



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU  
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Oskari Nordström

# 3D-TULOSTETTUJEN TYÖKALUJEN TESTIPENKKI

Suunnittelu, valmistus ja testaus

Tekniikka  
2023

## TIIVISTELMÄ

Tekijä	Oskari Nordström
Opinnäytetyön nimi	3D-tulostettujen työkalujen testipenkki
Vuosi	2023
Kieli	Suomi
Sivumäärä	85 + 3 liitettä
Ohjaaja	Sami Elomaa

---

Tämä opinnäytetyö tehtiin Wärtsilä Hub For Additive Manufacturing AM-Campus -osastolle. AM-Campuksella 3D-tulostetuille työkaluille tehdään topologista optimointia ja lujuuslaskentaa FEM-ohjelmilla. Aikaisemmin 3D-tulostettuja työkaluja testattiin pelkästään käytännössä tuotannossa. AM-Campus tarvitsi 3D-tulostettujen työkalujen testipenkin, jolla voidaan suorittaa erilaisten työkalujen testaamista turvallisesti, nopeasti ja tallentaa tuloksia. Halutut tulokset olivat työkalun suunnitellun maksimi vääntömomentin testaaminen ja sen mittaaminen, sekä muodonmuutosten mittaaminen. Joten, työn aiheena oli suunnitella, valmistaa ja testata kyseinen testipenkki. Opinnäytetyössä käytettävä menetelmä on kehitystyö, jonka lähestymistapoja ovat tapaustutkimus ja innovaatioiden tuottaminen.

Ensiksi lähdettiin selvittämään, että onko jo olemassa vastaavia testipenkkejä ja kuinka työkaluja voidaan testata. Sitten kun löytyi sopiva konsepti, aloitettiin tutkimaan testipenkin fysikaalista puolta ja matemaattista puolta. Sitten kun teoria-puoli oli selvitetty, niin suunniteltiin voiman tuotto ja testipenkin rakenne, jotta sillä voidaan testata lähes kaikenlaisia työkaluja ja saada tuloksia talteen. Lisäksi tutkittiin mahdollisia aiheeseen liittyviä standardeja.

Testipenkin komponentit, kokoonpanot mallinnettiin ja piirrettiin Siemens NX 3D -mallinnusohjelmalla. FEM-lujuuslaskelmia ja hitsauslaskelmia yritettiin tehdä itse. Mutta koska itse lasketut tulokset olivat epäluotettavia, teki Etteplan Oy FEM-lujuuslaskelmat. Testipenkin osia valmistettiin itse, 3D-tulostamalla ja muokkamalla olemassa olevia komponentteja. Isoimmat osakokonaisuudet valmistivat SOP-Metal Oy ja Easy-Systems Oy. Tuloksien tallentamiseen käytettiin kameraa ja vääntömomentti antureita.

Lopputuloksena saatiin toimiva vaatimusten mukainen testipenkki, jolla voidaan testata lähes kaikenlaisia työkaluja ja saadaan tarvittavat tulokset talteen testeistä.

## ABSTRACT

Author	Oskari Nordström
Title	Testbench for 3D Printed Tools
Year	2023
Language	Finnish
Pages	85 + 3 Appendices
Name of Supervisor	Sami Elomaa

---

This thesis was done for the Wärtsilä Hub for Additive Manufacturing AM-Campus department. At the AM-Campus, topological optimization and strength calculations using FEM software were carried out on 3D printed tools. Previously 3D printed tools at the AM-campus were only tested in practice in production. The AM-Campus needed a testbench for 3D printed tools which can be used to perform the testing of various tools safely, quickly and to record results. The desired result was the possibility to test the maximum designed torque of the tool and measuring it and also measuring deformations. Therefore, the topic of the thesis was to design, manufacture and test this testbench. The method used in the thesis is development work. The approaches are case study and producing innovations.

First, research was done to find out if tool testbenches already exist and how tools can be tested in general. When a suitable concept was found, research on the physical properties and required mathematical calculations of the testbench started. When the theory was settled, the design of the force output and testbench structure started, so the testbench can be used to test almost all kinds of tools and record results. In addition, possible standards related to the topic were studied.

The components and assemblies of the testbench were modelled and drawn with the Siemens NX 3D modelling program. There was an attempt to do the FEM calculations and welding calculations, but since the self-calculated results were unreliable, Etteplan Oy did the FEM calculations. The parts of the testbench were produced at Wärtsilä, by 3D printing and modifying existing components. The largest subassemblies were manufactured by SOP-Metal Oy and Easy-Systems Oy. A camera and torque transducers were used to record the results.

The final result of the thesis was a functional testbench that meets the requirements which can be used to test almost all kinds of tools and record the necessary results from the tests.

---

Keywords Tools, testing, 3D printing, design, and manufacturing

# SISÄLLYS

## TIIVISTELMÄ

## ABSTRACT

1	JOHDANTO.....	12
1.1	Wärtsilä Oyj.....	14
1.1.1	Wärtsilä Sustainable Technology Hub (STH).....	15
1.1.2	The Wärtsilä Hub for additive manufacturing (WHAM) .....	16
2	SUUNNITTELU.....	19
2.1	Aikataulu ja resurssienhallinta.....	19
2.2	Tutkimustyö .....	21
2.2.1	Työkaluihin kohdistuvat voimat.....	23
2.2.2	Vääntömomentti.....	24
2.2.3	Vääntömomenttianturi .....	26
2.2.4	Muodonmuutos .....	27
2.2.5	Pascalin laki .....	29
2.2.6	3D-Tulostus .....	30
2.2.7	FEM-lujuuslaskenta.....	30
2.3	Tuoteohjelma ja vaatimukset .....	37
2.4	Konseptit.....	38
2.4.1	Valmis laite.....	38
2.4.2	Hytorc.....	39
2.4.3	Hydraulinen prässä.....	40
2.5	Systemi.....	45
2.6	Testipenkin 3D-mallinnus .....	46
2.7	Testipenkin kehitys alusta loppuun .....	49
2.8	Testipenkin rakenne.....	51
2.9	Modulaarisuus .....	52
2.10	Konfiguraatiot ja simulointi .....	53
2.11	Detalji .....	57
3	VALMISTUS .....	58
3.1	Easy-Systems.....	58

3.2	SOP-Metal .....	59
3.2.1	Teräsosien leikkaus .....	59
3.2.2	Särmäys .....	60
3.2.3	Sahaus ja poraus .....	62
3.2.4	Jyrsintä .....	62
3.2.5	Hitsaus.....	63
3.2.6	Maalaus.....	64
3.3	3D-tulostus.....	64
3.3.1	Testipenkkiin muokattu momenttiväännin .....	66
4	KOKOONPANO.....	67
4.1	Ohjeet .....	67
4.2	Biltema 20 TON hydraulinen prässä .....	67
4.3	Alumiiniprofiili suojat.....	68
4.4	Jigi ja työkalutuet .....	71
4.5	Valmis testipenkki .....	72
5	TESTAUS.....	77
5.1	Työkalut.....	77
5.1.1	Perinteiset työkalut.....	77
5.1.2	3D-tulostettu antureitten työkalu .....	79
5.2	Tulokset.....	79
5.2.1	Perinteiset työkalut.....	79
5.2.2	3D-tulostettu antureitten työkalu .....	80
6	YHTEENVETO JA JATKOKEHITYS .....	82
	LÄHTEET .....	84
	LIITTEET .....	86

## KUVIO- JA TAULUKKOLUETTELO

<b>Kuva 1.</b> Wärtsilän tuotteita. /4/.....	15
<b>Kuva 2.</b> Sustainable Technology Hub. /6/.....	16
<b>Kuva 3.</b> Yritykset, jotka tekevät yhteistyötä Finnish Additive Manufacturing Ecosystem kanssa. /7/.....	17
<b>Kuva 4.</b> WHAM, 3D-tulostettuja osia. /7/.....	18
<b>Kuva 5.</b> WHAM, metallista 3D-tulostettuja erikoistyökaluja. /7/.....	18
<b>Kuva 6.</b> Erilaisia testipenkkien aiheita. /7/.....	22
<b>Kuva 7.</b> Vääntömomentin vektorikuva. /10/.....	25
<b>Kuva 8.</b> Akselin vääntyminen. /12/.....	26
<b>Kuva 9.</b> Venymäliuskan toimintaperiaate. /12/.....	27
<b>Kuva 10.</b> Venymäkäyrän alueet ja vaiheet. /13/.....	28
<b>Kuva 11.</b> WHAM, testattu 3D-tulostettu anturien erikoistyökalu. /7/.....	28
<b>Kuva 12.</b> Pascalin laki, visualisointi. /14/.....	29
<b>Kuva 13.</b> Testipenkin kameran kiinnikkeen 3D-tulostus.....	30
<b>Kuva 14.</b> Etteplan Oy FEM-lujuuslaskentarataportti, johdanto. /17/.....	32
<b>Kuva 15.</b> Etteplan Oy FEM-lujuuslaskentarataportti, ei analysoitavat komponentit. /17/.....	32
<b>Kuva 16.</b> Etteplan Oy FEM-lujuuslaskentarataportti, materiaalien ja kuormitustapauksien määrittely. /17/.....	33
<b>Kuva 17.</b> Etteplan Oy FEM-lujuuslaskentarataportti, geometrian ja rajoitteiden määrittely /17/.....	34
<b>Kuva 18.</b> Etteplan Oy FEM-lujuuslaskentarataportti, hitsauksien määrittely. /17/.....	34
<b>Kuva 19.</b> Etteplan Oy FEM-lujuuslaskentarataportti, kuormitusten määrittely. /17/.....	34
<b>Kuva 20.</b> Etteplan Oy FEM-lujuuslaskentarataportti, rajoitteet. /17/.....	35
<b>Kuva 21.</b> Etteplan Oy FEM-lujuuslaskentarataportti, tulokset jännityskeskittymät. /17/.....	36
<b>Kuva 22.</b> Etteplan Oy FEM-lujuuslaskentarataportti, tulokset pulttien rasitukset. /17/.....	36

<b>Kuva 23.</b> Etteplan Oy FEM-lujuuslaskentaraaportti, johtopäätökset. /17/.....	37
<b>Kuva 24.</b> Mittauksien tarkkuusvaatimukset. /7/ .....	38
<b>Kuva 25.</b> Instron MT Torsion testing machine. /18/.....	38
<b>Kuva 26.</b> Hytorc hydraulisia pulttien kiristyslaitteita. /19/.....	39
<b>Kuva 27.</b> Biltema 20 TON hydraulinen prässä. /20/ .....	40
<b>Kuva 28.</b> Vääntömomentin laskeminen voima-anturin avulla. /9/ .....	42
<b>Kuva 29.</b> Vääntömomentin laskeminen paineen avulla. /9/ .....	42
<b>Kuva 30.</b> TI-Nspire-laskuri. ....	43
<b>Kuva 31.</b> Laipallinen vääntömomenttianturi ja työkaluadapterit. ....	44
<b>Kuva 32.</b> Laipallisten antureitten kiinnikelaippa. ....	45
<b>Kuva 33.</b> Norbar staattisen anturin runko. ....	45
<b>Kuva 34.</b> Norbar T-Box 2 käyttöliittymä. ....	46
<b>Kuva 35.</b> Testipenkki alkuvaiheessa.....	49
<b>Kuva 36.</b> Testipenkki keskivaiheessa. ....	50
<b>Kuva 37.</b> Testipenkki viimeinen versio.....	51
<b>Kuva 38.</b> Testipenkki kokonaisuus, piirustus. ....	52
<b>Kuva 39.</b> Testipenkin säädöt eri työkaluille. ....	53
<b>Kuva 40.</b> Työkalutukien säätö. ....	53
<b>Kuva 41.</b> Testipenkin säädettävyys kiintoavaimelle. ....	54
<b>Kuva 42.</b> Testipenkin säädettävyys hylsulle. ....	55
<b>Kuva 43.</b> Anturin jigi ja erikokoiset pitimet. ....	56
<b>Kuva 44.</b> Erikokoiset työkaluadapterit.....	56
<b>Kuva 45.</b> Foscam R4 kameran ja mittaruudun testaus. ....	56
<b>Kuva 46.</b> Työkalun testaamisen simulointi. ....	57
<b>Kuva 47.</b> Testipenkin suojat. ....	58
<b>Kuva 48.</b> SOP-Metal, leikattuja ja särmättyjä testipenkin osia.....	59
<b>Kuva 49.</b> Ultracut Oy, vesileikkuri. ....	60
<b>Kuva 50.</b> SOP-Metal, testipenkin osan särmäys. ....	61
<b>Kuva 51.</b> Särmätty alusta. ....	61
<b>Kuva 52.</b> Alustan rungon sahatut ja poratut neliöputket.....	62

<b>Kuva 53.</b> Jyrsityt työkalujen pitimet. ....	63
<b>Kuva 54.</b> Hitsattu jigi ja muita hitsattuja osia. ....	63
<b>Kuva 55.</b> Pikakiinnikkeen tulostus ABS-materiaalista Raise3D Pro2 Plus 3D-tulostimella. ....	64
<b>Kuva 56.</b> Pikakiinnikkeen sovittelua antureitten näyttöön. ....	65
<b>Kuva 57.</b> FORTUS 400 MC 3D-tulostimella tulostettu solidi ABS-pikakiinnike. ....	65
<b>Kuva 58.</b> Näytön PLA-materiaalista tulostettu pikakiinnike. ....	66
<b>Kuva 59.</b> Testipenkkiin muokattu momenttiväännin. ....	66
<b>Kuva 60.</b> Biltema 20 TON hydraulisen prässin osat. ....	67
<b>Kuva 61.</b> Biltema 20 TON hydraulinen prässi puoliksi koottuna. ....	68
<b>Kuva 62.</b> Koottu Biltema 20 TON hydraulinen prässi. ....	68
<b>Kuva 63.</b> Alumiiniprofiilien liitostapa. ....	69
<b>Kuva 64.</b> Suojien osia. ....	69
<b>Kuva 65.</b> Levyjen asennus suojan runkoon. ....	69
<b>Kuva 66.</b> Suojien asennus testipenkkiin. ....	70
<b>Kuva 67.</b> Valmiita testipenkin teräsosia. ....	71
<b>Kuva 68.</b> Laipallinen anturi kiinnitettynä. ....	71
<b>Kuva 69.</b> Staattinen anturi kiinnitettynä. ....	72
<b>Kuva 70.</b> Alusta ja sen runko. ....	73
<b>Kuva 71.</b> Alusta koottuna. ....	73
<b>Kuva 72.</b> Testipenkin alustan asennus. ....	74
<b>Kuva 73.</b> Valmis testipenkki edestä ja takaa. ....	75
<b>Kuva 74.</b> Testipenkki sivusta. ....	76
<b>Kuva 75.</b> Testissä 19 mm kiintolenkkiavain. ....	77
<b>Kuva 76.</b> Testissä 30 mm kiintolenkkiavain. ....	78
<b>Kuva 77.</b> Vääntimen ja pitkän jatkon testaaminen. ....	78
<b>Kuva 78.</b> 3D-tulostettu antureitten työkalun testaus. ....	79
<b>Kuva 79.</b> Pitkän jatkon muodonmuutos. ....	80
<b>Kuva 80.</b> Vääntimen muodonmuutos. ....	80
<b>Kuva 81.</b> 3D-tulostettu antureitten työkalun maksimivääntömomentti. ....	81



<b>Kuva 82.</b> 3D-tulostettu antureitten työkalun muodonmuutos. ....	81
<b>Taulukko 1.</b> Ulrich & Eppingerin tuotekehitysprosessin vaiheet. /8/ .....	19
<b>Taulukko 2.</b> Prässien vertailua.....	41

## **LIITELUETTELO**

**LIITE 1.** Testipenkin kokoonpanopiirustukset

**LIITE 2.** Testipenkin FEM-Raportti

**LIITE 3.** Testipenkin käyttöohjeet

## **LYHENTEET JA TERMIT**

STH= Sustainable Technology Hub

FEM= Finite element method

DFMA= Design for manufacture and assembly

Jigi= Teline tai apukehikko

3D-Tulostus= Materiaalia lisäävä valmistustekniikka

WHAM= Wärtsilä Hub For Additive manufacturing

AM-Campus= Additive manufacturing Campus

DXF= Drawing Exchange Format

FAME= Finnish Additive Manufacturing Ecosystem

3D= Kolmiulotteinen

2D= Kaksiulotteinen

Logiikka= Tietyn loogisen päättelysystemin teoreemojen joukko

PLA= Polylaktidi

Simulaatio= Malli tai menetelmä, jolla jäljennetään todellisen tilanteen tai ilmiön toiminta

CNC= Tietokoneohjattu numeerinen ohjaus

## 1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tarkoituksena oli suunnitella, valmistaa (WHAM) AM-Campukselle vaatimusten mukainen 3D-tulostettujen työkalujen testipenkki ja tehdä sillä testejä. 3D-tulostetuille työkaluille tehdään topologista optimointia, lujuuslaskentaa FEM-ohjelmilla ja aikaisemmin ne testattiin pelkästään käytännössä tuotannossa. Aikaisempi työkalujen käytännön testaus toteutettiin momenttivääntimen avulla, eli sopivan kokoinen pultti laitettiin ruuvipenkkiin kiinni ja pultin kantaan työkalu kiinni. Sitten momenttivääntimeen asetettiin haluttu vääntömomentti ja työkalua väännettiin momenttivääntimellä, kunnes asetettu momentti saavutettiin. Samalla kun työkalua väännettiin, tutkittiin mahdollisia muodonmuutoksia. Tätä samaa toimintaperiaatetta hyödynnettiin testipenkin suunnittelussa.

Testipenkin tarkoitus on tehdä työkalujen testaamisesta turvallista, nopeaa ja saada testeistä tuloksia ylös. Testeissä on tarkoitus testata työkalun suunniteltua maksimi vääntömomenttia, eikä rikkoa työkaluja. Testipenkeissä työkalut voivat kuitenkin rikkoontua testattaessa, joten tämä piti ottaa suunnittelussa huomioon. Tuloksien avulla voidaan tutkia työkalujen kestävyyttä, toimivuutta syvemmin ja saada tietoja mahdollisia parannuksia varten. Talteen otettavat tulokset olivat vääntömomentin mittaaminen ja työkalujen muodonmuutoksien mittaaminen. Vääntömomenttia mitattiin vääntömomentti antureilla. Muodonmuutoksia tutkittiin kameralla ja mitattiin mittaruudukon avulla. Moni epäilee vielä 3D-tulostettujen työkalujen kestävyyttä ja toimivuutta. Joten testipenkillä todistetaan, että 3D-tulostetut työkalut oikeasti kestävät ja toimivat vaatimusten mukaisesti.

Ensiksi katsottiin Wärtsilällä, että millaiset ovat tarkemmat vaatimukset ja kriteerit. Eli millainen testipenkin pitäisi olla, millaisia työkaluja testataan, mihin testipenkki sijoitetaan ja kuinka suuri budjetti on. Sitten tutkittiin, että onko työkalujen testipenkejä jo olemassa. Etsittiin standardeja käsityökalujen testaamiseen ja ko-

neen käyttöön liittyen. Selvitettiin työkalujen testaamisen fysikaalinen ja matemaattinen teoriapuoli, eli millaisia voimia testeissä voi olla ja kuinka voimat laskeaan.

Sitten keksittiin kolme eri konseptia työkalujen testaamiseen, joista valittiin yksi, jota alettiin kehittämään. Sopivan konseptin löydyttyä aloitettiin jo olemassa olevien komponenttien etsintä, testipenkin rakenteen ja kokoonpanon suunnittelu sekä mallinnus Siemens NX 3D -mallinnusohjelmalla. Olemassa olevat/tilattavat osat listattiin Excel-taulukoihin, jotka helpottivat osien tilausta ja taulukoista näkee tarvittaessa tulevaisuudessa varaosat. Testipenkin käytön simulointia suoritettiin liikuttamalla komponenttien 3D-malleja kokoonpanossa ja katsomalla että ne pääsevät liikkumaan esteettä. Ennen testipenkin osien valmistusta, yritettiin tehdä itse FEM-lujuuslaskelmia testipenkin osille. Mutta tuloksien epäluotettavuuden takia lujuuslaskenta ulkoistettiin. Itse tehtyjä lujuuslaskelmia kuitenkin hyödynnettiin suunnittelussa, esimerkiksi tutkimalla mitkä olisivat optimaalisimmat muodot eri komponenteille. Etteplan Oy teki lopulliset FEM-lujuuslaskelmat testipenkin rakenteelle, jolloin nähtiin, että onko rakenteen jäykkyys oikealla hehtaarilla ja tarvitseeko tehdä rakenteelle parannuksia.

Kaikille testipenkin valmistusta vaativille osille tehtiin omat osapiirustukset, pääkokoonpanopiirustus ja alikokoonpanopiirustukset sisältäen osaluettelot, jotka sisälsivät kaikkien komponenttien lisäksi niihin kuuluvat pultit ja mutterit. Valmistajille muokattiin alkuperäisistä piirustuksista omat kokoonpanopiirustukset, joista he näkivät mitkä osat pitää valmistaa ja maalata. Teräslevyosille tehtiin erikseen DXF-tiedostot, joista valmistaja sai siirrettyä piirustukset leikkurikoneelle ja niistä näki mistä kohdasta teräslevyt piti särmätä, jotta mitat pysyivät suunnitelmien mukaisesti. Hitsausrakenteita varten tehtiin omat piirustukset, joista hitsaaja näki kuinka kaikki hitsausta vaativat osat pitää hitsata.

Testipenkin valmistusta vaativat teräsosat valmistivat SOP-Metal Oy alihankkijoidensa kanssa. Easy-Systems Oy valmisti testipenkin suojat alumiiniprofiilista ja polykarbonaattilevyistä. Joitain osia valmistettiin itse. Testipenkin kokoonpano,

käyttöönotto ja testaus tehtiin itse Wärtsilällä. Testipenkille tehtiin käyttöohjeet suomeksi ja englanniksi, joka sisälsi kuvailun testipenkin eri komponenteista, mitä kaikkia eri toimintoja testipenkistä löytyy ja kuinka käyttää testipenkkiä turvallisesti.

### **1.1 Wärtsilä Oyj**

Wärtsilä Oyj on suomalainen monikansallinen teknologiayhtiö, joka on erikoistunut meri- ja energiateollisuuden ratkaisuihin. Yhtiöllä on yli 180 vuoden historia ja se on vakiinnuttanut asemansa yhtenä maailman johtavista toimijoista näillä aloilla. Yhtiön asiakkaita ovat laivavarustamot, energiayhtiöt ja teollisuusyritykset. Pääkonttori sijaitsee Helsingissä, Suomessa ja päätuotanto sijaitsee Vaasassa, Suomessa. Lisäksi Wärtsilällä on toimipisteitä ympäri maailmaa. /1/

Wärtsilä Oyj:n liiketoiminta jakautuu kolmeen pääalueeseen Wärtsilä Energy, Wärtsilä Marine Power ja Wärtsilä Marine Systems. /1/ Wärtsilä Energy tarjoaa älykkäitä energiaratkaisuja, jotka kattavat sähköntuotannon ja energianhallinnan. Yhtiö valmistaa kaasumootoreita ja muita voimalaitoslaitteita, jotka ovat erityisen suosittuja sähköntuotannossa ja kaukolämmön tuotannossa. Wärtsilän energiateknologia tukee myös uusiutuvien energialähteiden integrointia perinteiseen voimalaitosinfrastruktuuriin. /2/ Wärtsilä Marine Power on meriteollisuuden johtava toimittaja, joka tarjoaa moottoreita, voimansiirtoratkaisuja ja automaatiojärjestelmiä. /3/ Wärtsilä Marine Systems tarjoaa meriteollisuuden ratkaisuja, kuten jäähdytysjärjestelmiä ja polttoainejärjestelmiä. /3/ Näiden pääalueiden lisäksi on Wärtsilä Portfolio Business, joka tarjoaa erilaisia palveluita, kuten huolto- ja kunnossapitopalveluita sekä varaosia ja lisävarusteita. /1/

## Products

Wärtsilä South Korea offers a wide range of innovative, high-performance products ranging from Engines and Generating Sets, Exhaust Gas Cleaning, Electrical & Automation, Gas Solutions, Propulsors & Gears, Seals & Bearings and more...



### Engines and generating sets

Our portfolio of engines for marine applications



### Electric shipping and hybrid ships

Electrical solutions enabling marine decarbonisation



### Propulsors and gears

A broad range of solutions comprising gears, propellers and thrusters



### Automation

Integrated and exceedingly user-friendly automation, monitoring and control systems available in a range...



### Ballast water management

Choice of AQUARIUS® systems utilising UV or EC treatment



### Dynamic positioning

Practical, well-engineered sophisticated DP system offering precision, reliability, and confidence...



### Wärtsilä Exhaust Treatment Equipment

Designed to meet the needs of our customer's, we can adapt our...



