

Opinnäytetyö AMK

Konetekniikka

2020

Pietu Koivunen

TESTAUSMENETELMÄN  
SUUNNITTELU  
ROOTTORIPURJEEN  
KATTOLUUKULLE

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Konetekniikka

2020 | 37 sivua, 2 liitesivua

Pietu Koivunen

# TESTAUSMENETELMÄN SUUNNITTELU ROOTTORIPURJEEN KATTOLUUKULLE

Opinnäytetyö tehtiin Norsepower Oy Ltd:lle, joka on suomalainen yritys. Se suunnittelee ja valmistaa roottoripurjeita. Opinnäytetyön tarkoituksena oli suunnitella koemenetelmä purjeen katolle kiinnitettävälle luukulle. Roottoripurjeet ovat korkeita, rakenteeltaan sylinterimäisiä energiantuotantoon suunniteltuja laitteita, joiden huollettavuus on oltava helppoa ja tehokasta. Vaihtoehdot purjeen päälle pääsyyn ovat joko henkilönostimen käyttö tai köysillä kiipeäminen sisäpuolelta purjeen keskellä olevan luukkun kautta katolle. Sitä ei ole suunniteltu helposti tai nopeasti irroitettavaksi ja sen viereen pääsy köysien avulla on hankalaa.

Koemenetelmän avulla on tarkoitus selvittää mahdollisuutta käyttää venekäyttöön suunniteltuja luukkuja katolle siirtymiseen. Purjeiden ollessa käytössä, pyörivät ne suurella nopeudella oman akselinsa ympäri, aiheuttaen suuren voiman kehällä pyörivään kappaleeseen. Täten luukkuja halutaan testata etukäteen, jotta ne ovat riittävän kestäviä otettavaksi käyttöön purjeissa.

Työ sisältää pohdintaa erilaisista testausvaihtoehdoista, voimien laskemista sekä taustatyötä luukuista ja turvallisuudesta. Yhteen testausvaihtoehtoon syvennyttään tarkemmin ja sen toteutusta varten laaditaan suunnitelma.

Lopputuloksena saatiin koemenetelmän kuvaus, joka on tarkoitus toteuttaa myöhemmin kuluvan vuoden aikana yhteistyössä Norsepowerin ja Turun ammattikorkeakoulun kanssa.

ASIASANAT:

Suunnittelu, Tuotekehitys, Kokeet, Kestokyky, Mittaustekniikka

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Degree programme in Mechanical engineering

2020 | 37 pages, 2 pages in appendices

Pietu Koivunen

## DESIGN OF TEST METHOD FOR ROTORSAIL TOP PLATE HATCH

The thesis was commissioned by Norsepower Oy Ltd which is a Finnish company that designs and manufactures rotor sails. Purpose of the thesis was to design a method to test hatches which shall be attached to the roof of a sail. Rotor sails are tall, cylindrical devices designed for energy production so their maintenance must be easy and efficient. Options for access on top of the sail are either use of an aerial work platform or to climb ropes inside the sail and go through a hatch in the middle of the sail. That hatch is not designed to be easily or quickly removed and it is difficult to access next to it with ropes.

The purpose of the test method is to determine the possibility of using hatches designed for boats to be used for access to roof. When the sails are in use, they rotate at high speed around their own axis, causing a large force on any item on the perimeter. Thus, hatches are wanted to be tested in advance to ensure that those are durable enough to be used on sails.

The thesis included a reflection on different testing options, calculation of forces, and background work on hatches and safety. One of the testing options was further developed into more detail and a plan was made up for its implementation.

As a result, a description of the testing method was created, which is to be implemented later in 2020 in cooperation with Norsepower and Turku University of Applied Sciences

### KEYWORDS:

Design, product development, testing, material tolerance measurement technology

# SISÄLTÖ

<b>KÄYTETYT LYHENTEET JA SANASTO</b>	<b>6</b>
<b>1 JOHDANTO</b>	<b>7</b>
<b>2 TIETOPERUSTA JA TUTKIMUS</b>	<b>10</b>
2.1 Valmiit luukkuvaihtoehdot	10
2.2 Kohdistuvat voimat ja laskenta	13
2.3 Turvallisuus	16
<b>3 TESTIPENKIN SUUNNITTELU</b>	<b>18</b>
3.1 Mekaniikka	18
3.1.1 Versio 1	19
3.1.2 Versio 2	20
3.1.3 Versio 3	21
3.2 Hydrauliikka	24
3.3 Mittaus ja datan kerääminen	27
3.4 Mallinnus	31
3.5 Valmistus	34
<b>4 YHTEENVETO JA SAATESANAT</b>	<b>35</b>
<b>LÄHTEET</b>	<b>37</b>

## LIITTEET

- Liite 1. Suoran ja kaltevan hattulevyn vaikutus voimaan  
Liite 2. Lujuuslasku S235 luokan teräkselle

## KAAVAT

Kaava 1. Kulmanopeus (Haarto & Karhunen)	13
Kaava 2. Keskeiskiihtyvyys (Haarto & Karhunen)	13
Kaava 3. Verranto (Väisälä, 1959, 54 – 55)	14
Kaava 4. Voiman kaava (Haarto 2012)	14
Kaava 5. Voiman kaava paineen avulla laskettuna	25

## KUVAT

Kuva 1 Kaksi 30 X 5 metristä roottoripurjetta operoivat Maersk Pelicanin kannella (Norsepower 2020)	7
Kuva 2 Roottoripurjeen yläosan rakenne	8
Kuva 3 Uusimman 30 x 5 metrisen roottoripurjeen asennus Scandlines Copenhagenille (Cruise and Ferry 2020)	9
Kuva 4 Vetuksen luukku (Vetus 2020)	10
Kuva 5 BSI DK:n luukku	11
Kuva 6 Version 1 testipenkin havainnekuva	19
Kuva 7 Version 2 testipenkin havainnekuva	21
Kuva 8 Version 3 testipenkin havainnekuva	22
Kuva 9 Hydraulikkajärjestelmän periaatekuva	26
Kuva 10 Koetta varten ajateltu hydrauliasema	26
Kuva 11 Arduino Uno mikrokontrolleri (Shemobotics 2020)	28
Kuva 12 WIKA A-10 painelähetin (Salhydro 2020)	28
Kuva 13 SHARP optinen etäisyysanturi (smart-prototyping 2020)	29
Kuva 14 Venymäliuska ja vahvistin (Partco 2020)	29
Kuva 15 Nestekidenäyttö kytkettynä Arduinolle (Makerguides 2020)	30
Kuva 16 Testipenkin 3D-malli	31
Kuva 17 S235 materiaaliominaisuudet (HTM yhtiöt 2020)	32
Kuva 18 Havainnekuva evämäisestä vetopisteestä simuloitaessa vetoa.	33

## KUVIOT

Kuvio 1 Voimat eri purjeissa	15
------------------------------	----

## TAULUKOT

Taulukko 1 Luukkujen tiedot (Quorning 2020 sekä Koskinen 2020.)	11
Taulukko 2 Luukkujen materiaalien ominaisuuksia (Makeitfrom 2020)	11
Taulukko 3 Lähtötiedot, kiihtyvyydet ja voimat	15

# KÄYTETYT LYHENTEET JA SANASTO

Lyhenne	Lyhenteen selitys (Lähdeviite)
$\Delta p$	Paineen muutos
$\Delta \varphi$	Kulman muutos
$\Delta t$	Ajan muutos
G	Putoamiskiihtyvyys
N	Newton, voiman yksikkö
MPa	Megapascal, paineen yksikkö (kerrannainen)
GPa	Gigapascal, paineen yksikkö (kerrannainen)
PMMA	Polymetyylimetakrylaatti, Akryyli
EN AW-5754	Alumiinilaatu
EN AW-6060	Alumiinilaatu
LCD	Liquid crystal display eli nestekidenäyttö
RHS	Profiililtaan suorakaiteen muotoinen putki

# 1 JOHDANTO

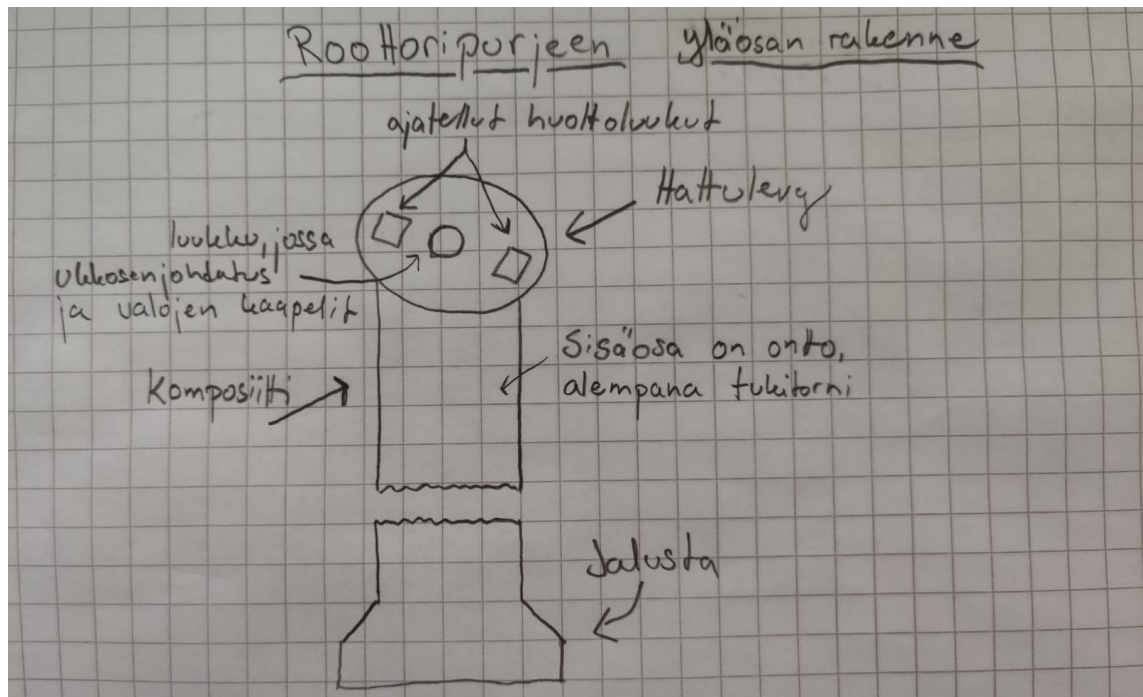
Opinnäytetyön aiheena on suunnitella testimenetelmä, jonka avulla voidaan selvittää, toimiiko venekäyttöön suunniteltu kansiluukku Norsepower Oy:n roottoripurjeissa. Aiheen taustalla on työntekijöiden ajatus huoltotöiden helpottamisesta. Lisäksi huollettavuus on yksi osa tuotteen kaupallistamista. Huoltotyön tekijän tulisi kyetä suoriutumaan tehtävästä nopeasti, helposti sekä kustannustehokkaasti.

