

LAPPEENRANNAN TEKNILINEN YLIOPISTO

LUT School of Energy Systems

LUT Kone

BK10A0401 Kandidaatintyö ja seminaari

HARRASTAJALUOKAN PUUSORVIN RUNKORAKENTEEEN KEHITTÄMINEN

DEVELOPMENT OF ENTHUSIAST CATEGORY WOODTURNING LATHE'S
FRAME STRUCTURE

Lappeenrannassa 18.10.2017

Jere Partti

Tarkastaja TkT Kimmo Kerkkänen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT Energiajärjestelmät
LUT Kone

Jere Partti

Harrastajaluokan puusorvin runkorakenteen kehittäminen

Kandidaatintyö

2017

35 sivua, 20 kuvaa, 4 taulukkoa ja 3 liitettä

Tarkastaja: TkT Kimmo Kerkkänen

Hakusanat: puusorvi, runko, teräsrakenne, lisälaite, piensarjatuotanto, modulaarinen

Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli suunnitella hitsatuista teräsrakenteista modulaarinen runko puusorviin. Idean kehitti yksityinen puusorvauksen harrastaja, joka alkaisi valmistaa laitetta piensarjatuotantona. Runkorakenteen ideoinnissa hyödynnettiin teoriakatsauksesta opittuja tietoja. Suunnitteluosio alkoi rakenteen hahmottamisella vaatimuslistan asettamien rajoitteiden mukaisesti. Useista ideoiduista vaihtoehdoista valittiin lähinnä valmistettavuuden kannalta käyttökohteeseen sopivin. Valittua ratkaisua alettiin tutkia ja kehittämään yksityiskohtaisemmin.

Suunnittelussa keskityttiin pääasiallisesti värähtelyjen hallintaan. Runkorakenteen ominaistajuudet pyrittiin poistamaan moottorin kierrosnopeusalueelta. Lujuustekniset laskut rajoittuivat taipuman tutkimiseen, millä tarkastettiin riittävä tarkkuus sorvattavan kappaleen asettelulle. Näiden vaatimuksien täyttäneiden profiilikokojen mukaan muodostettiin ensimmäinen kokoonpano sorvin rungosta. Rakenteen alimmat ominaistajuudet selvitettiin käyttäen 3D-mallinnusohjelmiston värähtelyanalyysiä. Runkorakenteeseen suunniteltiin erilaisia lisäjäykkyyttä tuovia tukiratkaisuja, joiden avulla ominaistajuudet yritettiin siirtää yli kriittisen alueen.

Tutkimuksessa ei löydetty täydellistä ratkaisua puusorvin runkoon värähtelyominaisuuksien kannalta. Erilaiset tukiratkaisut tai profiilivalinnat eivät poistaneet kaikkia ominaistajuuksia kriittiseltä alueelta. Lähimmäksi päästiin ratkaisussa, joka rajasi rungon ominaistajuudet kahden arvon ympärille.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
LUT School of Energy Systems
LUT Mechanical Engineering

Jere Partti

Development of enthusiast category woodturning lathe's frame structure

Bachelor's thesis

2017

35 pages, 20 figure, 4 table and 3 appendices

Examiner: D. Sc. (Tech.) Kimmo Kerkkänen

Keywords: woodturning lathe, frame, steel structure, attachment, small series product

The aim of this bachelor's thesis was to design a welded steel structure with a modular frame for the wood turning lathe. The idea was developed by a private wood rewarding enthusiast who would start making the product as a small-scale production. The idea of frame structure was utilized by the information learned from the theory review. The design section began to perceive the structure according to the constraints imposed by the requirement list. From a variety of ideas, the most suitable for use was chosen from the point of view of manufacturability. The selected solution was started to be explored and developed in more detail.

The design focused mainly on controlling vibrations. Efforts were made to remove the characteristic frequencies of the frame structure from the engine speed range. The technical bills were limited to examining the deflection, which was used to check the exact accuracy of the piece to be cut. According to the profile sizes that met these requirements, the first configuration of the lathe body was formed. The lowest characteristic frequencies of the structure were determined using the frequency analysis of 3D modelling software. In the frame structure, various support rigs were designed to increase the stiffness, which tried to move the characteristic frequencies over the critical area.

The study did not find a complete solution to frame structure of the wood turning lathe in terms of vibration characteristics. Different support solutions or profile selections did not remove all the characteristic frequencies from the critical area. The nearest solution was a solution that bounded the frame's characteristic frequencies around two values.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	2
ABSTRACT.....	3
SYMBOLILUETTELO.....	6
1 JOHDANTO.....	7
1.1 Tutkimuksen tavoitteet, tutkimuskysymykset ja hypoteesi	8
1.2 Tutkimusmenetelmät	9
1.3 Työn rajaus	10
2 RUNKORAKENTEEN IDEOINTIIN SOVELLETTAVA TEORIA.....	11
2.1 Nykyiset runkoratkaisut	11
2.2 Värähtely.....	12
2.3 Runkorakenteelta vaadittavat lujuustekniset ominaisuudet	14
2.4 Koneturvallisuus	15
2.5 Puusorvin standardiosat	16
2.6 Ruuviliitokset.....	17
2.7 Runkorakenteen hinta-arvio.....	18
3 RUNKORAKENTEEN IDEOINTI JA MITOITUS.....	19
3.1 Rungon ideointi ja mallinnus	19
3.2 Johderakenteet	20
3.3 Jalkarakenteet.....	24
3.4 Lopullisen ratkaisun valinta.....	26
3.5 Kuormien selvittäminen.....	27
3.6 Mitoituslaskelmat.....	28
3.7 Värähtelyanalyysit	28
4 TULOSTEN ANALYSOINTI	31
4.1 Vertailu nykyisiin rakenteisiin.....	31
4.2 Virhetarkastelu.....	31
4.3 Jatkotutkimusaiheet	32
5 YHTEENVETO	33
LÄHTEET	34

LIITTEET

LIITE I: Johderakenteiden vertailutaulukko

LIITE II: Jalkarakenteiden vertailutaulukko

LIITE III: Analyyttinen laskenta

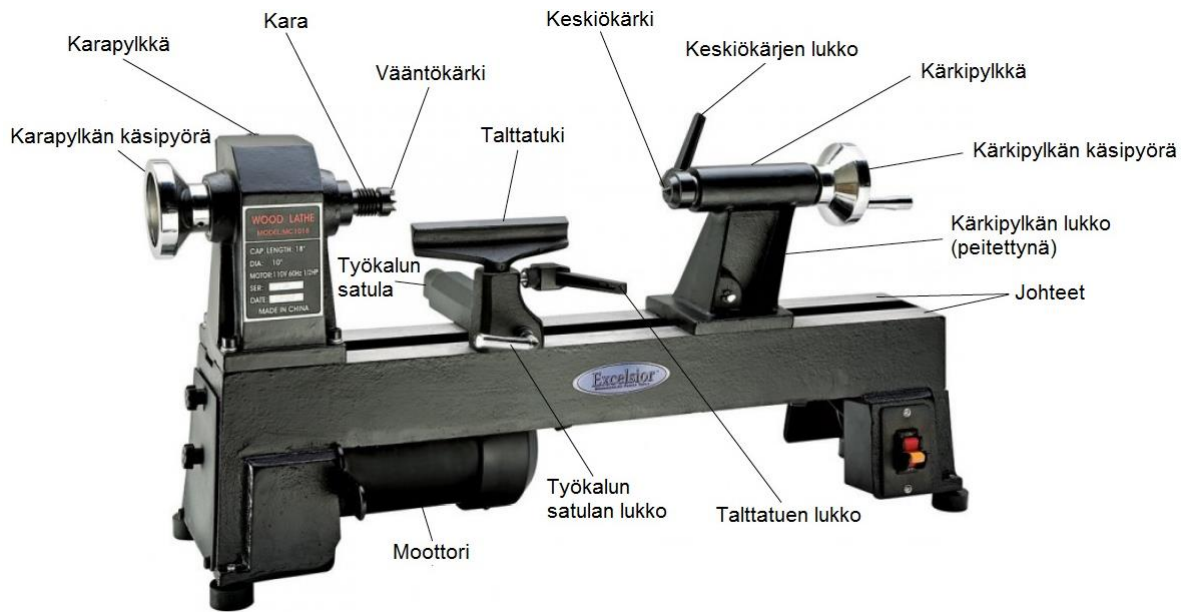
SYMBOLILUETTELO

A	Pinta-ala [m ²]
a	Neliöputkiprofiilin korkeus [mm]
b	Neliöputkiprofiilin leveys [mm]
c	U-palkin laipan pituus [mm]
d	U-palkin uuman pituus [mm]
E	Kimmomoduuli [Pa]
h	Liitoslevyn korkeus [mm]
I	Jäyhyysmomentti [mm ⁴]
k	Jousivakio [N/m]
K	Jäykkyysmatriisi
l	Palkin pituus [mm]
L	Elementin pituus [m]
M	Massamatriisi
q	Viivakuorma [N/m]
t	Aika [s]
t ₁	Neliöputkiprofiilin seinämän paksuus [mm]
t ₂	U-palkin seinämän paksuus [mm]
t ₃	Liitoslevyn paksuus [mm]
X	Värähtelyn amplitudi [m]
ÿ	Siirtymän toinen aikaderivaatta, kiihtyvyys [m/s ²]
ρ	Tiheys [kg/m ³]
ω	Kulmanopeus [rad/s]
DFMA	Design for Manufacture and Assembly, valmistus – ja kokoonpanoystävällinen suunnittelu

1 JOHDANTO

Puusorvin rungon kehittämisen taustalla on harrastajatasen sorvaajan idea luoda uudenlainen ratkaisu, joka mahdollistaa käyttäjäkohtaisesti räätälöidyt yksittäiskappaleet sekä mahdollisesti myös pienimuotoisen sarjatuotannon. Runkorakenteeksi ideotiin modulaarista, hitsattuihin teräsrakenteisiin perustuvaa ratkaisua. Siinä runko koostuu samanlaisista standardiprofiilin paloista, joita liitetään toisiinsa peräkkäin niin, että sorviin saadaan haluttu kärkiväli työstettävää kappaletta varten. Ratkaisun etuna on muunneltavuus jälkeenpäin sekä valmistettavuus. Sorvin työstökapasiteettia voidaan nostaa tai laskea muuttamalla runkoon liitettyjen moduulien määrää. Runkorakenne on helposti valmistettavissa standardiprofiileista, sillä suurempia laitteistoinvestointeja ei tarvita.

