

Tasapainotuspenkin suunnittelu

Aku-Ville Laitinen

Opinnäytetyö
Maaliskuu 2020
Tekniikan ala
Insinööri (AMK), konetekniikka

Tekijä(t) Laitinen, Aku-Ville	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä Maaliskuu 2020
	Sivumäärä 66	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty: x
Työn nimi Tasapainotuspenkin suunnittelu		
Tutkinto-ohjelma Insinööri (AMK), konetekniikka		
Työn ohjaaja(t) Tomi Nieminen		
Toimeksiantaja(t) Oy Botnia Mill Service Ab		
Tiivistelmä <p>Opinnäytetyön aiheena oli tasapainotuspenkin suunnittelu Äänekosken biotuotetehtaan kuivauskaapin puhaltimille. Kuivauskaappia käytetään sellun kuivaamiseen. Kuivauskaapin puhallin koostuu kolmesta osasta: moottori, siipipyörä ja kehikko. Moottori ja siipipyörä on tasapainotettu erikseen. Tästä syystä tasapainotuksen laatu ei ole ollut riittävä. Opinnäytetyön tavoitteena oli suunnitella tasapainotuspenkki, jonka avulla puhaltimen sähkömoottori ja siipipyörä voidaan tasapainottaa saman aikaisesti. Suunnittelussa on myös huomiotava turvallisuus sekä otettava kantaa tasapainotusympäristöön.</p> <p>Opinnäytetyö on luonteeltaan kehittämistutkimus. Tietoa ongelmasta ja mahdollisista ratkaisumalleista hankittiin havainnoimalla ja haastatteleamalla asiantuntijoita sekä tutkimalla aiheeseen liittyvää kirjallisuutta. Suunnitteluprosessi noudatti ongelmanratkaisumallia. Kaikki ratkaisut ovat perusteltu teorian ja painopistearvioinnin sekä FEM-analyysin pohjalta. Suunnitteluvaiheen jälkeen tasapainotuspenkistä laadittiin 3D-malli ja valmistuskuvat. Myös kaikki tarvittavat lujuuslaskut ja värähtelyiden selvitykset tehtiin.</p> <p>Tasapainotuspenkistä saatiin suunniteltua toimiva kokonaisuus, joka täytti toimeksiantajan vaatimukset. Suunnittelussa huomioitiin turvallinen käyttö ja käytön helppous. Lisäksi saatiin määritettyä sopiva tasapainotusympäristö puhaltimille. Lujuus- ja värähtelylaskujen myötä saatiin myös varmuus, että tasapainotuspenkki kestää sille kohdistetut rasitukset.</p> <p>Tasapainotuspenkki tarjoaa toimeksiantajalle uuden palvelun, jota se voi tuottaa pääasiakkaalleen Metsä Fibrelle. Tasapainotuspenkistä valmistettiin prototyyppi, joka toimii moitteetta tehtävässään. Toimeksiantaja oli tyytyväinen opinnäytetyön tuloksiin.</p>		
Avainsanat (asiasanat) Tasapainotus, värähtelyt, teräsrakenteet		
Muut tiedot (Salassa pidettävät liitteet)		

Author(s) Laitinen, Aku-Ville	Type of publication Bachelor's thesis	Date March 2020 Language of publication: Finnish
	Number of pages 66	Permission for web publication: x
Title of publication Designing in a balancing bench		
Degree programme Degree programme in Mechanical Engineering		
Supervisor(s) Nieminen, Tomi		
Assigned by Oy Botnia Mill Service Ab		
Abstract <p>The subject of the thesis was balancing bench design. The balancing bench had to be designed for use in the fans in Metsä Fibre Äänekoski. The fans were located in a drying cabinet. The drying cabinet is used to dry pulp. The fan has three main parts, which are an electric motor, a runner and a frame. The electric motor and the runner have been balanced separately. For this reason, the balancing was not good enough. The solution to this problem was to design a balancing bench for the fans so that the balancing process could be done simultaneously. Safety had to be considered during the design process. Balancing environment was also part of the thesis.</p> <p>The thesis mostly used the methods of development study. Information about the problem and possible solution were collected by observing and interviewing experts. Literature was also used to collect information. The design process followed a problem-solving process. Every solution was based on to the theory and FEM-analysis. After the design process, manufacturing pictures were made for the balancing bench. Also, a 3D-model was made for the balancing bench. Stress and vibration analysis were conducted after the design process.</p> <p>At the end of the process, the balancing bench is fully operative. The balancing bench is safe and easy to use. The construction of the balancing bench is strong enough and tolerates vibration. The balancing environment was included the thesis. The balancing environment should imitate the environment of the actual fan in the work situation.</p> <p>Botnia Mill Service can now offer new service for the customer Metsä Fibre. The prototype worked well. Botnia Mill Service was satisfied with the results.</p>		
Keywords/tags (subjects) Balancing, vibrations, steel structures		
Miscellaneous (Confidential information)		

Sisältö

1	Johdanto	4
1.1	Opinnäytetyön aihe ja tavoitteet	4
1.2	Toimeksiantaja	5
2	Suunnittelun lähtökohdat	5
2.1	Ongelma	5
2.2	Lähtötiedot	7
2.3	Menetelmät.....	8
	2.3.1 Toteutuksen periaatteet.....	8
	2.3.2 Kehittämistutkimus	8
	2.3.3 Kvalitatiivinen tutkimusote	10
3	Suunnittelun perusta	10
3.1	Värähtelyn perusteita.....	10
3.2	Tasapainotus.....	12
	3.2.1 Tasapainotusprosessi	13
	3.2.2 Tasapainotusympäristö	15
3.3	Teräsrakenteiden suunnittelu	16
	3.3.1 Teräsrakenteiden hitsaaminen.....	17
	3.3.2 Terästen leikkaaminen	18
	3.3.3 Värähtelyiden huomioiminen teräsrakenne suunnittelussa.....	19
3.4	Lujuusopilliset näkökulmat.....	19
	3.4.1 Rasitustyytit ja muodonmuutokset	19
	3.4.2 Staattisen kuormituksen rasituslajit.....	21
3.5	FEM-analyysi.....	22
3.6	Turvallisuus.....	23
	3.6.1 CE-merkintä	23
	3.6.2 Konedirektiivi ja koneasetus.....	24
4	Suunnitteluprosessi	25
4.1	Ideointi.....	25
4.2	Painopistearviointi.....	27

	2
4.3 Suunnittelu	28
5 Tulokset	30
5.1 Tasapainotuspenkin rakenne	30
5.2 Tasapainotuspenkin toimintaperiaate	32
5.3 FEM-analyysit	35
5.3.1 Tasapainotuspenkin rasitukset ja muodonmuutokset.....	35
5.3.2 Tasapainotuspenkin värähtelyt	42
5.4 Turvallisuus.....	45
5.5 Pintakäsittely	47
6 Johtopäätökset ja pohdinta	48
Lähteet	50
Liitteet	53
Liite 1. Vaatimuslista.....	53
Liite 2. Kokoonpanokuva	54
Liite 3. Etukiinnike.....	55
Liite 4. Sivukiinnike	56
Liite 5. Yläkiinnike	57
Liite 6. Yläpalkki	58
Liite 7. Alapalkki	59
Liite 8. Kolmiopala	60
Liite 9. Sivupalkki	61
Liite 10. Tukipalkki	62
Liite 11. Suojaverkko 1	63
Liite 12. Suojaverkko 2.....	64
Liite 13. Riskianalyysi	65
Liite 14. Tasapainotuspenkin käyttöohje.....	66
Kuviot	
Kuvio 1. Puhallin edestä.....	6

	3
Kuvio 2. Puhallin takaa.....	6
Kuvio 3. Epätasapainotyypit	13
Kuvio 4. Suljettu kehikko	26
Kuvio 5. H-muoto.....	27
Kuvio 6. A-muoto	27
Kuvio 7. Tasapainotuspenkki ja puhallin	30
Kuvio 8. Tasapainotuspenkin rakenne.....	31
Kuvio 9. Alatuki	32
Kuvio 10. Sivukiinnitys	33
Kuvio 11. Yläkiinnike	33
Kuvio 12. Etukiinnike	34
Kuvio 13. Kolmiopala	34
Kuvio 14. Alatuen rasitukset.....	36
Kuvio 15. Alatuen muodonmuutokset.....	37
Kuvio 16. Kolmiopalan rasitukset	39
Kuvio 17. Kolmiopalan muodonmuutokset.....	39
Kuvio 18. Tasapainotuspenkkiin kohdistuvat voimat ja tuennat	40
Kuvio 19. Tasapainotuspenkin rasitukset	41
Kuvio 20. Tasapainotuspenkin muodonmuutokset.....	42
Kuvio 21. Tasapainotuspenkin ja puhaltimen värähtelyt	45
Kuvio 22. Maalin valinta	47

Taulukot

Taulukko 1. Tasapainotusluokat	14
Taulukko 2. Rasituslajit	22
Taulukko 3. Painopistearviointi	28
Taulukko 4. Alatuen maksimijännitys analyyttisesti.....	37
Taulukko 5. Alatuen maksimimuodonmuutos analyyttisesti	38
Taulukko 6. Tasapainotuspenkin ominaistaajuudet.....	43
Taulukko 7. Tasapainotuspenkin sekä puhaltimen ominaistaajuudet	44
Taulukko 8. Jäännösriskin arvot.....	46

1 Johdanto

1.1 Opinnäytetyön aihe ja tavoitteet

Opinnäytetyön tehtävänä oli suunnitella tasapainotuspenkki Äänekosken biotuote-
tehtaan kuivaamon kuivauskaapin puhaltimille. Kuivauskaappi on kooltaan 10 metriä
leveä, 50 metriä pitkä ja 30 metriä korkea. Kuivauskaapissa kuivataan sellua. Puhalti-
met ovat asennettu kuivauskaapin sivuille kiinni ja haasteena on ollut saada ne tasa-
painotettua siten, että värähtelytasot eivät nouse liikaa. Aihe oli siis toimeksiantajalle
hyvinkin ajankohtainen, koska puhaltimien kanssa on ollut viime aikoina paljon on-
gelmia. Puhaltimien tasapainottaminen on ollut myös työlästä, koska kunnollisia väli-
neitä ei ole ollut saatavilla tähän asti. Puhallin on tasapainotettu tähän mennessä
erillisissä osissa siten, että sähkömoottori ja puhaltimen siipipyörä on tasapainotettu
erikseen.

Kuivauskaapin puhallin runkoineen ja moottoreineen painaa noin 300 kilogrammaa.
Puhallinta pyörittää teholtaan 30 kilowattia oleva sähkömoottori. Tasapainotuspen-
kin rakenteen tulisi kestää siihen kohdistuvat kuormitukset. Kuormituksia ovat esi-
merkiksi puhallinkokonaisuuden massa ja sen käyttämisestä aiheutuvat värähtelyt ta-
sapainotusprosessissa. Puhaltimen tasapainotusta aloitettaessa ei voida olla varmoja,
kuinka paljon pielessä tasapainotus on. Puhaltimien tasapaino vaikuttaa suoraan vä-
rähatelyjen amplitudien suuruuteen. Tasapainotuspenkin rakennetta oli siis pyrittävä
tarkastelemaan monin eri tavoin ja avuksi siihen sopi FEM-analyysi.

Tavoitteena oli siis suunnitella toimiva kokonaisuus tasapainopenkistä, jossa on
otettu huomioon kaikki oleellinen, kuten turvallisuus. Tasapainotuspenkin käyttämi-
sen on oltava helppoa, ergonomista sekä turvallista, eikä siitä saa aiheutua vaaraa ul-
kopuolisille. Tasapainotuspenkin sijoituspaikkaa tuli myös tarkastella ja mahdoli-

suuksien mukaan turvallistaa alue. Tasapainotuspenkin käyttämisestä aiheutuu monenlaista haittaa ympäristöön, esimerkiksi pölyämishaittaa itse tasapainotustilanteessa.

1.2 Toimeksiantaja

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi Botnia Mill Service eli lyhennettynä BMS. BMS on perustettu vuonna 1997 ja sen toimiala on kunnossapito. BMS tarjoaa kaikkia metsäteollisuuden käynnissäpito-, kunnossapito- ja asennuspalveluja sekä lisäksi projektointi ja suunnittelu palveluja. Vuonna 2018 BMS:n liikevaihto oli 60 milj. euroa. BMS:ssä työskentelee noin 380 henkilöä Suomen seitsemässä eri toimipaikassa: Äänekoskella, Joutsenossa, Kemissä, Raumalla, Kuopiossa, Tampereella ja Vantaalla. (Botnia Mill Service n.d.)

Metsä Fibre omistaa Botnia Mill Servicestä 51 % ja Caverion omistaa loput 49 %. BMS toimii Metsä fibren strategisena kumppanina, minkä merkitys on suuri kummankin osapuolen liiketoiminnalle. Yhteistyön tavoitteena on jatkuva toiminta sekä kilpailukyvyyn ja laadun parantaminen. (Botnia Mill Service n.d.)

2 Suunnittelun lähtökohdat

2.1 Ongelma

Kuivauskaappien puhaltimien tasapainotusprosessi on mennyt tähän mennessä siten, että puhaltimen moottori ja puhaltimen siipipyörä on tasapainotettu erikseen. Tästä on aiheutunut epätarkkuutta tasapainotukseen, koska tällöin siipipyörä ja moottori eivät ole välttämättä tasapainossa toisiinsa nähden. Tämä puolestaan on hyvin huono asia prosessin toiminnan kannalta, koska prosessin värähtelytasot pääsevät kasvamaan suuremmiksi kuin kuivauskaapin on suunniteltu kestävän. Kuviosta 1 ja 2

voidaan hahmottaa selkeämmin puhallinkokonaisuuden rakenne. Puhallin asennetaan kokonaisuutena kuivauskaapin seinään kiinni.



Kuvio 1. Puhallin edestä



Kuvio 2. Puhallin takaa

Tasapainotuspenkissä voidaan tasapainottaa puhaltimen moottori ja sen siipipyörä samanaikaisesti. Tällöin ne ovat tasapainossa myös toisiinsa nähden ja värähtelytasoa saadaan selvästi pienennettyä. Pienempien värähtelytasojen ansiosta myös prosessissa olevat muut laitteet ja rakenteet kykenevät toimimaan varmemmin. Tasapainotuspenkin ansiosta myös itse tasapainotusprosessi nopeutuisi huomattavasti, koska kaikki saataisiin tasapainotettua samalla kerralla.

2.2 Lähtötiedot

Tasapainotuspenkin suunnitteluun tarvittavia lähtötietoja kerättiin käynnissäpidon työnjohtajalta. Hän kertoi, että millainen tasapainotuspenkin pitäisi olla ja mitä kaikkea sitä suunnitellessa tulisi huomioida. Suunnitteluprosessissa kaikkien valintojen tuli olla hyvin perusteltuja teoriapohjan avulla. Tasapainotuspenkin suunnittelussa piti ottaa huomioon myös itse tasapainotusprosessi, jotta lopputuloksena olisi toimiva tasapainotuspenkki.

Tasapainotuspenkissä piti olla riittävästi kiinnike pisteitä, jotta saataisiin puhallinkonaisuus tukevasti paikalleen tasapainotuksen ajaksi. Kiinnikkeiden tuli olla myös helppoja ja ergonomisia käyttää. Rakenteen tuli olla kestävä ja sen piti kantaa koko puhallinkonaisuuden massa. Tasapainotuksesta aiheutuvat värähtelyt tuli huomioida rakennetta suunniteltaessa. Tasapainotuspenkin tuli olla myös liikuteltavissa nosturin avulla.

Puhaltimen kehikossa on kiinnityspisteitä, joita voisi hyödyntää puhallinta kiinnittäessä tasapainotuspenkkiin. Kiinnityspisteet puhallinkehikossa ovat lähinnä lattarautoja, joissa on reikä ruuville. Ruuvikiinnitys on varma tapa saada pysymään puhallin paikoillaan tasapainotuksen aikana. Puhallin pitää kuitenkin pyrkiä kiinnittämään jokaiselta kehikon sivultaan kiinni tasapainotuspenkkiin. Tämä on myös tasapainotuksen onnistumisen kannalta olennainen asia sekä tietenkin se on olennainen osa turvallisuutta.

Lähtötietojen perusteella laadittiin vaatimuslista. Vaatimukset jaoteltiin kategorioitain, siten että oli kiinteät vaatimukset, vähimmäisvaatimukset ja toiveet. Vaatimuslista antoi hyvän pohjan suunnittelulle ja se helpotti oleellisesti työtä, kun kaikki vaatimukset ovat helposti luettavassa muodossa. Vaatimuslista on esitetty liitteessä 1.

2.3 Menetelmät

2.3.1 Toteutuksen periaatteet

Opinnäytetyö oli luonteeltaan kehittämistutkimus. Kehittämistutkimus oli tässä tapauksessa paras vaihtoehto, koska ideana oli kehittää ratkaisua ongelmaan. Opinnäytetyössä käytettiin aineistonkeruumenetelmänä kvalitatiivista tutkimusmenetelmää. Opinnäytetyö etenee tuotesuunnitteluprosessin mukaisesti. Suunnittelutyöhön kuuluu 3D-mallinnusta, lujuuslaskuja ja värähtelylaskuja. Nämä edellä mainitut keinot muodostivat vankan ja hyvän pohjan opinnäytetyön onnistumiselle.

Kvalitatiivista dataa kerättiin haastattelemalla henkilöitä, jotka ovat tekemisissä puhaltimien tasapainotuksen kanssa. Puhaltimien vikaantumisajoista saadaan tietoa haastattelemalla tuotantohenkilöitä. Tieto dokumentoitiin muistiinpanoihin ja muistioihin. Kirjallista aineistoa pyrittiin keräämään kattavasti ja lähdekritiikkiä noudattaen. Aikataulussa oli varattu riittävästi aikaa aineiston keräämiselle. Kerättyä aineistoa hyödynnettiin opinnäytetyön teoriaosuudessa.

Tuloksien toimivuutta analysoitiin sekä teorian kautta, että prototyypin kautta. Suunnittelu tulosten toimivuus testattiin prototyypin avulla. Prototyyppi oli kaikista tärkein mittari opinnäytetyön onnistumisen kannalta. Teoreettisesti tuloksia analysoitiin esimerkiksi laskettujen laskujen perusteella sekä tietenkin analysoimalla itse prosessia kokonaisuudessaan.

2.3.2 Kehittämistutkimus

Kehittämistutkimus on kehittämisen ja tutkimuksen yhdistelmä. Kehittämistutkimus ei kuitenkaan ole mikään oma tutkimusmenetelmä, vaan siinä on yhdistelty erilaisia tutkimusmenetelmiä tilanteen mukaan. Kehittämistutkimuksen kulmakivenä toimii

teoria. (Kananen 2012, 19.) Kehittämistutkimuksen ideana on kehittää jotain olemassa olevaa tai luoda jotain täysin uutta. Pelkästään erilaiset vaihtoehdot eivät riitä, vaan ratkaisuja tulee myöskin testata. (Kananen 2012, 44.)

Kehittämistutkimukselle tyypillistä on lähteä kartoittamaan ensin lähtötilannetta. Aihe tulee rajata tarkasti, ja tutkittavaan ilmiöön tulee paneutua. Lähtötilanteen kartoittamiseen hyviä keinoja ovat esimerkiksi haastattelut, havainnointi ja dokumentteihin perehtyminen. (Kananen 2012, 52-62.) Lähtötilan kartoitus auttaa ymmärtämään itse ongelmaa paremmin ja näin ollen siihen on helpompi päästä käsiksi.

Toisena vaiheena on ongelman analysoiminen sekä ongelman taustalla olevien syiden tiedostaminen. Apuna voidaan käyttää esimerkiksi innovointimenetelmiä. Käsitekartan laadinta auttaa avaamaan itse ongelmaa ja ongelmaan liittyvien tekijöiden välisiä suhteita. (Kananen 2012, 63-67.)

Ongelman analysoinnin jälkeen on aika alkaa kehittämään parannusehdotuksia. Tässä vaiheessa parannusehdotuksia tulee myös tarkastella kriittisesti. Parannusehdotukset ja ratkaisut tulee esittää selvästi ja ymmärrettävästi kaikille asianomaisille. Ratkaisuja kehitettäessä on syytä pitää koko ajan mielessä haluttu tavoitetila. (Kananen 2012, 74-75.)

Ratkaisun käyttöönottovaiheessa on laadittava selkeä toimintasuunnitelma. Toimintasuunnitelman on pidettävä sisällään kaikki oleelliset asiat esimerkiksi käyttöönottamista varten. Näitä tietoja voivat olla vastuuhenkilöiden määrittäminen kullekin osalle ja sekä tavoitteiden ja tehtävien kirjaaminen. (Kananen 2012, 77-81.)

Kehittämistutkimuksen luotettavuutta on myös pyrittävä arvioimaan, ja se onkin tärkeä osa opinnäytetyötä. Tutkimustuloksien vakuuttelu ei ole riittävä menetelmä osoittamaan luotettavuutta, vaan tulokset on myös pystyttävä perustelemaan ja esittelemään käyttämällä hyväksi mahdollisimman tarkkaa dokumentaatiota. (Kananen 2012, 166.) Mikäli kehittämistutkimuksessa on jonkin muun tutkimustyyppin menetelmiä mukana, niin niiden luotettavuus tulee arvioida kyseinen tutkimusmenetelmän luotettavuuskriteeristön avulla (Kananen 2012, 170).

2.3.3 Kvalitatiivinen tutkimusote

Kvalitatiivisen tutkimusotteen periaatteena on ymmärtää tutkimuskohteena olevaa ilmiötä laaja-alaisesti. Kvalitatiivisesta tutkimusotteesta käytetään myös usein nimeä laadullinen tutkimus. Laadullisessa tutkimuksessa ei käytetä hyväksi tilastoitua numeerista dataa tai muita määrällisiä menetelmiä. (Kananen 2012, 29.)

Laadullisen tutkimuksen prosessi on seuraavanlainen: suunnittelu, tiedonkeruu, analyysi ja tulkinta. Suunnitteluvaiheessa paneudutaan tutkittavaan ongelmaan ja perehdytään saatavilla olevaan kirjallisuuteen. Tiedonkeruvaiheessa astuvat esiin haastattelut, havainnointi ja kirjalliset lähteet. Analyysivaiheessa analysoidaan sisältöä sekä luokitellaan sitä tarpeen mukaan. Tulkintavaiheessa tehdään johtopäätökset ja arvioidaan tutkimuksen validiteettia. Validiteetilla tarkoitetaan tutkimuksen pätevyyttä, esimerkiksi tuloksien tarkkuutta. Laadullinen tutkimus on läsnä koko ajan kehittämistutkimuksessa. (Kananen 2012, 93.)

