LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
LUT School of Energy Systems
LUT Kone

Tero Koivisto

ROBOTIIKKATUOTEPERHEEN KEHITTÄMINEN

Työn tarkastajat: Professori Timo Björk
DI Martti Nyhä

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT School of Energy Systems
LUT Kone

Tero Koivisto

Robotiikkatuoteperheen kehittäminen

Diplomityö

2016

77 sivua, 36 kuvaa, 9 taulukkoa ja 4 liitettä

Tarkastajat: Professori Timo Björk
DI Martti Nyhä

Hakusanat: Hitsausautomaatio, hitsausportaali, kotelopalkki, taipumatarkastelu, modulaarisuus
Keywords: Welding automation, welding portal, box beam, deflection analysis, modularity

Robottiikkatuoteperheeseen kuuluu robottihitsausportaalit, joiden päärunko rakentuu kotelopalkeista. Koteloprofiilien käyttö on suosittua teollisuuden eri aloilla ja se soveltuu hyvin raskaaseen konepajateollisuuteen.

Hitsausrobottiportaalin suunnitteluun liittyy monia eri vaiheita ja valituilla teknisillä ratkaisuilla voidaan vaikuttaa valmistettavan tuotteen hitsin laatuun ja työn onnistumiseen. Hitsausrobottiportaalit ovat usein asiakasräätälöityjä ratkaisuja, jolloin suunnittelutyö sekä valmistusvaihe vaativat runsaasti kapasiteettia. Modulaarisuuden avulla suunnittelu- ja valmistusvaiheita on mahdollista nopeuttaa sekä parantaa tuotteen testausta, huollettavuutta ja laatua.

Tässä diplomityössä tutkittiin, miten hitsausrobottiportaalin vaakapuomi käyttäytyy ja taipuu erilaisissa kuormitustilanteissa. Lisäksi työssä määritettiin alkuperäisen koteloprofiilin tilalle uusi optimoitu koteloprofiili sekä tarkasteltiin moduloinnin mahdollistamista robotiikkatuoteperheen portaalisovelluksiin.

ABSTRACT

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

Tero Koivisto

The development of a robotic product family

Master's thesis

2016

77 pages, 36 figures, 9 tables and 4 appendices

Examiners: Professor Timo Björk
M.Sc. (Tech) Martti Nyhä

Keywords: Welding automation, welding portal, box beam, deflection analysis, modularity

Robotic product family includes robotic welding portals. These welding portals are mainly built with box beams. Box beam profiles are popular in various industrial sectors and it suits very well for heavy engineering industry.

There are many different stages in welding robot portal design and the chosen technical solutions can affect for the weld quality and the success of the manufacturing process. Welding robot portals are often tailor- made solutions and therefore design and manufacturing phase requires a lot of capacity. With the help of product modularity, it is possible to speed up the design and manufacturing process and improve the product testing, maintainability and quality.

The aim of this master's thesis was to develop robotic portal structure and investigate how the horizontal boom of the portal behaves and bends in different loading situations. In addition the aim was to determine a new optimized box beam profile and finally examine the possibility for modularity in robotic portal applications.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö tehtiin Loimaalla sijaitsevalle Pemamek Oy:lle. Työssä tutkittiin robottihitsausportaalin käyttäytymistä erilaisissa vaakapuomin kuormitustilanteissa sekä tarkasteltiin moduloinnin mahdollistamista robottihitsausportaalisovelluksissa. Tahdon kiittää työni tarkastajana toiminutta Martti Nyhää sekä pääsuunnittelija Simo Leinoa opastuksesta ja neuvoista työni aikana sekä mahdollisuudesta tehdä diplomityö haastavasta ja opettavaisesta aiheesta. Lappeenrannan teknillisen yliopiston puolelta haluan kiittää tarkastajana toiminutta professori Timo Björkiä asiantuntevista neuvoista työhöni liittyen sekä kannustuksesta diplomityöni tekoon.

Opiskelija-aika päättyy tämän diplomityön myötä. Haluan kiittää perhettäni useiden vuosien aikana saamasta tuesta. Kiitokset myös ystäville ja opiskelukavereille, joiden kanssa koettiin monet hauskat ja ikimuistoiset reissut opintojen ohessa. Erityiskiitos kannustuksesta sekä tuesta kuuluu tyttöystävälleni Karoliina Tervolle.

Tero Koivisto
Tampereella 27.04.2016

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ
ABSTRACT
ALKUSANAT
SISÄLLYSLUETTELO
SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO
1 JOHDANTO 11
1.1 Aikaisempi tutkimus 11
1.2 Tavoite 12
1.3 Työn rajaukset ja rakenne 12
1.4 Yrityksen esittely 12
2 PORTAALIPALKIN MÄÄRITYS 14
2.1 Hitsatun profiilin valmistus ja valinta 14
2.1.1 Materiaalivaatimukset 14
2.1.2 Rakenneosien mitoitus 16
2.1.3 Poikkileikkauksen valinta 16
2.1.4 Poikkileikkauksen kestävyys 17
2.1.5 Poikkileikkausluokitus 17
2.1.6 Teräksen lujuusluokan valinta 20
2.2 Koteloprofiilin teoreettinen tarkastelu 23
2.2.1 Uumien ja laippojen mitoitus 24
2.2.2 Palkin taipuma 26
2.2.3 Nurjahdus 26
2.2.4 Kiepahdus 32
2.2.5 Vääntö 33
2.2.6 Vinoutuminen 35

2.2.7 Väsyminen 36
2.2.8 Teräsrungon jäykistäminen 41
2.2.9 Kotelopalkin kaulushitsien määritys 43
3 MODULOINTI 44
3.1 Modulaarisuuden määritys 44
3.1.1 Tuotteen modulaarisuus 46
3.2 Modulaarisuuden edut ja haitat 47
3.2.1 Edut 47
3.2.2 Haitat 48
3.3 Vakio moduulit 49
3.4 Optio moduulit 51
3.5 Modulaarisen rakenteen kehittäminen 51
3.5.1 Robottihitsausportaalin rungon modulointi 52
3.6 Moduloinnin järkevyys 54
4 TULOKSET 56
4.1 FE-analyysin käyttö 56
4.2 Reunaehdot ja epätarkkuudet 58
4.2.1 Malli 58
4.2.2 Materiaalit 58
4.2.3 Liitospinnat ja tuennat 58
4.2.4 Verkon tiheys 58
4.2.5 Massat ja vaikuttavat voimat 59
4.3 Kuormien mallinnus 60
4.4 Taipumat sekä jännitysmaksimit taulukoituna 61
5 KOTELOPROFIILIN POIKKILEIKKAUKSEN OPTIMOINTI 69
5.1 Poikkileikkauksen optimointi 69
6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOKEHITYSTOIMENPITEET 71

7 YHTEENVETO 75

LÄHTEET 77

LIITTEET

LIITE 1: HD-portaalin taipumadata vaakapuomille viiden metrin jalkovälillä

LIITE 2: HD-portaalin taipumadata vaakapuomille neljän metrin jalkovälillä

LIITE 3: MD-portaalin taipumadata vaakapuomille

LIITE 4: Koteloprofiilin tarkastelua käsinlaskennalla

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

a	Hitsin a-mitta	[mm]
A	Poikkileikkauksen pinta-ala	[mm^2]
a_0	Alkusärö	[mm]
A_0	Alkuperäinen poikkileikkauksen pinta-ala	[mm^2]
A_{eff}	Tehollinen poikkileikkaus	[mm^2]
a_f	Loppusärö	[mm]
b	Laipan leveys	[mm]
b_1	Koteloprofiilin vapaa reuna	[mm]
b_2	Koteloprofiilin uumien välinen etäisyys	[mm]
B	Laipan leveys kotelopalkin kaulushitsin mitoituksessa	[mm]
C_0	Särönkasvulausekkeen vakio	[$Nmm^{\frac{-3}{2}}$]
d	Uuman paksuus kotelopalkin kaulushitsin mitoituksessa	[mm]
E	Kimmokerroin	[N/mm^2]
f_u	Materiaalin murtolujuus	[N/mm^2]
f_y	Materiaalin myötölujuus	[N/mm^2]
f_{yf}	Hybridipalkin laipan materiaalin myötölujuus	[N/mm^2]
f_{yw}	Hybridipalkin uuman materiaalin myötölujuus	[N/mm^2]
F_H	Vinouttava voima	[N]
F_v	Vääntävä voima	[N]
G	Poikkileikkauksen paino pituusyksikköä kohden	[N]
G_l	Liukumoduuli	[Mpa]
G_{235}	Lujuusluokan S235 valmistetun poikkileikkauksen paino	[N]
h	Uuman korkeus	[mm]
h_w	Uuman korkeus teräsrungon jäykistämisessä	[mm]
I	Poikkileikkauksen jäyhyys	[mm^4]
I_x	Poikkileikkauksen jäyhyys x-akselin suhteen	[mm^4]
I_t	Vääntöjäyhyysmomentti	[mm^4]
I_w	Käyristymisjäyhyysmomentti	[mm^4]
L	Sauvan nimellispituus	[mm]
L_0	Murtovenymän mittapituus	[mm]

L_{cr}	Kriittinen nurjahduspituus	[mm]
q	Vääntöleikkausvuo	
R_{eH}	Ylempi myötöraja	[Mpa]
R_{eL}	Alempi myötöraja	[Mpa]
m	S-N-kuvaajan kulmakerroin	
M	Momentti	[Nm]
n	Hitsien lukumäärä/ leikkaus	
N_{Ed}	Puristusvoiman mitoitusarvo	[N]
$N_{b,Rd}$	Sauvan nurjahduskestävyyden mitoitusarvo	[N]
N_{cr}	Nurjahduskuorma	[N]
N_f	Liitoksen vaurioon johtaneiden kuormanvaihtojen lukumäärä	
N_{ref}	Kestoikä	
$N_{st,ten}$	Aksiaalivoima	[N]
T	Kotelopalkkiin kohdistuva voima	
$T_{t,Ed}$	Vapaa vääntö	[Nm]
$T_{w,Ed}$	Estetty vääntö	[Nm]
T_p	Laipan paksuus kotelopalkin kaulushitsin mitoituksessa	[mm]
t_w	Uuman ainepaksuus	[mm]
t_f	Laipan ainepaksuus	[mm]
T_{Ed}	Vääntömomentin mitoitusarvo	
T_{Rd}	Poikkileikkauksen vääntökestävyys	
V_{Ed}	Leikkausvoiman mitoitusarvo	
W	Taivutusvastus	[mm^3]
α	Epätarkkuustekijä	
β_b	uumien välisen etäisyyden suhde	
β_c	vapaan reunan suhdeluku	
βw	Perusaineen murtolujuus	
η	Uuman korkeussuhde	
ε_u	Kokonaistasavenymä	[mm]
ε_y	Myötövenymä	[mm]
γ_{M0}	Poikkileikkauskestävyyden osavarmuusluku	
γ_{M1}	Materiaalin osavarmuuskerroin	

γ_{M2}	Materiaalin osavarmuuskerroin	
$\Delta\sigma$	Jännitysvaihtelu	[MPa]
ΔK	Jännitysintensiteettikerroin	
$\sigma_{x,Ed}$	Normaalijännitys sauvan akselin suunnassa	[N/mm^2]
$\sigma_{z,Ed}$	Normaalijännitys sauvan akselia vastaan kohtisuorassa suunnassa	[N/mm^2]
τ_{Ed}	Leikkausjännityksen mitoitusarvo	[N/mm^2]
$\tau_{t,Ed}$	Sauvan vapaan väännön leikkausjännitys	[MPa]
$\overline{\lambda}$	Muunnettu hoikkuus	
λ_w	Uuman muunnettu hoikkuus	
ϕ	Nurjahduksen apukerroin	
φ_h	Laipan ja uuman lujuuksien suhdetta rajoittava tekijä	
χ	Tasonurjahduksen pienennyskerroin	
θ'	Vääntymä eli kiertymän ensimmäinen derivaatta	
θ'''	Kiertymän kolmas derivaatta	

