

Ari-Pekka Virsu

**VETOKOESAUVOJEN DIMENSIONIMITTAUSLAITTEEN  
SUUNNITTELU**

# **VETOKOESAUVOJEN DIMENSIOMITTAUSLAITTEEN SUUNNITTELU**

Ari-Pekka Virsu  
Opinnäytetyö  
Syksy 2020  
Konetekniikan tutkinto-ohjelma  
Oulun ammattikorkeakoulu

# TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu  
Konetekniikan tutkinto-ohjelma, koneautomaatio

---

Tekijä: Ari-Pekka Virsu

Opinnäytetyön nimi suomeksi: Vetosauvojen dimensiomittauslaitteen suunnittelu

Opinnäytetyön nimi englanniksi: Designing of Measurement Station for Tensile Test Specimens

Työn ohjaajat: Kai Jokinen ja Jani Alila

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: syksy 2020

Sivumäärä: 36 + 4 liitettä

---

Opinnäytetyö tehtiin SSAB:n Raahen terästehtaan testauslaboratoriolle. Työssä kehitettiin käytössä olevaa vetokoekoesauvojen automaattista dimensiomittauslaitetta. Toimeksiantajan tarpeena oli selvittää, voidaanko koesauvojen mittaaminen suorittaa kosketuksettomilla mittausantureilla. Työn tavoitteena oli tehdä dimensiomittauslaitteesta esisuunnittelu ja tarkastella sillä suoritettavien mittauksien epävarmuutta.

Tehtävän toteuttamiseksi perustettiin kehitysprojekti, jossa hyödynnettiin systemaattisen tuotekehityksen menetelmiä. Esisuunnittelussa kokonaistoiminto jaettiin osatoimintoihin, joita olivat koesauvan kiinnitys, mittaustekniikka ja mittauskohdan siirtäminen. Osatoimintoihin etsittiin eri ratkaisuvaihtoehtoja ja näistä koostettiin kolme toteutusvaihtoehtoa. Vaihtoehtoja vertailtiin muun muassa mitaustarkkuuden ja käyttöympäristöön soveltuvuuden perusteilla ja niistä valittiin kohteeseen käyttökelpoisin. Yksityiskohtaisessa suunnittelussa toteutusvaihtoehdolle valittiin toimilaitteet ja valmistettiin alustava CAD-malli mittauslaitteesta. Suunnittelun aikana tarkasteltiin myös, mitä koneturvallisuudesta pitää huomioida.

Dimensiomittauslaitteen mittaustekniikaksi valittiin koskettavat pituusmitta-anturit. Kosketuksettomien antureiden mittausalueen lineaarisuus ei täyttänyt mittatarkkuusvaatimusta. Kosketuksettomia antureita kannattaisi kuitenkin tarkastella uudestaan tulevaisuudessa, sillä antureissa käytettävä kameratekniikka kehittyy nopeasti.

Työn tuloksena suunniteltu mittauslaite on aikaisempaa pienikokoisempi ja yksinkertaisempi. Mittausmenetelmälle laadittiin epävarmuusbudjetti odottamaan mittauslaitteen käyttöönottoa ja validointia.

---

Asiasanat: suunnittelu, tuotekehitys, vetokokeet, mittausepävarmuus

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
SISÄLLYS	4
1 JOHDANTO	5
2 VETOKOE	7
2.1 Jännitysvenymäkäyrä	7
2.2 Kimmoinen alue	9
2.3 Myötöraja	9
2.4 Plastinen alue	10
3 KOESAUVOJEN MITTAAMINEN	11
4 PROJEKTIN SUUNNITTELU	15
5 ESISUUNNITTELU	16
5.1 Osatoimintojen ratkaisut	16
5.2 Kokonaisratkaisun toteutusvaihtoehdot	18
5.3 Vaihtoehtojen vertailu	20
6 YKSITYISKOHTAINEN SUUNNITTELU	21
6.1 Toiminnan kuvaus	21
6.2 Toimilaitteiden valinta	22
6.3 Koneturvallisuus	24
7 MITTAUSEPÄVARMUUS	27
7.1 Mittausepävarmuuksien luokittelu	28
7.2 Dimensiomittauslaitteen mittausepävarmuus	30
8 YHTEENVETO	33
LÄHTEET	35
LIITTEET	
Liite 1 S420ML-jännitysvenymäkäyrä	
Liite 2 Strenx 1100 -jännitysvenymäkäyrä	
Liite 3 Projektin aikataulu	
Liite 4 Morfologinen kaavio	

# 1 JOHDANTO

SSAB Europe Oy on maailmanlaajuisesti toimiva teräsyhtiö, joka valmistaa ja kehittää erikoislujuja teräksiä. Terästuotteilta vaaditaan nykyään yhä enemmän. Lujemmista teräslaaduista voidaan suunnitella entistä kestävämpiä ja kevyempiä rakenteita ja sillä tavoin säästää kustannuksissa tuotteen koko elinkaaren ajalla. ”SSAB on maailmanmarkkinoiden johtava tuottaja AHSS-teräksissä (*Advanced High-Strength Steels*) ja Q&T-teräksissä (*Quenched & Tempered Steels*), nauha-, levy- ja putkituotteissa sekä rakentamisen ratkaisuissa.” Yhtiön tavoitteena on olla kestävän kehityksen edelläkävijä ja tuoda markkinoille fossiilivapaata terästä vuonna 2026. Tavoitteena on poistaa valmistusprosessin hiilidioksidipäästöt kokonaan vuoteen 2045 mennessä. (SSAB lyhyesti. 2020.)

Teräslevyjen lujuus määritetään yleisimmin vetokoetesteillä. Raahen terästehtaan tuotteiden laadunvalvontaa suoritetaan tuotannon testauslaboratoriossa. Testauslaboratorio on Suomen suurin rikkovan aineenkoetuksen testauslaboratorio, jossa koestetaan noin 75 000 yksittäistä vetokoetta vuodessa. Testaustyötä tehdään ympäri vuorokauden ja vuoden jokaisena päivänä.

Laboratorion lähitulevaisuuden suunnitelmissa on korvata nykyinen vetokokeiden testausosuus uudella automaattisella testausjärjestelmällä. Tällä hetkellä käytössä oleva testausosuus alkaa lähestyä elinkaarensa loppua. Suunnitelmissa oleva testausjärjestelmä liitetään kuljettimilla automaattisiin koneistuskeskuksiin. Siten koesauvojen valmistaminen ja testaaminen tapahtuu alusta loppuun asti automaattisesti.

Ennen vetokoetestiä koesauvasta mitataan paksuus ja leveys. Standardi SFS-EN ISO 6892-1 asettaa vaatimuksia koesauvan vartalon nimellismitoille ja muodolle (SFS-EN ISO 6892-1 2019, 50). Testauslaboratorion käytössä olevassa mittauslaitteessa koesauvat pystytään mittaamaan vartalon keskeltä 50 mm:n välimatkalta. Osa koesauvoista on kuitenkin paljon tätä pidempiä. Mittauslaitteen rajoitteiden takia ei voida varmuudella sanoa, vastaavatko koesauvojen vartalat standardin toleranssivaatimuksia. Testauslaboratoriolla oli siis tarve kehittää mittauslaitetta ja etsiä tietoa markkinoilta löytyvistä uusista mittaustekniikoista.

Tässä opinnäytetyössä selvitetään, pystytäänkö kosketuksettomilla antureilla mittaamaan vetokoesauvojen vartalon dimensiot vaaditulla tarkkuudella. Opinnäytetyön tavoitteena on tehdä esisuunnittelu ja luonnostelu koesauvojen dimensiomittauslaitteesta. Mittauslaitteen automaatio- ja ohjausjärjestelmän suunnittelu rajataan opinnäytetyön ulkopuolelle. Myöskään mittauslaitteen valmistamiseen ei vielä tässä vaiheessa ollut rahoitusta.

## 2 VETOKOE

Terästä käytetään usein kantavissa rakenteissa, ja silloin on useimmissa tapauksissa oleellista tietää, kuinka se käyttäytyy jännityksen alaisena. Teräksen ominaisuuksiin vaikuttavat eniten valmistustapa ja seosaineet, joilla voidaan vaikuttaa teräksen sisäiseen rakenteeseen. Käyttäytymiseen vaikuttaa myös lämpötila, jossa jännitys teräkseen kohdistuu, sekä jännityksen luonne ja vaikutustapa. Korkeissa lämpötiloissa teräkseen voi syntyä hidasta plastista muodonmuutosta jopa sellaisilla alhaisilla jännityksillä, joilla teräs käyttäytyy huoneenlämpötilassa kimmoisesti. Alhaisessa lämpötilassa teräs voi murtua hauraasti ilman olennaista plastista muodonmuutosta, vaikka se huoneenlämpötilassa on täysin sitkeää. Jatkuvasti vaihtuva jännitys voi synnyttää teräkseen väsymismurtuman, vaikka teräs hyvin kestää vastaavan staattisen kuormituksen. (Lindroos – Sulonen – Veistinen – Miekko-oja 1986, 691.)

Suunnittelijan on siten huomioitava varsin monenlaiset tekijät materiaalin valinnassa. Erilaisilla aineenkoetuskokeilla pyritään jäljittämään teräksen käyttökohdeissa vallitsevia olosuhteita. Aineenkoetuskokeista ehkä tärkein ja yleisin on vetokoe. Vetokokeen tapahtumat ja sen aikana mitattavat materiaaliominaisuudet selviävät havainnollisesti jännitysvenymäkäyrästä. (Lindroos ym. 1986, 692.)

### 2.1 Jännitysvenymäkäyrä

Tasapaksuksi koneistettu koesauva asetetaan vetokoneen kiinnittimiin. Koesauvaa kuormitetaan vähitellen kasvavalla voimalla pituusakselinsa suuntaisesti, kunnes se katkeaa. Vetokone mittaa kuormituksen aikana voiman ja mittapituu- den muutoksen. (Laitinen – Laitinen – Niinimäki – Tiainen – Tiilikka – Tuomikoski – Koivisto 2008, 17). Nimellisjännitys on voiman suhde alkuperäiseen pinta-alaan ja se voidaan laskea kaavalla 1 (SFS-EN ISO 6892-1 2019, 10).

$$R = \frac{F}{S_0}$$

KAAVA 1

$R$  = nimellisjännitys (N/mm<sup>2</sup>)

$F$  = voima (N)

$S_0$  = sauvan alkuperäinen pinta-ala (mm<sup>2</sup>)

Suhteellinen venymä, jota kutsutaan yleensä nimellisvenymäksi, on mittapituu-  
den muutoksen suhde alkuperäiseen mittapituuteen, ja se voidaan laskea kaa-  
valla 2 (SFS-EN ISO 6892-1 2019, 8).

$$e = \frac{\Delta l}{L_0} \times 100\%$$

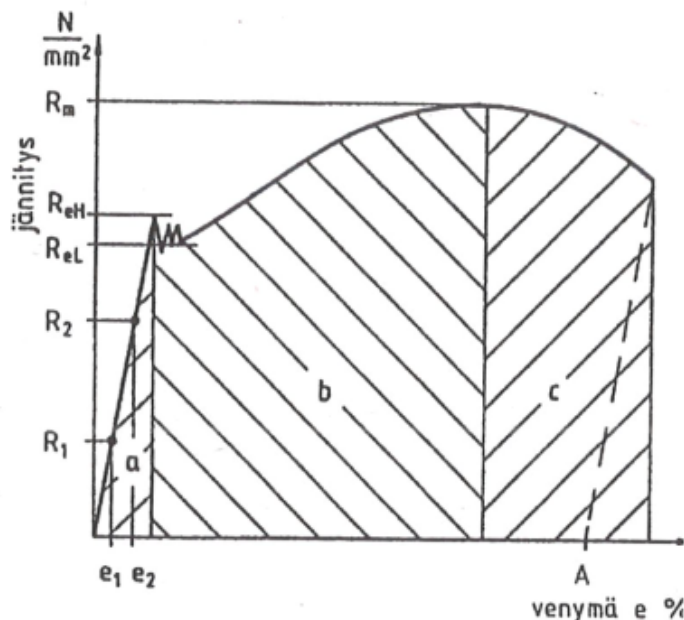
KAAVA 2

$e$  = nimellisvenymä (%)

$\Delta l$  = venymän muutos (mm)

$L_0$  = alkumittapituus (mm)

Mittaustulokset voidaan siten muuttaa kuvassa 1 näkyväksi jännitysvenymäpiir-  
rokseksi. Jännitysvenymäpiirros kuvaa materiaaliominaisuuksia selkeämmin,  
koska se on sauvan koosta riippumatta aina samanlainen. Piirrokselta voidaan  
erottaa kolme eri aluetta, jotka on merkitty kuvaan 1 kirjaimilla. Kimmoinen veny-  
mäalue on merkitty a-kirjaimella, plastinen venymäalue on merkitty b-kirjaimella  
ja kurouma-alue on merkitty c-kirjaimella. Kuroutumisessa venymä kohdistuu  
koesauvaan paikallisesti siten, että koesauvan poikkileikkaus ensin ohenee ja lo-  
pulta murtuu. (Laitinen – Niinimäki – Tiainen – Tiilikka – Tuomikoski – Koivisto  
2008, 17.)