### Freshwater generation

Unique Wärtsilä freshwater production system offers one ton per day fuel savings



### Gas solutions

Services and products for all phases of the LNG lifecycle that cover the entire gas value chain



### Navigation

Products and solutions for navigation and enhancing comfort, safety and security on board



### Shaft line solutions

Reliable & easy to maintain from the world's leading supplier

## Kuva 1. Wärtsilän tuotteita. /4/

### 1.1.1 Wärtsilä Sustainable Technology Hub (STH)

Wärtsilä Sustainable Technology Hub STH on uusi tulevaisuuden, tutkimuksen, tuotekehityksen ja tuotannon keskus, joka sijaitsee Vaasassa Vaskiluodossa. STH valmistui ja avattiin vuonna 2022. STH on vielä osittain käyttöönottoaiheissa, joten kaikki ei ole vielä aivan täysin valmista. Yksi isoimmista päämääristä on hiilidi-

oksidipäästöjen vähentäminen meri- ja energiasektoreilla. Joustavat valmistusjärjestelmät, robotiikka sekä materiaalia lisäävä valmistustekniikka ovat kiinteänä osana. Data-analysointi on tärkeässä roolissa STH:n teknologiakeskuksessa ja kerättyä dataa hyödynnetään elinkaarien maksimointiin.

Vuonna 2022 kaikki Wärtsilän toiminnot Vaasan keskustasta ja logistiikka- ja huoltotyöpajatoiminnot Vaasan Runsorista siirrettiin uuteen STH:n teknologiakeskukseen. Kokonaisinvestointi oli yli 200 miljoonaa euroa, josta 83 miljoonaa euroa on sijoitettu STH:n moderniin testaus- ja tuotantotekniikkaan. /5/



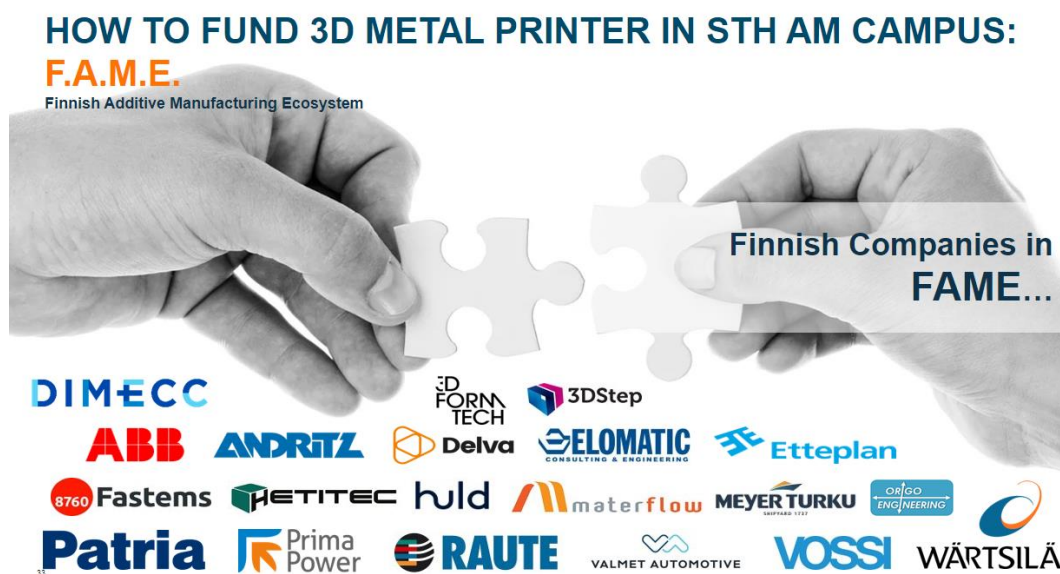
**Kuva 2.** Sustainable Technology Hub. /6/

### **1.1.2 The Wärtsilä Hub for additive manufacturing (WHAM)**

Wärtsilä Oy on kehittänyt materiaalia lisäävän valmistuksen keskuksen WHAM AM-Campus Vaasaan Vaskiluotoon STH:lle. AM-Campus on suunniteltu vastaamaan teollisuuden tarpeisiin 3D-tulostuksen avulla, tällä tavalla voidaan kokeilla ja kehittää uusia tuotteita nopeasti ja kustannustehokkaasti. AM-Campuksen tavoitteena on myös tarjota asiakkaille uusia ratkaisuja, joita ei ole aiemmin ollut



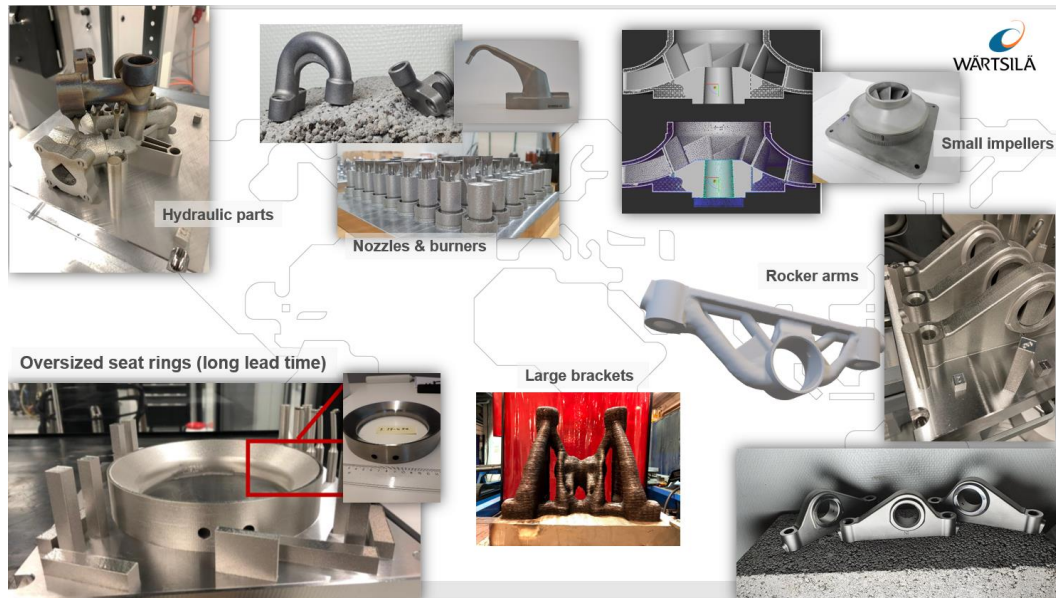
saatavilla. Koko WHAM-tiimi on sisäinen, ensimmäinen versio on perustettu loppuvuonna 2018 ja vuonna 2023 tiimissä toimi aktiivisesti 10 henkilöä. AM-Campus tekee yhteistyötä, jakaa omaisuuttaan ja toimintaansa Finnish Additive Manufacturing Ecosystem (FAME) kanssa. FAME tekee yhteistyötä myös monen muun yrityksen kanssa, kuten **kuvasta 3** näkee. Tämä mahdollistaa erilaisten yritysten yhteistoiminnan. /7/



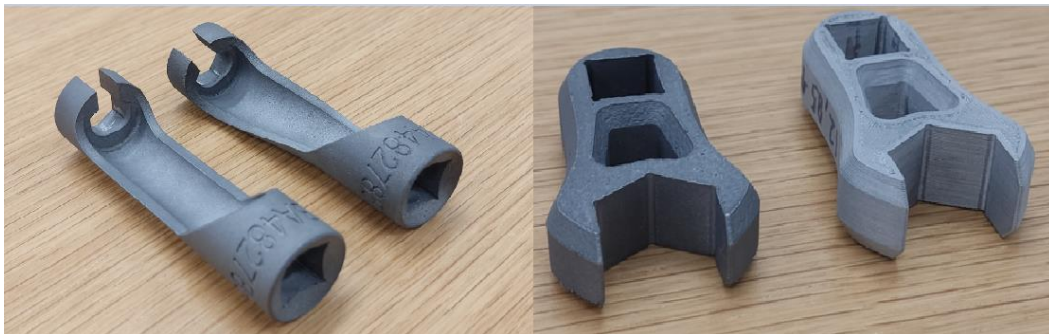
**Kuva 3.** Yritykset, jotka tekevät yhteistyötä Finnish Additive Manufacturing Ecosystem kanssa. /7/

AM-Campuksessa käytetään edistyksellistä teknologiaa, joka mahdollistaa erittäin monimutkaisten osien valmistuksen. Tämä tehdään käyttämällä metalli- ja muovipohjaista 3D-tulostusta sekä muita materiaalia lisääviä valmistusmenetelmiä. AM-Campuksen suurin etu on sen kyky nopeuttaa tuotekehitysprosessia, sillä se mahdollistaa monimutkaisten osien valmistuksen lyhyessä ajassa. Tämä puolestaan vähentää tuotekehityksen kustannuksia ja parantaa tuotteiden toimitusaikataulua. Pääasialliset tuotekehityksaiheet ovat moottorien osat, moottorien kokoonpanoon liittyvät asiat ja erilaiset prototyypit. **Kuvissa 4 ja 5** näkyy erilaisia metallista tulos-

tettuja osia. Moottorien kokoonpanoon liittyen voidaan 3D-tulostaa erilaisia jigejä, nostotyökaluja ja asennustyökaluja. Haastavampia 3D-tulosteita kuten erilaisia työkaluja voidaan myös teettää alihankkijalla. /7/



**Kuva 4.** WHAM, 3D-tulostettuja osia. /7/



**Kuva 5.** WHAM, metallista 3D-tulostettuja erikoistyökaluja. /7/

## 2 SUUNNITTELU

Suunnitteluun sovellettiin Ulrich ja Eppingerin tuotekehitys menetelmää. Ulrich & Eppingerin tuotekehitysprosessi on suosittu ja laajasti käytetty menetelmä uusien tuotteiden kehittämisessä. Koko prosessi koostuu kuudesta vaiheesta **taulukon 1** mukaisesti.

**Taulukko 1.** Ulrich & Eppingerin tuotekehitysprosessin vaiheet. /8/

Vaihe	Kuvaus
1	Asiakkaan tarpeiden ymmärtäminen ja tuotteen tavoitteen määrittäminen. Kartoitetaan asiakkaan toiveet, joiden perusteella määritellään tuotteen keskeiset ominaisuudet.
2	Tuotevaatimusten määrittäminen, joihin sisältyvät tekniset, taloudelliset ja aikataululliset vaatimukset. Vaatimukset auttavat luomaan selkeän suunnitelman tuotteen kehitykselle ja varmistamaan, että tuote vastaa asiakkaiden tarpeita.
3	Konseptin kehitys ja arviointi. Tavoitteena on löytää parhaiten asiakkaiden tarpeita vastaava konsepti.
4	Paras konsepti valitaan ja edetään prototyyppien kehittämiseen. Prototyyppien avulla testataan tuotteen toiminnallisuutta ja käytettävyyttä sekä tarkistetaan, että tuote vastaa alkuperäisiä vaatimuksia.
5	Tuotteen kehitys, joka sisältää valmistuksen, testauksen ja markkinoinnin.
6	Tuotteen käyttö ja seuranta. Tämä vaihe auttaa varmistamaan, että tuote vastaa asiakkaan odotuksia ja että seuraavissa kehitysprojekteissa otetaan huomioon opitut asiat.

### 2.1 Aikataulu ja resurssienhallinta

Aluksi tehtiin projektisuunnitelma. Suunnitelmia ja aikatauluja tarkennettiin, kun saatiin Wärtsilältä tarkemmat vaatimukset, kriteerit ja kun osattiin arvioida, että kauanko mahdollisesti kestää projektin eri vaiheissa. Wärtsilällä varoiteltiin opinäytetyön alkuvaiheessa, että osien valmistuksessa ja komponenttien toimituk-

sisä voi kestää kauankin. Osien valmistukseen ja komponenttien tilauksien viivästymiseen varauduttiin antamalla näille tarpeeksi aikaa. Kaikki suunnitelmat ja tilaukset pyrittiin tekemään heti kerralla oikein, jotta välttyttäisiin ongelmilta ja lisätilauksilta.

Resurssienhallintaa varten tehtiin Excel-ohjelmaan TO-DO-lista, jossa oli lueteltu kaikki eri opinnäytetyön tehtävät, kaikki tehtävät oli värikoodattu tilanteen mukaan ja tehtäviin päivitettiin lisätietoa sen nykytilanteesta.

Budjetointia varten tehtiin Excel-ohjelmaan tilauslista, jossa oli lueteltu kaikki eri komponentit, kappalemäärä, yhteishinnat, linkki komponenttiin ja värikoodaus tilauksen tilanteen mukaan. Tilauslistaan lisättiin komponenttien lisäksi myös kaikki hyväksytyt tarjoukset, FEM-lujuuslaskennan hinta, sekä pultit ja mutterit. Tällä tavalla saatiin laskettua testipenkin kokonaishinta.

Testipenkin pultit ja mutterit luettiin kokoonpanopiirustuksista erikseen Excel-ohjelmaan bulkkilistaksi. Lista sisälsi kokonaismäärän, huomioitavat asiat kaikista pulteista ja muttereista. Kokonaismäärälistan lisäksi tehtiin bulkkilistaan erikseen listat kaikille eri alikokoonpanoille. Bulkkilistan avulla sai suunniteltua tarkemmin kaikki pultit ja mutterit eri kokoonpanoille. Tilauslista ja bulkkilista helpottivat huomattavasti tilauksien tekemistä. Listojen avulla sai kätevästi jaettua kaikki tarvittavat tiedot PDF-tiedostona. Tilauksien kanssa oli aika paljon byrokratiaa, mutta niistä selvittiin.

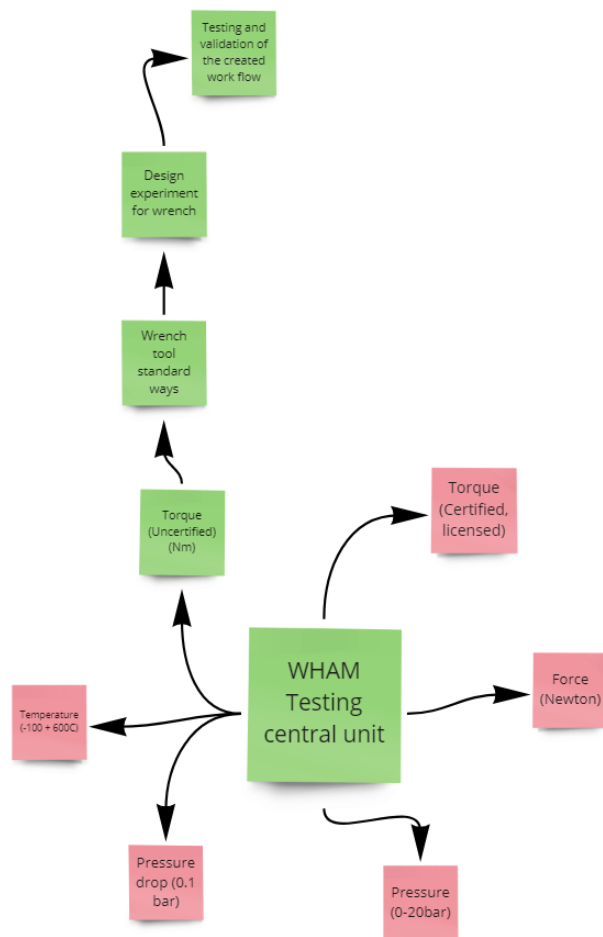
Dokumenttien hallintaan käytettiin Microsoft Onedrive-pilvipalvelua, jonka avulla sai kaikki tiedostot tallennettua automaattisesti tietokonepilveen. Onedrive-pilvipalvelu mahdollisti dokumenttien saatavuuden kätevästi kaikilla laitteilla ja dokumentit oli helppo jakaa muille tarkasteltavaksi ja muokattavaksi. Varmuuskopioita dokumenteista tallennettiin tietokoneiden kovalevyille.

Opinnäytetyön ohjaajan kanssa kommunikointiin käytettiin Wihi-palvelua. Wärtsilän yhteyshenkilöiden kanssa käytettiin Microsoft Teams-palvelua. Muut asiat hoidettiin kasvotusten, puhelimitse tai sähköpostilla. Palavereja ja esityksiä pidettiin etänä sekä paikan päällä, joissa esiteltiin sen hetkisiä suunnitelmia, tilannetta, kysyttiin mielipiteitä ja tehtiin päätöksiä.

## 2.2 Tutkimustyö

Opinnäytetyön alkuvaiheessa pidimme Wärtsilän yhteyshenkilöiden kanssa etäpalaverin, jossa esiteltiin useampia erilaisia **kuvan 6** mukaisia testiaihteita. Aiheina oli 3D-tulostettujen osien koeponnistusta vedellä, testaamista eri lämpötiloilla, testaamista tyhjiössä ja 3D-tulostettujen työkalujen testaamista sekä suunnittelua. Sitten menttiin katsomaan paikan päälle Wärtsilälle, että millaiset ovat tarkemmat vaatimukset ja kriteerit. Paikan päällä selvisi lähes heti mikä on tärkein senhetkinen tarvittavin testaamisen aihe, eli erilaisten työkalujen testaus. Opinnäytetyön

alkuvaiheessa päätettiin, että keskitytään pelkästään 3D-tulostettujen työkalujen testipenkkiin, eikä mietitä muita esiteltyjä aiheita.



**Kuva 6.** Erilaisia testipenkkien aiheita. /7/

Sitten tutkittiin mahdollisia testattavia työkaluja, millainen testipenkin pitäisi olla, mihin testipenkki sijoitetaan ja millainen budjetti on. Testipenkki sijoitettiin Wärtsilän STH AM-Campuksen tiloihin. AM-campuksen tilat olivat vielä kesken, joten suunniteltu paikka ei mahdollisesti ole pysyvä.

Tutkittiin olemassa olevia testipenkkejä, millaisia standardeja on käsityökalujen testaamiseen ja koneenkäyttöön liittyen. Selvitettiin työkalujen testaamisen fysi-

kaalinen ja matemaattinen teoriapuoli. Tutkimuksien tuloksena oli, että tämmöistä vastaavaa testipenkkiä ei virallisesti ole ja lähes kaikki löytyneet viittaavat standardit liittyivät pelkästään momenttivääntimien kalibrointiin. Mahdolliset testipenkit ovat eri yrityksillä sisäistä ja salaista tietoa. Työkalujen valmistajilta Bahco:lta ja Stahlwille:ltä tiedusteltiin, että kuinka he suorittavat työkalujen testaamista. He vastasivat, että tämä on salaista tietoa, jota ei voida antaa yrityksen ulkopuolisille.

Sitten lisätutkimisen tuloksena löytyi suomalainen YouTube-kanava Hydraulic Press Channel, joka tunnetaan erityisesti siitä, että he puristavat erilaisia esineitä hydraulisella prässillä ja kuvaavat videoita niiden tuhoutumisesta. He ovat tehneet erilaisten työkalujen testaamisesta videoita. Heidän testivideoissansa käytetään voiman tuottajana hydraulista prässä, työkaluille on tehty testijigi, jossa on työkaluadapterit erikokoisille työkaluille. He ovat myös tehneet heidän testijiginsä valmistuksesta videon. Tätä konsepti ideaa hyödynnettiin opinnäytetyössä. /9/

Kaikista kokoonpanon malliin tarvittavista jo olemassa olevista osista mitattiin tarvittavat mitat, geometriat ja ne 3D-mallinnettiin testipenkin kokoonpanoon. Mittattavat osat olivat: hydraulinen prässä, vääntömomentti anturit ja niiden kiinnikkeet, Wärtsilä moottorin nokkarulla, laakerit, momenttiväännin, Foscam-kamera ja sen kiinnikkeet. 3D-mallintamiseen käytettiin apuna valokuvamallinnusta. Eli otettiin useita kuvia osasta eri kuvakulmista, ja näiden kuvien avulla pystyttiin luomaan alustava 3D-malli, jota voitiin sitten hienosäätää ja tarkentaa 3D-mallinnusohjelmassa manuaalisesti. Mallinnettuja osia tulostettiin paperille oikeassa mitta-kaavassa, jolloin pystyttiin sovittelemaan osia. Enimmäkseen mittaamiseen käytettiin rullamittaa ja digitaalista työntömittaa.

### **2.2.1 Työkaluihin kohdistuvat voimat**

Kiintoavain ja hylsytyyppisten työkalujen testaamisessa tapahtuu väännön lisäksi myös aksiaalista ja säteittäistä voimaa. Säteittäistä voimaa tapahtuu enimmäk-

seen hylsytyyppisillä työkaluilla, koska mitä pitempi vääntöakseli on sitä kauemmas vääntökohta siirtyy ja vääntökohta on tällöin tavallaan ilmassa. Aksiaalista voimaa tapahtuu, kun työkalut voivat mahdollisesti irrota työkaluadapterista testattaessa. Tämän takia kehiteltiin työkaluille tuet. Hylsytyyppisille työkaluille kehiteltiin omat laakeroidut tuet, tukemaan säteittäisiä voimia ja laakerit vähentämään kitkaa. Kaikille työkaluille kehiteltiin yhteinen työkalutuki aksiaalisille voimille, joka estää työkalun irtoamista työkaluadapterista. Kiintoavain tyyppisille työkaluille kehitettiin prässin mäntään kiinnitettävä pidin, joka estää työkalun kääntymistä ja irtoamista työkaluadapterista. Muita voimia tarkasteltiin tarkemmin Etteplan Oy:n tekemässä FEM-lujuuslaskenta raportissa.

### 2.2.2 Vääntömomentti

Vääntömomentti kuvaa voimaa, joka pyrkii kiertymään kohteen ympäri, kuten **kuvasta 7** nähdään. Se on erityisen tärkeä käsite insinööritieteissä, erityisesti voimansiirrossa ja mekaniikassa.

Vääntömomentti on mittaussuure, joka ilmaisee kiertoliikkeen aiheuttavaa momenttia, ja sen yksikkö on newtonmetri (Nm). Se lasketaan vääntävän voiman ja vipuvarren pituuden tulosta. Vipuvarteen kohdistuvan voiman kulma vaikuttaa myös vääntömomentin suuruuteen. /10/

$$T = F \cdot r \cdot \sin(\theta), \text{ jossa}$$

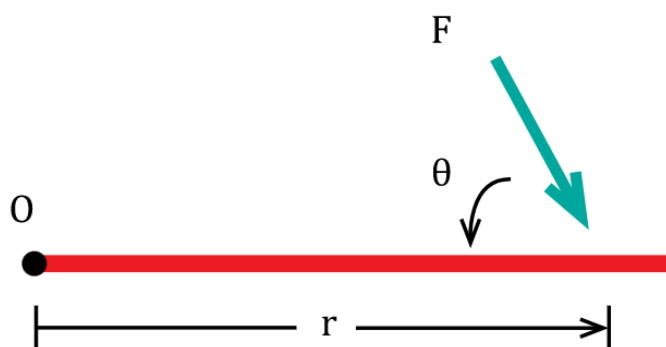
T = Vääntömomentti (X)

F = Voima

r = Vipuvarren pituus

$\theta$  = Kulma vipuvarren ja voiman välillä





**Kuva 7.** Vääntömomentin vektorikuva. /10/

Vääntömomentin liittymistä työkaluihin ja kierrelitoksiin tutkittiin. Kiristysmomenttien käyttö on yleinen käytäntö monissa teollisuudenaloissa, kuten Wärtsilällä koneiden ja muiden kokonaisuuksien kokoonpanossa. Kierrelitosten kiristäminen tiettyyn momenttiin varmistaa, että osat ovat oikein kiinnitetty ja luotettavia.

Pultin kiristäminen tiettyyn momenttiin on tärkeää, koska se auttaa estämään pultin ylikiristymisen tai alikiristymisen. Jos pultti kiristetään liian kovaa, se voi vaurioittaa kiinnitettävää osaa tai jopa rikkoa pultin. Toisaalta, jos pultti on liian löysällä, se voi irrota tai aiheuttaa värähtelyjä, jotka voivat johtaa kiinnitettävän osan vaurioitumiseen. Oikea kiristysmomentti takaa myös, että kierrelitoksen saa auki vaurioitta. /11/

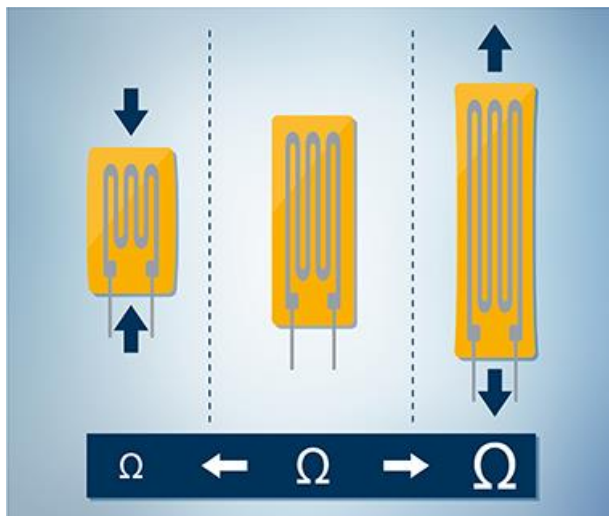
Pulttien kiristämiseen on laadittu omat momenttilistat, joissa on yleensä eritelty momentit pultin koon ja lujuuden mukaan. Kriittisten osien kokoonpanossa pulttien kiristämiseen voi olla olemassa myös tietty kiristyssekvenssi. Hyvä nyrkkisääntö on aina kiristää ristiin tyhjät pois ja sitten vasta kiristää ristiin lopulliseen momenttiin.

