



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Juha Kairismaa

GEOMETRIAN VERTAILU
NOSTOAPUVÄLINEEN LUJUUS-
LASKENNASSA

Tekniikka
2020

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Juha Kairismaa
Opinnäytetyön nimi	Geometrian vertailu nostoapuvälineen lujuuslaskennassa
Vuosi	2020
Kieli	suomi
Sivumäärä	36
Ohjaaja	Jari Lehtiö

Työn tavoitteena oli tutkia C-raudan geometrioita ja etsiä tapauksia, joissa sisäisen suunnitteluohjeen sisältämä laskentatapa tuottaisi nostoapuvälineen rakenteeseen pienempiä jännityksiä, kuin EN 13155 -standardin mukainen laskentatapa.

Opinnäytetyön teoreettisessa viitekehyksessä käsitellään lyhyesti lujuusopin peruskäsitteitä sekä nostoapuvälinettä määritelmänä. Tutkimusosiossa määritellään tarkemmin ongelman tausta sekä tutkimuksessa käytetyt menetelmät sekä ohjelmistot. Tutkimuksen alkuarvot saatiin olemassa olevasta C-raudasta, jossa oli esiintynyt tutkimusongelman mukainen geometria.

Tutkimuksen tuloksia ja havaintoja käsitellään opinnäytetyön loppuosassa. Tutkimuksen pääasiallisia havaintoja olivat kaksi yhtälöä, joita voidaan käyttää kuormituksen havainnointiin sekä havainto nosto- ja kuorman kiinnityspisteen vaakasuuntaisesta etäisyydestä suhteessa nostoapuvälineen korkeuteen.

ABSTRACT

Author	Juha Kairismaa
Title	Comparison of Lifting Device Geometry in Strength Calculations
Year	2020
Language	Finnish
Pages	36
Name of Supervisor	Jari Lehtiö

The objective of this thesis was to examine the geometry of C-shaped lifting devices and discover possible scenarios where the usage of TES' internal calculation guidelines would produce results that would indicate lower stresses in the structure compared to calculations performed according to the EN 13155 standard.

Autodesk Robot Structural Analysis Professional was used for the analysis of the static models. A previously designed lifting device was used as reference for the static models. The static model of the lifting device was broken down to three pieces and each one was assigned a mathematical variable. Microsoft Excel was used to store and analyze the data that was produced. A connection between the mathematical variables was discovered.

The key points of the findings are two equations that can be used to evaluate the load of the lifting device and an observation of how the problem may occur when the structure of the lifting device is tall and the distance between lift and load attachment points is close on the horizontal axis.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO JA YRITYKSEN ESITTELY	8
1.1	Johdanto	8
1.2	Yrityksen esittely	8
2	TUTKIMUSONGELMAN TAUSTA JA ESITTELY	10
2.1	Tutkimusongelman tausta	10
2.2	Tutkimusongelman esittely	11
3	LUJUUSLASKENTA	13
3.1	Lujuuslaskennan peruskuormitukset.....	13
3.2	Veto ja puristus	13
3.3	Leikkaus.....	14
3.4	Taivutus.....	15
3.5	Vääntö	15
3.6	Laskentatavat	16
3.6.1	Käsin tehtävä laskenta.....	16
3.6.2	FEA- ja FEM-laskenta	17
3.6.3	Olemassa olevien laskentadokumenttien hyödyntäminen	18
4	NOSTOAPUVÄLINEET	19
4.1	Määritelmä	19
4.2	Nostoapuvälineiden tyypit	19
4.3	Nostoapuvälineen suunnittelu	20
4.4	Markkinoille saattaminen.....	20
5	SUUNNITTELU- JA TOTEUTUSVAIHE	22
5.1	Opinnäytetyön suunnitteluvaihe	22
5.2	Opinnäytetyön toteutusvaihe	22
6	TULOKSET	26
6.1	Momenttikuorma kiinnityspisteessä	26
6.2	Jännitykset.....	28

7	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA	31
7.1	Tulosten tarkastelu	31
7.2	Johtopäätökset.....	31
7.3	Tutkimuksen eettisyys ja tulosten luotettavuus	32
7.4	Opinnäytetyön tulosten jatkokehitys.....	33
7.5	Yhteenveto	34
	LÄHTEET.....	35

KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO

Kuva 1. Esimerkki veto- ja puristussauvoista. /7, s.57/	14
Kuva 2. Esimerkki leikkauksesta. Kuvassa harmaa kappale on asetettu tummien tukien päälle ja ulkoinen voima leikkaa kappaleesta palan. /6, s.51/.....	15
Kuva 3. Esimerkki ylhäältä päin kuormitetun palkin taipumisesta. /7, s. 78/	15
Kuva 4. Poikkileikkauksen kiertyminen /6, s. 241/.....	16
Kuva 5. Kuvakaappaus NX-suunnitteluohjelmiston Design Simulation -näkökulmasta	18
Kuva 6. Nostoapuvälineen staattiset mallit ja muuttujat.	24
Taulukko 1. Kallistetusta kuormituksesta aiheutuva momentti suurempi.....	27
Taulukko 2. Kiinnityspisteeseen kohdistuva momentti lähes tasan.	27
Taulukko 3. Suorasta kuormituksesta aiheutuva momentti suurempi.....	27
Taulukko 4. Kallistetun kuormituksen aiheuttama jännitys suurempi.	29
Taulukko 5. Rakenteen jännitykset lähes tasan.	29
Taulukko 6. Suoran kuormituksen aiheuttama jännitys suurempi.....	29
Taulukko 7. Kaavan 2 toiminnassa havaitut poikkeamat.	30

SANASTO

Plastinen muodonmuutos	Materiaalin kuormittaminen sellaisella tavalla, jossa materiaalin myötöraja ylittyy ja kappale muovautuu pysyvästi uudelleen.
Myötölujuus	Lujuuslaskennassa käytettävä arvo, joka osoittaa jännityksen arvon, minkä ylittäminen johtaa kappaleen pysyvään muodonmuutokseen.
Jännitys	Kuormittavan voiman suhde kappaleen poikkileikkauksen pinta-alaan.
CAD	Computer-Aided Design, eli tietokoneavusteinen suunnittelu
3D-CAD	Kolmiulotteista grafiikkaa tuottava suunnitteluohjelmisto
Tekninen tiedosto	Teknisellä tiedostolla tarkoitetaan dokumenttia, joka sisältää nostoapuvälineen suunnittelun perusteena olleita tietoja, kuten lujuuslaskelmia.
TES	Tool and Equipment Specialists, työkalusuunnitteluosastosta käytetty lyhenne.
WLL	Working Load Limit, eli nostoapuvälineen kapasiteetti.

1 JOHDANTO JA YRITYKSEN ESITTELY

Tässä kappaleessa käsitellään opinnäytetyön perusasiat, minkä tarkoituksena on antaa lukijalle käsitys työstä, sen tavoitteista ja työn tilaajasta. Johdannon jälkeen siirytään yrityksen esittelyyn, jossa käydään lyhyesti läpi toimeksiantajayrityksen historia sekä nykytilanne.

1.1 Johdanto

Tämä opinnäytetyö tehtiin Wärtsilän Vaasan tehtaan Tool & Devices Design -osastolle, missä suunnitellaan tehtaan tarvitsemia erikoistyökaluja, sekä nostoapuvälineitä. Koska nostoapuvälineitä suunniteltaessa on noudatettava tiettyjä standardeja ja määräyksiä, on Wärtsilän Vaasan tehtaan työkalusuunnitteluosasto tehnyt oman, sisäiseen käyttöön tarkoitetun laskentaohjeen, jota voidaan käyttää apuna nostoapuvälineen suunnittelussa. Laskentaohje pohjautuu standardissa SFS-EN 13155 (Nosturit. Turvallisuus. Irrotettavat nostoapuvälineet) ja konedirektiivissä määriteltyihin vaatimuksiin. Vaasan tehtaalla käytetään useita erilaisia nostoapuvälineitä, mutta tässä opinnäytetyössä keskitytään C-raudan mukaiseen nostoapuvälineen geometriaan, koska kyseinen nostoapuvälineen tyyppi on yleinen Wärtsilän Vaasan tehtaalla. /1, 2/

Opinnäytetyön tavoitteena on vertailla standardiin perustuvan laskennan, sekä uuteen laskentaohjeeseen perustuvan laskennan eroja ja niiden pohjalta löytää kuormitustapauksia, joissa uuden laskentaohjeen mukainen laskentatapa tuottaa tarkasteltavalle geometrialle pienempiä jännityksiä, kuin standardissa määritelty laskentatapa. Löydettyjen kuormitustapausten pohjalta on tarkoituksena saada suosituksia tai ohjeistuksia suunnittelijoille, minkä pohjalta suunnittelija voi arvioida rakentamiseen kohdistuvia kuormituksia.