KUVA 1. Jännitysvenymäpiirros (Laitinen ym. 2008, 17)



## 2.2 Kimmoinen alue

Kun koesauvan jännitys on kimmorajaa alhaisempi, käyttäytyy koesauvan venymä kimmoisesti. Koesauva palautuu alkuperäiseen mittaansa, kun jännitys poistetaan. Kimmoisella alueella on voimassa Hooken laki, jonka mukaan jännitys on suoraan verrannollinen suhteellisen venymän kanssa. Jännitysvenymäkäyrän kimmoisan alueen suoralta voidaan määrittää kimmokerroin eli Youngin moduuli, joka kuvaa aineen jäykkyyttä. (Lindroos ym. 1986, 692–693.)

Kimmokerroin on materiaaliominaisuus ja keskeinen parametri suunnittelijan lujuuslaskelmissa. Kirjallisuudessa ja taulukkokirjoissa teräksen kimmokertoimen arvoksi ilmoitetaan 210 GPa. Vetokokeen mittaustuloksista määritetyt kimmokertoimen arvot kuitenkin vaihtelevat jonkin verran. Kylmämuokatuissa teräksissä kimmokertoimen arvo myös laskee voimakkaasti. Tutkimuksissa kimmokertoimen on havaittu laskevan noin 20 %, kun muokkausasete on ollut 12 %. (Mendiguren – Cortés – Galdos – Berveiller 2013, 437.) Standardissa SFS-EN ISO 6892-1 todetaan myös, että vetokokeessa vaadittava luokan 1 venymämittari ei ole yleensä riittävän tarkka kimmoisan alueen hyvin pienien venymien luotettavaan mittaamiseen (SFS-EN ISO 6892-1 2019, 55).

## 2.3 Myötöraja

Suunnittelijan lujuuslaskelmissa lähtökohtana on yleensä materiaalin myötöraja. Liite 1 esittää S420-rakenneteräksen jännitysvenymäkäyriä, josta voidaan erottaa selvästi kohta niin sanottu ylempi myötöraja  $R_{eH}$ , missä kimmainen alue päättyy. Tämän jälkeen koesauva alkaa myötämään. Silloin koesauvaan syntyy venymää ilman, että siihen vaaditaan jännityksen kasvua. Myötäminen saattaa jatkua usein ylempää myötörajaa pienemmällä jännityksellä, jonka arvoa kutsutaan alemmaksi myötöräjäksi  $R_{eL}$ . Korostunut myötöraja esiintyy kuumamuokatuissa, normalisoiduissa ja pehmeäksi hehkutetuissa teräksissä, jotka ovat jäähtyneet hitaasti ilmassa. (Lindroos ym. 1986, 697.)

Erikoislujissa ja kylmämuokatuissa teräksissä selkeätä myötörajaa ei esiinny (Lindroos ym. 1986, 698). Myötölujuuden rajana käytetään silloin tavallisesti niin sanottua 0,2-venymisrajaa  $R_{p0,2}$ . Sillä ilmaistaan sellaisen jännityksen arvo, jolla

saavutetaan koessaiuuan 0,2 % plastinen uenymä. (SFS-EN ISO 6892-1 2019, 10.) Liite 2 esittää ultralujan Strenx 1100 -rakenneteräksen jännitysuenymäkäyrää, josta on vaikea erottaa sellaista kohtaa, jossa kimmainen alue päättyy.

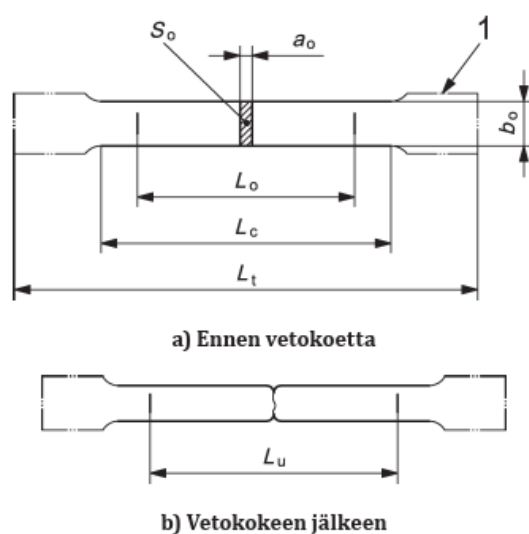
## 2.4 Plastinen alue

Plastisella alueella koessaiuua uenyy pysyvästi. Teräksen kiderakenteen virheitä kutsutaan dislokaatioiksi, ja ne vaikeuttavat teräksen muokkautumista. Plastisessa uenymässä dislokaatioita syntyy lisää ja ne kerääntyvät jonoiksi. Sen takia niiden siirtämiseen tarvitaan suurempi uoima ja teräs muokkauslujittuu. (Krauss 2015, 198.) Koessaiuuan uenyminen edellyttää jännityksen jatkuaa kasuamista, kunnes muokkauslujittuminen ei enää kykene kompensoimaan koessaiuuan uenymistä. Siinä kohdassa alkaa koessaiuuan kuroutuminen. Jännitysuenymäkäyrässä pistettä vastaa käyrän korkein kohta ja pisteestä määriteltyä jännityksen arua kutsutaan murtolujuudeksi  $R_m$ . (Lindroos ym. 1986, 694.)

### 3 KOESAUVOJEN MITTAAMINEN

Ennen vetokokeen suorittamista koesauvan (kuva 2) poikkipinta-ala määritetään. Standardi SFS-EN ISO 6892-1 suosittelee, että koesauvan suora osa mitataan sauvan keskeltä vähintään kolmesta kohdasta. Mittauslaitteiden on oltava kalibroituja ja jäljitettävissä kansalliseen mittausjärjestelmään. (SFS-EN ISO 6892-1 2019, 15.)

☺



#### Selite

$a_0$  Lattakoesauvan suoran osan paksuus tai putken seinämänpaksuus ennen koetta

$b_0$  Lattakoesauvan suoran osan leveys ennen koetta

$L_c$  Koepituus

$L_0$  Alkumittapituus

$L_t$  Koesauvan kokonaispituus

$L_u$  Loppumittapituus

$S_0$  Koesauvan suoran osan poikkipinta-ala ennen koetta

1 Kiinnityspäät

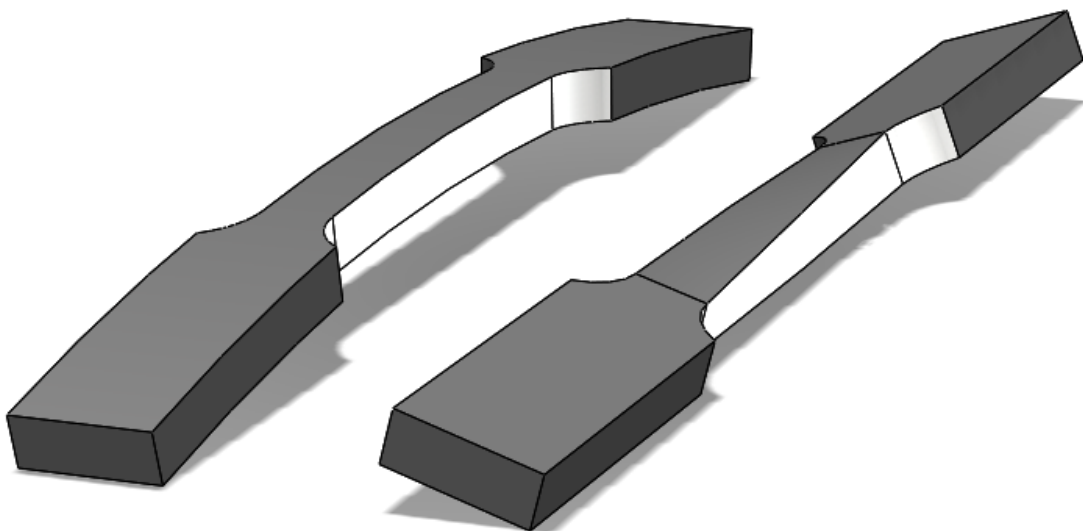
KUVA 2. Vetokoesauva (SFS-EN ISO 6892-1 2019, 38)

Standardin SFS-EN ISO 6892-1 taulukossa D.3 esitetään työstettyjen suorakaitteen muotoisten koesauvojen suurin sallittu poikittaismittojen vaihteluväli, joka on sauvan leveyden mukaan 0,06–0,15 mm (SFS-EN ISO 6892-1 2019, 50). Testauslaboratoriossa nyt käytössä olevan mittauslaitteen antureita voidaan liikuttaa koesauvan pituusakselin suuntaisesti 50 mm. Siirtoliikkeessä on kolme asentoa, eikä liikkeen pituutta voida säätää. Siitä syystä koesauvan vartalon suoran osan mittaukset ovat aina samoista kohdista. Koesauvojen suoran osan pituus on riippuvainen levyn paksuudesta ja koesauvatyypistä, suurimmissa koesauvoissa

suoran osan pituus on jopa 220 mm. Mittaustuloksista ei siis täysin varmasti voida päätellä, täyttävätkö koesauvat muototoleranssivaatimukset. Käytössä olevalla ohjelmistolla ei myöskään pystytä mittaamaan koesauvan vartalon suoruutta.

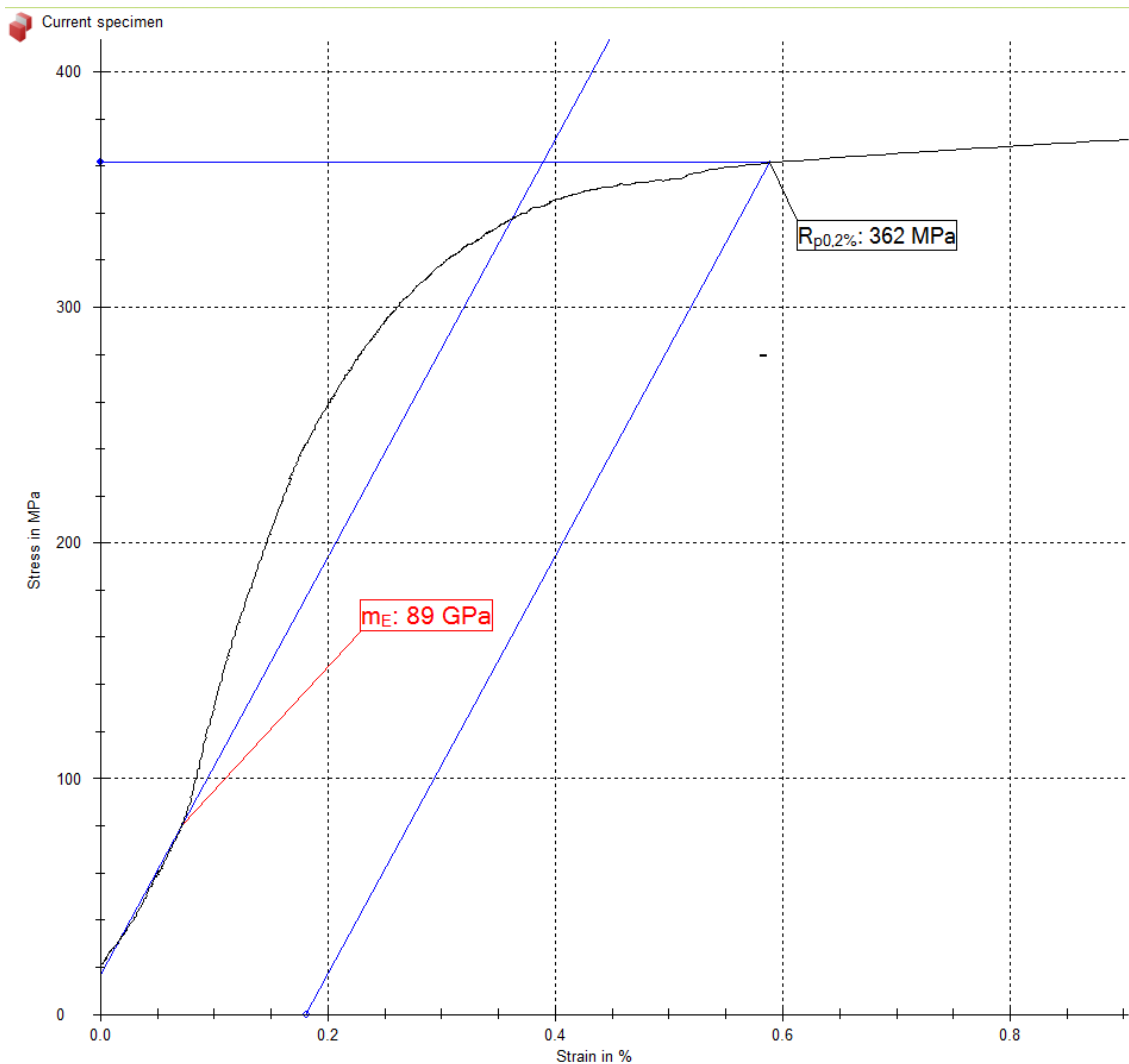
Koesauvojen mittauksessa mittauslaitteelta vaaditaan hyvää erottelukykä ja tarkkuutta, yksittäisen mittauksen virhe saa olla korkeintaan  $\pm 0,5\%$  (SFS-EN ISO 6892-1 2019, 50). Esimerkiksi mitattaessa 5 mm paksua koesauvaa mittausvirhe ei saa olla suurempi kuin 0,05 mm. Tarkkuusvaatimuksesta saadaan hyvä käsitys, jos sitä verrataan vaikkapa ihmisen hiukseen, joka on suurin piirtein yhtä paksu.

