puhdistuksen jälkeen mitään, jotta liima ja liuska saadaan mahdollisimman hyvään kontaktiin mitattavan pinnan kanssa.

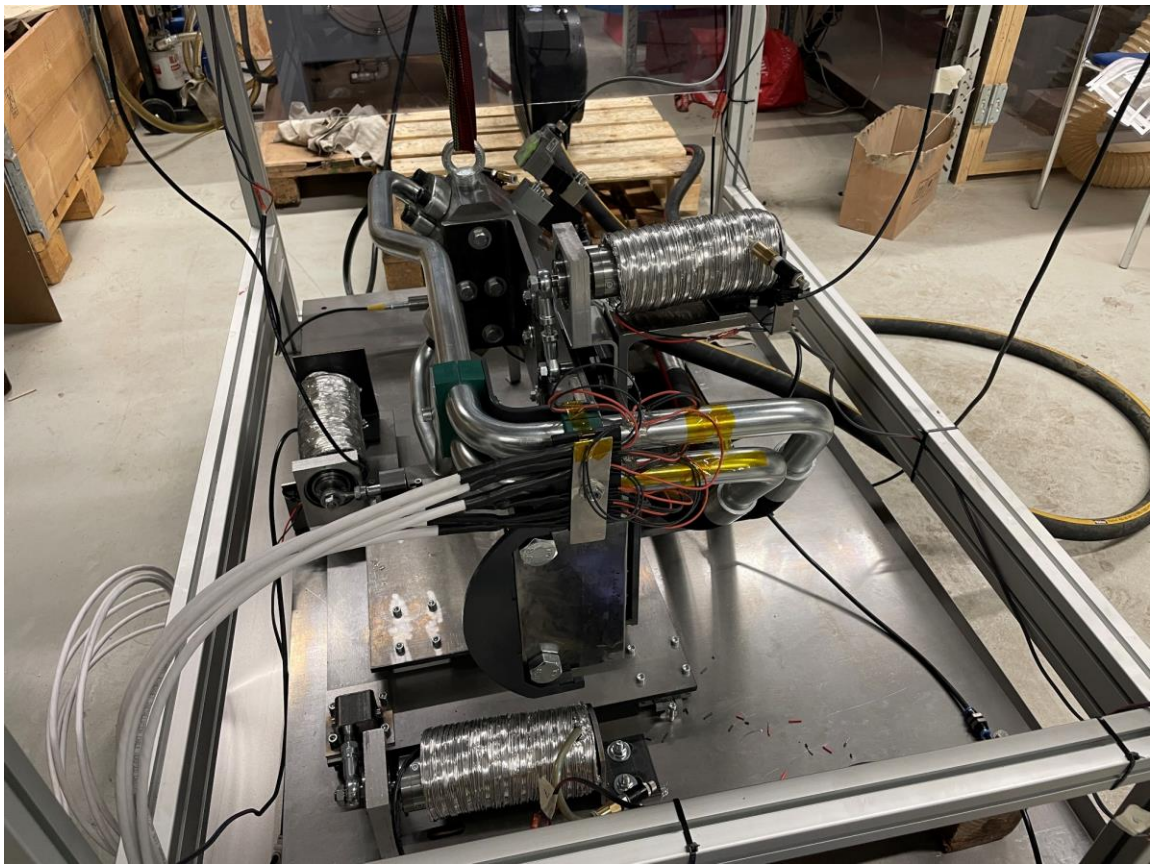
Liimana käytettiin HBM:n Z70-pikaliimaa, jonka käyttölämpötila oli tässä mittaustarkoituksessa 100 ℃, joten liima oli lämpötilakestoltaan täysin riittävä mittausta varten [8, s. 10].



Kuva 9. Venymäliuskat liimattuna testattavaan asetelmaan

Kuten ylemmässä kuvassa 9 näkyy, molemmat venymäliuskat pyrittiin asentamaan samaan kohtaan kumpaankin putkeen. Tällä pyritään vähentämään mittavirhettä, joka aiheutuisi eri pituisesta vipuvarresta suhteessa putkien kiinnikkeeseen.