### 2.2.3 Vääntömomenttianturi

Vääntömomenttianturin toimintaperiaate perustuu yleensä kahden elementin välisten aksiaalisten liikkeiden havaitsemiseen. Tämä toteutetaan yleensä joko käyttämällä erityisiä jousia tai käyttämällä joustavaa materiaalia, joka taipuu voimien vaikutuksesta. Venymäliuska-anturit ovat yleisimpiä. Kun vääntömomenttia kohdistetaan tällaiseen rakenteeseen, se aiheuttaa venymistä, mikä muuttaa anturin resistanssia tai jännitettä, joka voidaan mitata tarkasti ja muuntaa sähköiseksi signaaliksi. Kuten **kuvista 8 ja 9** näkee. /12/



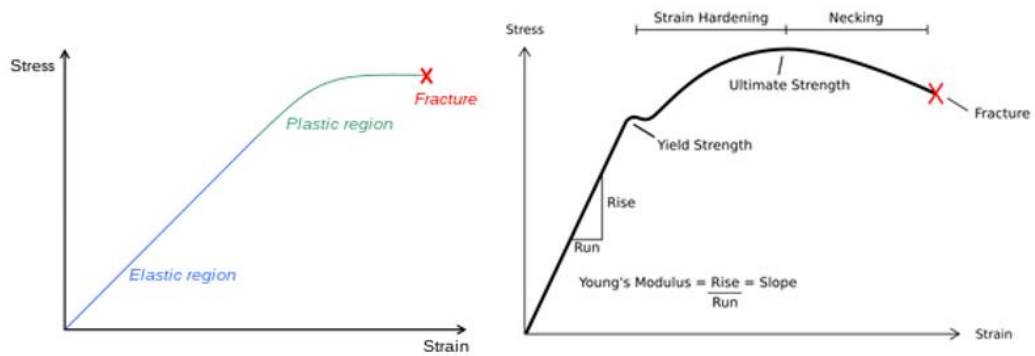
**Kuva 8.** Akselin vääntyminen. /12/



**Kuva 9.** Venymäliuskan toimintaperiaate. /12/

#### 2.2.4 Muodonmuutos

Muodonmuutos tarkoittaa kappaleen muodon tai koon muuttumista, kun kappaleeseen kohdistuu voimaa. Muodonmuutos voi olla joko elastista, eli voiman loputtua kappale palautuu alkuperäiseen muotoonsa tai plastista, eli kappale ei palaudu alkuperäiseen muotoonsa voiman loputtua. /13/ **Kuvassa 10** on venymäkäyrän alueet ja vaiheet. Näitä muodonmuutoksia testipenkissä tutkitaan ja mitataan. **Kuvassa 11** on testatulle työkalulle tapahtunut plastinen muodonmuutos.



**Kuva 10.** Venymäkäyrän alueet ja vaiheet. /13/



**Kuva 11.** WHAM, testattu 3D-tulostettu anturien erikoistyökalu. /7/

Muodonmuutos on tärkeä käsite materiaalitieteessä ja insinööritieteissä, joissa se liittyy usein materiaalin mekaanisiin ominaisuuksiin. Materiaalin muodonmuutos voi vaikuttaa kappaleen lujuuteen, kestävyteen ja joustavuuteen. Siksi pyritään ymmärtämään materiaalien muodonmuutoksia ja kehittämään materiaaleja, jotka olisivat mahdollisimman kestäviä ja joustavia. /13/

### 2.2.5 Pascalin laki

Pascalin laki on yksi fysiikan peruslaista, joka kuvaa nesteen tai kaasun paineen ja tilavuuden välistä suhdetta. Laki on nimetty ranskalaisen fyysikon ja matemaatikon Blaise Pascalin mukaan, joka tutki ilman painetta 1600-luvulla.

Lain mukaan paine on suoraan verrannollinen nesteen tai kaasun tilavuuteen, kuten **kuvas**sa 12 näkyy. Tämä tarkoittaa, että jos nesteen tai kaasun tilavuus kasvaa, paine vähenee, kun taas jos tilavuus pienenee, paine kasvaa.

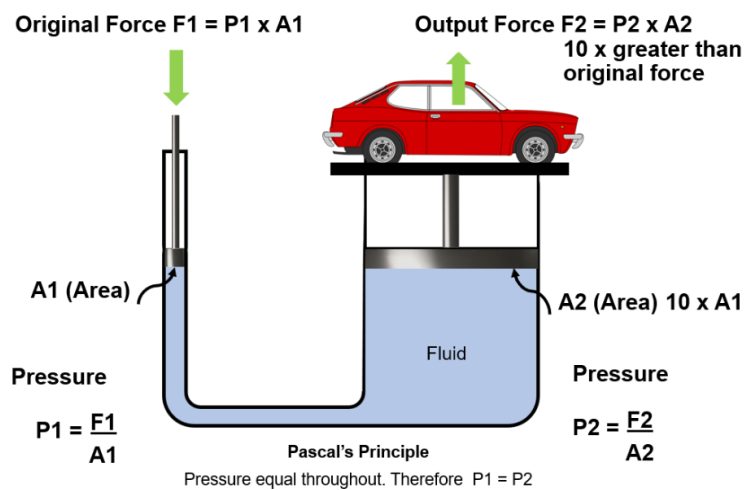
Pascalin lain sovellusalueita ovat muun muassa hydraulikka ja pneumatiikka, joissa nesteen tai kaasun painetta käytetään voiman välittämiseen. /14/

$$P = F/A, \text{ jossa}$$

$$P = \text{Paine}$$

$$F = \text{Voima}$$

$$A = \text{Pinta-ala}$$

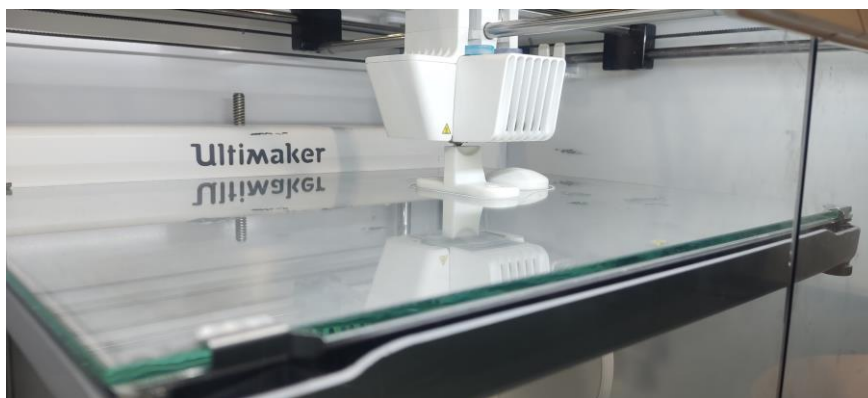


Kuva 12. Pascalin laki, visualisointi. /14/

### 2.2.6 3D-Tulostus

3D-tulostaminen eli materiaalia lisäävä valmistusmenetelmä on prosessi, jossa 3D-mallinnusohjelman avulla luodaan 3D-malli. Sitten tulostimen ohjainohjelmisto lukee 3D-mallin tiedot ja ohjaa tulostimen tulostuspäätä kerros kerrokselta, syöttäen suuttimen läpi sulatettua muovia tai muuta tulostusmateriaalia, joka sitten kovettuu.

Tulostusmateriaalin syöttö tapahtuu yleensä lankana, joka syötetään sulatinkammioon ja puristetaan ulos pienestä suuttimesta. 3D-tulostimia on kuitenkin monenlaisia, ja erilaiset materiaalit ja tekniikat voivat vaikuttaa tulostusprosessiin.



**Kuva 13.** Testipenkin kameran kiinnikkeen 3D-tulostus.

### 2.2.7 FEM-lujuuslaskenta

FEM (Finite Element Method) on menetelmä, jota käytetään lujuuslaskennassa ja monissa muissa insinööritieteissä. Se perustuu rakenteen jakamiseen pieniin alueisiin, joita kutsutaan elementeiksi. Nämä elementit on mahdollista laskea matemaattisilla yhtälöillä, jotka kertovat elementin käyttäytymisestä. Kun kaikki elementit on laskettu, ne yhdistetään kokonaisuudeksi, joka kuvaa koko rakenteen käyttäytymistä. Tämä mahdollistaa monimutkaisten rakenteiden analysoinnin ja suunnittelun.

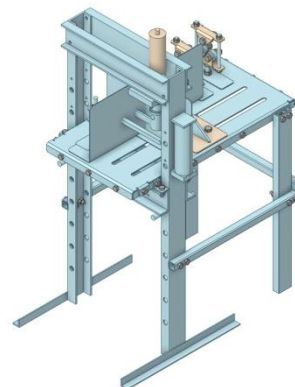
Ohjelmistojen avulla voidaan mallintaa erilaisia kuormitustilanteita, kuten staattisia tai dynaamisia kuormia, ja simuloida niiden vaikutusta rakenteisiin ja osiin. Tuloksena saadaan tarkka kuva siitä, miten materiaalit, rakenteet käyttäytyvät eri kuormitustilanteissa ja voidaan optimoida suunnittelua vastaamaan haluttuja vaatimuksia. /15/

Havainnollistamiseen on käytetty Etteplan Oy:n testipenkille tehdyn FEM-lujuuslaskennan raportin kuvia. Etteplan Oy on suomalainen teknisen suunnittelun ja asiantuntijapalveluiden tarjoaja. Yritys tarjoaa palveluitaan useilla eri toimialoilla, kuten teollisuudessa, energia-alalla, terveydenhuollossa, kuljetuksessa ja tietoliikenteessä. Etteplan on erikoistunut teknisen dokumentoinnin ja tuotekehityksen palveluihin, ja sen tarjoamia palveluita ovat muun muassa suunnittelu, simulointi, testaus ja asiantuntijapalvelut. /16/

Ensimmäinen vaihe on määrittää, että mikä on lujuuslaskennan aihe, kuinka kaikki toteutetaan ja mitä komponentteja analysoidaan. Ei analysoitavia komponentteja voi olla esimerkiksi kokoonpanon valmiit ostetut komponentit, joille on jo aikaisemmin tehty lujuuslaskelmat. Kuten **kuvissa 14 ja 15** näkyy.

## Introduction

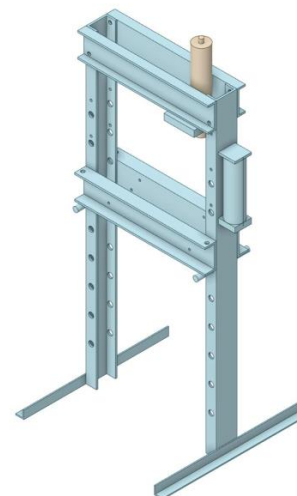
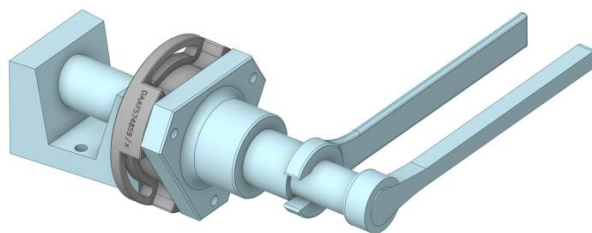
- Target of this study is to determine the static strength of test bench
  - Max testing torque is set to be 600 Nm
- Bolts and welds are analyzed according to Eurocode 3 EN1993-1-8
  - No fatigue analysis is conducted to the structure
- Analysis and geometry preparation preformed using
  - Ansys mechanical 2022 R2
  - SpaceClaim 2022 R2



**Kuva 14.** Etteplan Oy FEM-lujuuslaskentaraaportti, johdanto. /17/

## Components that are not analysed

- The press and its frame is not analyzed
- Also the sensors and tools tested are excluded.
- They are still modelled to help show real world behavior and to help determine and distribute the loads



**Kuva 15.** Etteplan Oy FEM-lujuuslaskentaraaportti, ei analysoitavat komponentit.

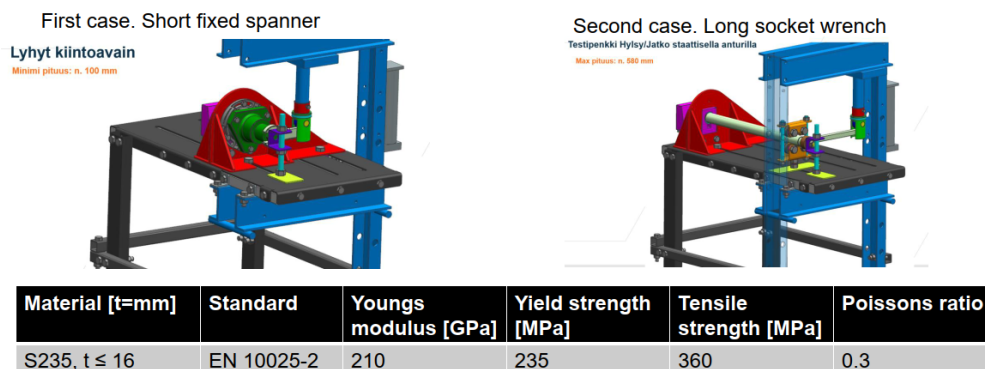
/17/



Seuraavaksi valitaan materiaalit, josta komponentit koostuvat ja määritellään kuormituspaukukset.

## Material properties and load cases

Two load cases were analysed. Both of them are presented in pictures below.

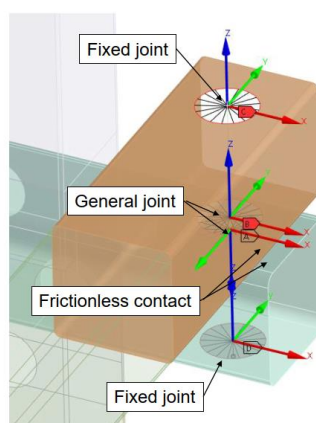


**Kuva 16.** Etteplan Oy FEM-lujuuslaskentaraapotti, materiaalien ja kuormituspauksien määrittely. /17/

Sitten määritellään mallin geometria, geometrian verkotus, liitokset, kuormitukset ja rajoitteet. Geometria yleensä tehdään pintamallinnuksena, jolla saadaan tehtyä mallista yksinkertainen kevyt malli. Tällä tavalla helpotetaan analysointia ja vähennetään tietokoneen prosessointikapasiteettia, joka taas nopeuttaa laskenta aikaa. Liitoksia voivat olla kokoonpanon osien pulttiliitokset, hitsausliitokset ja kitkaliitokset. Kuvissa **17** ja **18** näkyy geometria ja liitokset. Kuvissa **19** ja **20** näkyy kuormitukset ja rajoitteet.

## Geometry

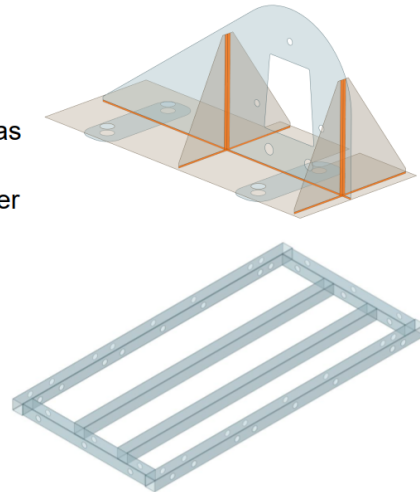
- Geometry was provided as a step file: "Testipenkki\_asm.step"
- Most of the geometry was converted to mid surfaces.
- Bolted joints were modelled using beam elements and Ansys joints
  - No pretension applied
  - Beam ends were set to be fixed to the edge they attach to
  - General joints that allow movement in the axial direction and rotation around the axial direction were set to possible shear planes as shown
- Welds were modelled using plate elements that use the a-dimension of weld as the plate thickness
- Appropriate contacts were modelled at locations where they were needed.
  - For example, there is a frictionless contact between the 2 profiles shown



**Kuva 17.** Etteplan Oy FEM-lujuuslaskentaratortti, geometrian ja rajoitteiden määrittely /17/

## Welds

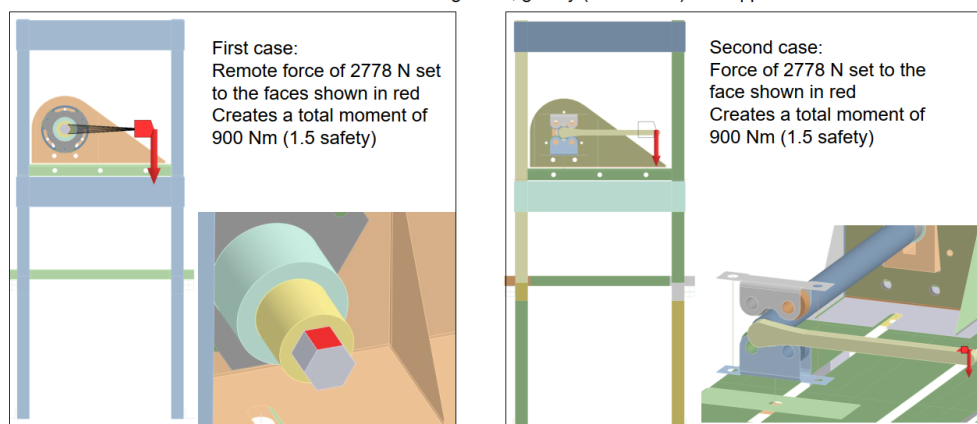
- The welds shown in orange are modelled as double sided a4 fillet welds
- The base frame part is also welded together with a4 fillet welds



**Kuva 18.** Etteplan Oy FEM-lujuuslaskentaratortti, hitsauksien määrittely. /17/

## Loads

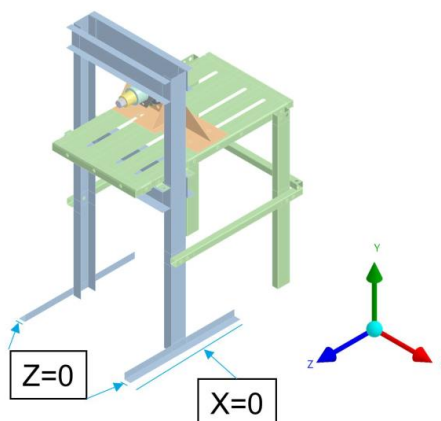
In addition to the working loads, gravity ( $9.81 \text{ m/s}^2$ ) was applied



**Kuva 19.** Etteplan Oy FEM-lujuuslaskentaratortti, kuormituksen määrittely. /17/

## Boundary conditions

- All the legs were supported in the y-direction
- Other boundary conditions shown in photo

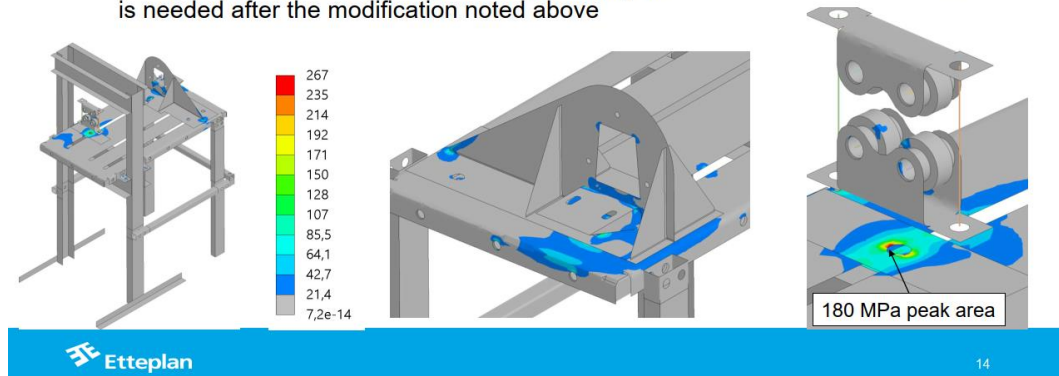


**Kuva 20.** Etteplan Oy FEM-lujuuslaskentaraaportti, rajoitteet. /17/

Kun määrittelyt ovat valmiita, FEM-ohjelma ratkaisee lineaarisen tai ei-lineaarisen yhtälöryhmän, joka kuvaa kohteen käyttäytymistä. Analyysin suorittamisen jälkeen tuloksia arvioidaan ja tulkitaan. Tämä vaihe sisältää yleensä tutkittavan kohteen muodonmuutoksien, jännityksien ja osien liitoksien arvioinnin sekä raportin kirjoittamisen **kuvien 21, 22 ja 23** mukaisesti.

## Results - second case, stresses

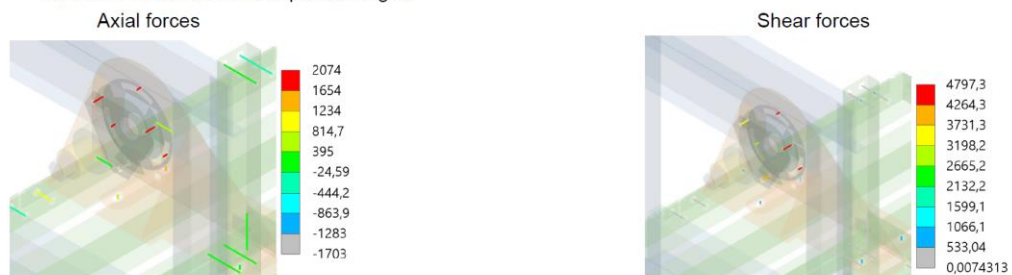
- The plate that holds the static torque sensor was reinforced with two 5mm plates as shown in photo (orange parts)
- The general stress state is low. No further analysis is needed after the modification noted above



**Kuva 21.** Etteplan Oy FEM-lujuuslaskentaraaportti, tulokset jännityskeskittymät. /17/

## Results – first case, bolts

Values of maximum loads can be seen in pictures below  
 These values translate to the following utilizations:  
 Slip resistance: 58%  
 Tension resistance: 2%  
 Shear resistance: 8%  
 Combined shear and tension: 10%  
 All these values are at acceptable ranges



**Kuva 22.** Etteplan Oy FEM-lujuuslaskentaraaportti, tulokset pulttien rasitukset. /17/

**Kuvassa 23** on kerrottu lujuuslaskennan johtopäätökset. Jännitykset materiaaleilla ovat hyväksyttävillä rajoilla. Jännitykset hitsausaumoissa ovat suhteellisen pieniä. Syvempää stressien analysointia ei tarvita. Kaikki pulttiliitokset ovat hyväksyttäviä

Eurocode 3 standardin mukaan. Staattisen vääntömomentti anturin L-tuki vahvistettiin kahdella jäykistelevyllä, koska ilman niitä jännitykset olisivat olleet liian suuria, eikä L-tuki olisi mahdollisesti kestänyt vaatimusten mukaisesti.

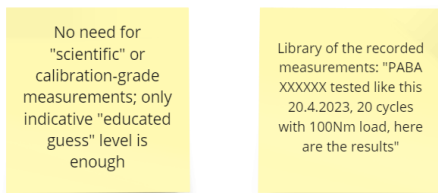
## Conclusions

- Stresses
  - Stresses at base material are at acceptable ranges
  - Stresses at welds are relatively low
  - No further analysis is needed for stress results
- Bolted connections
  - All bolted connections are acceptable when analyzed according to Eurocode 3
- The static torque analysis holder plate was reinforced with 2 stiffener plates

**Kuva 23.** Etteplan Oy FEM-lujuuslaskentaraaportti, johtopäätökset. /17/

### 2.3 Tuoteohjelma ja vaatimukset

Wärtsilä oli tavallaan jo valmiiksi suunnitellut tuoteohjelman. Tuoteohjelmana oli testipenkki, jolla voidaan testata erilaisia työkaluja käytännössä turvallisesti, nopeasti ja saada tuloksia talteen, eli vääntömomenttia ja muodonmuutoksia. Tuloksien tarkkuusvaatimus oli, että suuntaa antavat tulokset riittävät. Vaatimukset olivat aika selvät alusta lähtien ja annettiin aika lailla vapaat kädet testipenkin suunnitteluun ja valmistukseen. Vaatimuksena oli myös, että testipenkillä voidaan testata maksimissaan 400 mm pitkiä työkaluja ja testattavien työkalujen suuruuksiksi annettiin alustavasti 13, 24, ja 36 mm. Maksimi testattavaksi vääntömomentiksi annettiin 600 Nm.