Sorvaus on lastuava työstömenetelmä, jossa työstettävä kappale pyörii ja työkalun terä poistaa materiaalia lastuina sen pinnalta. Valmistettavat kappaleet ovat muodoltaan pyörähdyssymmetrisiä. Puusorvi rakentuu rungosta, johon on kiinnitetty työstettävää kappaletta pyörittävä sähkömoottori, työkalun tukemiseen tarkoitettu talttatuki ja sorvattavan kappaleen vakauttamiseen ja kohdistamiseen käytettävä kärkipylkkä. Työkappaleen kiinnityksessä käytetään monileukaistukkaa, jos sorvattavaa esinettä ei voida tukea sen molemmista päistä. Tällaisia tuotteita ovat esimerkiksi erilaiset kulhot ja lautaset. Muutoin työkappale kiinnitetään moottorissa olevaan vetokärkeen ja tuetaan toisesta päästä kärkipylkässä kiinni olevalla vastakärjellä. (Aaltonen 1997, s.176–177.) Kuvassa 1 on esitetty puusorvaukseen perehtyneen yrityksen Rocklerin 2014 sivuilta löytyneen tiedon mukaisesti tavanomainen puusorvi ja nimetty kaikki siihen kuuluvat vakio-osat.



Kuva 1. Puusorvi ja sen sisältämät standardiosat (muokattu Rockler 2014).

1.1 Tutkimuksen tavoitteet, tutkimuskysymykset ja hypoteesi

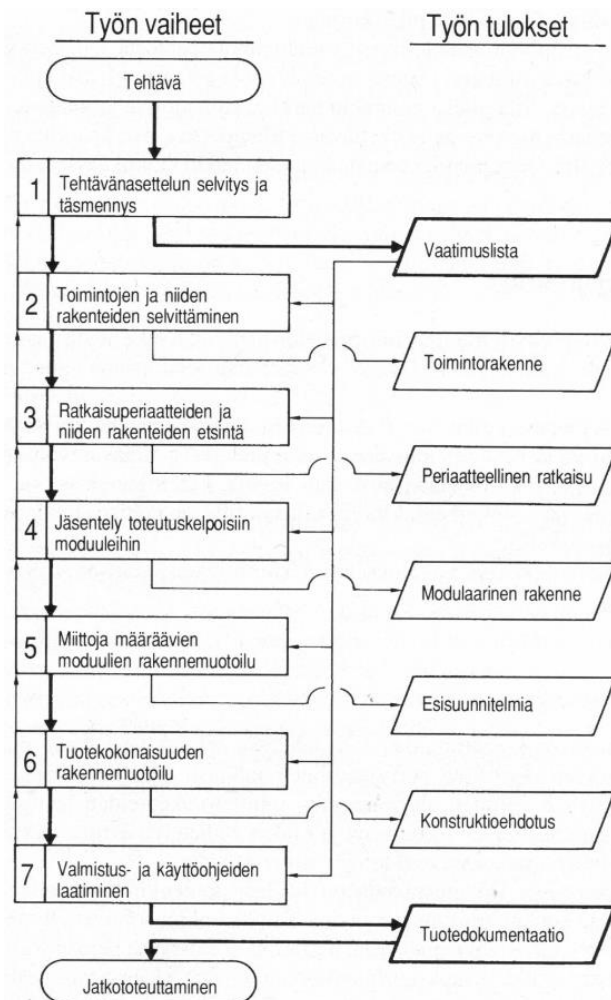
Tutkimuksen tavoitteena oli suunnitella hitsatuista teräsrakenteista valmistettava runkorakenne puusorviin. Rakenne oli tarkoitus toteuttaa modulaarisena ja pitää mahdollisimman yksinkertaisena sekä valmistusystävällisenä, kuitenkin siten, että työstettävien kappaleiden lopullisen pinnanlaadun laatuvaatimukset ja työturvallisuusehdot täyttyivät. Teräsrakenteisesta rungosta oli tarkoituksena tehdä myös nykyisiin valurautaisiin runkoihin verrattuna kevyempi. Valmiille tuotteelle oli annettu tuhannen euron hinta-arvio. Työn tutkimuskysymykset ovat seuraavat:

- Millainen on hyvä modulaarinen runkorakenne puusorvissa?
- Millainen on helposti valmistettava ja kokoonpantava runkorakenne?
- Kuinka värähtelyn vaikutuksen saadaan minimoitua?

Runkorakenteessa hyödynnetään todennäköisesti yleisesti kaikkien saatavilla olevia rakenneteräksiä, jotka ovat kooltaan niin pieniä, että niiden käsittely on vaivatonta yksinäänkin. Teräsprofiilien jälleen myyjien kuten Taloon ja VS-marketin kotisivuilla on huomattavissa, että, vaikka profiileja on olemassa eri kokoluokissa jopa millimetrin välein, eivät kaikki koot ole helposti saatavilla pienkuluttajille ja pienissä erissä ostettuina. Teräsrakenteisesta runkorakenteesta voi olla vaikea saada riittävän vakaata suuremman kokoluokan sorveihin, joissa kärkiväli ulottuu yli metrin pituuksiin.

1.2 Tutkimusmenetelmät

Suunnitteluprosessi alkoi yleisellä perehtymisellä puosorveihin. Tutkittiin, miten sorvin kiinnitys pöytään on toteutettu ja millainen muoto johteissa mahdollistaa talttatuen sekä kärkepylkän portaattoman kiinnityksen. Modulaarisuutta alettiin suunnitella näiden ominaisuuksien ympärille. Jo ensimmäisestä hahmotelmasta lähtien käytettiin mallinnuksessa Dassault Systèmes:n SolidWorks-ohjelmistoa, jolla määritettiin työn laskennallisessa vaiheessa myös rakenteen ominaisaajuudet. Tarvittavat lujuuslaskut tehtiin analyttisesti. Lopulliset materiaali- ja profiili- sekä osavalinnat tehtiin laskentavaiheen jälkeen. Runkorakenteen kehittämisessä noudatettiin soveltaen Pahlin ja Beitzin teoksessa Koneensuunnitteluoppi 1986 esittämää yleistä työnkulkua koneiden suunnitteluun. Kuvassa 2 on esitetty VDI 2221 -ohjeen mukainen seitsemän vaiheen toimintamalli konstruktion suunnitteluun.



Kuva 2. Suunnittelun yleinen työnkulku (Pahl & Beitz 1986, s. 47).

1.3 Työn raja

Lopulliset tutkimustulokset vaikuttavat siihen tehdäänkö runkorakenteesta 3D-piirrustuksien lisäksi myös valmistuspiirustukset. Jos tulokset näyttävät, että kyseistä ratkaisua ei voi saada toimimaan, jätetään valmistuspiirustukset tässä vaiheessa vielä tekemättä. Runkorakenteessa käytetään paljon standardien mukaisia osia, joten valmistuspiirustukset eivät olisi muutenkaan välttämättömät. Rakenteen mitoituksessa huomioidaan vain värähtelyn hallinta sekä staattiset kuormitukset. Väsymislujuus jätetään pois tarkasteluista. Hinta-arviossa huomioidaan vain materiaalikustannukset eli valmistuksen osuus jätetään huomioimatta. Runkorakenteeseen ei suunnitella lisälaitteita tai lisälaitteiden lisäämiseen mahdollistavia kiinnitysominaisuuksia.

2 RUNKORAKENTEEN IDEOINTIIN SOVELLETTAVA TEORIA

Runkorakenteen ideointiin sovellettavassa teoriavaiheessa tutkittiin millaisia vaatimuksia värähtely, koneturvallisuus ja puusorvin standardiosat asettavat runkorakenteeseen. Näiden asioiden pohjalta päästiin aloittamaan alustavien mallien ideointi ilman, että huomioitiin vielä lujuusteknisiä tai värähtelyn hallintaan liittyviä ominaisuuksia. Kun puusorvin standardiosien vaatima menoerä oli selvitetty, voitiin laskea hinta-arvio runkorakenteelle. Taulukossa 1 on esitetty työlle laadittu vaatimus ja toivomuslista.

Taulukko 1. Vaatimuslista (Kerkkänen 2017).

Jere Partti	Vaatimuslista Puusorvin runkorakenne	Vaatimus/ Toivomus
7.2.2017	Runkona teräsrakenne	V
	Runko modulaarinen	V
	Sorvin max pyörimisnopeus 4000 rpm	V
	Koneturvallisuus huomioitava	V
	Hinta kuluttajalle max 1000€	V
	Sorvattavan kappaleen asettelun tarkkuus millin kymmenesosia	V
	Sorvattavan pinnan lopullisen laadun ja mittatarkkuuden oltava riittävän hyvä	V
	Lisälaitteet ja niiden asennusmahdollisuus	T

2.1 Nykyiset runkoratkaisut

Puusorveissa runko on yleensä valmistettu valuraudasta. Valurautaisilla rungoilla saadaan rakenteeseen massaa ja jäykkyyttä, jotka pienentävät värähtelyherkkyyttä. Puusorvi voi olla joko pöydän päälle asetettava tai omilla jaloillaan seisova. Kun kärkiväli ylittää tuhat millimetriä, sorvit valmistetaan yleensä omille jaloilleen (Holzmann Maschinen; Bernardo 2016). Nykyiset kuluttajien saatavilla olevat jatkorungot on suunniteltu tavallisesti ainoastaan pienemmän kokoluokan, pöydän päälle asetettaville sorveille, joilla kärkiväli saadaan nostettu suurimmillaan noin 1000 millimetriin. Kaikki jatkorungot eivät salli useampien kuin yhden jatkopalan liittämistä sorviin. Kuvassa 1 on esitetty yleinen malli jatkorungosta ja kuvassa 2 jatkorunko on kiinnitettyä sorviin.



Kuva 3. Yleinen malli valurautaisesta jatkorungosta (Holzmann Maschinen).



Kuva 4. Jatkorunko liitettynä puusorviin (Holzmann Maschinen).

2.2 Värähtely

Värähtely on toistuvaa liikettä systeemin tasapainotilan ympärillä. Puusorvissa sähkömoottori toimii värähtely herätteenä. (Rao 2000, s. 11.) Pyörivä työstökappale aiheuttaa puusorvin rungossa vaimenematonta pakkovärähtelyä. Värähtely syntyy, kun pyörivässä osassa on massaepäkeskeisyyttä. Värähtelyn aiheuttamaa liikettä voidaan kuvata yksinkertaisimmillaan yhtälöllä:

$$x(t) = X \cos(\omega t) \quad (1)$$

jossa X on värähtelyn amplitudi, ω on kulmanopeus ja t on aika. (Pennala 1999a, s. 22.) Värähtelyn luonteeseen vaikuttavat mekaaniset ominaisuudet ovat massa ja jäykkyys sekä vaimennus ja heräte (Pennala 1999a, s. 13). Puusorvin runko voidaan ajatella kaksitukisena palkkina, jolloin se voidaan idealisoida yhden vapausasteen värähtelijäksi. Runkorakenteen värähtelyominaisuuksista ollaan kiinnostuneita alimmista ominaistajuuksista ja värähtelymuodoista, koska herätteen vaikuttaessa systeemiin samalla taajuudella kuin mikä on sen ominaistajuus, syntyy resonanssi. Resonanssissa runkorakenne heilahtelee suurella

amplitudilla, mikä on kuluttavaa rakenteelle ja tekee hyvän sorvausjäljen saavuttamisesta haastavaa. Sorvissa, jossa herätteenä toimii pyörivää liikettä synnyttävä moottori, voidaan resonanssin synnyttämät pyörimisnopeudet selvittää vertaamalla ominaistajuuksia sekä herätetaajuuksia. (Rao 2000, s. 16.) Ominaistaajuuksissa on huomioitava 30 prosentin marginaali sen ylä- ja alapuolelle, jonka muodostamassa alueessa laitteen pyörimisnopeutta ei tulisi käyttää saavuttaakseen vakaimman mahdollisen toiminnan. (Pöllänen 2107.)