Tutkimuksen luotettavuuden lisäämiseen on monia eri keinoja. Dokumentaatiota voidaan pitää yhtenä tärkeimmistä asioista, jolla saadaan työlle uskottavuutta. Kaikki valinnat ja ratkaisut tulee perustella kussakin eri tutkimuksen vaiheessa. Perustelut vaativat aineistoon ja menetelmiin paneutumista. Huonoja valintoja ei voi pelastaa hyvin laaditulla dokumentillaakaan. Esimerkiksi opinnäytetyöntekijän kannattaa pitää päiväkirjaa, jotta pysytään tilanteen tasalla koko tutkimuksen ajan. (Kananen 2012, 173.)

3 Suunnittelun perusta

3.1 Värähtelyn perusteita

Itse värähtelyllä tarkoitetaan jaksottaista liikettä, jolla on taajuus ja amplitudi. Taajuuden yksikkönä on Hz eli 1/s. Amplitudilla tarkoitetaan värähtelyn laajuutta eli

poikkeamaa tasapainoasemasta. Värähtelijä on kappale, joka tekee värähdysliikettä. Värähtelijä synnyttää aaltoliikkeen ympäristöönsä. Aaltoliike voi olla joko poikittainen tai pitkittäinen. (Värähdysliike on säännöllistä liikettä n.d, Pedanet.)

Värähtelyjä esiintyy teollisuudessa oikeastaan kaikkialla, eivätkä kaikki värähtelyt ole kohtalokkaita rakenteille. Pyörivät koneet eivät ole ikinä täydellisesti tasapainossa, vaan roottorin massakeskipiste poikkeaa keskiakselilta aina hieman. Tästä syystä epätasapainosta aiheutuva keskipakovoima pakottaa koneen värähtelemään. Keskeinen käsite on ominaistaajuus eli se taajuus, jolla systeemi pyrkii värähtelemään ilman ajotai vaimennusvoimaa (Luonnollinen taajuus n.d, wikipedia). Kaikista pahin skenaario on, jos laite pyörii samaa kierrosnopeutta, kuin mikä sen tuennan ominaistaajuus on. Tällöin syntyy resonanssivärähtelyä, joka on haitallista pidemmän päälle. Aikanaan resonanssivärähtely voi jopa tehdä pysyviä vaurioita rakenteisiin ja pahimmassa tapauksessa hajottaa esimerkiksi koneen osia. Värähtelyistä aiheutuvia haittoja rakenteisiin ovat esimerkiksi materiaalin kuluminen, materiaalin myötäminen, rakenneosien katkeaminen ja niiden lohkeaminen sekä murtuminen. Tarkemmin sanottuna resonanssi on tila, missä herätetaajuus ja ominaistaajuus ovat lähellä toisiaan. (Kallio 2016, 19.) Herätetaajuus on taajuus, jolla herätevoima vaihtelee suuntaansa pakottaen systeemin värähdysliikkeeseen. Herätevoimalla tarkoitetaan voimaa, jonka takia rakenne muodostaa värähtelevän systeemin. Resonanssi herää noin 15% prosentin etäisyydellä ominaistaajuudesta. (Värähtelymittausten perusteet n.d, 2-8.)

Värähtelyt aikaan saavat lisäksi rasituksia kohtiin, joissa niitä ei esiinny staattisella kuormalla. Tämän vuoksi värähtelyt on syytä pyrkiä tunnistamaan tietokonepohjaisilla laskentaohjelmistoilla ja käytännön kokeilulla. Värähtelyjä voidaan tietysti myös tarkastella analyttisesti laskemalla. (Kiviluoma 2010, 5,11.) Värähtelyiden ehkäisemiseen voidaan vaikuttaa muokkaamalla systeemin ominaistaajuutta. Ominaistaajuutta voidaan muokata esimerkiksi massan lisäämisellä tai vähentämisellä (Talja 2016, 55).

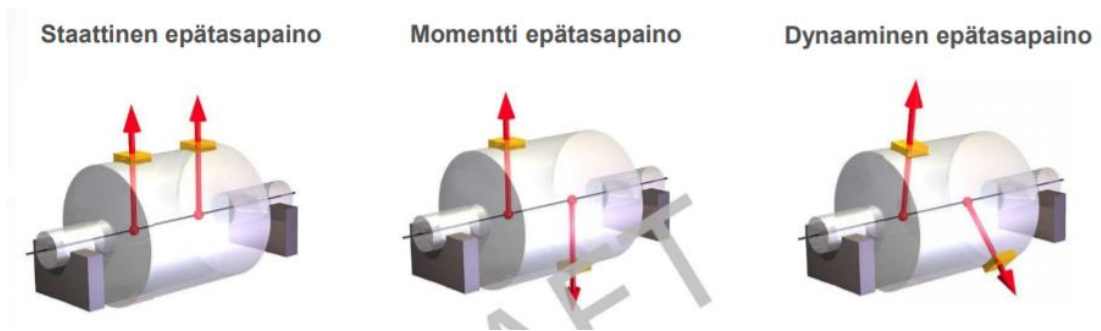
Värähtelyt on otettava huomioon jo alkuvaiheessa laitetta suunniteltaessa. Värähtelyistä aiheutuvia ongelmia ei välttämättä aina heti tunnisteta, jos niitä ei ole otettu huomioon suunnittelussa. Värähtely on kuitenkin aina läsnä joka paikassa tavalla tai toisella. Oleellista kuitenkin on amplitudin suuruuden tarkastelu, ja yleisesti ottaen

pienen amplitudin värähtelyt eivät ole haitallisia. Tässä opinnäytetyössä tarkasteltavana olleiden puhaltimien värähtelyt johtuvat yleensä epätasapainosta. Värähtely rikkoo puhaltimien sähkömoottorien laakereita.

3.2 Tasapainotus

Pyörivissä koneissa dynaamiset voimat ovat aina läsnä, ja mikäli dynaamiset voimat ovat riittävän suuret, ne aiheuttavat koneen vikaantumista. Vikaantumisella tarkoitetaan koneen tai sen elimen vioittumista. Esimerkiksi laakeri voi vikaantua siten, että pieni metallin muru tekee jäljen laakerin ulkokouliin. Vikoja voidaan pyrkiä paikantamaan kunnonvalvonnan menetelmillä tai sitten purkamalla laite. Värähtelyjä voidaan pienentää tasapainottamalla laitteet ennen niiden käyttöönottoa. (Värähtelymittausten perusteet n.d, 3-4.)

Tasapainotuksen päämääränä on poistaa systeemissä oleva epätasapaino. Epätasapainoa on kolmea eri tyyppiä: staattinen, momentti- ja dynaaminen epätasapaino. Staattisella epätasapainolla tarkoitetaan, että painopisteakseli ja pyörimisakseli eroavat toisistaan samansuuntaisesti. Momenttiepätasapainossa taas puolestaan painopisteakseli on kiertynyt pyörimisakseliin nähden, ja tällöin akselit leikkaavat toisensa pituussuuntaisen painopisteen keskellä. Dynaamista epätasapainoa voidaan pitää näiden kahden yhdistelmänä, sen aiheuttaa epätasainen massajakauma. (Tasapainotuskoulutus n.d, 4-6.) Kuviossa 3 on havainnollistettu kunkin eri epätasapainotyyppin periaatetta.



Kuvio 3. Epätasapainotyypit (Tasapainokoulutus n.d, 7)

3.2.1 Tasapainotusprosessi

Puhaltimia tasapainotettaessa on tavoitteena päästä tiettyyn tasapainotusluokkaan. Puhaltimet tasapainotetaan kenttätasapainotusmenetelmällä eli tasapainotus suoritetaan paikan päällä käyttökohteen lähetyillä. Tasapainottaminen pidentää huomattavasti esimerkiksi laakerien käyttöikä.

Botnia Mill Service on määrännyt, että puhaltimien on täytettävä tasapainotusluokka G 2.5. Tasapainotusluokka G 2.5 tarkoittaa käytännössä sitä, että puhaltimen värähtelyjen nopeudet eivät saa ylittää arvoa 2.5 mm/s. Värähtelyn nopeudella tarkoitetaan värähtelevän kappaleen nopeutta. Värähtelyn nopeutta kuvataan yksiköllä mm/s ja se voidaan määrittää matemaattisesti kertomalla pyörivän massan epäkeskisyyttä (e) värähtelyn kulmataajuudella (w). Värähtelyn nopeus mitataan nopeusanturilla. Nopeusantureita kiinnitetään yksi puhaltimen sähkömoottorin takaosaan ja toinen sähkömoottorin etuosaan. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää myös kiihtyvyyssanturia hieman tilanteesta riippuen. Kiihtyvyys on nopeuden derivaatta määritettynä ajan suhteen, joten kiihtyvyys voidaan siten myös määrittää matemaattisesti, mikäli siihen on tarve. Puhaltimen pyörimisnopeus on 1700 rpm. Tasapainotus tapahtuu

standardin PSK 5707 mukaisesti. (Aaltonen 2020.) Taulukossa 1 on esitettyä tasapainotusluokat sekä kerrottu esimerkkejä kuhunkin tasapainotusluokkaan kuuluvista koneista.

Taulukko 1. Tasapainotusluokat (Niemelä 2019, 9)

Tasapainoluokka G	e_w [mm/s]	Esimerkkejä koneistotyypeistä
G 4000	4000	Suurten, hitaiden meridieselmoottorien kampikoneistot, tasapainottamaton
G 1600	1600	Suurten, hitaiden meridieselmoottorien kampikoneistot, tasapainotettu
G 630	630	Joustavat kampikoneistot, tasapainottamaton
G 250	250	Jäykät kampikoneistot, tasapainottamaton
G 100	100	Autojen, kuorma-autojen ja veturien mäntämoottorit
G 40	40	Joustavat kampikoneistot, tasapainotettu
G 16	16	Maatalouskoneet Jäykät kampikoneistot, tasapainotettu Murskaimet Vetoakselit
G 6.3	6.3	Lentokoneiden kaasuturbiinit Sentrifugit Sähkömoottorit ja generaattorit, maksiminopeus 950 r/min asti Puhaltimet Paperikoneet Pumput Prosessilaitosten koneistot Turboahtimet Vesiturbiinit Työstökoneet Koneistot, yleinen
G 2.5	2.5	Kompressorit Sähkömoottorit ja generaattorit, maksiminopeus yli 950 r/min Kaasu- ja höyryturbiinit
G 1	1	Hiomakoneiden koneistot
G 0.4	0.4	Gyroskoopit Tarkkuuskoneiden koneistot

Tasapainotusprosessin ensimmäinen vaihe on alustava ajo. Alustavan ajon ideana on olla ikään kuin referenssijajo. Alustavan ajon jälkeen toteutuneita värähtelyjä kuvaavia suurearvoja, tässä tapauksessa nopeusrajoja (mm/s), luetaan värähtelyanalysaattorista. Kyseisellä värähtelyanalysaattorilla tarkoitetaan laitetta, joka on hyväksytty käytettäväksi osana tasapainotusta. Värähtelyanalysaattori saa tietonsa nopeus-, kiihtyvyy- ja pyörimisantureiden perusteella. Käytetyn värähtelyanalysaattorin merkki oli VIBXPRT II. Alustavan ajon jälkeen lisätään mahdollisesti painoja puhaltimeen tasapainon saavuttamiseksi. Ennen alustavaa ajoa voidaan kuitenkin tehdä niin sanottu ylösajo. Ylösajon ideana on tunnistaa systeemin ominaistaajuudet. (Aaltonen 2020.)

Alustavan ajon jälkeen on koeajo. Koeajon tehtävänä on selvittää, miten koepaino vaikuttaa puhaltimen tasapainoon. Koeajon jälkeen lisätään tai poistetaan painoa tarpeen mukaan. Värähtelyanalysaattori näyttää aina, kuinka paljon materiaalia on

lisättävä tai poistettava. Lisäksi värähtelyanalyysoija näyttää myös kulman, johon kohtaan materiaalin lisäys tai poisto suoritetaan. Kyseinen kulma lasketaan puhaltimen siipipyörän määritetystä nollapisteestä. Nollapiste on kohta, jossa on kiinnitettyä heijastintarra pyörimisanturia varten. (Aaltonen 2020.)

Korjausajot alkavat koeajon jälkeen. Korjausajoja ajetaan tarpeen mukaan niin kauan, kunnes haluttu tasapainotusluokka on saavutettu. Toimenpiteinä toimii edelleen materiaalin lisääminen tai poistaminen määrätystä kulmasta. Kun puhallin on tasapainotettu, niin se voidaan asentaa paikalleen kuivauskaappiin. (Aaltonen 2020.)

Jos tarkastellaan tasapainotusprosessin näkökulmasta tasapainotuspenkin suunnittelua, niin on selvää, että puhaltimeen on päästävä helposti käsiksi tasapainotusprosessin aikana. Puhaltimeen pitää esimerkiksi päästä lisäämään tasapainoja tai poistamaan niitä. Tasapainotuspenkin mahdollisiin turva-aitoihin on siis suunniteltava ovi, josta pääsee puhaltimeen käsiksi.

3.2.2 Tasapainotusympäristö

Tasapainotusympäristöä koskevia vaateita ei löytynyt standardien pohjalta. Tähän saattaa vaikuttaa se, että puhaltimia on niin paljon erilaisia ja moneen eri käyttötarkoitukseen, jolloin standardointi näiden suhteen olisi kovin hankalaa käytännössä. Tasapainotusympäristö tulee kuitenkin miettiä ja suunnitella etukäteen. Yritys voi esimerkiksi itse kehittää laitteilleen oman ympäristönsä konsultoimalla ammattilaisia. (Aaltonen 2020.)

Kuivauskaapin puhaltimien käyttöympäristönä on tietenkin kuivauskaappi, jossa olosuhteet ovat haastavat. Kuivauskaappi on kooltaan noin 10m x 50m x 30m ja siellä on puhaltimia noin 60 kappaletta. Puhaltimet puhaltavat toisiansa vastaan noin 10 metrin etäisyydeltä. Lisäksi kuivauskaapissa liikkuu varmasti myös epäpuhtauksia, mitkä tarttuvat helposti puhaltimien siipiin.

Tasapainotusympäristö kannattaa suunnitella sen mukaan millaiset käyttöolosuhteet puhaltimilla on. Puhaltimet kuitenkin käyttäytyvät eri tavoin ollessaan tyhjässä huoneessa, kuin jos niitä tasapainotettaisiin käyttöolosuhteiden mukaan. Tietenkään täydellisyyteen ei käyttöolosuhteita matkimalla päästä. (Aaltonen 2020.)

3.3 Teräsrakenteiden suunnittelu

Tuotteen / rakenteen suunnittelu on tärkeä monivaiheinen prosessi, johon on syytä käyttää erityistä tarkkuutta. Suunnittelijan tehtävänä on suunnitella tuote siten, että sen valmistamiseen ja aihion muokkaamiseen kuluu mahdollisimman vähän aikaa. Suunnittelijan mukaan määräytyy noin 70-80% tuotteen kustannuksista. (Piironen 2013, 4.) Teräsrakenteiden suunnittelussa osto-osien hyödyntäminen lyhentää valmistusaikaa sekä laskee myös kustannuksia. Standardiosat kannattaa siis ostaa ja suunnitella itse vain ne osat, mitkä tekevät tuotteesta erityisen. Standardi osien käyttö on aina pois valmistusajasta ja helpottaa työtä. (Piironen 2013, 8).

Oleellisia kohtia teräsrakennesuunnittelussa ovat valmistettavuus, kustannusten huomiointi ja rakenteen kesto staattisen sekä dynaamisen kuormituksen suhteen. Kuormituksia tarkastellessa tulee huomioida materiaalien myötörajat. Tuotteen valmistamiseen on kiinnitettävä huomiota, jotta se onnistuu suunnitelman mukaan. Katavilla lähtötiedoilla pääsee jo pitkälle, jolloin saa jo jonkinlaisen hahmotelman millainen tuotteen/rakenteen tulisi olla. Suunnitelmien huipentumana voidaan pitää valmistuskuvia, joiden mukaan tuotteen tulee olla valmistettavissa ilman epäselvyyksiä. Päämääränä tulee olla mahdollisimman kustannus tehokas rakenne. Kustannus tehokkuuteen voidaan vaikuttaa komponenttien valinnoilla ja työstövaiheiden määrällä. Myös materiaalien hinnat vaikuttavat paljon tuotteen lopullisiin valmistuskustannuksiin. (Ekaterina 2017, 28.)

Tarkasteltaviksi valmistusmenetelmiksi valikoituivat hitsaaminen sekä leikkaaminen. Kyseiset valmistusmenetelmät valikoituivat tarkastelun kohteeksi, koska toimeksiantaja voi suorittaa tasapainotuspenkin valmistamisen omalla pajallaan. Tasapainotuspenkin rakenteesta on saatava jäykkä ja kehikkomainen. Tasapainotuspenkin valmis-

tustarkkuuden ei tarvitse olla viimeisen päälle, jolloin voidaan säästää valmistuskustannuksissa. Ei ole kannattavaa tehdä liian hyvää jälkeä, jos tilanne ei sitä vaadi. Hitsaamalla saadaan rakenteeseen kestävätkä liitokset, eivätkä saumat löysty verrattuna esimerkiksi ruuviliitoksiin. Leikkaamisen suorittamiseen toimeksiantajalta löytyy termisiä ja mekaanisia leikkausmenetelmiä. Suunnittelijan on hyvä tietää valmistuksessa käytettävät menetelmät, koska siten tuote voidaan suunnitella optimaaliseksi valmistaa käyttäen tiettyjä valmistusmenetelmiä.

3.3.1 Teräsrakenteiden hitsaaminen

Hitsaaminen on kallista käyttää valmistuksessa ja tästä syystä hitsattavia kohteita kannattaa suunnitella mahdollisimman vähän tuotteeseen. Hitsattavia kohteita voidaan karsia käyttämällä eri teknologiaa esimerkiksi levyn taivutusta. Hitsauksen kustannuksista noin 80% muodostuu itse hitsauksesta. Näin ollen on kiinnitettävä erityistä huomiota siihen, että hitsaaminen sujuisi mahdollisimman jouhevasti ja esimerkiksi turhat kappaleen asetteluajat saataisiin minimoitua. Hitsattavien osien tulisi olla mielellään itsepaikottuvia, koska näin voidaan välttää mitta- ja asennusvirheitä. (Piironen 2013, 40).

Hitsauksen suunnittelua voidaan pitää viisi vaiheisena prosessina. Nämä viisi kohtaa ovat: materiaalin valinta, hitsin koko ja mitoitus, railo ja liitostyyppi, valmistettavuus sekä hitsille asetettavat vaatimukset. Näistä tärkeimpänä voidaan pitää materiaalin valintaa. Materiaalin valinta määrittää paljon liittyen tuotteen valmistuskustannuksiin. Materiaalin valinta määrittelee esimerkiksi käytettävän materiaalin paksuuden ja näin ollen se vaikuttaa oleellisesti siihen, että kuinka paljon hitsausmateriaalia tarvitaan. (Piironen 2013, 40). Hyvin suunniteltu hitsausprosessi laskee myös valmistuskustannuksia, koska silloin pääpaino on itse työnteolla.

Hitsauksesta aiheutuu myös aina sisäisiä rasituksia kappaleeseen. Hitsauksesta aiheutuvat rasitukset kappaleeseen ovat lähinnä jännityksiä kappaleen sisällä, mitkä puolestaan aikaan saavat muodonmuutoksia kappaleeseen. Muodonmuutokset voivat esiintyä esimerkiksi kappaleen kaareutumisenä. Rasitusten ehkäisemiseksi on olemassa menetelmiä, joita ovat esimerkiksi hitsausjärjestys, hitsin koko, hitsin muoto ja

hitsin sijoitus paikka. (Piironen 2013, 41). Hitsaus jäännösjännityksiä voidaan pienentää myös hitsauksen jälkeen. Tällaisia toimenpiteitä ovat kuulapuhallus tai hitsaus-
sauman vasarointi. (Kaila 2014, 36.) Hitsauksen jäännösjännitysten poistamisella tai pienentämisellä saadaan hitsisaumalle lisää kesto.

Hitsauksen laatua tulee myöskin valvoa, jotta päästään parhaaseen mahdolliseen lopputulokseen. Hitsaukselle on olemassa kolme oleellista vaatimusta: 1. Hitsattavasta työstä on tehtävä ohje, jotka on tehty menetelmäkokeen perusteella. Näin voidaan todeta hitsisauman olevan laadukas. Menetelmäkoetta voidaan tehdä esimerkiksi koehitsin avulla, josta voidaan todeta hitsisauman kestävyys. 2. Hitsaajan voimassa oleva pätevyys tulee tarkastaa ennen työn aloittamista. 3. Hitsaustyökirjan pitäminen hitsausprosessin aikana. Tällöin voidaan todeta, että hitsaaminen on tehty suunnitellulla tavalla. (Leino 2006, 42-43.) Hitsauksesta vaadittavat dokumentit tulee selvittää tapauskohtaisesti aina ennen työn aloittamista.

3.3.2 Terästen leikkaaminen

Terästen leikkaamiseen kannattaa käyttää tietenkin edullisinta menetelmää. Leikkausmenetelmää valittaessa tulee kuitenkin huomioida tuotteen laatuvaatimukset ja toimitusaika. Leikkaus menetelmän valintaan vaikuttavat kappaleen osalta sen muodot ja haluttu leikkauksen laatu. Leikattavaa kappaletta suunniteltaessa on myös otettava huomioon materiaalihukka ja pyrkiä mahdollisuuksien mukaan minimoimaan se. Leikkaustyyppit voidaan jakaa kahteen pääkategoriaan, mitkä ovat terminen ja mekaaninen.

Terminen leikkaaminen on leikkaamista lämpöä apuna käyttäen. Termisenleikkauksen alalajeja ovat kaasu, plasma ja laserleikkaus. Terminen leikkaus tuo tietysti mukanaan myös haittapuoliaan, mitkä ovat esimerkiksi lämmöntuonti. Lämmöntuonnista taas seuraa kappaleeseen muodonmuutoksia. Muodonmuutosten syntyminen voidaan kuitenkin minimoida kappaleen muodon suunnittelussa. (Piironen 2013, 17).

Mekaanisessa leikkaamisessa itse leikkaaminen tapahtuu mekaanisilla välineillä. Mekaanisia leikkausmenetelmiä ovat esimerkiksi levyleikkuri. Mekaaninen leikkaaminen

on tehokas tapa silloin, kun muodot eivät ole monimutkaisia. Myös vesileikkaus luetaan yhdeksi mekaanisen leikkauksen menetelmäksi. (Piironen 2013, 17).