Roottoripurje on sylinterimäinen, kaksiosainen mekaaninen purje, jonka toiminta perustuu Magnus-ilmiöön ja sellainen voidaan asentaa erityyppisten alusten kannelle (Ro-Ro alukset, tankkerit, risteilijät). Purjeen ulompi osa on valmistettu lasikuitukomposiitista, joka pyörii laakerien varassa sisemmän, teräksisen tukitornin päällä. Komposiittia pyöritetään sähkömoottorin avulla. Pyörittämällä purjetta saadaan komposiitin ulkopintaan aiheutettua ohut ilmakerros, joka liikkuu pyörimisliikkeen suuntaan. Kun tuuli osuu liikkuvaan ilmakerrokseen, se aiheuttaa purjeen toiselle puolelle nopeamman virtauksen kuin toiselle. Täten purjeen eri puolille syntyy Bernoullin lain mukaan paine-ero. Purjeen pyrkinessä pienemmän paineen suuntaan, syntyy työntövoimaa, joka auttaa liikuttamaan alusta samalla vähentäen pääpropulsion tarvetta ja päästöjä.



Kuva 1 Kaksi 30 X 5 metristä roottoripurjetta operoivat Maersk Pelicanin kannella (Norsepower 2020)

Pääosin kaikki purjeen hattulevyn päällä tehtävä työ, pois lukien visuaalinen tarkistus dronilla, vaatii henkilönostimen käyttöä, mikä on sekä kallista, että aikaa vievää.



Kuva 2 Roottoripurjeen yläosan rakenne

Henkilönostimen käyttö ei ole käytännössä mahdollista muulloin, kuin laivan pidempien telakointien tai huoltoseisakkien aikana. Toinen vaihtoehto on kiivetä köysiä pitkin purjeen sisältä hattulevyn alapuolelle ja siirtyä siitä ulos hattulevyn päälle. Tällä hetkellä tämä on kuitenkin lähes mahdotonta, sillä ainoa luukku on hattulevyn keskiosassa oleva ruuvikiinnitteinen levy, johon myös ukkosenjohdatin ja sen kaapelointi sekä mahdolliset lentoestevalojen kaapelit ovat kiinnitettyinä. Muttereiden irrottaminen ja levyn pois nostaminen alakautta köysien varassa on itsessään jo vaikeaa, mutta köysien kiinnityspisteiden sijainti kaukana keskiluukusta tekee työstä erittäin haastavaa. Tämän takia henkilönostinta on käytetty aina kun kulku hattulevyn päälle on ollut tarpeen. Uutena tapana on harkittu kahden, helposti avattavan luukun sijoittamista vastakkaisille puolille hattulevyä, jolloin siirtyminen yläpuolelle voitaisiin tehdä sisäkautta. Tällöin



henkilönostimen käyttöä ei tarvittaisi ja näin purjetta päästäisiin huoltamaan, ilman että alus on pidemmän aikaa samassa satamassa.



Kuva 3 Uusimman 30 x 5 metrisen roottoripurjeen asennus Scandlines Copenhagenille (Cruise and Ferry 2020)

## 2 TIETOPERUSTA JA TUTKIMUS

### 2.1 Valmiit luukkuvaihtoehdot

Testiä varten Euroopan markkinoilta oli hankittu kaksi luukkua, joiden toimintakykyä ja kestävyyttä tässä testissä tullaan koettamaan. Muutoin luukut ovat hyvin samankaltaisia, molemmissa on muoviset kahvat sisäpuolella, ne ovat suunnilleen samankokoisia ja painoisia. Myös avautumismekanismi ja kiinnitys on toteutettu samalla tavalla. Suurimpana erona on itse luukkuosan materiaali. Tanskalaisen BSI:n luukussa on alumiininen luukkuosa, kun Alankomaalaisen Vetuksen luukussa on akryyliä.



Kuva 4 Vetuksen luukku (Vetus 2020)



Kuva 5 BSI DK:n luukku

Molempien luukkujen kehykset ovat 6060-luokan alumiinia, joten vertailussa voidaan tarkastella itse luukkuosien materiaalien eroja. Alle on koottuna luukkujen tiedot taulukossa 1 sekä materiaalien mekaaniset ominaisuudet taulukossa 2. Lisäksi kehyksien materiaali on lisätty vertailun vuoksi mukaan taulukkoon 2.

Luukku 1		Luukku 2
BSI DK	Toimittaja	Vetus
636060M64AD5	Malli	MAG6363SL
EN AW-6060 + EN AW-5754	Materiaali	EN AW-6060 + PMMA
9.5 kg	Paino	10 kg
295 €	Hinta	190 €

Taulukko 1 Luukkujen tiedot (Quorning 2020 sekä Koskinen 2020.)

Määritelmä	Yksikkö	EN AW-5754	PMMA	EN AW-6060
Myötölujuus	MPa	180,00	-	120
Murtolujuus	MPa	265,00	70,00	180
Murtovenymä	%	10,50	5	12,50
Kimmokerroin	GPa	68	3,2	68
Taivutuslujuus	MPa	-	115,00	-
Leikkausmoduuli	GPa	26	1,50	26
Väsymislujuus	MPa	102	-	53,5

Taulukko 2 Luukkujen materiaalien ominaisuuksia (Makeitfrom 2020)

Meriolosuhteissa molemmat luukut ovat materiaaliensa puolesta toimivia. 5754-luokan alumiini on valmistettu nimenomaan meri-ilmastoa ajatellen ja sen korroosionkestävyys on hyvä. Akryyli toimii myös meriolosuhteissa hyvin sillä sen säänkestävyys ja UV-säteilyn kestävyys ovat erinomaisia. Käyttölämpötila akryylille on noin - 40°C – 100°C (Vink 2020).

Materiaalien teknisiltä ominaisuuksiltaan alumiininen luukku on kestävämpi kuin akryylistä valmistettu, mutta molempien pitäisi kestää testauksen aikana niihin kohdistettu voima. Akryyli on ominaisuuksiltaan kuitenkin haavoittuvainen vedolle, sillä suurin sallittu murtovenymä on melko pieni. Venymää luukussa olisi siis hyvä tarkkailla, jotta sen avulla voidaan arvioida materiaalin soveltuvuus aktiivikäyttöön. Lisäksi vaikka akryyli kestää heikkoja happoja ja rasvoja, alkoholia ja vahvoja happoja se ei kestä. Tämän ei kuitenkaan pitäisi muodostua ongelmaksi kokeen tai käytön aikana (Vink 2020). Alumiini kestää näitä yhdisteitä paremmin kuin akryyli.

Alumiiniluukun eduksi voidaan katsoa käyttökohteessa sen parempi muokattavuus. Siihen on helpompi kiinnittää jälkikäteen esimerkiksi silmukkaruuvi tai kahva käsittelyä tai muuta laitteistoa varten. Myös esimerkiksi jonkin anturin kiinnitys luukkuun on helpompaa sillä alumiiniin reijän tekeminen on riskittävämpää verrattuna akryyliin.

Akryylistä valmistetun luukun etuna alumiiniseen voidaan pitää sen valonläpäisyä, jolloin purjeen komposiittiosassa on helpompi työskennellä myös ilman tehokasta valonlähdettä. Tämä helpottaa lyhyitä huoltoja komposiitissa, kun sinne ei välttämättä tarvitse tuoda valonlähdettä. Lisäksi hattulevyn päällä olevien lentohuomiovalojen toiminnan tarkastaminen visuaalisesti onnistuu ilman luukun avaamista tai jopa ilman tarvetta kiivetä katonrajaan, mikäli ulkona on tarpeeksi pimeää.

Kummallakin luukuista on siis hyviä puolia ja niiden ollessa suunnilleen samaa hintaluokkaa, halutaan niitä molempia testata käyttöä varten. Tarvittaessa molempien luukkujen valmistukseen ja materiaaleihin voidaan vaikuttaa, vaikka se ei olekaan tämän kokeen osalta relevanttia.

## 2.2 Kohdistuvat voimat ja laskenta

Roottoripurjeen komposiittiosaa pyöritetään suurella nopeudella oman akselinsa ympäri. Korkean pyörimisnopeuden  $n$  ja halkaisijan  $d$  takia keskeiskiihtyvyys  $[a]$  on suuri ja purje toimii periaatteessa sentrifugina. Pyöriessään akselinsa ympäri, komposiittiin kohdistuu täten kymmenien G:n kiihtyvyys, joka kasvaa siirryttäessä keskipisteestä ulospäin. Esimerkiksi 30 metriä korkean purjeen halkaisija on 5.0 metriä ja kierrosnopeus 180 kierrosta minuutissa, sen ulkoreunaan kohdistuva voima voidaan kulmanopeuden ja keskeiskiihtyvyyden avulla.

kulmanopeuden kaava:

$$\omega = \Delta\varphi / \Delta t \quad \text{eli} \quad \omega = 2\pi * rad / t$$

Kaava 1. Kulmanopeus (Haarto & Karhunen)

keskeiskiihtyvyyden kaava:

$$\alpha_r = \frac{v^2}{r} \quad \text{eli} \quad \alpha_r = r * \omega^2$$

Kaava 2. Keskeiskiihtyvyys (Haarto & Karhunen)

Joissa  $\Delta\varphi$  = kulman muutos,  $\Delta t$  = ajan muutos,  $r$  = säde metreissä

Kun lähtöarvot halkaisijasta ja kierrosnopeudesta ovat selvillä, kulmanopeudeksi saadaan 18,849 [rad/s] ja keskeiskiihtyvyydeksi 888,2591 [m/s<sup>2</sup>]. Tästä voidaan laskea G-kiihtyvyyden arvoksi 90,56 G, jakamalla keskeiskiihtyvyys G-kiihtyvyyden vakioarvolla 9,80665.

Näin suuri kiihtyvyys asettaa vaatimuksia komposiittiin kiinnitettävälle kappaleille, joten venekäyttöön suunniteltua kansiluukkua ei voida suoraan kiinnittää purjeeseen ilman asianmukaista testausta. Tässä tapauksessa tulee ottaa kuitenkin huomioon, että luukku on suunniteltu sijoitettavaksi hattulevylle, noin 1 – 2 metrin etäisyydelle pyörähdysakselilta. Tällöin vaikuttava voima pienenee verrattaessa ulkoreunaan. Koska eri kokoisia purjeita pyöritetään eri nopeudella, tulee kullekin purjekoolle laskea aiheutuva voima ja verrata sitä tämän kokeen tuloksiin.

Luukut tullaan sijoittamaan lähelle kunkin purjeen hattulevyn ulkoreunaa, vaihtelevalla etäisyydelle pyörähdysakselilta. Luukkujen sijainti tulee olemaan kuitenkin noin 1 – 2 metriä pyörähdysakselilta ja vaikuttavan voiman suuruuteen vaikuttavista tekijöistä, eniten vaihtelee kierrosnopeus. Tällä hetkellä käytössä olevista purjeista suurin osa on joko 4 tai 5 metriä leveitä. Näiden purjeiden suurin kierroslukema vaihtelee välillä 160 – 180 rpm 5 metrin halkaisijalla ja 205 – 225 rpm 4 metrin halkaisijalla varustetuissa purjeissa. Tällä hetkellä vain 24 x 4 metrin purjeesta on valmistuskuva, jossa luukun keskikohdaksi määritellään 1.697 metriä pyörähdysakselilta, 30 x 5 metriselle purjeelle luukun keskipisteen paikka voidaan ratkaista verrannosta.

Etäisyyden ratkaisu:

$$\frac{x_1}{d_1} = \frac{x_2}{d_2}$$

Kaava 3. Verranto (Väisälä, 1959, 54 – 55)

Missä  $x_1$  = on tuntematon etäisyys,  $x_2$  = tunnettu etäisyys,  $d_1$  = tuntemattoman etäisyyden purjeen halkaisija ja  $d_2$  = tunnetun etäisyyden purjeen halkaisija.