1.2 Yrityksen esittely

Wärtsilä on vuonna 1834 perustettu suomalainen yritys. Nykyään Wärtsilä on kansainvälinen, johtava, älykkääseen teknologiaan ja kokonaislinkaariratkaisuihin

keskittyvä toimittaja globaaleilla merenkulku- ja energiamarkkinoilla. Wärtsilän tavoitteena on maksimoida asiakkaidensa alusten ja voimaloiden ympäristötehokkuutta ja taloudellisuutta keskittymällä kestäviin innovaatioihin, kokonaishyöty-suhteeseen ja data-analytiikkaan. Wärtsilällä on yli 200 toimipistettä yli 80 maassa eri puolilla maailmaa. Wärtsilän liiketoimintayksiköitä tällä hetkellä ovat Marine Business ja Energy Business. /3/

Marine Business -liiketoimintayksikkö keskittyy tukemaan meri-, öljy- ja kaasuteollisuudessa toimivien asiakkaidensa liiketoimintaa tarjoamalla erilaisia ratkaisuja, jotka ovat turvallisia, ympäristömyötäisiä, taloudellisia, tehokkaita ja joustavia. Räätelöidyt ratkaisut tarjoat eri puolilla maailmaa toimiville asiakkaille optimaaliset edut. /3/

Energy Business -liiketoimintayksikön tavoitteena on johtaa muutosta kohti tulevaisuutta, jossa energia on sataprosenttisen uusiutuvaa. Tavoitteeseen pyritään suunnittelemalla ja rakentamalla optimaalisia energiajärjestelmiä tulevia sukupolvia varten. Tarjonta sisältää erilaisia tuotteita moottorikäyttöisistä voimalaitoksista hybridiaurinkovoimaloihin sekä energian varastointiin. /3/

Services-liiketoimintayksikkö on nykyisin osa Marine Business- ja Energy Business -yksiköjä. Sen tarkoituksena oli keskittyä tukemaan asiakkaalle toimitettua järjestelmää sen koko elinkaaren ajan optimoimalla hyötysuhdetta ja suorituskykyä. Huoltopalveluita tarjotaan monille eri osa-alueille, kuten moottoreille, potkureille, sähkö- ja automaatiotuotteille, huoltoprojekteille ja koulutuspalveluille. Wärtsilän Services palveluvalikoima on alansa laajin maailmassa. /3–5/

2 TUTKIMUSONGELMAN TAUSTA JA ESITTELY

Tässä kappaleessa käsitellään opinnäytetyön tutkimusongelma ja sen taustat. Tutkimusongelman tausta kuvaillaan yksinkertaisten esimerkkien avulla, jotta lukijan olisi helpompi ymmärtää kaksi asiaa; miksi nostoapuvälineitä suunnitellaan ja miksi niiden suunnittelussa on haasteita. Ongelman esittelykappaleessa tutkimusongelma esitellään yksityiskohtaisesti.

2.1 Tutkimusongelman tausta

Moottoreihin asennettävien komponenttien ominaisuuksista, kuten painosta ja koosta johtuen, joudutaan kokoonpanovaiheita varten suunnittelemaan joissakin tapauksissa erikoistyökaluja ja nostovälineitä. Usein komponentit asennetaan sellaisiin paikkoihin, joissa nostoketjuista ja standardiosista valmistettava yhdistelmä ei sovellu kyseiseen työvaiheeseen. Standardiosien käyttökelvottomuus saattaa johtua edellisissä työvaiheissa asennetuista komponenteista tai tarpeesta sijoitella asennettava komponentti esimerkiksi moottorilohkon sisään, jolloin suoraan yläpuolelta tapahtuva nosto ei ole mahdollinen. Tällaisia moottorilohkon sisälle asennettavia komponentteja ovat esimerkiksi hammaspyörät. Komponentin geometria voi olla sellainen, että sitä ei voida nostaa pelkän ketjun avulla. Usein toimivin ratkaisu nostoapuvälineelle tällaisissa tapauksissa on C-rauta, jonka avulla olemassa olevia nostureita voidaan käyttää hyödyksi komponenttien nostoissa, sekä asennuksessa. /1, 2/

Käytettävien nostoapuvälineiden on oltava turvallisia käyttää ja niiden on kestävä niillä nostettavat kuormat ilman, että nostoapuväline vaurioituu tai vahingoittaa ihmisiä tai nostettavaa kuormaa. Wärtsilässä suunnitellun nostoapuvälineen tulee täyttää konedirektiivin sille asettamat vaatimukset. Konedirektiivin lisäksi standardia EN 13155 voidaan käyttää apuna nostoapuvälineen suunnittelussa. Standardissa määritellään nostoapuvälineelle ja sen kestävyydelle tiettyjä rajoja. Standardin kappaleessa 5.1.1 ”Mekaaniset, kuormaa kantavat osat” on määrätty, että nostoapuväline tulee suunnitella kestävänsä staattinen kuorma, joka on kolme kertaa nostokyky, vaikka nostoapuvälineen rakenteessa tapahtuisi pysyvä muodonmuutos. Pysyvä muodonmuutos saattaa tulla kyseeseen, mikäli nostoapuvälineen rakennetta

ylikuormitetaan riittävästi, jolloin materiaalin myötölujuus ylittyy ja nostoapuvälineen rakenne muokkautuu uudelleen. Esimerkiksi ylikuormitustilanteessa nostoapuvälineen jokin osa taipuu ja muodonmuutoksen vuoksi ei enää palaudu alkuperäiseen mittaansa, kun kuormitus poistuu. /1/

Nostoapuvälineen varmuuskertoimien lisäksi standardissa, että nostoapuvälineen on kestettävä 6:n asteen kallistuma työskentelyasentoonsa nähden siitä huolimatta, onko nostoapuväline suunniteltu kallistuvaksi vai kallistumatta toimivaksi. Edellä mainittu asia tulee nostoapuvälineen suunnittelijan huomioida jo suunnitteluvaiheessa, jotta vältetään ylimääräisiltä suunnitteluiteraatioilta, jos myöhemmässä vaiheessa havaittaisi, että rakenne ei kestäkään sille määriteltyä kuormaa. /1/

2.2 Tutkimusongelman esittely

Standardin määrittämän 6:n asteen kallistuman huomioiminen tekee lujuuslaskennasta monimutkaisempaa, sillä laskentatapauksia tulee tällöin enemmän. Laskentatapauksien lisääntyminen aiheuttaa lisäkustannuksia nostoapuvälineen suunnitteluun, sillä laskentojen suorittamiseen kuluu enemmän aikaa. Asiaan on pyritty kehittämään uusi sisäinen suunnitteluohje, minkä mukaan kallistuman laskeminen voitaisiin korvata korottamalla varmuuskerroin 4-kertaiseksi 3-kertaisen sijasta ja huomioimalla vain 4-kertainen suora kuormitus. Varmuuskertoimen nostaminen 4-kertaiseksi pyrkii ottamaan huomioon kallistumasta aiheutuvat momenttikuormat nostoapuvälineen kuorman kiinnityspisteessä. Varmuuskertoimen nostaminen tuottaa laskennallisesti suurempia jännityksiä rakenteeseen, mutta tämä voidaan hyväksyä, sillä nostoapuvälineen rakenne on tällöin mitoitettu kestävämmäksi. /1/

Jotta suunnitteluohjeen käyttö suunnittelun tukena olisi järkevää, on suunnittelijan voitava luottaa siihen, että laskennan antamat tulokset nostoapuvälineen jännityksistä ovat suurempia, kuin tulokset, joita standardin mukainen laskenta antaisi. Suuremmat jännitykset tarkoittavat, että laskelmat ovat ns. ”turvallisella puolella”.