3.3.3 Värähtelyiden huomioiminen teräsrakenne suunnittelussa

Tarkastelun kohteena opinnäytetyössä oli tasapainotuspenkin ominaistajuus verrattuna puhaltimen pyörimisen taajuuteen. Mikäli nämä kaksi taajuutta ovat samat, niin syntyy resonanssivärähtelyä. Ominaistaajuuden muuttamiseen on käytävä läpi muutamia keinoja.

Värähtelyitä voidaan kuitenkin pystyä hallitsemaan. Helpoiten tämä tapahtuu tietenkin puuttamalla jo suunnittelun alkuvaiheessa tuotteen ominaistajuuteen. Tuotteen ominaistajuutta voidaan muuttaa esimerkiksi kasvattamalla tuotteen massaa tai jäykistämällä rakennetta. Tuotteen massaa voidaan lisätä monin eri keinoin, esimerkiksi kasvattamalla palkkien ainevahvuutta. Tehokkain värähtelyiden vaimennuskeino on kuitenkin tärinävaimennus. Tärinävaimentimista on eniten hyötyä, kun ne on sijoitettu oikeaan paikkaan. Oikea paikka voisi olla värähtelyn lähteen ja värähtelevän systeemin välissä. Jos mietitään tasapainotuspenkkiä, niin tärinävaimentimet voisivat tarvittaessa olla puhaltimen rungon tasapainotuspenkin rungon välissä siten, että ne eivät pääsisi kosketukseen toistensa kanssa. (Somelar 2017, 12.)

3.4 Lujuusopilliset näkökulmat

3.4.1 Rasitustyyppit ja muodonmuutokset

Materiaalia valittaessa pitää huomioida sijoitusympäristö kokonaisuutena. Rasitukset voidaan jakaa viiteen eri kategoriaan, jotka ovat staattinen kuormitus, dynaaminen kuormitus, väsyminen, viruminen, kuluminen ja ympäristökuormitus (Rasitus 2005). Materiaali valinta voidaan tehdä edellä mainittujen rasitusten perusteella oikea oppisesti, jolloin saadaan paras mahdollinen lopputulos tuotteen kestävyden kannalta.

On olennaista selventää muutamia materiaalitekniikan keskeisimmät käsitteet. Näitä käsitteitä ovat myötölujuus, murtolujuus, sitkeys, hauraus ja elastinen- sekä plastinen muodonmuutos. Myötölujuus käsitteenä tarkoittaa materiaaliin kohdistuvan paineen

yläarvoa, jolla materiaali antaa myöten. Eli tapahtuu elastista muodonmuutosta, joka sitten palautuu, kun paine materiaalin sisältä häviää. Jos myötölujuus ylitetään, niin tapahtuu plastista muodonmuutosta, jolloin materiaali ei palaudu paineen loputtua, vaan materiaaliin jää näkyviin rasituksen aiheuttamaa muodonmuutosta. Murtolujuus tarkoittaa paineen arvoa, missä materiaali murtuu. (Korpela, luku 9.) Sitkeydellä tarkoitetaan materiaalin kykyä vastustaa murtuman etenemistä (Jäntti 2017). Sitkeyden vastakohtana voidaan pitää haurautta ja yleensä puhutaankin sitkeästä tai hauraasta murtumasta. Hauraassa murtumassa materiaaliin ei tule juurikaan plastista muodonmuutosta, vaan murtuma kohta näyttää tasapaksulta ja materiaali näyttää siltä kuin se olisi katkaistu. Sitkeässä murtumassa voidaan puolestaan nähdä materiaalin plastista muodonmuutosta murtuma kohdassa.

Staattisella kuormituksella tarkoitetaan kuormitusta, joka on koko ajan samansuuntainen. Staattisen kuormituksen alla olevan materiaalin myötölujuutta ja sitkeyttä on tarkasteltava esimerkiksi vetokokeen avulla. (Rasitus 2005, staattinen kuormitus.) Vetokokeessa materiaali sauva kiinnitetään molemmista päistä kiinni koneeseen, jonka jälkeen aloitetaan vetokoe. Vetokoe on hyvä tapa selvittää materiaalin ominaisuuksia. Dynaaminen kuormitus on puolestaan vaihtelevaa kuormitusta. Dynaamisessa kuormituksessa voiman suuruus ja suunta vaihtelevat. Dynaamisen kuormituksen eri tyyppejä ovat jatkuvasti muuttuva kuormitus, pulssikuormitus ja iskukuormitus. Jatkuvasti muuttuvassa kuormituksessa voiman suuruus ja suunta muuttuvat säännöllisesti, kun taas pulssikuormituksessa voiman suuruus ja suunta muuttuvat epäsäännöllisesti. Iskukuormituksessa voiman suuruus ja suunta muuttuvat sattumanvaraisesti, eikä kuormitus noudata minkäänlaista jaksotusta. (Rasitus 2005, dynaaminen kuormitus.)

Väsyminen on vaihtosuuntaisesta kuormituksesta johtuvaa materiaalin murtumista. Keskijännitys ja jännitysamplitudi vaikuttavat, että kuinka monta kuormanvaihtoa materiaali määrällisesti kestä. Keskijännitys kertoo jännityksen staattisen osuuden. Jännitysamplitudi tarkoittaa jännityksen maksimiarvoa dynaamisen kuormituksen osalta. Väsymistä pidetään yleisimpänä koneen osien murtumisen syynä. (Rasitus 2005, väsyminen.)

Virumisella tarkoitetaan korkeissa lämpötiloissa tapahtuvaa muodonmuutosta. Muodonmuutosta voi edes auttaa materiaalin kuormittaminen. (Rasitus 2005, viruminen). Viruminen asettaa materiaalin valinnoille omat vaatimuksensa, jotka on huomioitava suunnittelussa.



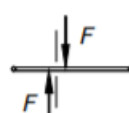
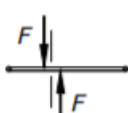


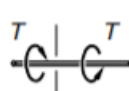
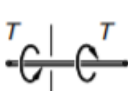
Kulumisella tarkoitetaan materiaalin irtoamista kuluvalta pinnalta erilaisten mekanismien välityksellä. Kulumisesta seuraa materiaaliin painohäviöitä, mittojen muuttumista, muodonmuutoksia ja pinnan laadun heikkenemistä. Kulutusta vaativiin kohteisiin on syytä valikoida kulutusta varten kehitettyjä materiaaleja. (Rasitus 2005, kuluminen.)

Ympäristökuormituksella viitataan yleensä korroosioon. Korroosiossa metalli hapettuu ympäristön vaikutuksesta. Korroosio aikaan saa painohäviöitä ja pinnan laadun heikkenemistä. On olemassa kahta erilaista korroosiotyyppiä, jotka ovat kemiallinen ja sähkökemiallinen korroosio. Kemiallisessa korroosiossa metalli alkaa hapettumaan ilmassa olevan hapen ja epäpuhtauksien takia. Sähkökemiallisessa korroosiossa on korroosiopari, jossa toinen on epäjalompi. Tällöin epäjalompi alkaa syöpymään hapettumis- ja pelkistymisreaktion seurauksena. Esimerkiksi raudan ruostuminen on korroosiotia. (Rasitus 2005, korroosio.)

3.4.2 Staattisen kuormituksen rasituslajit

Staattisen kuormituksen rasituslajit voidaan jakaa neljään eri kategoriaan, jotka ovat leikkaus-, vääntö-, taivutus-, veto- ja puristusrasitus (Sormunen 2005, 35). Veto- ja puristusrasitus ovat sauvan suuntaisia rasituksia, joissa voimat kohdistuvat sauvan päihin. Leikkausrasitus kohdistuu kohtisuoraan sauvan pintaan, jossa kaksi vastakkaisista voimaa yrittävät leikata rakenteen. Leikkaus esiintyy yleensä taivutuksen kanssa, ellei kyse ole puhtaasta leikkautumisesta. Taivutus pyrkii taivuttamaan kappaletta sen päistä ja aiheuttaa näin ollen momenttia kappaleeseen. Vääntö pyrkii pyörittämään sauvaa oman keskiakselinsa ympäri, aiheuttaen kiertymää sauvaan. Väännöstä aiheutuu vääntömomenttia rakenteeseen. (Sormunen 2005, 35-58.) Taulukosta 2 voidaan nähdä periaatekuva kustakin eri rasituslajista.

Taulukko 2. Rasituslajit (Sormunen 2005, 35.)

	⊕	⊖
<u>VETO JA PURISTUS</u>		
<u>LEIKKAUS</u>		
<u>TAIVUTUS</u>		
<u>VÄÄNTÖ</u>		

3.5 FEM-analyysi

FEM-analyysi on tietokoneella tehtävä simulaatio, jota kutsutaan äärellisen elementin menetelmäksi. FEM-analyysin avulla voidaan selvittää esimerkiksi rakenteessa esiintyvät jännitykset ja muodonmuutokset. FEM-analyysin avulla voidaan saada monia hyötyjä tuotesuunnitteluun. Näitä hyötyjä ovat prototyyppien ja kokeiden määrän vähentäminen fyysisillä kappaleilla. (Finite element analysis n.d.) FEM-analyysin ansiosta siis tuotteensuunnittelua voidaan nopeuttaa.

FEM:ssä käytettäviä laskenta malleja on kolmea erityyppiä, jotka ovat keskiviiva-, keskipinta- ja kiinteät mallit. Keskiviivamallit ovat 1D-malleja, joita käytetään hyväksi laskettaessa sauvoja ja palkkirakenteita. Keskipintamallit ovat 2D-malleja ja niitä käytetäänkin lähinnä kuorityyppisten rakenteiden tarkasteluun. Solidimallit ovat puolestaan 3D-malleja. Kiinteitä malleja käytetään silloin kuin 1D- ja 2D-mallit eivät riitä tuloksien saamiseksi. Laskentamalli on valittava tarkastelun kohteen mukaisesti, jotta voidaan saada totuuden mukaisia vastauksia. (Lähteenmäki, 11.)

FEM-laskenta perustuu elementtiverkkoon. Kappale jaetaan äärellisiin osiin, jotka ovat geometrialtaan riittävän yksinkertaiset. Nämä jaetut osat ovat elementtejä. Kolmiulotteisissa kappaleissa elementit ovat yleensä neli-, viisi-, ja kuusitahokkaita. Pintamalleille puolestaan käytetään yleensä kolmi- ja nelisivuisia tasoelementtejä. Viivarakenteissa on käytössä janaelementit. Palkki- ja sauvaelementit ovat janaelementtejä. (Lähtenmäki, 2.)

Elementtiverkossa esiintyy paljon elementtejä ja solmuja. Elementtejä ja solmuja on käsiteltävä sekä yksilöinä ja yhdessä. Solmujen tehtävänä on yhdistää elementit toisiinsa. Tämän vuoksi tarvitaan erillinen merkintätapa solmusuureille. Elementtimenetelmässä hyödynnetään matriisilaskentaa, jolloin solmusuureet laitetaan pystyvektoreiksi. Elementtimenetelmässä ratkaistaan ensimmäisenä solmusuureet ja tämän jälkeen elementtien alueilla olevat suureet. (Lähtenmäki, 7-8.)

3.6 Turvallisuus

Tasapainotuspenkin suunnittelussa on huomioitava turvallisuus näkökulmat huolellisesti. Tasapainotuspenkki itsessään ei ole kone, mutta kun siihen liitetään puhallin, niin sitä tulee käsitellä kuin konetta. Tuovallisuuden takaamiseksi on tarkasteltava CE-merkintää sekä konedirektiiviä.

3.6.1 CE-merkintä

CE-merkillä todistetaan, että tuote täyttää EU:n direktiivien ja asetusten vaatimukset. CE-merkityt tuotteet saavat liikkua vapaasti EU-alueella. CE-merkintää edeltää viisi vaiheinen prosessi. Nämä vaatimukset ovat tuotekohtaiset vaatimukset, tuotteen tarkistaminen ja testaaminen, tekniset asiakirjat, käyttöohjeet, EU-vaatimustenmukaisuusvakuutus ja CE-merkintä. CE-merkintä ei kuitenkaan takaa tuotteen laatua. (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto n.d.)

Tuotekohtaiset vaatimukset ovat kullekin eri tuotteelle omanlaisensa. Tuotetta koskevat vaatimukset on selvitettävä. Näitä vaatimuksia ovat direktiivit, asetukset ja standardit. Tuotteen tarkastaminen ja testaaminen on idea varmistua siitä, että tuote

vastaa sille asetettuja vaatimuksia. Tarvittaessa tuotteen testaaminen on suoritettava tarvittaessa määrätyllä laitoksella, mikäli vaatimus näin on. (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto n.d.)

Tuotteesta on laadittava määrätyt dokumentit. Dokumentit on tarvittaessa esiteltävä markkinavalvontaviranomaisille. Tuotteesta on laadittava käyttöohjeet, jotta tuotetta voidaan käyttää turvallisesti. Viimeisimpänä tehdään EU-vaatimustenmukaisuusvakuutus ja kiinnitetään CE-merkintä näkyville tuotteeseen. (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto n.d.)

3.6.2 Konedirektiivi ja koneasetus

Koneiden tulee olla EU:n konedirektiivin vaatimusten mukaisia. EU:n konedirektiivi 2006/42/EY on koneiden turvallisuuteen ja terveyteen liittyvä säädös. Konedirektiivi on syytä ottaa suunnitteluun mukaan jo heti alkuvaiheessa, koska se asettaa vaatimuksia suunnittelutyölle, niin turvallisuuden kuin terveyden näkökulmasta. (Koneturvallisuus 2008.) Konedirektiivi koskee seuraavia tuotteita: (Konedirektiivi 1. artikla.)

1. koneet
2. vaihdettavat laitteet
3. turvakomponentit
4. nostoapuvälineet
5. ketjut, köydet ja vyöt
6. nivelakselit
7. puolivalmisteet

Konedirektiivin yleisiin periaateisiin kuuluu riskin arviointi. Riskin arvioinnin perusteella voidaan määrittää terveys- ja turvallisuusvaatimukset. Riskin arviointi prosessina on seuraavanlainen: koneen raja-arvojen määrittäminen, tunnistetaan vaarat ja vaaratilanteet, arvioidaan riskin suuruus, arvioidaan riskin merkitys direktiivin suhteen, poistetaan vaarat tai tehdään suojatoimenpiteitä. Kone on suunniteltava ja rakennettava siten, että kone on tarkoitukseensa sopiva ja sen käyttäminen, huoltaminen ja säätäminen voidaan toteuttaa henkilöitä vaarantamatta. Myös väärinkäyttö on huomioitava suunnittelussa. (Konedirektiivi liite 1.)

Koneen on oltava myös ergonomialtaan hyvä käyttää. Fyysistä ja psyykkistä kuormitusta on pyrittävä minimoimaan mahdollisuuksien mukaan. Esimerkiksi säädettävyyttä käyttäjän mitoille tai koneen työtahdin määrittämien sopivaksi. Koneen käyttäjälle pitää olla myös tarvittava liikkuma tila. (Konedirektiivi liite 1.)

Kone on oltava pysäytettävissä tarpeen vaatiessa. Normaalin pysäytyksen lisäksi koneessa tulee olla myös hätäpysäytys mahdollisuus. Hätäpysäytys tulee olla helposti tunnistettavissa, jotta sen löytää helposti tositilanteessa. Hätäpysäytys on vain lisänä, eikä sen olemassaololla voida tinkiä muista turvatoimista. (Konedirektiivi liite 1.)

Koneasetus perustuu EU:n konedirektiiviin. Koneasetuksessa on määriteltynä valmistajan velvollisuudet ennen koneen laskemista markkinoille. Koneen valmistajan tehtäviä ovat: ”riskien arviointi, selvittää konetta koskevat turvallisuusvaatimukset, suunnitella ja rakentaa kone turvallisuusvaatimusten mukaisesti, laatia käyttöohjeet ja tehdä koneeseen tarvittavat merkinnät, laatia tekninen tiedosto, tehdä vaatimustenmukaisuusvakuutus, kiinnittää koneeseen CE-merkintä” (Koneturvallisuus 2008, 6).

4 Suunnitteluprosessi

Tuotteen suunnitteluprosessi voidaan jakaa karkeasti kolmeen pääkategoriaan, jotka ovat ideointi, suunnittelu ja toteutus. Hyvällä suunnittelutyöllä voidaan pyrkiä minimoimaan tuotteessa olevat virheet. Suunnitteluprosessiin panostamalla voidaan säästää kustannuksissa tapauksista riippuen suuriakin summia, koska hyvin suunnitellut tuotteet yleensä toimivat. (Tuotteen kokonaissuunnittelu ja ideointi, KAMK.)

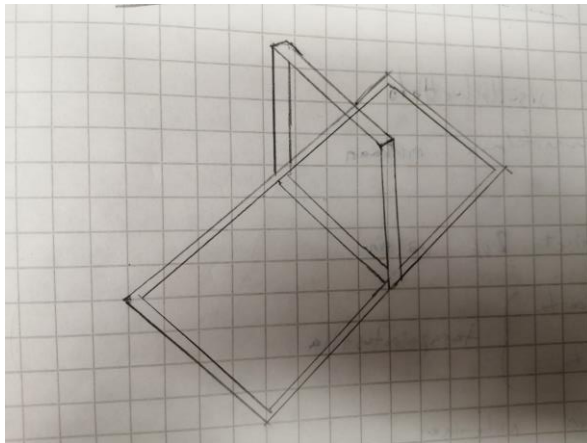
4.1 Ideointi

Suunnitteluprosessi aloitettiin kehittämällä mahdollisimman paljon erilaisia ratkaisuja. Innovointitilaisuudessa käytettiin hyväksi menetelmää nimeltä aivoriihi. Aivoriihen ensimmäinen peruseriaate on tuottaa mahdollisimman paljon ideoita ja siinä

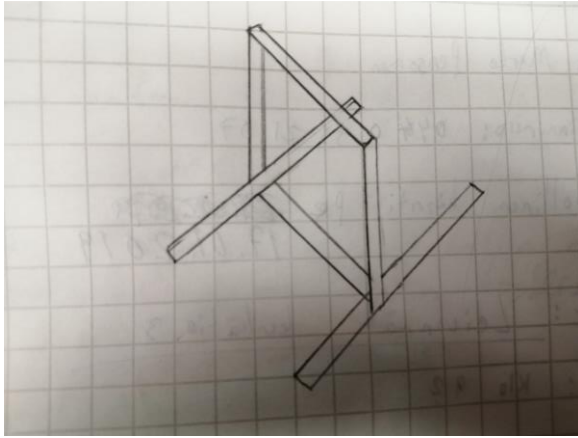
kuvitellaan määrän tuottavan laatua. Kukin idea kirjattiin omalle lapulleen. Toinen periaate on ideoimisen ja arvioinnin erottelu toisistaan. Ei siis tyrmätä ideoita ideoinnin aikana, vaan annetaan luovuuden päästä valloilleen. (Halme 2018.)

Kolmantena periaatteena on poikkeavien ja villien ideoiden rohkaisu. Poikkeavat ideat toimivat myös ikään kuin rohkaisuna ja näin ollen auttavat löytämään monenlaisia ratkaisuja. Neljäntenä on aikaisempien ideoiden hyödyntäminen eli esimerkiksi niitä jatkokehitetään. (Halme 2018.)

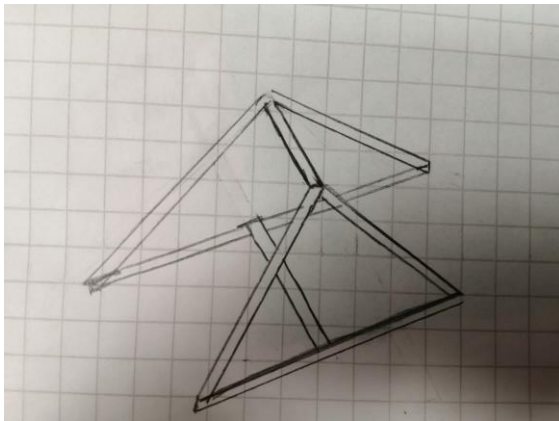
Noudattamalla näitä aivoriihen peruseriaatteita saatiin ideoitua paljon erilaisia ratkaisuja. Ideoimisen jälkeen alettiin karsimaan ideoista. Kriteereinä ideoiden karsimisessa käytin helppokäyttöisyyttä, valmistettavuutta, liikuteltavuutta ja rakenteen jäykkyyttä. Nämä kriteerit sijoitettiin painopistearviointitaulukkoon, jossa ideat pisteytettiin. Jatkokehitykseen valikoitui eniten pisteitä saanut idea. Painopistearvioinnissa arviointiin kolmen erilaisen idean väliltä. Painopistearvioinnissa mukana olleet ideat olivat suljettu kehikko, H-muoto ja A-muoto. Nämä ideat löytyvät kuvioista 5-7.



Kuvio 4. Suljettu kehikko



Kuvio 5. H-muoto



Kuvio 6. A-muoto

4.2 Painopistearviointi

Painopistearviointi on helppo tapa karsia pois ylimääräisiä vaihtoehtoja. Kriteerit valikoituivat painopistearviointiin tasapainotuspenkiltä vaadittavien ominaisuuksien perusteella. Näitä ominaisuuksia ovat rakenteen jäykkyys, massan suuruus, liikuteltavuus, valmistettavuus ja helppokäyttöisyys.

Taulukossa 4 on listattuna painopistearvioinnissa olleet ideat. Helppokäyttöisyyttä pohdittaessa pisteet jakautuivat tasan H-muodon ja suljetun kehikon välillä, kun taas

A-muotoinen sai selvästi huonommat pisteet. Valmistettavuuden kannalta H-muoto olisi järkevin verrattuna suljettuun kehikkoon. A-muoto on valmistettavuutensa puolesta hivenen huono, koska siinä olisi paljon enemmän työvaiheita kuin muissa. Liikuteltavuudessa kaikki ideat pärjäsivät yhtä hyvin. Tässä tapauksessa massa on ratkaisevassa asemassa: mitä enemmän massaa, sitä parempi. Tästä suhteesta suljettu kehikkomainen oli paras vaihtoehto. Myös rakenteen jäykkyys on tärkeä kriteeri. Jäykin rakenne on suljetulla kehikolla. Painopistearvioinnin perusteella parhaaksi vaihtoehdoksi valikoitui suljettu kehikko -malli.