Koska myös 18 x 3 metrisiä purjeita tuotetaan myös ja niiden teoreettinen maksimi kierrosnopeus on 300 rpm tulee ne ottaa mukaan voimavertailuun alla. Varsinaisessa lujuuslaskussa tullaan käyttämään keskeiskiihtyvyyden arvoa, sillä G-voimaa ei voida hyödyntää suoraan laskuissa.

Kiinnitettävään luukkuun kohdistuva voima  $F$  on siihen kohdistuvan keskeiskiihtyvyyden kiihtyvyyden ja luukun massan kertoma:

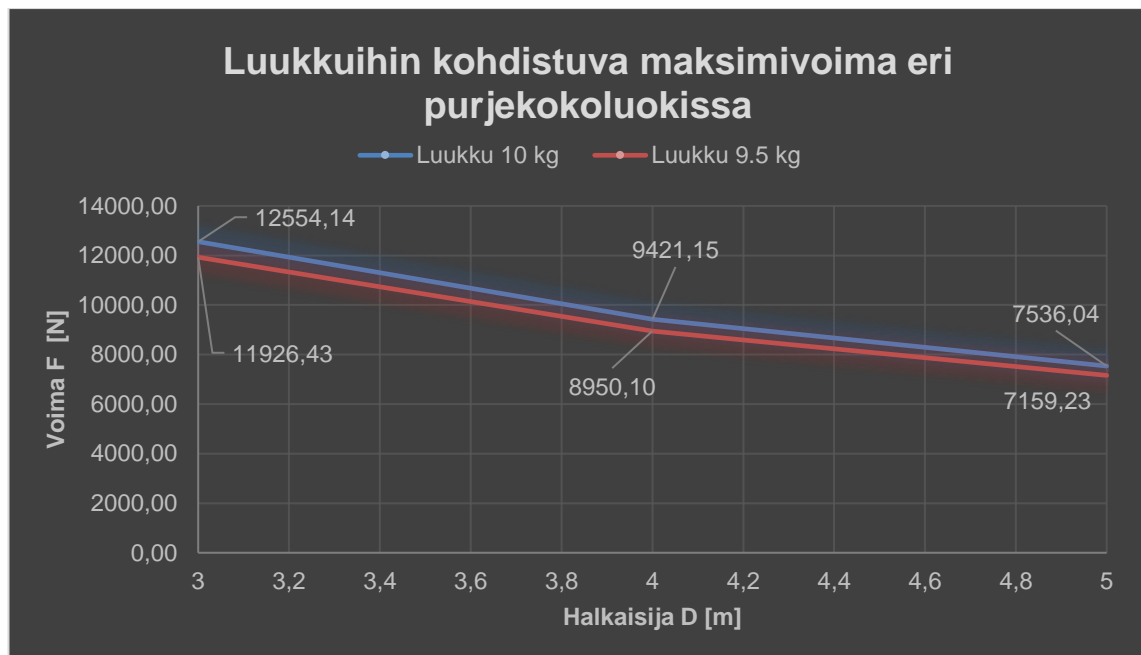
$$\sum \bar{F} = m * \bar{a}$$

Kaava 4. Voiman kaava (Haarto 2012)

Suurinta kohdistuvaa voimaa haettaessa, lähtötiedoista kirjattiin Excel-taulukko, johon lähtötiedot kirjattiin. Primääriset lähtöarvot ovat purjeen kierrosnopeus ja luukun keskipisteen etäisyys pyörimisakselilta. Näistä voitiin johtaa tarvittavat sekundääriset arvot, piiri ja kulmanopeus. Näin saatu keskeiskiihtyvyys ja luukkujen massat kirjattiin taulukoksia ja niistä muodostettiin kuvaaja, vertailun helpottamiseksi.

Kokoluokka	18 x 3	18 x 3	24 x 4	24 x 4	30 x 5	30 x 5	m
Luukun massa	9.5	10	9.5	10	9.5	10	kg
Keskeiskiihtyvyys	1255,42	1255,42	942,12	942,12	753,60	753,60	m/s <sup>2</sup>
Kokonaisvoima	11926	12554	8950	9421	7159	7536	N

Taulukko 3 Lähtötiedot, kiihtyvyydet ja voimat



Kuvio 1 Voimat eri purjeissa

Yllä olevaa kuvaajaa tarkastelemalla, voidaan havaita pienempään purjeeseen kohdistuvan suuremman voiman. Tämä johtuu pääosin huomattavasti korkeammasta kierrosnopeudesta, etäisyyden kasvaessa suhteessa paljon vähemmän. Testivoimaksi valitaan suurin mahdollinen voima, joka kerrotaan valitulla varmuuskertoimella.

### 2.3 Turvallisuus

Luukun tullessa kohteeseen, jossa se on jatkuvan rasituksen alla suurimman osan käyttöikästään, tulee suunnittelussa huomioida erityisesti turvallisuustekijät. Purjeen asennuskohde voi vaihdella risteilijöiden, tankkerien, Ro-Ro alusten tai muiden alustyyppien välillä, purje voidaan sijoittaa kullakin aluksella useaan eri kohtaan kantta ja kansilla liikkuu eri alustyypeillä vaihtelevasti ihmisiä. Tämä tulee huomioida turvallisuusriskejä kartoittaessa, sillä henkilövahinkojen riski vaihtelee suuresti. Lisäksi tulee huomioida, että tankkerit ovat poikkeuksetta räjähdysvaarallisia, jolloin ATEX-säännökset tulee myös huomioida kartoituksessa.

Suurimmat riskit ovat juurikin edellä mainitut henkilövahinko sekä mahdollinen kipinäriski, lisäksi yrityksen maine voi kärsiä mahdollisesta tapaturmatilanteesta. Mahdolliset riskit keskittyvät siis lähinnä osan, esimerkiksi luukun yläosan tai ruuvien irtoamiseen. Mikäli näin pääsee tapahtumaan, kyseinen osa voi todennäköisesti sinkoutua pyörimisliikkeen tangentin suuntaisesti kauas. Tällaisessa tilanteessa osa sinkoutuu suurella todennäköisyydellä pois kansialueelta, mutta se voi myös tippua kannelle suoraan tai osuessaan johonkin kansirakenteeseen, aiheuttaen mahdollisesti henkilövahingon tai kipinöintiä.

Roottoripurjeen kunnonvalvonta on herkkä havaitsemaan epätasapainoa, joten koko luukun irtoaminen hiljalleen näkyisi todennäköisesti värähtelynä, ennen irtoamista. Pienemmän osan vaiheittainen irtoaminen ei välttämättä näy samalla tavalla kunnonvalvonnassa, eikä myöskään minkään osan äkkinäiseen irtoamiseen voida juurikaan vaikuttaa, vaikka se havaittaisiinkin.

Eri rikkoutumismekanismeja voivat olla ruuviliitoksen pettäminen kehyksen ja purjeen kattolevyn välillä, saranan rikkoutuminen halkeamalla tai murtumalla, itse luukun pettäminen tai luukun nouseminen irti paikaltaan lukkomekanismien pettäessä.

Testauksessa tullaan luukkuun kohdistamaan staattista voimaa, jota kasvatetaan asteittain, jotta rikkoutumismekanismi voitaisiin selvittää. Väsymistestin toteutus todettiin testiä suunniteltaessa haastavaksi toteuttaa ja sen osalta jatkotestejä tullaan harkitsemaan, riippuen staattisen rasituksen testin tuloksista.



Itse testauksen aikana luukku tulisi sijoittaa siten, että se ei aiheuta välitöntä vaaraa testausta tekeville henkilöille ja sen ympärille voitaisiin rakentaa jonkinlainen suoja, esimerkiksi muovista. Lisäksi luukku tulisi tarkastellaan testauksen aikana rasitusvoiman kasvatuksen välissä, jotta mahdolliset murtumat tai muut vauriot luukussa voidaan havaita jolloin voidaan varautua äkillisiin muodonmuutoksiin.

Varmuuskertoimen määrittely maksimivoimalle osoittautui varsin haastavaksi vastaavanlaisten kohteiden puutteen takia, jolloin mitään esimerkkejä kertoimen kokoluokasta ei juurikaan ollut. Roottorin kaltaisia suuria, pyöriviä komponentteja lähimpänä kohteina voitaisiin pitää tuulivoimaloiden lapoja tai huvipuistolaitteita. Tuulivoimalat ovat näistä kahdesta lähempänä, sillä huvipuistolaitteiden turvakertoimia nostaa ihmisten oleminen mukana yhtälössä.

Koska purjeet, jonne luukut on aikomus sijoittaa, voivat sijaita myös matkustaja-aluksilla ja rahtilaivoilla tai tankkereilla miehistö voi työskennellä kannella, oli testauksen aikaisen turvakertoimen valinta tarpeellista korkeammaksi perusteltua. Tarkoituksena on todeta toteutuva raja-arvo maksimivoimalle ja sen jälkeen vielä miettiä yrityksen sisällä, halutaanko tällaista luukku käyttää.

Testin aikaiseksi turvakertoimeksi valittiin 4. Suurin luukkuun kohdistuva kiihtyvyyden on noin taulukon 3 mukaisesti  $18 \times 3$  metrin purjeessa  $1255 \text{ m/s}^2$ , joka aiheuttaa  $10 \text{ kg}$  luukulla voiman  $12\,554 \text{ N}$ , mikä kerrotaan valitulla varmuudella 4. Varmuuskerronta voitiin perustella sillä, että todennäköisesti voima tulee olemaan riittävän suuri saadakseen aikaan jonkinlaista muodonmuutosta luukussa tai sen kiinnityksessä. Mikäli luukku pysyy ehjänä voidaan luukku käyttää purjeissa, kunhan päätösät tehtäessä ollaan varmoja, ettei väsymisilmiö aiheuta ongelmia. Todellisessa tilanteessa  $52 \text{ kN}$  ei tulla koskaan saavuttamaan, joten mikäli tulos on jostakin maksivoiman ja varmuuskertoimella kasvatetun voiman väliltä, tulee asiaa harkita tilannekohtaisesti.

### 3 TESTIPENKIN SUUNNITTELU

Norsepower oy on pääosin vain suunnitteluun keskittynyt yritys, jonka tuotanto toteutetaan alihankkijoilla. Jonkin verran huoltoa sekä joitakin testejä komponenteille tehdään, mutta vastaavanlaista testiä tullaan tuskin toteuttamaan useammin kuin tämän kerran. Penkin suunnittelussa tuleekin siis huomioida testin kertaluontoisuus. Kaikki käytettävät materiaalit ja komponentit tulisivat olla melko edullisia ja helposti saatavilla. Mikäli osia on mahdollista valita siten, että niitä voidaan käyttää johonkin toiseen käyttökohteeseen myöhemmin, tulisi näin tehdä.

Kyseistä testiä on harkittu jo pidemmän aikaa suoritettavaksi ja sen mekaanista toteutusta on pohdittu alkuun toteutettavaksi hyvin yksinkertaistetusti. Vallitseva mielipide on ollut, että luukku ei voida testata aivan todellisuutta vastaavalla tavalla, sillä riittävän pyörimisliikkeen ja sitä kautta voiman aikaansaaminen ilman suurempia investointeja on varsin haastavaa. Onkin päädytty siihen, että koe tulee olemaan ennemmin vetokokeen tyyppinen järjestely, missä luukkuun kohdistetaan voimaa, sen ollessa kiinnitettynä johonkin.