BEF	Kimmoisalla alustalla olevan palkin analogia
FAT	Väsymisluokka
FEA	Epälineaarinen analyysi
FEM	Finite Element Method, Elementtimenetelmä
HD-portaali	Pemamek Oy:n hitsausrobottiportaali
HSS	High strength steel, korkealujuusteräs
MFD	Modular Function Deployment, moduulikohtainen suunnittelu
MIM	Module Indication Matrix, Modulaaristen konseptien vertailutyökalu
MD-portaali	Pemamek Oy:n hitsausrobottiportaali

1 JOHDANTO

Kotelopalkkien käyttö teräsrakenneteollisuudessa on hyvin yleistä. Koteloprofiilit ovat valmistettavuuden kannalta hyvin hitsattavia ja muokattavia sekä ne ovat rakenteeltaan vääntöjäykkiä. Tämä tekee koteloprofiilista varsin edullisen vaihtoehdon verrattuna I-profiiliin. Kovassa kilpailutilanteessa yritysten on pyrittävä tehostamaan tuotantoaan ja karsittava turhia kustannuksia. Suunnitteluvaiheella on suuri merkitys, koska siinä määritetään suuri osa valmistettavan tuotteen kustannuksista aina valmistusvaiheesta lopullisen tuotteen käyttökustannuksiin ja kierrätykseen. Rakenteen optimointi sekä turhien materiaali- ja valmistuskustannusten karsiminen on olennainen osa tuotekehitystä ja samalla tavoiteltaessa kustannustehokasta prosessia.

Tämän työn tarkoituksena oli optimoida kotelopalkkiprofiilista valmistetun hitsausrobottiportaalin rakennetta ja tutkia moduloinnin mahdollistamista rakenteelle. Hyvin optimoitu rakenne ja tuotteen moduloitavuus pienentävät valmistukseen kuluvaa aikaa ja kustannuksia. Samalla yritys pystyy kilpailemaan paremmin markkinoilla laadukkaiden ja joustavien tuotteiden sekä nopeampien valmistusaikojen avulla.

Moduloinnilla tarkoitetaan tuotteen jakamista pienempiin osarakenteisiin eli moduuleihin. Modulaarisuus kuvastaa tuotteiden muunneltavuutta ennalta määrättyjen rajapintojen kohdalta, joiden kautta moduulien yhdistäminen eri sovellutuksiin tapahtuu. Moduulien vaihdolla tuotteen ominaisuuksia pyritään monipuolistamaan ja esimerkiksi robottihitsausportaaleissa hitsausvarustuksen vaihdolla pystytään muokkaamaan portaalin ominaisuuksia. Moduulisoinnin käytöllä tuotteen käyttöikää voidaan myös kasvattaa, jos tuoterakenteeseen tulee käyttöiän aikana päivityksiä ja lisäyksiä tai kuluvia osia vaihdetaan uusiin.

1.1 Aikaisempi tutkimus

Kirjallisuudessa on paljon kotelopalkkien suunnittelua ja mitoitusta käsitteleviä artikkeleita ja kirjoja, mutta hitsausportaalisovelluksista on vähän julkaisuja sekä tutkimusaineistoa saatavilla etenkin moduloinnin osalta.

1.2 Tavoite

Työn tavoitteena on löytää optimaalinen ratkaisu robottiportaalin vaakapuomin poikkileikkaukseksi, jotta vaakapuomista tulisi riittävän jäykkä soveltuakseen hitsausautomaatioon ja lisäksi rakenne olisi kustannustehokas. Vaakapuomi ei saa taipua liikaa, jotta hitsaustarkkuus säilyisi mahdollisimman hyvänä. Lisäksi tavoitteena on selvittää, miten modulointi olisi hyödynnettävissä kehitettäessä robottiportaalin rakennetta.

1.3 Työn rajaukset ja rakenne

Työ rajataan koskemaan vaakapuomin taipumatarkastelua ja sen rakenteen optimointia. Optimaalisen rakenteen tutkiminen rajataan kolmanteen poikkileikkausluokkaan. Samalla tutkitaan rakenteen moduloinnin mahdollistaminen ja kannattavuus. Työstä rajataan ulkopuolelle poikkileikkauksen vinoutumisen ja välilevyjen tarpeellisuuden analysointi sekä koteloprofiilin kaulushitsien lujuus vinoutumisessa.

Työn teoriaosuudessa käsitellään aluksi materiaalivaatimuksia sekä teräksen lujuusluokan ja poikkileikkausluokan valintaa. Tämän jälkeen esitetään katsaus koteloprofiilin teoreettisen tarkasteluun ja mitoitukseen liittyviin laskukaavoihin. Lisäksi käsitellään rakenteen väsymistä ja teräsrungon jäykistämistä. Teoriaosuuden päätteeksi käydään läpi moduloinnin periaate, edut ja haitat sekä moduloinnin soveltuvuus robottihitsausportaaliin. Lopuksi käydään läpi portaalin vaakapuomin rakennetta ja varusteluita, tarkastellaan laskentatuloksia suuremman kokoluokan HD-portaalille ja pienemmän kokoluokan MD-portaalille sekä suoritetaan vertailua optimoituun rakenteeseen.

1.4 Yrityksen esittely

Pemamek Oy on vuonna 1970 perustettu suomalainen hitsausautomaatioratkaisuja ja työkappaleen käsittelylaitteistoja valmistava yritys. Yrityksen pääkonttori suunnittelu- ja tuotantotiloineen sijaitsee Loimaalla ja lisäksi Pemamek Oy:lla on myyntitoimistoja Venäjällä, Brasiliassa, Saksassa ja Puolassa. Yhtiössä työskentelee noin 150 henkilöä ja tämän hetkisestäkin myynnistä yli 90 prosenttia on vientikauppaa. Pemamek on toimittanut yli 15000 laiteratkaisua yli 50 maahan. Kuvassa 1 on esitetty Pemamekin Loimaalla sijaitseva pääkonttori.

Kuva 1. Pemamek Oy:n toimipiste Loimaalla (Pemamek Oy, 2013, s. 18).