Ominaistaajuudet voidaan laskea Solidworksissä tehtävän analyysin lisäksi myös FE-menetelmällä (Finite Element Method) ominaisarvotehtävänä yhtälöstä:

$$[m]\{\ddot{x}\} + [k]\{x\} = \{0\} \quad (2)$$

Jossa $[m]$ on massamatriisi, $[k]$ jäykkyydematriisi, x siirtymä ja \ddot{x} kiihtyvyys. (Pennala 1999a, s. 131.) Yhtälössä 2 huomioidaan yleensä myös vaimennuskerroin, joka tässä tapauksessa jätettiin pois, koska se on teräksellä todella pieni (Pennala 1999a, s. 14). Kun huomioidaan yhtälössä yksi esitetty harmonisen värähtelyn lauseke, kaava saadaan muotoon

$$[k]\{x\} = \omega^2[m]\{x\} \quad (3)$$

Jossa ω on ominaistaajuus ja x ominaistaajuutta vastaava värähtelymuoto. Ominaistaajuudet ovat karakteristisen determinantin juuria. (Pennala 1999a, s. 131.) Laskennassa tarvittavat massamatriisi \mathbf{M} ja jäykkyydematriisi \mathbf{K} ovat

$$\mathbf{m} = \frac{\rho AL}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22L & 54 & -13L \\ 22L & 4L^2 & 13L & -3L^2 \\ 54 & 13L & 156 & -22L \\ -13L & -3L^2 & -22L & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{k} = \frac{EI}{L^3} \begin{bmatrix} 12 & 6L & -12 & 6L \\ 6L & 4L^2 & -6L & 2L^2 \\ -12 & -6L & 12 & -6L \\ 6L & 2L^2 & -6L & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Jossa ρ on materiaalin tiheys, A profiilin poikkipinta-ala, L pituus, E kimmomoduuli ja I jäyhyysmomentti. Kun runkorakenteen lopullisia mittoja lasketaan, täytyy huomioida, että

ominaistaajuuksia ei saada muutettua rakenteen massaa lisäämällä, jos sen jäykkyys kasvaa samassa suhteessa. Ominaiskulmanopeus sisältää massan ja jäykkyyden välisen suhteen, joka nähdään yhtälöstä:

$$\omega^2 = \frac{k}{m} \quad (6)$$

Jossa k on jousivakio. Taajuus saadaan, kun ominaiskulmanopeus jaetaan yhdellä jaksolla eli 2π :llä. (Pennala 1999a, s. 22, 37.)

2.3 Runkorakenteelta vaadittavat lujuustekniset ominaisuudet

Puusorvin runkorakennetta suunniteltaessa täytyy huomioida myös, että sen lujuustekniset ominaisuudet ovat vaatimusten kannalta riittäviä. Johderakenteen taipuma on saatava riittävän vähäiseksi, jotta moottorin vetokärki ja kärkipylkän keskiökärki pysyvät yhdensuuntaisina. Rakenne mitoitetaan vaativimman tilanteen mukaan, jolloin asetetut ehdot toteutuvat varmasti myös muissa tilanteissa. Taivutusta aiheuttava kuorma syntyy johderakenteen sekä sorvattavan kappaleen massasta. Sähkömoottori sijoitetaan suoraan jalkarakenteen yläpuolelle, jolloin sen kohdistama voima saadaan siirrettyä taivutuksen sijaan aksiaalisvoimaksi jalkarakenteeseen eikä se siten aiheuta taipumaa johderakenteeseen.

Jos puusorvia ei kiinnitetä lattiaan, voidaan johderakenne ajatella vaativimman tapauksen mukaan molemmista päistä vapaasti tuettuna palkkina, johon kohdistuu tasaisesti jakautunut kuorma. Silloin suurin taipuma saadaan yhtälöstä:

$$\max(v) = \frac{5ql^4}{384EI} \quad (7)$$

Yhtälössä 7 q on viivakuorma, l palkin pituus, E kimmomoduuli ja I jäyhyysmomentti. (Pennala 1999b, s. 107.) Sorvattava kappale aiheuttaa suurimman taipuman, kun kärkipylkkä on johderakenteen keskikohdassa ja kappaleen halkaisija on suurin sallittu. Kappaleen pituus on silloin puolet sorvin suurimmasta mahdollisesta kärkivälistä. Pistevoiman aiheuttama taipuma voidaan laskea yhtälöstä:

$$\max(v) = \frac{Fl^3}{48EI} \quad (8)$$

Yhtälössä 8 F on pistevoiman suuruus. (Pennala 1999b, s. 107.) Sorvattavan kappaleen aiheuttamaa taipumaa laskettaessa puun tiheytenä on käytetty rauduskoivun 550 kg/m^3 . Se on raskain Suomesta löytyvä lajike, jolla saavutetaan suurin mahdollinen sorvin sallima halkaisija. (Kärkkäinen 2003, s. 147.)

Jäyhyysmomentti on poikkipintasuure, joka kuvaa kappaleen kykyä vastustaa taipumaa. Se voidaan määrittää yhtälöstä:

$$I = \frac{bh^3}{12} + d^2 * A \quad (9)$$

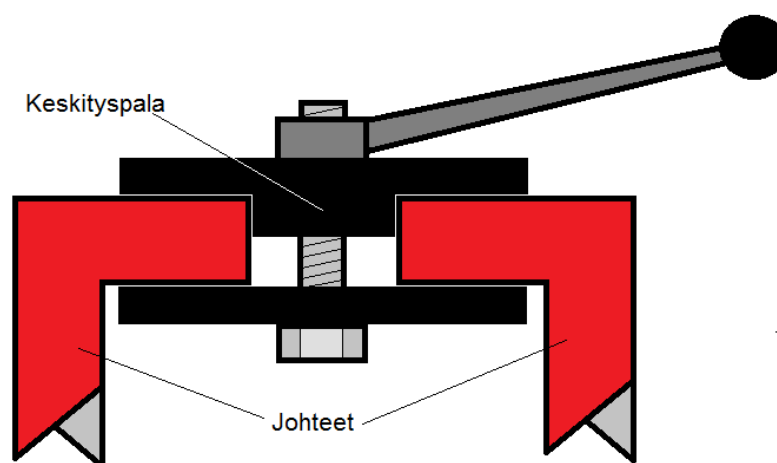
Yhtälössä 9 b on kappaleen poikkipinnan leveys, h korkeus, d etäisyys neutraaliakselista ja A pinta-ala. (Pennala 1999b, s. 53-55.)

2.4 Koneturvallisuus

Koneturvallisuudesta on huomioitava runkorakenteen suunnittelussa tässä tapauksessa ensi sijaisesti yleinen käytettävyyys sekä rakenteen vakaus ja työergonomia. Modulaariset osat ovat niin kevyitä ja yksinkertaisia, että niiden kuljettamisen tai siirtämisen varalle ei tarvitse suunnitella erillisiä lisäosia. Valtioneuvoston asetuksessa koneiden turvallisuudesta (400/2008) on liitteessä I kohdassa 2.3 erillinen maininta puun työstökoneista. Siinä todetaan: ”Kone on suunniteltava, rakennettava ja varustettava siten, että työstettävä kappale voidaan asettaa ja sitä voidaan ohjata koneeseen turvallisesti.” Kohdassa 1.3.1, jossa käsitellään koneen vakautta, todetaan: ”Koneen sekä sen komponenttien ja liitoskappaleiden on oltava riittävän vakaita, jotta estetään niiden kaatuminen, putoaminen tai hallitsemattomat liikkeet kuljetuksen, kokoonpanemisen ja purkamisen sekä muiden koneeseen liittyvien toimien aikana.” Sorvista saadaan vakaa, kun sen jalkojen tukipisteet levittyvät riittävän laajalle alueelle. Myös sorvin kiinnitys lattiaan tuo tarvittaessa lisää vakautta. Kohdassa 1.1.6 todetaan työergonomiasta: ”Tarkoitetuissa käyttöolosuhteissa on koneen käyttäjään kohdistuva epä mukavuus, väsymys sekä fyysinen ja psyykinen kuormitus minimoitava”. Ergonominen työasento saadaan, kun sorvista suunnitellaan monen pituisille ihmisille sopivan korkuinen ja vältetään syvää muotoa etukumaran välttämiseksi.

2.5 Puusorvin standardiosat

Puusorvin runkoon kiinnitetään kolme sorvauksen kannalta olennaista standardiosaa: sähkömoottori, talttatuun pidin ja kärkiylkkä. Moottori on kiinteästi kiinni rungossa. Talttatuun pidintä sekä kärkiylkkää on pystyttävä siirtämään rungon pituussuunnassa ja lukitsemaan ne johteisiin kohdasta riippumattomasti. Kuvassa 3 on Holzmann Maschinen sorvien perusteella piirretty havainnollistava esitys siitä, kuinka osat kiinnitetään runkoon ja millaisen muodon johteiden täytyy muodostaa, jotta osat saadaan lukittua siihen kohdasta riippumattomasti.



Kuva 5. Kärkiylkkän ja talttatuun pitimen kiinnitys johteisiin (muokattu Holzmann Maschinen).

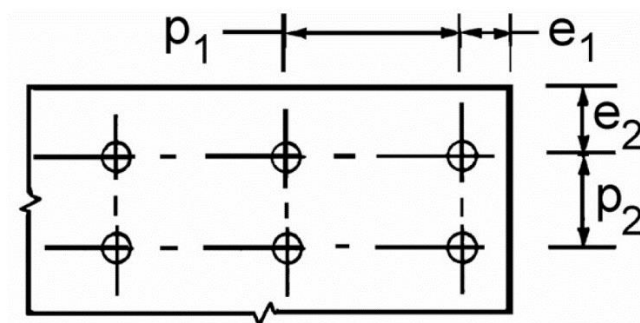
Standardiosia on pystyttävä käyttämään runkorakenteessa niiden valmistajasta riippumattomasti. Tämä vaikuttaa lähinnä johteiden korkeuteen sekä niiden väliin jäävän aukon leveyteen. Johteiden on oltava riittävän matalia, jotta ne mahtuvat kärkiylkkän ja talttatuun pitimen kiinnitysmekanismin vastakappaleiden väliin. Johteiden välille jäävän aukon leveyttä on pystyttävä muuttamaan kärkiylkkän keskittämistä varten. Kärkiylkkän alapinnassa on tavanomaisesti keskittämiseen tarkoitettu olake, joka on leveydeltään saman suuruinen aukon kanssa. Tämä pakottaa kärkiylkkän samaan linjaan johteiden ja siten myös moottorin istukan kanssa, jolloin myös sorvattava kappale saadaan asetettua suoraan.