#### 3.1 Mekaniikka

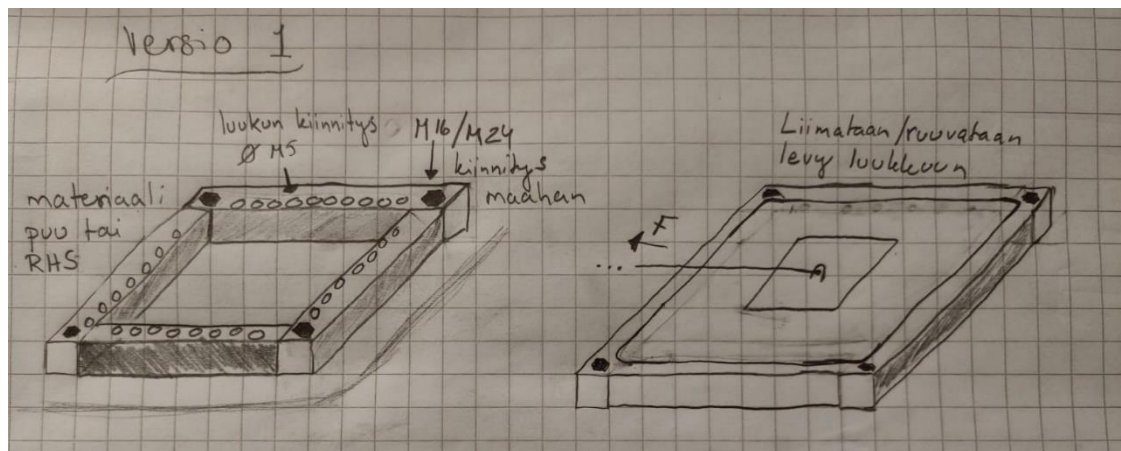
Testin kehitys aloitettiin keskustelemalla ajatuksen alunperin saaneen suunnittelijan kanssa. Hän vastaa komposiittirakenteiden kehityksestä, joten kyseinen testaus liittyi vahvasti hänen erikoisalaansa ja häneltä saatiin lähtötiedot sekä luukkuvaihtoehdot testiä varten.

Lähtökohtana oli tarkoitus toteuttaa varsin yksinkertainen vetokokeen tapainen testi, jossa määritellään miten kovaa voimaa erilaiset luukut kestävät ja sitten päättää otetaanko niitä käyttöön purjeisiin. Testaustapaa tarkemmin läpi käytäessä päädyttiin hahmottelemaan muutamia erilaisia vaihtoehtoja, joista sitten valittiin erikseen tarkasteluun järkevän oloiset ja muutoin toteutettavaksi sopivat ehdokkaat.

### 3.1.1 Versio 1

Liikkeelle lähdettiin yksinkertaisesta rakenteesta, missä luukkuu varten valmistettaisiin joko puinen tai metallinen runko, johon se voitaisiin kiinnittää. Tämä kokonaisuus kiinnitettäisiin johonkin sopivaan paikkaan, esimerkiksi betoniselle tasolle ruuveilla ja sidontaliinoilla tai esimerkiksi liinoilla jonkin rakenteen ympäri. Tämän jälkeen itse luukkuun kiinnitettäisiin vetolenkki tai muu sellainen piste, mistä sitä voitaisiin vetää vaijerin tai ketjun ja taljan avulla. Voimamittaus toteutettaisiin kiinnittämällä puntari tai muu vastaava voima-anturi veto-osien väliin. Tämän jälkeen voimaa kasvatettaisiin hiljalleen ja luukun pettäessä todettaisiin, millä voimalla se rikkoutui.

Testiä harkittiin toteutettavan siten, että vaijeri kiertäisi taljapyörän kautta 90° kulmassa, jolloin veto ei tulisi suoraan testaajia kohden ja koe ei olisi liian vaarallinen suorittaa. Ongelmana tässä toteutuksessa on mahdollinen vaijerin venymä, sillä vaijerin pituus tulisi olla melko pitkä, jotta testiä suorittavien ei tarvitsisi olla aivan luukun vieressä. Voimaa olisi myös hankala tarkkailla, joutumatta menemään vaara-alueelle ja sen säätö olisi melko epätarkkaa ketjutaljan avulla.



Kuva 6 Version 1 testipenkin havainnekuva

Vaikka tämänkaltainen testi olisikin varsin yksinkertainen toteuttaa, on siinä suuri riski epäonnistua siten, että mitään varmaa tulosta ei saataisi voiman osalta, joka on tämän kokeen tärkein elementti. Koetta voidaan pitää silti varasuunnitelmana, mikäli voimamittaus kyetään toteuttamaan jotenkin varmemmin ja voimantuotosta saadaan riittävän tarkka. Tähän voitaisiin päästä esimerkiksi lisäämällä muita mittaustapoja tuloksen parantamiseksi. Puntarin tyyppisen voima-anturin lisäksi esimerkiksi

venymäliuskoilla mittaamalla ja keräämällä data tietokantaan, josta sen voisi tarkastaa myös jälkikäteen.

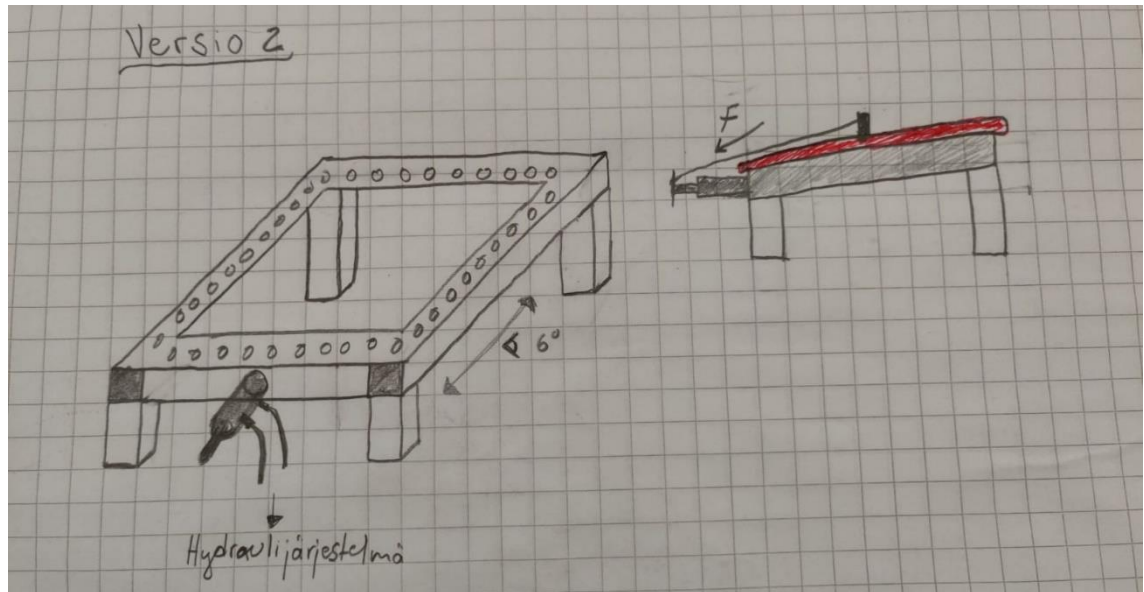
### 3.1.2 Versio 2

Ensimmäisen suunnitelman pohjalta lähdettiin kehittämään melko samantyyppistä runkoa, jossa luokkuja voitaisiin testata ilman penkin kiinnitystä johonkin toiseen kohteeseen. Voimantuotto haluttiin myös saada tarkemmaksi ja siihen lähdettiin suunnittelemaan hydraulista toteutustapaa. Tällöin voiman tuottaminen tasaisesti, pienin askelin ja helposti säädettävästi olisi huomattavasti helpompaa. Tukivoima kohdistettaisiin hydraulisylinterin avulla penkin runkoon ja itse veto toteutettaisiin joko vaijereilla tai metallivarsilla luokkuun. Metallivarret olisivat hieman hankalammat hankkia ja hinta olisi korkeampi, mutta niiden avulla voiman välittäminen olisi varmempaa kuin vaijereilla. Voimamittaus voitaisiin toteuttaa järjestelmän painetta seuraamalla, kun sylinterin pinta-ala tunnetaan. Tätä tietoa voitaisiin tallentaa ja hydraulijärjestelmää ohjata esimerkiksi mikrokontrollerin avulla.

Lisäksi tähän versioon huomattiin ottaa mukaan hattulevyn pieni kaltevuus, joka on muutaman asteen luokkaa, veden, lumen ja jään tehokkaammaksi poistamiseksi. Se muuttaa voimaa ja sen suuntaa aavistuksen, mutta suhteessa kokonaisvoimaan se merkitys on kuitenkin vähäinen, voiman määrä vähenee noin 0,22 % verrattuna tasaiseen kattoon (liite 1).

Täten testi voitaisiin toteuttaa siten, että kenekään ei tarvitsisi olla aivan testilaitteiston vieressä, jolloin kokeet olisi turvallisempi suorittaa. Testilaitteiston ympärille voitaisiin myös rakentaa suoja, joka estäisi mahdollisten rikkoutumisesta aiheutuvien projektiilien sinkoutumisen ympäristöön.

Verrattuna versioon yksi, laitteiston kokoaminen olisi huomattavasti kalliimpaa ja Norsepower tuskin tarvitsisi hydraulikkakomponentteja juurikaan jatkossa. Tätä koetta suunniteltiinkin toteutettavaksi yhdessä Turun ammattikorkeakoulun kanssa tai jonkin sellaisiin toimijan tiloissa, jossa olisi mahdollista saada komponentteja lainaan mahdollisimman paljon.