Pemamekin asiakaskunta koostuu useasta eri teollisuuden alasta. Yritys jaottelee toimintansa seitsemään eri osa-alueeseen (Pemamek Oy, 2014):

- heavy fabrication (raskas konepajateollisuus)
- mobile machinery (liikkuvien työkoneiden valmistus)
- civil steel construction (teräsrakenneteollisuus)
- shipbuilding and offshore (laivanrakennus- ja offshoreteollisuus)
- industrial boilers (voimalaitosteollisuus)
- wind energy (tuulivoimateollisuus)
- process and nuclear (prosessi- ja ydinvoimateollisuus)

2 PORTAALIPALKIN MÄÄRITYS

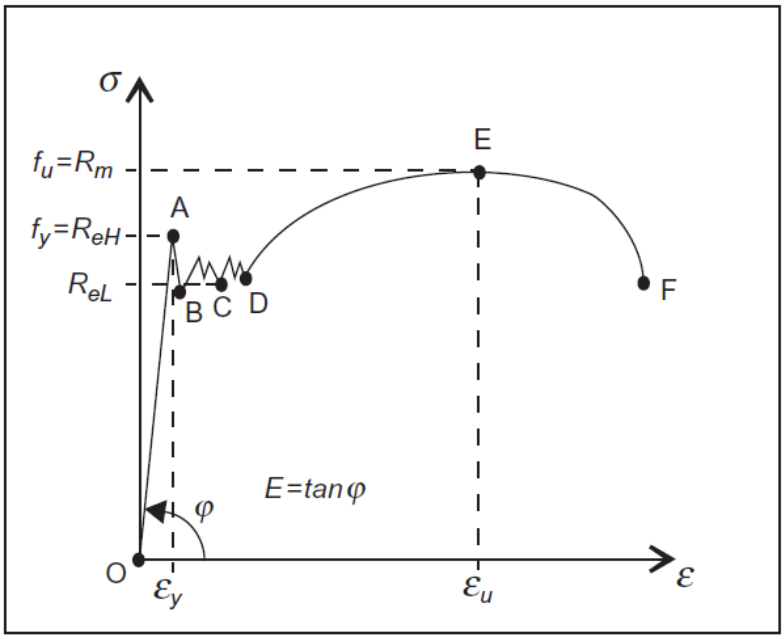
Robottihitsausportaalit ovat rakenteeltaan suurikokoisia, joten portaalipalkin profiilin poikkileikkaus sekä materiaalivalinta tulee määrittää tarkasti, jotta turhilta kustannuksilta tai ongelmatilanteilta vältyttäisiin.

2.1 Hitsatun profiilin valmistus ja valinta

Hitsattuja profiileja käytetään kohteissa, joissa vakioprofiilien käyttö on epäedullista. Syitä tähän on useita. Vakiomuoto ei välttämättä ole tarkoituksenmukainen, niitä ei ole saatavilla riittävän suurikokoisina kuormien tai jännevälien kasvaessa tai vakioprofiileja ei ole saatavissa halutussa materiaalin lujuusluokassa. Lisäksi vakiomuotojen rajoitteena voi tapauskohtaisesti toimia kilpailukyky verrattaessa hitsattuihin rakenteisiin. Hitsattavan profiilin suunnittelussa olisi tärkeää pyrkiä minimoimaan hitsien määrää, jotta niistä johtuvat kappaleiden muodonmuutokset olisivat mahdollisimman vähäisiä. Vaihtoehtoisia valmistusmenetelmiä on syytä tarkastella, kuten särmäyksen hyödyntämistä. Särmäyksellä saadaan vähennettyä liitettävien osien määrää, jolloin hitsien ja muodonmuutosten määrä samalla vähenee. Yleisesti voidaan sanoa, että hitsattujen profiilien käyttö tarjoaa suunnittelijalle enemmän mahdollisuuksia valita käyttökohteeseen kooltaan optimaalinen profiili.

2.1.1 Materiaalivaatimukset

Kuvassa 2 on esitetty teräkselle tehdyn vetokokeen jännitys-venymä-käyrä. Kuvasta huomataan, että välillä O-A sauva käyttäytyy täysin kimmoisasti eli Hooken laki on voimassa. Tämä tarkoittaa sitä, että jos kuormitus poistetaan, sauva palautuu alkuperäiseen muotoonsa. Kohdassa A saavutetaan ylempi myötöraja R_{eH}, jonka jälkeen kappaleeseen alkaa syntyä plastisia muodonmuutoksia, eli kappale ei enää palaudu entiselleen. Eurocodessa ylemmälle myötörajalle käytetään merkintää f_y. Vastaavaa venymää ε_y kutsutaan myötövenymäksi. Myötövenymän arvo on riippuvainen teräksen lujuusluokasta. Välillä B-D venymä kasvaa ja jännityksen arvo pysyy likimain samalla tasolla. Tätä aluetta kutsutaan myötöalueeksi. Pisteessä C olevaa pienintä jännitystä myötöalueella kutsutaan alemmaksi myötörajaksi R_{eL}.



Kuva 2. Kuumavalssatun teräksen jännitys-venymä-käyrä (Ongelin et al., 2010, s. 23).

Kuvassa 2 pisteessä D plastinen muodonmuutos on kasvanut riittävän suureksi, että koesauva tasaisesti myötölujittuu. Näin ollen sauvan venyttämiseen tarvittava jännitys kasvaa. Pisteessä E saavutetaan jännitysmaksimi eli kappaleen murtojännitys f_u. Tämän pisteen ylitettyä kappaleen venyttämiseen tarvittava voima pienenee huomattavasti ja kohdassa F saavutetaan kappaleen murtokohta.

Eurocode edellyttää, että teräksien tulee olla ominaisuuksiltaan riittävän sitkeitä, jotta ne soveltuvat kimmoteorian lisäksi myös plastisuusteorian mukaiseen mitoitukseen. Tämä pystytään määrittämään kolmella eri tapaa (Ongelin et al., 2010, s. 25–27):

1) vetomurtolujuuden f_u ja myötörajan f_y miniarvojen perusteella:
   lujuusluokilla S235-S460:
   $$\frac{f_u}{f_y} \geq 1{,}10 \tag{1}$$
   sekä lujuusluokilla S500-S700:
   $$\frac{f_u}{f_y} \geq 1{,}05 \tag{2}$$
2) kokonaistasavenymän ε_u avulla:
   $$\varepsilon_u \geq 15\varepsilon_y\,, \quad \text{missä } \varepsilon_y \text{ on myötövenymä } (\ \varepsilon_y = \frac{f_y}{E}\ ) \tag{3}$$
3) Mittapituutta vastaavan murtovenymän avulla:

$L_0 = 5{,}65 * \sqrt{A_0}$, missä A_0 on poikkileikkauksen alkuperäinen pinta-ala. Standardin SFS-EN 1993-1-1 (2005) mukaan murtovenymän suositellaan olevan lujuusluokilla S235-S460 vähintään 15 % ja lujuusluokilla S500-S700 10 % mittapituuden L_0–arvosta.