2.6 Ruuviliitokset

Sorvin muunneltavuuden mahdollistamiseksi moduulit liitetään toisiinsa ruuviliitoksia hyödyntäen. Ruuviliitosten mitoituksessa on standardisoitu reuna- ja päätyetäisyydet sekä keskiöväli reiän halkaisijan suhteen. Taulukossa 2 on listattu erilaisille tapauksille suunnattuja arvoja, jotka havainnollistuvat kuvassa 6.

Taulukko 2. Ruuviliitosten pienin ja suurin keskiöväli sekä pääty- ja reunaetäisyydet (SFS-EN 1993-1-8, s.24).

Pääty- ja reunaetäisyydet sekä keskiöväli, ks. kuva 3.1	Minimi-arvo	Maksimi-arvo ^{1) 2) 3)}		
		EN 10025 mukaisista teräksistä (paitsi EN 10025-5:n mukaiset teräkset) tehdyt rakenteet		EN 10025-5 mukaisista teräksistä tehdyt rakenteet
		Säälle tai muille korroosiorasituksille altis rakenne	Rakenne, joka ei ole altis säälle tai muille korroosiorasituksille	Suojaamaton rakenne
Päätyetäisyys e_1	$1,2d_0$	$4t + 40$ mm		Suurempi arvoista $8t$ ja 125 mm
Reunaetäisyys e_2	$1,2d_0$	$4t + 40$ mm		Suurempi arvoista $8t$ or 125 mm
Etäisyys e_3 Pidennetyissä rei'issä	$1,5d_0$ ⁴⁾			
Etäisyys e_4 Pidennetyissä rei'issä	$1,5d_0$ ⁴⁾			
Keskiöväli p_1	$2,2d_0$	Pienempi arvoista $14t$ ja 200 mm	Pienempi arvoista $14t$ ja 200 mm	Pienempi arvoista $14t_{\min}$ ja 175 mm
Keskiöväli $p_{1,0}$		Pienempi arvoista $14t$ ja 200 mm		
Keskiöväli $p_{1,1}$		Pienempi arvoista $28t$ ja 400 mm		
Keskiöväli p_2 ⁵⁾	$2,4d_0$	Pienempi arvoista $14t$ ja 200 mm	Pienempi arvoista $14t$ ja 200 mm	Pienempi arvoista $14t_{\min}$ ja 175 mm



Kuva 6. Taulukkoon 2 liittyvä malli ruuviliitosten reuna- ja päätyetäisyyksistä (SFS-EN 1993-1-8, s.25).

2.7 Runkorakenteen hinta-arvio

Tässä kappaleessa perehdytään erilaisten sorvin runkorakenteessa mahdollisesti hyödynnettävien teräsprofiilien hintoihin. Profiileita etsittiin jälleen myyjiltä, jotka mahdollistavat jokaiselle kuluttajalle vaivattoman ostotapahtuman ja ilmoittavat hinnan ilman tarjouspyyntöä. Puusorvin hinta-arvio kokonaisuudessaan rajattiin siten, että se tulisi maksamaan kuluttajalle maksimissaan 1000 euroa. Taulukossa 3 on listattu VS-Marketin myymiä profiileja sekä niiden hintoja, kun profiilin pituus on kuusi metriä. Kyseisissä profiileissa teräksen kilohinta on noin 1,5 euroa.

Taulukko 3. Erilaisien teräsprofiilien hintoja (VS-Market 2017).

Profiili		Materiaali	Paksuus [mm]	Hinta [€]
Neliöputki palkki	40x40	S235JR	2	21,61
		S355J2H	3	30,78
		S355J2H	4	39,27
	50x50	S235JR	2	28,64
		S355J2H	3	39,84
		S355J2H	4	50,83
L-profiili	40x40	S235JR	2	13,12
		S235JR	3	19,37
		S235JR	4	19,46
		S235JR	5	23,88
	60x40	S235JR	5	30,14
	70x50	S235JR	4	38,02
	80x40	S235JR	6	46,88
U-profiili	120x40	S235JR	4	61,98
	120x60	S235JR	4	75,52
	160x60	S235JR	5	107,28

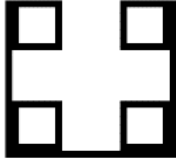
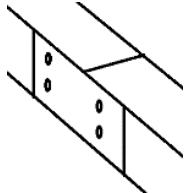
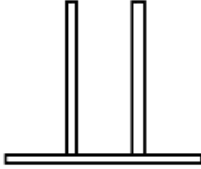
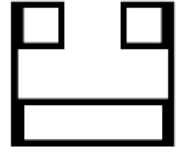
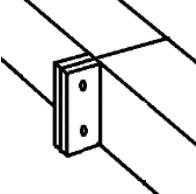
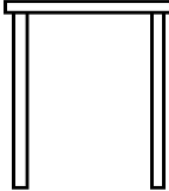
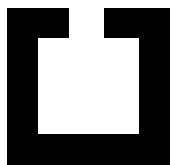
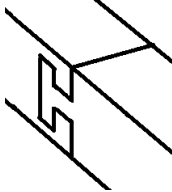
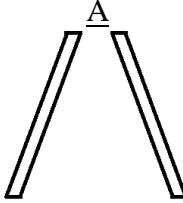


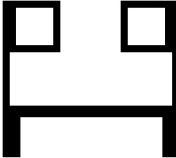
3 RUNKORAKENTEEN IDEOINTI JA MITOITUS

Teoriavaiheen tietojen perusteella voitiin aloittaa runkorakenteen ideointi ja mallinnus. Aluksi suunniteltiin erilaisia vaihtoehtoja, joista valittiin vertailujen jälkeen sopivin ratkaisu. Rakenne mitoitettiin staattista kuormitusta kestäväksi taipuman mukaan ja vastaamaan värähtelyn vaikutuksiin. Oleellista oli, että runkorakenteen ominaistuujuudet eivät olleet kriittisissä kohdissa sorvin pyörimisnopeuteen suhteutettuna. Suunnittelussa pyrittiin hyödyntämään mahdollisimman hyvin DFMA – mallia (Design for Manufacture and Assembly). Tässä kappaleessa syntyneet ideat ja niiden kehittyminen esitetään kronologisessa järjestyksessä.

3.1 Rungon ideointi ja mallinnus

Mallinnuksessa hyödynnettiin alusta alkaen SolidWorks 3D-mallinnusohjelmistoa. Ensimmäisissä luonnoksissa hahmoteltiin, miten runkoon saadaan muodostettua vaadittava geometrinen muoto talttatuen ja kärkipylkän kiinnitystä ja johteita pitkin portaattomasti liikuttamista varten. Samalla suunniteltiin erilaisia kiinnitysvaihtoehtoja moduulien välille sekä jalkarakenteita. Taulukossa 2 on ideamatriisi erilaisista syntyneistä ideoista, joita hahmoteltiin kuvanmuokkausohjelmistolla. Siinä johteista on mallinnettu poikkileikkauksen profiili. Liitoksien ideoita hyödynnettiin erilaisissa moduuleissa valitsemalla aina tapauskohtaisesti sopivin vaihtoehto tai suunniteltiin yhdistelmä useammista vaihtoehtoista.

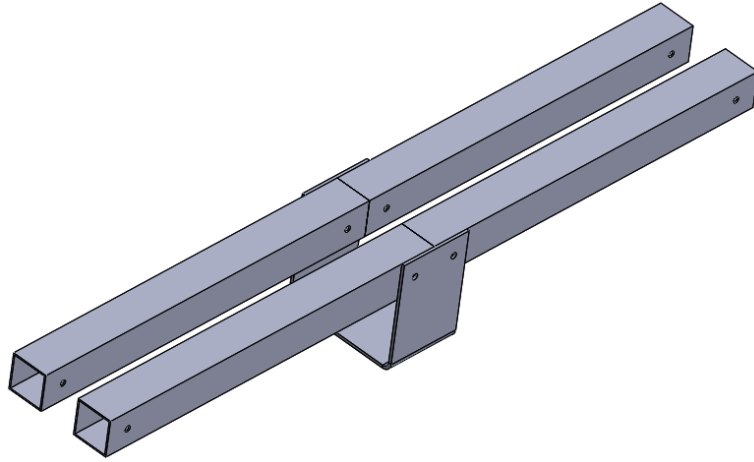
Taulukko 2. Ideamatriisi

Ideamatriisi		Osatoiminto		
		1	2	3
		Johteet	Litos	Jalat
Ratkaisu	1	<u>Neliöprofiili</u> 	<u>Pituussuuntainen</u> 	<u>L</u> 
	2	<u>Neliö- ja suorakaideprofiili</u> 	<u>Syvyysuuntainen</u> 	<u>Ylösalainen L</u> 
	3	<u>C-profiili</u> 	<u>Muotolukitus</u> 	<u>A</u> 
	4	<u>U-profiili</u> 	<u>Edellisten yhdistelmä</u>	
	5	<u>U- ja L-profiili</u> 		
	6	<u>Neliö- ja U-profiili</u> 		

3.2 Johderakenteet

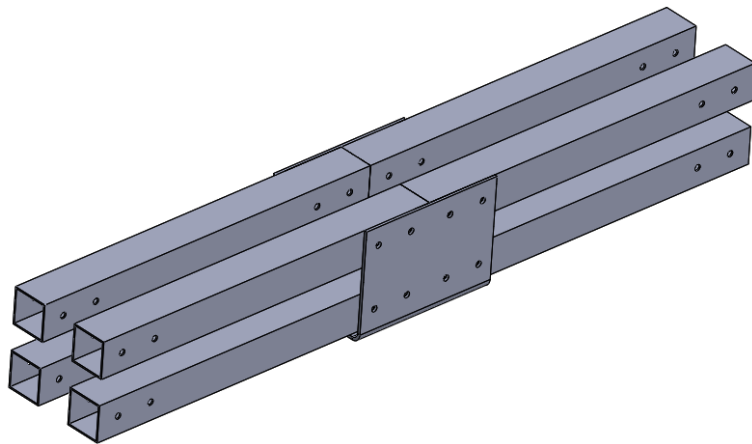
Kuvassa 4 on ensimmäinen mallinnus, jossa rakenne toteutettiin RHS-rakenneputkella ja U-raudalla, jotka liitetään toisiinsa ruuviliitoksilla. Ensimmäinen malli ei ole vielä riittävän

jäykkä kestävämpiin suurimpiin yli kahden metrin kärkiväleihin, mutta kyseistä ideaa voidaan hyödyntää, jos sorvi asetetaan suoraan pöydän päälle.