**Kuva 24.** Mittauksien tarkkuusvaatimukset. /7/

## 2.4 Konseptit

Sopiva konsepti valittiin aika nopeasti opinnäytetyön alussa. Tämän takia muita keksittyjä konsepteja ei mietitty kovin paljoa. Muista konsepteista kyllä otettiin vaikutteita ja ideoita valittuun konseptiin.

### 2.4.1 Valmis laite

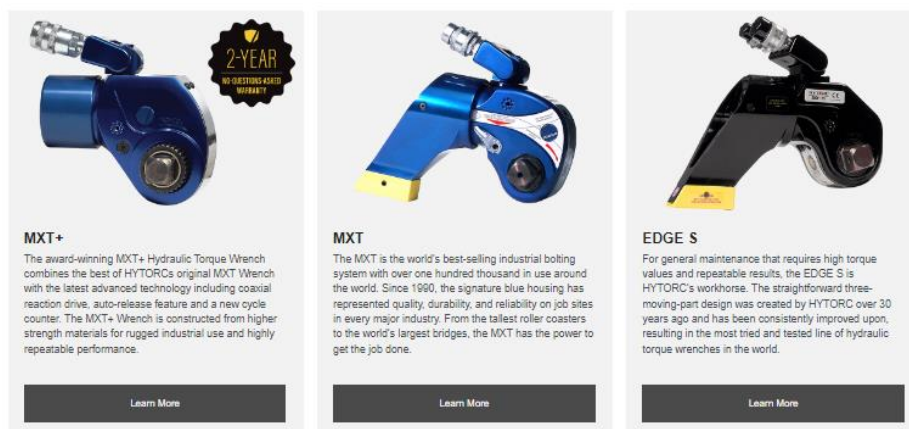
Valmis työkalujen testipenkki. Momenttivääntimien kalibrointilaite tai erilaisten materiaalien testauslaite. Kallis ja turhan vaikea muokata erilaisille työkaluille sopivaksi. Joten ei mietitty sen enempää. Otettiin kyllä vaikutteita suunnitteluun, esimerkiksi suojiin suunnittelussa ja vääntömomentin mittaamisessa.



**Kuva 25.** Instron MT Torsion testing machine. /18/

## 2.4.2 Hytorc

Jokin hydraulinen pulttien kiristyslaite. Kallis laite, epävarma että soveltuuko suunniteltuun käyttöön, pitäisi tehdä kokonaan oma runko alusta asti ja jigi. Vääntömomentin selvittäminen olisi onnistunut Hytorcin omasta momenttistasta. Momenttistassa on listattu vääntömomentit kiristyslaitteen paineen mukaan. Tätä paineesta vääntömomentin laskenta ideaa hyödynnettiin suunnittelussa.



Kuva 26. Hytorc hydraulisia pulttien kiristyslaitteita. /19/

### 2.4.3 Hydraulinen prässä



**Kuva 27.** Biltema 20 TON hydraulinen prässä. /20/

Parhaaksi konseptiksi valittiin hydraulinen prässä. Koska siitä oli jo olemassa todistetusti toimiva konsepti, prässillä on yksinkertainen toimintaperiaate ja hydraulinen prässä oli edullisin vaihtoehto. Valmiiksi sopivan kokoinen kestävä runko, johon suunnitella testipenkki ja pystyttiin hyödyntämään prässin omia valmiita ominaisuuksia, kuten männän sivuttaisliikettä ja pedin korkeussäätöä. Prässä voidaan mahdollisesti käyttää myös muihin käyttötarkoituksiin, kuten laakerien asentamiseen.

Erilaisia hydraulisia prässejä vertailtiin Excel-ohjelman avulla, kuten **taulukossa 2** näkyy. Tarkisteltiin prässien hyviä ja huonoja puolia. Katsottiin mitä kaikkea ominaisuuksia prässiltä vaaditaan. Pumpumallinen prässä valittiin koska se täytti kaikki vaaditut ominaisuudet. Prässin valintaan vaikutti myös sen koko, valitussa



prässissä oli testipenkille sopivat mitat. Pneumatiikalla toimivaa hydraulista prässyä harkittiin nopeutensa takia, mutta päätettiin, että pneumatiikkaa ei tarvita ja se olisi ollut liian nopea ja äänekäs käyttötarkoitukseen. Sähköhydraulinen prässä olisi ollut liian kallis ja iso.

## Taulukko 2. Prässien vertailua.

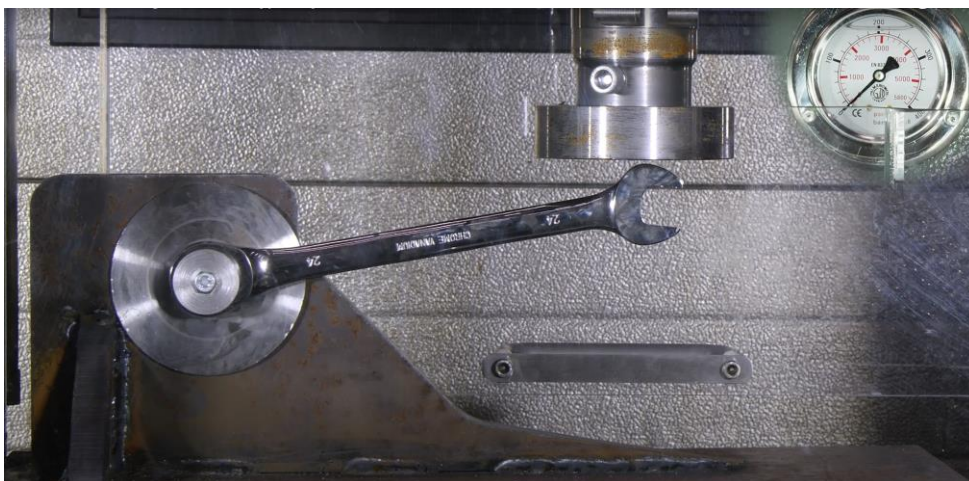
<b>Karvalakkimalli eli pumppumalli</b>	
<b>Hinta:</b> 250-1000 Euroa	
<b>Hyvät</b>	<b>Huonot</b>
Yksinkertainen	Ei ohjelmoitava
Hiljainen	
Halpa	
Kevyt runko	
Ei tarvitse sähkövirtaa eikä ilmanpainetta	
Tarkka, pystyy tekemään hienosäätöä	
Pedin korkeuden säätö	
Voimakas	
Männän sivuttaisliikkeen säätö	
Painemittari mukana	
<b>Pneumaattinen hydrauliprässä</b>	
<b>Hinta:</b> 600-1000 Euroa	
<b>Hyvät</b>	<b>Huonot</b>
Melko halpa	Äänekäs
Voimakas	Mahdollisesti liian nopea käyttötarkoitukseen
Nopea	Hieman monimutkaisempi kuin pumppumalli
Käsitönteon lisäksi käyttö ilmanpaineella	Tarvitsee ilmanpainetta
Pedin korkeuden säätö	Ei ohjelmoitava
Kevyt runko	Kalliimpi kuin pumppumalli
Männän sivuttaisliikkeen säätö	
Painemittari mukana	
<b>Sähköhydraulinen prässä</b>	
<b>Hinta:</b> 5000+ Euroa	
<b>Hyvät</b>	<b>Huonot</b>
Tasainen liike	Kallis
Ohjelmoitava	Painava runko
Voimakas	Monimutkaisempi kuin muut
Omia digitaalisia hallintapaneeli	Löytyy vain 30 TON+
Anturit/digitaaliset ulostulot	Iso koko
Turvallinen	Ääni
Pedin korkeuden säätö	Tarvitsee sähkövirtaa
Männän sivuttaisliikkeen säätö	

Ensimmäisenä ideana prässin käytössä oli, että käytetään hydraulista prässyä voiman tuottajana, tehdään työkaluille jigi, jossa on erikokoisia työkaluadaptoreita työkaluille ja tehdään suojat. Vääntömomentti lasketaan laskurilla voima-anturin ja vipuvarren pituuden avulla. Testiä kuvataan kameralla ja muodonmuutoksia mitataan mittaruudun avulla.



**Kuva 28.** Väntömomentin laskeminen voima-anturin avulla. /9/

Sitten katsottiin, että tarvitseeko voima-anturia tuloksien laskemiseen, koska ne ovat aika hinnakkaita ja oli epävarmaa, että kuinka hyvin ne soveltuvat testipenkkiin käytettäväksi. Joten sitten tutkittiin väntömomentin laskemista hydraulisen prässin paineesta, joka nähtäisiin painemittarista. Väntömomentin laskemiseen käytettiin avuksi Pascalin lakia.



**Kuva 29.** Väntömomentin laskeminen paineen avulla. /9/

Tulokset laskettaisiin laskurilla, joka tehtäisiin Excel-ohjelmaan. Oma laskuri tarvittavalle painolle/paineelle, jotta saadaan haluttu vääntömomentti hydraulisella prässillä tietyn pituisella vääntövarrella ja oma laskuri vääntömomentin laskemiseen. Laskurissa olisi ollut jo ennalta määrätyt vakio arvot, kuten hydraulipumpun männän pinta-ala ja varmuuskerroin vääntömomentille. Sitten laskuri olisi kysynyt tarvittavat muuttujat ja laskenut niiden perusteella tarvittavan voiman, paineen tai painon, jotta saadaan haluttu vääntömomentti. Kysytyt muuttujat olisivat olleet vipuvarren pituus, kulma työkalun ja prässin männän välillä ja haluttu vääntömomentti. **Kuvassa 30** näkyy TI-Nspire-laskinohjelmalla tehty laskuri.

Vakio arvot (ei muutu)

Hydraulipumpun männän säde.

$$r := 30 \cdot \text{mm} \cdot 0.03 \cdot \text{m}$$

Hydraulipumpun männän säteestä pinta-ala.

$$a := \pi \cdot r^2 \cdot 0.002827 \cdot \text{m}^2$$

Gravitaatio vakio

$$g := g \cdot 9.80665 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Varmuuskerroin vääntömomentille

$$\text{varmuusk} := 1.5 \cdot 1.5$$

Vipuvarren pituus?

$$l := 400 \cdot \text{mm} \cdot 0.4 \cdot \text{m}$$

Työkalun kulma männän suhteen?

$$k := 90 \cdot 90$$

Maksimi vääntömomentti, joka annettu työkalulle?

$$t := 600 \cdot \text{J} \cdot 600 \cdot \text{J Nm}$$

$$t_{\text{max}} := t \cdot \text{varmuusk} \cdot 900 \cdot \text{J Nm}$$

Tarvittava voima, jotta saadaan haluttu vääntömomentti

$$f := \frac{t_{\text{max}}}{\sin(k) \cdot l} \cdot 2250 \cdot \text{N}$$

Tarvittava paine, jotta saadaan haluttu vääntömomentti

$$p := \frac{f}{a} \cdot 795775 \cdot \text{Pa}$$

Tarvittava paino, jotta saadaan haluttu vääntömomentti

$$w := \frac{f}{g} \cdot 229.436 \cdot \text{kg}$$

**Kuva 30.** TI-Nspire-laskuri.

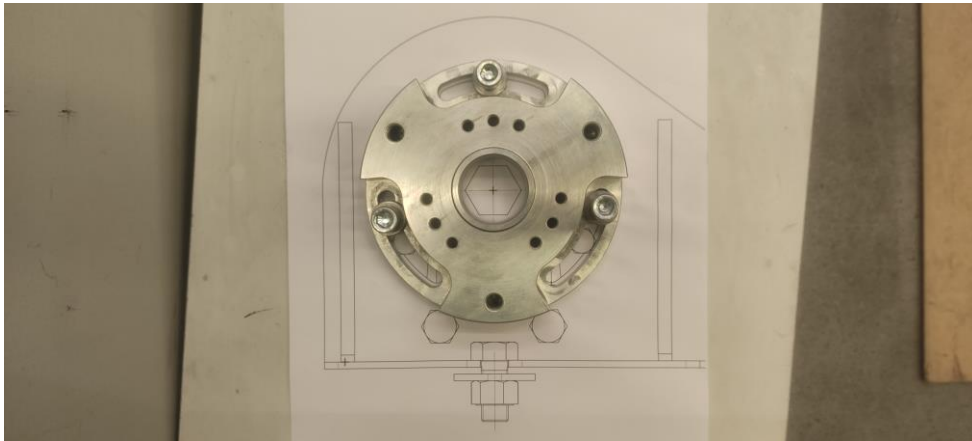
Paineen säätöön oltaisiin käytetty 3-tievirtauksensäätöventtiiliä. Laskurista oltaisiin katsottu tarvittava paine, jotta saadaan haluttu vääntömomentti. Sitten prässiä oltaisiin kokeiltu tyhjään kohtaan ja tarkistettu painemittarista paine. Virtauksensäätöventtiiliä oltaisiin säädetty kunnes tarvittava paine olisi saavutettu ja sitten lukittu siihen. Virtauksensäätöventtiili olisi ohjannut ylimääräisen öljyn takaisin säiliöön, tällä tavalla oltaisiin saatu pidettyä tietty paine prässissä. Samanlaista toimintaperiaatetta käytetään Hytorc hydraulisissa kiristimissä. Tämän olisi mahdollisesti saanut aika helposti automatisoitua, mutta se olisi vaatinut kalliin logiikan.

Tämä olisi voinut olla ihan toimiva konsepti. Mutta ongelmana olisi ollut tuloksien epätarkkuus ja voimahäviöt, jotka aiheutuvat esimerkiksi prässin eri osista kitkan takia ja laskurin epätarkkuudesta. Sekä tuloksien laskeminen olisi ollut turhan haastavaa ja aikaa vievää mahdolliselle testipenkin käyttäjälle.

Sitten saimme Wärtsilän laatuosastolta käyttöön Norbar-merkkiset vääntömomenttianturit, niiden omat työkaluadapterit, pidikkeet ja tietokoneen. Joita käytetään momenttivääntimien kalibrointiin. Vääntömomentti antureina oli staattisia, laipallisia antureita ja tietokoneena Norbar T-Box 2. Tämä osoittautui parhaaksi vaihtoehdoksi vääntömomentin mittaamiseen. Tällä tavalla saatiin nopeasti tarkkoja mittatuloksia ja tulokset saatiin talteen helposti.



**Kuva 31.** Laipallinen vääntömomenttianturi ja työkaluadapterit.



**Kuva 32.** Laipallisten antureitten kiinnikelaippa.



**Kuva 33.** Norbar staattisen anturin runko.

## 2.5 Systemi

Ihan ensimmäinen idea tuloksien tallentamiseen olisi ollut, että kuvataan kame-  
ralla samaan aikaan testiä sekä painemittarin/voima-anturin tulosta. Samaa ideaa  
käytti Hydraulic Press channel Youtube-kanava videoillaan. Näin olisi saatu tulok-  
set synkronoitua videon kanssa.

Mutta sitten kun käytimme vääntömomenttianturia ja niiden tietokonetta niin ei  
tarvinnut saada videolle näkyviin painemittarin/voima-anturin tulosta, koska

vääntömomentti nähtiin tietokoneelta reaaliajassa. Videon kuvaus kumminkin piti käynnistää samaan aikaan vääntömomentin mittauksen kanssa, jotta ne saatiin suunnilleen synkronoituja.



**Kuva 34.** Norbar T-Box 2 käyttöliittymä.

## 2.6 Testipenkin 3D-mallinnus

Testipenkin mallinnus suoritettiin Siemens NX 3D -Mallinnusohjelmalla. Kokoonpanon mallinnukseen käytettiin Top-Down-menetelmää. Ekaksi otettiin tarvittavat mitat hydraulisen prässin rungosta ja mallinnettiin se testipenkin kokoonpanoon. Sitten aloitettiin testipenkin osien mallinnus prässin runkoon, eli pidettiin hydraulinen prässä muuttumattomana. Testipenkki ja sen suojat tulevat tavallaan lisäosana hydrauliseen prässäin. Tällä tavalla saatiin osista heti yhteensopivia ja mittatarkkoja. Testipenkin osat suunniteltiin ensiksi sopivaksi isoimmille työkaluille ja sitten lähdettiin tekemään niistä yhteensopivia myös pienemmille työkaluille.

3D-mallinnuksessa käytetty Top-Down-menetelmä on nopea ja tehokas suunnitteluprosessi, jossa koko tuotteen suunnittelu tehdään yhdessä kokoonpanomallissa. Tämä tarkoittaa, että tuotteen ylä- ja alaosat mallinnetaan yhtenä kokonaisuutena, jolloin voidaan varmistaa, että kaikki osat sopivat yhteen ja että tuote toimii kuten suunniteltu. Tämä menetelmä on erityisen hyödyllinen monimutkaisten tuotteiden suunnittelussa, koska se mahdollistaa eri osien välisen sopivuuden ja integraation helposti.

Top-Down-menetelmässä aloitetaan yleensä ylemmästä tasosta, joka on usein tuotteen yleinen muoto tai koko rakenne. Tämä ylempi taso muodostaa perustan, jota käytetään, kun suunnitellaan kaikki alemmat tasot. Näin ollen ylempi taso sisältää kaikki tarvittavat suunnitteluparametrit ja -rajoitukset, jotka alemmat tasot on otettava huomioon.

Kun ylempi taso on suunniteltu, seuraava vaihe on luoda alemmat tasot, kuten osat ja alakokoonpanot. Alemmat tasot on suunniteltava siten, että ne sopivat yhteen ylempien tasojen kanssa ja että kaikki osat toimivat yhdessä saumattomasti. Tämä varmistaa, että tuote toimii moitteettomasti ja että kaikki osat ovat yhteensopivia. /21/

Top-Down-menetelmän lisäksi käytettiin myös DFMA-menetelmää. DFMA (Design for Manufacture and Assembly) on menetelmä, jota käytetään tuotesuunnittelussa varmistamaan, että tuote on valmistettavissa ja koottavissa tehokkaasti ja kustannustehokkaasti. DFMA-menetelmän avulla voidaan arvioida eri komponenttien valmistettavuutta ja mahdollisuutta niiden yhdistämiseen lopputuotteeksi. DFMA-menetelmässä on kaksi erillistä vaihetta: valmistettavuusanalyysi (Design for Manufacture) ja kokoamisanalyysi (Design for Assembly).

Valmistettavuusanalyysissä tarkastellaan, kuinka hyvin tuotteen eri komponentit voidaan valmistaa ja kuinka tehokkaasti niitä voidaan valmistaa. Tämä vaihe käsittää komponenttien suunnittelun tarkastelun, valmistusprosessien tarkastelun ja tuotteen valmistusprosessin optimoinnin.

Kokoamisanalyyssissä tarkastellaan, kuinka tehokkaasti eri komponentit voidaan liittää yhteen ja miten lopputuote voidaan koota nopeasti ja tehokkaasti. Tämä vaihe sisältää komponenttien liitosten tarkastelun, tuotteen kokoamisprosessin tarkastelun ja kokoonpanon optimoinnin.

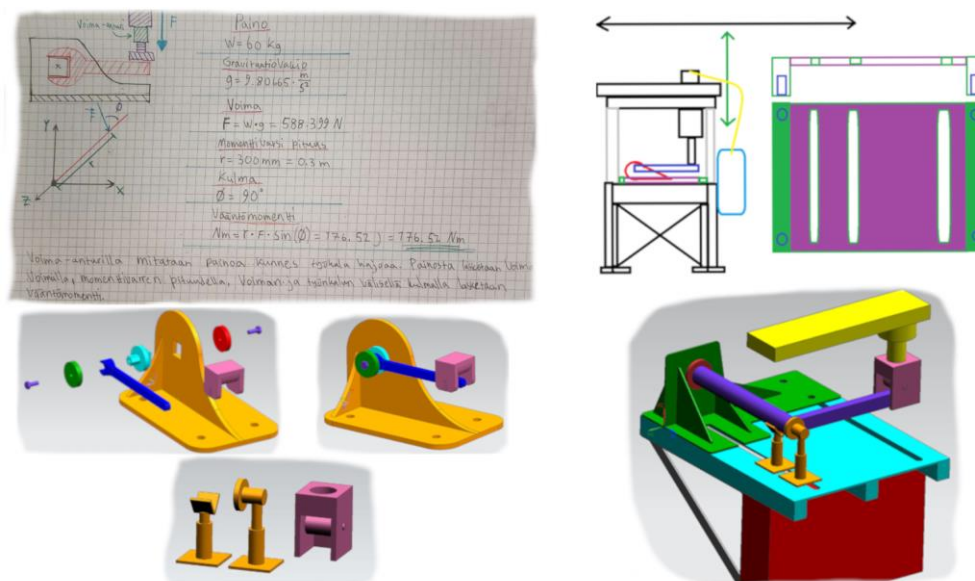
DFMA-menetelmä auttaa valitsemaan oikeat komponentit ja optimoimaan tuotteen valmistus- ja kokoonpanoprosessit. Tämä auttaa vähentämään tuotantokustannuksia ja parantaa tuotteen laatua. /22/

Hieman haasteita aiheutti uuden NX 3D -Mallinnusohjelman version opettelu. Koska tässä uudessa versiossa oli uudenlainen automatisoitu luonnostelu ja tällä versiolla tehdyt 3D-mallit eivät toimineet koulun omalla vanhemmalla NX12 3D -mallinnusohjelman versiolla. Uudempi NX 3D -Mallinnusohjelman versio kuitenkin oli muuten aika lailla samalainen kuin vanhempi versio. Uudempaa NX-versiota käytettiin mallintamiseen sen takia koska se oli käytössä Wärtsilältä lainatussa läppärissä, eikä sitä saanut asennettua henkilökohtaiselle tietokoneelle.



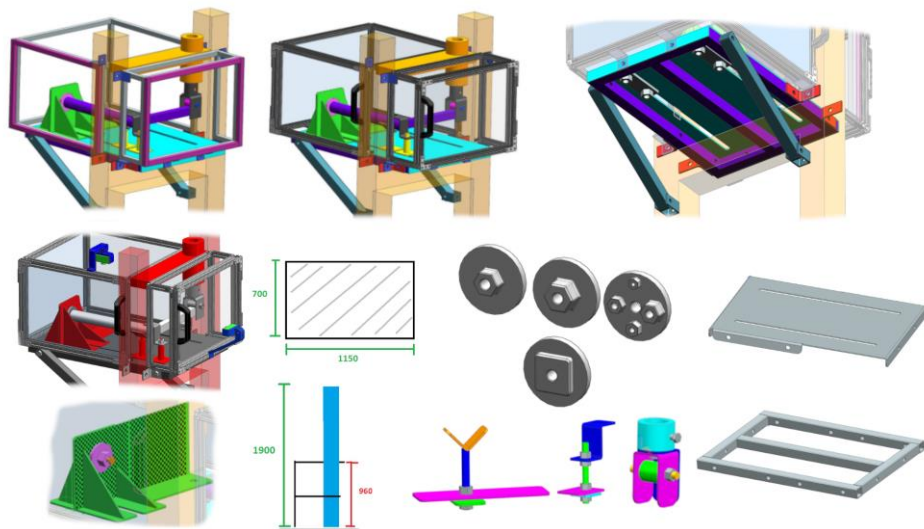
## 2.7 Testipenkin kehitys alusta loppuun

Aluksi tutkittiin testipenkin teoriapuolta. Hahmoteltiin testipenkin rakennetta ja säädettävyyttä erilaisille työkaluille. Aluksi testipenkissä ajateltiin käytettävän pelkästään työkaluadapttereita jigissä ja voimia mitattaisiin voima-anturilla, joka tulisi prässin mäntään kiinni.



Kuva 35. Testipenkki alkuvaiheessa.

Sitten suunniteltiin rakennetta yksityiskohtaisemmaksi ja otettiin mitat tarkemmin huomioon, kun löydettiin sopivan kokoinen hydraulinen prässä. Hahmoteltiin suo-  
 jia, kameran ja mittaruudukon käyttöä. Suunniteltiin erilaisia työkaluadapttereita ja parannettiin työkalutukien rakennetta.



**Kuva 36.** Testipenkki keskivaiheessa.

Sitten viimeisteltiin koko testipenkki yksityiskohtaisemmaksi, tehtiin testipenkin rakenteesta tukevampi ja parannettiin komponenttien kiinnityksiä. Lisättiin kokoonpanoon kaikki päätetyt komponentit. Suunniteltiin jigi sopivaksi vääntömomenttiantureille ja kehiteltiin laakerointi työkaluille. Mietittiin testipenkin väri-maailma. Viimeisteltiin kameran ja mittaruudukoiden käyttö. Lisättiin kaikki lopulliset ideat.