Kuva 7 Version 2 testipenkin havainnekuva

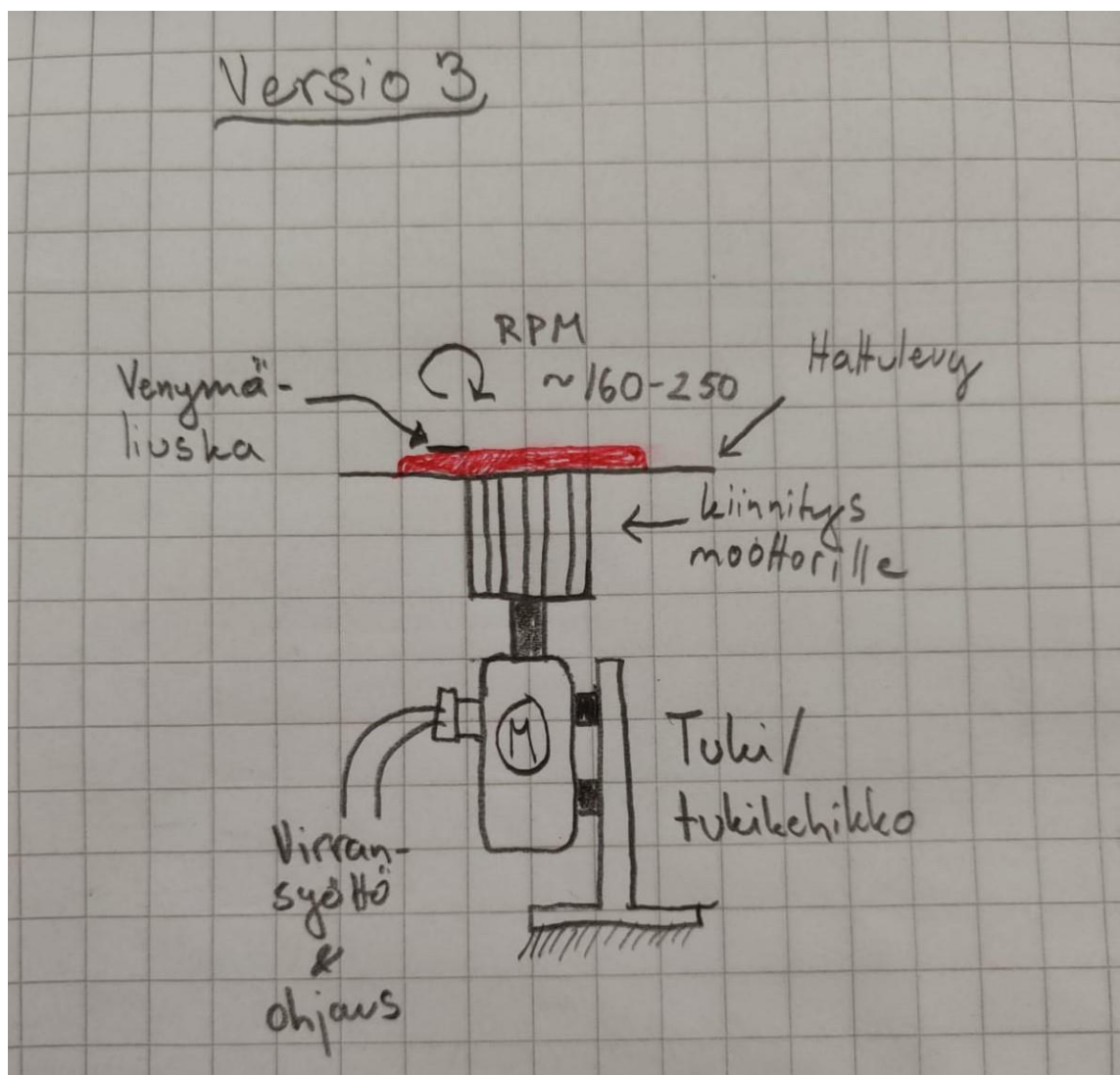
### 3.1.3 Versio 3

Edellisen version tarkemman suunnittelun aikana tehtiin samanaikaisesti testausta kahdelle uudelle purjeen voimayksikölle, joka koostuu sähkömoottorista sen akselille kiinnitettävästä kytkimestä ja kiinnitinadapterista, jolla kytkimen toiseen päähän saadaan kiinnitettyä esimerkiksi suuri päälaakeri tai muu rakenne. Tästä ylimääräiseksi jäi yksi voimayksikkö kokonaisuudessaan sekä tukirakenteet. Näitä voitaisiin mahdollisesti hyödyntää luukkujen testaukseen siten, että voitaisiin luoda mahdollisimman todennukainen testausmenetelmä.

Voimayksikköön voitaisiin yhdistää hattulevyä vastaava rakenne, johon luukku sitten kiinnitettäisiin ja tätä kokonaisuutta pyöritettäisiin halutulla kierrosnopeudella. Koska käytössä olisi koko voimayksikkö, voitaisiin hyödyntää myös liukurengasta, jonka avulla voitaisiin johtaa signaali luukulta ja saamaan näin esimerkiksi luukkuun kiinnitettävien venymäantureiden avulla dataa, jota voitaisiin analysoida ja siten selvittää sen kestäkykyä. Myös pidemmän rasitustestin suoritus olisi mahdollinen ja epätasapainon vaikutuksia luukkujen keston tarkastella lisäämällä pieniä massoja levyille, aiheuttamaan pyörimisliikkeeseen orbitointia ja värinää.

Vaikea puoli täysmittaisessa testauksessa on turvallisuus. Mikäli luukku–levy yhdistelmää pyöritetään täydellä nopeudella, täytyy se suorittaa joko jossakin suljetussa tilassa, missä luukun mahdollisesti rikkoutuessa irtoavat osat eivät aiheuta vahinkoa tai sen ympärille tulee rakentaa erittäin vahva suoja. Tällaisen paikan löytäminen ja tarvikkeiden sinne kuljetus sekä testauslaitteiston sähköistys voi olla hieman liian kallis ja vaivalloinen operaatio, toisaalta myöskin riittävän kestävä suojarakenteen valmistus ei ole aivan helppoa ja vaatisi melko paljon resursseja.

Tämä versio olisi erittäin hyvä valinta testausmenetelmäksi, mikäli sen toteutus on mahdollista ajan ja muiden resurssien puitteissa.



Kuva 8 Version 3 testipenkin havainnekuva

Näistä versioista päädyttiin suunnittelemaan tarkemmin versiota kaksi. Kuten aiemmin todettiin, versio yksi jää varalle yksinkertaiseksi vaihtoehdoksi ja version kolme toteutusta voidaan harkita mikäli version kaksi testauksessa on ongelmia tai tulos ei ole varmuudella oikea.

### 3.2 Hydrauliiikka

Testipenkin hydrauliikkasuunnittelu päästiin aloittamaan raakaversion kehittämisen ja luokkuun kohdistuvan voiman laskemisen jälkeen. Koska testi tulee olemaan varsin kertaluontoinen ja Norsepower ei todennäköisesti tule tarvitsemaan hydrauliikkakomponentteja mihinkään muuhun jatkossa, pyrittiin niitä saamaan lainalle mahdollisimman paljon.

Hydraulijärjestelmästä halutaan melko yksinkertainen ja helposti toteutettava, mutta silti voiman säädön tulisi olla riittävän tarkkaa ja portaatonta. Proportionaaliventtiili eli venttiili, jota voidaan säätää mihin tahansa asentoon täysin aukinaisen ja täysin kiinni olevan välillä, sille takaisinsyötettävän anturidatan perusteella, soveltuu tällaiseen sovellukseen hyvin. Mekaanisen toimintaperiaatteen mukaisesti järjestelmään tulee yksi työsylinteri, jota säädellään tällä venttiilillä. Testissä oli suunniteltu käytettävän yksitoimiventtiiliä, mutta koska niiden kysyntä on vähäistä, hinnat ovat korkeita. Näin ollen päädyttiin käyttämään kaksitoimista venttiiliä niiden paremman saatavuuden sekä edullisuuden vuoksi. Voimantuoton tarkkailua varten järjestelmään kytketään anturi mittaamaan painetta ennen sylinteriä. Tästä voidaan laskea yksinkertaisella kaavalla sylinterin tuottama voima. Paineanturin mittadata kerätään mikrokontrollerin avulla talteen, myöhempiä analyysiä varten.

Komponenttien kerääminen aloitettiin selvittämällä, millaisia hydrauliikkakomponentteja mahdolliselta yhteistökumppanilta, Turun ammattikorkeakoululta löytyy ja voidaanko niitä hyödyntää testauksessa. Tarkoituksena oli käyttää järjestelmää, jonka paine on 200 baaria, mutta asiaa tiedusteltaessa saatiin tietää ammattikorkeakoululla olevan hydraulijärjestelmiä, joiden paine on maksimissaan 60 – 100 baaria.

Tarvittava voima, joka järjestelmän täytyy kyetä tuottamaan on noin 50 kN. Kun järjestelmän maksimipaine saatiin selville, voitiin laskea minkä kokoinen hydraulisyylinteri tarvitaan voiman tuottamiseksi. Internetistä löytyy paljon laskureita tätä varten, mutta koska laskukaava ei ole kovin vaikea, voitiin laskemista varten luoda oma excel, mikäli maksimivoimaa haluttaisiin muuttaa myöhemmin ja uusi männänhalkaisija laskea.

Voiman kaava on varsin yksinkertainen

$$\sum F = p * A$$



Kaava 5. Voiman kaava paineen avulla laskettuna

Missä  $F$  on voima,  $p$  järjestelmän paine pascalleina ja  $A$  männän pinta-ala.

Vaadittu männän pinta-ala voidaan laskea johtamalla kaavasta 5.

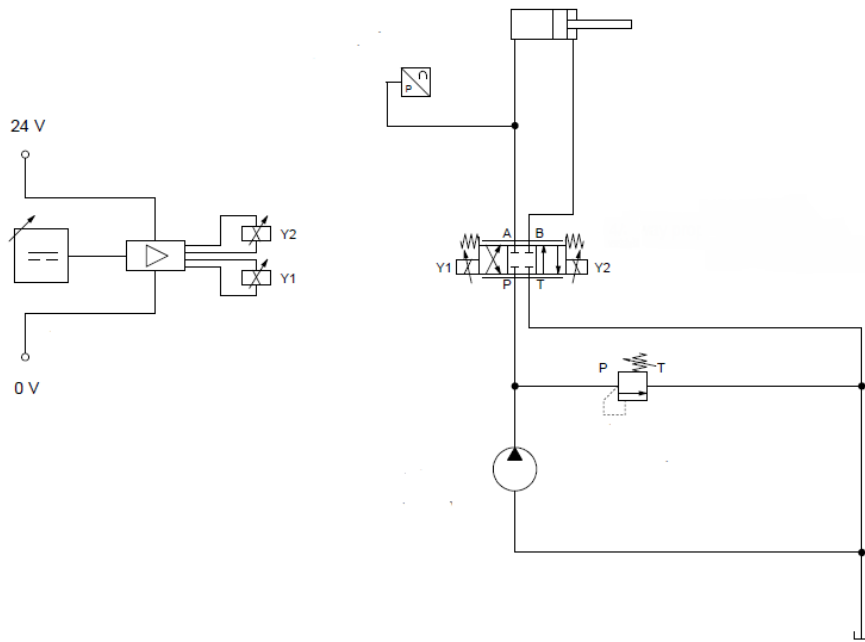
$$A_{\text{mäntä}} = \left( \frac{F}{p} \right), p \neq 0$$