Johdotus tuli tehdä mahdollisimman vähän ylimääräistä voimaa aiheuttaen. Tämä tarkoitti sitä, ettei itse mittajohto saa painaa tai vetää venymäliuskaa liian paljon. Tällä olisi suora vaikutus mittaustuloksiin. Venymäliuskan ja mittajohdon väliin asennettiin lyhyet, hyvin joustavat silikonikuoriset välijohdot. Tällä saatiin kevennettyä mittajohtojen massaa venymäliuskan päässä. Mittajohdot tuettiin alla olevan kuvan 10 mukaisesti asetelman rakenteeseen, jotta ne liikkuivat asetelman mukana testin aikana.



Kuva 10. Venymäliuskat asennettu ja johdotettu testattavaan asetelmaan

5 Tulokset

Tavoitteena tällä mittauksella oli tukea asiakkaan omia simulaatioita, sekä tarjota merkityksellistä tietoa asetelman väsymisestä, vaikkei testi aiheuttaisi näkyviä vaurioita. Kummastakin putkesta oli tavoitteena saada mittausdataa seuraavasti:

- Asetelma on paikallaan huoneenlämmössä
- Asetelma on käyttölämpötilassa paikallaan
- Asetelma suorittaa työsykliä käyttölämpötilassa

Näistä viimeisin oli asiakkaan mielestä tärkein, sillä tämä työsykli paljastaa, onko putkiasetelma asiakkaan omien vaatimusten mukainen. Saatua jännitysdataa oli tarkoitus vertailla simulaatioista saatuihin arvoihin, ja tällä tukea ja kehittää putkiasetelman simulaatiomallia.

Mittauksista saatiin runsaasti dataa, ja mittasarjojen pituus vaihteli muutamista kymmenistä sekunneista kymmeniin minuutteihin. Riittävän pitkillä mittauksilla varmistettiin, että dataa saatiin sekä suurempipaineisesta työsyklistä, että matalapaineisesta syklistä. Mittauksia tuli jatkaa useamman syklijakson yli, jotta akselit liikkuivat varmasti ainakin kerran samaan aikaan ääriasentoihinsa.

Mittauksista syntyi tuloksina datapisteitä, jotka ilmaistiin venymänä. Mittayksikkönä näissä oli µm/m, eli kuinka monta mikrometriä venymää tapahtui metriä kohden. Rosette-liuskasta näitä saatiin 3 kappaletta 45 asteen välein, jolloin pystyttiin selvittämään päävenymän suunnat ja suuruudet.

Tuloksina mittauksista saatiin pitkiä datapistesarjoja, joista kyettiin selvittämään jännityksien suunnat ja suuruudet. Testipenkillä ajettiin useita erilaisia testisarjoja. Merkittävimmät näistä oli staattinen, putket paineettomana ja liikkumattomana, huoneenlämpöisenä (n. 22 astetta) ajettava kylmä ajo, sekä käyttölämpötilassa ajettava työsykliajo.

Mittauksesta saaduilla venymän arvoilla ei itsessään välttämättä ole suurta käyttöä, ellei ole tarkalleen tiedossa materiaalin sallitut venymät. Venymistä voitiin johtaa kuitenkin jännityksiä, kuten aiemmin mainitut pääjännitykset ja niiden suunnat. Kuitenkin elastisille materiaaleille kuten teräs pääjännitykset eivät ole paras tapa arvioida niiden kestävyyttä. Tähän soveltuu esimerkiksi von Mises-teoria, joka ottaa huomioon kummankin pääjännityksen vaikutukset materiaaliin.

Yksistään von Mises-teorian jännitykset eivät kerro kappaleen kestoikää määrittäessä mitään. Vaikka kappaleeseen ei kohdistu yhdellä kertaa myötölujuuden ylittäviä jännityksiä, kappale voi kuitenkin väsyä. Tätä väsymiskestoa voidaan määrittää joko fyysisesti testaamalla, taikka hyödyntämällä aikaisemmin tehtyjen testien tietoa. Näistä tiedoista voidaan johtaa oletuksia, joilla voidaan arvioida kappaleen kestoikää tietyllä jännityskuormalla.