2.1.2 Rakenneosien mitoitus

Teräsrakenteiden perusrakenneosia kuten palkkeja ja pilareita kutsutaan sauvoiksi, jotka voivat olla erilaisten voimien kuten puristuksen, taivutuksen ja väännön kuormittamia. Kaikki sauvat mitoitetaan ottamalla huomioon murtorajatilassa esiintyvät rajoitukset. Näitä rajoituksia ovat mm. seuraavat tilat (Kaitila, 2014, s. 33):

- rakenteen kriittisen kohdan murtuminen
- vaihtoplastisoituminen
- rakenteen stabiiliuden menetys (lommahdus)
- särön kasvu muuttuva-amplitudisen kuormituksen seurauksena, joka voi johtaa liitoksen tai rakenteen murtumiseen

Lisäksi taivutetuissa sauvoissa tulee ottaa huomioon suurimpien muodonmuutosten kuten taipumien rajoittaminen. Palkkien mitoitusperiaatteena toimivat taivutusmomentit, leikkausvoimat sekä mahdolliset vääntömomentit (Kaitila, 2014, s. 47).

2.1.3 Poikkileikkauksen valinta

Hitsatun profiilin kustannukset koostuvat monesta osa-alueesta, kuten esimerkiksi materiaalin hinnasta, suunnittelu-, valmistus-, kuljetus- ja asennuskustannuksista. I-profiilia voidaan pitää kustannustehokkaana ratkaisuna, kun poikkileikkaukseen kohdistuu taivutusta profiilin vahvemmassa suunnassa. Vastaavasti, kun poikkileikkaukseen kohdistuu suurta sivuttaistaivutusta, vääntörasitusta tai suuria normaalivoimia, on koteloprofiili parempi vaihtoehto, koska se omaa suuremman vääntöjäykkyyden ja toisen tason taivutusjäykkyyden (Ongelin et al., 2010, s. 31–32).

Poikkileikkauksen muodon tai levypaksuuksien valinnassa täytyy ymmärtää myös valmistustekniset lähtökohdat. Kaikkia profiilikokoja ei ole järkevää valmistaa ilman, että profiilien painonsäästössä olisi huomattavaa eroa. Tämä konkretisoituu suurissa sarjatuotannoissa, joissa voidaan tilata suuria määriä samankokoisia levyjä tai yhdestä isommasta ai-

hiokoosta voidaan valmistaa useampia profiileja. Samalla säästyy aikaa, kun monia aihioita ei tarvitse siirrellä ja profiiliaihioiden hitsaus nopeutuu.

2.1.4 Poikkileikkauksen kestävyys

Kestävyydellä tarkoitetaan rakenteen kykyä kantaa siihen kohdistuvat kuormitukset ilman, että rakenne murtuu tai että muodonmuutokset kasvavat liian suuriksi. Määräytyen poikkileikkauksen osien hoikkuudesta voi stabiiliuden menetys määrittää poikkileikkauksen maksimi kestävyyden jo ennen plastisoitumista. Poikkileikkaukseen voi vaikuttaa samanaikaisesti useampia erilaisia kuormituksia, kuten puristava tai vetävä normaalivoima, taivutus- ja vääntömomentti. Jännityksen suurimpia arvoja voidaan rajoittaa von Mises'n myötöehdon mukaisesti. Tällöin mitoitus tapahtuu kimmoteorian mukaan ja myötäämistä pidetään kestävyyden mitoitusrajana. (SFS-EN 1993-1-1, 2005, s.48; Kaitila, 2014, s. 47.)

$$\sqrt{{\sigma_{x,Ed}}^2 + {\sigma_{z,Ed}}^2 - \sigma_{x,Ed} * \sigma_{z,Ed} + 3{\tau_{Ed}}^2} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{tai} \tag{4}$$

$${\gamma_{M0}}^2 \left[\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y}\right)^2 - \frac{\sigma_{x,Ed} * \sigma_{z,Ed}}{{f_y}^2} + 3\left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y}\right)^2 \right] \leq 1 \tag{5}$$

, missä

γ_{M0} on poikkileikkauskestävyyden osavarmuusluku

$\sigma_{x,Ed}$ on normaalijännitys sauvan akselin suunnassa

$\sigma_{z,Ed}$ on normaalijännitys sauvan akselia vastaan kohtisuorassa suunnassa

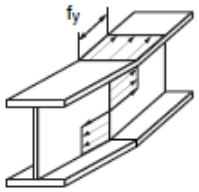
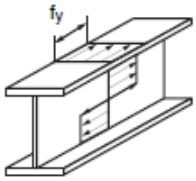
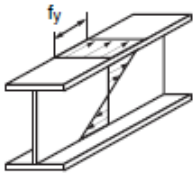
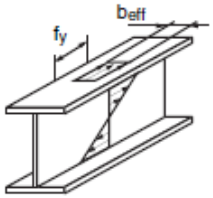
τ_{Ed} on leikkausjännitys tarkasteltavassa kohdassa

f_y on materiaalin myötölujuus.

2.1.5 Poikkileikkausluokitus

Poikkileikkausluokka kertoo, miten poikkileikkauksen paikallinen lommahdus vaikuttaa poikkileikkauksen kestävyyteen ja kiertymiskykyyn (Ongelin et al., 2010, s. 77). Taulukossa 1 on esitetty poikkileikkausluokkien jakotapa neljään eri luokkaan ja mitoitusmenetelmät.

Taulukko 1. Mitoitusmenetelmät eri poikkileikkausluokissa (Ongelin et al. 2010, s. 79).