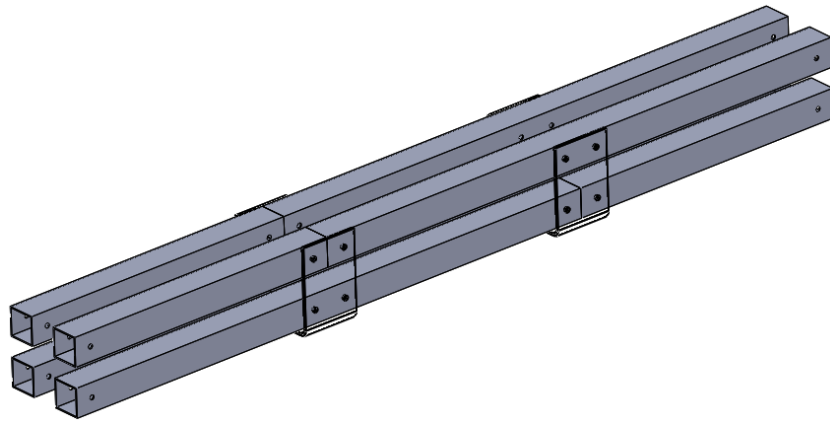


Kuva 6. Periaatekuva modulaarisen rakenteen ensimmäisestä versiosta.

Rakenteesta tehtiin tukevampi lisäämällä rakenneputkien ja ruuviliitosten määrää. Kuvassa 5 on mallinnettu seuraava versio toisiinsa liitetyistä moduuleista. Ruuviliitoksia on oltava kaksi jokaisen rakenneputken päädyssä, jotta liitos ei pääsisi toimimaan saranan tavoin. Ruuviliitosten suuri määrä vaatii myös paljon porattavia reikiä sekä rakenneputkeen että U-rautaan. Ruuviliitosten määrää voidaan vähentää, kun limitetään rakenneputkien liitokset käyttämällä kahta eri pituista putkea vuorotellen. Kuvassa 6 on liitosten kannalta optimoidumpi versio rakenteesta.

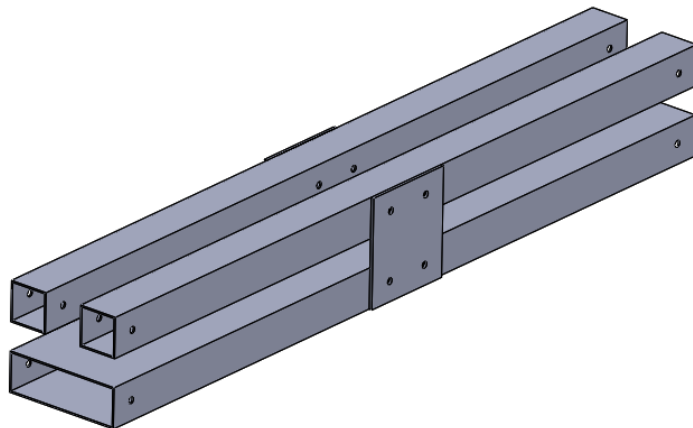


Kuva 7. Ensimmäisen version seuraava kehitemä.



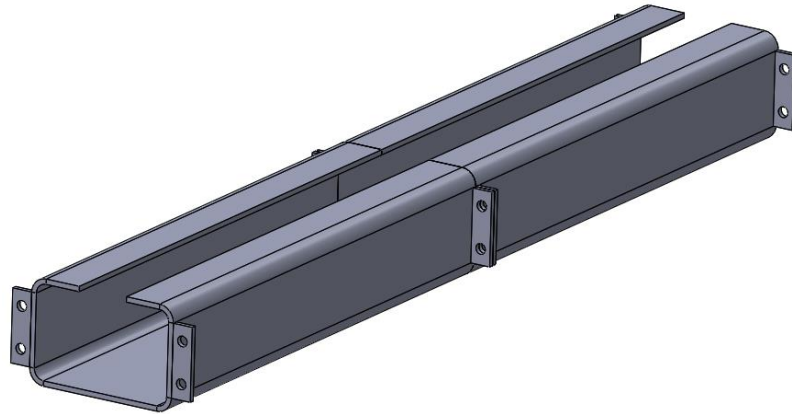
Kuva 8. Ensimmäisen version lopullinen periaatekuva. Liitoskappaleet on muutettu läpinäkyviksi, jotta limitetyt liitokset on helpompi havainnollistaa.

Ensimmäisen idean perustalta pohdittiin miten rakenteen voisi toteuttaa muilla tavoin. Johteiden alarakenteen voi vaihtoehtoisesti rakentaa myös yhdestä profiilista, josta syntyi ajatus, että korvataan kaksi neliöputkea yhdellä suorakaideputkella. Kuvassa 7 on mallinnettu periaatekuva neliö- ja suorakaideprofiililla tehdystä rakenteesta. Ratkaisussa voidaan hyödyntää ensimmäisessä ideassa esille tullutta liitosten limittämistä. Myöhemmässä vaiheessa kuitenkin ilmeni, että oikeankokoisen suorakaideprofiilin saatavuus on harrastelijatason henkilöille haastavaa.



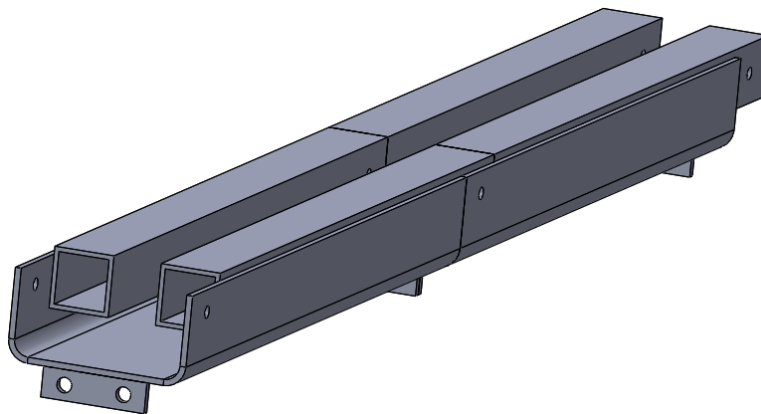
Kuva 9. Toisen johderatkaisun periaatekuva.

Yksinkertaisin ajatus oli hyödyntää c-profiilia, joka sisältää tarvittavan geometrisen muodon jo itsestään. Kuvassa 8 on mallinnettu toisiinsa liitetyt c-profiilista tehty moduulit. Rakenne jäi kuitenkin vain ideatasolle, koska sopivaa c-profiilia ei ollut saatavilla. Vaihtoehto oli kuitenkin mukana vertailuissa ja värähtelyanalyysissä.



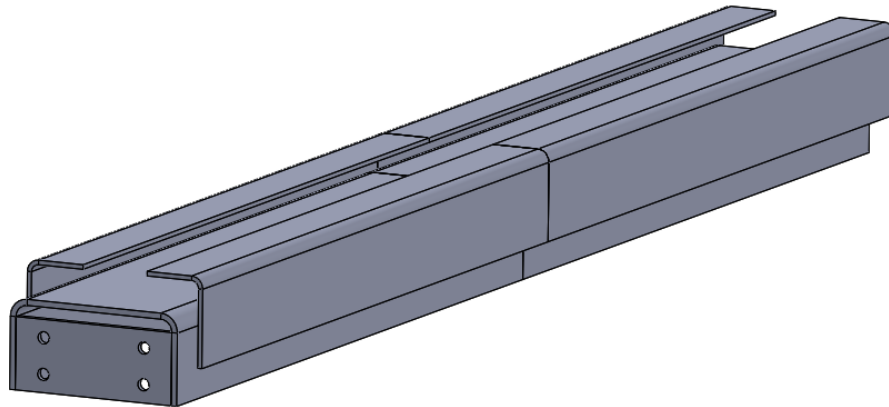
Kuva 10. Kolmannen johderatkaisun periaatekuva.

Kun sopivaa c-profiilia ei ollut suoraan saatavilla, syntyi ajatus, että se tehtäisiin kahdesta erilaisesta profiilista. C-profiilin muoto saadaan, kun u-palkkiin liitetään joko kaksi l- tai neliöprofiilia. Kuvassa 9 on u-palkki, jonka molempiin laippoihin on kiinnitetty rakenneputki. Rakenneputkien tilalla voi käyttää myös l-profiilia. Rakenteessa voidaan hyödyntää myös kuvassa näkyvää toisenlaista kiinnitysmekanismia. Rakenneputket menevät limittäin u-palkin kanssa, millä saadaan parannettua johteiden yhdensuuntaisuutta.



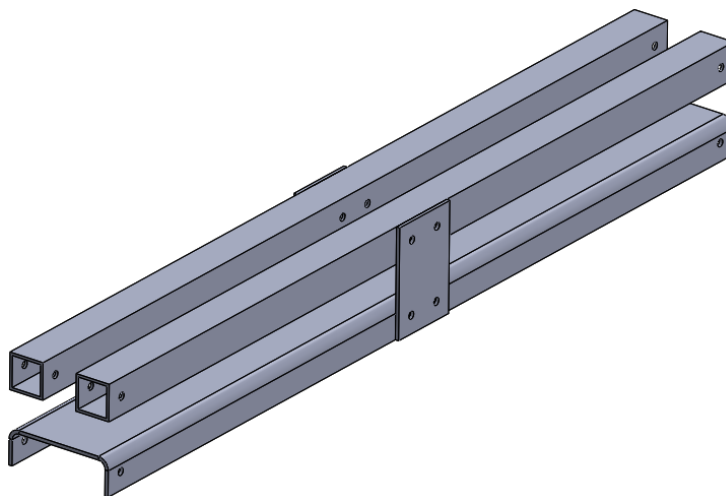
Kuva 11. Neljännen johderatkaisun periaatekuva.

Edellisen idean pohjalta kehitettiin lähes samoista osista rakentuva malli. Kuvassa 10 on mallinnettu aikaisemman idean kaltainen ratkaisu, jossa u-profiili on käännetty toisinpäin. Rakenteesta saadaan esteettisemmän näköinen, kun liitoslevyt jäävät u-palkin sisäpuolelle.



Kuva 12. Viidennen johderatkaisun periaatekuva.

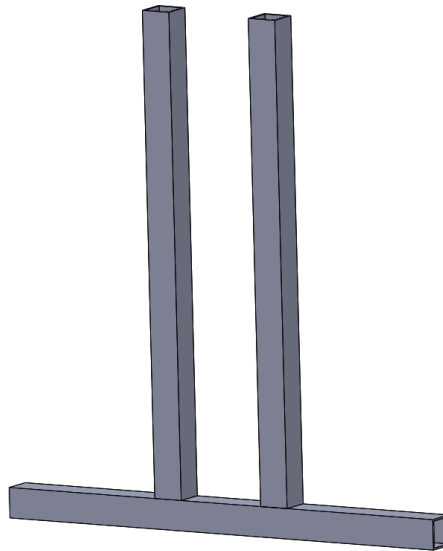
Viimeisessä ratkaisussa yhdisteltiin edellisten ideoiden hyviä ominaisuuksia. Päädyttiin kuvan 11 mukaiseen rakenteeseen, jossa u-palkkiin on liitetty kaksi neliöprofiilia erillisiä liittimiä käyttäen. U-palkin laipat on käännetty osoittamaan alaspäin, jolloin rakenteen kokoonpano helpottuu. Ratkaisussa voidaan myös hyödyntää ylä- ja alakappaleiden liitosten limittämistä.