5.1 Tulosten käsittely

Mittausten jälkeen seuraava vaihe oli saattaa saatu raakadata ymmärrettävään muotoon, tässä tapauksessa jännitykseksi. Datasta tuli ensin erotella tarpeelliset datapisteet jokaisesta mittasarjasta. Tämä suoritettiin taulukkolaskentaohjelmalla etsimällä jokaisesta sarjasta minimi- ja maksimiarvot. Käyttölämpötilassa tapahtuneista työsykliajoista laskettiin myös yhden minuutin mittaiset sarjat asiakkaalle. Seuraavana nämä arvot tuli laskea jännityksiksi ja kulmiksi.

Tämä tapahtui HBM:n muuntokaavoilla, joista päästiin muutaman välivaiheen kautta jännityksiin. Alla on esitetty seuraavilla kaavoilla, kuinka tämä tapahtui. [9, s. 12.]

$$\sigma_{\frac{1}{2}} = \frac{E}{1-\upsilon} * \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{2} \pm \frac{E}{\sqrt{2}(1+\upsilon)} * \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_c - \varepsilon_b)^2} \tag{5}$$

- $\sigma_{1/2}$ ovat pääjännitykset
- E on materiaalin kimmokerroin
- v on materiaalin Poissonin vakio
- $\varepsilon_{a,b,c}$ ovat venymäliuskalla mitattujen venymien a, b ja c suureet

Pääjännityksien kulmat selvitetään seuraavalla kaavalla:

$$\alpha = \frac{1}{2} arctan \left| \frac{2\varepsilon_a - \varepsilon_b - \varepsilon_c}{\varepsilon_a - \varepsilon_c} \right| \tag{6}$$

- α on pääjännityksen σ_1 kulma radiaaneina, pääjännityksen σ_2 kulma on tästä +90°
- $\varepsilon_{a,b,c}$ ovat venymäliuskalla mitattujen venymien a, b ja c suureet

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2} \tag{7}$$

- σ_v on von Misesin vertailujännitys
- $\sigma_{1/2}$ ovat pääjännitykset

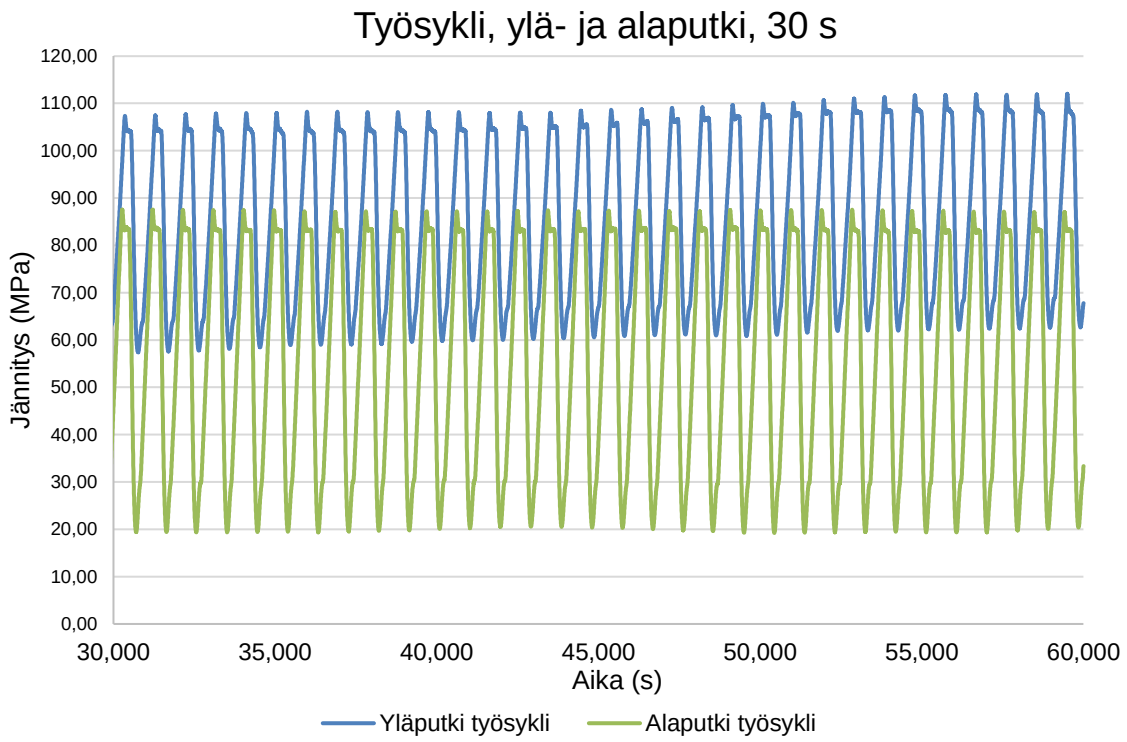
Työssä mitattujen venymien ja sitä kautta jännitysten arvot jäivät merkittävästi materiaalille annetusta myötörajasta. Tässä tapauksessa ei mitoituksessa tarvitse huolehtia liian suurista jännityksistä, ja voidaan olettaa, että materiaali tulee hajoamaan pääasiassa väsymisen vuoksi.