**Kuva 37.** Testipenkki viimeinen versio.

## 2.8 Testipenkin rakenne

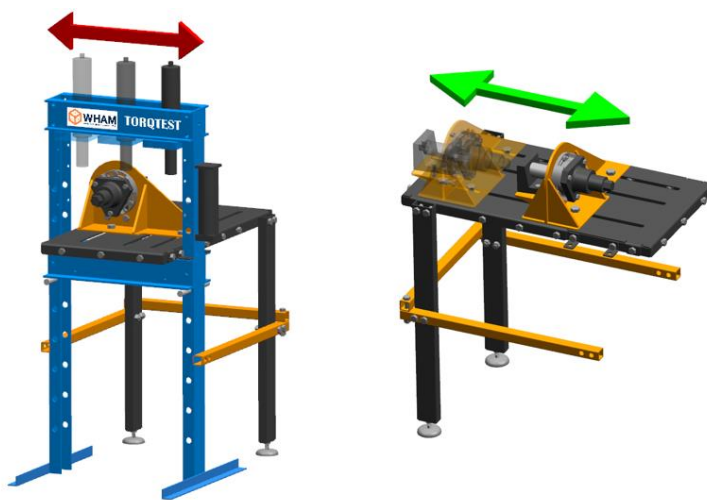
Testipenkin rakenne jaettiin pienempiin moduuleihin ja itse testipenkki tulee lisäosana Biltema 20 TON hydraulisen prässin runkoon kuten **kuvasta 38** nähdään. Kaikista komponenteista tehtiin omat valmistuspiirustukset ja moduuleista kokoonpanopiirustukset. Jokainen pultti suunniteltiin oikean kokoiseksi ja pituiseksi lujuus huomioon ottaen. Kaikki pultit myös merkattiin kokoonpanopiirustuksiin.



## 2.10 Konfiguraatiot ja simulointi

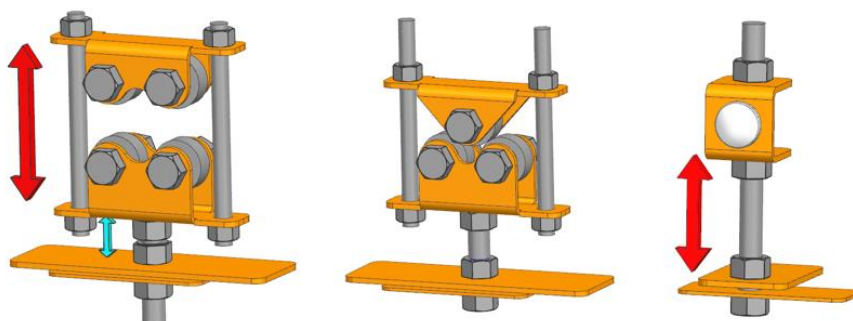
Testipenkin käyttöä simuloitiin 3D-mallinnusohjelmassa liikuttamalla komponentteja kokoonpanossa ja katsottiin että kaikki pääsevät liikkumaan esteettä.

Prässin mäntää säädetään sivuttaissuunnassa kiintoavaimen pituuden mukaan ja jigiiä syvyysuunnassa hylsyn pituuden mukaan **kuvan 39** mukaisesti.



**Kuva 39.** Testipenkin säädöt eri työkaluille.

Työkalutukia on 15—30mm ja 30—45mm halkaisijalle. Työkalutuet säädetään sopivaksi hylsyn halkaisijalle **kuvan 40** mukaisesti.



**Kuva 40.** Työkalutukien säätö.

Alustan alapuolella on levyt, joihin on hitsattu mutteri niin ei tarvitse pitää alapuolelta vastaan, kun kiristää jigien ja työkalutukien pultteja. Jigi ja työkalutuet liikkuvat omissa urissa. Minimi ja maksimi pituus kiintoavain tyyppiselle työkalulle näkyvät **kuvassa 41**. Jos tarvitsee testata pidempää kuin 345 mm pitkää työkalua, niin jigi pitää laittaa 2 asentoon kuvan mukaisesti ja työkalujen painaja pitää kääntää 90 astetta.

Kamera kiinnitetään testipenkin etupuolelle alumiiniprofiilin uraan, niin että se kuvaa työkalua oikeasta suunnasta ja että mittaruudukko näkyy työkalun taustalla.

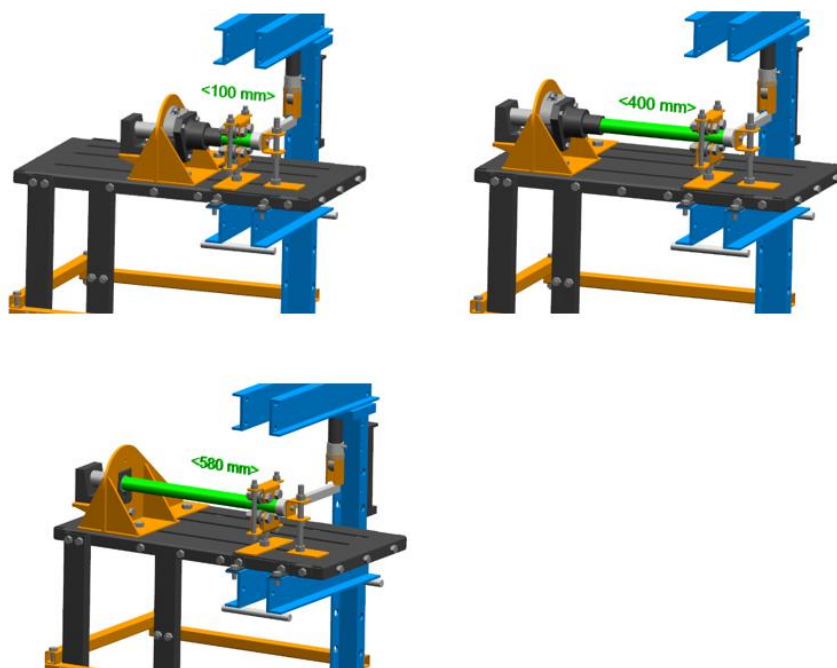


**Kuva 41.** Testipenkin säädettävyys kiintoavaimelle.

**Kuvassa 42** näkyy minimi ja maksimi pituus hylsy tyyppiselle työkalulle. Jos tarvitsee testata pidempää kuin 400 mm pitkää työkalua, niin pitää käyttää staattista anturia ja sen runkoa. Vääntimessä on 3/4" vääntiö, jos testattavassa työkalussa

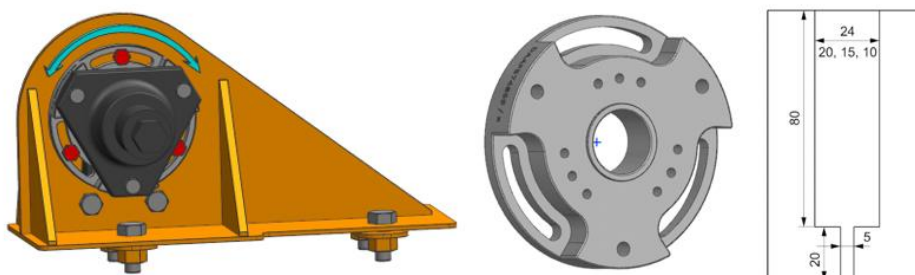
on 1/2" vääntöreikä, niin vääntimeen pitää kiinnittää vähennyskappale 3/4">1/2".

Kamera kiinnitetään testipenkin etupuolelta katsottuna testipenkin oikealle puolelle alumiiniprofiilin uraan, niin että se kuvaa työkalua oikeasta suunnasta ja että mittaruudukko näkyy työkalun taustalla.

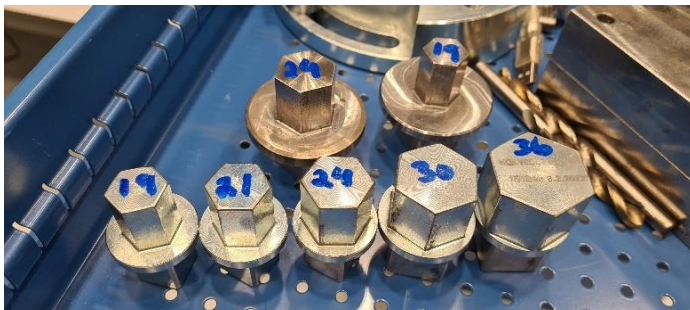


**Kuva 42.** Testipenkin säädettävyys hylsille.

Laipallisen vääntömomenttianturin kiinnikettä pystyy kiertämään tarvittaessa. Anturiin voi vaihtaa erikokoisia työkaluadapttereita. Prässin mäntään voi kiinnittää erikokoisia pitimiä. Kuten **kuvassa 43 ja 44** näkyy.



**Kuva 43.** Anturin jigi ja erikokoiset pitimet.



**Kuva 44.** Erikokoiset työkaluadapterit.

Kameran käyttöä testattiin ja simuloitiin **kuvien 45 ja 46** mukaisesti. Kameraa testattiin 5 mm, 10 mm mittaruudukoilla ja 200–500 mm etäisyyksillä. Minimi etäisyys kameran ja mittaruudukon välillä oli 200 mm, tällä etäisyydellä kuvan tarkkuus oli vielä tarpeeksi selvä. Kuva tarkentui, kun etäisyys suureni 200 mm:stä. 400 mm etäisyydellä oli optimi kuvan tarkkuus. Kameralla pystyi zoomata tarvittaessa, jos kameran etäisyys oli liian suuri.



**Kuva 45.** Foscam R4 kameran ja mittaruudukon testaus.





**Kuva 46.** Työkalun testaamisen simulointi.

### 2.11 Detalji

Testipenkin rakenteen ja valmistettavien komponenttien materiaaliksi valittiin kestävä ja edullinen materiaali, jolla on vaatimusten mukaiset ominaisuudet. Eli yleisesti käytetty S235-rakenneteräs, tarpeeksi kestävä, helppo saatavuus, hyvä koneistettavuus, hyvä hitsattavuus ja on saatavilla useasta paikasta metritavaran.

Testipenkin suojat valmistettiin alumiiniprofiilista ja läpinäkyvästä polykarbonaatti levystä. Alumiini on kevyttä, kestävä ja polykarbonaatti on hyvin iskunkestävää. Suojien rungot ajateltiin aluksi valmistaa teräs neliöputkesta, edullisuutensa vuoksi. Mutta alumiiniprofiili, valikoitui paremmaksi, ominaisuuksiensa ja ulkonäön vuoksi. Alumiiniprofiilin uraa käytettiin hyödyksi kameran käytössä.

### 3 VALMISTUS

SOP-Metal Oy valmisti teräsosat tytäryhtiönsä Ultracut Oy:n kanssa ja Easy-systems suojien alumiiniprofiilit. Osia valmistettiin myös itse muokkaamalla jo olemassa olevia komponentteja ja 3D-tulostamalla. Teräsosien valmistusta seurattiin ja dokumentoitiin.

#### 3.1 Easy-Systems

Easy-Systems on yritys, joka tarjoaa alumiiniprofiilijärjestelmiä erilaisiin käyttötarkoituksiin. Yrityksen tavoitteena on helpottaa asiakkaidensa arkea tarjoamalla monipuolisia, helppokäyttöisiä ja modulaarisia ratkaisuja. Asiakas voi valita haluamansa komponentit ja rakentaa niistä juuri omaan tarpeeseensa sopivan kokonaisuuden. Tämä mahdollistaa joustavan ja kustannustehokkaan ratkaisun erilaisiin tarpeisiin. Easy-Systemsin valikoimaan kuuluvat muun muassa erilaiset kehikot, kaapelikanavat, ovet ja ikkunat, jotka valmistetaan alumiinista. Easy-Systemsin alumiiniprofiilijärjestelmiä käytetään monenlaisissa sovelluksissa, kuten teollisuusautomaatioissa, kalusteissa ja mainosrakenteissa. /23/

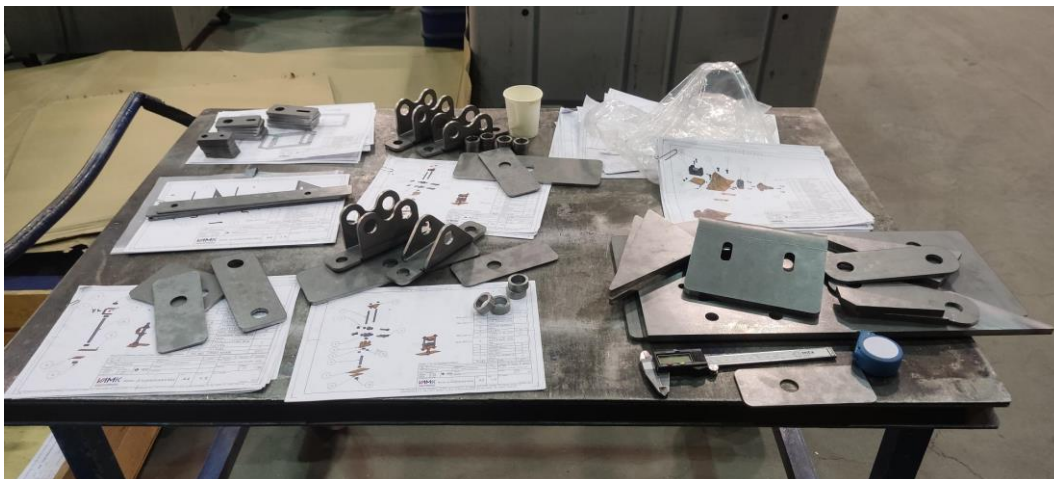


**Kuva 47.** Testipenkin suojat.

### 3.2 SOP-Metal

SOP-Metal Oy on suomalainen kone- ja metalliteollisuuden yritys, joka tarjoaa laajan valikoiman alihankintapalveluita eri alojen yrityksille. SOP-Metallin liiketoiminta kattaa mm. CNC-työstön, hitsauksen, levytyöt, pintakäsittelyn ja kokoonpanon. Yrityksen osaamisalueisiin kuuluu myös tuotteiden suunnittelu ja valmistus asiakkaan tarpeiden mukaan. /24/

Samoissa tiloissa sijaitseva Ultracut Oy on SOP-Metallin tytäryhtiö, joka tarjoaa leikkauspalveluja teollisuudelle. Yrityksen palveluihin kuuluvat muun muassa vesileikkaukset ja laserleikkaukset. Ultracutin asiakkaita ovat muun muassa kone- ja laitevalmistajat, teräs- ja metalliteollisuus sekä meriteollisuus. /24/



**Kuva 48.** SOP-Metal, leikattuja ja särmättyjä testipenkin osia.

#### 3.2.1 Teräsosien leikkaus

Testipenkin teräsosien valmistuksessa käytettiin kahta erilaista leikkausmenetelmää laserleikkausta ja vesileikkausta. Laserleikkauksessa käytetään fokuusoitua laseria, joka sulattaa tai haihduttaa materiaalia tarkasti. Sitä voidaan käyttää eri materiaalien leikkaamiseen, kuten metalliin, muoviin ja puuhun. Kuitulaserleikkaus soveltuu ohuiden materiaalien leikkaamiseen, kun taas CO<sub>2</sub>-laserleikkaus soveltuu

paksummille materiaaleille. Vesileikkauksessa materiaali upotetaan veden alle, ja leikkaus tehdään korkean paineen avulla. Vesileikkaus sopii materiaaleille, jotka eivät kestä lämpöä tai joissa leikkauks jäljen tulee olla puhtas.

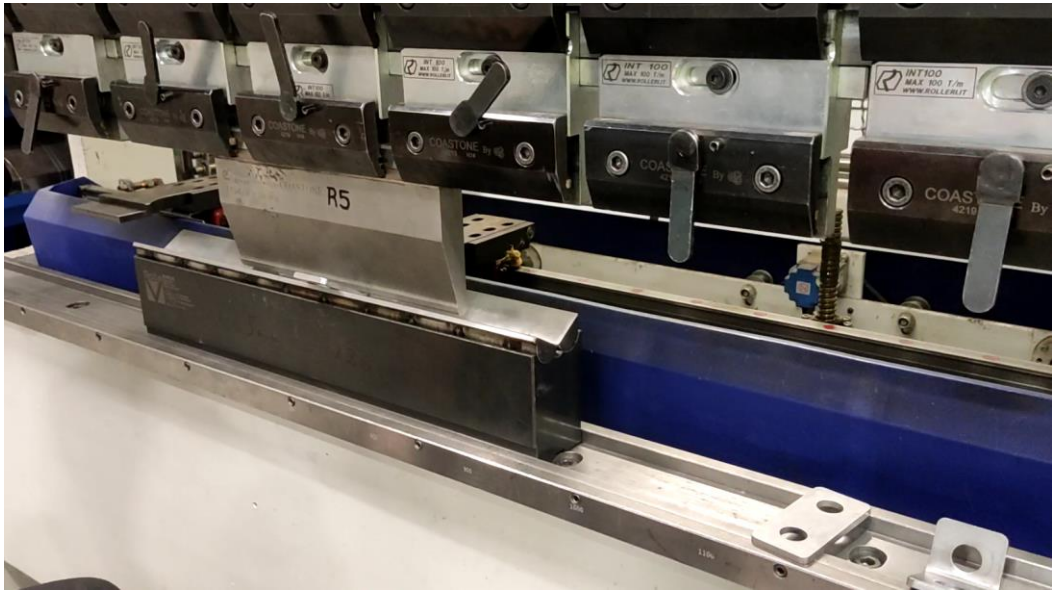
Leikkausta vaativille teräsosille tehtiin erikseen 2D-piirustukset DXF (Drawing Exchange Format) tiedostomuodossa. Laserleikkausohjelmat voivat lukea DXF-tiedoston ja muuntaa sen ohjelmistossa käytettäväksi formaatiksi. Ultracut Oy siirsi DXF-tiedostoista piirustukset leikkurin ohjelmaan. Eli ne aseteltiin aihiolevylle sopivasti, niin että materiaalihukka minimoitiin ja työstöradat olivat hyvät.



**Kuva 49.** Ultracut Oy, vesileikkuri.

### 3.2.2 Särmäys

Särmäys on prosessi, jossa metallilevy taivutetaan tiettyyn kulmaan. Särmäyksessä on otettava huomioon tiettyjä asioita kuten materiaali, materiaalin vahvuus, työkalut, taivutussäde, taivutuskohta, taivutusjärjestys, reikien etäisyys taivutuskohdasta ja helpotukset. Joissakin osissa oli reiät hieman liian lähellä taivutuskohdasta, niin reiät menivät hieman soikeaksi ja ne paisuivat ulos päin. Mutta nämä saatiin korjattua sorvaamalla pinnat tasaiseksi ja poraamalla reikiä isommaksi.



**Kuva 50.** SOP-Metal, testipenkin osan särmäys.

NX 3D -mallinnusohjelman Sheet Metal -työkalu mahdollistaa tarkat 3D-mallinnukset, joita käytetään särmäyksessä. Ohjelman avulla voidaan suunnitella erilaisia särmäyksiä, jolloin voidaan havaita ja korjata mahdolliset ongelmat jo ennen valmistusta. Sheet Metal -työkalu sisältää myös työkaluja, joiden avulla voidaan automaattisesti generoida 2D DXF -tiedostoja valmiista 3D-malleista.



**Kuva 51.** Särmätty alusta.

### 3.2.3 Sahaus ja poraus

Sahaus ja poraus ovat perustekniikoita, joita käytetään usein metallien ja muiden materiaalien leikkaamiseen ja rei'ittämiseen. Tämä on tärkeä vaihe monissa valmistusprosesseissa, jotta osat voidaan muotoilla ja liittää yhteen.



**Kuva 52.** Alustan rungon sahatut ja poratut neliöputket.

### 3.2.4 Jyrsintä

Jyrsintä on erittäin tarkka ja yleensä erikoistyökaluja vaativa valmistusprosessi, jossa aihio kiinnitetään leukoihin ja työkalua liikuttamalla työstetään paikoillaan olevaa aihiota. Jyrsintä voidaan suorittaa manuaalisesti käsin tai automaattisella CNC-jyrsintäkoneella, jolle määritetään koneistusohjelma. Koneistusohjelmassa käytetään tiettyä ohjelmointikieltä yleisimmin G-koodia. Koneistusohjelma sisältää aihion mitat, koneistusvaiheet, työstöradat, käytettävät työkalut ja työstön parametrit.



**Kuva 53.** Jyrsityt työkalujen pitimet.

### 3.2.5 Hitsaus

Hitsaus on tärkeä osa valmistusprosessissa, se mahdollistaa metallin ja muiden hitsattavien materiaalien liittämisen yhteen. Hitsauksessa käytetään yleensä kahta tai useampaa metalliosaa, jotka liitetään yhteen korkean lämpötilan avulla. Hitsauksessa on tärkeää valita oikea hitsausmenetelmä ja hitsausmateriaali, jotta saavutetaan paras mahdollinen lopputulos.



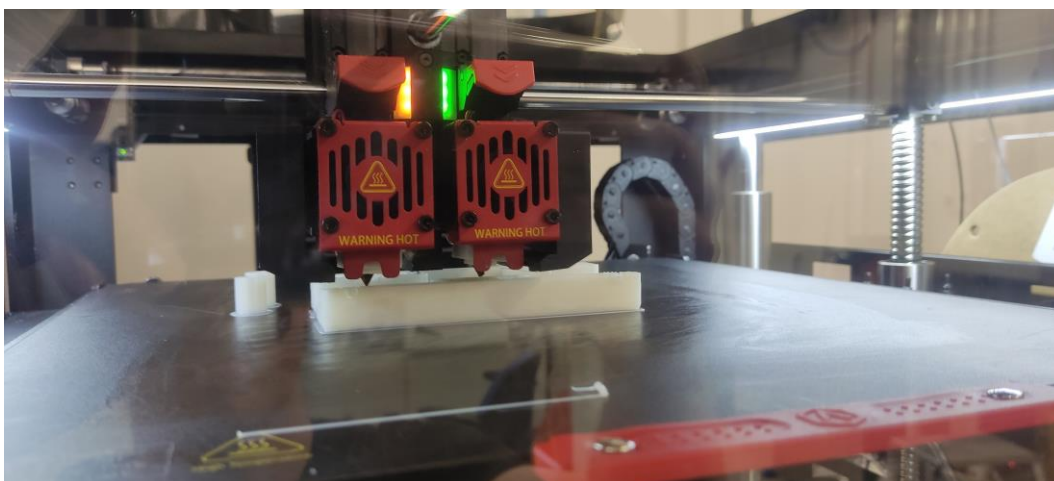
**Kuva 54.** Hitsattu jigi ja muita hitsattuja osia.

### 3.2.6 Maalaus

Maalaus on valmistusprosessi, joka suojaa komponentteja korroosiolta ja antaa niille esteettisen ulkonäön. Maalausprosessiin kuuluu yleensä pintakäsittely, pohjamaalaus ja lopullinen maalaus.

Märkämaalausta käytettiin osien maalaukseen. Tämä on yksi yleisimmistä pintakäsittelymenetelmistä, jota käytetään esimerkiksi metalliin, muoviin ja puuhun. Märkämaalaus voidaan suorittaa joko käsin tai automaattisesti. Maalausprosessin aikana maali levitetään pinnalle ilmanpaineen tai pensselin avulla. Testipenkki maalattiin Wärtsilän uusimpien moottorien väripaletilla.

### 3.3 3D-tulostus

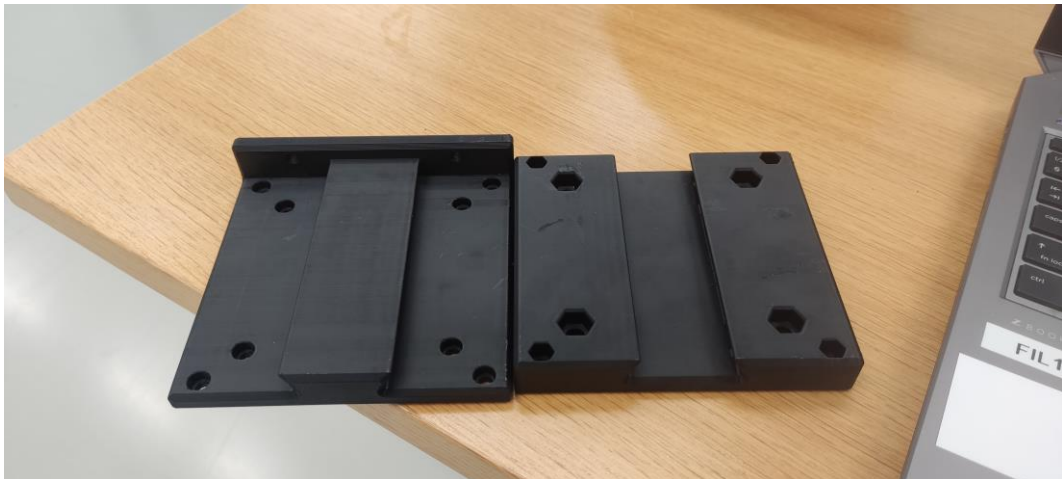


**Kuva 55.** Pikakiinnikkeen tulostus ABS-materiaalista Raise3D Pro2 Plus 3D-tulostimella.





**Kuva 56.** Pikakiinnikkeen sovittelua antureitten näyttöön.



**Kuva 57.** FORTUS 400 MC 3D-tulostimella tulostettu solidi ABS-pikakiinnike.



**Kuva 58.** Näytön PLA-materiaalista tulostettu pikakiinnike.

### 3.3.1 Testipenkkiin muokattu momenttiväännin

Wärtsilän laatuosastolta saatiin romutettu momenttiväännin, joka muokattiin testipenkkiin sopivaksi lyhentämällä. Vääntimeen mallinnettiin ja 3D-tulostettiin oma tulppa PLA-materiaalista.