Kuva 13. Kuudennen johderatkaisun periaatekuva.

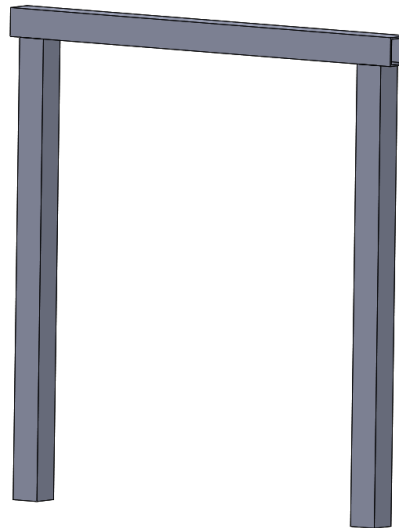
3.3 Jalkarakenteet

Jalkarakenteita pyrittiin ideoimaan sellaisista profiileista, joita pystytään hyödyntämään myös runkorakenteen johteissa. Useissa johderatkaisuissa käytettiin rakenneputkea, joka soveltuu hyvin käytettäväksi myös jalkarakenteisiin. Ensimmäisessä ratkaisussa jalkarakenteessa on kaksi pystyputkea ja niiden alapuolelle on kiinnitetty yksi vaakaputki, jolla on koko pituudeltaan kosketuspintaa lattian kanssa. Kuvassa 12 on esitetty periaatekuva rakenteesta.



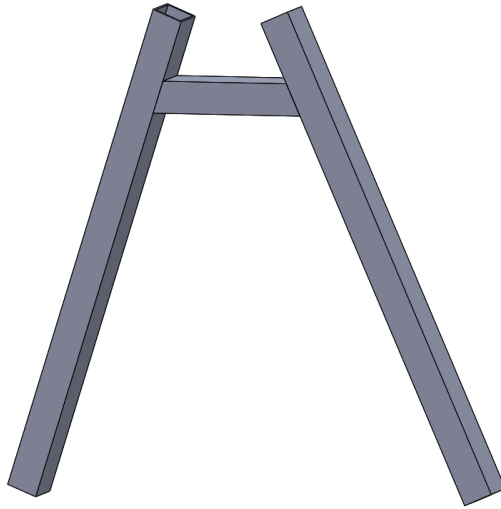
Kuva 14. Ensimmäisen jalkarakenteen periaatekuva.

Toinen idea rakentuu täysin samoista osista kuin ensimmäinen. Siinä pystyputket on sijoitettu leveämmälle ja vaakaputki siirretty niiden yläpuolelle. Rakenteella saadaan neljän pisteen tuenta lattiaan. Kuvassa 13 on mallinnettu periaatekuva jalkarakenteesta.



Kuva 15. Toisen jalkarakenteen periaatekuva.

Kolmannessa ratkaisussa hyödynnetään A-kirjaimen muotoa. Pystyputket vaativat erillisen liitoskappaleen, jotta ne saadaan asettumaan viistoon. Rakenteella saadaan edellisen vaihtoehdon tavoin neljän pisteen tuenta. Kuvassa 14 on esitetty periaatekuva rakenteesta.

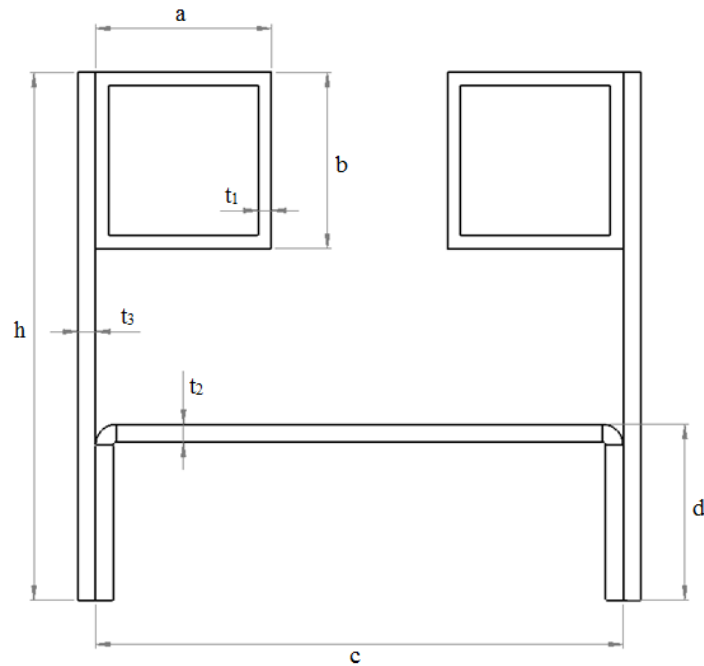


Kuva 16. Kolmannen jalkarakenteen periaatekuva.

3.4 Lopullisen ratkaisun valinta

Ideoitujen mallien pohjalta tehtiin vertailu valmistettavuuden ja kustannuksien näkökulmasta, joiden perusteella valittiin lopullinen ratkaisu. Liitteessä I on johderakenteiden vertailutaulukko, jossa keskityttiin pääsääntöisesti valmistettavuuden vertailuun. Liitteessä II on esitetty samalla periaatteella tehty vertailutaulukko jalkarakenteille. Pisteytys jätettiin pois, koska sitä ei koettu tarpeelliseksi vähäisten osatoimintojen sekä yksinkertaisen rakenteen takia.

Vertailujen perusteella johderakenteen lopullinen valinta voitiin rajata kahden ideamatriisissa esitetyn ratkaisun välille. Vaikka ensimmäisessä vaihtoehdossa oli runsaasti hyviä ominaisuuksia, päädyttiin kuitenkin ratkaisuun numero kuusi, koska se on helpompi valmistaa harrastelijatason laitteilla ja kustannuksiltaan edullisempi. Ainoaksi ongelmaksi valmistukseen jäi u-profiilin käsittely, joka voi harrastelijatason laitteilla koitua haastavaksi. Valmistusmenetelmänä leikkaus kuitenkin onnistuu harrastelijatason laitteilla todennäköisemmin kuin ensimmäisessä ratkaisussa tarvittavan liitoskappaleen taivutus. Kuvassa 17 on esitetty valitun johderakenteen poikkileikkaus.



Kuva 17. Valitun johderatkaisun poikkileikkaus

Jalkarakenteiden välillä ei ollut suuria eroavaisuuksia kustannuksien välillä, jolloin merkittäväksi tekijäksi lopullisessa valinnassa osoittautui valmistettavuus sekä käytännöllisyys. Ensimmäisenä esitetty ratkaisu oli näissä vaatimuksissa muita ideoita parempi eli sen pohjalta alettiin kehittää lopullista jalkarakennetta.

3.5 Kuormien selvittäminen

Runkorakenteen mitoituksen lähtökohtana oli ominaistuuksien poistaminen sorvin pyörimisnopeuden kannalta kriittisiltä alueilta. Lisäksi mitoituksessa huomioitiin johderakenteiden taipuma, joka aiheutuu niiden omasta sekä sorvattavan kappaleen massasta.

Markkinoilla olevissa tämän kokoluokan puusorveissa suurin halkaisija, joka sorvattavalle kappaleelle annetaan ei ylitä 400 millimetriä (Holzmann Maschinen). Sorvauksessa työstettävä puu on painavimmillaan tuoreena. Tammen tiheys voi olla enimmillään 600 kilogrammaan kuutiometriä kohden. (Fagerstedt 2016, s. 108.) Näiden tietojen avulla voidaan määrittää sorvattavan kappaleen massa ja sitä kautta runkorakenteelta vaadittava ainevahvuus.

3.6 Mitoituslaskelmat

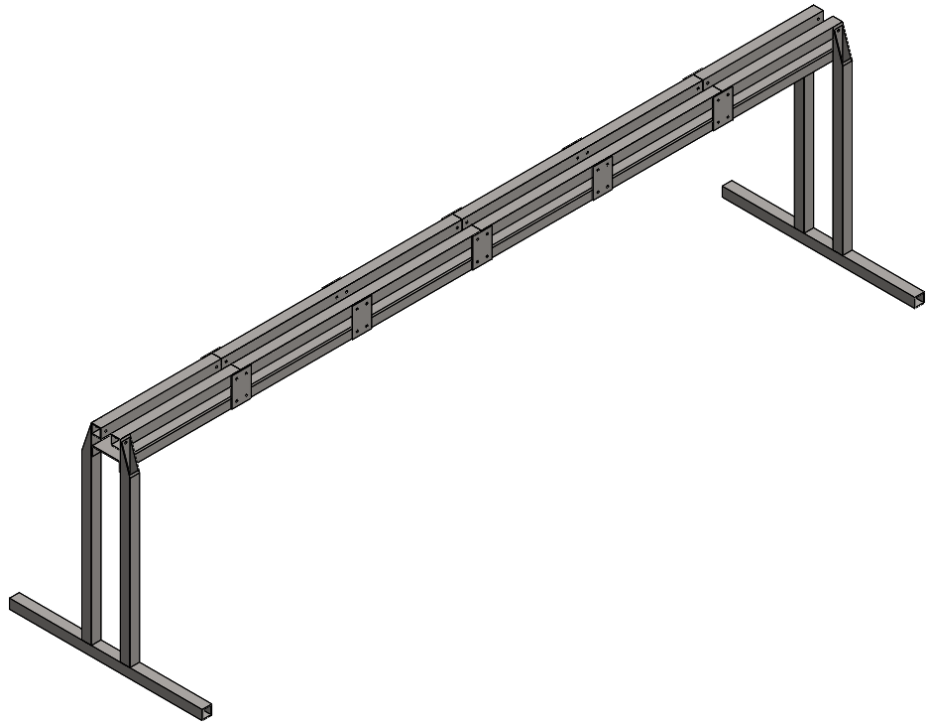
Ennen värähtelyanalyysien tekemistä, täytyi selvittää sorvin runkoon käytettävien profiilien mitat sekä ainepaksuudet ja tarkastaa johteiden taipumat pahimman mahdollisen tilanteen mukaisesti. Analyttisessä laskennassa johteet yksinkertaistettiin yhdeksi kokonaiseksi palkiksi. Profiilien mitat oli valittava siten, että johteisiin saadaan liitettyä talttatuki ja kärkipylkkä mahdollisimman pienillä muutoksilla. Taipuman laskenta on esitetty yksityiskohtaisesti liitteessä III. Laskennassa on käytetty taulukkoon 3 koottuja johderakenteen päämittoja. Liitteen laskuista voidaan havaita, että alustavilla mitoilla taipuman suuruus jää noin yhteen millimetriin. Tulos poikkeaa hieman todellisesta, sillä johderakenne ajateltiin yhtenäiseksi palkiksi.

Taulukko 3. Johderakenteen poikkileikkauksen alustavat päämitat.