Maksimaalinen työsyklien mittaustuloksista saatu vertailujännitys, jonka testilaite oli teoreettisesti voinut kohdistaa testattavaan putkistoon, oli yläputkessa 124 MPa ja alaputkessa 107 MPa. Erään hydrauliikkakomponenttejavalmistajan mukaan E355-teräksen väsymislujuus on 265 MPa, joten putkeen ei kohdistu merkittävää väsyttävää kuormitusta. [7, s. 6.]

5.2 Työsyklit

Laite suunniteltiin ajamaan simuloituja työsyklejä, joista oli poistettu kaikki muu käyttö paitsi, kun koneella tehtiin työtä, ja kun kone siirtyi haastavassa maastossa. Nämä syklit nopeutettiin kaksinkertaisiksi kokeen lyhentämiseksi. Työpainesyklissä paineen nousun ja laskun taajuus oli 1 hertsi, ja paine nostettiin 500 baariin. Siirtymäsyklissä taajuus oli sama, mutta paine nostettiin 250 baariin.

Kumpaakin sykliä ajettiin vuorotellen, simuloiden koneen työntekoa ja siirtymistä paikasta toiseen. Alla olevassa kuvaajassa esitetään eräs työsykli. Venymän kasvaminen jokaisella syklillä voidaan havaita voimakkaana jännityksen kasvuna. Paineen nousu putkistossa nähdään vielä pienenä piikkinä jokaisessa venymähuipussa. Tällä 30 sekunnin aikajaksolla yläputkessa oli havaittavissa pientä vaihtelua jännityksen huippukohdassa. Tämä johtui akseleiden eriaikaisesta liikkeestä.



Kuva 11: Työsykli, jossa nähtävissä ylä- ja alaputken jännitysero

5.3 Rainflow-menetelmä

Siniaaltomuotoisesta datasta olisi helppo suodattaa rasituksien ääriarvot, mutta harvoin kerätty tieto on tämän muotoista, vaan sisältää satunnaisia vaihteluita ääriarvojen välillä. Tällaista dataa olisi kokonaisuutena vaikea käsitellä, joten yleisin keino tähän on niin kutsuttu Rainflow-metodi, jossa erotellaan rasitussyklit mistä tahansa kuorma-aika-historiasta. Tarkoituksena on erotella kokonaiset kuormasyklit ja puolikkaat kuormasyklit toisistaan. Kokonaisessa kuormasyklissä neljän pisteen metodilla alku- ja loppupiste edustavat paikallisia huippuja, ja väliin jäävät pisteet kuuluvat näiden väliin. Puolikkaassa syklissä alku- tai loppupiste ei ole paikallinen huippu, vaan väliin jäävät pisteet ovat arvoltaan suurempia kuin alku- tai loppupiste. [1, s. 364.]

Metodilla kyetään tarkastelemaan mitä tahansa kuorma-aika-historiaa keskenään. Yleisellä tasolla metodilla vähennetään merkittävästi tietomäärän kokoa

menettämättä syklihistoriaa, ja nopeutetaan väsymisanalyysien suorittamista. Tämä tarkastelu ei ollut osana tätä opinnäytetyötä.