**Kuva 59.** Testipenkkiin muokattu momenttiväännin.

## 4 KOKOONPANO

### 4.1 Ohjeet

Testipenkin kokoonpano tehtiin kokoonpanopiirustusten ja 3D-mallien mukaisesti. Komponentit levitettiin ensiksi lattialle ja katsottiin mittaamalla mikä komponentti on mikäkin, kokoonpanopiirustuksia ja osaluetteloita apuna käyttäen. 3D-malli helpotti kokoonpanoa, kun sieltä pystyi poistamaan tiettyjä komponentteja pois tieltä ja katsomaan tarkemmin, kuinka kaikki osat kiinnitetään toisiinsa. Kaikki pultit kiristettiin Wärtsilän yleisten kiristysmomenttien listan mukaisesti.

### 4.2 Biltema 20 TON hydraulinen prässä

Ensiksi koottiin hydraulisen prässin runko, johon itse testipenkki koottiin.



**Kuva 60.** Biltema 20 TON hydraulisen prässin osat.



**Kuva 61.** Biltema 20 TON hydraulinen prässi puoliksi koottuna.



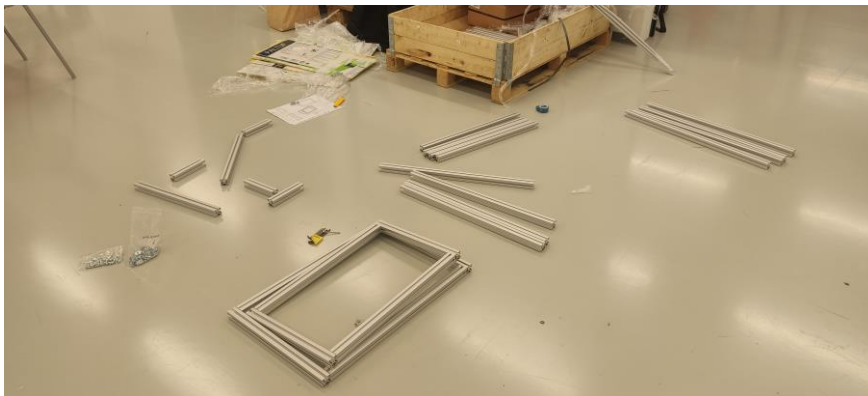
**Kuva 62.** Koottu Biltema 20 TON hydraulinen prässi.

### 4.3 Alumiiniprofiili suojat

Ensiksi liitettiin oikeat alumiiniprofiilit toisiinsa kiinni **kuvan 63** mukaisesti. Sitten alumiiniprofiilirunkoihin laitettiin polykarbonaattilevyt. Polykarbonaattilevyjä piti itse hieman muokata, jotta ne sopivat profiilien sisään. Ovet piti sovittaa runkojen sisälle, niin että ne aukeavat kunnolla. Sitten suojat asennettiin testipenkkiin kiinni ja alumiiniprofiilin uraan asennettiin kameran teline.



**Kuva 63.** Alumiiniprofilien liitostapa.



**Kuva 64.** Suojien osia.



**Kuva 65.** Levyjen asennus suojan runkoon.



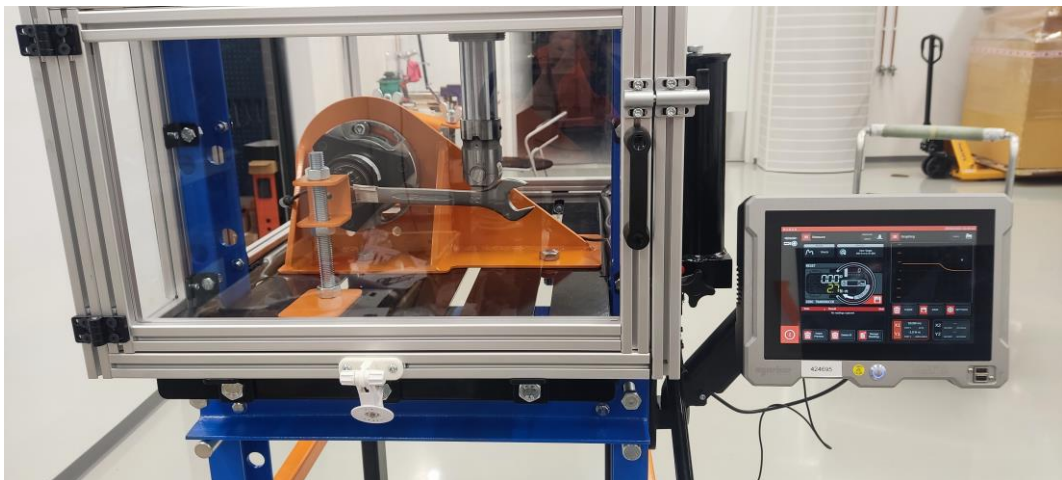
**Kuva 66.** Suojien asennus testipenkkiin.

#### 4.4 Jigi ja työkalutuet

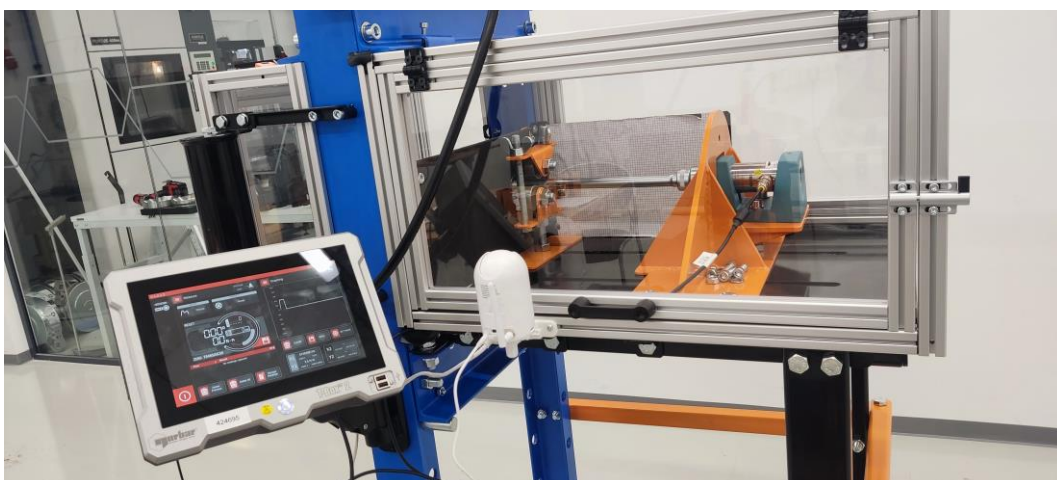
Vääntömomentti antureitten jigi ja työkalutuet koottiin erikseen ja asennettiin testipenkkiin kiinni kuvien 68 ja 69 mukaisesti.



**Kuva 67.** Valmiita testipenkin teräsosia.



**Kuva 68.** Laipallinen anturi kiinnitettynä.

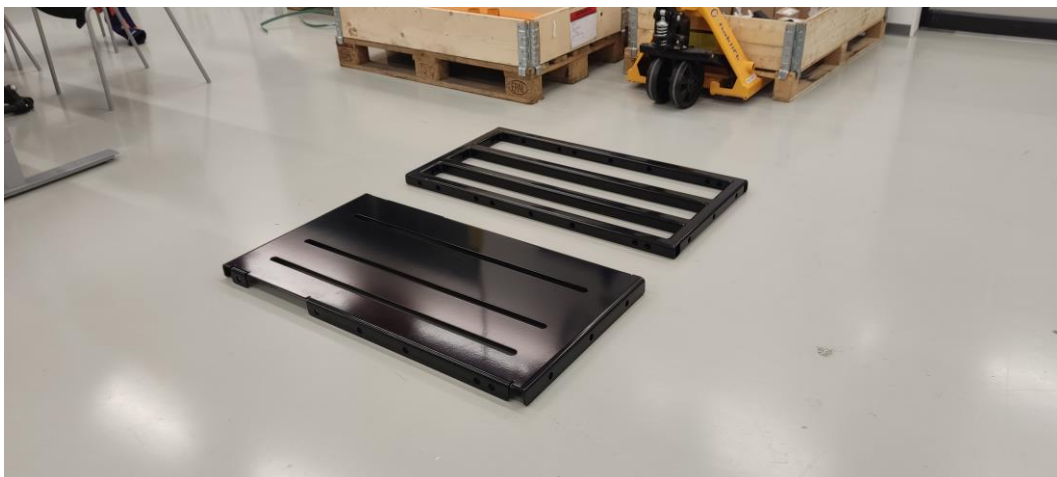


**Kuva 69.** Staattinen anturi kiinnitettynä.

#### **4.5 Valmis testipenkki**

Sitten kun kaikki eri alikokoonpanot saatiin koottua. Koottiin niistä itse testipenkin kokonaisuus. Ensiksi koottiin testipenkin alusta **kuvien 70 ja 71** mukaisesti. Eli alustan runko tiputettiin alustan sisään ja siihen kiinnitettiin kaikki kiinnikkeet.





**Kuva 70.** Alusta ja sen runko



**Kuva 71.** Alusta koottuna.

Sitten koottiin koko testipenkin runko **kuvan 72** mukaisesti. Eli alustaan kiinnitettiin säädettävät jalat ja niiden tuet. Sekä alustan kokonaisuus kiinnitettiin prässin runkoon. Alusta säädettiin säätöjalkojen ja vatupassin avulla suoraan.

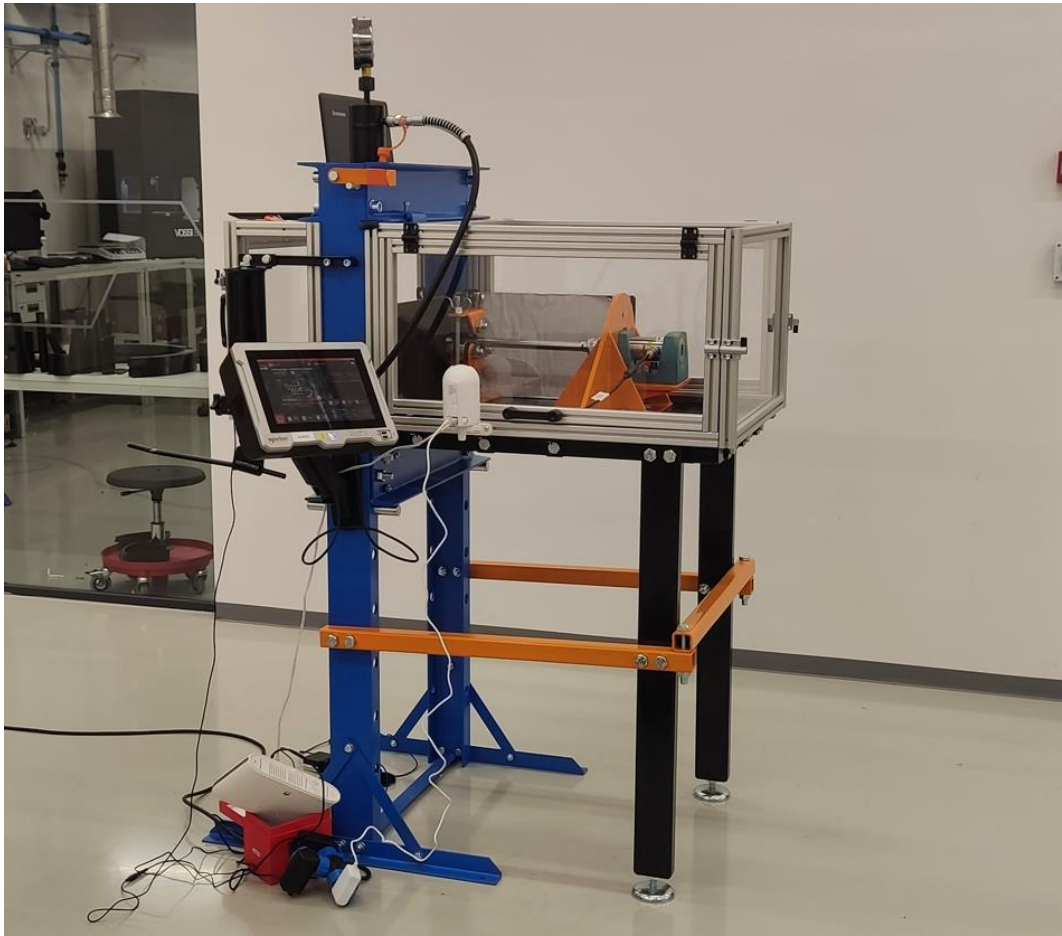


**Kuva 72.** Testipenkin alustan asennus.

Sitten testipenkkiin asennettiin suojat ja muut komponentit **kuvan 73 ja 74** mukaisesti.



**Kuva 73.** Valmis testipenkki edestä ja takaa



**Kuva 74.** Testipenkki sivusta.

## 5 TESTAUS

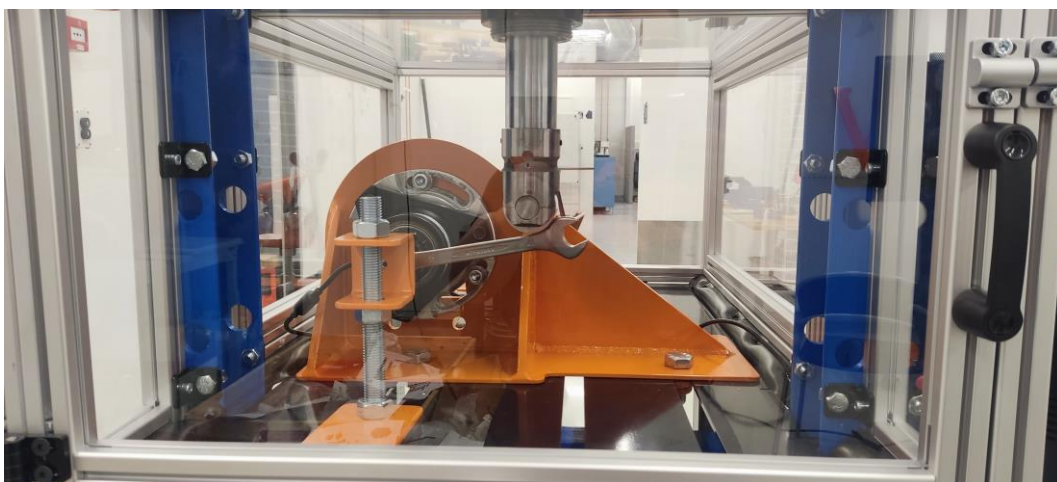
Sitten kun testipenkki saatiin koottua kokonaan, aloitettiin itse testipenkin testaaminen. Testipenkin käyttöä varten tehtiin käyttöohjeet, joita käytettiin hyödyksi testaamisessa. Käyttöohjeita parannettiin ja tarkennettiin testattaessa sitä mukaan, kun huomattiin jokin parannusta vaativa kohta ohjeissa.

### 5.1 Työkalut

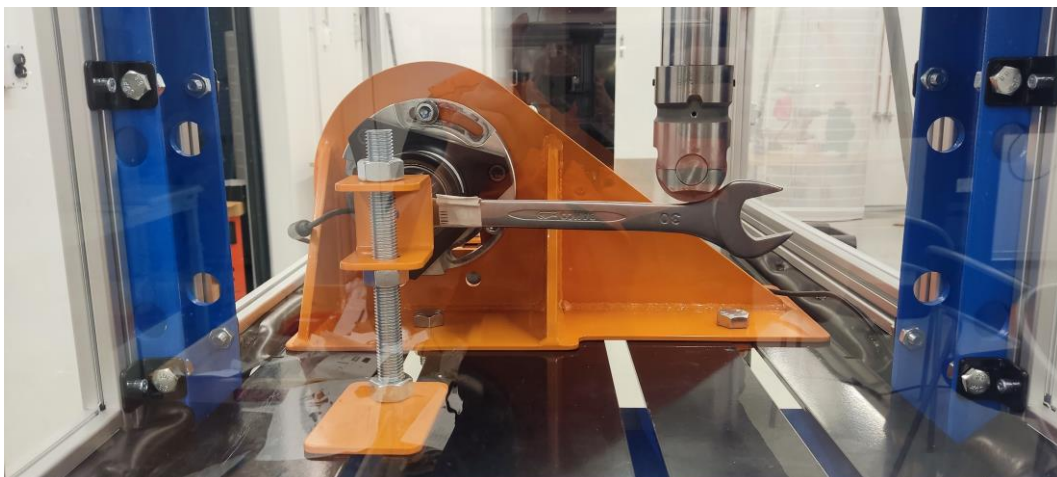
Testipenkkiä testattiin aluksi perinteisillä työkaluilla. Sitten kun todettiin testipenkki toimivaksi, kokeiltiin testata metallista 3D-tulostettua työkalua.

#### 5.1.1 Perinteiset työkalut

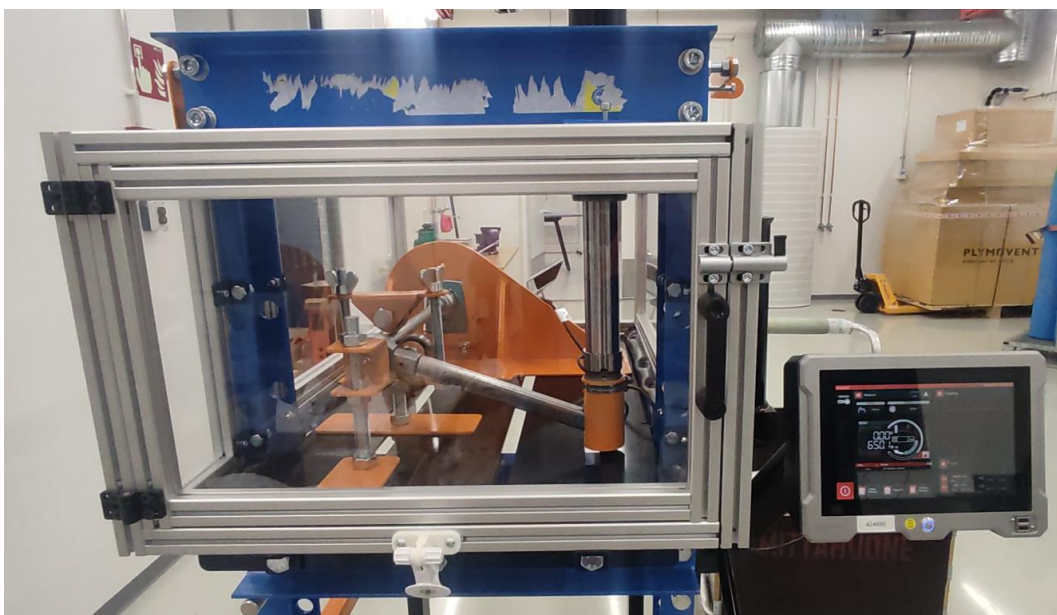
Kiintolenkkiavaimia testattaessa piti työkalujen painajasta poistaa työkalujen pidin, jotta nokkarulla osuu haluttuun kohtaan ja pääsee liikkumaan työkalua pitkin. Kiintolenkkiavaimille pitäisi mahdollisesti kehittää omanlainen parempi painaja.



**Kuva 75.** Testissä 19 mm kiintolenkkiavain.

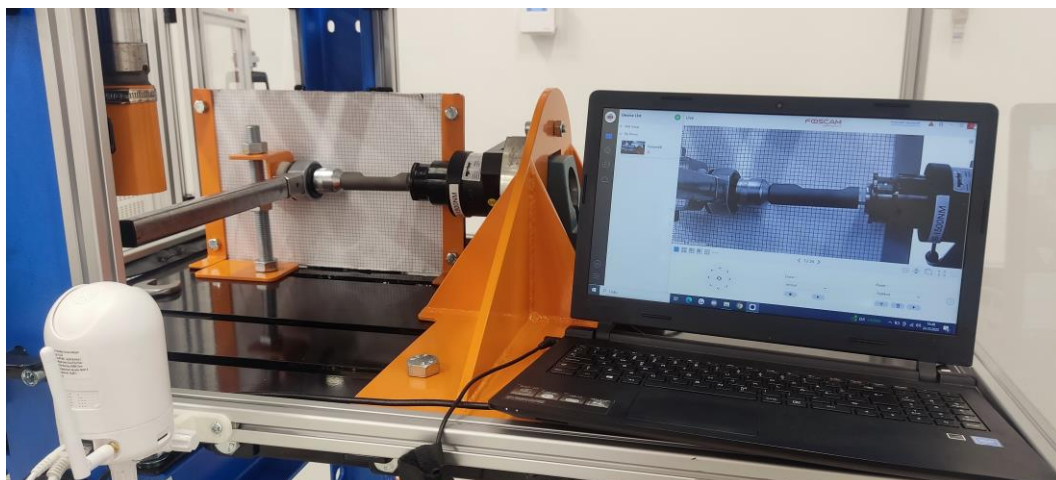


**Kuva 76.** Testissä 30 mm kiintolenkkiävain.



**Kuva 77.** Vääntimen ja pitkän jatkon testaaminen.

### 5.1.2 3D-tulostettu antureitten työkalu



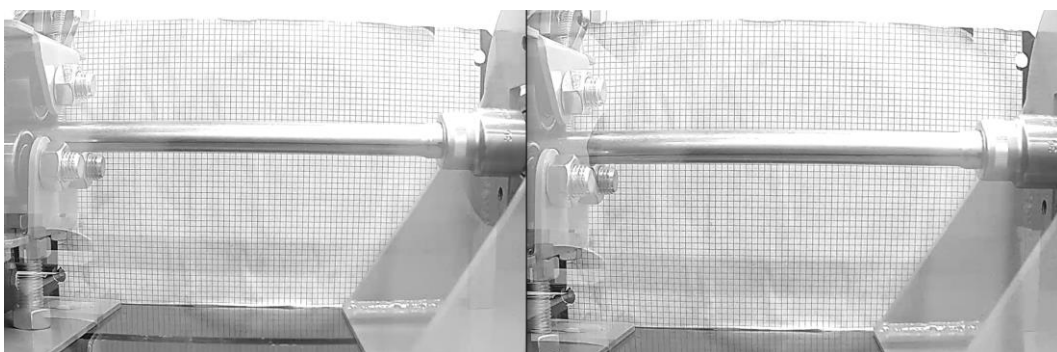
**Kuva 78.** 3D-tulostettu antureitten työkalun testaus.

## 5.2 Tulokset

Vääntömomenttia mitattiin Norbar-vääntömomenttiantureilla ja niiden omalla tietokone näytöllä. Muodonmuutoksia tarkasteltiin kameran ja mittaruudun avulla. Videokuvaus laitettiin testin ajaksi päälle. Otettiin alkutilanteesta kuva ja sitten kun työkaluun kohdistettiin haluttu vääntömomentti, otettiin uusi kuva ja näitä kuvia verrattiin. Näin nähtiin ja saatiin mitattua suunnilleen muodonmuutokset. Maksimivoimana testeissä käytettiin 600 Nm.

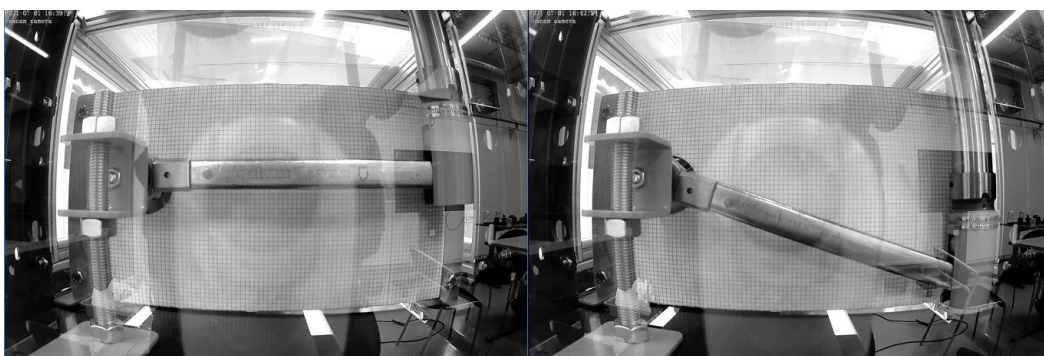
### 5.2.1 Perinteiset työkalut

**Kuvassa 79** näkyy pitkän jatkos kiertyminen, kun siihen kohdistetaan vääntömomenttia. Jatkoon piirrettiin tussilla viiva, joka auttaa näkemään muodonmuutoksia. Muodonmuutokset olivat melko pieniä, joten ne olivat aika vaikea huomata. Mutta muodonmuutosta oli kuitenkin huomattavissa.