Alustavien sisäisten laskelmien mukaan 4-kertainen suora kuormitus olisi riittävä huomioimaan myös kallistuneesta kuormasta aiheutuneet kuormitukset kokeilla

nostoapuvälineen geometrioilla. Koska nostoapuvälineen geometria voi muuttua tapauskohtaisesti, on mahdollista, että joillakin geometrioilla 4-kertainen varmuuskerroin ei olisi enää riittävä. Asiasta päätettiin teettää opinnäytetyö, minkä tarkoituksena olisi tutkia asiaa tarkemmin ja tarkastella löytyykö tällaisia tilanteita.

3 LUJUUSLASKENTA

Lujuuslaskennassa tai lujuusopissa keskitytään kiinteiden aineiden lujuus- ja jäykkyysominaisuuksiin, joiden perusteella eri aineet vastustavat ulkoisten voimien vaikutusta murtumatta tai muuttamatta muotoaan suuresti. Lujuusoppi perustuu fyysikaalisiin tieteisiin ja on täten teknillisen mekaniikan osa. Lujuusoppi juurtaa teoriansa klassisesta mekaniikasta perustuen erityisesti statiikkaan. /6/

Koska lujuusopin teoria perustuu klassiseen mekaniikkaan, on sen tavoitteena kehittää fysiikan lakeihin perustuva teoria, jonka avulla voidaan kuvata kiinteän kappaleen mekaanista käyttäytymistä. Teoriaa voidaan soveltaa koneiden, rakenteiden osien tai kokonaisuuksien suunnittelun apuna. Lujuusopin teoriaa soveltamalla voidaan rakenteet tai koneenosat mitoittaa tarkoitukseen sopiviksi ja välttää turhaa ja kallista ylimitoitusta. Työvälineenä teorian soveltamisessa käytetään matematiikkaa, joten erilaisten materiaalien ja niiden mekaanisten ominaisuuksien kuvaamiseksi käytetään yksinkertaistettuja malleja, jotka kuitenkin vastaavat mahdollisimman hyvin olemassa olevia materiaaleja. /6/

3.1 Lujuuslaskennan peruskuormitukset

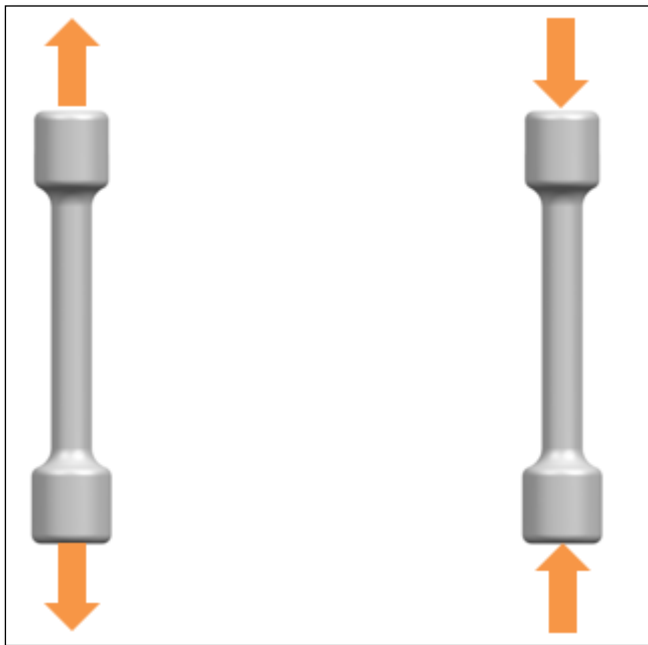
Lujuuslaskennassa niin sanottuja peruskuormituksia on viittä erilaista. Nämä kuormituslajit ovat nimeltään veto, puristus, vääntö, leikkaus ja taivutus. Kuormitukset voivat olla luonteeltaan dynaamisia tai staattisia. Dynaamisella kuormituksella tarkoitetaan sellaista kuormitusta, joka ei ole ajan suhteen vakio, vaan kuormitus on vaihtuva. Staattinen kuormitus vastaavasti on ajan suhteen vakio ja täten ei muutu. /7, s. 21/

3.2 Veto ja puristus

Lujuusopin kannalta peruskäsitteitä ovat veto- ja puristuskuormitus, sillä ne ovat yksinkertaisia ja helposti hallittavia kuormituksia. Kun sauvamaiseen kappaleeseen vaikuttaa kuvan 1 mukainen, sauvan pituusakselin kanssa yhdensuuntainen voima, on sauva tällöin veto- tai puristuskuormituksen alainen. Sauvan pituusakselin suun-

taista voimaa kutsutaan normaalivoimaksi. Veto- tai puristuskuormituksen kohteena ovat usein sauvamaiset kappaleet, joita ovat esimerkiksi mäntämoottorin kiertokanki tai ristikkorakenteissa esiintyvät sauvamaiset kappaleet. /6–7/

Erilaisten materiaalien, kuten metallien, materiaaliominaisuuksien määrittelemiseen voidaan käyttää vetokoetta. Kokeessa sauvaa kuormitetaan asettamalla se vetokoneeseen ja vetämällä sauvaa yleensä siihen asti, kunnes sauva katkeaa. Tutkitavasta materiaalista koostuvasta aihioista valmistettu koesauva on yleensä valmistettu koneistamalla, prässämällä tai valamalla. Joitakin koekappaleita, kuten kaapeleita tai palkkeja, ei välttämättä ole tarpeen koneistaa vetokoetta varten. /8/



Kuva 1. Esimerkki veto- ja puristussauvoista. /7, s.57/

3.3 Leikkaus

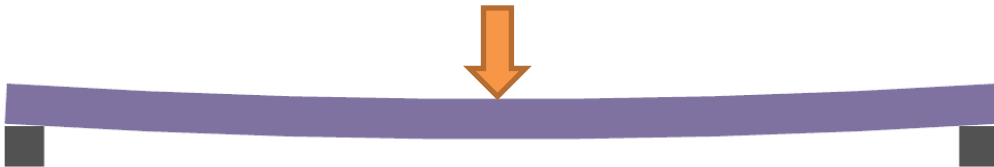
Yksinkertaisessa leikkauksen esimerkissä kappale on asetettu vaakasuuntaisesti kahden jäykän tuen päälle. Tukien välissä on tyhjä tila, jonka yläpuolella kappale lepää. Kun kappaletta kuormitetaan ulkoisella voimalla tyhjän tilan yläpuolelta, yrittää ulkoinen voima saada kappaleesta leikattua palan pois. /6, s. 51/



Kuva 2. Esimerkki leikkauksesta. Kuvassa harmaa kappale on asetettu tummien tukien päälle ja ulkoinen voima leikkaa kappaleesta palan. /6, s.51/

3.4 Taivutus

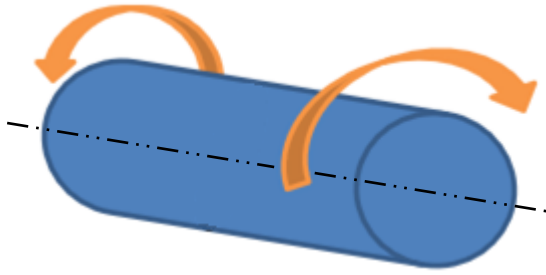
Taivutus on tärkeä lujuusopin käsite, sillä se aiheuttaa rakenteisiin huomattavia rasituksia. Kuvan 3 mukaisessa tilanteessa ulkoinen voima aiheuttaa päistään tuetulle palkille normaalijännityksen, minkä suuruus riippuu poikkileikkauksesta, sekä taivutusmomentista. Kuormitettu palkki taipuu kuvan 3 mukaisesti. Palkin yläpintaan kohdistuu taivutuksen vuoksi puristusjännitys ja palkin alapintaan puolestaan vetojännitys. /7, s.78/