Koesauvan muotoon voi vaikuttaa myös se, mistä kohdasta ja millä menetelmällä näytelevy leikataan irti teräslevystä. Mikäli näytelevy joudutaan irrottamaan teräsnauhakelasta, valmiista koesauvasta tulee väkisin hieman kaareva. Mekaaniset leikkurit voivat vääntää näytelevyä ja silloin irrotetut koesauvat saattavat jäädä kiertyneiksi. Kuvassa 3 on havainnollistettu näytteenotosta koesauvoihin aiheutuvia muotovirheitä. Vaikka koesauvat koneistuksen aikana puristetaan vastinlevyä vasten suoraksi, teräksen kimmoisuus aiheuttaa sen, etteivät koesauvat täysin oikene pysyvästi.



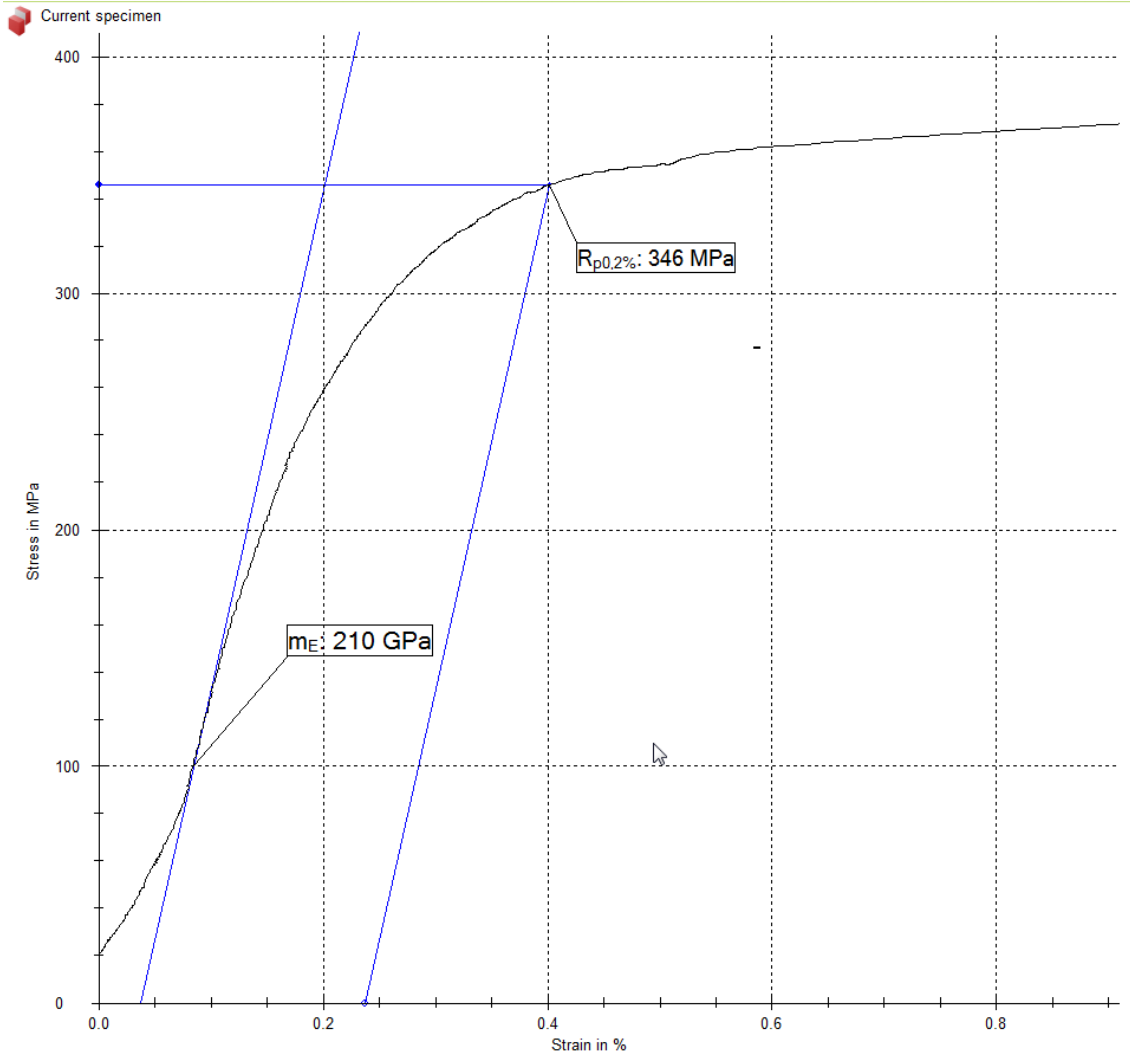
*KUVA 3. Muokkautuneet koesauvat*

Kaarevien ja vääntyneiden koesauvojen pinta-alan mittaaminen voi olla haastavaa. Vaikka koesauvojen muotovirheet eivät aiheuttaisikaan ongelmia mittaamisen aikana, käyttäjä voi joutua tekemään korjauksia vetokokeen jälkeen. Vetokokeen alussa taipuneet koesauvat oikenevat ja antavat siksi liian suuren venymäarvon. Kuvasta 4 nähdään kaarevan koesauvan jännitysvenymäkäyrä, jossa kimmokertoimen määrittäminen on epäonnistunut ja kimmokertoimen arvo on siitä syystä alhainen.



**KUVA 4. Virheellisesti määritetty kimmokerroin**

Kuvassa 5 kimmokertoimen määrittämiseen on tehty korjaus. Kuvia vertailemalla huomataan, kuinka suuri vaikutus kimmokertoimen määrittämisellä on myötölujuuteen.



*KUVA 5. Korjattu kimmokerroin*

Mikäli koesauva olisi ollut esimerkiksi S355-luokan terästä, virheellisesti määritetty kimmokerroin antaisi hyväksyttävän testaustuloksen, joka saattaisi pahimmassa tapauksessa johtaa tuotereklamaatioon. Tämän takia taipuneet koesauvat tulisi tunnistaa mittauslaitteessa ja siirtää syrjään odottamaan manuaalista testausta.

## 4 PROJEKTIN SUUNNITTELU

Opinnäytetyön suunnittelukohde ei varsinaisesti ole markkinoille tähtäävä uusi tuote. Kehitettävä mittauslaite suunniteltiin palvelemaan yksinomaan suunnitteilla olevan testausjärjestelmän vaatimukset huomioiden. Kehitystehtävää alettiin toteuttaa perustamalla kehitysprojekti. Projektissa päästiin hyödyntämään Tuotekehitystoiminta-opintojaksolla opittuja menetelmiä käytännössä.

Projekti jaettiin neljään vaiheeseen, jotka olivat

- projektin suunnittelu
- esisuunnittelu
- yksityiskohtainen suunnittelu
- projektin päättäminen.

Projektille laadittiin vaiheiden perusteella liitteen 3 aikataulu. Jokaisen vaiheen jälkeen pidettiin katselmointi, jossa päätettiin seuraavaan vaiheeseen siirtymisestä. Katselmoineista laadittiin esityslistat ja muistiot myöhempää käyttöä varten.

### **Vaatimusmäärittely**

Vaatimusmäärittely tehtiin yhdessä toimeksiantajan kanssa ja sen pohjalta laadittiin vaatimuslista. Listatut vaatimukset jaettiin kiinteisiin ja vähimmäisvaatimuksiin sekä toivomuksiin. Tuotteelta vaaditut kiinteät vaatimukset eivät muutu. Tuote voi olla parempi kuin vaaditaan, mutta täyttää vähimmäisvaatimukset. Toivomukset ovat ominaisuuksia, jotka eivät välttämättä toteudu.

### **Tekninen spesifikaatio**

Tekniseen spesifikaatioon lueteltiin tuotteen tekniset vaatimukset lukuarvoina. Spesifikaatiosta saadaan lisäinformaatiota tuotteen ominaisuuksista sekä laatu- ja tarkkuusvaatimuksista.

## 5 ESISUUNNITTELU

Olemassa olevan tuotteen kehitystehtävässä tulisi pyrkiä välttämään ennakkokäsityksiä ja pitämään mieli avoimena uusille osatoimintojen ratkaisuperiaatteille. Suunnittelijan tehtävänä on vaatimuslistan avulla pohtia, millaiset ominaisuudet ratkaisulla tulee olla, ja toisaalta millaisia ominaisuuksia on vältettävä. (Björk – Hautala – Huhtala – Kivioja – Kleimola – Lavi – Martikka – Miettinen – Ranta – Rinkinen – Salonen 2014, 13–14.) Osatoimintojen ratkaisusta voidaan koostaa morfologinen kaavio, jonka tavoitteena on helpottaa ratkaisuiden yhteensopivuuden arviointia (Pahl – Beitz 1992, 129–131).

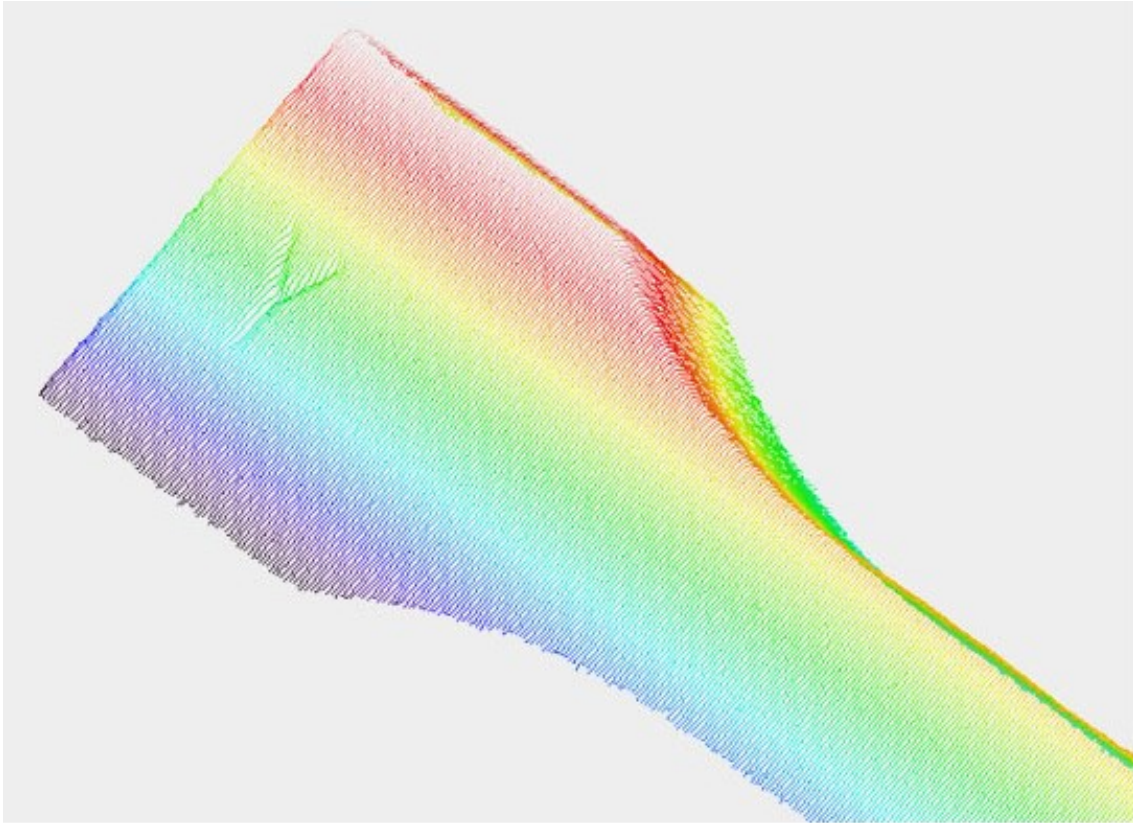
Mittauslaitteen kokonaistoiminto on vetokoesauvan vartalon suoran osan pakisuuden ja leveyden mittaaminen automaattisesti. Kokonaistoiminto jaettiin osatoimintoihin, joihin etsittiin erilaisia ratkaisuvaihtoehtoja.

### 5.1 Osatoimintojen ratkaisut

Osatoiminnoista keskeisimmässä roolissa oli mittaustekniikka, joka myös vaikutti paljon muidenkin osatoimintojen ratkaisuihin. Koskettavia pituusmitta-antureita on jo pitkään käytetty konepajamittauksissa ja ne on suunniteltu teollisuusympäristöihin. Mitta-anturit tarjoavat korkean tarkkuuden ja toistettavuuden koko mitta-alueella. (Mitta-anturit. 2020).

Kolmiomittaukseen perusuvassa laseranturissa on valonlähde ja digitaalikamera, joiden välinen etäisyys tunnetaan. Valonlähde heijastaa mitattavan kappaleen pintaan valopisteen. Kamera havaitsee kappaleesta heijastuvan valon ja mittaa sen tulokulman. Valonlähteen ja kameran välisestä etäisyydestä sekä heijastuvan valon tulokulmasta voidaan laskea kappaleen etäisyys anturista. Laserskannerissa laserpisteen sijasta kappaleen pintaan heijastetaan ohut valoraita, josta voidaan mitata useampi kohta samanaikaisti. (Tabia – Laga – Guo – Fisher – Bennamoun 2019, 46–47.) Kuvassa 6 on esimerkki laserskannerin avulla luodusta 3D-mallista.