Taulukko 3. Painopistearviointi

Kriteerit	H-muoto	Suljettu kehikko	A-muoto
Helppokäyttöisyys	4	4	2
Valmistettavuus	4	3	1
Liikuteltavuus	3	3	3
Massa	3	5	3
Rakenteen jäykkyys	3	5	4
Yhteensä	17	20	13

4.3 Suunnittelu

Innovoinnin ja painopistearvioinnin jälkeen suunnittelu voitiin aloittaa virallisesti. Suunnittelun kulmakivenä toimi laadittu vaatimuslista (ks. liite 1), jossa oli esitettyinä kaikki oleelliset huomiot tasapainotuspenkin suunnittelua varten. Painopistearvioinnin jälkeen oli selvää, että tasapainotuspenkki on rakenteeltaan kehikkomainen.

Suunnittelun alkuvaiheessa puhallin mallinnettiin Inventorilla. Puhaltimen mallintaminen helpotti huomattavasti työn määrää. Sitten kun itse tasapainotuspenkkikin on mallinnettuna, voidaan todeta niiden yhteensopivuus. Yhteensopivuuden toteaminen ehkäisee mahdollisia suunnitteluvirheitä, jotka todennäköisesti huomattaisiin vasta valmistuksen aikana tai pahimmassa tapauksessa vasta puhallinta sovitettaessa tasapainotuspenkkiin. Puhaltimesta saadaan myös mittoja, jotka ovat ratkaisevassa asemassa esimerkiksi tasapainotuspenkin kiinnityspisteiden suunnittelemisessa. Suunnittelussa hyödynnettiin myös haastattelujen pohjalta esiin tulleita toiveita ja vaatimuksia. Haastatteluissa esiin tulleet toiveet liittyivät lähinnä tasapainotuspenkin käytettävyyteen, jotta se olisi mahdollisimman helppoa ja luontevaa.

Tasapainotuspenkki pyrittiin suunnittelemaan siten, että siinä hyödynnetään mahdollisuuksien mukaan standardipalkkeja. Palkkien vertailemisen jälkeen päädyttiin käyttämään UNP-140x60x7 -palkkia. Kyseinen palkki on lujuusominaisuuksiltaan hyvä, eikä se menetä muotoaan helposti verrattuna esimerkiksi putkipalkkeihin. Tasapainotuspenkkiin olisi saatava myös massaa paljon ja UNP-palkki sitä lisäisi. Tasapainotuspenkki koostuu oikeastaan kokonaan UNP-140x60x7 -palkista. UNP-palkin materiaalina on S355JR. Tasapainotuspenkin suunnittelussa huomioitiin myös suunnittelijan perusohjeet liittyen teräsrakennesuunnitteluun.

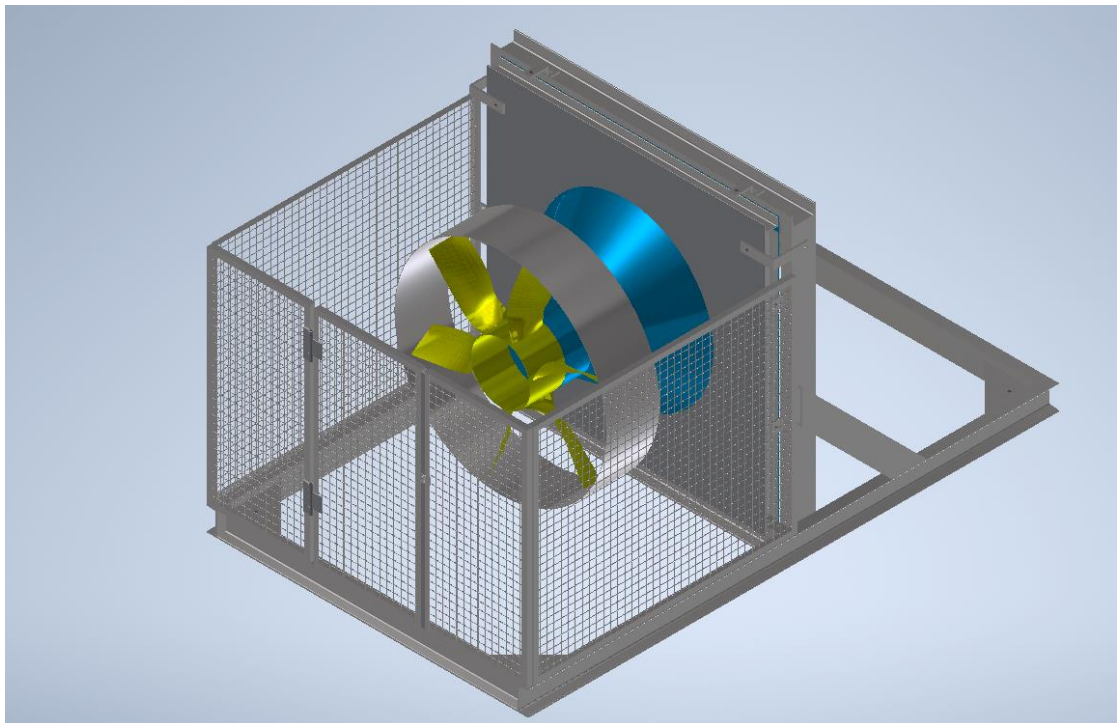
Materiaali ja palkki valinnan jälkeen aloitettiin miettimään valmistamista. Tasapainotuspenkin pitää olla luja rakenteeltaan, liitokset mukaan lukien, eikä niihin saa puhaltimen pyörimisestä aiheutuvat värähtelyt vaikuttaa. Kokoonpano suunniteltiin suoritettavan puikko hitsauksella. Liitoskohdat hitsataan ympäriinsä, jolloin rakenteesta tulee tasaluja. Lisäksi mahdolliset UNP-palkkien muokkaamiset suoritetaan lähinnä leikkaamalla niistä halutun muotoiset. Leikkausmenetelmänä käytetään varsin perinteistä polttoleikkausmenetelmää. Edellä mainituilla valmistusmenetelmillä ei päästä välttämättä ihan hirveän hyviin mittatarkkuuksiin, jos niitä verrataan esimerkiksi lasertyöstöön. Se ei kuitenkaan tässä tapauksessa haittaa, vaan olisi turhan kallista yrittää päästä liian hyvään tarkkuuteen valmistuksen suhteen, jos sillä ei olisi mitään käytännön tuomaa lisäarvoa tasapainotuspenkille.

Lopuksi tasapainotuspenkistä ja sen osista laadittiin valmistuskuvat. Valmistuskuviin kuuluivat myös polttokuvat. Lisäksi tasapainotuspenkin 3D-malliin voitiin sovittaa puhaltimen 3D-malli. Tämä oli hyvä lisäys, jolloin pystyimme toteamaan tasapainotuspenkin olevan juuri oikeanlainen puhaltimelle. Tasapainotuspenkkiin suunnitellut kiinnitystä helpottavat välykset olivat juuri oikeanlaisia, mikä ilmeni 3D-mallia tarkasteltaessa.

Tasapainotuspenkin valmistus kuvat löytyvät liitteistä 2-10. Valmistuskuvien perusteella tasapainotuspenkin valmistaminen voidaan toteuttaa. Valmistuskuvista löytyy kaikki oleellinen informaatio teknillisen piirustusten vaatimusten mukaisesti.

5 Tulokset

Suunnitteluprosessin aikana tasapainotuspenkistä luotiin 3D-malli sekä valmistuskuvat. Tasapainotuspenkille suoritettiin myös tarvittavat laskelmat värähtelyn ja rasituksen suhteen. Suunniteltu tasapainotuspenkki täyttää toimeksiantajan kaikki vaatimukset ja siinä onkin huomioitu asioita laajalti, mitkä vaikuttavat sen käyttämiseen osana tasapainotusprosessia. Näitä edellä mainittuja asioita ovat esimerkiksi turvallisuus ja käytettävyys. Kuvioista 7 voidaan nähdä tasapainotuspenkki ja siihen istutettuna puhallin.



Kuvio 7. Tasapainotuspenkki ja puhallin

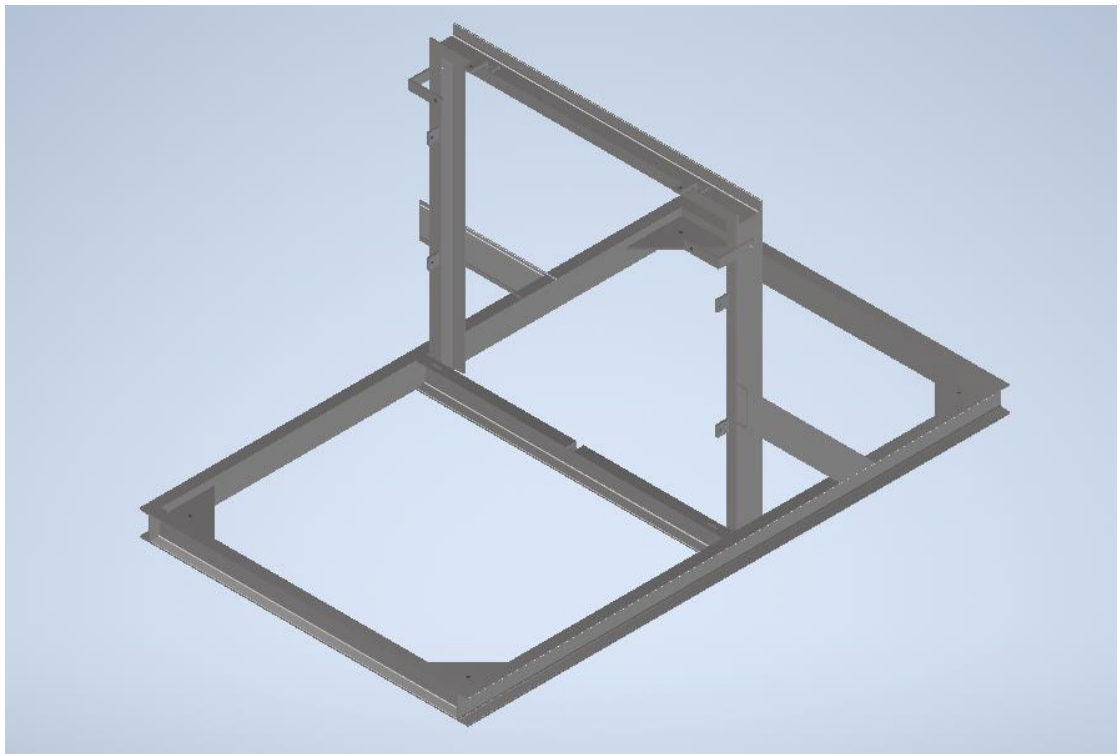
5.1 Tasapainotuspenkin rakenne

Tasapainotuspenkki on rakenteeltaan jäykkä ja kehiikkomainen. Tasapainotuspenkki on rakennettu pääosin UNP 140/60x7 palkista. Kyseinen palkki valikoitui käytettäväksi, koska sen muoto on oivallinen ja siinä riittää jäykkyyttä ja lujuutta riittämiin. U-palkki ei myöskään muuta muotoaan helposti verrattuna esimerkiksi RHS-

neliöputkipalkkiin. U-palkki lisää myös tasapainotuspenkin painoa merkittävästi. Tasapainotuspenkin on hyvä olla tukeva ja painava rakenteeltaan.

Tasapainotuspenkki on suunniteltu valmistettavan teoriaosuudessa esitettyjen valmistusmenetelmien mukaisilla tavoilla. Kyseisiä valmistusmenetelmiä apuna käyttäen tasapainotuspenkin osat saadaan valmistettua tarpeeksi tarkoin toleranssein sekä liitoksista saadaan tukevat ja värähtelyn kestävät.

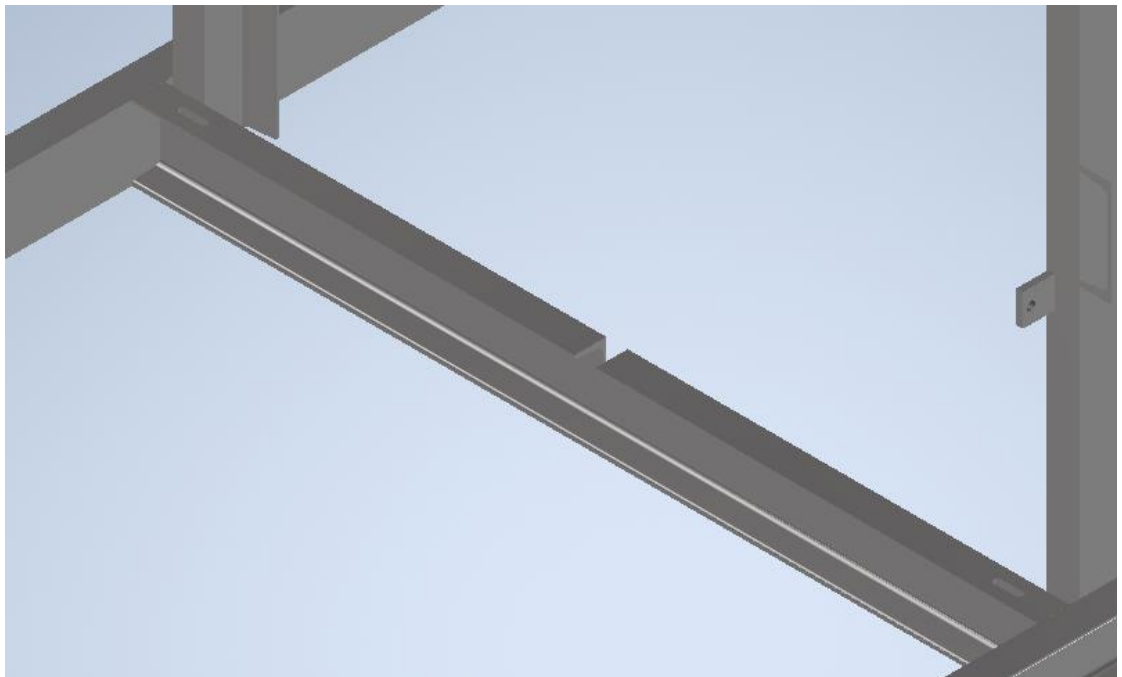
Kuviosta 8 voidaan hahmottaa vielä selkeämmin tasapainotuspenkin rakenne. Tasapainotuspenkki painaa noin 300 kg. Rakenne on kehikkomuotoinen siitä syystä, että se lisää huomattavasti tasapainotuspenkin jäykkyyttä verraten siihen, että se olisi avoin kummastakin päästä. Kehikko muotonsa perusteella tasapainotuspenkki on helposti liikuteltavista nosturin avulla nostokorvakkeistaan. Tasapainotuspenkki kiinnitetään lattiaan ruuviliitoksien siten, että jokaisella sivulla on kaksi M16 ruuvia.



Kuvio 8. Tasapainotuspenkin rakenne

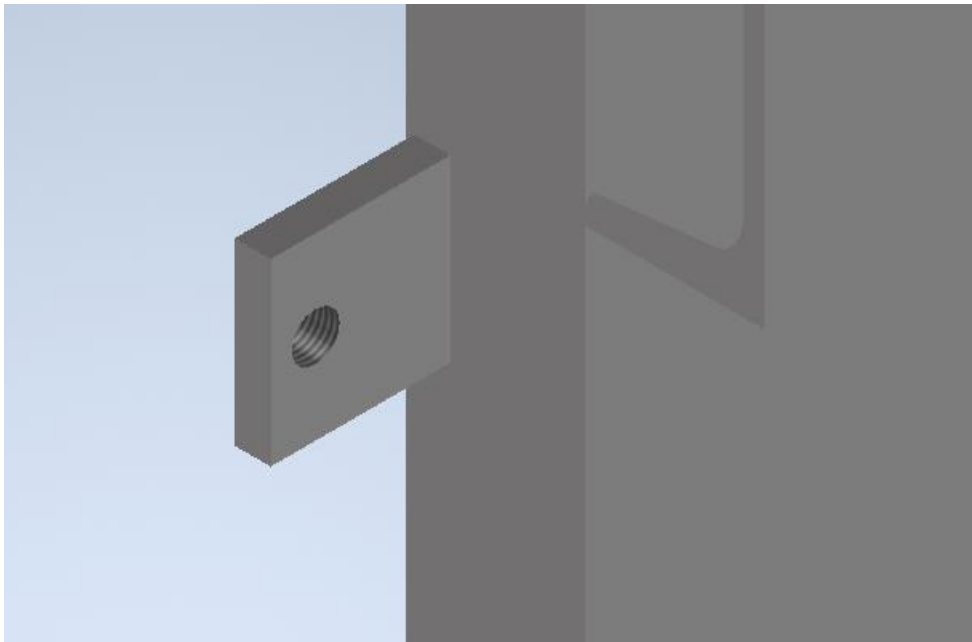
5.2 Tasapainotuspenkin toimintaperiaate

Tasapainotuspenkkiin puhallinkokonaisuus on helposti kiinnitettävissä. Se nostetaan nosturilla paikalleen, minkä jälkeen se pultataan tasapainopenkin poikittaiseen alatukeen kiinni. Alatuken ja kehikon välissä on välys, johon puhallin voidaan asettaa. Alatuessa on kaksi kiinnityspistettä, joissa on ovaalin muotoisen halkaisijaltaan 14 mm olevia reikiä kaksi kappaletta. Puhaltimen kehyksessä on puolestaan samassa kohtaa alatuesta katsottuna kaksi 12 mm reikää. Näin ollen puhaltimen kehikko saadaan pultattua kiinni tasapainotuspenkkiin. Lisäksi alatuessa on hahlo keskellä, jotta puhallinkokonaisuus on helpompi kohdentaa paikalleen. Kuviossa 9 voidaan nähdä alatuki ja siinä olevat kiinnityspisteet. Tasapainotuspenkin käytöstä on laadittu käyttöohjeet, jotka löytyvät liitteestä 14.



Kuvio 9. Alatuki

Kun puhallin on kiinnitetty alatukeen, niin voidaan sen jälkeen kiinnittää sivuilta. Kummallakin sivulla on kaksi kiinnityspistettä. Kiinnityspisteet toimivat siten, että niissä oleva ruuvi kiristetään vasten puhaltimen kehyksessä. Ruuvi on kooltaan M16. Kuviossa 10 on esitetty tasapainotuspenkin sivukiinnitys.



Kuvio 10. Sivukiinnitys

Tasapainotuspenkissä on kaksi kiinnityspistettä myös puhaltimen yläosalle. Periaatteena yläkiinnityksessä on sama kuin sivukiinnityksessä eli ruuvi kiristetään vasten puhaltimen kehikkoa. Yläkiinnityspisteet ovat irrottavissa tasapainotuspenkistä ruuviliitosten avulla, koska tämä helpottaa puhaltimen asentamista tasapainotuspenkkiin. Kuvio 11 voidaan nähdä yläkiinnike.



Kuvio 11. Yläkiinnike

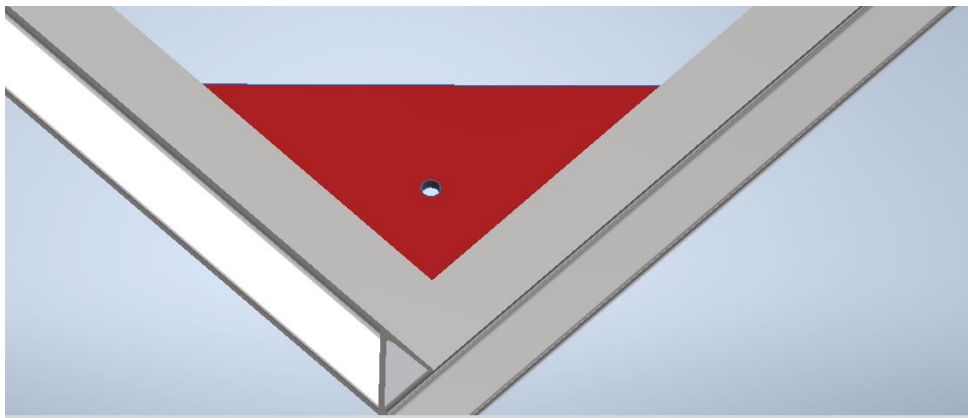
Kaikkien näiden kiinnityspisteiden lisäksi tasapainotuspenkissä on vielä kaksi kiinnityspistettä puhaltimen yläosaan. Nämä niin sanotut lisäkiinnikkeet tukevat puhallintansa etupuolelta. Toimintaperiaatteena on tuttu menetelmä eli M16 ruuvi kiristetään

vasten puhaltimen kehikkoa. Etukiinnikkeet ovat myös irrotettavissa ruuviliitoksin tasapainotuspenkistä puhaltimen asennuksen helpottamiseksi. Kuviossa 12 on esitettyä etukiinnike.



Kuvio 12. Etukiinnike

Kun tasapainotuspenkkiä tarvitsee siirtää paikasta toiseen, niin onnistuu se kiinnittämällä nostosilmukat kolmiopaloihin. Kolmiopaloissa on reikä nostosilmukan kiinnittämistä varten. Tasapainotuspenkin jokaisessa kulmassa on kolmiopala, jotta nostotahtuma voitaisiin toteuttaa tasapainotuspenkin pysyessä vakaana. Kuviossa 13 on punaisella esitetty kolmiopala ja sen paikka tasapainotuspenkissä.



Kuvio 13. Kolmiopala

Tasapainotuspenkin ansiosta puhallinkokonaisuus voidaan tasapainottaa kerralla kuntoon. Tämä on paitsi myös nopeampi tapa, niin samalla myös paljon tarkempi ja luotettavampi tapa saada puhallin ja sen moottori tasapainoon. Tasapainotusprosessi oli ennen paljon monivaiheisempi ja sen myötä puhaltimia ei saatu kunnolla tasapainotettua. Ennen jouduttiin tasapainottamaan erikseen puhaltimen moottori ja puhaltimen siipipyörä. Tästä aiheutui epätarkkuutta tasapainotuksen suhteen. Vanhan menetelmän mukaan värähtelytasot nousivat korkeammiksi kuivauskoneen kuivauskaapissa. Tämä on erityisen huono asia prosessin toiminnan kannalta. Kuivauskaappi on suunniteltu tietyn suuruisille värähtelyille ja mikäli nämä värähtelyt ylitetään, niin kuivauskaappi saattaa vaurioitua, mistä taas seuraa isot kustannukset Metsä Fibrelle.

5.3 FEM-analyysit

Tasapainotuspenkkiin suoritettiin tarvittavat lujuus- ja värähtelytarkastelut FEM:iä apuna käyttäen. FEM-ohjelmana käytettiin Ansysia, josta löytyy monipuolisesti työkaluja lujuuksien ja värähtelyiden tarkasteluun. Tulosten luotettavuuden takaamiseksi FEM-tarkastelut suoritettiin useampaan kertaan, jotta voitiin varmistua tuloksista.