Kaava 6. Pinta-alan ratkaisu

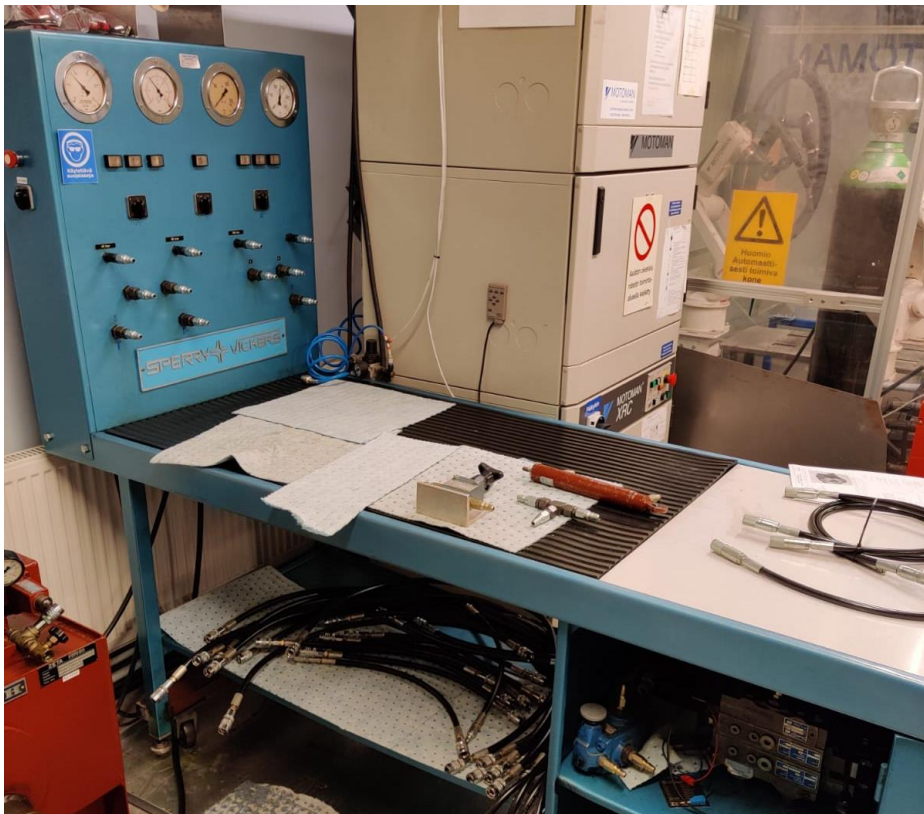
Tavoiteltua pienempi paine johti siihen, että sylinterin halkaisijaa kasvatettiin aiempien hahmotelmien noin 50 millimetristä 105 – 115 millimetriin, jotta vaadittu voima saavutetaan 60 baarin paineella ja järjestelmään jäisi vielä hieman pelivaraa. Lisäksi tulee ottaa huomioon, että järjestelmässä on erilaisia häviöitä ja vuotoja, jolloin näin yksinkertaisesti laskettu voimantuotto jää uupumaan todellisesta jonkin verran. Testiä varten suunniteltiin käytettäväksi 115 mm halkaisijalla olevaa mäntää, jolloin voimantuotto on yli 62 kN. Tällöin vaadittu voima tullaan varmasti saavuttamaan.

Tämän kokoista sylinteriä ei korkeakoululta löytynyt, vaan se tullaan hankkimaan alan liikkeestä. Lisäksi koejärjestelmää kartoittaessa selvisi, etää jonkun verran pikaliittimiä ja haaroitinpaloja tarvitaan myös. Lisäksi painemittausta varten hankitaan paineanturi tarvikkeineen. Suuret komponentit, kuten pumppuyksikkö moottoreineen ja tankkeineen sekä letkut ja suurin osa liittimistä sekä ohjauselektronikasta voitaisiin kuitenkin saada lainaan korkeakoululta tavoitteen mukaisesti.

Hydraulijärjestelmän alustava kokoonpano nähdään kuvassa 7. Järjestelmää ohjataan syöttämällä jännite proportionaaliventtiin jouselle, joka avaa itse karaa päästäen tietyn virtauksen lävitseen ohjauksen mukaisesti. Järjestelmän painetta tarkkaillaan ja tieto johdetaan takaisinkytkentänä ohjaukselle. Täten säätöjärjestely on tarkka ja haluttu voima voidaan tuottaa tasaisemmin sekä varmemmin. Järjestelmään asetetaan paineen hallitsemista varten paineenrajoitusventtiili pumpun jälkeen, jotta 60 baarin paine ei ylitä estäen venttiilin ja letkujen vahingoittumisen.



Kuva 9 Hydraulikkajärjestelmän periaatekuva



Kuva 10 Koetta varten ajateltu hydrauliasema

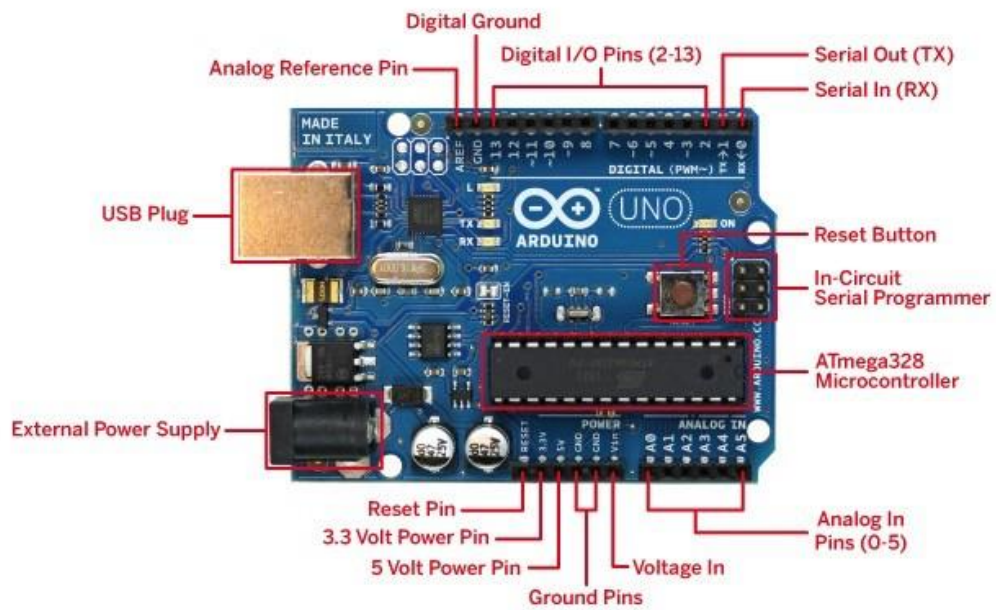
### 3.3 Mittaus ja datan kerääminen

Mittausta suunniteltaessa erilaisia vaihtoehtoja käytiin lävitse. Mitä enemmän dataa testauksesta nauhoitetaan, sitä tarkemmin kestävyys voidaan määrittää. Voimamittaus voidaan toteuttaa lukemalla sylinteripainetta ja luukussa tapahtuvia muutoksia visuaalisesti tarkastelemalla testattavaa luukkuu. Luukun muutoksia voidaan mitata myös esimerkiksi käyttämällä venymäliuskoja ja konenäköä.

Testata varten päädyttiin suosittelemaan paineen kirjausta digitaalisena logitiedostoon ja lisäksi mittaamaan liikemäärää sekä mikäli vain mahdollista, hyödyntämään venymämittausta. Liikemäärää voidaan mitata tarkastelemalla sylinterin liikkeen pituutta ja erillistä, luukkuun kiinnitettävän osan liikettä testin aikana. Tällöin voidaan tarkkailla näiden erotusta ja eliminoida mahdollinen venymä vaijerissa tai vetovarressa. Venymämittausta varten luukkuun voitaisiin kiinnittää venymäliuskapari esimerkiksi itse luukun kansiosaan sekä kehykseen.

Kirjaamalla nämä tiedot aikaleimattuna, voidaan niistä koota kuvaaja testijaksolta. Lisäksi luukun eri osia visuaalisesti tarkastelemalla testin aikana, voidaan luukun mahdolliset muodonmuutokset huomata. Täten luukun rikkoutumismekanismi voidaan mahdollisesti havaita.

Datan keräämiseen ja mittalaitteiden ohjaukseen valittiin Arduino-mikrokontrolleri. Näitä laitteita on myös Turun ammattikorkeakoululla, mutta tarvittaessa sellaisen hankinta on varsin edullista ja niitä voidaan hyödyntää myös mahdollisesti muissa testeissä tai jonkin kohteen tarkkailussa käytössä olevassa purjeessa.



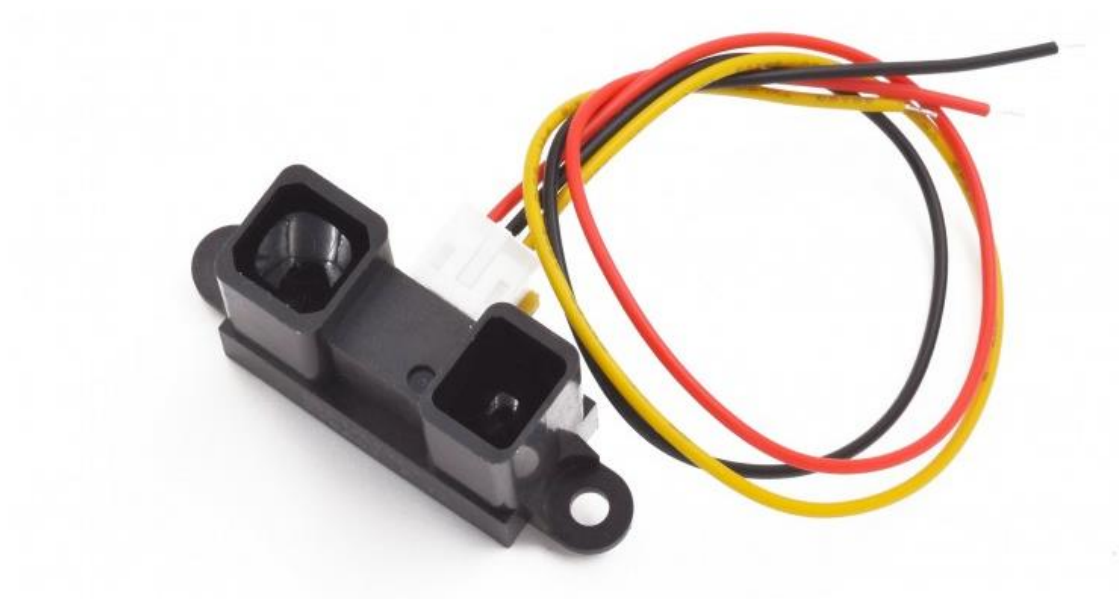
Kuva 11 Arduino Uno mikrokontrolleri (Shemobotics 2020)

Paineen mittaamiseen voidaan käyttää esimerkiksi WIKA A-10 painelähetintä, josta data saadaan joko virta- tai jänniteviestinä.



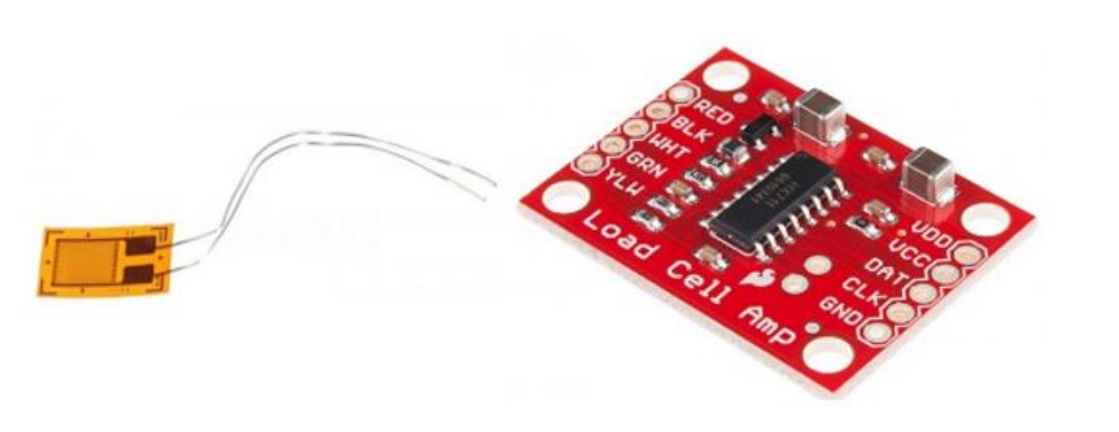
Kuva 12 WIKA A-10 painelähetin (Salhydro 2020)

Liikkeen mittaamiseen voidaan käyttää optista etäisyysanturia SHARP GP2Y0A02YK0F.