5.4 Tiedon luotettavuus

Tällaisista mittauksista saatava data on vain niin hyvää kuin mittauksen suorittaja. Dataa tuli tarkastella kriittisesti, ja vertailla eri ajojen tuloksia, joiden avulla voitiin päätellä, onko mittaukset toistettavia ja tapahtuuko mittauksissa mitään merkittäviä poikkeamia. Mitattujen venymien vaihteluväli ei muuttunut merkittävästi työsykliajojen välillä eri mittauskerroilla, alle 5 % ero oli havaittavissa. Mittauksen nollapiste kuitenkin siirtyi merkittävästi testin edetessä. Tälle ei löytynyt mitään suoraa, yksittäistä selitystä. Syitä tälle muutokselle saattoi olla asetelman väsyminen, testilaitteiston väsyminen, mittaajan tuomat.

Testilaitteiston elektroniikka tuo myös tasomuutoksia mittauksiin. Jo pelkästään mittalaitteen ikä ja lämpötila vaikuttavat näin pienien resistanssin muutoksien mittauksessa, ja laitetta ei ollut kalibroitu ennen mittausta. Tätä ei nähty tarpeelliseksi, sillä mittaus tehtiin tukemaan simulaatiomallin tuloksia.

5.5 Havainnot

Testipenkin huonoin puoli oli se, että niin sanottuja turhia datapisteitä syntyi paljon. Jokainen liike käy jokaisella liikemoottorin pyöräytyksellä ääriasennossaan, mutta harvoin nämä osuivat kaikki samaan aikaan kohdalleen. Tämän takia syntyi paljon pisteitä, joissa ei esiintynyt maksimijännityksiä. Tämä kuitenkin kuvastaa myös käyttöympäristöä: asetelmaan ei jatkuvasti myöskään käytössä kohdistu maksimijännitykset. Tämän vuoksi testipenkki kuvasti omasta mielestäni hyvin käyttötarkoitustaan.

Näitä maksimijännityksiä sisältäviä pisteitä etsittiin jokaisesta erilaisesta testisyklistä, ja nämä raportoitiin asiakkaalle. Saaduilla pisteillä asiakas tukee omia simulaatioitaan putkien vaurioitumisesta.

Testi päättyi muutamia päiviä etuajassa alemman putkiasetelman kehittäessä pienen, pistemäisen vuodon. Vuotokohta oli putkissa havaituissa taivutuslestin jäljissä, ja mitä ilmeisimmin korotettu työpaine pääsi tekemään putkeen reiän. Vuotokohta muodostui aikaisemmin putkeen, putkenkannakkeen toiselle puolelle mistä mittaus tapahtui.

Kuva 12. Vuotokohta ja taivutuslestin jälki putkessa. Vuotokohta on merkitty sinisellä tussilla.

6 Yhteenveto

Kokonaisuus oli itselle mieleinen, sillä tutkimuskohteena oli konetekniikan suuntaus, jota ei koulussa käsitellä. Työn aikana pääsi myös kehittämään omia osaamisalueitaan, eritoten CNC-koneistamista. Hydrauliikan jakotukit osoittautuivat paljon suunniteltua haastavammiksi koneistaa kuin oli alun perin ajateltu.

Lisämittaukset olisivat todennäköisesti tarpeellisia, jotta putkiasetelmasta voidaan useammasta kohtaa selvittää jännitykset ja niiden suunnat. Tämä yksi mittauskohta kummassakin kohdassa antoi kuitenkin hyvän pohjan asiakkaalle, jonka pohjalta voidaan ryhtyä määrittämään tuotteen suunniteltua elinikää.

Työssä tapahtui taatusti mittavirheitä mittaajan toimesta. Mittaaminen itsessään ei ole vaikeaa, mutta tarkasti ja toistettavasti mittaaminen kerrasta toiseen on vaikeaa. Liuskojen asennus ja niiden juotoskohtiin mittausjohtojen juottaminen vaikuttavat jo mittatulokseen, joten nämä tuli suorittaa mahdollisimman tarkasti ja samalla tavalla, jottei tämä itsessään lisännyt tapahtuvaa mittavirhettä. Jos tekisin työn uudestaan, valitsisin erilaisen mittaliuskan, ja valmiiksi juotetut ja johdotetut venymäliuskat. Tämä poistaisi turhia, itseaiheutettuja virheitä mittauksista.