Kuva 3. Esimerkki ylhäältä päin kuormitetun palkin taipumisesta. /7, s. 78/

3.5 Vääntö

Vääntöä esiintyy esimerkiksi poikkileikkauksiltaan pyöreissä kappaleissa, kuten voimansiirtoakseleissa /7/. Kuvassa 4 on esitetty lieriömäinen kappale. Kappaleeseen kohdistuu ainoastaan vääntörasitus ja kappaleen päissä olevat vääntömomentit pyrkivät vääntämään kappaletta /9/. ”Kannattimen vääntömomentiksi sanotaan niiden kahden sisäisen voimasysteemin yhdistystuloksina olevia momentteja, jotka estävät leikkauksen eri puolilla olevia kannattimen osia kiertymästä toisiinsa nähden leikkauksen kohdalla.” /10/



Kuva 4. Poikkileikkauksen kiertyminen /6, s. 241/

3.6 Laskentatavat

Tässä kappaleessa käsitellään yleisesti käytettyjä tapoja, jotka liittyvät esimerkiksi nostoapuvälineiden suunnitteluun. Käsin tehtävä laskenta ja olemassa olevien laskentadokumenttien hyödyntäminen on yrityskohtaista ja kappaleiden teksti on kirjoitettu Wärtsilän asiantuntijan haastattelun perusteella.

3.6.1 Käsin tehtävä laskenta

Käsin tehtävä manuaalinen laskenta soveltuu nostoapuvälineiden tapauksessa esimerkiksi konseptisuunnitteluvaiheen jälkeen detaljisuunnittelun yhteydessä tehtäväksi karkeaksi laskennaksi. Tyypillisesti Wärtsilässä suunnitelluista nostoapuvälineistä löytyy jokin elementti, joka soveltuu käsin laskettavaksi. Kuormaa kantaville rakenteille voidaan käsin tehdyn laskennan pohjalta määritellä tarvittavat materiaalivehvuudet, sekä dimensiot. Käsin tehtävää laskentaa voidaan myös käyttää rajattujen kuormaa kantavien alueiden laskentaan, kuten hitsisaumat, ruuviliitokset, akselit tai kierteet. /11/

Käsin tehtävän laskennan hyvä puoli on sen nopeus sellaisessa tilanteessa, missä laskennan kohde on yksinkertainen, ns. taulukkomainen tapaus. Usein kuitenkin käsin laskettavien kohteiden kuormitukset poikkeavat taulukkotapauksista niin paljon, että laskijan on selvitettävä erikseen tarkasteltavaan kohtaan kohdistuvat kuormitukset, mikä käsin laskien olisi työlästä. Tällaisissa tapauksissa lujuuslaskijan ammattitaito korostuu, sillä kuormitusten oikeanlainen selvittäminen vaikuttaa tuloksiin suuresti. /11/

Käsin tehtävän laskennan hyödyksi voidaan katsoa detaljisuunnittelussa tehty karkea mitoitus, minkä pohjalta rakenne suunnitellaan. Rakenteen materiaalivahvuudet ja muiden kuormaa kantavien osien dimensiot saadaan ns. ”oikealle alueelle”, eli lähelle tarvittavia mittoja. Tehdyllä laskelmalla voidaan estää liian heikkoja tai ylimitoitettuja rakenteita, sekä suuria muutoksia rakenteeseen, jos FEM-laskennassa havaitaan, että rakenne ei kestäkään sille määriteltyä kuormaa. /11/

Käsin tehtyä laskentaa voidaan siis pitää suhteellisen luotettavana tapana, mikäli kuormitukset voidaan määrittellä luotettavasti. Monimutkaiset rakenteet, joissa on rakenteellisia epäjatkuvuuskohtia, soveltuvat paremmin FEM-laskentaan. /11/

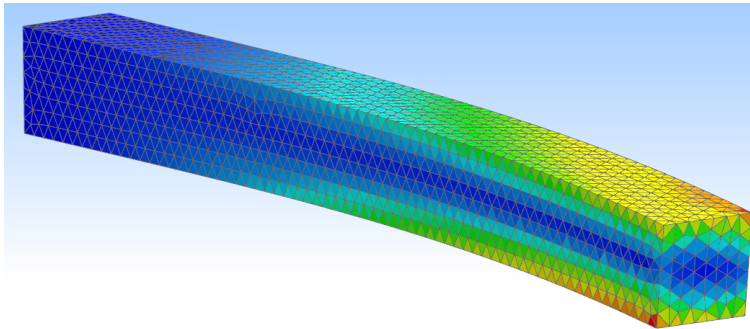
3.6.2 FEA- ja FEM-laskenta

Nykyään tietokonepohjainen suunnittelu on syrjäyttänyt tuotteiden suunnittelussa tarvittavan piirtämisen monilla aloilla. Tuotteet suunnitellaan 3D-CAD-ohjelmistoilla konseptivaiheesta lähtien ja tuotteista tehdyt 3D-mallit mahdollistavat erilaisien analyysien ja tarkasteluiden tekemisen suunnitteluprosessin aikana. /7, 12/

Koska tuotteesta on muodostettu 3D-malli suunnitteluohjelmistoon, voidaan tätä mallia hyödyntää erilaisten analyysien tekemiseen. Nostoapuvälineen kannalta tärkeä analyysi on 3D-malliin pohjautuva lujuusanalyysi, eli FEA- tai FEM-analyysi. Molemmilla lyhenteillä tarkoitetaan samaa asiaa, lyhenne FEA koostuu sanoista Finite Element Analysis ja lyhenne FEM taas koostuu sanoista Finite Element Method. Tuotteille tehtävät lujuusanalyysit ovat yleisiä useissa suunnittelukonttoreissa. /7, 12/

Lujuusanalyysiä tehtäessä kappaleen 3D-malli jaetaan äärelliseen määrään elementtejä, eli kappale niin sanotusti verkotetaan laskentaa varten. Elementtien koko vaikuttaa oleellisesti laskennan tarkkuuteen. Pienemmät ja näin tiheämmin sijoitetut elementit tuottavat tarkempia tuloksia analyysistä. Pienempien elementtien käyttäminen kuitenkin johtaa elementtien suurempaan kokonaismäärään, jolloin analyysin suorittamiseen tarvittava laskentateho nousee. Usein verkotus tehdään ti-

heämmäksi lujuudeltaan kriittisten osa-alueiden kohdalle ja vastaavasti harvemmaksi vähemmän kriittisten alueiden kohdalle. /7, 12/ Kuvassa 5 on havainnollistettu suunnitteluohjelmiston laskentatilan näkymää.



Kuva 5. Kuvakaappaus NX-suunnitteluohjelmiston Design Simulation -näkymästä.

3.6.3 Olemassa olevien laskentadokumenttien hyödyntäminen

Joissakin tilanteissa on mahdollista käyttää nostoapuvälineen suunnittelussa aikaisemmin tehtyjä laskentadokumentteja. Tällaisia tilanteita ovat esimerkiksi vanhaan nostoapuvälineeseen tehtävä päivitys, eli revisiointi, tai uuden, vastaavan nostoapuvälineen suunnittelu vanhan pohjalta. Olemassa olevaa nostoapuvälinettä revisioitaessa muutokset ovat aina tapauskohtaisia ja näin ollen asiantuntijan tulee arvioida, voidaanko vanhaa laskentadokumenttia käyttää. Pienten muutosten tapauksessa, kuten kierrereikien tai väisteiden lisääminen, voidaan yleensä käyttää vanhaa laskentadokumenttia. Wärtsilän tapauksessa laskentadokumentteihin kirjataan nostoapuvälineen kriittinen käyttöaste, mikä auttaa asiantuntijaa arvioimaan, tuleeko muutosten jälkeen suorittaa uusi FEM-laskenta. Nostoapuvälineen revisioinnin yhteydessä revisioidaan myös laskentadokumentti, mihin lisätään maininta muutoksista ja perustelut aikaisemman laskentadokumentin riittävydestä. /13/

4 NOSTOAPUVÄLINEET

Tässä kappaleessa esitetään nostoapuvälineen periaate ja käydään läpi sen määritelmä, sekä minkälaisia nostoapuvälineiden tyyppejä on olemassa. Kappaleen loppuosassa käsitellään nostoapuvälineen suunnitteluun ja markkinoille saattamiseen liittyviä asioita, jotka ovat tärkeitä asioita nostoapuvälineen suunnittelussa.