Kuva 13 SHARP optinen etäisyysanturi (smart-prototyping 2020)

Venymän mittaamiseen voidaan käyttää Partcon venymäliuskaa ja signaalin vahvistamiseen SparkFun:in venymäliuskavahvistinta PBC HX711.



Kuva 14 Venymäliuska ja vahvistin (Partco 2020)

Mittainstrumentit valittiin siten, että kaikki ovat helposti yhdistetävissä joko suoraan tai kytkentälaudan välityksellä mikrokontrollerille. Myös hydraulikan ohjaus voidaan toteuttaa mikrokontrollerin avulla, jolloin saadaan takaisinkytketty säätöjärjestelmä. Mikäli kuitenkin halutaan tai laitteisto sitä vaatii, voidaan ohjaus toteuttaa perinteisemmällä potentiometrisäädöllä manuaalisesti, jolloin mikrokontrolleri toimii vain mittauslaiteistona. Koetta varten voidaan Arduinolle kytkeä myös lcd-paneeli tai led-näyttö, johon voidaan kirjoittaa mittausdataa reaaliajassa.



Kuva 15 Nestekidenäyttö kytkettynä Arduinolle (Makerguides 2020)

Tällä mittajärjestelmällä voidaan nauhoittaa kattavasti eri ilmiöitä testauksen aikana ja sen avulla voitaisiin todennäköisesti saada niin varma testitulos, että päätös luukkujen käytöstä voitaisiin tehdä. Ennen testin suorittamista tulisi kalibroida mittalaitteet mahdollisuuksien mukaan ja tarkastella sen tarkkuutta seäk laskea mittauksen epätarkkuuden vaikutus kokeessa.

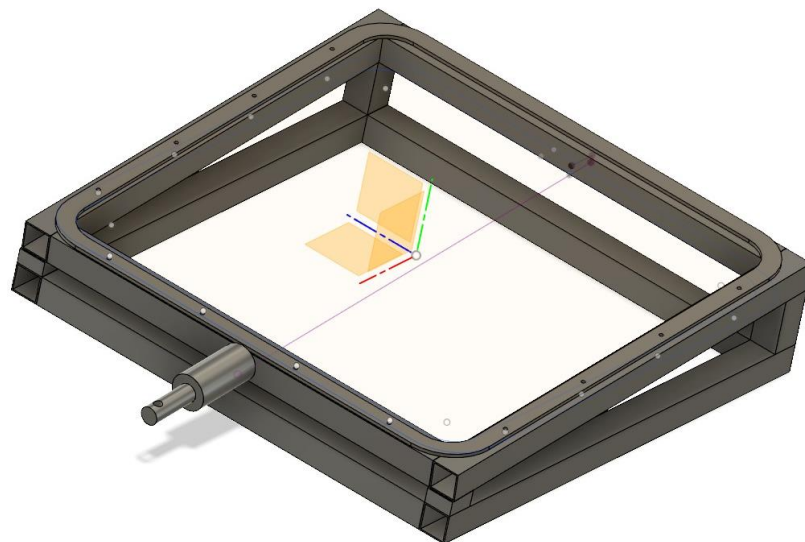
### 3.4 Mallinnus

Mekaniikkasuunnittelun valmistuttua testipenkkiä aloitettiin 3D-mallintamaan. Mallinnuksesta vastasi opinnäytetyön alussa mukana ollut toinen opiskelija, joka kuitenkin jättäytyi pois aikataulusyistä.

Testipenkin rakenne tulisi olla jäykkä, joten sen valmistus RHS-putkipalkista oli selkeä päätös. Lisäksi markkinoilla on saatavilla laajasti erilaisia RHS-profiileita eri paksuuksissa, joten tarvittavilla mitoilla olevaa putkea saadaan varmasti ja se on myös edullista. Lisäksi sen käyttäminen valmistuksessa on helppoa, tilatusta määrästä voidaan vain pätkiä sopivan mittaiset palat.

Lisäksi penkin yläreunaan ajateltiin jonkinlaista ohutta kaulusta, jotta luukku asettuu paikalleen hyvin ja tiiviisti. Se voitaisiin toteuttaa lattaraudasta ja kulmat voitaisiin pyöristää tai viistää sopiviksi.

Haluttu vetokulma voitaisiin toteuttaa korottamalla penkin takaosaa ja asettamalla hydraulisylinteri vaakatasoon. Sylinterille pitää suunnitella jonkinlainen tuki tai putkirakenne, mutta sen ei tarvitse kuin pitää sylinteri vaakasuorassa, jotta tukivoima saadaan penkin etureunasta luotettavasti tuotettua.



Kuva 16 Testipenkin 3D-malli



Materiaaliksi sopisi esimerkiksi S235 laadun teräs, josta profiilit usein valmistetaan. Se riittää tähän tarkoitukseen hyvin lujuusominaisuuksiltaan (kuva 17 , liite 2).

S235 on standardin EN 10025-2 mukainen seostamaton rakenneteräs.

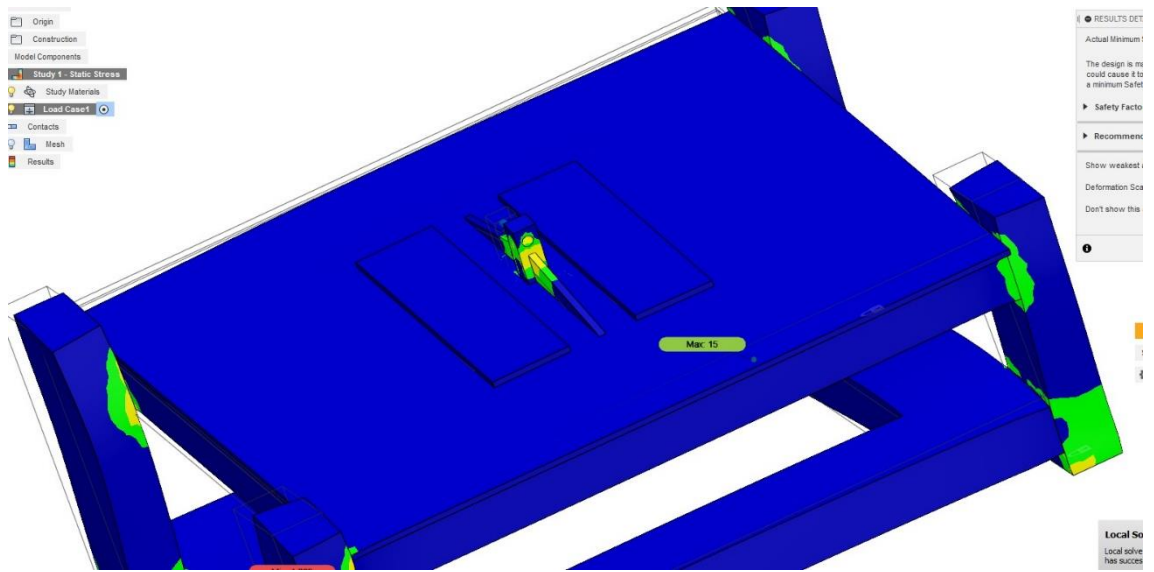
Laatu	Myötölujuus [N/mm <sup>2</sup> ]	Murtolujuus [N/mm <sup>2</sup> ]	Murtovenymä [%]
S235*	min. 235	360 - 510	min. 26
*mekaaniset ominaisuudet koskevat paksuuksia 3 - 16 mm			

Kuva 17 S235 materiaaliominaisuudet (HTM yhtiöt 2020)

Luukun kiinnitystä varten profiilin ylä- ja alasivulle porataan joko läpireiät M5 ruuveille tai mikäli materiaalin paksuus on riittävä, voidaan ruuveille tehdä kierteytetyt reijät, asennuksen helpottamiseksi.

Vetoa varten sylinterin päähän tehdään tappi tai hakanen, johon voidaan liittää vetovarret tai vaijeri. Toinen pää kiinnittyy luukkuun siten, että luukun ylä- ja alapintaan liimataan teräseelevyt, jotka vielä kiinnitetään toisiinsa ruuviliitoksella. Tätä varten luukkuihin tarvitsee porata reijät. Metallilevyjen ajatuksena on jakaa tuotettu voima tasaisemmin koko luukulle, eikä vain aiheuttaa suurta pistekuormaa sille. Levyyn kiinnitetään joko ruuvilla tai hitsaamalla vastaavanlainen tappi kuin sylinterin päähän tai mahdollisesti evän muotoinen uloke, jos sen kiinnitys levyyn on helpompaa. Evämäinen rakenne kiinnittyy tasaisemmin levyyn , jolloin yksittäiseen hitsisaumaan ei kohdistu niin suurta voimaa. Lisäksi se jakaa voimaa tasaisemmin koko levyn alueelle.





Kuva 18 Havainnekuva evämäisestä vetopisteestä simuloitaessa vetoa.

### 3.5 Valmistus

Testipenkin valmistus ja kokoonpano voitaneen toteuttaa yhdessä Turun ammattikorkeakoulun yhteydessä toimivan Koneteknologiakeskuksen kanssa. Koneteknologiakeskukselta löytyvät kaikki valmistuksessa tarvittavat työstökoneet sekä pätevää työvoimaa auttamaan tuotannossa. Tarvittaessa myös jokin toinen konepaja käy valmistukseen oikein hyvin, sillä koneistukseen ei vaadita juuri muuta kuin saha, hitsauslaitteisto ja pylväspora. Yhteistyö Koneteknologiakeskuksen kanssa olisi silti järkevin vaihtoehto mikäli testaus voitaisiin toteuttaa korkeakoulun kanssa yhteistyössä. Tällöin materiaaleja ja valmista testipenkkiä ei tarvitsisi kuljettaa paikasta toiseen vaan kaikki voitaisiin suorittaa samassa rakennuksessa.

Opinnäytetyön pohjalta voidaan suunnitella valmis tuote ja toimittaa valmistuskuvat sekä -ohjeet. Materiaalihankinnasta voi vastata joko valmistava konepaja tai Norsepower Oy, joka vastaa tietysti myös kuluista.

Tarkoituksena oli päästä valmistamaan testipenkkiä jo keväällä 2020 ja aloittamaan testaus, mutta johtuen opinnäytetyön hitaasta etenemisestä ja kiireestä myös Norsepower oy:n puolella, missä opinnäytetyön suorittaja työskentelee osa-aikaisesti, päätettiin tätä lykätä hieman pidemmälle.

Tämä hankaloittaa myös osien lainaamista korkeakoululta, sillä opinnäytetyön valmistuttua sen suorittaja ei ole enään koulun kirjoilla. Onneksi opinnäytetyössä aluksi mukana ollut toinen opiskelija, joka on myös Norsepower Oy:n henkilöstöä kykenee jatkamaan dialogia korkeakoulun ja yrityksen välillä myös kesän ajan ja sen jälkeen.