**Kuva 79.** Pitkän jatkon muodonmuutos.

**Kuvassa 80** näkyy hylsyjen väätimen muodonmuutos, jossa samalla havainnollistetaan kiintoavaimen testaamista. Kuten kuvasta huomaa on muodonmuutos väätimellä suuri. Mutta pysytään kuitenkin elastisella puolella, eli väännin joustaa ja palautuu alkuperäiseen muotoonsa voiman loputtua. Muodonmuutoksen suuruus johtuu varmaankin siitä, kun väännin on muokattu momenttiväätimestä, jonka on tarkoitus joustaa, jotta vääntömomenttimekanismi toimisi.



**Kuva 80.** Väätimen muodonmuutos.

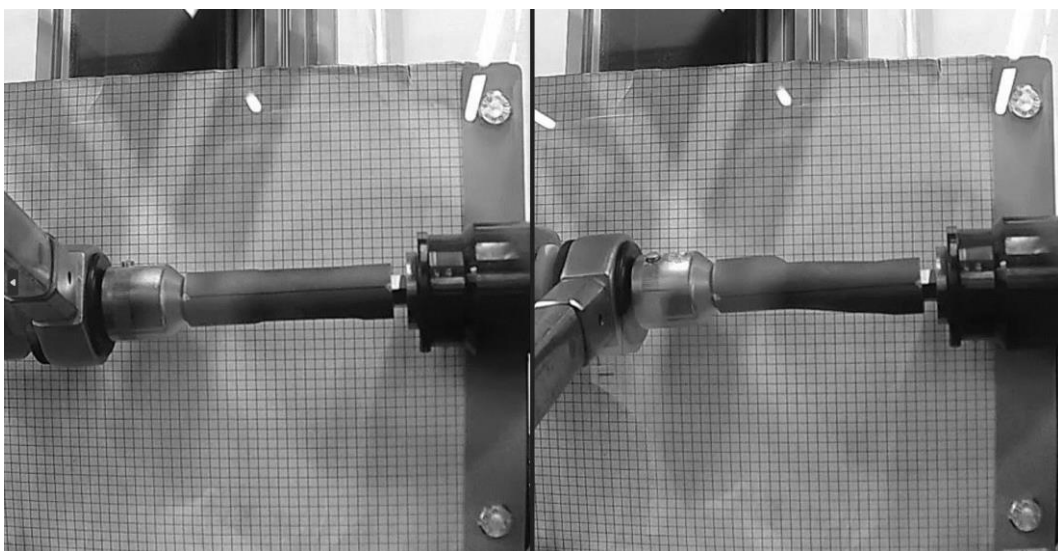
### 5.2.2 3D-tulostettu antureitten työkalu

**Kuvasta 81 ja 82** nähdään että 150 Nm kohdalla tuli työkalun myötöraja vastaan ja mentiin plastiselle alueelle eli työkalu ei palautunut väännön loputtua alkuperäiseen muotoonsa. Työkalulla kiristetään antureita 20 Nm kiristysmomenttiin.





**Kuva 81.** 3D-tulostettu antureitten työkalun maksimivääntömomentti.



**Kuva 82.** 3D-tulostettu antureitten työkalun muodonmuutos.

## 6 YHTEENVETO JA JATKOKEHITYS

Opinnäytetyön tarkoituksena oli suunnitella, valmistaa (WHAM) AM-Campukselle vaatimusten mukainen 3D-tulostettujen työkalujen testipenkki ja tehdä sillä testejä. Tutkimustyössä ensiksi lähdettiin selvittämään, että onko jo olemassa vastaavia testipenkkejä ja kuinka työkaluja voidaan testata. Sitten kun löytyi sopiva konsepti, aloitettiin tutkimaan testipenkin fysikaalista puolta ja matemaattista puolta. Sitten kun teoriapuoli oli selvitetty, niin suunniteltiin voiman tuotto ja testipenkin rakenne, jotta sillä voidaan testata lähes kaikenlaisia työkaluja ja saada tuloksia talteen. Lisäksi tutkittiin mahdollisia aiheeseen liittyviä standardeja. Suunnitteluun sovellettiin Ulrich ja Eppingerin tuotekehitysmenetelmää. Suunnitteluun ja mallintamiseen käytettiin DFMA- ja TOP-down-menetelmiä.

Lopputuloksena saatiin valmistettua toimiva vaatimusten mukainen testipenkki, jolla voidaan testata lähes kaikenlaisia työkaluja ja saada tarvittavat tulokset talteen testeistä turvallisesti. Tämän opinnäytetyön aikana opittiin paljon suunnittelusta ja mitä kaikkea siihen kuuluu. Esimerkiksi testipenkkiin liittyvistä resursseista, kuten aikataulutuksesta, budjetoinnista, komponenttien tilauksista ja osien valmistuksista. Sekä opittiin kommunikoimaan tehokkaasti eri sidosryhmien kanssa.

Haasteita opinnäytetyössä aiheutti ennennäkemättömän laitteen suunnittelu, eli laite piti kehittää aika lailla tyhjästä ja piti soveltaa koulusta aiemmin opittuja asioita. Aikataulun kanssa oli hieman ongelmia, eli oli vaikea arvioida kuinka kauan kaikissa eri suunnittelun vaiheissa voisi kestää koska aiempaa syvempää kokemusta ei ollut. Byrokratia eri sidosryhmien kanssa aiheutti omanlaisia ongelmia ja pitkitti opinnäytetyön valmistumista. Muuten opinnäytetyö sujui ihan hyvin ja päästiin haluttuun lopputulokseen, johon kaikki osapuolet olivat tyytyväisiä.

3D-tulostettujen työkalujen testipenkillä WHAM saa todistettua, että heidän suunnitellut työkalut oikeasti toimivat ja kestävät kuten he ovat suunnitelleet. Testipenkillä voidaan tutkia 3D-tulostuksen käyttämistä erilaisten työkalujen valmis-

tukseen ja saadaan uutta tietoa, jota voidaan hyödyntää 3D-tulostamisen kehittämiseen. Tämän ansiosta tuotantoon saadaan uudenlaisia innovatiivisia työkaluja, jotka nopeuttavat ja helpottavat asentajien arkea esimerkiksi moottorien kokoonpanossa.

Testipenkin jatkokehittämisellä saataisiin parannettua testin tuloksia, laajennettua testejä ja nopeutettua testaamista. Testaamisen parantamiseen voitaisiin käyttää: automatisointia, eli jokin logiikka, jolla voitaisiin tehdä toistuvia testejä työkaluille, tällä tavalla voitaisiin tehdä työkaluille väsymiskokeita. Lisää antureita, kuten voima-anturi, liimattavia venymäliuskoja ja kulmamittari pitkille hylsille. Testipenkin muokkaaminen siten että sillä voitaisiin testata muitakin 3D-tulostettuja osia, kuten erilaisia kiinnikkeitä. Kunnan kameranäkö, jolla saadaan automatisoitua ja tarkennettua muodonmuutosten mittaaminen. Useampia eri työkalujen painajia ja työkalutukia, joilla voitaisiin testata monimutkaisempia työkaluja. Standardoidaan työkalujen testaus virallisesti, jolloin työkaluja voitaisiin markkinoida ja valmistaa sarjatuotantona.

## LÄHTEET

- /1/ Wärtsilä Oy about. Viitattu 5.2.2023. <https://www.wartsila.com/about>
- /2/ Wärtsilä Oy Energy. Viitattu 10.2.2023. <https://www.wartsila.com/energy>
- /3/ Wärtsilä Oy Marine products and solutions. Viitattu 12.2.2023. <https://www.wartsila.com/voyage>
- /4/ Kuva 1. Wärtsilä tuotteita. Viitattu 17.2.2023. <https://www.wartsila.com/kor/en/marine/products>
- /5/ Wärtsilä Sustainable Technology Hub (STH). Viitattu 26.2.2023. <https://www.sustainabletechnologyhub.com/fi/sth/>
- /6/ Kuva 2. Sustainable Technology Hub. Viitattu 30.2.2023. <https://brand-hub.wartsila.com/share/3850865A-CCD9-4B95-BE0B258A58231BBB/?mediaId=2D96ECE8-CCA9-472C-935DE3627EC5304C>
- /7/ Wärtsilä Oy, sisäinen tieto. Viitattu 5.3.2023.
- /8/ Hantula, Juha. 2022. Tuotekehitysprojekti. Kurssimateriaali. Vaasan ammattikorkeakoulu. Viitattu 12.1.2023.
- /9/ Hydraulic Press Channel. Youtube kanava. Viitattu 15.3.2023. <https://www.youtube.com/@HydraulicPressChannel>
- /10/ University of Guelph torque. Viitattu 5.2.2023. <https://www.physics.uoguelph.ca/torque-and-rotational-motion-tutorial>
- /11/ Boltscience is torque value really needed. Viitattu 18.3.2023. <https://www.boltscience.com/pages/is-a-torque-value-needed.htm>
- /12/ HBM how does a torque transducer actually work. Viitattu 17.2.2023. <https://www.hbm.com/en/10716/how-does-a-torque-transducer-actually-work/>
- /13/ Wikipedia muodonmuutos. Viitattu 13.3.2023. [https://en.wikipedia.org/wiki/Deformation\\_\(engineering\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Deformation_(engineering))
- /14/ Enerpac Pascal's Law and hydraulic tools. Viitattu 10.2.2023. <https://blog.enerpac.com/pascals-law-and-hydraulic-tools/>
- /15/ Caendkoelsch 7 general steps in any FEM simulation. Viitattu 1.4.2023 <https://caendkoelsch.wordpress.com/2018/05/19/7-general-steps-in-any-fem-simulation/>

/16/ Etteplan Oy tietoa meistä. Viitattu 10.3.2023.  
<https://www.etteplan.com/fi/tietoa-meista>

/17/ Etteplan Oy, sisäinen tieto. Viitattu 21.3.2023.

/18/ Kuva 25. Instron MT Torsion testing machine. Viitattu 5.1.2023.  
<https://www.instron.com/en/resources/videos/2022/march/mt-torsion-testing-machine>

/19/ Kuva 26. Hytorc hydraulisia pulttien kiristyslaitteita. Viitattu 7.1.2023.  
<https://hytorc.com/hydraulic-tools>

/20/ Kuva 27. Biltema 20 TON korjaamopuristin. Viitattu 13.3.2023.  
<https://www.biltema.fi/tyokalut/kasityokalut/pihdit/erikoispihdit/korjaamopuristin-20000-kg-2000040883>

/21/ M3Design Guide to top down design. Viitattu 12.3.2023 <https://www.m3design.com/guide-to-top-down-design/>

/22/ DesigningBuildings Design for manufacture and assembly. Viitattu 18.3.2023.  
[https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Design\\_for\\_Manufacture\\_and\\_Assembly\\_\(DfMA\)](https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Design_for_Manufacture_and_Assembly_(DfMA))

/23/ Easy-Systems ratkaisut. Viitattu 20.3.2023. <https://easy-systems.fi/ratkaisut/>

/24/ Sop-Metal esite. Viitattu 24.3.2023. [https://www.esitteemme.fi/SOP-Metal\\_Oy/WebView/](https://www.esitteemme.fi/SOP-Metal_Oy/WebView/)

LIITTEET

Liite 1. Testipenkin kokoonpanopiirustukset

26	VÄÄNNIN_ASM	1
25	M16X150_BOLT	2
24	FOSCAM_ASM	1
23	M12X30_BOLT	2
22	M12_NUT	2
21	OVEN_PIDIN	2
20	MITTAUSRUUDUKK_OI	1
19	M10_NUT1	12
18	M10X25_BOLT	12
17	M6X14_BOLT	12
16	M6X12_BOLT	12
15	ALUMINIIPROFIILLI_TUKI2	12
14	ALUMINIIPROFIILLI_TUKI1	6
13	ALUMINIIPROFIILLI_TUKI3	6
12	ALUMINIIPROFIILLI_SUOJAJ	1
11	ALUMINIIPROFIILLI_SUOJAJ	1
10	M16X85_BOLT	4
9	M16_NUT	10
8	M16X35_BOLT	4
7	TYÖKALUTUKI_HYLKYVILLE_15-30MM	1
6	TYÖKALUTUKI_HYLKYVILLE_30-45MM	1
5	JIGI_ASM	1
4	PRASSI_PAINAJA	1
3	ALUSTA_ASM	1
2	PRASSI	1
1	TYÖKALUTUKI_VÄÄNTIMELLE	1

Rev	0	Modification	0	Date	0	Designer	0	Checked	0	Approved	0
Project	Testipenkki		Designer	Oskari Nordström	26.3.2023	Part Name	Jigi_ASM				
General tolerances	Checked	Approved									
Machining	ISO 2768										
Welding	ISO 18253										
Thermal	ISO 9653										
Material	Alu		Scale	1:5							
Weight	2220		Part Number								
kg			Sheet	1/1							

This document and its technical content is a property of owner and shall neither be copied, shown or communicated to a third part without a prior written permission of the owner. All rights reserved.

16	STAATTINEN_ANTURI_L-TUKI	1
15	M16_NUT	2
14	M12X50_BOLT	2
13	M12X45_BOLT	3
12	M12X40_BOLT	3
11	M12_NUT	5
10	M16X40_BOLT	2
9	M20X45_BOLT	4
8	LAIPPA_VÄÄNTÖMOMENTTIAANTURI	1
7	PABA453424 --	1
6	STAATTINEN_VÄÄNTÖMOMENTTIAANTURI	1
5	ALUSTA_PM1	2
4	JIGI_ETUTUKI	2
3	JIGI_KESKILEVY	1
2	JIGI_TAKATUKI	2
1	JIGI_ALALEVY	1

Rev	0	Modification	0	Date	0	Designer	0	Checked	0	Approved	0
Project	Testipenkki		Designer	Oskari Nordström	26.3.2023	Part Name	Jigi_ASM				
General tolerances	Checked	Approved									
Machining	ISO 2768										
Welding	ISO 18253										
Thermal	ISO 9653										
Material	Alu		Scale	1:5							
Weight	30		Part Number								
kg			Sheet	1/2							

This document and its technical content is a property of owner and shall neither be copied, shown or communicated to a third part without a prior written permission of the owner. All rights reserved.

(RAL 9004)-->	10	M16X100_BOLT-	6
	9	SÄÄTOJALKA_ASM	2
	8	M16X110_BOLT-	4
	7	M16X70_BOLT-	18
	6	M16_NUT-	28
(RAL 2011)-->	5	JALKA_40X40_80S-	2
(RAL 2011)-->	4	JALKA_40X40_70S-	1
(RAL 9004)-->	3	L_TUUTI-	4
(RAL 9004)-->	2	ALUSTA1-	1
(RAL 9004)-->	1	ALUSTA_RUNKO-	1

Rev	Modification	Date	Designer	Checked	Approved
A					

Project	Testipenkki	Designer	Oskari Nordström	Date	10.3.2023	Part Name	Alusta_ASM
General tolerances		Checked		Material		Weight	kg
Machining	ISO 2768	Approved					
Welding	ISO 5828						
Thermal cut	ISO 9013						

VMK Kone- ja tuotantotekniikka A2 1:10 Sheet 1/1

This document and its technical content is a property of owner and shall neither be copied, shown or communicated to a third party without a prior written permission of the owner. All rights reserved.

(RAL 2011)-->	6	M8_BOLT-	1
	5	PÄRSSI_PAINAJA_K LEMMARI-	1
	4	PRÄSSI_PAINAJA_PI DIN-	1
	3	PRÄSSI_PAINAJA_A KSELI-	1
	2	PRÄSSI_PAINAJA_ RULLA-	1
	1	PRÄSSI_PAINAJA_R UNKO-	1

Rev	Modification	Date	Designer	Checked	Approved
A					

Project	Testipenkki	Designer	Oskari Nordström	Date	10.3.2023	Part Name	Prässi_painaja_Asm
General tolerances		Checked		Material		Weight	kg
Machining	ISO 2768	Approved					
Welding	ISO 5828						
Thermal cut	ISO 9013						

VMK Kone- ja tuotantotekniikka A4 1:2 Sheet 1/1

This document and its technical content is a property of owner and shall neither be copied, shown or communicated to a third party without a prior written permission of the owner. All rights reserved.

	12	HITSI_M20_NUT-	1
(RAL 2011)->	11	TYÖKALUTUKI_POH JALEVY2-	1
(RAL 2011)->	10	TYÖKALUTUKI_LAA KERI_RUNKO_15-30 MM2-	1
	9	M20X120_KIERRETA NKO1-	1
(RAL 2011)->	8	M20_NUT-	6
(RAL 2011)->	7	TYÖKALUTUKI_ALA LEVY1-	1
(RAL 2011)->	6	TYÖKALUTUKI_LAA KERI_RUNKO_15-30 MM-	1
	5	LAAKERI1-	3
	4	M20X75_BOLT-	3
	3	HOLKKI-	6
	2	M16_NUT-	4
	1	M16X200_KIERRETA NKO1-	2
	PC NO	PART NAME	QTY

(Osat 11 ja 12 hitsataan yhteen)

No	Modifikaatio	Päivä	Disainija	Tarkastaja	Approvointi		
Projekti	Teslipenkki	Disainija	Oskari Nordström	10.3.2023	Part Name	TYÖKALUTUKI_POH_15-30mm_ASM	
General	Valmistus	ISO 9001	Checked	Approved	Material	Wagti	
Production	ISO 9001	Checked	Approved	Material	Wagti	3.2	
Thermal	cat. ISO 9001	Checked	Approved	Material	Wagti	kg	
		Size	A3	Scale	1:5	Part Number	

Sheet 1/1

This document and its technical content is a property of owner and shall neither be copied, shown or communicated to a third part without a prior written permission of the owner. All rights reserved.

	12	TYÖKALUTUKI_POH JALEVY2-	1
(RAL 2011)->	11	HITSI_M20_NUT-	1
(RAL 2011)->	10	TYÖKALUTUKI_ALA LEVY1-	1
(RAL 2011)->	9	TYÖKALUTUKI_LAA KERI_RUNKO_30-45 MM-	1
	8	M20X120_KIERRETA NKO-	1
	7	M20X75_BOLT-	4
	6	TYÖKALUTUKI_LAA KERI-	4
	5	TYÖKALUTUKI_HOL KKI-	8
(RAL 2011)->	4	TYÖKALUTUKI_LAA KERI_RUNKO_30-45 MM2-	1
	3	M20_NUT-	7
	2	M16_NUT-	4
	1	M16X200_KIERRETA NKO-	2
	PC NO	PART NAME	QTY

(Osat 11 ja 12 hitsataan yhteen)

No	Modifikaatio	Päivä	Disainija	Tarkastaja	Approvointi		
Projekti	Teslipenkki	Disainija	Oskari Nordström	10.3.2023	Part Name	TYÖKALUTUKI_POH_30-45mm_ASM	
General	Valmistus	ISO 9001	Checked	Approved	Material	Wagti	
Production	ISO 9001	Checked	Approved	Material	Wagti	3.5	
Thermal	cat. ISO 9001	Checked	Approved	Material	Wagti	kg	
		Size	A3	Scale	1:5	Part Number	

Sheet 1/1

This document and its technical content is a property of owner and shall neither be copied, shown or communicated to a third part without a prior written permission of the owner. All rights reserved.



(RAL 2011)-->

(RAL 2011)-->

(RAL 2011)-->

(Osat 5 ja 6 hitsataan yhteen) (Osat 7 ja 8 liimataan yhteen)

9	M10_NUT1-	1
8	M10X16_BOLT	1
7	PYÖREÄKANTAINEN_TUKI1	1
6	HITSI_M20_NUT-	1
5	TYÖKALUTUKI_POH_JALEVY2-	1
4	M20_NUT-	3
3	M20X250_KIERRETA_NKO-	1
2	TYÖKALUTUKI_ALA_LEVY2-	1
1	U-TUKI-	1
PC NO	PART NAME	QTY

Rev	Modification	Date	Designer	Checked	Approved
-	-	-	-	-	-
Project Testipenkki		3.4.2023	Oskari Nordström		
General tolerances		Checked	Part Name Työkalutuki vääntimelle_ASM		
Machining ISO 2768		Approved	Material	Weight	kg
Welding ISO 13920				1.5	
Thermal cut ISO 9013					
<b>VAMK</b> Kone- ja tuotantotekniikka <small>VAASAN AMMATTIOIKSEKÄKOULU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES</small>		Size A4	Scale 1:5	Part Number	
Sheet 1/1					

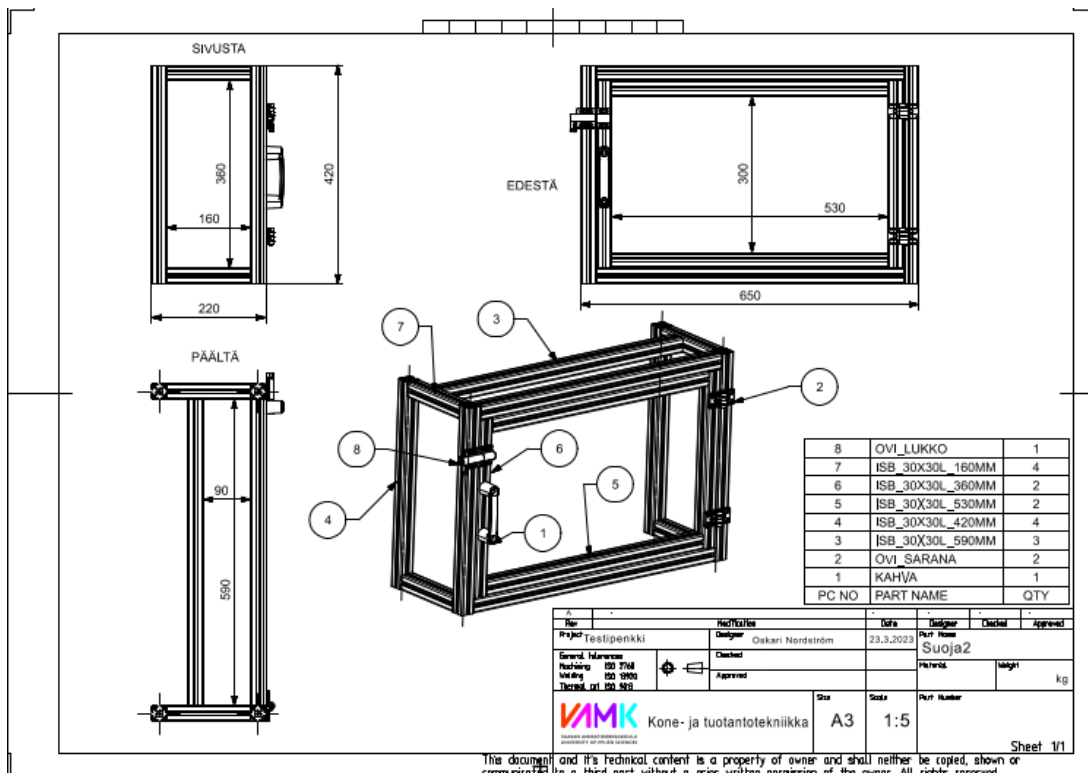
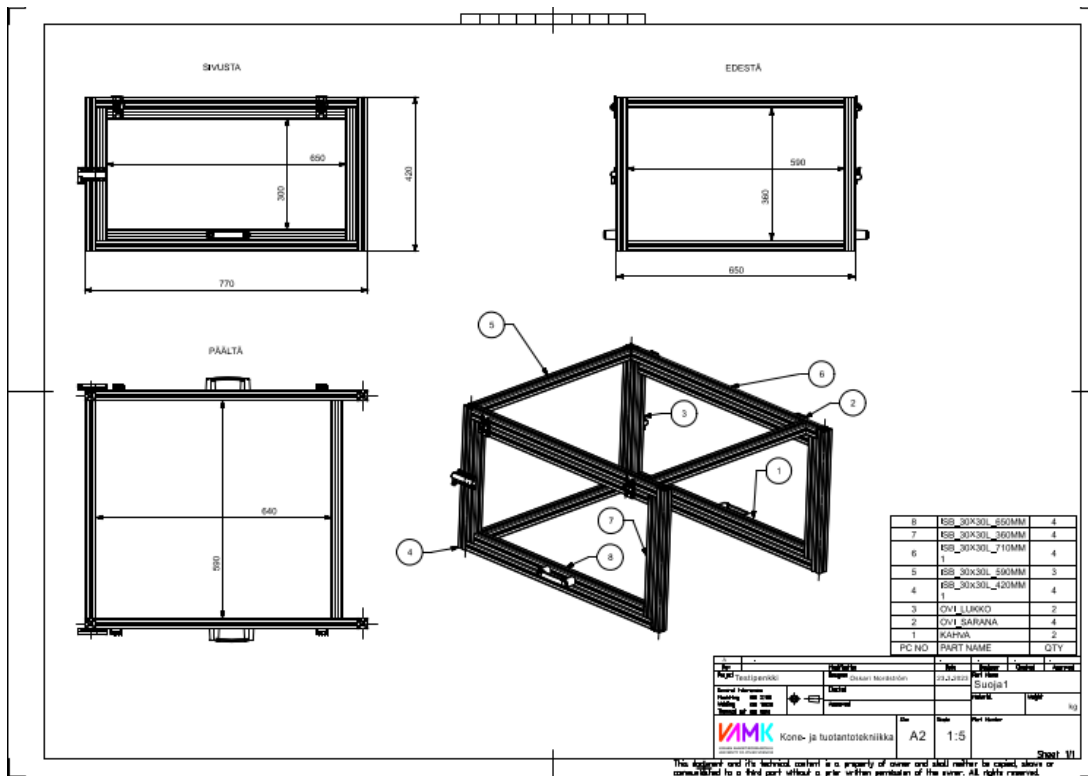
This document and its technical content is a property of owner and shall neither be copied, shown or communicated to a third part without a prior written permission of the owner. All rights reserved.