*KUVA 6. 3D-malli (Applications for 2D/3D laser scanners)*

3D-konenäköjärjestelmässä kuvaustekniikka ja mittaustarkkuus ovat lähes samat kuin edellä mainitussa laseranturissa. Konenäköjärjestelmässä kamera ja valonlähde ovat erillisiä ja siten vapaammin säädettävissä kuin mitä ne ovat laseranturissa. (Nousiainen 2020.) Konenäköratkaisusta päätettiin kuitenkin luopua, sillä säädeltävyyden tuoma hyöty oli tässä suunnittelukohteessa varsin pieni. Lasermikrometrin ongelmaksi koitui se, että neliönmuotoisen koesauvan onnistunut mittaaminen vaatisi koesauvan ja anturin täydellisen kohtisuoruuden, joka oli käytännössä hyvin vaikea toteuttaa.

Mittauksen ajaksi koesauva voidaan asettaa telineeseen tai siitä voidaan pitää kiinni tarttujalla. Koesauvat eivät ole niin painavia, että kiinnitykseen tarvitaan hydraulisilla puristimilla saavutettavia suuria voimia. Koesauvan kannattelemiseen riittää ihan hyvin joko pneumaattinen tai sähköinen tarttuja.

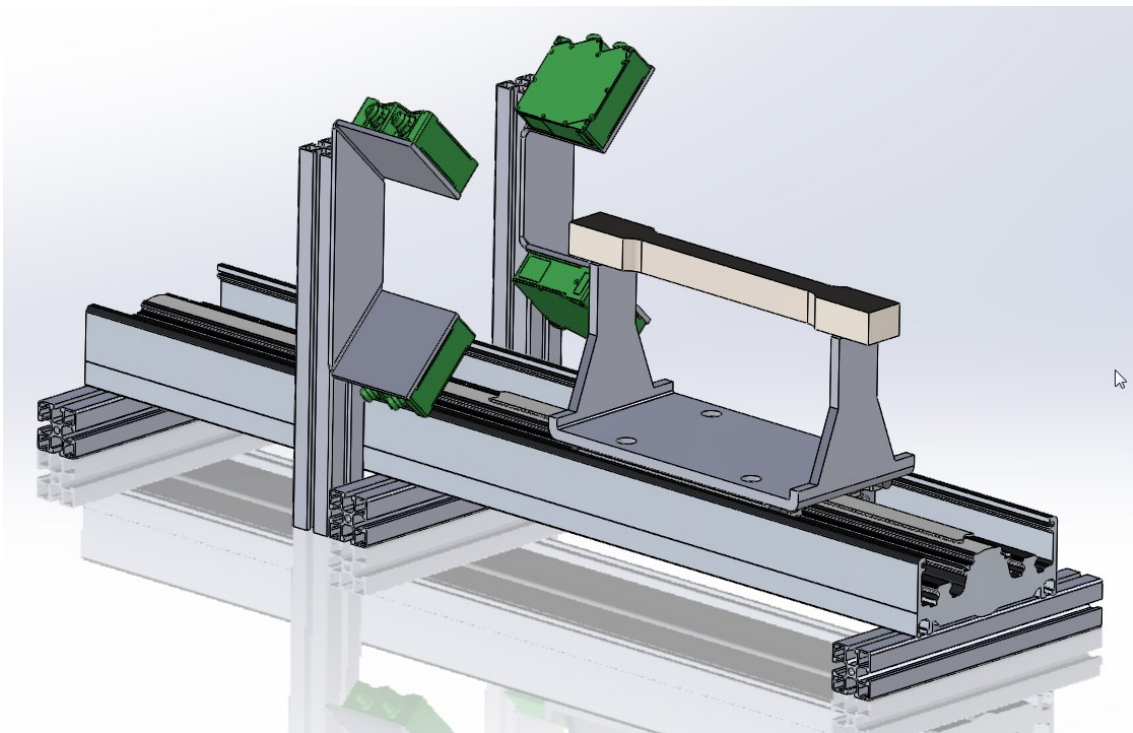
Mittauspistettä voidaan vaihtaa siirtämällä koesauvaa testausjärjestelmän robotilla tai liikuttamalla tarttujaa lineaarijohdetta pitkin. Tällä hetkellä käytössä olevassa mittauslaitteessa siirtämiseen käytetään pneumaattista sylinteriä, mutta sylinterien liikepituus ei ole samalla tavoin säädeltävissä.

## 5.2 Kokonaisratkaisun toteutusvaihtoehdot

Osatoimintojen ratkaisuista koostettiin morfologisen kaavion (liite 4) avulla kolme erilaista toteutusvaihtoehtoa. Esivalinnassa robotin avulla toteutettava vaihtoehto karsittiin jatkosta ulkopuolisten ympäristötekijöiden perusteella. Sijoituspaikan läheisyydessä liikkuu raskaita teräslevyjä rullaradalla. Niiden aiheuttamat värähtelyt saattavat siirtyä robotin runkoa pitkin mitattavaan kappaleeseen ja heikentää mittauksen tarkkuutta.

### Vaihtoehto 1

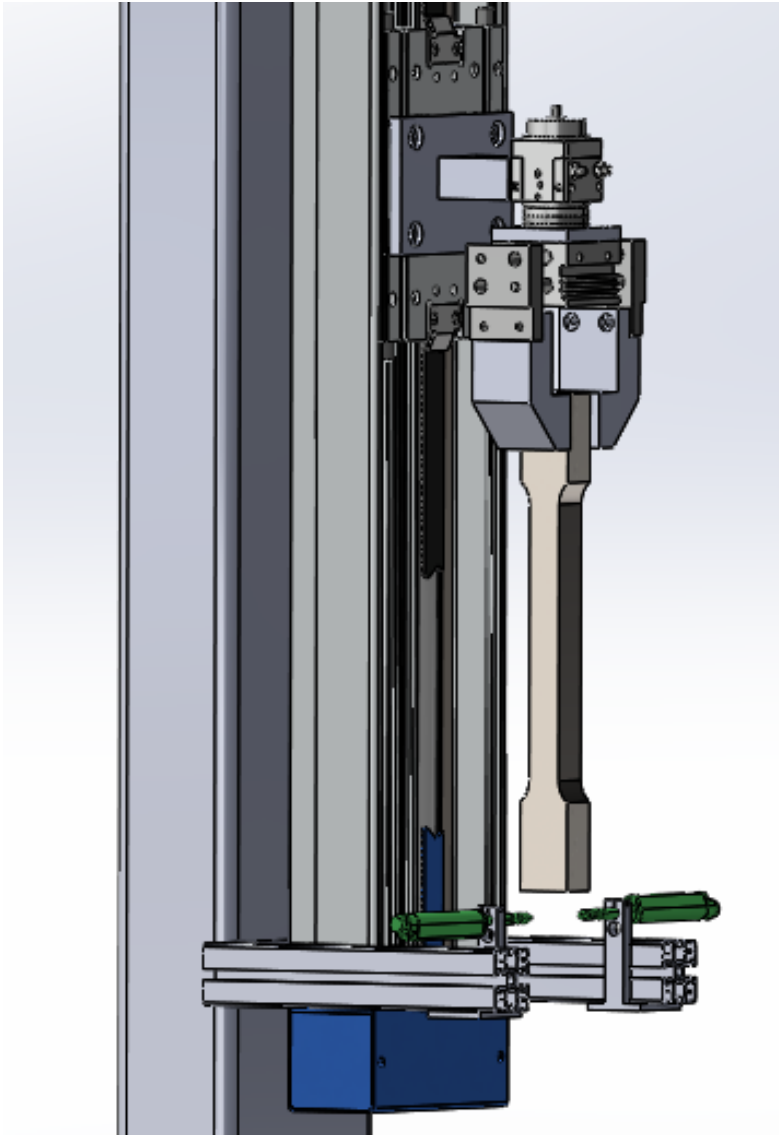
Vaihtoehdossa 1 (KUVA 7) koesauva asetetaan telineeseen, joka siirtyy lineaarijohdetta pitkin mittausantureille. Neljä laserskanneria on sijoitettu siten, että koko kappale voidaan mitata kerralla.



KUVA 7. Vaihtoehto 1

## Vaihtoehto 2

Vaihtoehdossa 2 (KUVA 8) lineaarijohde on käännetty pystyasentoon. Koesauvasta pidetään kiinni pneumaattisella tarttujalla ja sen kääntämistä varten tarttuja on kiinnitetty kääntösylinteriin. Mittaaminen suoritetaan kahdella vastakkain asetuilla pituusmitta-anturilla.



KUVA 8. Vaihtoehto 2

### 5.3 Vaihtoehtojen vertailu

Vaihtoehdon 1 etuna on, että laserskannerilla voidaan mitata helposti myös koesauvan muoto. Käytettävyyttä rajoitti kuitenkin se, että laserskannerin mittausalueen lineaarisuus ei täyttänyt vaatimuslistan tarkkuusvaatimusta. Lineaarisuusvirheen korjaamiseksi täytyisi mitata useita eripaksuisia vertailusauvoja ja laatia mittausohjelmaan korjausasteikko. Laserskannerilla mittaaminen tarvitsee myös tasaiset ympäristöolosuhteet. Lämpötilavaihtelut, ilmassa leijuva pöly ja rakenteiden värähtelyt kasvattavat mittaustuloksien hajontaa.

Vaihtoehdossa 2 mittaaminen suoritetaan koskettavilla pituusmitta-antureilla. Pituusmitta-anturit eivät ole yhtä herkkiä ympäristötekijöille ja tärinälle. Koesauvan muodon mittaaminen vaatii kuitenkin useita toistoja ja vie silloin myös enemmän aikaa. Mittaaminen olisi nopeampaa siten, että mittauskärkenä on pieni rullalaskeri ja silloin mittauksia voidaan tehdä koskettamalla ja siirtämällä koesauvaa samanaikaisesti. Pystyyn asetettuna lineaarijohde vie vähemmän tilaa ja pysyy helpommin puhtaana.

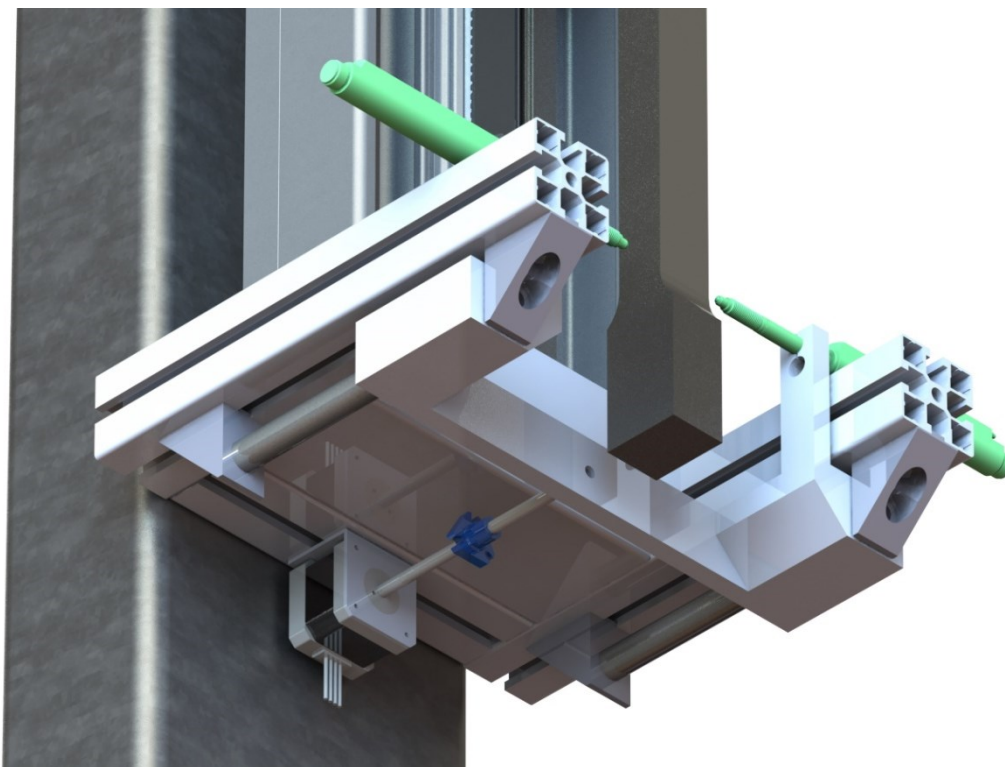
Tilaajan kanssa käydyissä keskusteluissa vertailtiin vaihtoehtojen hyviä ja huonoja puolia ja vaihtoehto 2 katsottiin paremmaksi kokonaistoiminnon ratkaisuksi. Keskusteluissa nousi myös esille, että koesauvat olisi mahdollista mitata yhdistämällä eri mittaustekniikoita, mikäli se on tarpeellista. Mittauslaitteeseen voidaan lisätä muodon mittauksia varten laserskanneri tai konenäkökamera ja pinta-alan määrittämisessä käytetään koskettavia pituusmitta-antureita.

## 6 YKSITYISKOHTAINEN SUUNNITTELU

Tuotteen rakenne suunnitellaan esisuunnitteluvaiheen parhaaksi valitun ratkaisuvaihtoehdon pohjalta. Yksityiskohtaisen suunnittelun työvaiheissa on paljon korjaavia askelia johtuen siitä, että tehdyt laskelmat ja mallinnukset tuovat uutta tietoa, jotka vaikuttavat tuotteen konstruktion. Yksinkertainen ratkaisu on tyypillisesti myös taloudellinen. Valmistusta helpottavat osien yksinkertaiset muodot ja osien pieni lukumäärä. Turvallisuusperusteinen suunnittelu edellyttää tarkastelemaan tuotteen kestävyyttä, luotettavuutta ja ympäristövaikutuksia. (Björk ym. 2014, 14.)