Suurin haaste itse mittaukselle oli kuitenkin testipenkin liikkeen synkronointi, jota ei kyetty toteuttamaan tämän testipenkin ratkaisuilla. Eri akselit eivät kommunikoineet keskenään ja niistä ei suoraan ollut saatavilla synkronaatiosignaalia, jolla PLC olisi voinut pitää akselit toisiinsa nähden samassa rytmissä. Tällä olisi varmistettu testipenkin aiheuttama maksimaalinen rasitus testattavalle putkistolle. Kuten myös todettiin kappaleessa 6, tämä testi myös tavallaan kuvastaa oikeaa käyttötarkoitusta.

Haluaisin kiittää Otto Kärkeä työnaikaisesta avusta ja testipenkin suunnittelusta.

Lähteet

1 Pennala, Erkki. 1994. Lujuusopin perusteet. ISBN 951-672-297-0. Helsinki: Otatieto.

2 Hoffman, Karl. 1989. An Introduction to Measurements using Strain Gages. Darmstadt: Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH.

3 Kyowa-ei.com. 2019. What's a Strain Gage | KYOWA. Verkkodokumentti. Saatavilla: https://www.kyowa-ei.com/eng/technical/strainbasic_course/index.html. Luettu 27.10.2022.

4 Izantux 2011. Strain Gauge Visualization. Kuva saatavilla: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:StrainGaugeVisualization.svg. Haettu 27.11.2022.

5 Santaoja, Kari. 2011. Rasitusopin käsikirja lujuusopin lukijoille. ISBN 978-952-67189-3-4. Helsinki: Sasata

6 HBM kuvapankki. https://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/images/products/sensors/strain-gauges/ld20_514px.png. Haettu 4.11.2022.

7 Parker Hannifin Corporation. 2018. EO-Tubes for fitting- & flange systems Industrial- and Mobile-Applications Marine- and Offshore-Applications. Verkkodokumentti. Saatavilla https://www.parker.com/content/dam/Parker-com/Literature/HPCE/New/CAT-4041-2-UK.pdf. Luettu 2.12.2022.

8 HBM. Instructions for use Z70. Saatavilla: https://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/A01653.pdf. Luettu 24.9.2021.

9 HBM. Strain gauges, First choice for strain measurements. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH. Saatavilla: https://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/S01265.pdf. Luettu 5.4.2022.

10 DIN 2413:2020–04. Verkkodokumentti. https://www.beuth.de/de/norm/din-2413/314166719. Maksumuurin takana. Luettu 2.12.2022.

DIN 2413-3 mukainen laskentakaava putken työpaineelle

DIN 2413 III, for dynamic load

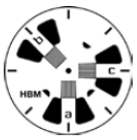
Calculation of working pressure of steel tubes for dynamic stress up to 120°C.
Corrosion - additional allowances are not considered for the calculation of pressures.

$$P = \frac{20 * K * s * c}{S * (D + s * c)}$$

P = permissible working pressure [bar]
K = fatigue strength [N/mm²]
s = tube wall thickness [mm]
c = factor for wall thickness allowance
= 0.8 for Tube-OD 4-5
= 0.85 for Tube-OD 6-8
= 0.9 for Tube-OD 10-80
= 0.9 for all stainless steel tubes
S = safety factor = 1.5
D = tube outside diameter [mm]

HBM:n laskentakaavat

$$\sigma_{1/2} = \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{2} \pm \frac{E}{\sqrt{2}(1+\nu)} \cdot \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_c - \varepsilon_b)^2}$$



0°/45°/90° strain gauge rosette
e.g. RY3x

and for the 0°/60°/120° rosette:

$$\sigma_{1/2} = \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_b + \varepsilon_c}{3} \pm \frac{E}{1+\nu} \cdot \sqrt{\left(\frac{2\varepsilon_a - \varepsilon_b - \varepsilon_c}{3}\right)^2 + \frac{1}{3}(\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2}$$

0°/60°/120° strain gauge rosette
e.g. RY7x

For the 0°/45°/90° rosette using the formula:

$$\tan \psi = \frac{2\varepsilon_b - \varepsilon_a - \varepsilon_c}{\varepsilon_a - \varepsilon_c} \quad \Bigg| \quad \frac{Z}{N}$$

and for the 0°/60°/120° rosette according to the formula:

$$\tan \psi = \frac{\sqrt{3}(\varepsilon_b - \varepsilon_c)}{2\varepsilon_a - \varepsilon_b - \varepsilon_c} \quad \Bigg| \quad \frac{Z}{N}$$