## 4 YHTEENVETO JA SAATESANAT

Työn alkuperäisenä tavoitteena oli laatia suunnitelma luukun testausta varten ja toteuttaa testi kahden eri luukkuvalmistajan tuotteelle. Työtä alettiin lähestymään kartoittamalla valmiina olevia ajatuksia toteutuksesta yrityksen sisällä. Lisäksi saatiin valmiit luukuvaihtoehdot tarkasteluun ja lähetettiin tiedustelu niiden materiaaleista ja muista teknisistä ominaisuuksista valmistajille. Purjeiden osalta selvitettiin teoreettinen maksikierrosnopeus kullekin purjekoolle, jonka perusteella kyettiin laskemaan maksivoima, joka kohdistuu luukkuihin käytössä. Tämän lisäksi tutkittiin erilaisia teknisiä rakenteita ja laitteita sekä niiden suunnittelussa käytettyjä varmuuskertoimia. Tällä haettiin visiota testipenkin varmuuskertoimelle. Alkuperäisten ajatusten pohjalta ideoitettiin kolme erilaista vaihtoehtoa, joista yksi valittiin tarkempaan suunnitteluun. Tuloksena tästä saatiin hyvä suunnitelma testausta varten, mutta alkuperäisen ajatuksen mukaisesti ei kuitenkaan päästy suorittamaan sitä.

Aikataulullisesti opinnäytetyö myöhästyi melko pahasti, sillä alunperin työ aloitettiin toukuussa 2019 ja sen ajateltiin olevan maalissa syksyllä 2019. Myöhästyminen johtui pääosin työn aloittamisesta juuri ennen kesää, jonka aikana työtä ei saatu etenemään juurikaan ja syksyllä jatkunut työkiire pidensi prosessia entisestään. Työ eteni hitaasti ja vasta joulun jälkeen löydettiin tarvittava motivaatio ja aika sen työstämiseen. Mukana oli alunperin myös toinen opiskelija, mutta hänen työkuormansa kasvoi keväällä oleellisesti, joka johti hänen jättäytymiseensä pois työstä helmikuun jälkeen. Yrityksellä oli tuotetoimitus kevään lopulla, jonka johdosta kokeen suoritusta jouduttiin lykkäämään ajan ollessa todella vähissä.

Testin suunnittelu ei sinällään aiheuttanut kustannuksia yritykselle ja itse valmistunut suunnitelma pyrittiin laatimaan siten, että kulut testilaitteistoa rakennettaessa pysyisi kurissa. Tämä tulee riippumaan paljolti siitä, voidaanko koe suorittaa yhteistyössä Turun ammattikorkeakoulun kanssa. Mikäli ei, voi olla että tässä opinnäytetyössä valittu testipenkkimallia ei toteuteta, vaan sen sijasta rakennetaan paranneltu malli versiosta 1.

Työn aikana opittiin paljon uutta mittaustekniikasta sekä hydrauliiikan oppeja palautettiin mieleen. Mekaniikan ja mallinnuksen osalta opittiin myös tarkastelemaan ideoita kriittisesti ja kehittämään vanhoja ajatuksia edelleen.

Aikaiseksi saatiin hyvä suunnitelma testin toteutuksesta ja sitä suositellaan toteutettavaksi heti kun sille on riittävästi aikaa. Tällaisten valmiiden luukkujen käyttö olisi järkevää niin huollon kannalta, kuin myös asennuksen aikana. Mikäli tässä opinnäytetyössä suunniteltu versio osoittautuu liian kalliiksi tai hankalaksi toteuttaa muutoin, suositellaan joko version 1 toteutusta. Version 3 toteutusta olisi hyvä tutkia tarkemmin, sillä se on kaikista realistisin menetelmä ajatellen itse käyttöolosuhteita.

Jatkokehitystä ajatellen kannattaisi tutkia vaihtoehtoa suunnitella oma luukkusysteemi, missä sen avaaminen, siitä kulkeminen ja materiaalivalinta olisi optimaalinen. Nyt testattavina olevien luukkujen avaamista köysissä voidaan pitää hieman haastavana, sillä niiden lukituskahvojen on havaittu olevan melko jäykkiä. Lisäksi muita mittausmetodeja eri ilmiöille voisi vielä miettiä, esimerkiksi värinän mittaaminen voisi olla hyödyllistä.

Myös väsymistestin suunnittelu tähän tarkoitukseen olisi erittäin hyödyllistä. Luukut kokevat hyvin paljon erilaisia kiihtyvyyksiä, värinää ja luonnonolosuhteita, jolloin väsymisanalyysi voisi auttaa muun muassa luukkujen eliniän määrittelyssä ja vaihtotarpeen arvioinnissa. Lisäksi olisi hyvä selvittää, vaativatko eri luokituslaitokset jotain lisäyksiä luukkujen testaukselle, jotta itse purje saadaan luokitettua.

## LÄHTEET

BSI DK verkkosivut. Viitattu 2.3.2020.

<https://www.bsidk.com/product-category/hatches/offshore-hatches/>

Cruise and Ferry verkkosivu. Kuva roottoripurjeen asennuksesta. Viitattu 29.5.2020.

<https://www.cruiseandferry.net/articles/scandlines-installs-norsepower-rotor-sail-on-copenhagen-1>

Haarto, A. 2012: Turun ammattikorkeakoulun fysiikan opetusjakson materiaali. Viitattu 10.2.2020

[http://fysiikka.turkuamk.fi/fysiikka/FysiikanPerusteetEL13/3\\_FP\\_voimat.pdf](http://fysiikka.turkuamk.fi/fysiikka/FysiikanPerusteetEL13/3_FP_voimat.pdf)

Haarto & Karhunen: Turun ammattikorkeakoulun fysiikan opetusjakson materiaali. Viitattu 10.2.2020.

[http://fysiikka.turkuamk.fi/fysiikka/Infya/4a\\_ympyräliike.pdf](http://fysiikka.turkuamk.fi/fysiikka/Infya/4a_ympyräliike.pdf)

PDF-tiedosto HTM yhtiöt verkkosivulla. Viitattu 31.5.2020.

<https://htmyhtiöt.fi/assets/files/TPK%20asiakirjat/Ter%C3%A4sten%20mekaaniset%20ominaisuudet.pdf>

Makeitfrom verkkosivu. PMMA ominaisuudet Viitattu 2.3.2020.

<https://www.makeitfrom.com/material-properties/Polymethylmethacrylate-PMMA-Acrylic>

Makeitfrom verkkosivu. EN AW-5754 Viitattu 2.3.2020

<https://www.makeitfrom.com/material-properties/5754-AlMg3-3.3535-A95754-Aluminum/>

Makeitfrom verkkosivu. EN AW-6060 ominaisuudet. Viitattu 2.3.2020.

<https://www.makeitfrom.com/material-properties/6060-AlMgSi-3.3206-A96060-Aluminum>

Makerguides verkkosivu. Nestekidenäytön kuva. Viitattu 28.5.2020.

<https://www.makerguides.com/character-lcd-arduino-tutorial/>

Norsepower verkkosivu. Kuva Maersk Pelican tankkerista ja roottoripurjeista. Viitattu 31.5.2020.

<https://www.norsepower.com/for-designers/>

Partco verkkosivu. Venymäliuska ja -vahvistin kuvat. Viitattu 28.5.2020.

<https://www.partco.fi/fi/>

Quorning, Eric 2020: Data for hatch. Yksityinen sähköpostiviesti 24.2.2020. Viestin saaja: Pietu Koivunen

Salhydro verkkosivu. WIKA painelähetin kuva. Viitattu 28.5.2020.

<https://www.salhydro.fi/fi/mittaus-ja-anturit/painelähetin-wika-a-10>

Schemobotics verkkosivu. Arduino Uno kuva. Viitattu 28.5.2020

<http://schemobotics.com/product/arduino-uno-rev3/>

Smart-prototyping verkkosivu. SHARP etäisyysanturi kuva. Viitattu 28.5.2020

<https://www.smart-prototyping.coharp-IR-Distance-Sensor-GP2Y0A02YK0F-20-150-cm>

Vetus verkkosivu. MAG6363SL kuvat. Viitattu 27.5.2020

<https://www.vetus.com/en/boat-windows/escape-and-ventilation-hatches/10837.html>

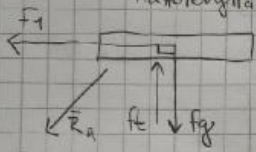
Vink verkkosivu. PMMA ominaisuudet. Viitattu 29.5.2020

<https://docplayer.fi/1964688-Vink-passion-for-plastics-pmma-tekniset-tiedot.html>

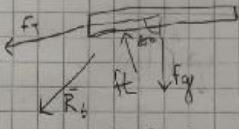
Väisälä, K.1959, Geometria. Helsinki: WSOY

## Suoran ja kaltevan hattulevyn vaikutus voimaan

Luokkaa tasaisella hattulevyllä



Luokkaa kaltevilla hattulevyllä



Oletetaan  
 $f_t = f_{gj} + \bar{R}$  |  $f_t = 52000 \text{ N}$   
 $m = 10 \text{ kg}$  |  $f_{gj} = 98,1 \text{ N}$

$$R_a^2 = F_1^2 + f_{gj}^2 - 2 \cdot f_t \cdot f_{gj} \cdot \cos 90^\circ$$

$$R_a^2 = (52000)^2 + 98,1^2 - 2 \cdot 52000 \cdot 98,1 \cdot \cos 90^\circ$$

$$R_a^2 = 2708581049,87 \text{ (N)}$$

$$R_a = \sqrt{2708581049,87 \text{ (N)}} : 1000$$

$$R_a = 52,044 \text{ kN}$$

$$R_b^2 = f_t^2 + f_{gj}^2 - 2 \cdot f_t \cdot f_{gj} \cdot \cos 95^\circ$$

$$R_b^2 = (52000)^2 + 98,1^2 - 2 \cdot 52000 \cdot 98,1 \cdot \cos 95^\circ$$

$$R_b^2 = 2696560100,87 \text{ (N)}$$

$$R_b = \sqrt{2696560100,87 \text{ (N)}} : 1000$$

$$R_b = 51,928 \text{ kN}$$

$$R_a - R_b = 52,044 - 51,928 \text{ kN}$$

$$\Rightarrow 0,116 \text{ kN} \Rightarrow \frac{0,116 \text{ kN}}{52 \text{ kN}} \Rightarrow 0,002233 \cdot 100$$

$$\Rightarrow 0,22 \%$$

## Lujuuslasku S235 luokan teräkselle

$A = 500 \text{ mm}$   
 $b = 500 \text{ mm}$   
 $f = 52000 \text{ N}$   
 $L = 1000 \text{ mm}$

$A = \frac{b}{2} f$      $B = \frac{a}{2} f$   
 $M(x) = F \left( b \frac{x}{L} - (x-a) \right)$   
 $M_{\text{max}} = M(x) = \frac{ab}{L} f$

$\Rightarrow \frac{0.5 \text{ m} \cdot 0.5 \text{ m}}{1 \text{ m}} \cdot 52000 \text{ N}$

$\Rightarrow \frac{13000 \text{ Nm}}{1 \text{ m}}$

$I_z = \frac{bh^3}{12} - \frac{(b-2t) \cdot (h-2t)^3}{12}$   
 $\Rightarrow I_z = \frac{50792166.67 \text{ mm}^4}{12}$

$y_{\text{max}} = \frac{b}{2} \Rightarrow 60$

$\sigma_x = \frac{Fy}{I} \Rightarrow Mx = \frac{60 \cdot 12}{y} \Rightarrow \sigma_x = \frac{Mx}{I} y$

$\sigma_x = \frac{13000 \cdot 10^3 \text{ Nm} \cdot 60 \text{ mm}}{50792166.67 \text{ mm}^4} \Rightarrow 153.568 \text{ N/mm}^2$

$\sigma_x \text{ [MPa]} < 235 \text{ MPa}$   
 puuttuu leikkaus

RHS - puuttii  
 • 120 · 120 · 5 [mm]  
 • S235