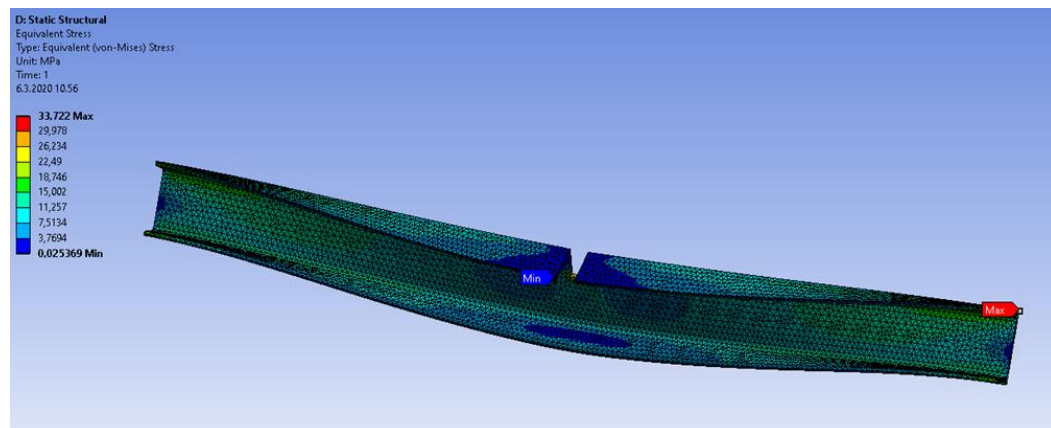
5.3.1 Tasapainotuspenkin rasitukset ja muodonmuutokset

FEM-analyysi tuli suorittaa useampaan osaan tasapainotuspenkissä. Tarkastelun kohteina olivat alatuki, kolmiopalat ja kokonaisuuden tarkastelu. FEM-tarkasteluissa keskityttiin kuormitusten alla ilmeneviin rasituksiin ja niistä aiheutuviin muodonmuutoksiin. FEM-analyysi suoritettiin niihin osiin, joihin on kuviteltu esiintyvän eniten rasituksia. FEM-analyysin jälkeen laskettiin myös varmuusluvut. Varmuusluku lasketaan siten, että myötölujuus jaetaan maksimijännityksellä.

Alatuki joutuu kantamaan koko puhallinkokonaisuuden massan, mikä on noin 300 kg. Kyseinen massa jakautuu tasaisesti alatuen päälle. Kuitenkin FEM-analyysissä käytettiin kuormana 500 kg eli 5000 N, koska haluttiin varmistaa alatuen kesto. Kuviosta 14

voidaan nähdä 5000 N aiheuttamat rasitukset alatukeen. Alatuen materiaali on S355JR, jolloin sen myötölujuus on 355 MPa. Alatuki on tuettu kummastakin päästä kiinteästi kiinni, mutta pohjaa ei ole tuettu maahan kiinni kuten se todellisuudessa olisi. Tämä lähinnä sen takia, että nähdään miten alatuki käyttäytyisi, mikäli se jostain syystä ei ottaisi maahan kiinni puhaltimen ollessa kiinnitettynä. Kyseessä siis hieman karrikoitu tilanne.

Maksimi rasituksena voidaan pitää 32 MPa, koska kuvassa esiintyvä 33,7 MPa on vain pieni piikki, mikä voidaan jättää huomioimatta. Varmuuskerroin on kyseisellä 32 MPa rasituksella 11,1 eli rakenne kestää varmasti sille asetetun kuorman. Rasituksen tulokset on saatu käyttämällä verkkoa, joka on kooltaan 10 mm vakion 80 mm sijasta.



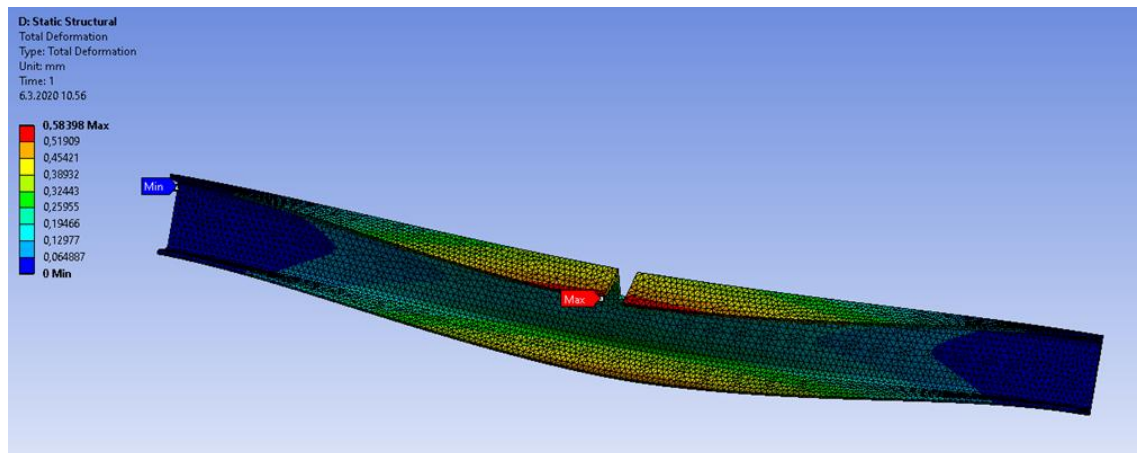
Kuvio 14. Alatuen rasitukset

Alatukeen tehtiin lisäksi analyttinen tarkastelu. Kaava kyseiseen tarkasteluun löytyi Tekniikan taulukkokirjasta (Valtanen 323, 2016). Maksimijännitys saatiin laskettua maksimimomentin kautta. Maksimimomentti kohdistui alatuen päihin eli kiinnityspisteisiin laskennan perusteella. Tämän jälkeen maksimimomentti kerrottiin neutraaliakselin etäisyydellä reunasta ja jaettiin jäyhyysmomentilla. Tällöin saatiin maksimijännitykseksi 34 MPa. Taulukossa 4 on esitettyä laskun lähtötiedot, vaiheet ja vastaus. Kuormana oli sama kuin FEM-laskennassa eli 5000 N tasaisesti jakautuneena pitkin alatukea. Tuennat olivat myös samat kuin FEM-laskennassa.

Taulukko 4. Alatuon maksimijännitys analyyttisesti

$l=1700 \text{ mm}$
$q=(5000\text{N}/1700\text{mm})=2,941 \text{ N/mm}$
$I=0,627 \times 10^6 \text{ mm}^4$
$M_F=(ql^2)/24=354\,145 \text{ Nmm}$
$M_a=M_B=-(ql^2)/12=-708\,290 \text{ Nmm}$
$G=M_a Z/I=34 \text{ Mpa}$

Muodonmuutokset jäivät vähäiseksi alatuessa. Maksimimuodonmuutos oli vain 0,6 mm 5000 N kuormalla. Kuorman suuruus oli siis sama kuin rasituksen tarkastelussa. Muodonmuutosten tarkastelussa käytettiin samanlaista tuentaa kuin rasituksia tarkastellessa. Muodonmuutos ei ole suuri ja se on lisäksi elastista, koska myötörajaa ei ole ylitetty. Verkon koko oli tässä tapauksessa samankokoinen kuin rasituksia tarkastellessa. Alatuon muodonmuutokset voidaan havaita kuviosta 15.



Kuvio 15. Alatuon muodonmuutokset

Myös alatuon maksimimuodonmuutosta tarkasteltiin analyyttisesti. Kaava maksimimuodonmuutokselle löytyi Tekniikan taulukkokirjasta (Valtanen 323, 2016). Maksimimuodonmuutokseksi saatiin 0,49 mm, joka on lähellä FEM-analyysin tulosta. Taulu-

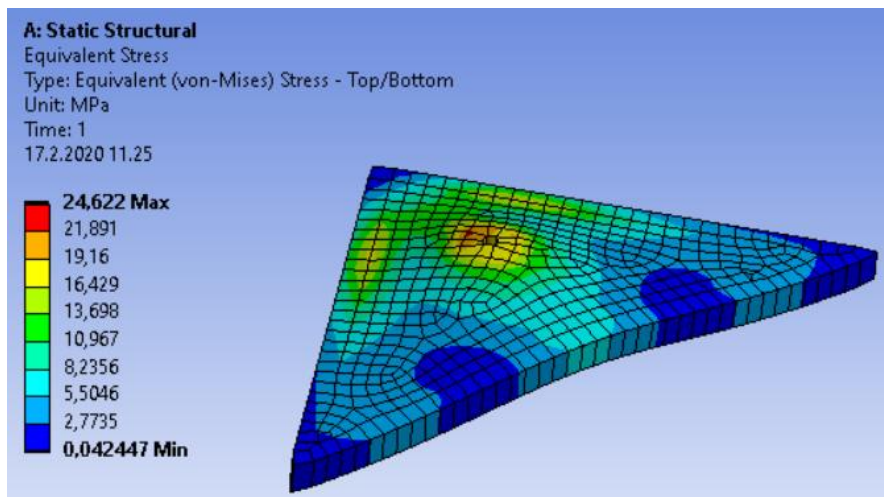
kossa 5 on esitetty lähtötiedot sekä laskun vaiheet. Analyttisessä laskennassa käytettiin samaa 5000 N kuormaa, joka oli jakautunut tasaisesti pitkin alatukea. Myös tuennat olivat samat kuin FEM-analyysissä.

Taulukko 5. Alatuken maksimimuodonmuutos analyttisesti

$l=1700 \text{ mm}$
$q=(5000\text{N}/1700\text{mm})=2,941 \text{ N/mm}$
$I=0,627 \times 10^6 \text{ mm}^4$
$E=210\,000 \text{ Mpa}$
$F_m = (ql^4)/(384EI)$
$F_m = 0,49 \text{ mm}$

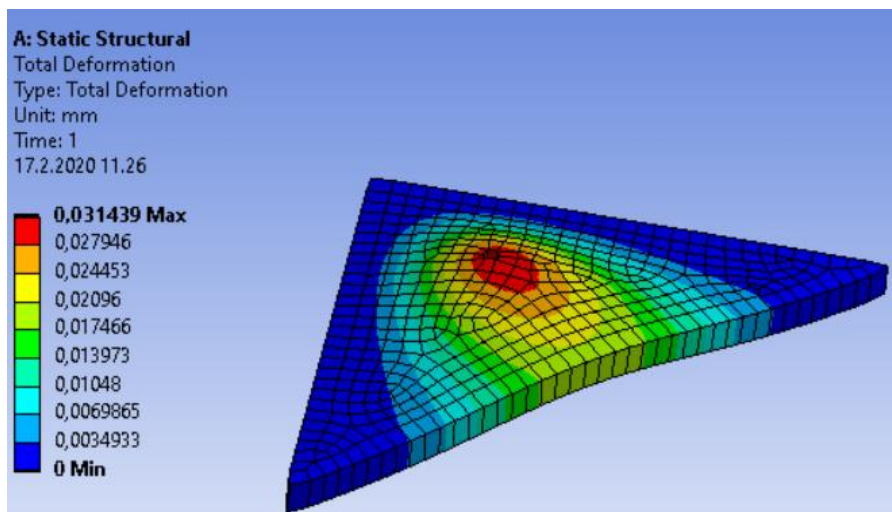
Kolmiopalojen tehtävä on kantaa koko tasapainotuspenkin rakenne ja puhaltimen massa sitä nostettaessa. Kolmiopaloihin siis kiinnitetään nostosilmukat, jolloin systeemi voidaan nostaa ja siirtää tarpeen mukaan. Kolmiopaloja on neljä kappaletta ja ne ovat hitsattu kiinni jokaiseen tasapainotuspenkin kulmaan. Itse tasapainotuspenkin massa on noin 307 kg ja puhaltimen massa 300 kg eli yhteensä tämä kokonaisuus on massaltaan noin 607 kg. Tällöin jokaisen kolmiopalan pitäisi pystyä kestäämään noin 152 kg. Tarkastelu suoritettiin siis 1520 N suuruisella kuormalla. Tuennat on määritetty siten, että ne ovat kuin tositilanteessa eli kolmiopala on hitsattu kiinni kahdelta sivulta. Tarkastelussa kolmiopala oli esitetty pintamallina, jolloin saadaan tässä tapauksessa luotettavampia tuloksia.

Kolmiopalaan muodostuva suurin rasitus on noin 24 MPa. Tätä ei kuitenkaan tule huomioida, koska kyseessä on vain yksittäinen jännityspiikki. Haarukoimalla hieman rasituksia voidaan todeta rasituksen olevan noin 21 MPa. Rasitukset jäävät siis todella pieniksi, kun verrataan niitä materiaalin myötörajaan. Kolmiopalan materiaali on S355JR ja näin ollen varmuuskertoimeksi saadaan laskemalla 16,9. Lisäksi voidaan todeta, että kolmiopalat kestävät vaikka itse puhallin olisi kiinni noston aikana. Kuviosta 16 voidaan nähdä rasitusten suuruudet.



Kuvio 16. Kolmiopalan rasiukset

Rasitusten lisäksi myös muodonmuutokset kiinnostivat. Muodonmuutokset samalla kuormalla olivat kolmiopaloissa todella mitättömiä. Maksimimuodonmuutos oli noin 0,03 mm ja kyseinen muodonmuutos on elastista. Eli ei ole syytä huoleen muodonmuutosten suhteen. Kuviossa 17 on esitettyä muodonmuutokset 1520 N kuormalla.

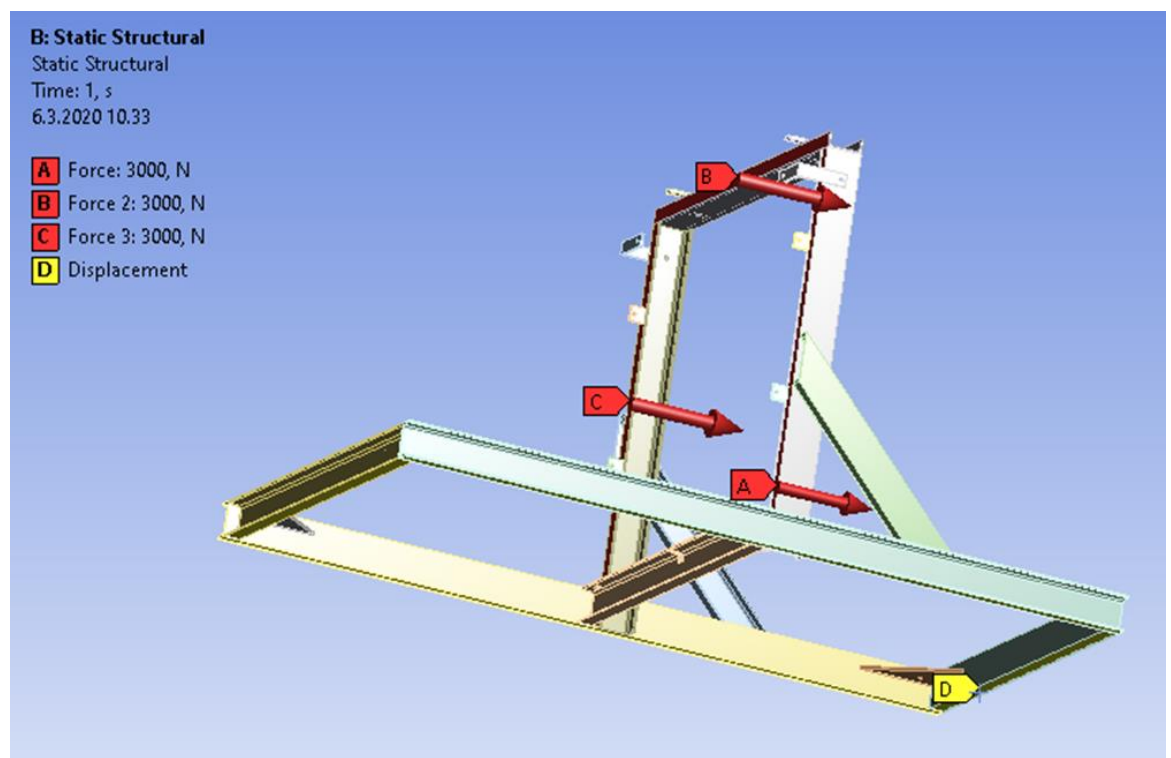


Kuvio 17. Kolmiopalan muodonmuutokset

Kokonaisuus tarkastelussa tarkasteltiin koko tasapainotuspenkin rakennetta ja siihen syntyviä rasituksia ja muodonmuutoksia kuormitusten alla. Tasapainotuspenkkiin

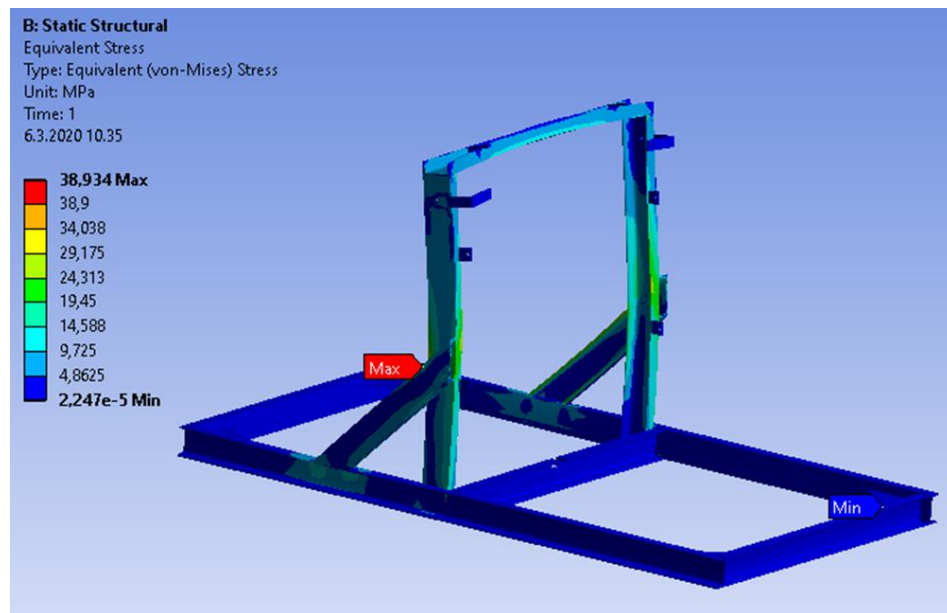
kohdistuvat voimat valikoituivat siten, että kuviteltiin tilanne, missä esimerkiksi nosturi tönäisee tasapainotuspenkkiä. Toinen tilanne on tietenkin itse tasapainotustilanne, jossa puhallin aiheuttaa työntävän voiman kohti kehikkoa, mutta puhaltimen aiheuttama työntövoima on varmasti pienempi kuin esimerkiksi nosturin tönäisy.

FEM-analyysissä kohdistuvat kuormat ovat siis, että yläpalkkiin kohdistuu 300 kg tönäisevä eli noin 3000 N suuruinen voima. Lisäksi tönäisevä kuorma kohdistuu myös pystyssä oleviin palkkeihin, mitkä kannattelevat yläpalkkia. Näihin kannatteleviin palkkeihin kohdistuu myös kumpaakin 3000 N suuruinen voima. Voiman suunta FEM-analyysissä on puhaltimen asennussuunnasta, eli tällöin tasapainotuspenkkiä ovat takana tukemassa U-palkit 45° kulmassa. Kuviossa 18 on havainnollistettu voimien paikat. Kukaan voima on suuruudeltaan 3000 N. Lisäksi kuviosta 18 voidaan nähdä myös tasapainotuspenkin tuennat. Tuennat olivat toteutettu siten, että tasapainotuspenkki oli tuettuna neljästä palkista kiinni lattiaan. Tämän tuennan käyttäminen on perusteltua, koska halutaan varmistua siitä, että tasapainotuspenkki pysyy paikallaan tasapainotuksen aikana häiriötilanteidenkin aikana.



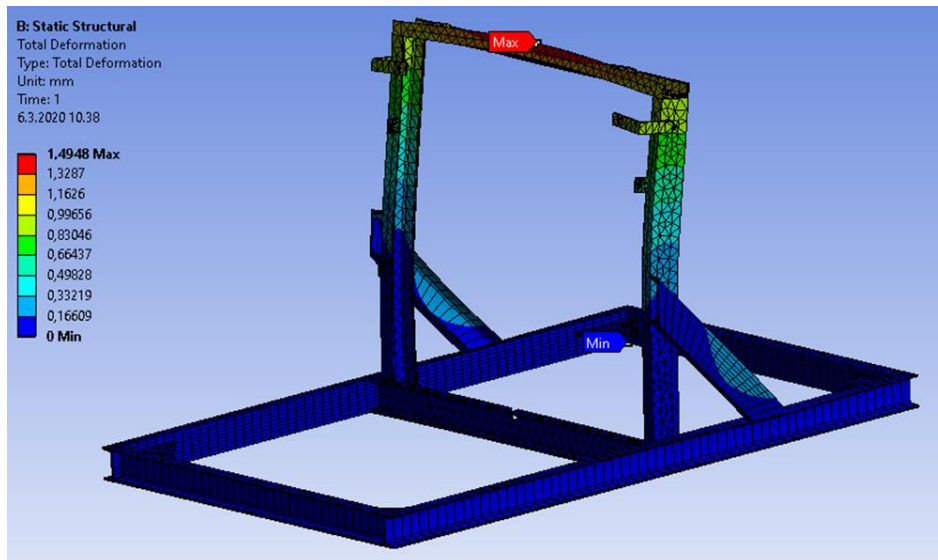
Kuvio 18. Tasapainotuspenkkiin kohdistuvat voimat ja tuennat

Maksimijännitys on noin 37 MPa ja se näyttää kohdistuvan tasapainotuspenkin tukirautoihin, jotka ovat 45° kulmassa. Tarkastelussa esiintyi myös yksittäinen jännitys-piikki 39 MPa, joka voidaan sivuuttaa, koska se on vain pieni piste. Jos tarkastellaan tasapainopenkin rakennetta muuten, voidaan huomata noin 20 MPa suuruisia rasituksia eripuolella tasapainotuspenkkiä. Tasapainotuspenkki siis kestää edellä mainitut siihen kohdistuvat voimat. Varmuusluvaksi muodostuu noin 9,6, kun se lasketaan käyttäen 37 MPa:n suuruista jännitystä. Jännitys jakauma tasapainotuspenkissä voidaan hahmottaa kuviosta 19.