4.1 Määritelmä

Nostoapuväline on komponentti tai laite, jota ei ole pysyvästi kiinnitetty nostolaitteeseen. Nostoapuväline on sijoitettu koneen (esim. nosturi) ja kuorman väliin ja sillä on tarkoitus tarttua kuormaan. Nostoapuväline voi olla myös tarkoitettu kuorman kiinteäksi osaksi. Nostoapuvälineisiin liittyvät raksit ja niiden komponentit katsotaan myös nostoapuvälineiksi. /14/

Työnantajan vastuulla on huolehtia, että tehtävä työ on turvallista. Nykyisin suunnittelun trendejä ovat muun muassa tuotteen ulkomittojen tai ainevahvuuksien pienentäminen. Näiden trendien vuoksi joudutaan usein suunnittelemaan erillinen nostoapuväline. Nostojen ja siirtojen on oltava turvallisia ja jos niiden tekemistä käsin ei voida välttää, on nostoista johtuvien vaarojen vähentämiseksi annettava työntekijöiden käyttöön nosto- ja siirtoapuvälineitä. /15, 16/

4.2 Nostoapuvälineiden tyypit

Standardissa SFS-EN 13155 + A2. (Nosturit. Turvallisuus. Irrotettavat nostoapuvälineet.) mainitaan useita erilaisia nostoapuvälineiden tyyppejä. Standardi kattaa seuraavat nostoapuvälineiden tyypit:

- levytarraimet
- alipainetarttujat
- magneettiset nostimet
- nostopuomit
- C-koukut
- nostohaarukat
- tarraimet.

C-koukku on nimitys nostoapuvälineelle, joka on C-kirjaimen muotoinen. Tämän tyyppistä nostoapuvälinettä voidaan käyttää esimerkiksi putkien tai kelojen nostamiseen. /17/

4.3 Nostoapuvälineen suunnittelu

Nostoapuvälineen suunnittelussa on noudatettava ajantasaista lainsäädäntöä ja suunnittelua ohjaavat konedirektiivi sekä koneasetus, jos nostoapuvälineen käyttöikä rajoitetaan 20 000 nostojaksoon ja nostoapuvälinettä ei käytetä kaivoskuiluissa, ihmisten yläpuolella tapahtuvissa nostoissa, taikka ihmisen nostossa. Suunnittelijan on mitoitettava nostoapuväline siten, että mekaaniset ja kuormaa kantavat osat on mitoitettu kestäväksi kolminkertainen staattinen nostokykyä vastaava kuorma niin, että kuorma ei irtoa, vaikka nostoapuvälineessä tapahtuisi kuormituksesta johtuva pysyvä muodonmuutos. Lisäksi nostoapuvälineen on kestävä kaksinkertainen staattista nostokykyä vastaava kuorma, ilman nostoapuvälineessä tapahtuvaa pysyvää muodonmuutosta. /18/

Nostoapuvälineen rakenne tulee suunnitella lujuusvaatimusten lisäksi sellaiseksi, että sen rakenne kestää suurimman työskentelykulman ylityksen vähintään 6:lla asteella, vaikka nostoapuvälinettä on tarkoitus käyttää pelkästään suorissa nostoissa. Lisäksi hallintaelimien, sekä kädensijojen, on oltava sellaisia, että sormivahingoilta voidaan välttyä. Jos nostoapuväline joudutaan varastoimaan, eli sitä ei käytetä jatkuvasti, on nostoapuvälineen oltava varastointia varten riittävän vakaa. Nostoapuväline ei saa kaatua, kun sitä kallistetaan 10 astetta mihin tahansa suuntaan. Kaatuminen voidaan estää muotoilun avulla tai käyttämällä varastointiin soveltuvaa telinettä. /18/

4.4 Markkinoille saattaminen

Koneasetuksen mukaan on nostoapuvälineen valmistajan ennen markkinoille saattamista tai käyttöönottoa varmistettava seuraavat asiat:

- Nostoapuväline täyttää sitä koskevat olennaiset terveys- ja turvallisuusvaatimukset
- Tekninen tiedosto on saatavilla tarvittaessa

- Nostoapuvälineen mukana toimitetaan tarvittava dokumentointi, kuten ohjeistus laitteen käyttöä varten
- Vaatimustenmukaisuuden arviointimenettely on tehty asianmukaisesti
- EY-vaatimustenmukaisuusvakuutus on laadittu, täytetty ja se toimitetaan laitteen mukana
- Laitteeseen on kiinnitetty CE-merkintä. /18/

5 SUUNNITTELU- JA TOTEUTUSVAIHE

Tässä kappaleessa kuvaillaan opinnäytetyön suunnittelu- ja toteutusvaiheessa tehdyt asiat. Ensimmäisessä kappaleessa kerrotaan opinnäytetyön suunnitteluvaiheesta, minkä jälkeen siirrytään toteutusvaiheen kuvailuun sekä käytettyjen työkalujen esittelyyn.

5.1 Opinnäytetyön suunnitteluvaihe

Opinnäytetyön alussa pidettiin suunnittelukokous Wärtsilän tiloissa, jossa tutustuttiin aiheeseen, sekä opinnäytetyön tavoitteisiin. Aiheen ja tavoitteiden määrittelyn jälkeen mietittiin yrityksen edustajien kanssa, millä tavoilla asiaa kannattaisi lähestyä. Melko pian tultiin siihen tulokseen, että asiaa kannattaisi lähestyä statiikan näkökulmasta. Kokouksen päätteeksi sovittiin opinnäytetyön käytännön asioista.

Suunnittelukokouksen jälkeen tutustuttiin Vaasan ammattikorkeakoulun opinnäytetyöohjeisiin ja sisällöstä tehtiin alustava sisällysluettelo, joka lähetettiin kommentoitavaksi opinnäytetyön ohjaajalle. Opinnäytetyön aikataulusta tehty suunnitelma sisällytettiin alustavaan sisällysluetteloon.

5.2 Opinnäytetyön toteutusvaihe

Ensimmäisenä vaiheena opinnäytetyön toteutusvaiheessa tutustuttiin nostoapuvälineisiin yleisesti teoriatasolla, sekä Wärtsilässä suunniteltuihin ja käytössä oleviin nostoapuvälineisiin. Teoriatasolla perehdyttiin myös erilaisiin vaatimuksiin ja standardeihin, mitä nostoapuvälineille on asetettu. Samalla perehdyttiin aikaisemmin suunniteltujen nostoapuvälineiden laskentaraaportteihin.

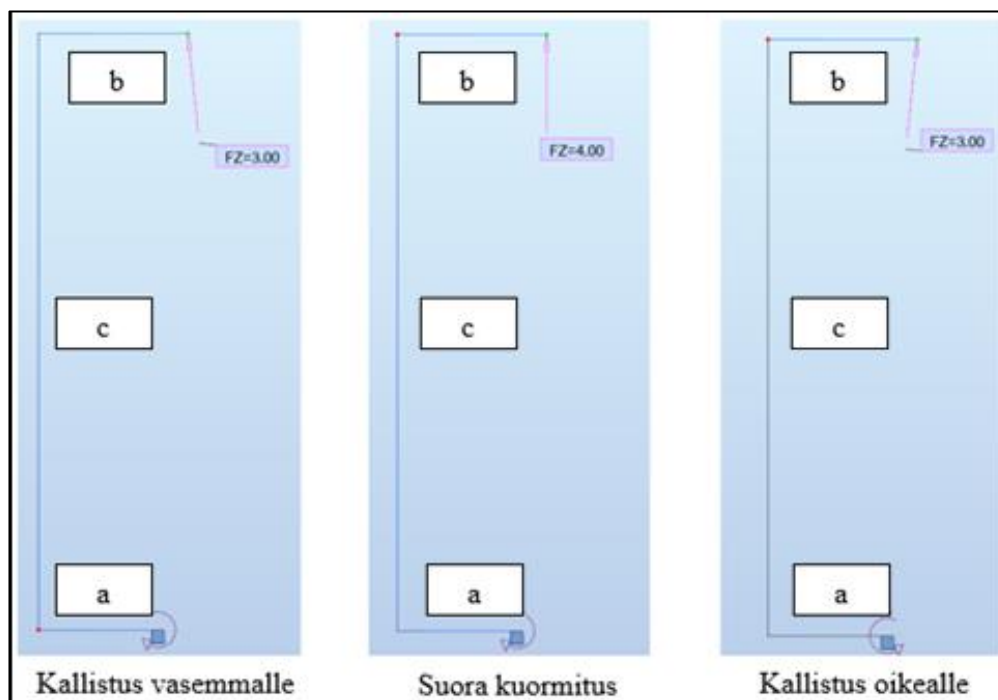
Seuraavaksi aloitettiin työn kirjallisen osuuden kirjoittaminen, sekä asiaan liittyvän teorian hankkiminen. Teoreettisen viitekehyksen, sekä muiden asioiden kirjoittamisen jälkeen aloitettiin opinnäytetyön tutkimusvaihe.