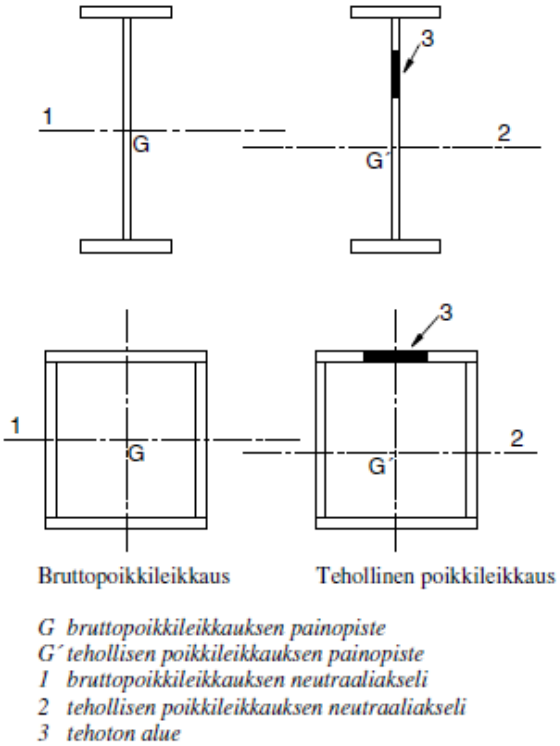
Poikkileikkausluokka	Kestävyyden laskentatapa	Voimasuureiden laskentatapa	Jännitysjakauma, kun kestävyys on saavutettu
1	plastisuusteoria	plastisuusteoria	
2	plastisuusteoria	kimmoteoria	
3	kimmoteoria	kimmoteoria	
4	tehollinen poikkileikkaus	kimmoteoria	

Ongelin et al. (2010, s.77–78) luokittelee poikkileikkausluokat seuraavasti:

1) Poikkileikkausluokka 1 (PL1). Poikkileikkaus on täysplastinen ja kiertymiskykyinen. Tämä tarkoittaa sitä, että sauvoihin voi syntyä riittävän kiertymiskykyisiä plastisia niveliä.
2) Poikkileikkausluokka 2 (PL2). Poikkileikkaus on kompakti ja siihen voi kehittyä plastisuusteorian mukainen taivutuskestävyys, mutta ei plastiseen niveleen vaadittavaa kiertymiskykyä. Tällöin sauvaan syntyy paikallisia plastisia lommoja.
3) Poikkileikkausluokka 3 (PL3). Poikkileikkausluokkaan 3 kuuluvan sauvan poikkileikkaus on puolikompakti. Poikkileikkauksen koko teräsmäärä saadaan teholliseen käyttöön ja sauvan puristetussa reunassa jännitys voi kasvaa myötörajan suuruiseksi. Ongelin et al. (2010, s. 77) mukaan ”poikkileikkaus lommahtaa ennen kuin sisäinen momentti on kehittynyt poikkileikkauksen plastisen taivutuskestävyyden suuruiseksi.” Mitoitettaessa rakenteita puristusjännityksen suurinta arvoa käytetään

materiaalin mitoituslujuutena (f_y / γ_{M1}), missä γ_{M1} on sauvan osavarmuusluku stabiiliuden suhteen.

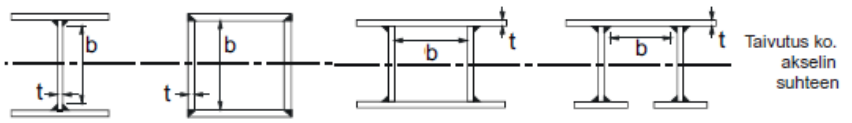
4) Poikkileikkausluokka 4 (PL4). Poikkileikkaus on hoikka ja vain osa siitä on tehollista. Poikkileikkaus lommahtaa myötölujuutta pienemmällä jännityksen arvolla, joten kestävyys määritetään kimmoteorian mukaan tehollisen pinta-alan avulla. Kuvassa 3 on havainnollistettu poikkileikkausluokan 4 tehollinen poikkileikkaus.

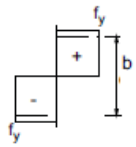
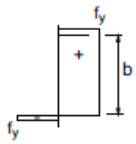
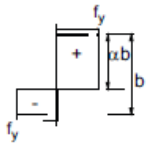
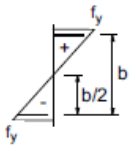
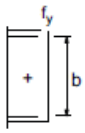
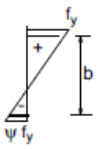


Kuva 3. Poikkileikkausluokka 4 – taivutusmomentti (SFS-EN 1993-1-5, 2006, s. 15).

Palkkeja suunniteltaessa on suositeltavaa, että laipan paksuus ja leveys valitaan mahdollisuuksien mukaan vähintään poikkileikkausluokkaan 3. Poikkileikkausluokassa 4 osa puristetusta laipasta on tehotonta. Tämä tarkoittaa sitä, että laipassa on ylimääräistä terästä, joka ei toimi poikkileikkauksen osana. Puristetut rakenteet on suositeltavaa mitoittaa poikkileikkausluokka 3 mukaan, koska siten koko pinta-ala pystytään hyödyntämään kuormitusta kantavana osana (Ongelin et al., 2010, s. 32). On myös mahdollista, että laippa ja uuma mitoitetaan eri poikkileikkausluokkiin, jolloin poikkileikkausluokitus tehdään ilmoittamalla molempien poikkileikkausluokat erikseen (SFS-EN 1993-1-1, 2005, s. 43). Taulukossa 2 on esitetty poikkileikkausluokkien rajat taivutetuille ja puristetuille taso-osille.

Taulukko 2. Poikkileikkausluokkien rajat(Ongelin et al., 2010, s. 83).