Kuvio 19. Tasapainotuspenkin rasitukset

Muodonmuutoksia puolestaan tarkastellessa voidaan huomata suurimman muodonmuutoksen olevan yläpalkissa. Yläpalkissa maksimimuodonmuutos on noin 1,5 mm edellä mainituilla mahdollisen nosturin tönäisyn aiheuttamilla voimilla. Kyseinen muodonmuutos on elastista, eikä se ole suuruudeltaan kovinkaan iso. Kuviosta 20 voidaan nähdä miten muodonmuutokset ovat jakautuneena.



Kuvio 20. Tasapainotuspenkin muodonmuutokset

Lujuustarkasteluista ilmenneet varmuusluvut ovat suuria. Se ei kuitenkaan välttämättä takaa sitä, että rakenne kestäisi värähtelystä aiheutuvat rasitukset. Tasapainotuspenkin rakenne on painava, koska materiaalia on paljon tällöin myös varmuusluvut ovat sen mukaiset.

5.3.2 Tasapainotuspenkin värähtelyt

Tasapainotuspenkin värähtely itse tasapainotuksen aikana on olennainen osa tasapainotusprosessin onnistumisesta. Tasapainotuspenkin ominaistaajuus ei saa olla sama kuin puhaltimen pyörimisen taajuus. Mikäli näin on, niin vaarana on resonanssi värähtely. Tasapainotuspenkin värähtelyitä tarkasteltaessa piti tarkastella itse teräsraakenteen värähtelyitä sekä myös värähtelyitä, kun puhallin on kiinnitettynä tasapainotuspenkkiin. Puhaltimen ollessa kiinni tasapainotuspenkissä sen rakenteen jäykkyys yms. muuttuvat, jolloin on syytä tarkastella myös värähtelyt uudelleen. Värähtely tarkasteluissa käytettiin samanlaista tuentaa kummassakin tarkastelu tapauksessa. Tuenta kuvasi todellista tasapainotuspenkin käyttötilannetta, jossa tasapainotuspenkki

olisi tuettuna maahan sen jokaiselta sivultaan. Tuenta oli siis värähtelytarkasteluissa sama kuin rasituksia ja muodonmuutoksia tarkastellessa.

Tarkasteltaessa pelkän tasapainotuspenkin ominaistajuuksia kriittiseksi ja varteen otettavaksi kipupisteeksi löytyi kierrosnopeus 1049 rpm. Eli tulos osoittaa sen, mikäli puhallin pyörisi 1049 rpm, niin tasapainotuspenkki alkaisi resonoimaan. Taulukosta 6 voidaan nähdä kriittiset taajuudet itse tasapainotuspenkin suhteen. Edellä mainittu pyörimisnopeus ei sinänsä vaikuta kriittisesti, koska puhaltimet tasapainotetaan niiden pyöriessä 1700 rpm. Tarkkaillessa tasapainotustilannetta prototyypin kautta huomattiin kuitenkin, ettei 1049 rpm aiheuttanut mitään suurempia piikkejä värähtelyihin. Tähän siis vaikuttaa puhallin kokonaisuuden massa vasten tasapainotuspenkkiä. Eli tällöin tarvitaan toinen tarkastelu lisäksi, jos halutaan selvittää kriittiset pyörimisnopeudet tasapainotuspenkin toiminnan kannalta.

Taulukko 6. Tasapainotuspenkin ominaistajuuudet

	Mode	Frequency [Hz]
1	1,	17,482
2	2,	50,318
3	3,	61,94
4	4,	74,731
5	5,	80,235
6	6,	96,173

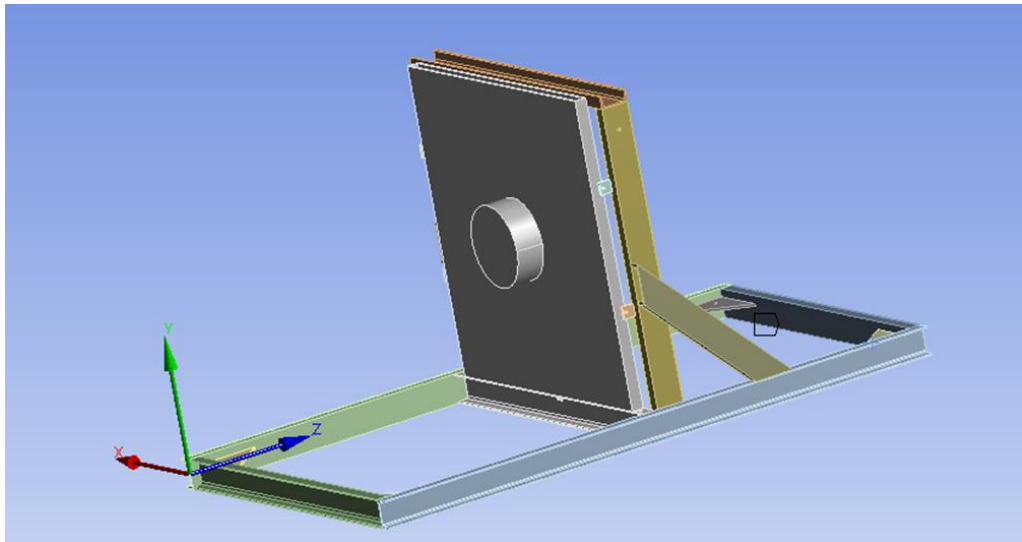
Tämän toisen tarkastelun ideana oli kiinnittää puhallin tasapainotuspenkkiin. Tasapainotuspenkistä ja puhaltimesta oli luotuna 3D-mallit, joten tämä kävi sittemmin vain istuttamalla puhallin tasapainotuspenkkiin. Tästä yhteisestä 3D-mallista tehtiin STEP-tiedosto, jota voitiin hyödyntää ansyksen laskennassa. Tasapainotuspenkin ja puhaltimen massat ja rakenteet vastasivat todellisuutta. Tosin puhaltimen rakennetta yksinkertaistettiin hieman, jotta tulokset saataisiin laskettua ja myös puhaltimen kiinnitystä tasapainotuspenkkiin piti hieman yksinkertaistaa ruuviliitosten sijaan. Pääpointtina oli kuitenkin pitää, että niin tasapainotuspenkin kuin puhaltimenkin massat olisivat totuuden mukaiset. Tuennat oli toteutettu samalla tavalla kuin edellisessä värähtelytarkastelussa. Kuviossa 21 on esitetty tasapainotuspenkin ja puhaltimen värähtelytarkastelussa käytetty malli.

Värähtelytarkastelun jälkeen kävi ilmi, etteivät ominaistajuudet osuneet liian lähelle puhaltimen suunniteltua pyörimisnopeutta. Kyseiset ominaistajuudet sijoittuivat 227-2687 rpm, mikä voidaan todeta taulukosta 7. Neljännen asteen ominaistajuus on kaikkein lähimpänä puhaltimen pyörimisnopeutta, mutta tämäkään ei ole haitallinen, koska kyseinen ominaistajuus on 1836 rpm kierrosnopeudella. 1836 rpm on kuitenkin lähempänä puhaltimen pyörimisnopeutta kuin itse tasapainotuspenkin 1049 rpm kohdalla sijaitseva ominaistajuus. Värähtelytarkastelussa ilmeni kuitenkin, että suurimmat värähtelystä aiheutuvat muodonmuutokset kohdistuisivat itse puhaltimeen.

Tasapainotuspenkki toimii siis hyvin osana tasapainotusprosessia ilman, että se aiheuttaisi haittaa tasapainottamiselle. Käytännön testaamisessa kokeiltiin tasapainotuspenkin prototyyppiä ja mitään silmin nähtäviä värähtelyitä tai muodonmuutoksia ei näkynyt. Tasapainotuspenkin prototyypille tehtiin myös ylösajo mittausta puhaltimen ollessa kiinni. Ylösajolla pystytään löytämään systeemin ominaistajuudet ja niiden värähtelyt. Mitään hälyttävää ei kuitenkaan löytynyt ylösajossa, joten tämä varmisti tasapainotuspenkin toiminnan sille suunnitellussa tehtävässä.

Taulukko 7. Tasapainotuspenkin sekä puhaltimen ominaistajuudet

	Mode	<input checked="" type="checkbox"/> Frequency [Hz]
1	1,	3,7983
2	2,	18,473
3	3,	23,796
4	4,	30,595
5	5,	34,557
6	6,	44,791



Kuvio 21. Tasapainotuspenkin ja puhaltimen värähtelyt

5.4 Turvallisuus

Turvallisuus oli olennainen osa tätä opinnäytetyötä. Tämän työn perusteella tasapainotuspenkistä saatiin toimiva ja käyttökelpoinen kokonaisuus, mikä on myös turvallinen käyttää. Tasapainopenkin käyttöprosessista laadittiin riskianalyysi SFS EN 12100 standardin mukaisesti. SFS EN 12100 standardin kaavakkeen avulla tunnistettiin riskit ja näin ollen saatiin kehitettyä myös toimenpiteitä riskien pienentämiseksi. Riski on käsitteenä todennäköisyys kerrottuna vakavuudella. Lähtökohtaisesti aina voidaan puuttua vähintään jompaankumpaan riskien pienentämiseksi. Liitteissä 11 ja 12 on valmistuskuvat tasapainotuspenkin suoja-aidoista sekä riskianalyysi liitteessä 13.

SFS EN 12100 standardin mukaisen riskianalyysi kaavakkeen täyttäminen alkaa vaaratekijöiden tunnistamisella. Vaaratekijöiden tunnistamisen jälkeen kirjataan mahdollinen tilanne, joka voisi tapahtua. Tämän jälkeen arvioidaan riskin kannalta oleelliset asiat eli esiintyminen ja vakavuus. Kaavakkeessa esiintyminen kerrotaan vakavuudella ja siitä saadaan riskin suuruus. Riskin suuruus määrittelee sen, että tarvitaanko jatkotoimenpiteitä. Kaavakkeessa on kullekin riskille jatkotoimenpide kohta, johon kirjataan riskiä pienentävät toimenpiteet. Toimenpiteiden määrittämisen jälkeen arvioidaan niin sanottu jäännösriski.

Taulukossa 8 on esitettyinä jäännösriskin arvot asteikoittain. 0,1-5,0 suuruisella riskeillä ei tarvita toimenpiteitä. 6-15 suuruisilla riskeillä tarvitaan valvontaa ja seuranta, mutta ei konkreettisia toimenpiteitä. 16-29 suuruisille riskeille on ryhdyttävä toimenpiteisiin määräajassa. Lisäksi tarvitaan myös tehokasta valvontaa. 29-48 suuruisille riskeillä työtä ei saa aloittaa ennen kuin riskejä on pienennetty. Korjaus toimenpiteisiin on alettava välittömästi. 49-100 suuruisilla riskeillä työtä ei saa aloittaa ja työn tekemiselle on asetettava pysyvä kielto ennen kuin riskit on saatu laskettua so-pivalle tasolle.

Taulukko 8. Jäännösriskin arvot

Jäännösriskin arvot:
0,1...5,0 Vähäinen
6...15 Siedettävä
16...29 Kohtalainen
29...48 Merkittävä
49...100 Sietämätön

Hyvin laadittua riskianalyysiä voidaan käyttää hyväksi monissa eri tilanteissa, kuten lainsäädännössä edellytettyjen selvitysten osana. Pohja hyvällä riskianalyysille luodaan jo sitä suunnitellessa. Riskianalyysin valmistelutyöt on syytä tehdä kunnolla, jotta saadaan paras mahdollinen tulos. Hyvän riskianalyysin tunnuspiirteitä ovat: tavoitteen määrittely, kohteen rajaus, oikeat menetelmät, lähtötietojen laatu, vetäjän pätevyys, resurssien varaus, dokumentointi, tulosten ja toteutuksen tavoitteen mukaisuus sekä niistä viestintä. (Heikkilä, Murtonen, Nissilä & Virolainen 2007, 8-9.)

Riskianalyysi suoritettiin samalla, kun tasapainotuspenkin prototyyppiä kokeiltiin puhaltimen tasapainotukseen. Riskianalyysin laadinta prototyyppiä testattaessa oli antoisempaa, kun voitiin nähdä tasapainotuspenkki oikeassa toiminnassaan. Suurimpia riskejä olivat puhaltimen aiheuttama iso ilmavirta ja puhaltimen siipien pyöriminen. Tasapainotuspenkkiin suunniteltiin myös turva-aidat, koska muutenhan se olisi hengenvaarallinen. Riskianalyysissa on tietenkin myös huomioitava myös mahdolliset laitteen vikaantumiset. Vikatilanteet aiheuttavat varmasti kaikista suurimman riskin. Esimerkiksi mikäli puhaltimen moottorin sähkömoottorin laakerointi pettää ja puhaltimen siipipyörä alkaa sakkaamaan voi kyseessä olla varsin kohtalokas vahinko.

5.5 Pintakäsittely

Tasapainotuspenkin materiaalina on S355JR, joten se alkaa ruostumaan ilman pintakäsittelyä. Tasapainotuspenkkiä käytetään pääosin teollisuushallissa, missä olosuhteet voivat olla prosessin mukaan laidasta laitaan. Pintakäsittelyn tehtävänä on suojata tasapainotuspenkkien ympäristön vaikutuksilta. Hyvä pintakäsittely tarjoaa tasapainotuspenkille pitkän käyttöiän. Suurimpana ongelmana lienee korroosion torjunta. Tasapainotuspenkin sijoitusympäristö saattaa olla siis korroosioaktiivinen ympäristö. Nämä seikat on otettava huomioon valittaessa oikeanlaista maalia tasapainotuspenkille.

Ennen pintakäsittelyn aloittamista on käsiteltävät pinnat puhdistettava huolellisesti ruosteesta, rasvasta ja liasta. Nämä voidaan poistaa pinnalta käyttämällä mekaanisia tai kemiallisia toimenpiteitä. Mekaanisia puhdistusmenetelmiä on esimerkiksi teräs- harjaus ja kemiallisia on puolestaan esimerkiksi liuottimien käyttäminen. Näiden menetelmien yhdistäminen on kuitenkin tehokkain tapa saada käsiteltävät pinnat puhtaksi. (Korroosionestomaalauksen käsikirja 2013, 18.)

Tikkurilan sivuilla on kattava pintakäsittelyn valinta palvelu. Täytyy vain tietää, että millaisissa olosuhteissa maalattavaa kohdetta käytetään. Olosuhteiksi määritettiin korroosioaktiivinen ympäristö, koska sijoitus kohteessa voi esiintyä mahdollisia höhkähöyryjä, jotka aiheuttavat lisää vaatimuksia maalin kestolle. Myös mahdollisia lämpötila vaihteluita voi esiintyä. Maaliksi valikoitui tikkurilan maali numero 45405 (kuvio 22). Kyseinen maali tarjoaa juuri oikeanlaisen suojan tasapainotuspenkille korroosiota ja ympäristön rasituksia vastaan.

45405	454 Peltikattojen ja metallipintojen 2-komponenttiset liuoteohenteiset maalit RL 11...14	12	Pu2	P	2,3,4
-----------------------	------------------------------------------------------------------------------------------	----	-----	---	-------

Kuvio 22. Maalin valinta

6 Johtopäätökset ja pohdinta

Opinnäytetyön tulokset vastasivat hyvin toimeksiantajan vaatimuksia. Vaatimuksina oli suunnitella toimiva tasapainotuspenkki, mikä toimii turvallisesti. Lisäksi tuli myös selvittää, että millainen itse tasapainotus ympäristön pitäisi olla. Opinnäytetyö tarjoaa toimeksiantajalle kokonaisvaltaisen paketin tasapainotuksen suorittamiseen. Toimeksiantaja voi nyt tehdä itselleen uuden aluevaltauksen ja alkaa suorittamaan tasapainotusta. Tämä lisää toimeksiantajan merkitystä asiakkaan näkökulmasta katsottuna.

Suunnitteluprosessi opinnäytetyössä sujui hyvin. Suunnitteluprosessin kulmakivenä toimi teoriapohja, jolla on perusteltu kaikki opinnäytetyössä tehdyt valinnat. Suunnitteluprosessissa hyödynnettiin innovointimenetelmiä sekä hyväksi todettua painopistearviointia. Suunnitteluprosessiin panostamalla saatiin merkittäviä hyötyjä tasapainotuspenkin onnistumisen kannalta.

Tasapainopenkille on myös katsottuna sijoituspaikka valmiiksi, missä sitä voidaan käyttää. Tasapainotuspenkistä valmistettiin myös prototyyppi. Prototyypin käyttäjiä haastateltiin ja heidän mielestään se toimii, kuten pitääkin. Tasapainopenkki ei resonoi puhaltimia tasapainottaessa ja puhaltimien kiinnitys ja pois ottaminen onnistuu käyttäjien mukaan helposti. Käyttäjät kritisoivat ainoastaan, että kiinnityspisteitä on liian monta. Mutta jos ajatellaan tilannetta, jossa esimerkiksi puhaltimen moottorin laakerointi pettää ja puhaltimen siipipyörä alkaa sakkaamaan voimakkaasti, niin tällöin kaikki kiinnityspisteet ovat varmasti hyödyllisiä. Tässä tapauksessa kiinnityspisteet voivat olla todella ratkaisevassa asemassa henkilöiden turvallisuuden suhteen. Suunnittelussa on aina tärkeä varautua pahimpaan, eikä suunnitella vain peruskäyttöä tuotteille.

Opinnäytetyön perusteella suunniteltu tasapainotuspenkki on lujuus- ja värähtelytarkasteluiden suhteen onnistunut prosessi. Opinnäytetyössä hyödynnettiin myös analyttistä laskentaa. Analyttisellä laskennalla päästiin lähes samoihin tuloksiin kuin FEM-analyysilla. Prototyypin testaus tositilanteessa lienee kuitenkin kaikista merkittävien opinnäytetyön luotettavuutta lisäävä kohde. Tasapainotuspenkin prototyypille

tehtiin ylösajomittaus, joka voitiin todeta onnistuneeksi kokeiluksi värähtelyjen osalta.

Pohdittaessa opinnäytetyön luotettavuutta on tarkasteltava käytettyjä lähteitä, teoriaa ja menetelmiä. Lähteissä olisi voinut olla enemmän ulkomaisia lähteitä. Opinnäytetyössä lähdekritiikki oli läsnä koko ajan aineistonkeruussa. Teoriassa on huomioituna kaikki oleelliset asiat tasapainotuspenkin suunnittelun onnistumiseen. Hyvän tutkimuksen tunnuspiirteitä ovat reliabiliteetti ja validiteetti ja ne varmasti toteutuvat opinnäytetyössä esimerkiksi FEM-analyysien osalta.

Lähteet

Aaltonen, H. 2020. Machine & laser technology oy. myynti- ja mittausinsinööri. Haastattelu 17.01.2020.

Botnia Mill Service. N.d. Caverion kotisivut. Viitattu 13.01.2020. <https://www.caverion.fi/tietoa-caverionista/liiketoiminta-ja-palvelut/botnia-mill-service>

Ekaterina, S. 2017. Challenges of structural design of industrial buildings according to the USA regulations. Thesis. Saimaa University of Applied Sciences. Viitattu 12.03.2020. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/138595/Shadrina_Ekaterina.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Finite element analysis. N.d. Simscale. Viitattu 31.01.2020. <https://www.simscale.com/docs/content/simwiki/fea/whatisfea.html>

Halme, J. 2018. Aivorihi- toteutus ja peruseriaatteet. Innovaatio blogi Viitattu 22.01.2020. <https://info.orchideainnovations.com/innovaatio-blogi/aivorihi>

Heikkilä, A-M., Murtonen, M., Nissilä, M., Virolainen, K. 2007. Riskianalyysien laatu: vaatimukset tilaajalle ja toteuttajalle. VTT:n tutkimusraportti. Viitattu 22.01.2020. https://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2007/Tutkimusraportti_VTT_R_03718_07.pdf

Jäntti, M. 2017. Materiaali tutkimuksilla isoja säästöjä yrityksille. Uutinen Ylen sivuilta. Viitattu 30.01.2020. <https://yle.fi/uutiset/3-9519970>

Kaila, P. 2014. Muodonmuutosten ja jäännösjännitysten hallinta kuumennettaessa. Kandidaatintyö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Viitattu 24.01.2020. <https://lut-pub.lut.fi/bitstream/handle/10024/100135/Muodonmuutosten%20ja%20j%E4%E4nn%E4nnitysten%20hallinta%20kuumennettaessa.pdf;jsessionid=62D7EF32A081F34B69EB15A6FB>

Kallio, M. 2016. Värähtelymittaukset koneiden kunnonvalvonnassa. Opinnäytetyö. Seinäjoen ammattikorkeakoulu, automaatiotekniikka. Viitattu 04.02.2020. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/119353/Kallio_Matias.pdf;jsessionid=A265BCA0A57CD97D3CAD0B50E261E52C?sequence=1

Kiviluoma, R. 2010. Siltarakenteiden värähtelymitoitus värähtelymitoituksen periaatteet. Viitattu 24.01.2020. https://vayla.fi/documents/20473/64349/Kiviluoma_Siltarakenteiden_varahtelymitoitus.pdf/7566cccc-dddc-4344-a56f-4c986d74cf8b

Konedirektiivi. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2006/42/EY. Viitattu 02.03.2020. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/ALL/?uri=CELEX:32006L0042>, Konedirektiivi

Koneturvallisuus. 2008. Työsuojeluhallinto. Viitattu 02.03.2020. https://www.tyosuojelu.fi/documents/14660/2426906/Koneturvallisuus_tso_16-2009.pdf/6ae406a0-29fc-45fa-a4a6-19e38af399cc

- Korpela, J. N.d. Murto- ja myötölujuus. Mittayksiköt luku 9 mekaniikka. Julkaistu kirjoittajan omilla sivuilla. Viitattu 30.01.2020. <http://jkorpela.fi/yksikot/9.7.html>
- Korroosionestomaalauksen käsikirja. 2013. Teknos Oy. Viitattu 28.01.2020. https://www.teknos.com/globalassets/teknos.fi/teollisuuteen/downloads/fi_korroosionestomaalauksen_kasikirja_2013.pdf
- Leino, T. 2006. Tutkimusraportti. Staattisesti kuormitettujen hitsausliitosten suunnittelu. Opetusministeriö, ympäristöministeriö, teräsrakenneyhdistys ry. Tutkimusraportti. Viitattu 24.01.2020. https://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2006/HitsLiit-Suunn_19-7-2006.pdf
- Luonnollinen taajuus. N.d. Wikipedia. Viitattu 30.01.2020. https://fi.wikipedia.org/wiki/Luonnollinen_taajuus
- Lähtenmäki, M. N.d. Elementtimenetelmän perusteet. Julkaistu kirjoittajan omilla sivuilla. Viitattu 05.02.2020. https://mlahten.fi/arkistot/elpe_pdf/johdanto.pdf
- Niemelä, O. 2019. Harmonisen pystyherätteen kuormittaman maanvaraisen laiteperustuksen vasteen määrittäminen eri upotussyvyyksillä. Diplomityö. Tampereen yliopisto, rakennustekniikka. Viitattu 06.02.2020. <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/27692/Niemela.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- Piironen, T. 2013. Teräsrakenteiden suunnitteluohjeita parempaan valmistettävyyteen. Savonia-ammattikorkeakoulu. Viitattu 20.01.2020. <http://portal.savonia.fi/pdf/julkaisutoiminta/2013-hitnet-suunnittelijanopas.pdf>
- Rasitus. 2005. Tampereen teknillinen yliopisto. Viitattu 30.01.2020. http://www.tut.fi/vmv/2005/vmv_2_1_1.php
- Somelar, M. 2017. Värähtelevän teräsrakenteen suunnittelu. Opinnäytetyö, AMK. Satakunnan ammattikorkeakoulu, rakennustekniikan koulutusohjelma. Viitattu 22.01.2020. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/121943/Somelar_Maksim.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Sormunen, T. 2005. Statiikan peruskurssin oppimateriaali. Tutkintotyö. Tampereen ammattikorkeakoulu, rakennustekniikka. Viitattu 06.02.2020. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/9704/TMP.objres.34.pdf?sequence=2>
- Talja, A. 1996. VTT-tiedotteita. Teräsrunkoisten välipohjien värähtelyjen hallinta. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Viitattu 24.01.2020. <https://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/1996/T1790.pdf>
- Tasapainotuskoulutus. N.d. Machine & laser technology oy. Koulutusmateriaali. Yrityksen sisäinen koulutusmateriaali.