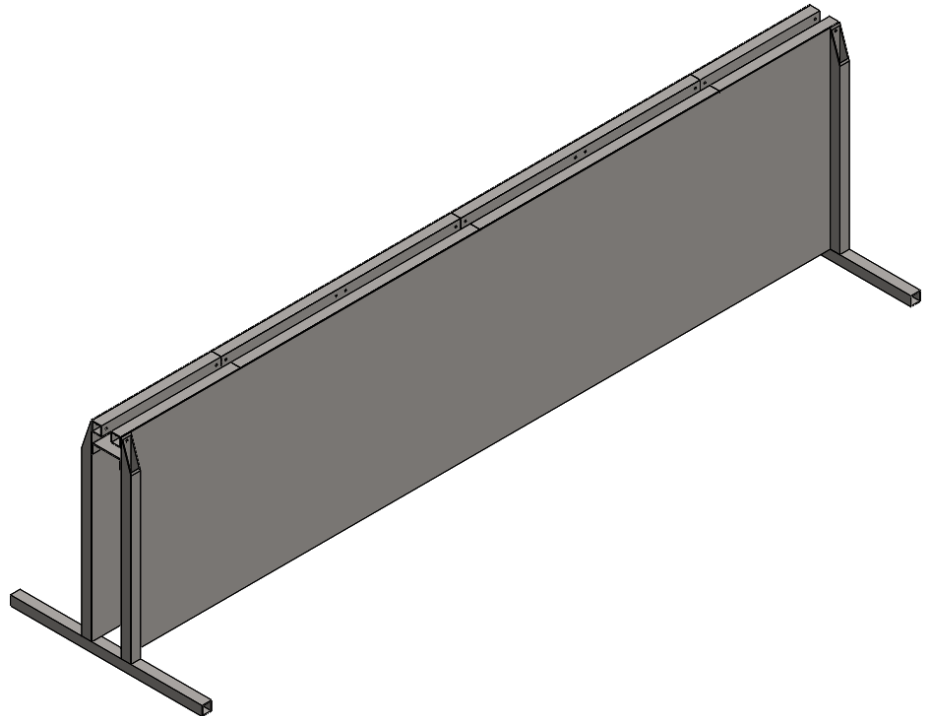
Symboli	a	b	t ₁	c	d	t ₂	h	t ₃
Mitta [mm]	40	40	4	120	4	4	120	4

3.7 Värähtelyanalyysit

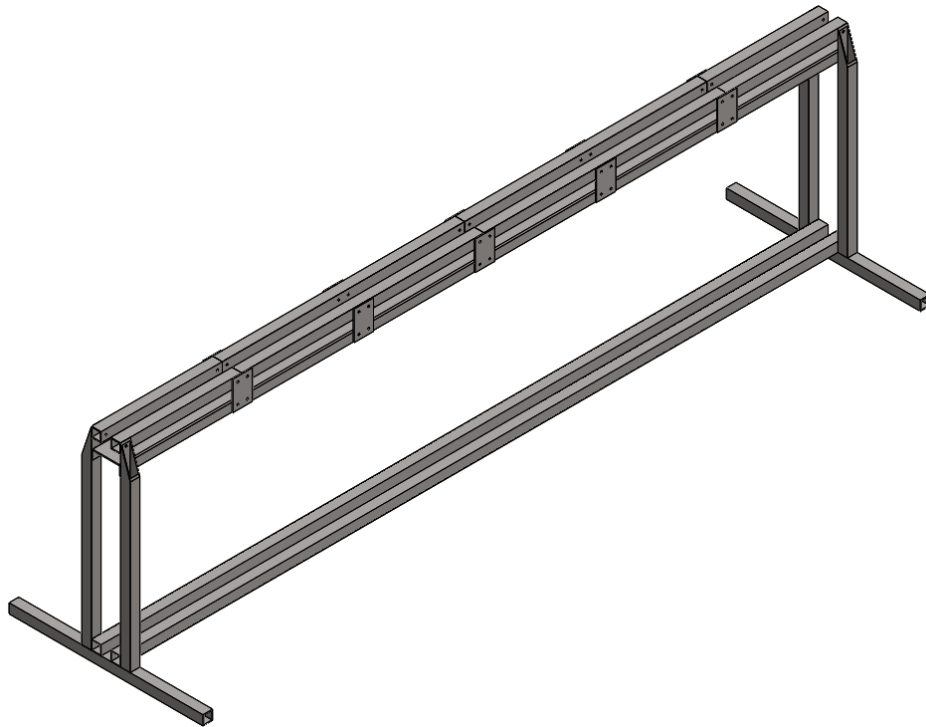
Värähtelyanalyysit tehtiin kuvien 17, 18 ja 19 mukaisille kokoonpanoille. Levy- ja vaakatukia ei suunniteltu modulaarisina ennen, kuin saatiin selville, onko kyseisillä ratkaisuilla mahdollisia vaikutuksia värähtelyjen hallinnassa. Reunaehdot asetettiin siten, että rungon jalkojen alapinnoilta estettiin siirtymät ja kiertymät kaikkiin suuntiin. Tilanne kuvaa sitä, että sorvi on liitetty kiinteästi alustaan, jonka päällä se seisoo. SolidWorksissa ei ollut mahdollisuutta reunaehdolle, joka kuvastaisi tilannetta, jossa sorvi olisi asetettu alustan päälle vapaasti ilman kiinnitystä.



Kuva 18. Yksinkertainen versio kootusta runkorakenteesta.



Kuva 19. Runkorakenne tuettuna ohutlevyllä.



Kuva 20. Runkorakenne tuettuna vaakatuilla.

Taulukossa 3 on esitetty SolidWorksin antamat viisi alinta ominaistajuutta jokaiselle ratkaisuvaihtoehdolle. Taulukosta nähdään, että perusversiossa sekä levytuellisessa versiossa lähes kaikki ominaistajuudet ovat sorvin pyörimisnopeuden sisältämällä alueella tasaisesti jakautuneena. Vaakatuellisessa versiossa ominaistajuudet ovat myös pyörimisnopeuden kannalta kriittisellä alueella, mutta ne ovat jakaantuneet käytännössä katsottuna kahden arvon ympärille.

Taulukko 4. Sorvin runkorakenteiden viisi alinta ominaistajuutta sekä niitä vastaavat kierrosnopeudet.

Perusversio		Levytuki		Vaakatuki	
Taajuus [Hz]	Kierrosnopeus [rpm]	Taajuus [Hz]	Kierrosnopeus [rpm]	Taajuus [Hz]	Kierrosnopeus [rpm]
17,09	1025,52	18,84	1130,34	17,45	1046,82
29,77	1786,32	24,91	1494,78	30,04	1802,58
34,62	2077,14	31,12	1867,08	30,15	1809,00
37,37	2242,32	43,13	2587,74	30,45	1827,18
72,02	4321,14	59,84	3590,22	30,55	1832,76

4 TULOSTEN ANALYSOINTI

Puusorvin rungon kehittämisessä onnistuttiin löytämään rakenteellinen ratkaisu modulaariseen toteutukseen. Rakenteen värähtelyominaisuuksia ei vain saatu täydellisesti sorvaamisen kannalta vaadittavalle tasolle. Erikokoiset profiilit sekä erilaiset tukirakenteet eivät mahdollistaneet kaikkien ominaistuuksien siirtämistä pois sorvin pyörimisnopeuden suhteen kriittiseltä alueelta. Tässä työssä keskityttiin pääasiallisesti värähtelyhallintaan, mutta paremman lopputuloksen saamiseksi tulisi rungon rakenteeseen käyttää enemmän suunnittelutyötä.

4.1 Vertailu nykyisiin rakenteisiin

Moniosaisia modulaarisia puusorveja ei tällä hetkellä löydy markkinoilta. Modulaarisuus on rajoittunut ainoastaan yhteen jatkopalaan. Teräsrakenteet mahdollistavat runkorakenteiden valmistuksen myös pienemmille toimijoille, sillä valmistuksen ja kokoonpanon laitteistovaatimukset ovat vähäisemmät kuin perinteisemmissä valurautaisissa ratkaisuissa. Modulaarisuudella voi olla vaikutuksia myös teknisten asioiden ulkopuolella esimerkiksi logistiikassa. Osina toimitettavat runkorakenteet vievät koottuja rakenteita vähemmän kuljetustilaa.

4.2 Virhetarkastelu

Tässä työssä mahdolliset virheet painottuivat ensisijaisesti SolidWorksilla tehtyihin värähtelyanalyysiin. Todellisia reunaehtoja ei pystytty määrittämään tilanteeseen, jossa sorvi ei ole kiinnitettynä lattiaan, vaan on vapaasti liikuteltavissa. Analyyseissä ei myöskään otettu huomioon sorvin rungon lisäksi muiden osien sekä sorvattavan kappaleen vaikutusta värähtelyn ominaistuuksiin. Lujuuslaskennassa rakenne mitoitettiin kestämään staattista kuormitusta. Tarkempien tuloksien saamiseksi laskennassa olisi pitänyt huomioida myös mahdollinen sorvattavan kappaleen epäkeskeisyyden aiheuttama väsyttävä kuormitus. Tämä asia pystytään kuitenkin kompensoimaan varmuusluvulla.

4.3 Jatkotutkimusaiheet

Tätä työtä tehdessä ilmeni kolme jatkotutkimuksen ja –kehityksen aihetta, jotka ovat seuraavat:

- Tärinäeristysten hyödyntäminen
- Rakenteen yksityiskohtaisemmat lujuus- ja väsymislaskennat
- Lisälaitteet ja niiden kiinnitysmahdollisuudet

Tärinäeristysten hyödyntämisessä tutkitaan, voidaanko niitä käyttämällä vähentää värähtelyn vaikutuksia. Perehdytään tärinäeristimien eri materiaalivaihtoehtoihin sekä mihin rakenteen kohtiin niitä tulisi sijoittaa saavuttaakseen parhaan mahdollisen tuloksen. Pyörivä liike aiheuttaa väsyttävää kuormitusta, mikä vaatii rakenteelle tarkemmat väsymislaskelmat. Myös tietyille rakenteen yksityiskohdille kuten ruuviliitoksille sekä moduulien liitoslevyille olisi hyvä tehdä tarkemmat lujuuslaskelmat. Rakenteesta tulisi myös tarkastaa, ettei mihinkään kohtaan synny paikallisia muodonmuutoksia tai plastisoitumista. Jo alun perin lisälaitteet ja niiden kiinnitysmahdollisuudet rajattiin pois tästä kandidaatintyöstä. Jos tässä työssä kehiteltyä sorvia ei saada käyttökelpoiseksi, voidaan lisälaitteet suunnitella käymään joko merkkikohtaisesti tai merkistä riippumattomasti muihin sorveihin.

5 YHTEENVETO

Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli kehittää hitsatuista teräsrakenteista modulaarinen runkorakenne puusorviin. Idea syntyi harrastelijatason sorvaajalta, jonka tarkoituksena oli alkaa valmistaa kyseistä tuotetta piensarjatuotantona. Modulaarisuuden lisäksi suunnittelussa täytyi ottaa huomioon koneturvallisuus, budjetti sekä rakenteelliset asiat, jotka vaikuttavat sorvattavan kappaleen lopulliseen pinnanlaatuun.