Opinnäytetyön tutkimusvaiheessa tutkimusongelmaan perehdyttiin tarkemmin ja lähestymistapaa suunniteltiin tarkemmin. Ensimmäisenä palautettiin mieleen statiikan opintoja kurssimuistiinpanoja selailemalla. Ongelma kuvattiin paperille kynällä

piirtämällä, sekä käsin laskemalla, jotta ongelma saataisiin paremmin hahmotettua. Jonkin ajan jälkeen kuitenkin huomattiin, että lähestymistapana kynä ja paperi toimii, mutta on kuitenkin melko hidasta ja käsin tehtävien laskujen ongelmana olisi mahdolliset näppäily- ja laskuvirheet.

Tutkimusongelma päätettiin siirtää digitaaliseen muotoon ja laskenta automatisoida, jotta voitaisiin välttyä turhilta virheilta tutkimusta tehdessä. Statiikan tutkiminen ja ratkaiseminen päätettiin toteuttaa Autodesk Robot Structural Analysis Professional -ohjelmistolla, sillä ohjelmisto on melko helppokäyttöinen ja tarkoitukseen sopiva. C-raudan staattinen malli määriteltiin ohjelmistoon ja statiikkaa lähdettiin tutkimaan tarkemmin. C-raudan mallin lähtötiedot perustuivat Wärtsilässä aiemmin suunniteltuun C-rautaan, minkä laskennassa oli havaittu opinnäytetyön tutkimusongelman mukainen tilanne.

Staattinen malli sai kuvan 6 mukaisen rakenteen, mihin määriteltiin muuttujat C-raudan eri osille. Kuorman kiinnityspisteeseen asetettiin jäykkä tuki, minkä tarkoituksena oli simuloida nostettavan taakan aiheuttamaa kuormitusta rakenteessa. Nostovoiman F arvoksi määritettiin 1 kN, varmuuskertoimiksi $4F$ suoralle kuormitukselle ja $3F$ kallistetulle kuormitukselle. Nostovoima F määritetään laskentaohjelmistossa muuttujana FZ , koska laskentaohjelmiston koordinaatistossa Z-akseli osoittaa ylöspäin.



Kuva 6. Nostoapuvälineen staattiset mallit ja muuttujat.

Lähtötilanteessa C-raudan mitoilla laskettiin rakenteen statiikka, sekä kuormat 4-kertaisella suoralla kuormituksella, sekä 3-kertaisella kallistetulla kuormituksella. Tuloksista tarkasteltiin erityisesti kuorman kiinnityspisteeseen kohdistuvaa momenttia. Tulokset kirjattiin ylös Excel-taulukkoon ja seuraavana vaiheena muutettiin C-raudan staattisen mallin dimensioita. Laskenta ajettiin uudelleen useaan otteeseen arvoja muuttaen ja samalla seuraamalla, miten arvot muuttuvat dimensioiden muuttuessa. Arvot kirjattiin jokaisella laskennalla Excel-taulukkoon ja muuttaman ajan jälkeen tulokset tarkastettiin. Havaintojen perusteella löydettiin muuttujien välillä oleva yhteys kiinnityspisteeseen vaikuttavassa momentissa, mikä kirjattiin ylös.

Momenttiin liittyvän yhteyden löytymisen jälkeen staattiselle mallille määriteltiin ohjelmistossa poikkileikkaus, minkä pohjalta voitaisiin tarkastella rakenteeseen kohdistuvia jännityksiä. Mittoina käytettiin Excel-taulukkoon kirjattuja arvoja, joita oli aikaisemmin käytetty momenttikuorman tarkasteluajoissa. Jännitysarvojen havaintojen perusteella löytyi yhteys, joka kirjattiin ylös.

Tulosten kirjaamisen jälkeen tehtiin yksinkertainen Excel-taulukko, johon syöttämällä mittoja voitaisiin arvioida 4-kertaisen suoran ja 3-kertaisen kallistetun kuorman tuottamia jännityksiä ja momenttikuormia, sekä sitä, ylittääkö 3-kertaisen kallistetun kuormituksen jännitys 4-kertaisen suoran kuormituksen tuottaman jännityksen. Excel-taulukon laskentatietojen perusteella löydökset tarkastettiin opinnäytetyön ohjaajan kanssa koululla ja saatuja tietoja verrattiin vastaaviin käsin lasketuihin tapauksiin. Toteutusvaiheen lopuksi opinnäytetyön toteutusvaiheen tuloksia esiteltiin Wärtsilässä opinnäytetyön tilaajalle ja tuloksista keskusteltiin.

Taulukko 1. Kallistetusta kuormituksesta aiheutuva momentti suurempi.

Muuttujien arvot	
<i>a</i>	0,4 m
<i>b</i>	0,8 m
<i>c</i>	1,5 m
Momentti kiinnityspisteessä	
Suora kuormitus	1,6 kNm
Kallistus oikealle	0,73 kNm
Kallistus vasemmalle	1,66 kNm
Kaavan antama arvo 0,267	

Taulukko 2. Kiinnityspisteeseen kohdistuva momentti lähes tasan.

Muuttujien arvot	
<i>a</i>	0,4 m
<i>b</i>	0,8 m
<i>c</i>	1,2996 m
Momentti kiinnityspisteessä	
Suora kuormitus	1,6 kNm
Kallistus oikealle	0,73 kNm
Kallistus vasemmalle	1,60002 kNm
Kaavan antama arvo 0,308	

Taulukko 3. Suorasta kuormituksesta aiheutuva momentti suurempi.

Muuttujien arvot	
<i>a</i>	0,4 m
<i>b</i>	1,2 m
<i>c</i>	1,3
Momentti kiinnityspisteessä	
Suora kuormitus	3,20 kNm
Kallistus oikealle	1,98 kNm
Kallistus vasemmalle	2,80 kNm
Kaavan antama arvo 0,615	

6.2 Jännitykset

Rakenteen jännityksiä tutkittiin määrittämällä rakenteelle poikkileikkaus. Koska kyseessä ei ole varsinainen nostoapuväline taikka lujuuslaskelma, valittiin ohjelmiston valikoimasta poikkileikkaukseksi mielivaltaisesti CHS 101 x 3,6. Rakenteen jännityksiä tutkimalla löydettiin kokeilemalla kaava 2. Kaavan tuottaman tuloksen lähestyessä arvoa 0,294 on rakenteessa esiintyvä maksimijännitys lähestulkoon sama kallistetulla kuormituksella, kuin suoralla kuormituksella.

$$\frac{b - a}{\frac{c}{0,308\dots}} = 0,294\dots, \text{ jossa} \quad \begin{aligned} a &= 0,4 \text{ m} \\ b &= 0,57 \text{ m} \\ c &= 1,8712 \text{ m.} \end{aligned} \quad (2)$$

Kaavan 2 tuottamaa tulosta voidaan käyttää apuna, kun verrataan suoran ja kallistetun kuormituksen aiheuttamia maksimijännityksiä rakenteessa. Jos kaava saa arvon 0,294 ylittävän lukeman, on tällöin suoran kuormituksen aiheuttama jännitys rakenteessa suurempi, kuin kallistetun kuormituksen aiheuttama jännitys. Kaavan saadessa arvon 0,294 alittavan lukeman, on tällöin kallistetun kuormituksen aiheuttama jännitys rakenteessa suurempi, kuin suoran kuormituksen aiheuttama jännitys. Tulokset havainnoista on esitetty taulukoissa 4–6. Taulukossa 4 kallistetun kuormituksen aiheuttama jännitys on suurempi, kuin suoran kuormituksen aiheuttama jännitys. Taulukossa 5 rakenteen jännitykset ovat lähes samat suoralla- ja kallistetulla kuormituksella. Taulukossa 6 suoran kuormituksen aiheuttama jännitys on suurempi, kuin kallistetun kuormituksen aiheuttama jännitys.