MaalausRYL 2012. Tikkurilan maalinvalintaopas. Viitattu 27.01.2020.
https://www.tikkurila.fi/ammattilaiset/ratkaisut/maalausryl_2012

Tuotteen kokonaissuunnittelu ja ideointi. N.d. Kajaanin ammattikorkeakoulu. Viitattu 05.02.2020. <https://www.kamk.fi/fi/opari/Opinnaytetyopakki/Teoreettinen-materiaali/Tukimateriaali/Tuotteistaminen/Tuotteen-kokonaissuunnittelu-ja-ideointi>

N.d. Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (TUKES). CE-merkintä. Viitattu 02.03.2020.
<https://tukes.fi/tuotteet-ja-palvelut/ce-merkinta>

Valtanen, E. 2016. Tekniikan taulukkokirja. Genesis-kirjat Oy. Viitattu 17.02.2020.

Värähdysliike on säännöllistä liikettä. N.d. Pedanet. Viitattu 04.02.2020.
<https://peda.net/valkeakoski/opetuspalvelut/pk/naakan-koulu/oppiaineet/fysiikka/fy-tervaniemi/efysiikka-722/aal>

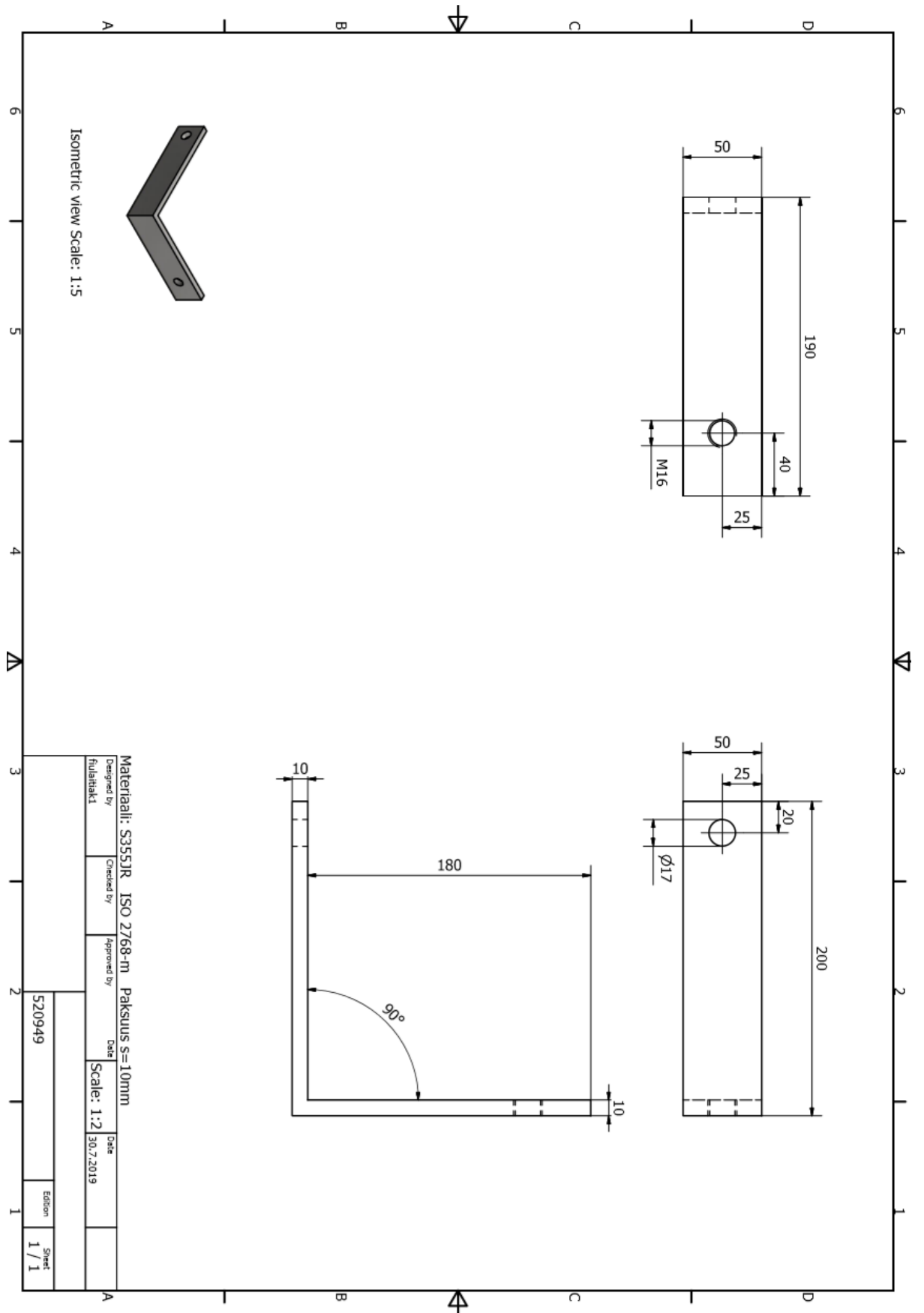
Värähtelymittausten perusteet. N.d. Machine & laser technology oy. Yrityksen sisäinen koulutusmateriaali.

Liitteet

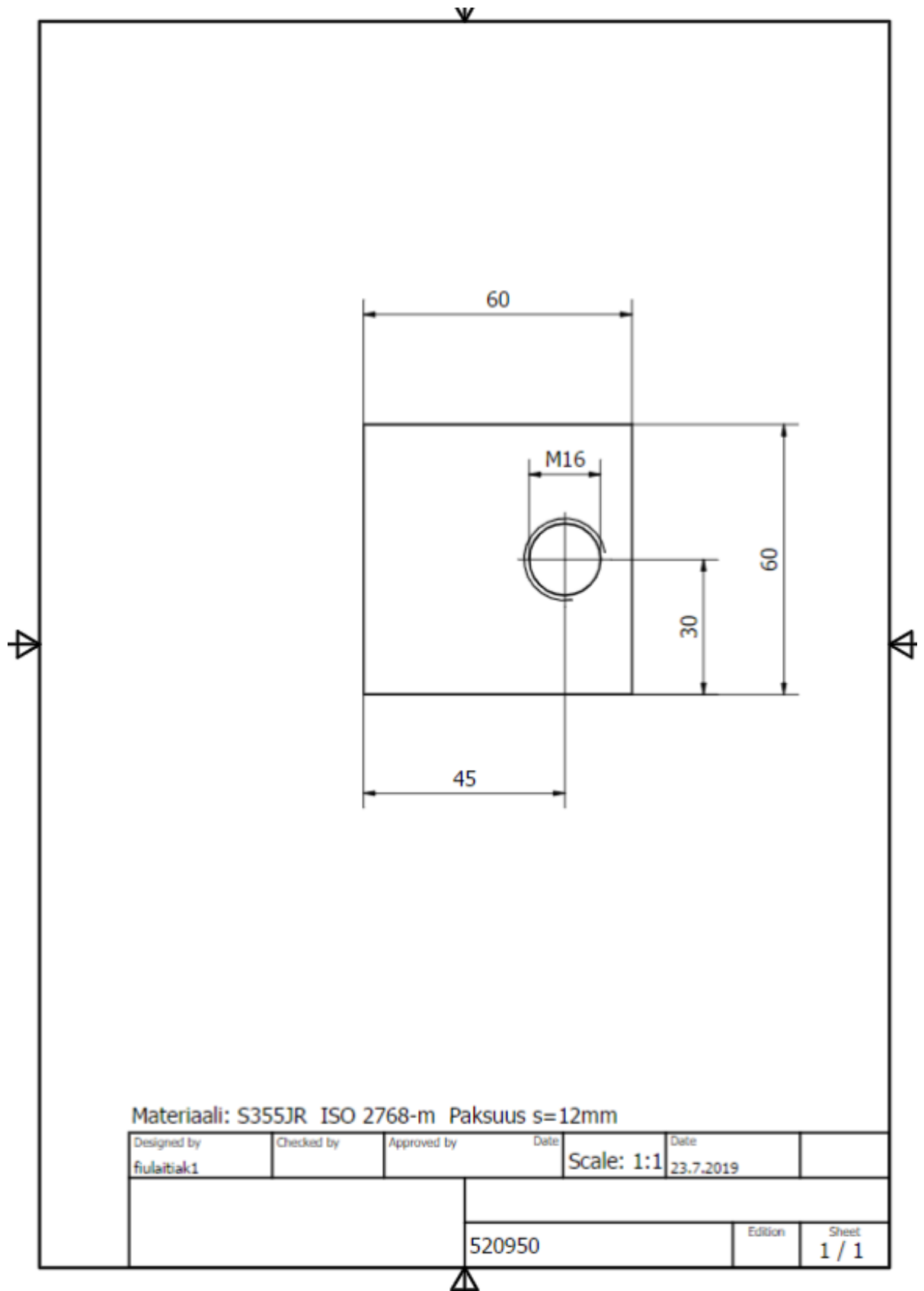
Liite 1. Vaatimuslista

Vaatimukset	KV	VV	T
1. Sijoituspaikka			
Nosturille tilaa	x		
Siisti ympäristö	x		
2. Tasapainotuspenkki			
Kantavuus 500kg		x	
Värähtelyiden huomiointi	x		
Liikuteltavuus	x		
Jäykkä rakenne	x		
3. Turvallisuus			
Riittävä tuenta	x		
Riskianalyysi	x		
Turva-aidat	x		
Turvallinen käyttö	x		
4. Geometria			
Leveys max 2000 (mm)		x	
Pituus max 4000 (mm)		x	
Korkeus max 1700 (mm)		x	
5. Asennus			
Kiinnitys lattiaan	x		