Poikkileikkaus-luokka	Taivutetut taso-osat	Puristetut taso-osat	Taivutetut ja puristetut taso-osat [a)]
Taso-osan jännitysjakauma (puristus positiivinen)			 b)
1	$b/t \le 72\varepsilon$	$b/t \le 33\varepsilon$	$kun\ \alpha > 0,5:\quad b/t \le \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1}$ $kun\ \alpha \le 0,5:\quad b/t \le \frac{36\varepsilon}{\alpha}$
2	$b/t \le 83\varepsilon$	$b/t \le 38\varepsilon$	$kun\ \alpha > 0,5:\quad b/t \le \frac{456\varepsilon}{13\alpha - 1}$ $kun\ \alpha \le 0,5:\quad b/t \le \frac{41,5\varepsilon}{\alpha}$
Taso-osan jännitysjakauma (puristus positiivinen)			
3	$b/t \le 124\varepsilon$ c)	$b/t \le 42\varepsilon$ d)	$kun\ \psi > -1:\quad b/t \le \frac{42\varepsilon}{0,67 + 0,33\psi}$ e) $kun\ \psi \le -1$ [f)]$: b/t \le 62\varepsilon(1-\psi)\sqrt{(-\psi)}$

$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	**355**	420	460	500
	ε	1,0000	0,9244	**0,8136**	0,7480	0,7148	0,6856
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	550	600	620	650	690	700
	ε	0,6537	0,6258	0,6157	0,6013	0,5836	0,5794

a) Varmalla puolella oleva arvio saadaan, kun poikkileikkausluokka määritetään puhtaan puristuksen mukaan
b) Puristetun osan korkeuden määrittäminen (α-kerroin), ks. kohta 2.7.1
c) EN 1993-1-5 mukaan raja-arvoksi saadaan: $b/t \le 121{,}43\varepsilon$
d) EN 1993-1-5 mukaan raja-arvoksi saadaan: $b/t \le 38{,}25\varepsilon$
e) EN 1993-1-5 mukaan raja-arvo riippuu lommahduskertoimesta k_σ ja jännityssuhteesta ψ
f) Kohtaa $\psi \le -1$ käytetään, kun joko puristusjännitys $\sigma < f_y$ tai vedetyn puolen venymä $\varepsilon_y > f_y / E$

2.1.6 Teräksen lujuusluokan valinta

Suomessa yleisin hitsattu profiili valmistetaan lujuusluokan S355 teräksestä. Tätä pidetään myös suunniteltavien profiilien peruslujuutena. Eurocode määrittelee myös lujuusluokan S420 ja S460 teräkset normaalilujuuksiin. Näitä teräksiä korkeamman lujuusluokan omaavat teräkset luokitellaan korkealujuusteräksiksi, joista käytetään myös nimilyhennettä HSS-teräkset (High Strength Steels) (Ongelin et al., 2010, s. 45). Teräksen valintaan vaikuttaa lukuisia eri asioita. Valinnan lähtökohtana toimivat vaurioitumismekanismit ja mitoituskriteerit, jotka määräytyvät käyttökohteen ja ympäristöolosuhteiden mukaan. Näiden vaatimusten perusteella tehdään valinnat materiaalin saatavuuden, hinnan ja materiaaliominaisuuksien kuten hitsattavuuden ja muokattavuuden mukaan, jotta toimivuus ja kus-

tannukset saadaan optimoitua. Toimivuudessa on otettava huomioon konepajavalmistettavuuden lisäksi myös asiakkaan käytön mukaiset toiminnot. (Kaitila, 2014, s. 28.)

Lujien terästen käytön tärkein syy on painonsäästö. Ainepaksuuden ohentaminen keventää rakennetta ja tällöin saavutetaan materiaalisäästöjä. Ohuempien ainepaksuuksien myötä hitsauslisäaineen tarve vähenee ja näin ollen saavutetaan säästöjä myös hitsauskustannuksissa. Profiilin poikkileikkauksen painon minimointi perustuu laipan ja uuman paksuuksien sekä uuman korkeuden ja laipan leveyden optimointiin (Ongelin et al., 2010, s. 34). Yleisesti voidaan sanoa, että lujien terästen käyttö on kannattavaa, jos rakenne on raskaasti kuormitettu ja rakenteelle halutaan merkittävää painonsäästöä. Tämän lisäksi rakenteen kuormitustavalla on suuri vaikutus lujuusluokan valintaan. Lujuuden kasvattamisesta saatava painonsäästö voidaan määrittää kaavasta, jossa vertailukohtana toimii S235 teräs. Tämä kaava pätee puristettuun levykenttään.

$$\frac{G}{G_{235}} = \varepsilon = \sqrt{235/f_y} \tag{6}$$

, missä

G= poikkileikkauksen paino pituusyksikköä kohden

G_{235} = poikkileikkauksen paino, joka on valmistettu lujuusluokasta S235

f_y = materiaalin nimellinen myötölujuus, $[f_y]$= N/mm^2.

(Ongelin et al., 2010, s. 34.)

Korkealujuusterästen suurempaa myötölujuutta ei kuitenkaan pystytä aina käyttämään täysin hyväksi vastaavana painonsäästönä, koska Eurocode määrittelee korkealujuusluokan teräksille lisäehtoja mitoitukseen, jotka voivat estää myötölujuuden täyden hyödyntämisen. Korkealujuusterästen myötä konepajavalmistus tulee hitsausteknisesti vaativammaksi hitsauksen osalta, koska työkappaleelle voidaan asettaa mahdollisia lämmöntuontirajoituksia sekä laaduntarkkailu on vaativampaa. Tällöin painonsäästössä saatavat kustannussäästöt voivat kompensoitua näiden rajoitusten myötä.

Suuremmasta myötölujuudesta ei ole myöskään väsyttävässä kuormituksessa merkittävää hyötyä ilman erityistoimenpiteitä. Väsymislujuus määräytyy jännitysvaihteluiden suuruudesta ja jännityssuhteesta, detaljin geometriasta (jännityskonsentraatiot, lovet, säröt ja viat), materiaalista ja jäännösjännitystilasta. Lujan teräksen hyödyntäminen väsymiskuormitetussa rakenteessa edellyttää laatutason nostoa ja jäännösjännitystilan säätöä normaalia

konepajatasoa (C) paremmaksi. Muutoin lujuudesta ei ole hyötyä väsymiskestävyyden paranemisena. (Björk, 2011.)

Korkealujuusterästen etuja pystytään parhaiten hyödyntämään hybridipalkeissa. Hybridipalkissa laipat valmistetaan lujemmasta teräksestä kuin uumat. Tällöin laipat ovat mahdollista optimoida taivutusrasituksen perusteella ja uuman lujuusluokka määritellä leikkausrasituksen perusteella. (Ongelin et al., 2010, s. 48.)