### 6.1 Toiminnan kuvaus

Vetokokeen suorittamiseen kuluu aikaa noin 2 minuuttia, jonka aikana mitataan seuraava testaukseen saapuva koesauva. Koesauvat tuodaan robotilla mittauslaitteelle tarttujan ollessa alimmassa kohdassa. Ensin mitataan koesauvan paksuus siirtämällä tarttujaa ylöspäin lineaarijohdetta pitkin ja samalla voidaan mitata koesauvan kaarevuus. Tämän jälkeen tarttujaa käännetään 90° ja mitataan koesauvan vartalon leveys, samaan aikaan kun tarttuja palaa takaisin ala-asentoon. Lineaarijohteen vaunun liikepituus on noin 550 mm ja siirtonopeus noin 200 mm/s. Mittauskohtaa voidaan siirtää vaakatasossa kuvassa 9 näkyvällä lineaariaskelmoottorilla. Kun mittaukset on suoritettu, robotti noutaa koesauvan ja siirtää sen seuraavaan työvaiheeseen.



*KUVA 9. Pituusmitta-antureiden vaakasiirto*

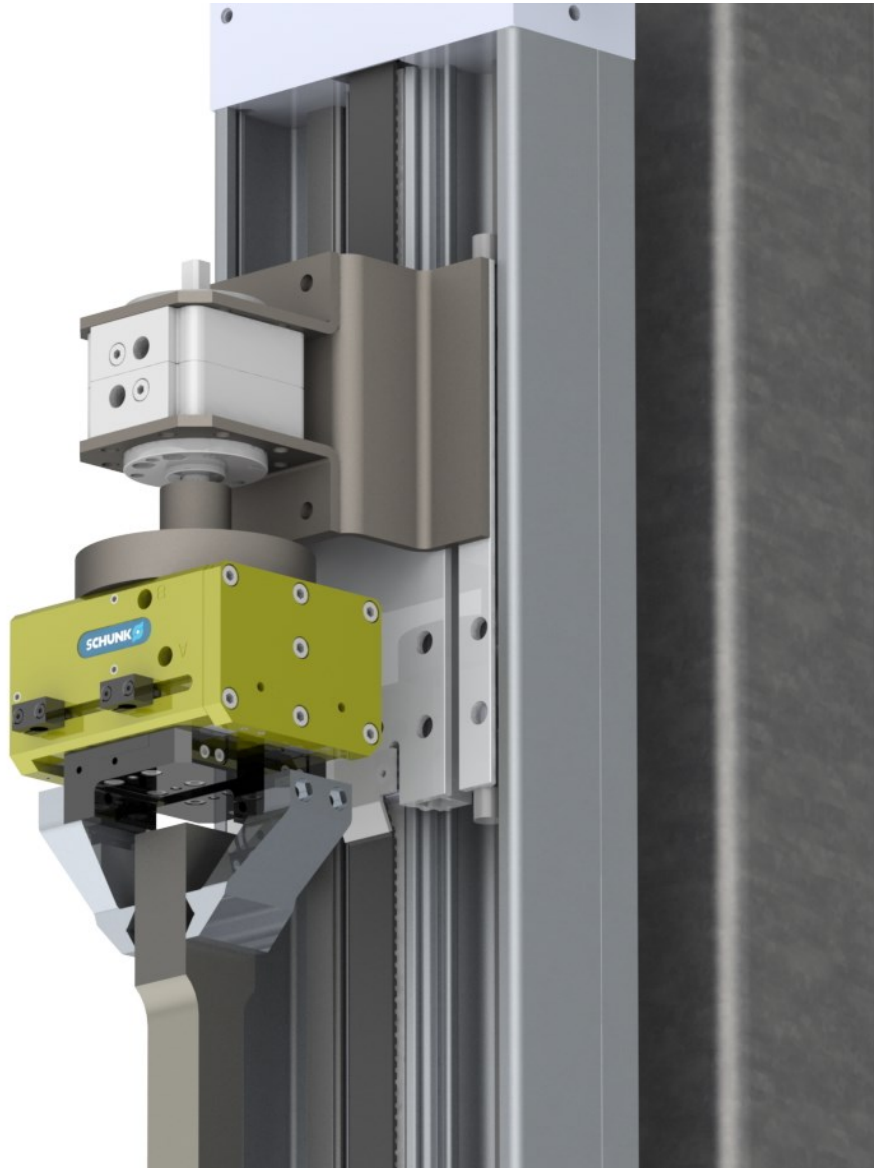
## **6.2 Toimilaitteiden valinta**

Dimensiomittauslaitteeseen valittiin seuraavat komponentit:

- lineaarijohde Profican Oy PR20HH
- pneumaattinen tarttuja Schunk PFH-mini 30
- pneumaattinen kääntösylinteri SMC CRB1BW50-100S
- pituusmitta-anturit Heidenhain Acanto AT-3017
- lineaariaskelmoottori Helix Linear SMA-17S2.

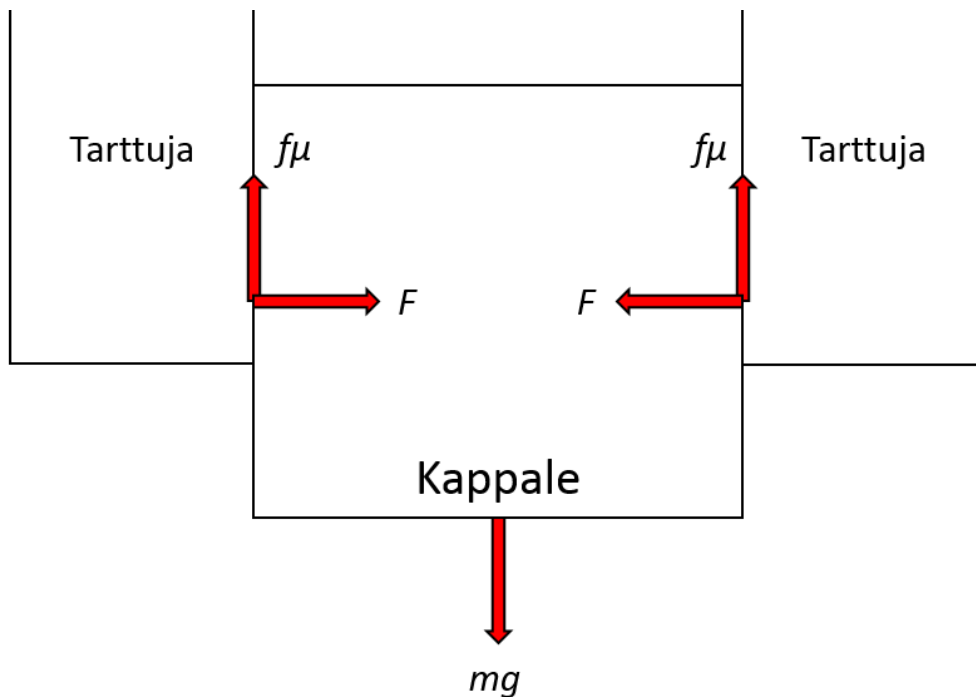
Kalajoella toimivan Profican Oy:n valikoimasta valittiin lineaarijohde kuulajohteilla ja hammashihnakäytöllä. Lineaarijohde on valmistettu vakiokomponenteista ja voidaan varustaa erityyppisillä moottoroinneilla ja vaihteistoilla. Lineaarijohteen siirtonopeus saadaan säädettäväksi asentamalla moottoriin taajuusmuuttaja.

Kuvassa 10 esiintyvän kääntösylinterin akselin varassa on sekä tarttujan että koesauvan massa. Suurimmat vetokoesauvat painavat noin 6 kg. Tarttujan kokonaispaino on kiinnitinleukojen kanssa noin 4 kg. Valitun kääntösylinterin suurin sallittu aksiaalinen kuorma on 196 N, minkä alle jääetään reilusti.



*KUVA 10. Kääntösylinteri ja tarttuja*

Kuvassa 11 on esitetty vapaakappalekuva koesauvan kiinnityksestä. Kaavassa 3 esitetään kuvassa näkyvien voimien suhteet. Tarttuja tuottaa 5 bar:n käyttöpainella 630 N:n puristusvoiman. Oletetaan, että molemmat tartuntapinnat ovat terästä, jolloin lepokitkakerroin on noin 0,15. Kaavasta 3 voidaan ratkaista koekappaleen suurin sallittu massa, joka olisi näillä lähtötiedoilla noin 19 kg.



KUVA 11. Kappaleen kiinnityksen vapaakappalekuva

$$mg = 2f_{\mu} = 2F \times \mu$$

KAAVA 3

$m$  = kappaleen massa (kg)

$g$  = putoamiskiihtyvyyys ( $\text{m/s}^2$ )

$f_{\mu}$  = kitkavoima (N)

$F$  = puristusvoima (N)

$\mu$  = kitkakerroin

### 6.3 Koneturvallisuus

Konedirektiivi otettiin käyttöön Suomessa vuoden 1994 alussa valtioneuvoston asetuksella ja siinä esitetään koneiden yleiset tekniset terveys- ja turvallisuusvaatimukset. Konedirektiivi koskee muutamia poikkeuksia lukuun ottamatta kaikkia koneita riippumatta siitä, onko kone tarkoitettu kuluttajille vai teolliseen käyttöön. Asetuksen piiriin kuuluvat myös omaan käyttöön tarkoitetut koneet sekä työpaikoilla itse tehdyt sähköä, paineilmaa tai hydraulikkaa käyttävät apulaitteet. (Siirilä – Tytykoski 2016, 34–43.)

Ennen kuin koneen saa ottaa omaan käyttöönsä tai tuoda EU:n markkinoille, koneen valmistajan velvollisuutena on (Koneen valmistaja)



- selvittää konetta koskevat terveys- ja turvallisuusvaatimukset ja arvioida koneen riskit
- suunnitella ja rakentaa kone turvallisuusvaatimusten mukaisesti
- laatia tekninen tiedosto
- suorittaa koneelle asianmukainen vaatimustenmukaisuuden arviointi
- laatia käyttöohjeet ja kiinnittää tarvittavat merkinnät
- laatia vaatimustenmukaisuusvakuutus
- kiinnittää koneeseen CE-merkintä.

Koneturvallisuuden kannalta on tärkeää tunnistaa vaarat ja arvioida niistä aiheutuvat riskit jo suunnitteluvaiheessa. Lähtökohtana on riskien poistaminen koneen kaikissa käyttövaiheissa, joka sisältää myös kuljetus-, kokoonpano-, käytöstäpoisto- ja romuttamisvaiheet. Ensisijaisesti kone suunnitellaan ja rakennetaan siten, että riskejä ei synny ja sitä voidaan käyttää ja huoltaa henkilöitä vaarantamatta. Mikäli koneen kaikkia vaaratekijöitä ei voida suunnittelulla poistaa, silloin seuraava vaihtoehto on pienentää riskiä suojuksilla ja turvalaitteilla. Jos näiden toimenpiteiden jälkeen koneeseen jää joitain jäännösriskejä, on niistä tiedotettava koneen käyttäjää käyttöohjeissa ja koneessa olevilla kilvillä, ja määritettävä käyttöön tarvittavat henkilösuojaimet ja erikoiskoulutukset. (Siirilä – Tytykoski 2016, 43.)

Osittain valmiita koneita tehdään osaksi laajempaa konejärjestelmää. Osittain valmiiden ja valmiiden koneiden teknisiä asiakirjoja koskevat vaatimukset ovat jokseenkin samanlaiset. Asiakirjoissa tulee olla osittain valmiin koneen tekniset tiedot ja riskien arvioinnin dokumentit. Osittain valmiin koneen mukana toimitetaan liittämismakuutus ja kokoonpano-ohjeet, mitkä liitetään konejärjestelmän tekniseen tiedostoon. Vaatimustenmukaisuusvakuutus ja CE-merkintä koskettaa järjestelmän kaikkia toimilaitteita ja konejärjestelmän on oltava kaikilta osin vaatimusten mukainen. (Siirilä – Tytykoski 2016, 119–122.)

Dimensiomittauslaite on osittain valmis kone, joka liitetään testausjärjestelmään. Laitteen perustoiminta on suunniteltu automaattiseksi ja sitä palvellaan robotilla. Käyttäjään kohdistuvat vaarat aiheutuvat häiriönpurku- ja huoltotilanteissa.

Standardi SFS-EN ISO 12100 sisältää yleiset riskin arviointia koskevat periaatteet. Standardi määrittelee peruskäsitteet, periaatteet ja menetelmät turvallisten koneiden suunnitteluun. Dimensiomittauslaitteen riskien arvioinnissa käytettiin SSAB:n sisäiseen käyttöön tarkoitettua SARA-turvallisuusriskienhallinta-ohjelmistoa. Taulukkoon 1 on koottu riskien arvioinnin pääkohdat.