(RAL 2011)-->

5	MAGNEETTI-	4
4	M10_NUT-	4
3	M10X20_BOLT-	4
2	MITTARUUDUKKO1-	1
1	MITTAUSRUUDUKKO_L-TUKI-	4
PC NO	PART NAME	QTY

Rev	Modification	Date	Designer	Checked	Approved
-	-	-	-	-	-
Project Testipenkki		26.3.2023	Oskari Nordström		
General tolerances		Checked	Part Name Mittausruudukko_ASM		
Machining ISO 2768		Approved	Material	Weight	kg
Welding ISO 13920					
Thermal cut ISO 9013					
<b>VAMK</b> Kone- ja tuotantotekniikka <small>VAASAN AMMATTIOIKSEKÄKOULU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES</small>		Size A4	Scale 1:5	Part Number	
Sheet 1/1					

This document and its technical content is a property of owner and shall neither be copied, shown or communicated to a third part without a prior written permission of the owner. All rights reserved.



## Liite 2. Testipenkin FEM-Raportti

**Report number:** ETT1159316\_v1.0  
**Date:** 21.03.2023  
**Pages:** 17

**Issued by:** Lintula Petteri  
**Inspected by:** Hiljanen Antti  
**Approved by:** Lindroos Kati

# Wärtsilä

Test bench for 3D printed tools



 **Etteplan** Contact: [firstname.lastname@etteplan.com](mailto:firstname.lastname@etteplan.com)

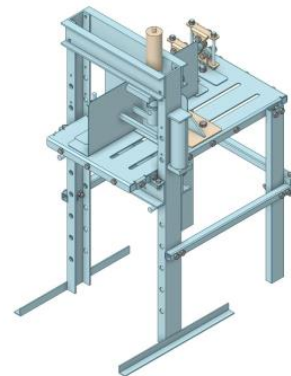
## Version history

Document version	Date	Description
1.0	21.03.2023	First version

 **Etteplan**

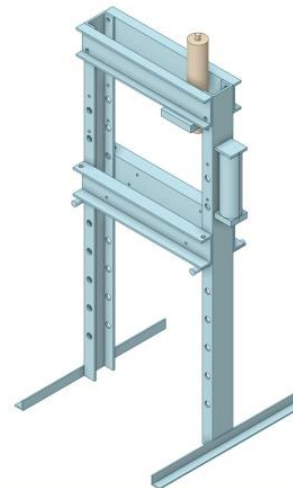
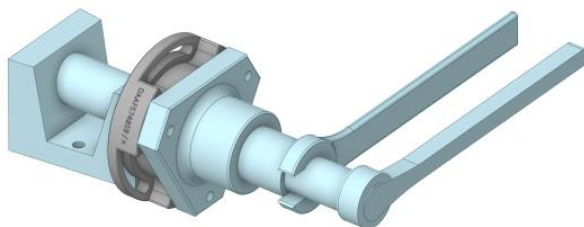
## Introduction

- Target of this study is to determine the static strength of test bench
  - Max testing torque is set to be 600 Nm
- Bolts and welds are analyzed according to Eurocode 3 EN1993-1-8
  - No fatigue analysis is conducted to the structure
- Analysis and geometry preparation preformed using
  - Ansys mechanical 2022 R2
  - SpaceClaim 2022 R2



## Components that are not analysed

- The press and its frame is not analyzed
- Also the sensors an tools tested are excluded.
- They are still modelled to help show real world behavior and to help determine and distribute the loads

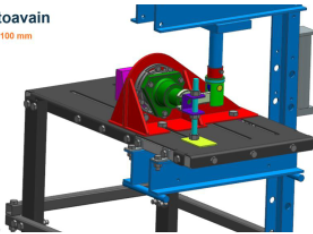


## Material properties and load cases

Two load cases were analysed. Both of them are presented in pictures below.

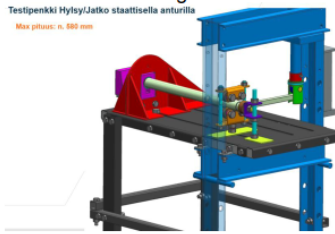
First case. Short fixed spanner

Lyhyt kiintoavain  
Minimi pituus: n. 100 mm



Second case. Long socket wrench

Testipenkki Hylsy/Jatko staattisella anturilla  
Max pituus: n. 500 mm



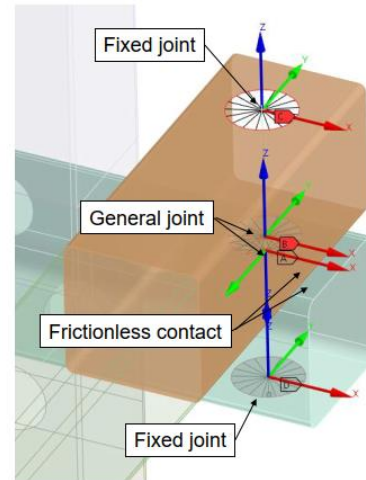
Material [t=mm]	Standard	Youngs modulus [GPa]	Yield strength [MPa]	Tensile strength [MPa]	Poissons ratio
S235, t ≤ 16	EN 10025-2	210	235	360	0.3

## GEOMETRY



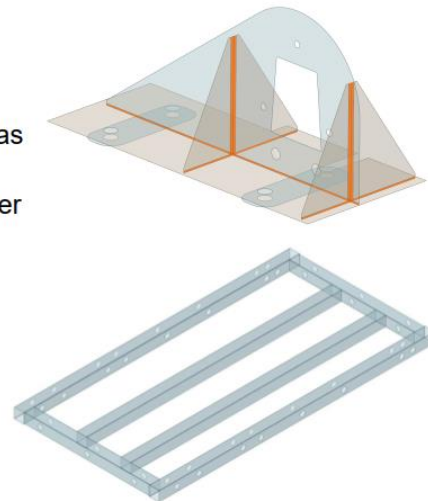
## Geometry

- Geometry was provided as a step file: "Testipenkki\_asm.step"
- Most of the geometry was converted to mid surfaces.
- Bolted joints were modelled using beam elements and Ansys joints
  - No pretension applied
  - Beam ends were set to be fixed to the edge they attach to
  - General joints that allow movement in the axial direction and rotation around the axial direction were set to possible shear planes as shown
- Welds were modelled using plate elements that use the a-dimension of weld as the plate thickness
- Appropriate contacts were modelled at locations where they were needed.
  - For example, there is a frictionless contact between the 2 profiles shown



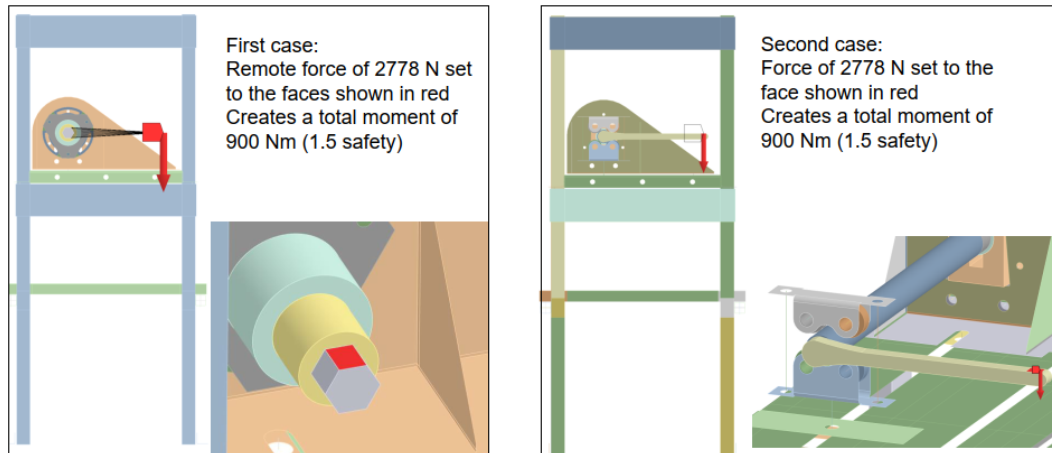
## Welds

- The welds shown in orange are modelled as double sided a4 fillet welds
- The base frame part is also welded together with a4 fillet welds



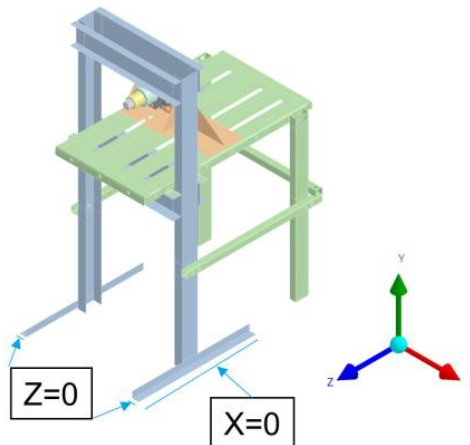
## Loads

In addition to the working loads, gravity ( $9.81 \text{ m/s}^2$ ) was applied



## Boundary conditions

- All the legs were supported in the y-direction
- Other boundary conditions shown in photo



# RESULTS



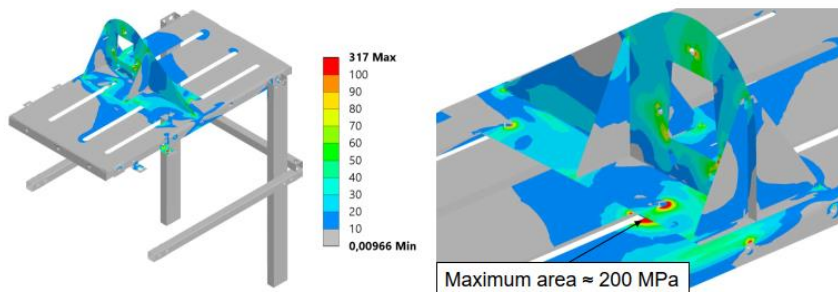
Etteplan

## Results – first case, stresses

The stress state of the structure is low. The structure can stand the loads meant to it.

No further analysis is needed.

Maximum stress are is shown in photo. They are local and do not exceed the yield limit



Etteplan



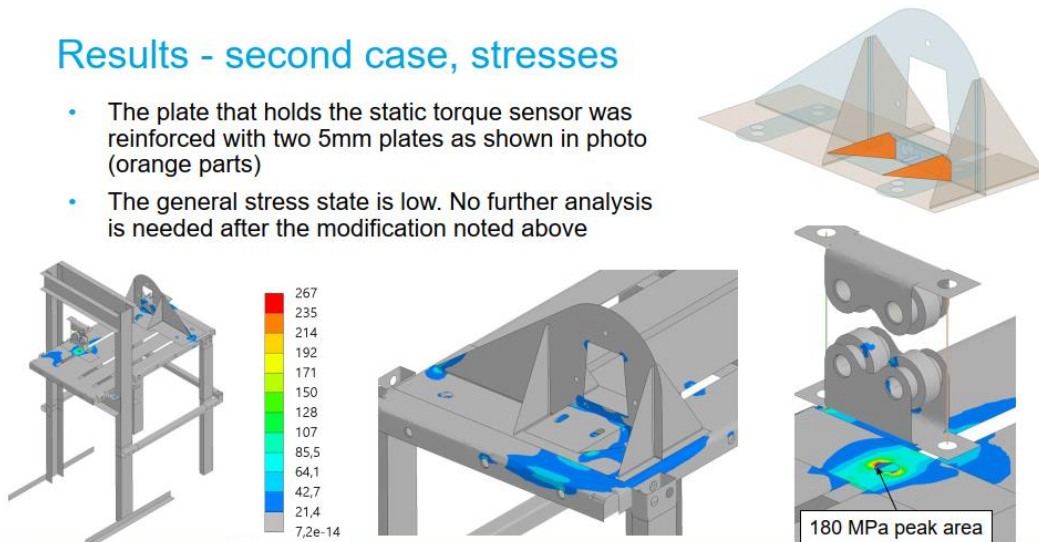
## Results – first case, bolts

Values of maximum loads can be seen in pictures below  
 These values translate to the following utilizations:  
 Slip resistance: 58%  
 Tension resistance: 2%  
 Shear resistance: 8%  
 Combined shear and tension: 10%  
 All these values are at acceptable ranges



## Results - second case, stresses

- The plate that holds the static torque sensor was reinforced with two 5mm plates as shown in photo (orange parts)
- The general stress state is low. No further analysis is needed after the modification noted above



## Results – second case, bolts

Values of maximum loads can be seen in pictures below

These values translate to the following utilizations:

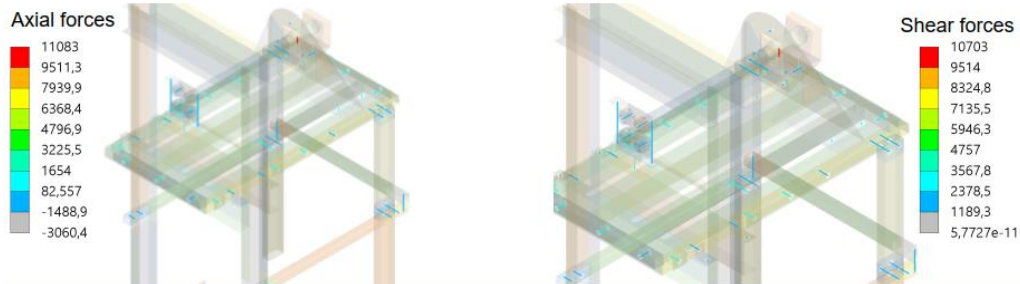
Slip resistance: 134%

Tension resistance: 12%

Shear resistance: 17%

Combined shear and tension: 25%

All these values are at acceptable ranges. Slip resistance can be lost but it will not result in fatal problems



## CONCLUSIONS



## Conclusions

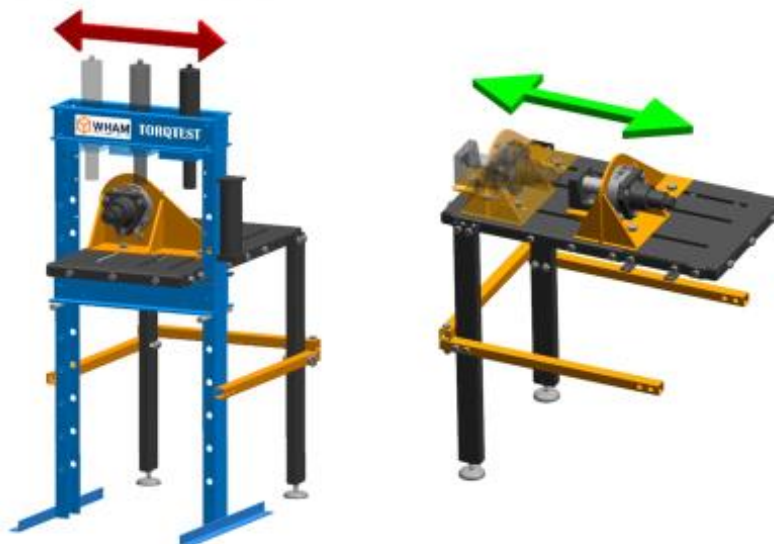
- **Stresses**
  - Stresses at base material are at acceptable ranges
  - Stresses at welds are relatively low
  - No further analysis is needed for stress results
- **Bolted connections**
  - All bolted connections are acceptable when analyzed according to Eurocode 3
- The static torque analysis holder plate was reinforced with 2 stiffener plates

## Liite 3. Testipenkin käyttöohjeet

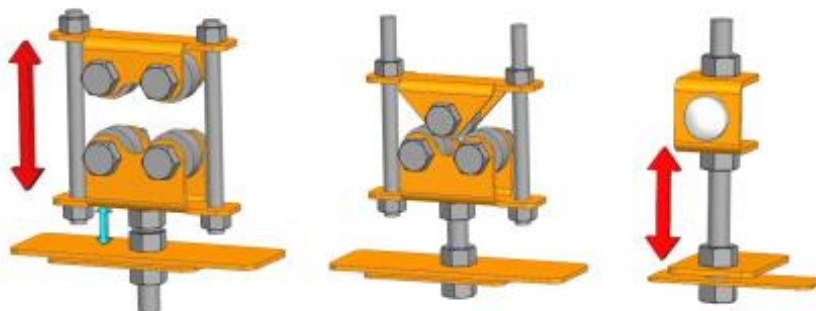
Testipenkki kokoonpanot.....	2
Testipenkki kokonaisuus.....	2
Jigi .....	2
Työkalutuki 15-30mm.....	3
Työkalutuki 30-45mm.....	3
Työkalutuki vääntimelle.....	4
Mittaruudukko.....	4
Prässin mäntä painaja.....	5
Testipenkin säädöt eri työkaluille.....	6
Käyttöohjeet .....	10

Testipenkin säädöt eri työkaluille

Prässin mäntää säädetään sivuttaissuunnassa kiintoavaimen pituuden mukaan ja jigiä syvyys suunnassa hylsyn pituuden mukaan.



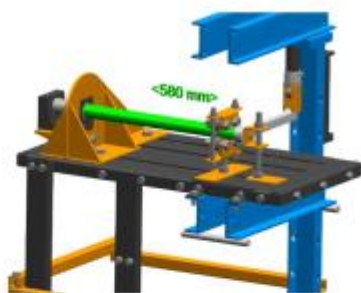
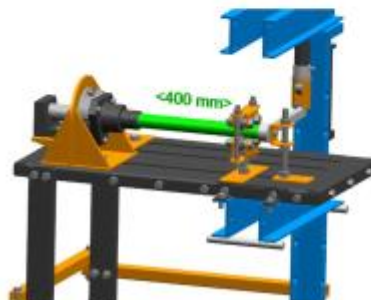
Työkalutukia on 15-30mm ja 30-45mm halkaisijalle. Työkalutuet säädetään sopivaksi hylsyn halkaisijalle.



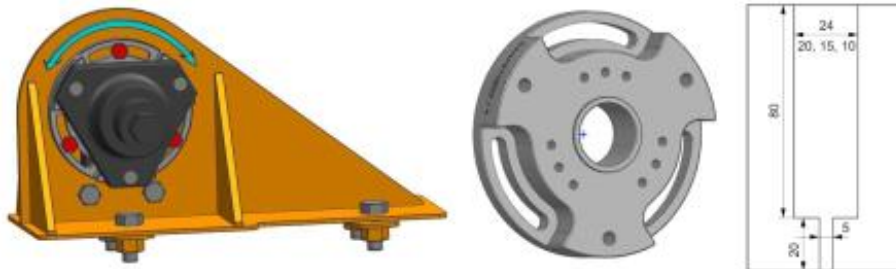
Alustan alapuolella on levyt, joihin on hitsattu mutteri niin ei tarvitse pitää alapuolelta vastaan kun kiristää jigia ja työkalutukien pultteja. Jigi ja työkalutuet liikkuvat urissa. Kuvissa näkyy minimi ja maksimi pituus kiintoavain tyyppiselle työkalulle. Jos tarvitsee testata pidempää kuin 345 mm pitkää työkalua, niin jigi pitää laittaa 2 asentoon kuvan mukaisesti ja työkalujen painaja pitää kääntää 90 astetta. Kamera kiinnitetään testipenkin etupuolelle alumiiniprofiilin uraan, niin että se kuvaa työkalua oikeasta suunnasta ja että mittaruudukko näkyy työkalun taustalla.



Kuvissa näkyy minimi ja maksimi pituus hylsy tyypiselle työkalulle. Jos tarvitsee testata pidempää kuin 400 mm pitkää työkalua, niin pitää käyttää staattista anturia ja sen runkoa. Vääntimessä on 3/4" vääntiö, jos työkalussa on 1/2" vääntiön reikä, niin vääntimeen pitää kiinnittää vähennyskappale 3/4">1/2". Kamera kiinnitetään testipenkin etupuolelta katsottuna testipenkin oikealle puolelle alumiiniprofiilin uraan, niin että se kuvaa työkalua oikeasta suunnasta ja että mittaruudukko näkyy työkalun taustalla.



Laipallisen vääntömomenttianturin kiinnikettä pystyy kiertämään tarvittaessa. Anturiin voi vaihtaa erikokoisia työkaluadaptereita. Prässin mäntään voi kiinnittää erikokoisia pitimiä.





## Käyttöohjeet

Tutustu Biltema 20 TON korjaamopuristimen, Norbar T-Box 2 ja FOSCAM R4 käyttöohjeisiin.

Biltema prässä: <https://docs.biltema.com/v2/documents/file/f/60f9e12e-1e14-4cff-a571-6cd3d08f033e>

Norbar T-Box 2: [https://www.norbar.com/Portals/0/NorbarProducts/operators\\_handbook/34474.pdf](https://www.norbar.com/Portals/0/NorbarProducts/operators_handbook/34474.pdf)

Foscam R4: [https://www.foscam.com/Uploads/usermanual/2019-07-09/User%20Manual%20for%20R2%20R4%20%20R2E\\_V2.6\\_English.pdf](https://www.foscam.com/Uploads/usermanual/2019-07-09/User%20Manual%20for%20R2%20R4%20%20R2E_V2.6_English.pdf)

1. Tarkista testipenkki ennen testausta. Varmista, että kaikki prässin letkut ovat kiinni ja että niissä ei ole vuotoja. Tarkista myös, että prässä toimii kunnolla ja osissa ei ole rikkoumia. Käytä suojalaseja testin aikana.

2. Kiinnitä sopiva vääntömomenttianturi jigiiin ja anturiin oikean kokoinen työkaluadapteri. Aseta kiintoavain tyyppisten työkalujen mittaruudukko kohdilleen. Kiinnitä kiintoavain tyyppinen työkalu työkaluadapteriin niin, että työkalun ja prässin männän välillä kulma on 90 astetta. Tarvittaessa kierrä laipallisen anturin kiinnikettä, kunnes työkalu on sopivassa asennossa. Aseta vääntimen tuki työkaluadapteria vasten.

Jos testattavana on hylsyttyyppinen työkalu, käytä erillistä säädettävää laakeroitua tukea. Säädä jigin etäisyys sopivaksi hylsyn pituudelle ja säädä laakeroitun tuen korkeus sopivaksi. Laita hylsyy kiinni väännin ja käytä hylsyyille tarkoitettua mittaruudukkoa. Kiristä laakeroitun tuen yläosa niin, että laakerit osuvat hylsyy. Aseta vääntimen tuki väännintä vasten.

4. Kiinnitä prässin mäntään työkalulle sopiva pidin. Säädä jigiiä ja prässin mäntää pumpaamalla sitä hieman, niin että mäntä painaa työkalua oikeasta kohdasta ja pidin estää työkalun irtoamisen työkaluadapterista. Kiristä jigin 4x M20 pulttia ja männän sivuttaisliikkeen lukituksen 2x M10 pulttia. Sulje suojien ovet ja ota kuva alkutilanteesta.

5. Tarkista että kameraa kuvaa työkalua hyvin. Aloita vääntömomentin, videon tallennus ja aloita testaaminen pumpaamalla mäntää. Ota uusi kuva, kun haluttu vääntömomentti on saavutettu.

6. Kun testi on valmis, päästä prässistä paineet. Kun paineet on päästetty, lopeta vääntömomentin ja videon tallennus. Avaa suojat ja tarkista työkalu. Vertaa otettuja kuvia keskenään ja mittaa mahdollinen muodonmuutos ruudukoitten avulla.

7. Kun tarkistukset on tehty, avaa männän sivuttaisliikkeen lukituksen 2x pulttia. Löysää vääntimen tuki. Irrota työkalun pidin, työkalu, työkaluadapteri ja mittaruudukko. Löysää jigin 4x pulttia.

Jos testattavana oli hylsyttyyppinen työkalu, niin irrota laakeroitu tuki ja laita se takaisin säilytyspaikkaan.

Säädä jigin etäisyys ja prässin mäntä takaisin alkuperäisiin kohtiin.