Taulukko 4. Kallistetun kuormituksen aiheuttama jännitys suurempi.

Muuttujien arvot	
<i>a</i>	0,4 m
<i>b</i>	0,5 m
<i>c</i>	2 m
Rakenteen maksimijännitykset	
Suora kuormitus	76,3 N/mm ²
Kallistus oikealle	56,6 N/mm ²
Kallistus vasemmalle	80,5 N/mm ²
Kaavan antama arvo 0,162	

Taulukko 5. Rakenteen jännitykset lähes tasan.

Muuttujien arvot	
<i>a</i>	0,4 m
<i>b</i>	0,57 m
<i>c</i>	1,8712 m
Rakenteen maksimijännitykset	
Suora kuormitus	86,9308 N/mm ²
Kallistus oikealle	64,5580 N/mm ²
Kallistus vasemmalle	86,9305 N/mm ²
Kaavan antama arvo 0,294	

Taulukko 6. Suoran kuormituksen aiheuttama jännitys suurempi.

Muuttujien arvot	
<i>a</i>	0,4 m
<i>b</i>	1,2 m
<i>c</i>	1,3 m
Rakenteen maksimijännitykset	
Suora kuormitus	183,4 N/mm ²
Kallistus oikealle	136,5 N/mm ²
Kallistus vasemmalle	152,3 N/mm ²
Kaavan antama arvo 1,99	

Kaavan 2 toiminnassa havaittiin poikkeus, kun rakenteen nostopisteen ja kuorman kiinnityspisteen välinen vaakasuuntainen etäisyys on lyhyt. Lyhyen vaakasuuntaisen etäisyyden takia kaavan 1 tuottaman tuloksen ollessa välillä 0,02 – 0,1 havaittiin, että suoran kuormituksen aiheuttama jännitys rakenteessa ylittää kallistetun

kuormituksen aiheuttaman jännityksen, vaikka kaavan 2 antama tulos olisi alle 0,294. Havaitut poikkeamat on esitetty korostettuina taulukossa 7.

Taulukko 7. Kaavan 2 toiminnassa havaitut poikkeamat.

Kaavan 1 arvo	Kaavan 2 arvo	Suoran kuormituksen aiheuttama jännitys	Kallistetun kuormituksen aiheuttama jännitys
0,02	0,064	64 N/mm²	59,45 N/mm²
0,00625	0,02	61,77 N/mm²	55,35 N/mm²
0,00625	0,002	61,08 N/mm²	54,84 N/mm²
0,09	0,2944	86,93 N/mm ²	86,93 N/mm ²
0,1	0,324	73,2 N/mm ²	63,88 N/mm ²
0,125	0,405	76,25 N/mm ²	66,16 N/mm ²

7 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Opinnäytetyön viimeisessä kappaleessa kerrataan aluksi mitä tehtiin ja miksi. Ker-
tauksen jälkeen siirrytään opinnäytetyön tuloksista saatuihin johtopäätöksiin,
minkä jälkeen pohditaan saatuja tuloksia sekä jatkokehitystä. Tutkimuksen eettisiä
kysymyksiä pohditaan sille varatussa omassa kappaleessa. Viimeisenä pohditaan
tulosten luotettavuutta, sekä käytettävyyttä.

7.1 Tulosten tarkastelu

Opinnäytetyön tuloksena saatiin kaksi kaavaa, joiden tarkoituksena on helpottaa
nostoapuvälineen suunnittelijan tekemää suunnittelutyötä. Kaavojen avulla suun-
nittelija pystyy nopeasti ja helposti arvioimaan rakenteeseen kohdistuvia kuormi-
tuksia jo suunnittelun alkuvaiheessa ja ottamaan nämä huomioon suunnitellessaan
muuta rakennetta. Momenttikeruun kiinnitettiin opinnäytetyössä erityistä huo-
miota, sillä kuorman kallistaminen aiheuttaa sen kiinnityspisteeseen momenttikeruun
nostoapuvälineelle.

Rakenteen jännitysten tarkastelu nostoapuvälineen osalta on erityisen tärkeää, jotta
voidaan varmistua, että nostoapuvälineen käyttö on säädösten ja määräysten mu-
kaista ja turvallista. Jännitysten tarkasteluun löydettiin oma kaava, mikä auttaa ra-
kenteen jännitysten arvioinnissa. Jännitysten osalta kaavan toiminnassa havaittiin
epävarmuutta tilanteissa, joissa kiinnityspisteiden vaakasuuntainen etäisyys on ly-
hyt ja tästä kirjattiin tuloksien esittelyn yhteydessä huomio.

7.2 Johtopäätökset

Tulosten ja tutkimuksen perusteella voidaan sanoa, että nostoapuvälineen rakenteen
ollessa pitkä ja kiinnityspisteiden vaakasuuntaisen etäisyyden ollessa lyhyt, saattaa
tutkimusongelman mukaisia tilanteita esiintyä. Suunnittelijoiden tulisikin kiinnittää
erityistä huomiota edellä mainittuihin tilanteisiin ja mahdollisesti käyttää enemmän
aikaa yksityiskohtien huolelliseen suunnitteluun. Wärtsilän Vaasan tehtaan työka-
lusuunnitteluosaston suunnittelijoilla on nostoapuvälineiden suunnittelusta vuosien

kokemus, ja opinnäytetyön tulosten avulla suunnittelijat saavat lisätietoa nostoapuvälineen rakenteen käyttäytymisestä.

7.3 Tutkimuksen eettisyys ja tulosten luotettavuus

Ennen opinnäytetyön tutkimuksen aloittamista mietittiin, millä tavoin ongelmaa kannattaisi lähestyä. Koska kyseessä ei ollut yksittäiseen, olemassa olevaan tai suunnitteilla olevaan nostoapuvälineeseen kohdistuva tutkimus, päätettiin nostoapuvälineen rakenteesta tehdä staattinen malli, minkä avulla voitaisiin tarkastella rakennetta kaksiulotteisena mallina. Statiikan avulla mallille voitiin määrittellä eri osille omat muuttujat ja jäykän kiinnityksen avulla pystyttiin simuloimaan kuorman kiinnitystä nostoapuvälineeseen. Nostavan voiman avulla voitiin laskea rakenteeseen kohdistuvia kuormituksia.

Staattisen mallin avulla tehtävien laskelmien suorittamiseen käytettiin aluksi kynää ja paperia. Malli piirrettiin paperille ja mallille laskettiin muutama tapaus käsin, mutta alussa huomattiin, että käsin tehtävä laskenta tuottaa turhaa työtä ja veisi turhaa aikaa itse tutkimuksen tekemisestä. Lisäksi inhimillisten virheiden, kuten näppäilyvirheiden, todennäköisyys kasvaisi. Malli päätettiin siirtää digitaaliseen muotoon. Sopivan ohjelmiston valintaan käytettiin jonkin verran aikaa ja parhaimmaksi valinnaksi osoittautui Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2019 -ohjelmisto, sillä opinnäytetyön tekijällä oli ennestään kokemusta ohjelmiston käytöstä. Ohjelmistoa on aikaisemmin käytetty opintojen aikana lujuusopin jatkokursilla, missä tutustuttiin ohjelmiston käyttöön teräsrakenteiden mitoituksessa.

Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2019 -ohjelmistoa ei suoranaisesti voida käyttää nostoapuvälineiden suunnittelussa apuna, mutta ohjelmiston avulla voidaan ratkaista rakenteen statiikka, joten tässä tapauksessa voitiin käyttää kyseistä ohjelmistoa. C-raudan tapauksessa rakenne on jäykkä, joten mallin tekeminen ohjelmiston sisällä oli suoraviivaista. Ohjelmiston avulla rakenteelle voitiin määrittää tarvittavat kuormitukset sekä kuorman kiinnityspisteeseen sijoitettava jäykkä tuki. Rakenteen mittoja voitiin myös muuttaa helposti ohjelmiston käyttöliittymästä, minkä jälkeen uuden laskennan tekeminen rakenteelle oli helppoa ja

näin voitiin välttyä näppäily- ja laskuvirheiltä. Ohjelmistoa käyttäen tehdyt laskelmat tarkastettiin tulosten keräämisen jälkeen opinnäytetyön ohjaajan kanssa MathCad-ohjelmistoa käyttäen. Todettiin, että laskelmat ovat yhteneviä.

Opinnäytetyön alussa oli tavoitteena, että kuormitustilanteiden löytyessä staattisen mallin pohjalta suunniteltaisiin 3D-CAD-ohjelmistolla kuvitteellinen nostoapuväline, joka noudattaisi staattisen mallin mittoja. Mallille tehtäisiin standardin mukaiset laskennat ja tuloksista nähtäisiin, miten ongelma esiintyisi nostoapuvälineen lujuuslaskennassa. Tavoitteesta kuitenkin luovuttiin, sillä kokoonpanojen FEM-laskenta on huomattavasti hankalampaa, kuin yksittäisten osien FEM-simulaatiot. Vaasan ammattikorkeakoulussa 3D-CAD-järjestelmien käyttökursseihin ei kuulu kokoonpanojen FEM-simulointien opetus, vaan FEM-laskennasta käsitellään lähinnä perusteet. Vaihtoehtona olisi ollut opiskella FEM-laskentaa itseopiskeluna, mutta työn aiherajaukseen ja lisääntyvään työmäärään vedoten FEM-laskennan itseopiskelu päätettiin rajata työn ulkopuolelle.

Tulosten luotettavuutta tutkittiin opinnäytetyön tekijän toimesta käyttäen edellä mainittua Autodeskin toimittamaa ohjelmistoa. Kun kokeilemalla löydettiin kaavat 1 ja 2, kokeiltiin erilaisia kuormitustilanteita ohjelmiston avulla staattisen mallin mittoja muuttamalla. Tulosten vertailun perusteella voidaan todeta, että kaavat antavat varmallalla puolella olevia tuloksia, minkä takia pystytään riittävällä varmuudella toteamaan, että kaavat toimivat. Kaavojen todentamista yritettiin, mutta siihen ei pystytty.

7.4 Opinnäytetyön tulosten jatkokehitys

Opinnäytetyön aiheesta saisi tehtyä laajan tutkimuksen, mutta laajemman tutkimuksen tekemiseen ei opinnäytetyön tavoiteresurssi 400 h olisi riittänyt. Työn tuloksia voitaisiin jatkokehittää todentamalla saadut kaavat. Toimeksiantaja mainitsi myös, että automatisointi esimerkiksi laskennan suhteen olisi kannattavaa toteuttaa, sillä se tuo kustannussäästöjä suunnitteluun. Jatkokehityksenä voitaisiin siis tutkia, onko mahdollista toteuttaa jonkinlainen automaattinen laskentamalli, jota voitaisiin käyttää suunnittelun tukena.

7.5 Yhteenveto

Opinnäytetyön tavoitteena oli etsiä sellaisia C-raudan geometrioita, joilla suunniteluohjeen mukainen laskenta 4-kertaisella suoralla kuormituksella tuottaisi pienempiä jännityksiä, kuin standardin mukainen 3-kertainen kallistettu kuormitus. Aluksi käsiteltiin lujuusopin peruskäsitteitä ja sen jälkeen siirryttiin nostoapuvälineen käsitteeseen sekä niihin kohdistuviin vaatimuksiin. Teoriaosuuden jälkeen tutustuttiin tutkimuksen taustoihin ja itse tutkimusongelmaan sekä ongelman ratkaisemisessa käytettyihin menetelmiin. Lopuksi käsiteltiin löydettyjä tuloksia.

Opinnäytetyöstä saatujen tulosten pohjalta päästiin haluttuun tavoitteeseen, eli tehtyjen tutkimusten perusteella löydettiin tilanteita, missä pelkkä suoran kuormituksen mukainen laskentatapa ei ole riittävä. Tutkimusongelman mukaisten tilanteiden ennustamiseen ja arviointiin saatiin toimivat laskukaavat, jotka toimivat riittäväällä tarkkuudella. On hyvä kuitenkin huomata, että laskukaavojen tarkoitus ei ole korvata virallista lujuuslaskentaa, vaan tarjota suunnittelijalle helppokäyttöisiä työkaluja suunnittelun alkuvaiheen tueksi.

LÄHTEET

- /1/ Peltokorpi, O. 2019. Development Expert. Wärtsilä Finland Oy. Aloituskokous 19.6.2016
- /2/ Lehtonen, S. 17.1.2020. Manager. Wärtsilä Finland Oy. Sähköpostikeskustelu 24.6.2019. Tulostettu 11.2.2020.
- /3/ Wärtsilä lyhyesti. Viitattu 22.6.2019, <https://www.wartsila.com/fi/wartsila>
- /4/ Wärtsilän huolto ja palvelut. Viitattu 22.6.2019, <https://www.wartsila.com/fi/huolto-palvelut>
- /5/ Wärtsilä, usein kysytyt kysymykset. Viitattu 22.6.2019, <https://www.wartsila.com/fi/wartsila/usein-kysytyt-kysymykset>.
- /6/ Salmi, T., Pajunen, S. 2010. Lujuusoppi. Tampere. Pressus Oy.
- /7/ Hietikko, E. 2013. Palkki. Helsinki. BoD – Books on Demand.
- /8/ ISO SFS-EN ISO 6892-1. Metallien vetokoe. Osa 1: Vetokoe huoneenlämpötilassa. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto. 2019. 85 s
- /9/ Hahtokari, T. Rakenteiden lujuus ja kimmoisuus. Viitattu 11.2.2020. https://portal.vamk.fi/pluginfile.php/468648/mod_resource/content/1/Lujuus%20ja%20kimmoisuus.pdf
- /10/ Outinen, H. 1965. Statiikka II. 13. uud. painos. Tampere. Pressus Oy.
- /11/ Peltokorpi, O. 17.1.2020. Development Expert. Wärtsilä Finland Oy. Sähköpostikeskustelu 17.1.2020. Tulostettu 17.1.2020.
- /12/ Pere, A. 2016. Koneenpiirustus 1 & 2. Espoo. Kirpe Oy.
- /13/ Peltokorpi, O. 9.1.2020. Development Expert. Wärtsilä Finland Oy. Sähköpostikeskustelu 9.1.2020. Tulostettu 17.1.2020
- /14/ A 2006/42/EY. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi koneista ja direktiivin 95/16/EY muuttamisesta. Viitattu 22.6.2019, <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2006/42/oj>.
- /15/ Työterveyslaitos, Nostotyöt. Viitattu 12.1.2020, <https://www.ttl.fi/vesihuoltolaitosten-tyoturvallisuus-opas/riskien-tunnistus-ja-hallintakeinot/tapaturmavaaralliset-tyot/nostotyot/>
- /16/ RD Velho, Mitä tulisi huomioida nostoapuvälineen suunnittelussa? Viitattu 12.1.2020, <https://www.rdvelho.com/blogi/mita-tulisi-huomioida-nostoapuvälineen-suunnittelussa/>

/17/ SFS-EN 13155 + A2. Nosturit. Turvallisuus. Irrotettavat nostoapuvälineet. 2. painos. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto. 2009. 133 s

/18/ A 12.6.2008/400. Valtioneuvoston asetus koneiden turvallisuudesta. Säädos säädöstietopankki Finlexin sivuilla. Viitattu 27.11.2019. <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2008>