*TAULUKKO 1. Riskien arviointi*

Vaaratekijä ja mahdollisia seurauksia	Riskin hallinta
<p><b>Paineilmasta aiheutuva vaara:</b></p> <p>Pienestä reiästä purkautuva kapea suihku voi leikata ihoa.</p> <p>Irtoavan letkun aiheuttama isku.</p> <p>Paineilman kokoonpuristuvuus voi aiheuttaa yllättäviä liikkeitä.</p> <p>Likaantunut äänenvaimennin voi estää laitteen normaalin toiminnan.</p> <p>Paineilmasta aiheutuva melu.</p>	<p>Koteloidaan paineilmaletkut tai asennetaan mekaaninen suojaus.</p> <p>Käytetään standardiosia liittimissä ja letkuissa.</p> <p>Suunnitellaan paineilmajärjestelmä siten, että laite jää turvalliseen tilaan yli-/alipaine tilanteessa.</p> <p>Paineilmalinjaan asennetaan sulkuventtiili ja huoltoyksikkö suodattimen välittömään läheisyyteen.</p>
<p><b>Liikkuvat kone-elimet:</b></p> <p>Terävät ja kulmikkaat osat voivat viiltää tai pistää käyttäjää.</p> <p>Robotti törmää käyttäjään.</p> <p>Robotti törmää esteeseen ja kappale sinkoutuu käyttäjään.</p>	<p>Vältetään suunnittelussa kohteita, jossa muodostuu leikkautumisen riski ja vältetään teräviä kulmia.</p> <p>Asennetaan suoja liikkuville osille.</p> <p>Liitetään laite testausjärjestelmän turvalogikan piiriin, joka valvoo laitteen ympäristöä.</p>
<p><b>Puristuminen, takertuminen:</b></p> <p>Käyttäjän käsi jää tarttujan leukojen väliin.</p> <p>Käyttäjän käsi jää lineaarijohteen liikkuvan vaunun ja rakenteiden väliin.</p>	<p>Asennetaan suojakaappi laitteen ympärille.</p> <p>Tarvittaessa asennetaan turvaloverho.</p> <p>Liitetään laite testausjärjestelmän turvalogikan piiriin.</p>
<p><b>Sähköstä aiheutuva vaara:</b></p> <p>Sähköisku, ylikuormitus, oikosulku, tulipalo.</p> <p>EMC häiriöt aiheuttavat ohjausjärjestelmässä laitteen odottamattoman käynnistymisen.</p> <p>Ohjausjärjestelmä vikaantuu ja laite käynnistyy odottamattomasti.</p> <p>Laite käynnistyy sähköjen palautuksen jälkeen odottamattomasti.</p> <p>Sähköasennusvirheet ja puutteellinen laitteiden koestus ja koekäyttö.</p>	<p>Suojaus käyttäen syötön automaattista erottamista ylikuormitus ja oikosulku tapauksissa Standardin SFS-EN 60204-1 mukaisesti.</p> <p>Huomioidaan EMC vaatimukset asennuksissa ja komponenttivalinnoissa.</p> <p>Lukittava syötönerotuskytkin (turvakytin) huoltotöitä varten.</p> <p>Suoritetaan standardin SFS-EN 60204-1 edellyttämät mittaukset ja IO koestus ennen koekäyttöä.</p> <p>Laaditaan toimintaohjeet ja koulutus.</p>

## 7 MITTAUSEPÄVARMUUS

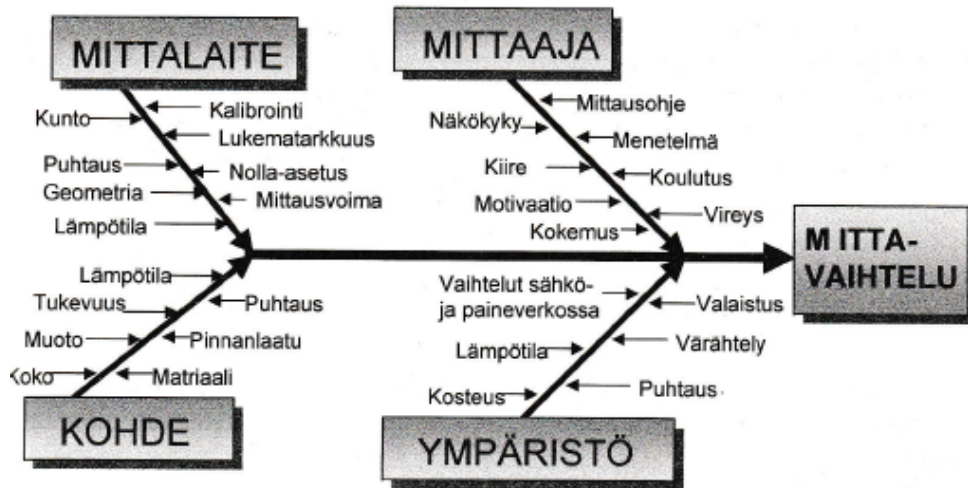
Mitään mittausta ei voida tehdä täysin virheettömästi, sillä muun muassa mittauslaitteet eivät ole täydellisiä ja mittausolosuhteet vaihtelevat. Mittausvirheet voidaan jakaa perinteisesti kolmeen ryhmään, jotka ovat systemaattiset, satunnaiset ja karkeat virheet. Systemaattisilla virheillä on jokin tunnettu suunta ja suuruus. Sellaisten virheiden vaikutus voidaan poistaa esimerkiksi asteikon korjaustaulukon avulla. Satunnaisten virheiden suuruutta ja suuntaa ei pystytä yksitellen erottamaan, mutta toistamalla mittauksia saadaan niiden suuruudesta tietoa tilastomatematiikan avulla. Karkeat virheet aiheutuvat mittaajan huolimattomuudesta ja erehdyksestä, kuten esimerkiksi mittaustuloksen virheellisestä tulkinnasta. (Andersson – Tikka 1997, 127–130.)

Mittausepävarmuus kuvaa mittasuurelle saatujen arvojen vaihtelua. Mikäli mittaustuloksen epävarmuutta ei tunneta, ei mittaustuloksesta voi tehdä johtopäätöksiä. Mittausepävarmuuslaskelman laatiminen alkaakin tunnistamalla mittauksen virheiden lähteet. Epävarmuuslähteiden tunnistamiseen tarvitaan ammattitaitoa ja näkemystä. Tyypillisesti mittauksessa on kuitenkin vain muutama tekijä, jotka määräävät mittausepävarmuuden. Sellaiset virhelähteet, joiden vaikutus mittausepävarmuuteen on vain vähäinen, voidaan jättää huomioimatta. (Hiltunen – Linko – Hemminki – Hägg – Järvenpää – Saarinen – Simonen – Kärhä 2011, 35–38.)

Mittaustuloksen epävarmuutta aiheuttavat seuraavat lähteet (Hiltunen ym. 2011, 39–42):

- mittauslaite
- ympäristöolosuhteet
- käyttäjä
- mittauskohde
- näytteenotto ja näytteen käsittely
- mittaus- ja laskuvirheet.

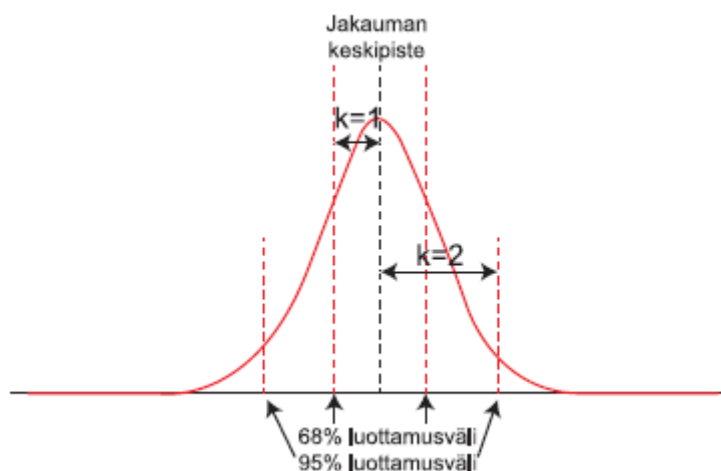
Kuvassa 12 on esitetty mittaukseen vaikuttavia virhetekijöitä.



KUVA 12. Mittauksen epävarmuuden syy-seuraus-diagrammi. (Andersson – Tikka 1997, 139)

### 7.1 Mittausepävarmuuksien luokittelu

Mittausepävarmuuksien määrittämistä jaotellaan tyypillisesti kahteen luokkaan. Tyypin A mukainen epävarmuus voidaan määrittää tilastollisin menetelmin. Toistettujen mittausten todennäköisyysjakauma noudattaa hyvin usein kuvassa 13 näkyvää normaalijakaumaa. Mittaustuloksen todennäköisyys pienenee sitä mukaan, kun etäännyttään jakauman keskikohdasta. Normaalijakaumaa kuvaavat keskiarvo  $\bar{x}$  ja keskihajonta  $\sigma$ . Mittaustuloksista 68 % sijaitsee välillä  $\bar{x} \pm \sigma$  ja 95 % välillä  $\bar{x} \pm 2\sigma$ . Epävarmuuskomponenttia, jonka todennäköisyys on 68 %, kutsutaan standardiepävarmuudeksi. (Hiltunen ym. 2011, 37–38).



KUVA 13. Normaalijakauma (Hiltunen ym. 2011, 37)

Mittaustulosten keskihajonta kuvaa yksittäisen havaintopisteen poikkeamaa mittauksien keskiarvosta. Keskihajonta voidaan laskea kaavalla 4 (EA-4/02 M. 2013, 6).

$$\sigma(x) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{KAAVA 4}$$

$\sigma$  = keskihajonta

$x_i$  = mittaustulos

$\bar{x}$  = mittaustulosten keskiarvo

$n$  = mittausten lukumäärä

Kaavalla 5 lasketaan mittaustulosten keskiarvon poikkeama eli keskiarvon keskihajonta (EA-4/02 M. 2013, 6). Keskiarvona ilmoitetun tuloksen hajonta pienenee, kun mittauksien määrää kasvatetaan (Hiltunen ym. 2011, 46).

$$u(\bar{x}) = \frac{\sigma(x)}{\sqrt{n}} \quad \text{KAAVA 5}$$

$u$  = keskiarvon keskihajonta

$\sigma$  = keskihajonta

$n$  = mittausten lukumäärä

Tyyppin B mukaista epävarmuutta ei voida määrittää tilastollisin menetelmin ja sen epävarmuus ei pienene mittauksia toistamalla. Epävarmuus saadaan esimerkiksi laitteen kalibrointitodistuksesta, laitteen spesifikaatiosta, aikaisemmasta mittauskokemuksesta tai arvioimalla. Esimerkiksi digitaalisen mittauslaitteen viimeisen desimaalin pyöristyksestä aiheutuva epävarmuus on yhtä suurella todennäköisyydellä välillä  $\pm 0,5$ . Kun mittaustuloksista tiedetään ylä- ja alaraja, todennäköisyysjakauma on silloin suorakulmainen tasajakauma ja sen standardiepävarmuus voidaan laskea kaavalla 6. (Hiltunen ym. 2011, 37–38.)

$$u_a(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad \text{KAAVA 6}$$

$u_a$  = tasajakauma

$a$  = vaihteluvälin puolikas

Mikäli epävarmuuskomponentit ovat riippumattomia toisiinsa nähden, saadaan kokonaisepävarmuus laskemalla epävarmuustekijät neliöllisesti yhteen. Mikäli

epävarmuustekijöiden välillä on korrelaatiota, lasketaan standardiepävarmuus osittaisderivoimalla jokainen yksittäinen epävarmuusarvio ja laskemalla osittaisderivaatat neliöllisesti yhteen (Hiltunen ym. 2011, 43–44). Mittauksen kokonaisepävarmuuteen sisältyy yleensä myös varmuuskerroin  $k$ , jonka ilmoittamalla todennäköisyydellä mittaustulos on yhdistetyn mittausepävarmuuden sisällä. Kertoimella 2 todennäköisyys on 95 % ja kertoimella 3 todennäköisyys on 99,7 %. (Andersson – Tikka 1997, 154–155.)

## 7.2 Dimensiomittauslaitteen mittausepävarmuus

Mittauslaitteen suunnitteluvaiheessa epävarmuuksia arvioitiin kokemukseen ja aikaisempaan tietoon perustuen. Mittauslaitteen käyttöönoton jälkeen arviot voidaan korvata mittaustuloksista laskettuihin arvoihin. Mittaustuloksen matemaattinen malli esitetään kaavassa 7 (EA-4/02 M. 2013, 32).

$$l_x = l_l + \delta l_r + \delta l_k + \delta l_\theta + \delta l_\beta + L(\alpha \times \delta t + \delta \alpha \times \Delta t) \quad \text{KAAVA 7}$$

$l_x$  = kappaleen mittaustulos (m)

$l_l$  = toistettujen mittauksien keskiarvo (m)

$\delta l_r$  = mittauslaitteen resoluution korjaus (m)

$\delta l_k$  = mittauslaitteen kalibrointikorjaus (m)

$\delta l_\theta$  = mittauskärkien ja kappaleen kulmavirheen korjaus (m)

$\delta l_\beta$  = mittauskärkien yhdensuuntaisuusvirheen korjaus (m)

$L$  = kappaleen nimellismitta (m)

$\alpha$  = lämpölaajenemiskerroin

$\delta t$  = mittauslaitteen ja kappaleen lämpötilaero mittaushetkellä (°C)

$\delta \alpha$  = mittauslaitteen ja kappaleen lämpölaajenemiskertoimien erotus (°C)

$\Delta t$  = lämpötilanmuutos mittaushetkellä (°C)

### Toistettujen mittauksien keskiarvo ( $l_l$ )

Koesauvan mittauksien keskiarvoon ei yhdistetä paksuuden ja leveyden mittauksia vaan niiden keskiarvo ja mittausepävarmuus määritetään erikseen. Mittauksen toistokertoja on oltava vähintään kolme kappaletta ja toistokertoja lisäämällä

mittaustuloksesta saadaan luotettavampi ( $n \geq 10$ ). Toistettujen mittauksien keskiarvon keskihajonnasta saadaan standardiepävarmuus, jonka suuruudeksi arvioitiin  $3 \mu\text{m}$ .