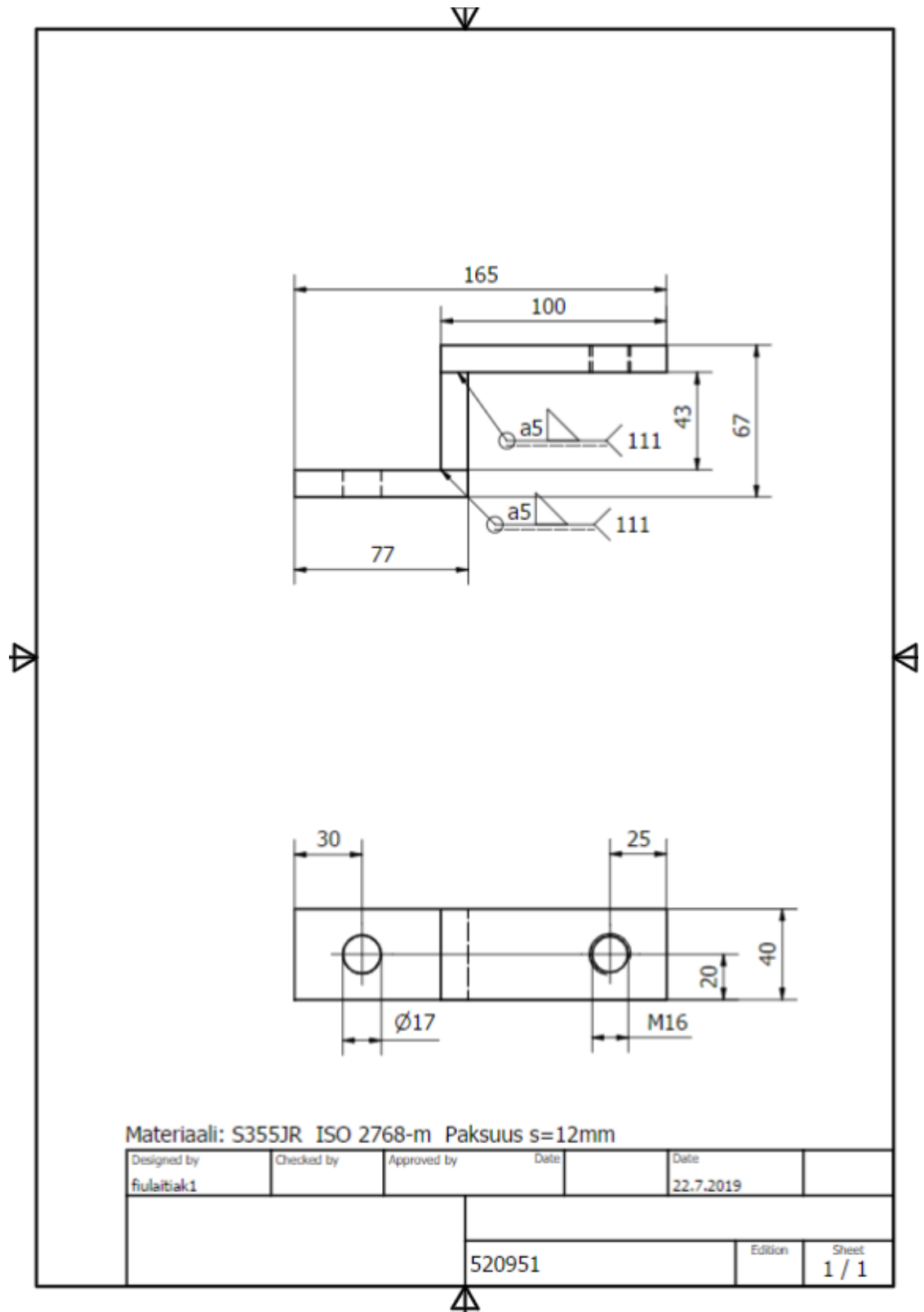
Liite 3. Etukiinnike



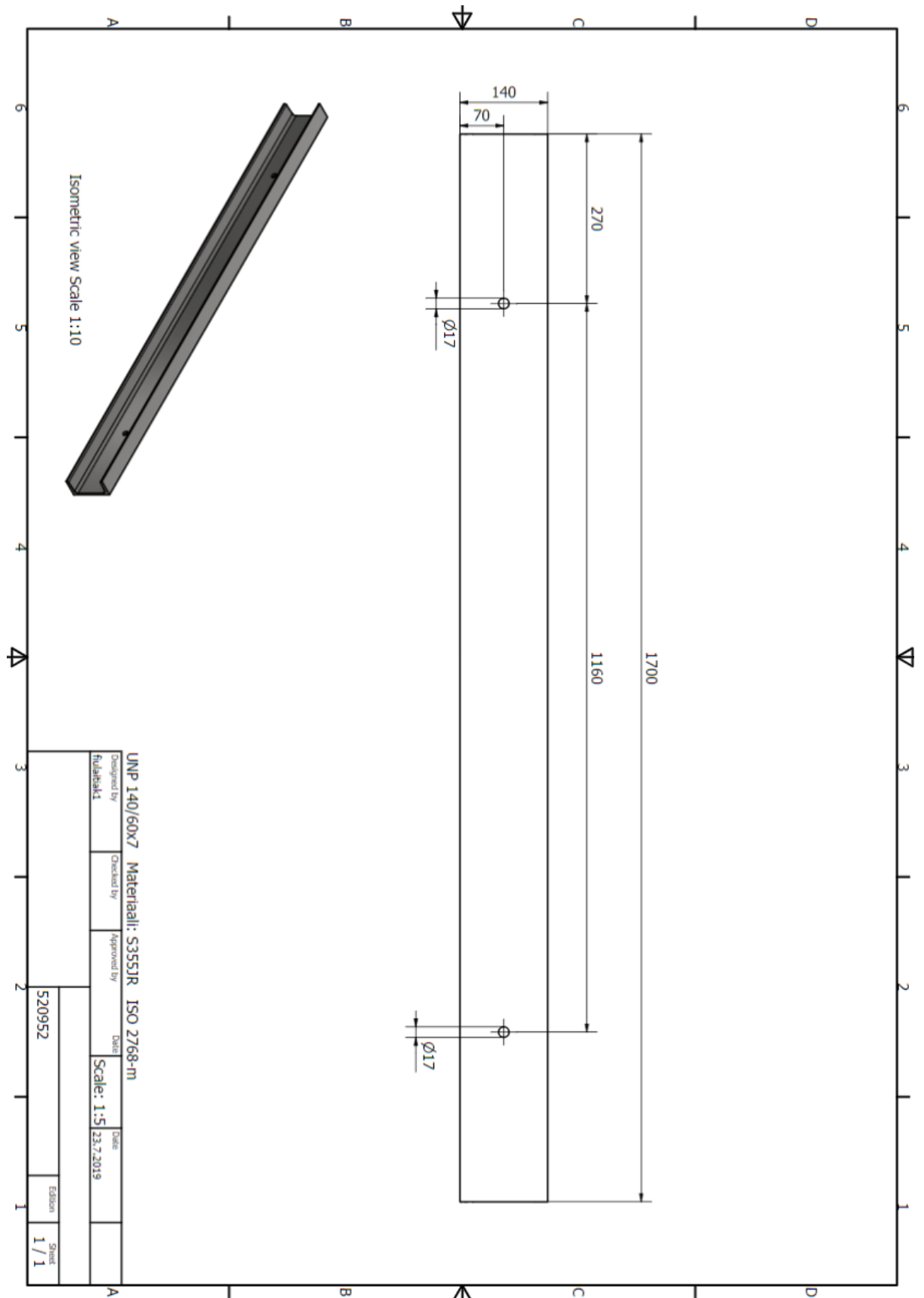
Liite 4. Sivukiinnike



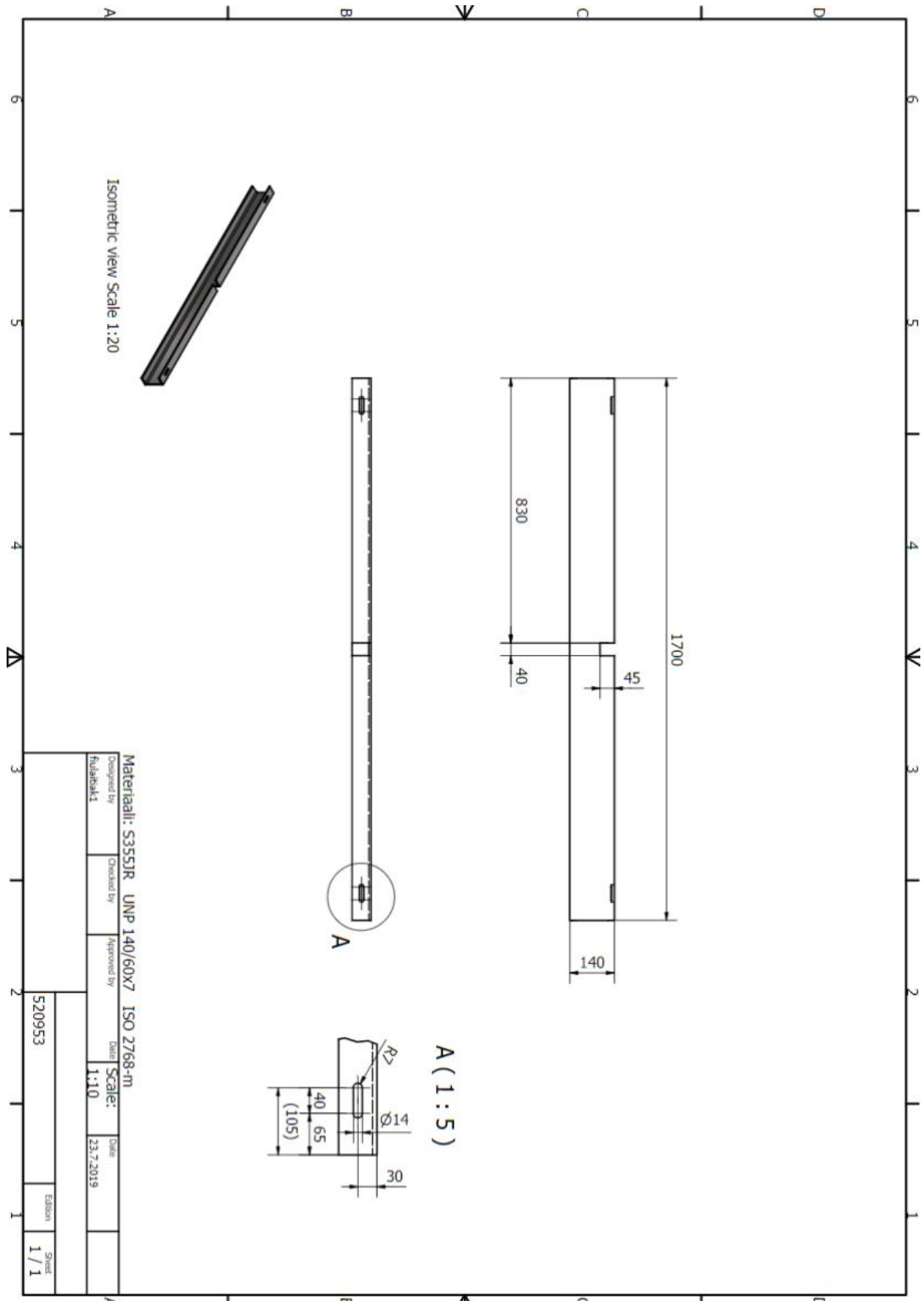
Liite 5. Yläkiinnike



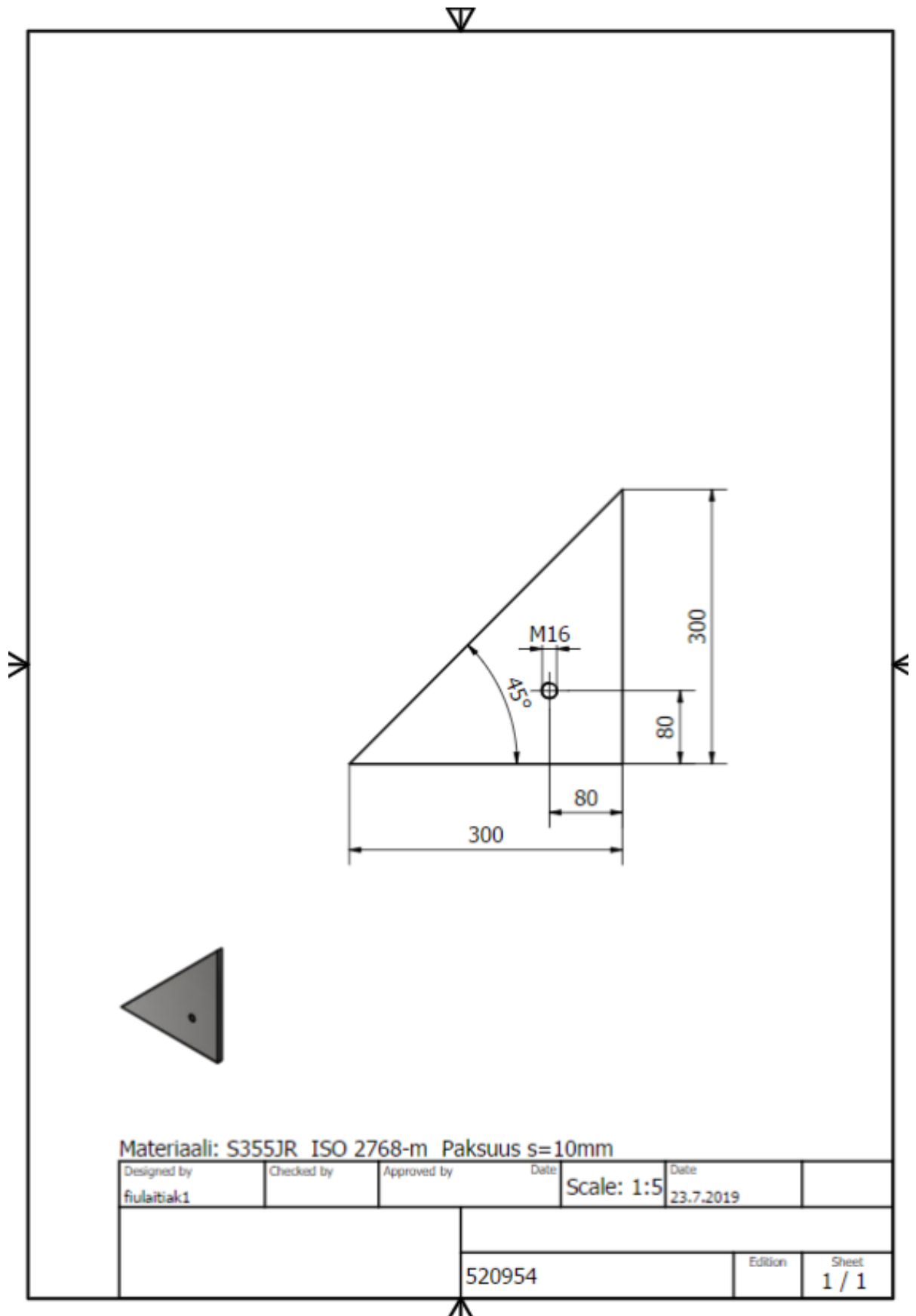
Liite 6. Yläpalkki



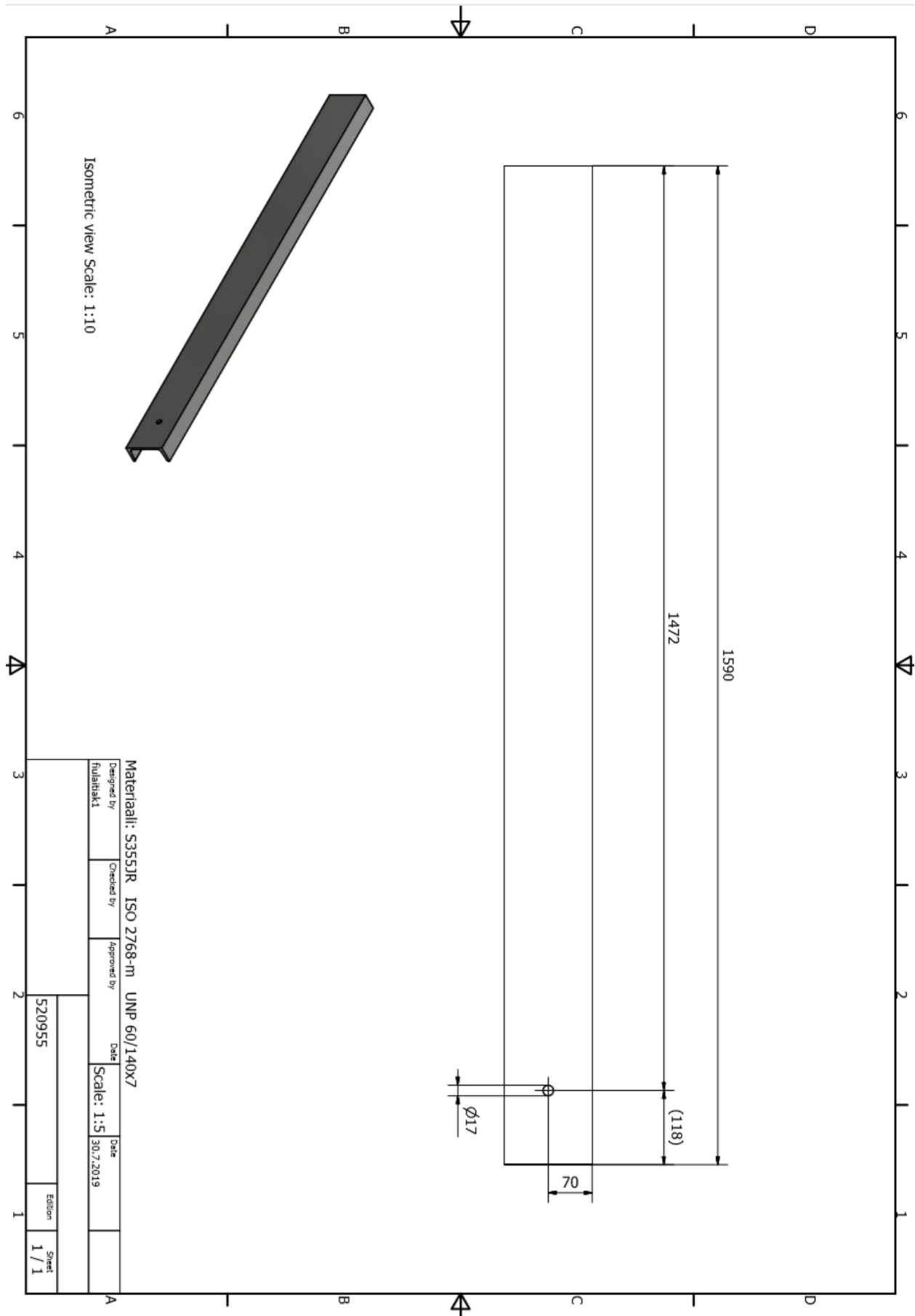
Liite 7. Alapalkki



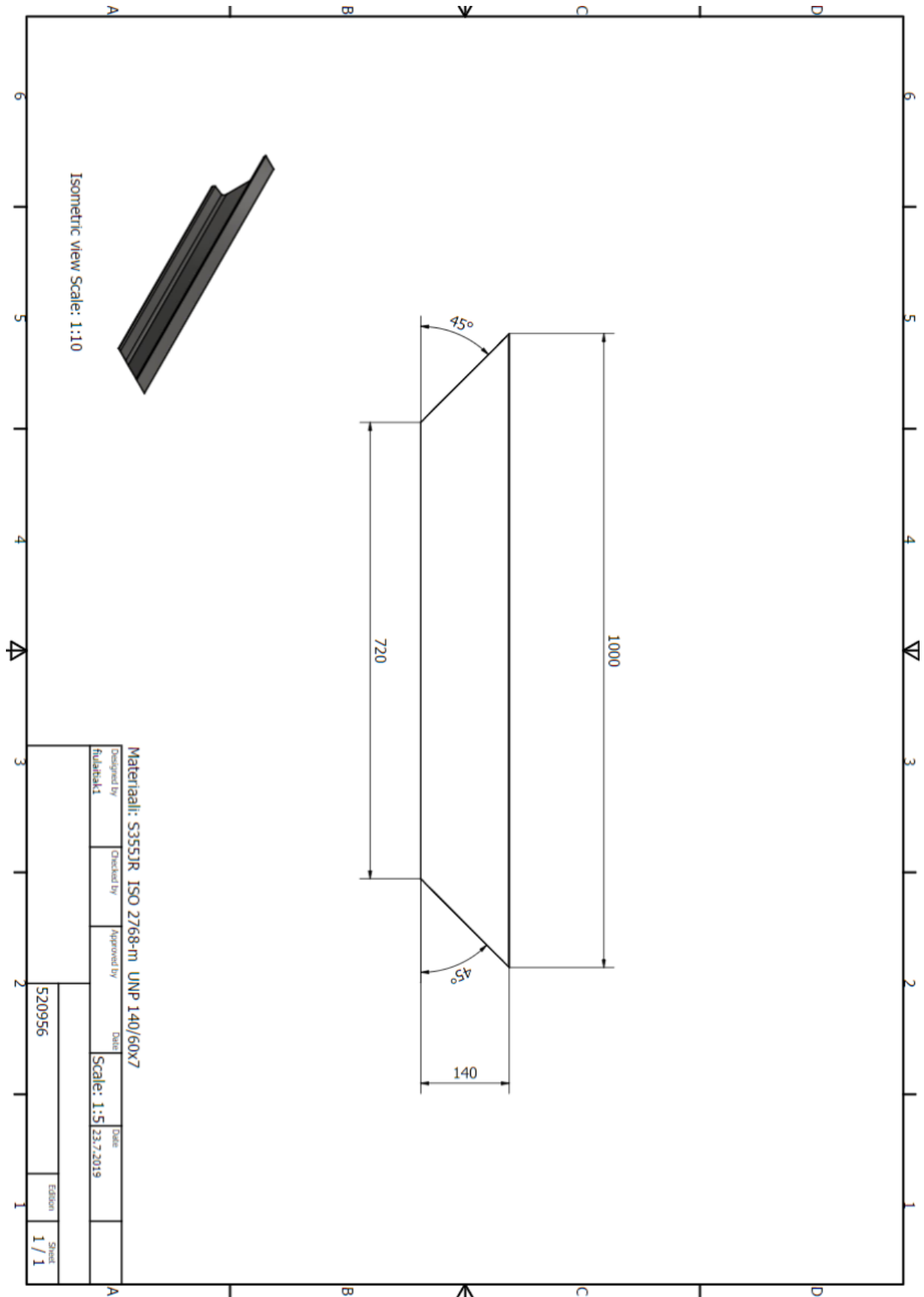
Liite 8. Kolmiopala



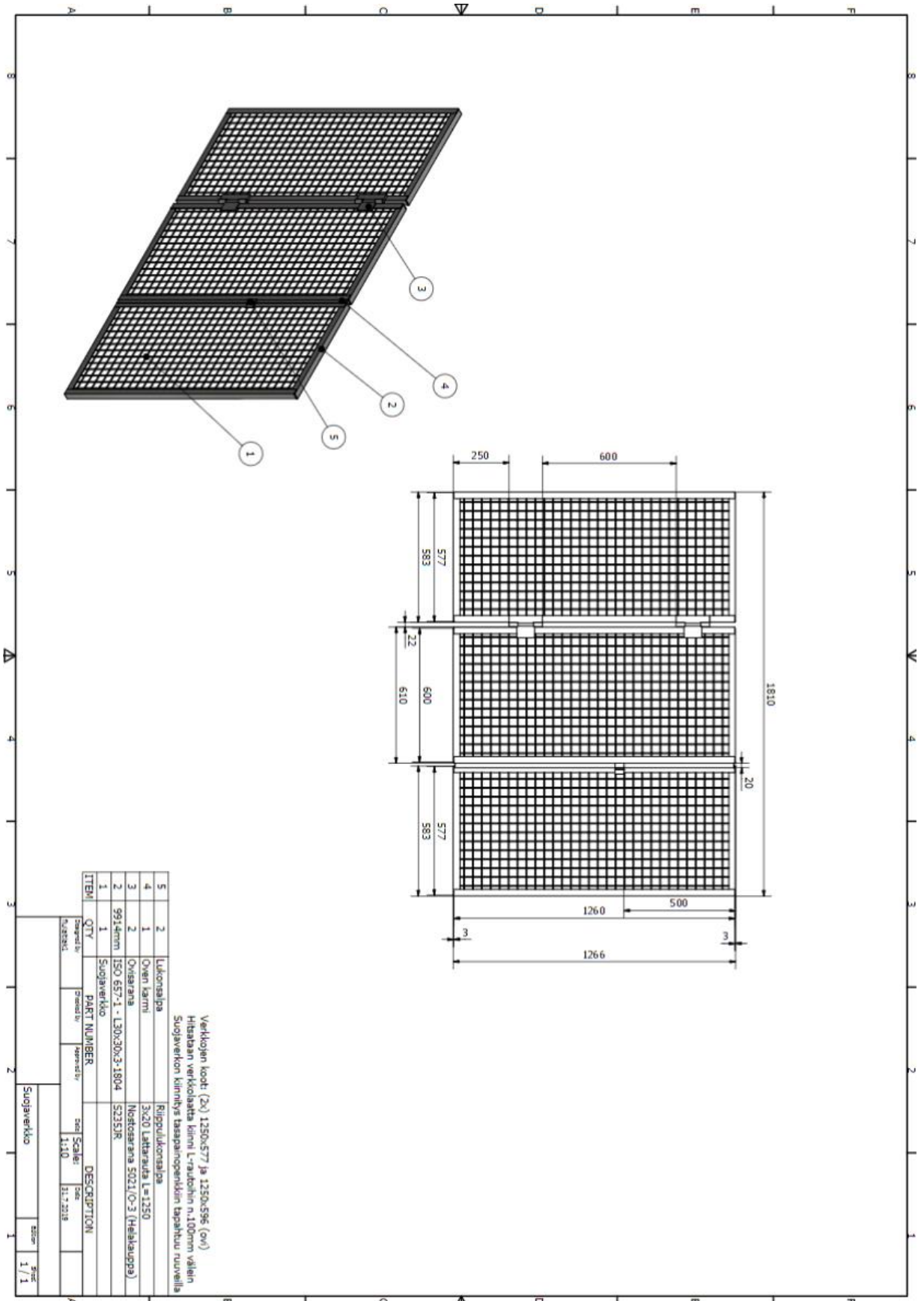
Liite 9. Sivupalkki



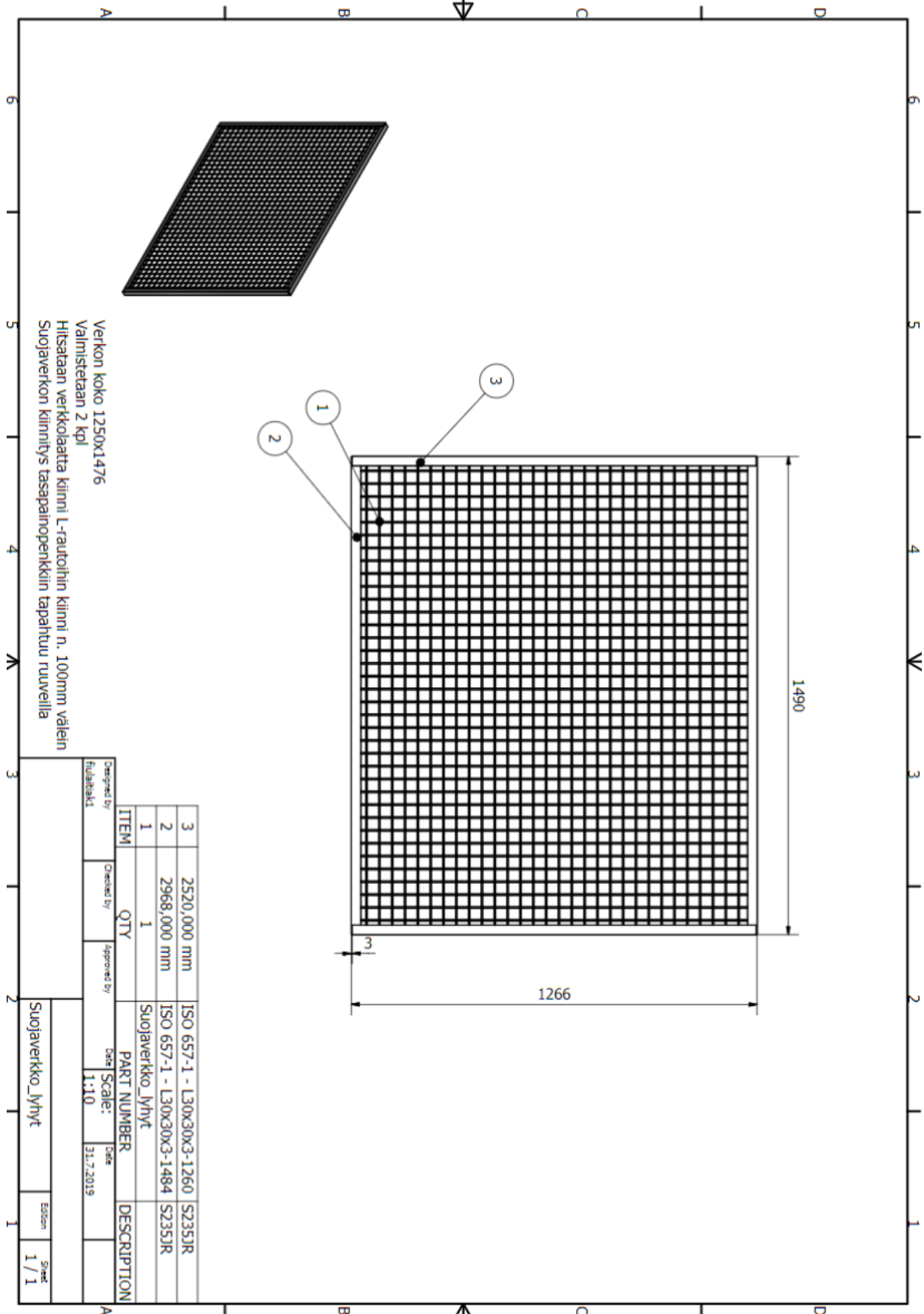
Liite 10. Tukipalkki



Liite 11. Suojaverkko 1



Liite 12. Suojaverkko 2



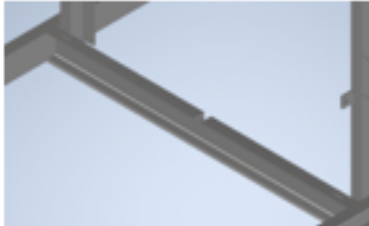
Liite 13. Riskianalyysi

KOHDE: Tasapainotuspenkki		Tunistettu riski				Jäännösriski			
SFS-EN 12100:		A	E	S	R	E	S	R	
		AF = automaattaja	Esiintymisen	Seuraukset	Riski	Esiintymisen	Seuraukset	Riski	
		H = huolto	K = käsittelo						
Vaaratyö	Kohde: Tilanne								
Propelli	Henkilö putoo propellin muun	AK/H	1,0	100	100	0,2	1	0,2	
Pöly	Puhallin nostattaa pölyä	AK/H	1,0	80	80	1,0	10	10	
Melu	Puhallimen pyörimisestä aiheutuva melu	AK/H	1,0	60	60	1,0	1	1	
Sähköiskut	Henkilö saa sähköiskun	AK/H	0,2	100	20	0,1	100	10	
Puhallimen kimmitys ja pois otto	Puhallin putoaa henkilön päälle	AK/H	0,2	100	20	0,1	100	10	
Vakaltanne	Propelli pääsee irti pyöryksessä	AK/H	0,2	100	20	0,1	100	10	
Ylikuumentuminen	Systeemissä jokin komponentti ylikuumentuu	AK/H	0,2	40	8	0,1	40	0	
Värikköjäminen	Henkilö tunaa ajan sisäpuolella käynnistyksen aikana	AK/H	0,3	100	30	0,1	100	10	
Tasapainotus paino	Paino rtoaa propellin pyöryksessä	AK/H	0,3	30	9	0,1	30	3	
		Toimenpite							
		Asennetaan suoja-aidat							
		Tasapainotusalue oltava siisti ja suojaamia käytettävä							
		Käulosuojaimet oltava puhallinta pyöritettäessä							
		Sähköiskut tehtävä vaarustusten mukaisesti							
		Ohjeistus: Nostolapahtumissa varoituskyvyt huomioidava							
		Ohjeistus: Varoituskyvyt puhallimen pyöryksessä suojainten lisäksi							
		Ohjeistus: Tasapainotusprosessin valvonta							
		Ohjeistus: Kaikkien oltava tunareäsiydyillä							
		Ohjeistus: Painot kiinnitettävä kunnolla							

Liite 14. Tasapainotuspenkin käyttöohje

Tasapainotuspenkin käyttöohje

1. Nosta puhallin paikalleen ja laske se vasten tasapainotuspenkin alatukea ja kiinnitä ruuviliitoksin.



2. Kiristä tasapainotuspenkin sivukiinnikkeet (4kpl) puhaltimen runkoa vasten.



3. Kiristä yläkiinnikkeet (2kpl) vasten puhaltimen runkoa.



4. Kiristä etukiinnikkeet (2kpl) vasten puhaltimen etuseinämää.



Tasapainotuspenkin nostaminen ja siirtäminen tapahtuu kolmiopaloista, joihin kiinnitetään nostosilmukat. Kolmiopalat sijaitsevat tasapainotuspenkin jokaisessa nurkassa.