Kirjallisuuskatsauksessa perehdyttiin runkorakenteen ideoinnissa tarvittavaan teoriaa. Tutustuttiin yleisesti sorvaukseen ja sorveihin sekä suunnittelussa tarvittavaan lujuuslaskentaan ja värähtelyyn. Runkorakenteen suunnittelu alkoi luonnostelemalla runsaasti erilaisia modulaarisesti toimivia johderakenteita sekä jalkarakenteita. Valmistustekninen näkökulma oli huomioitava suunnittelussa siinä määrin, että kehitellyt ratkaisut voidaan valmistaa yksinkertaisella laitteistolla. Ideoita syntyi runsaasti, joista valittiin itsenäisesti tehtyjen vertailujen avulla paras vaihtoehto.

Valittu johderakenne suunniteltiin yleisesti saatavilla olevien rakenneteräksien mukaan sopivan mittaiseksi ja tarkastettiin analyttisesti taipuma. Kun lopulliset dimensiot olivat selvillä, voitiin rakenteelle tehdä värähtelyanalyysit käyttäen SolidWorks-ohjelmistoa. Runkorakenteeseen suunniteltiin ja lisättiin erilaisia tuentavaihtoehtoja, jotta vaadittavat värähtelyominaisuudet olisi saatu edellytettävälle tasolle.

Puusorvin runko voidaan toteuttaa teräsrakenteista modulaarisena, mutta materiaalin ja rakenteen kapasiteetti ei ole riittävä poistamaan värähtelyn asettamia vaatimuksia. Yksikään ideoiduista ratkaisuista ei täyttänyt vaadittavia värähtelyominaisuuksia. Lähimmäksi päästiin vaakatuellisella vaihtoehdolla, jossa ominaistajuudet keskittyivät kahden arvon ympärille.

LÄHTEET

400/2008. Valtioneuvoston asetus koneiden turvallisuudesta. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 14.2.2017]. Saatavilla: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2008/20080400>

Aaltonen, K. 1997. Sorvaus. Teoksessa: Aaltonen, K. & Andersson, P. & Kauppinen, V. Koneistustekniikat. Porvoo: WSOY. s. 176-197.

Bernardo. 2016. Woodturning Lathes. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 12.2.2017]. Saatavilla: http://www.bernardo.at/kataloge/2016/holz/en/06_woodturning_lathes_en/index.html

Fagerstedt, K. 2016. Tunnista puu ja puuaine. 1. painos. Latvia: Metsäkustannus Oy. 108 s.

Holzmann Maschinen. Puusorvien tuoteluettelo. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 12.2.2017]. Saatavilla: <http://www.holzmann-maschinen.at/EN/products/wood-lathe-1595>

Kerkkänen, K. 2017. Kandityön sisällysluettelomalli ja infoa aiheesta [Yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Jere Partti. Lähetetty 10.1.2017 klo 18.46 (GMT +0200).

Kärkkäinen, M. 2003. Puutieteen perusteet. Hämeenlinna: Karisto Oy. s. 147

Rockler. 2014. Basic Lathe Anatomy. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 7.2.2017]. Saatavilla: <http://www.rockler.com/how-to/basic-lathe-anatomy/>

Pahl, G. & Beitz, W. 1986. Koneensuunnitteluoppi. 2. painos. Helsinki: Suomen Metalli-, Kone- ja Sähköteknisen Teollisuuden Keskusliitto. 608 s.

Pennala, E. 1999a. Koneiden ja rakenteiden värähtelyt. 2. painos. Helsinki: Oy Yliopistokustannus/Otatieto. 314 s.

Pennala, E. 1999b. Lujuusopin perusteet 9. painos. Helsinki: Otatieto Oy 400 s.

Pöllänen, I. 2017. Diplomi-insinööri, Etteplan Oy. Lappeenranta, Lappeenrannan teknillinen yliopisto: Haastattelu 3.4.2017.

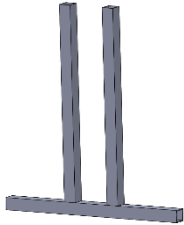
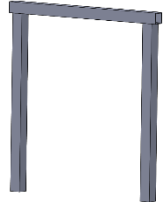

Rao, S. S. 2000. Mechanical Vibrations. 4. painos. Intia: Pearson Education. 1078 s

VS-Market. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 19.3.2017]. Saatavilla: <http://www.vs-market.fi/fi/6-teras>

Johderakenteiden vertailu

Nro	Periaatekuva	Edut	Haitat
1		<ul style="list-style-type: none"> + Yksinkertainen rakenne + Ei vaadi hitsausta + Pieniä profileja helppo käsitellä + Vähän erilaisia osia + Pöytämalli optimoitu + Samojen profiilien hyödynnettävyys jalkarakenteissa + Edullinen ja helppo valmistus 	<ul style="list-style-type: none"> - Liitoskappale vaatii taivutusta - Ruuviliitosten suuri määrä - Moniosainen kokoonpano
2		<ul style="list-style-type: none"> + Yksinkertainen rakenne + Edullinen ja helppo valmistus + Liitoskappale ei vaadi taivutusta + Samojen profiilien hyödynnettävyys jalkarakenteissa 	<ul style="list-style-type: none"> - Suorakaidenprofiilin saatavuus - Tarve pitkille ruuveille
3		<ul style="list-style-type: none"> + Yksinkertainen rakenne + Vähän erilaisia osia + Helposti kokoonpantava 	<ul style="list-style-type: none"> - Profiiline saatavuus - Johteiden yhdensuuntaisuus - Hitsauksen tarve - Kallis valmistus - Profiilin leikkaus
4		<ul style="list-style-type: none"> + Johteiden yhdensuuntaisuus + Helposti kokoonpantava 	<ul style="list-style-type: none"> - Erialaisten osien määrä - Kallis ja monimutkainen valmistus - Hitsauksen tarve
5		<ul style="list-style-type: none"> + Johteiden yhdensuuntaisuus + Helposi kokoonpantava 	<ul style="list-style-type: none"> - Hitsauksen tarve - Erialaisten osien määrä - Moniosainen valmistus
6		<ul style="list-style-type: none"> + Yksikertainen rakenne + Ei vaadi hitsausta + Samojen profiilien hyödynnettävyys jalkarakenteissa + Helppo kokoonpanna + Pöytämällin optimointi mahdollista 	<ul style="list-style-type: none"> - U-profiilin käsittely - Moniosainen kokoonpano - Ruuviliitosten suuri määrä

Jalkarakenteiden vertailu

Nro	Periaatekuva	Edut	Haitat
1		+ Yksinkertainen rakenne + Edullinen ja helppo valmistus	- Vaatii tasaisen lattian
2		+ Yksinkertainen rakenne + Edullinen ja helppo valmistus + Nelipiste kosketus lattiaan	- Laajalle ulottuva ylätuki - Kiinnitys johteisiin
3		+ Yksinkertainen rakenne + Vähäinen materiaalin tarve + Nelipiste kosketus lattiaan	- Monimutkainen valmistus - Kiinnitys johteisiin

Analyttinen laskenta

Jäyhydet

RHS – profiili

$$t_1 := 4$$

$$a := 40$$

$$b := 40$$

$$A_r := a \cdot b - (a - 2 \cdot t_1) \cdot (b - 2 \cdot t_1) = 576$$

$$I_r := \frac{a \cdot b^3}{12} - \frac{(a - 2 \cdot t_1) \cdot (b - 2 \cdot t_1)^3}{12} = 1.26 \times 10^5$$

UPE – palkki

$$t_2 := 4$$

$$c := 120$$

$$d := 60$$

$$A_u := c \cdot d - (c - 2 \cdot t_2) \cdot (d - t_2) = 928$$

$$y_u := \frac{2 \cdot (d - t_2) \cdot t_2 \cdot \frac{(d - t_2)}{2} + c \cdot t_2 \cdot \left(d - \frac{t_2}{2}\right)}{2 \cdot (d - t_2) \cdot t_2 + c \cdot t_2} = 43.517$$

$$I_u := 2 \cdot \left[\frac{t_2 \cdot (d - t_2)^3}{12} + \left[t_2 \cdot (d - t_2) \cdot \left[y_u - \frac{(d - t_2)}{2} \right]^2 \right] \right] + \left[\frac{c \cdot t_2^3}{12} + c \cdot t_2 \cdot \left(d - y_u - \frac{t_2}{2} \right)^2 \right] = 3.263 \times 10^5$$

Yhdistetty jäyhyys

$$\text{Profiilin kokonaiskorkeus} \quad h_{\text{profil}} := 120$$

$$y_r := h_{\text{profil}} - \frac{b}{2} = 100$$

$$y_{\text{profil}} := \frac{A_u \cdot y_u + 2A_r \cdot y_r}{A_u + A_r} = 103.447$$

$$d_r := |y_r - y_{\text{profil}}| = 3.447$$

$$d_u := |y_{\text{profil}} - y_u| = 59.93$$

$$I_{\text{profil}} := 2(I_r + A_r \cdot d_r^2) + I_u + A_u \cdot d_u^2 = 3.925 \times 10^6$$

Taipumat

Johderakenteen oman massan aiheuttama

$$E := 210000$$

$$L_{\text{sorvi}} := 3000$$

$$\rho := 8000 \cdot 10^{-9}$$

$$A_{\text{profil}} := 2 \cdot A_r + A_u = 2.08 \times 10^3$$

$$V_{\text{profil}} := A_{\text{profil}} \cdot L_{\text{sorvi}} = 6.24 \times 10^6$$

$$m_{\text{sorvi}} := \rho \cdot V_{\text{profil}} = 49.92$$

$$q := \frac{m_{\text{sorvi}} \cdot 9.81}{L_{\text{sorvi}}} = 0.163$$

$$v_{\text{max1}} := \frac{5 \cdot q \cdot L_{\text{sorvi}}^4}{384 \cdot E \cdot I_{\text{profil}}} = 0.209$$

Sorvattavan kappaleen massan aiheuttama

$$\rho_{\text{puu}} := 800 \cdot 10^{-9} \quad d_{\text{kappale}} := 400$$

$$m_{\text{kappale}} := \frac{\pi}{4} \cdot d_{\text{kappale}}^2 \cdot \frac{s}{2} \cdot \rho_{\text{puu}} = 125.664$$

$$F_{\text{kappale}} := m_{\text{kappale}} \cdot 9.81 = 1.233 \times 10^3$$

$$v_{\text{max_kappale}} := \frac{\frac{F_{\text{kappale}}}{2} \cdot L_{\text{sorvi}}^3}{48 \cdot E \cdot I_{\text{profil}}} = 0.421$$

Kokonaistaipuma

$$v_{\text{max_tot}} := v_{\text{max1}} + v_{\text{max_kappale}} = 0.63$$