### **Mittauslaitteen resoluution korjaus ( $\delta_r$ )**

Pituusmitta-anturin erottelukyvyksi on laitevalmistajan esitteessä ilmoitettu  $\pm 2 \mu\text{m}$  (Heidenhain-Acanto. 2020). Erottelukyvyyn todennäköisyysjakauma on tasajakauma ja sen standardiepävarmuus on

$$u(\delta_{l_r}) = 2 \mu\text{m} / \sqrt{3} = 1,16 \mu\text{m}.$$

### **Mittauslaitteen kalibrointikorjaus ( $\delta_k$ )**

Kalibroinnin mittausepävarmuus ilmoitetaan kalibrointitodistuksessa. Standardiepävarmuuden arvioitiin vastaavan samankaltaisen mittausanturin kalibrointitodistuksesta saatua arvoa  $1,5 \mu\text{m}$ .

### **Mittauskärkien kulmavirheiden korjaus ( $\delta_\theta$ ) ( $\delta_\beta$ )**

Kulmavirheet syntyvät, kun mittauskärkien keskilinjat ja mitattavan kappaleen keskilinja eivät ole kohtisuorassa toisiinsa nähden. Kohdistuksen kulmapoikkeamien oletetaan tapahtuvan vain yhden akselin suhteen, ja poikkeaman suuruudeksi arvioitiin  $\pm 0,5^\circ$ . Kulmapoikkeamasta aiheutuva kosinivirhe voidaan laskea kaavalla 8. Kosinivirheen todennäköisyysjakauma on tasajakauma ja sen standardiepävarmuus saadaan laskettua kaavalla 6. (Andersson – Tikka 1997, 137.)

$$l_\theta = L(1 - \cos\theta)$$

KAAVA 8

$l_\theta$  = kosinivirhe

$L$  = nimellismitta

$\theta$  = kulmapoikkeama

### **Lämpötilakorjaimet ( $\delta_t$ ) ( $\delta_\alpha$ )**

Lämpötilan epävarmuustekijöiden määrittämisessä käytettiin avuksi EAL:n julkaisua (*EA-4/02 Calibration of a Gauge Block s. 32–35*). Mittauksen aikaisen läm-

pötilan muutoksen sekä mitattavan kappaleen ja mittausantureiden välisen lämpötilaeron oletetaan olevan  $\pm 1^\circ\text{C}$ . Antureiden ja kappaleen lämpölaajenemiskertoimien oletetaan olevan  $(11,5 \pm 1) \times 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$ . Lämpötilan muutoksen todennäköisyysjakauma on tasajakauma. Herkkyyskerroin saadaan, kun kerrotaan lämpölaajenemiskerroin mitattavan kappaleen pituudella. Lämpötilan muutos ja lämpötilaero ovat tässä esimerkissä yhtä suuria ja niiden standardiepävarmuus on  $u(\Delta t) = 1^\circ\text{C} / \sqrt{3} = 0,577^\circ\text{C}$ .

Mittausantureiden ja koekappaleen tasajakautuneet lämpölaajenemiskertoimet lasketaan neliöllisesti yhteen.

$$u(\delta\alpha) = \sqrt{u^2(\alpha_x) + u^2(\alpha_y)} = \sqrt{2 \times (1 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} / \sqrt{3})^2} = 0,817 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

Epävarmuustekijöistä saadaan laskettua standardiepävarmuus kertomalla lämpölaajenemiskertoimen ja lämpötilaeron tekijät keskenään.

$$u(\Delta t \times \delta\alpha) = 0,577^\circ\text{C} \times 0,817 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} = 0,471 \times 10^{-6}$$

Taulukoon 2 on koottu dimensiomittauslaitteen virheiden lähteet ja arviot niiden suuruudesta, vaikutussuureiden ei katsota korreloivan merkitsevästi.

*TAULUKKO 2. Epävarmuuslaskennan komponentit*

Suure $X_i$	Odotus-arvo $x_i$	Standardi-epävarmuus $u(x_i)$	Jakauma	Herkkyyskerroin $C_i$	Epävarmuus $U_i(y)=C_i \cdot u(x_i)$
$l_l$	30 mm	3 $\mu\text{m}$	normaali	1	3 $\mu\text{m}$
$\delta r$	0	1,16 $\mu\text{m}$	tasa	1	1,16 $\mu\text{m}$
$\delta k$	0	1,5 $\mu\text{m}$	normaali	1	1,5 $\mu\text{m}$
$\delta \theta$	0	0,66 $\mu\text{m}$	tasa	1	0,66 $\mu\text{m}$
$\delta \beta$	0	0,66 $\mu\text{m}$	tasa	1	0,66 $\mu\text{m}$
$\delta t$	0	0,577 $^\circ\text{C}$	tasa	0,345 $\mu\text{m}^\circ\text{C}^{-1}$	0,2 $\mu\text{m}$
$\delta\alpha \times \Delta t$	0	0,471 $\times 10^{-6}$	special	30 mm	0,014 $\mu\text{m}$
$l_x$	30 mm				3,68 $\mu\text{m}$
Laajennettu epävarmuus (k = 2) 95 % luottamustaso					7,35 $\mu\text{m}$



## 8 YHTEENVETO

Opinnäytetyössä tehtiin esisuunnittelu ja luonnostelu vetokoesauvojen dimensio-  
mittauslaitteesta. Tehtävänä oli selvittää, voidaanko koesauvojen mittaaminen  
suorittaa kosketuksettomilla mittaustekniikoilla. Koesauvan muodon mittaaminen  
todettiin myös tärkeäksi, sillä taipuneet koesauvat on siirrettävä syrjään odotta-  
maan manuaalista vetokoetestausta. Tehtävää varten perustettiin tuotekehitys-  
projekti. Sen tuloksena valmistunut mittauslaitteen suunnitelma vastasi toimeksi-  
antajan tavoitteita. Työssä tunnistettiin koesauvojen mittauksen olennaisimmat  
virhelähteet ja laadittiin mittausepävarmuusbudjetti myöhempää käyttöä varten.

Tässä työssä tutkittujen kosketuksettomien mittausantureiden erottelukyky olisi  
ollut riittävän hyvä. Kosketuksettomista antureista kuitenkin luovuttiin, koska an-  
tureiden mittausalueen lineaarisuus ei täyttänyt vaatimuksia. Mittausantureiksi  
valittiin koskettavat Heidenhain pituusmitta-anturit, jotka tarjoavat korkean tark-  
kuuden koko mittausalueella ja ovat suunniteltuja teollisuusympäristöön. Kosket-  
tavien antureiden heikkoutena on se, että koesauvan muodon mittaaminen on  
hitaampaa. Ongelma olisi kuitenkin ratkaistavissa yhdistelemällä mittaustekni-  
koita ja käyttämällä esimerkiksi konenäkökameraa koesauvan muodon mittaami-  
seen. Kosketuksettomien mittauksen vaihtoehtoa kannattaa tutkia vielä myöhem-  
min uudestaan, sillä kameratekniikka kehittyy nopeasti ja lineaarisuusvirhe var-  
masti pienenee tulevaisuudessa.

Yksityiskohtaisen suunnittelun aikana havaittiin asia, jota esisuunnittelussa ei  
vielä osattu huomioida: mitta-antureita pitää pystyä siirtämään myös vaakata-  
sossa. Tähän ajauduttiin oikeastaan sen takia, että lähtökohtaisesti selvitettiin  
kosketuksettomia antureita, joiden mittausperiaate ei vaadi antureiden siirtoa.

Tuotekehitysprojektin tekemistä helpotti hyvin suunniteltu projekti aikataulu. Mis-  
sään vaiheessa projektia ei ollut vaikeuksia pysyä aikataulussa. Esisuunnittelun  
aikana vaatimuslistaan tehtiin jonkin verran muutoksia ja ehkäpä projektin alussa  
vaatimuslistaa olisi kannattanut laatia huolellisemmin.

Suunnittelun tuloksena dimensiomittauslaitteen toimintoja saatiin yksinkertaisemmaksi verrattuna aikaisempaan mittauslaitteeseen. Suunnitelmassa lineaariakseli käännettiin pystyasentoon, ja silloin mittauslaite on helpompi sovittaa testausjärjestelmän layoutiin ja lineaariakseli pysyy myös helpommin puhtaana. Mittauslaite on koostettu vakiokomponenteista, jotka ovat helposti saatavilla. Komponentit voidaan myös korvata muiden valmistajien vastaavilla tuotteilla. Komponenttien kiinnityssovittimet ovat yksinkertaisia, ja ne voidaan valmistaa konepajamenetelmillä.

Tämän työn jälkeen pitää vielä suunnitella dimensiomittauslaitteen automaatio- ja ohjausjärjestelmä ja valmistella niiden liittäminen testausjärjestelmän logiikkaan. Käyttäjää varten mittauslaitteelle täytyy suunnitella käyttöliittymä ja laatia tuotteen huolto- ja käyttöohjeet. Mittalaitteen mukana toimitettavaan teknisiin asiakirjoihin on sisällytettävä riskien arvioinnin dokumentit, kokoonpano-ohjeet ja liittämisvakuutus.

## LÄHTEET

Andersson, Paul – Tikka, Heikki 1997. Mittaus- ja laatutekniikat. Porvoo, Helsinki, Juva: WSOY.

Applications for 2D/3D laser scanners. 2020. Micro-Epsilon. Saatavissa: [https://www.micro-epsilon.com/2D\\_3D/laser-scanner/applications/](https://www.micro-epsilon.com/2D_3D/laser-scanner/applications/). Hakupäivä 24.9.2020.

Björk, Timo – Hautala, Pekka – Huhtala, Kalevi – Kivioja, Seppo – Kleimola, Matti – Lavi, Markku – Martikka, Heikki – Miettinen, Juha – Ranta, Aarno – Rinkinen, Jari – Salonen, Pekka 2014. Koneenosien suunnittelu. 6. painos. Helsinki: Sanoma Pro.

EA-4/02 M. 2013. European Accreditation. Saatavissa: <https://european-accreditation.org/publications/ea-4-02-m/>. Hakupäivä 1.10.2020.

Heidenhain-Acanto. 2020. Heidenhain. Saatavissa: [https://www.heidenhain.fi/fi\\_FI/tuotevalikoima/mitta-anturit/tuotevalikoima/acanto/](https://www.heidenhain.fi/fi_FI/tuotevalikoima/mitta-anturit/tuotevalikoima/acanto/). Hakupäivä 3.12.2020.

Hiltunen, Erkki – Linko, Linnéa – Hemminki, Sari – Hägg, Margareta – Järvenpää, Eila – Saarinen, Pertti – Simonen, Seppo – Kärhä, Petri 2011. Laadukkaan mittaamisen perusteet. Espoo: Centre of Metrology and Accreditation. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/MIKES/2011-J4.pdf>. Hakupäivä 9.10.2020.

Koneen valmistaja. Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (Tukes). Saatavissa: <https://tukes.fi/tuotteet-ja-palvelut/koneet/koneen-valmistaja>. Hakupäivä 1.12.2020.

Krauss, George 2005. Steels: Processing, Structure, and Performance. Materials Park, Ohio: ASM International. Saatavissa: <https://ebookcentral-proquest-com.ezp.oamk.fi:2047/lib/oamk-ebooks/reader.action?docID=3002345> (vaatii käyttäjälisenssin). Hakupäivä 26.9.2020.

Laitinen, Esko – Niinimäki, Matti – Tiainen, Tuomo – Tiilikka, Pentti – Tuomikoski, Juho – Koivisto, Kaarlo 2008. Konetekniikan materiaalioppi. 12. painos. Helsinki: Edita.

Lindroos, Veikko – Sulonen, Martti – Veistinen, Mauri K. – Miekko-oja, Heikki M. 1986. Uudistettu Miekko-ojan metallioppi. Helsinki: Teknillisten tieteiden akatemia, Otava.

Mendiguren, J. – Cortés, F. – Galdos, L. – Berveiller, S. 2013. Strain path's influence on the elastic behaviour of the TRIP 700 steel. *Materials Science and Engineering* vol. 560. S. 433–438. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com.ezp.oamk.fi:2048/science/article/pii/S0921509312014013> (vaatii käyttäjälisenssin). Hakupäivä 26.9.2020.

Mitta-anturit. 2020. Heidenhain. Saatavissa: [https://www.heidenhain.fi/fi\\_FI/tuotevalikoima/mitta-anturit/](https://www.heidenhain.fi/fi_FI/tuotevalikoima/mitta-anturit/). Hakupäivä 24.9.2020.

Nousiainen, Antti 2020. Noracommitt Oy. Puhelinhaastattelu 24.9.2020.

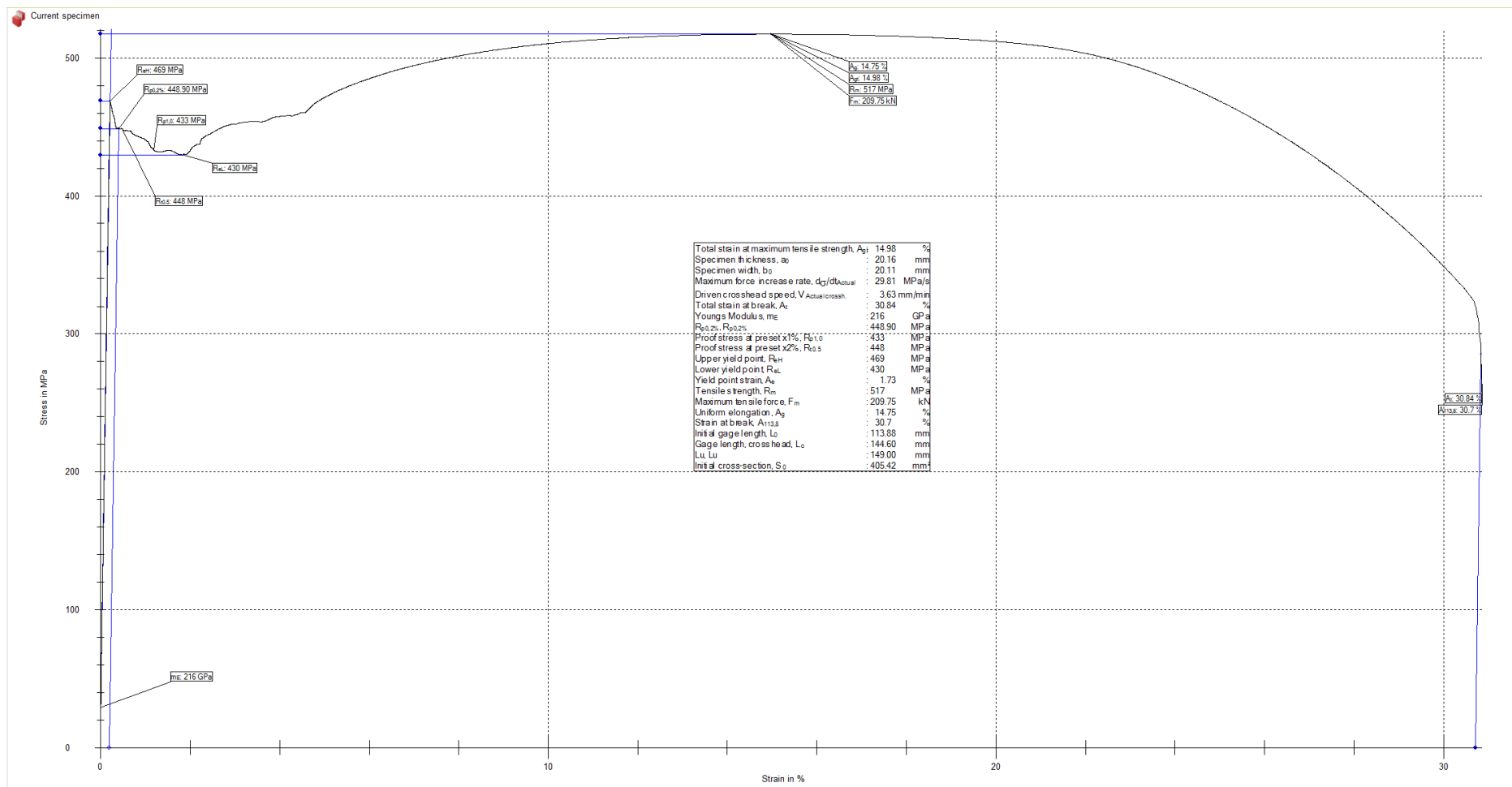
Pahl, Gerhard – Beitz, Wolfgang 1992. Koneensuunnitteluoppi. Toinen korjattu painos. Helsinki: Metalliteollisuuden kustannus.

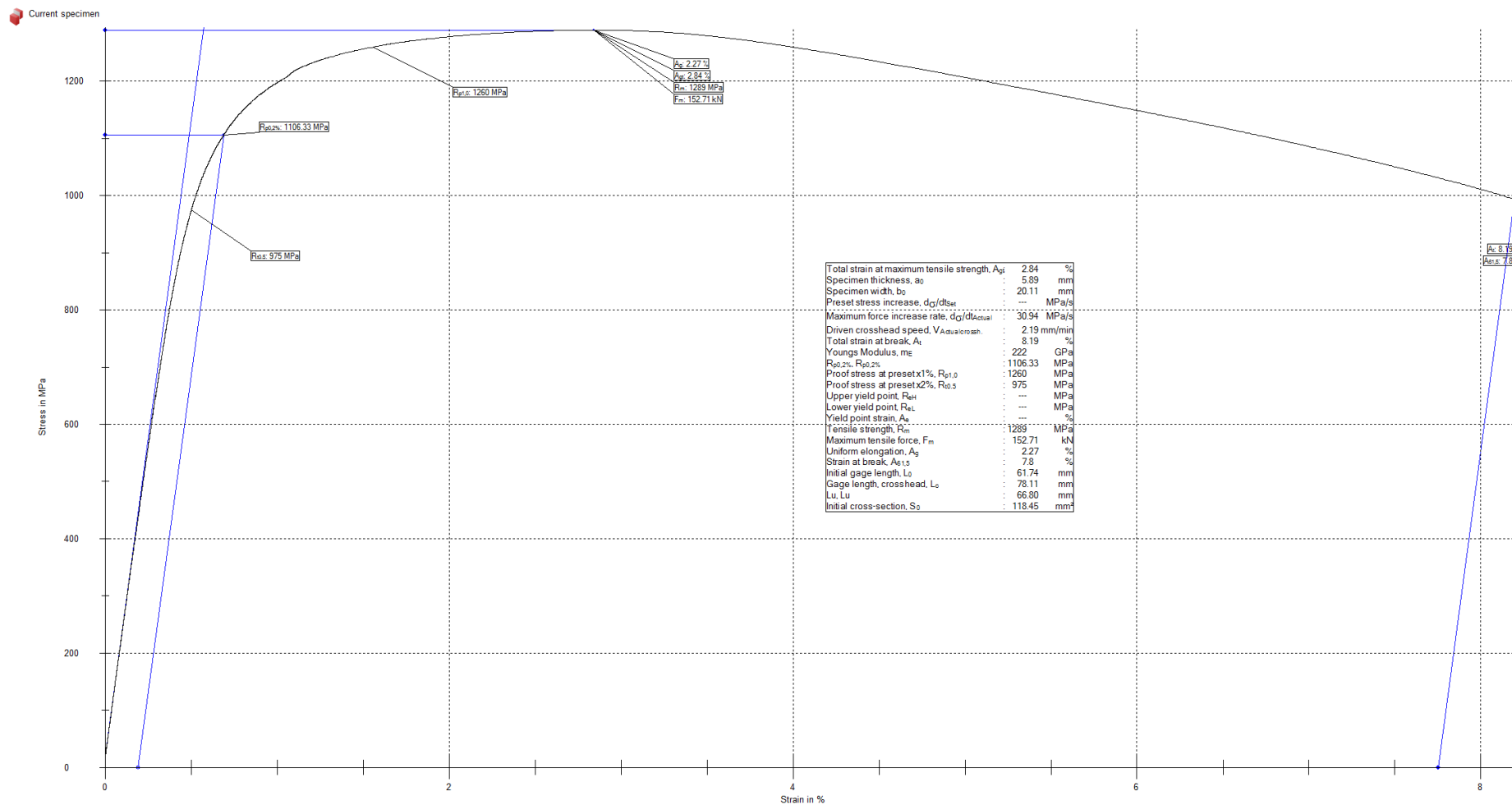
SFS-EN ISO 6892-1. 2019. Metallien vetokoe. Osa 1: Vetokoe huoneenlämpötilassa. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

Siirilä, Tapio – Tytykoski, Katri 2016. Koneturvallisuuden käsikirja. 2. painos. Helsinki: Inspecta Oy.

SSAB lyhyesti. 2020. SSAB. Saatavissa: <https://www.ssab.fi/ssab-konserni/tietoja-ssabsta/ssab-lyhyesti>. Hakupäivä 23.9.2020.

Tabia, Hedi – Laga, Hamid – Guo, Yulan – Fisher, Robert B. – Bennamoun, Mohammed 2019. 3D Shape Analysis: Fundamentals, Theory, and Applications. Newark: John Wiley & Sons, Incorporated. Saatavissa: <https://ebookcentral-proquest-com.ezp.oamk.fi:2047/lib/oamk-ebooks/reader.action?docID=5625418> (vaatii käyttäjälisenssin). Hakupäivä 26.9.2020.



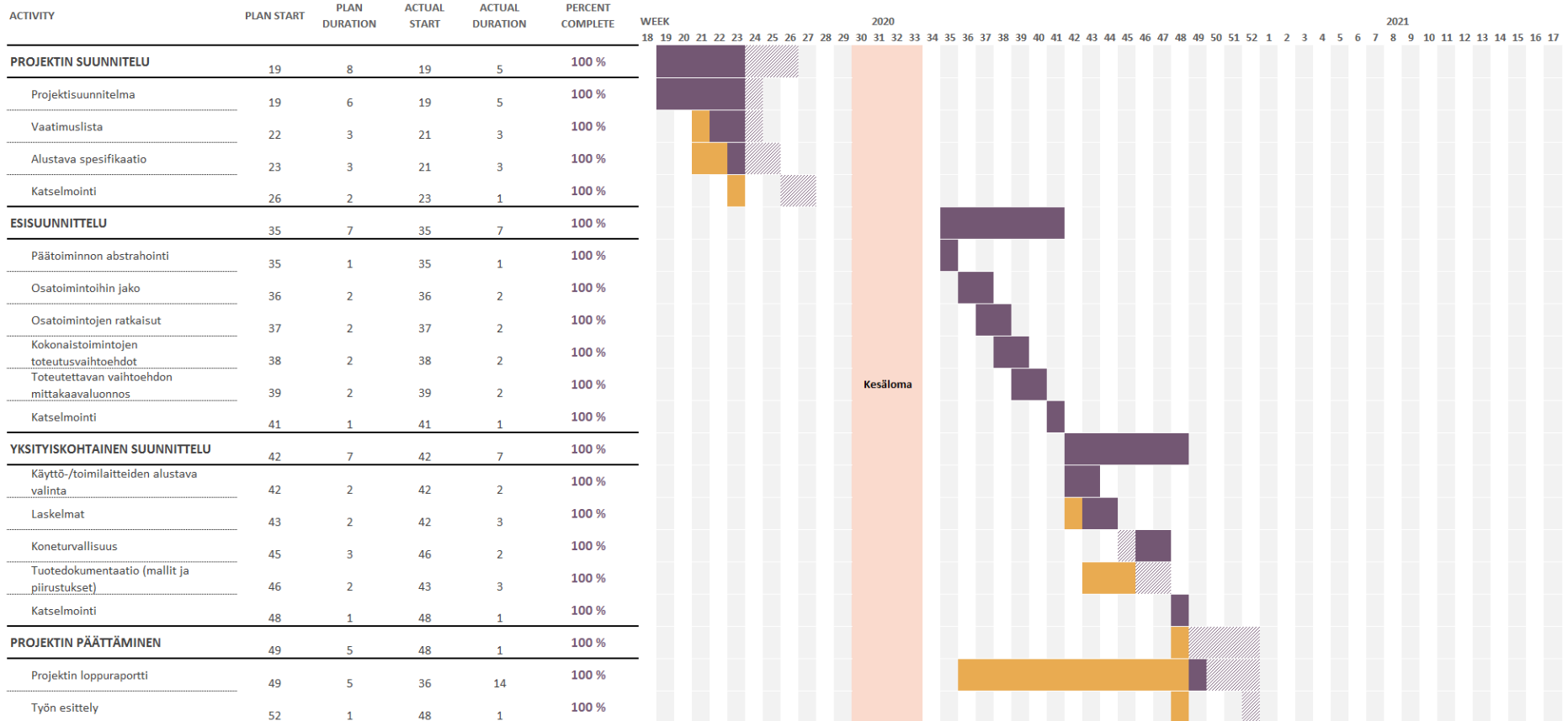


# Project Planner


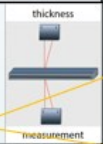

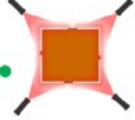
Select a period to highlight at right. A legend describing the charting follows.

Period Highlight: 53

Plan Duration Actual Start % Complete Actual (beyond plan) % Complete (beyond plan)



# Morfologinen kaavio

Ratkaisuvaihtoehdot		1	2	3	4	5
Osatoiminnot		1	2	3	4	5
A	Vetokoesavasta tarttuminen kiinni	Pneumaattinen tarttuja	Hydraulinen tarttuja	Sähköinen tarttuja Robotti kannattelee	Teline tai jigi johon koesauva asetetaan	Sähkömagneettinen tarttuja
B	Paksuuden ja leveyden mittaus	Koskettava mitta-anturit 	Laseranturi, kolmiomittaus 	Kamera	Lasermikrometri 	360° Laserskanneri 
C	Vetokoesauvan kääntäminen	Pneumaattinen kääntösyylinteri	Sähköinen kääntölaite	Testausjärjestelmän robotti kääntää koesauvan	Mekaaninen kääntölaite	
D	Mittauspaikan siirtäminen	Pneumaattinen sylinteri siirtää mittaustulosta	Servomoottori siirtää anturia. Liukujohteet, hihna- tai kuularuuvi	Robotti siirtää koesauvaa	Servomoottori siirtää koesauvaa. Liukujohteet, hihna- tai kuularuuvi	
E	Mittauksien tulosten käsittely, lähettäminen ja arkistointi	Lähetetään mittaustulokset logiikalle, logiikka arkistoi tietokantaan.	Lähetetään mittaustulokset vetokoneen ohjelmistolle ja tietokantaan.			