Eurocode määrittelee rajaehdot laippojen ja uumien materiaalilujuuksille seuraavan kaavan mukaisesti.

$$f_{yf} \leq \varphi_h * f_{yw} \tag{7}$$

, missä

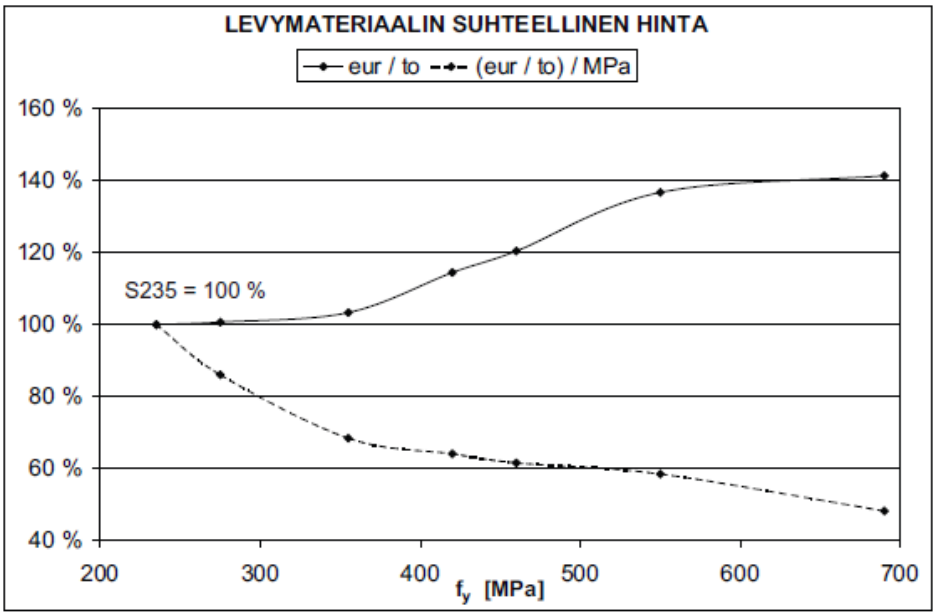
f_{yf} = hybridipalkin laipan materiaalin myötölujuus

f_{yw} = hybridipalkin uuman materiaalin myötölujuus

φ_h = laipan ja uuman lujuuksien suhdetta rajoittava tekijä. Eurocoden suositusarvo on φ_h= 2,0.

(SFS-EN 1993-1-5, 2006, s. 14.)

Kaavan 7 mukaan valittaessa uuman materiaaliksi lujuusluokan S355 teräs, voidaan laipoissa käyttää korkeintaan lujuusluokan S700 terästä.



Kuva 4. Eri terästen lujuusluokkien sekä myötölujuuksien hintoja (materiaalin hinta jaettuna myötölujuudella) vuoden 2007 alussa (Ongelin et al., 2010, s. 46).

Korkealujuusterästen käytön suurimpia rajoitteita ovat niiden korkea hinta ja saatavuus. Kuvasta 4 huomataan, että myötölujuuden kasvaessa myös teräksen kilohinta kasvaa. Kuvassa 4 teräksen myötölujuuden hinta (eur/to) saadaan määritettyä jakamalla terästonnin hinta nimellisellä myötölujuudella. Kun suhteutetaan teräslaadun hinta myötölujuuden arvoon, voidaan päätellä, että lujien terästen käyttö on varsin edullinen vaihtoehto, jos sen ominaisuuksia pystytään hyödyntämään täysin. Tällöin on mahdollista saavuttaa energiasäästöjä käyttötilanteessa. On lisäksi muistettava, että kuljetus, rakenteen asennettavuus tai kierrätys voivat toimia tekijöinä lujuusluokkaa valittaessa.

2.2 Koteloprofiilin teoreettinen tarkastelu

Koteloprofiili on suosittu profiilimuoto raskaasti kuormitetuissa kohteissa, joissa poikkileikkaukseen kohdistuu suurta sivuttaistaivutusta ja vääntörasitusta. Koteloprofiili on vääntökuormituksessa poikkileikkaukseltaan edullinen muoto, koska sen vääntöjäykkyys on moninkertainen esimerkiksi verrattuna I-profiiliin. Kuvassa 5 on esitetty kotelopalkkiprofiilin periaatekuva, josta käy ilmi seuraavat geometriasuureet:

b = koteloprofiilin laipan leveys

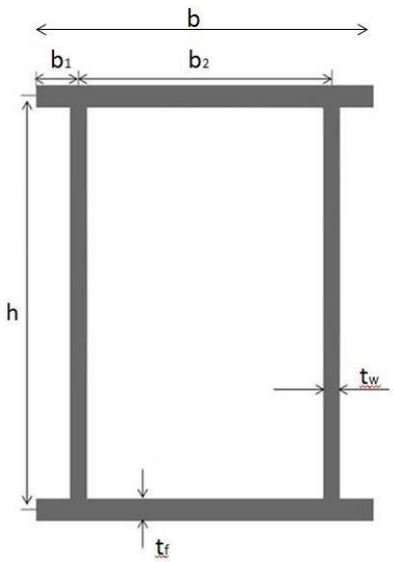
b_1 = vapaan reunan leveys

b_2 = uumien välinen etäisyys

h = koteloprofiilin korkeus

t_w = uuman ainepaksuus

t_f = laipan ainepaksuus.

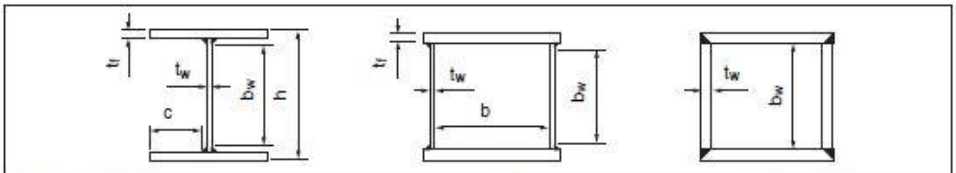


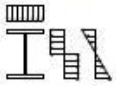
Kuva 5. Kotelopalkkiprofiilin periaatekuva. Uuman korkeus h on yksinkertaistuksen vuoksi mitoitettu laippojen keskelle.

2.2.1 Uumien ja laippojen mitoitus

Valitaan kotelopalkin geometria suureiksi uuman korkeudeksi h, laipan leveydeksi b, vapaan reunan leveydeksi b_1, uumien väliseksi etäisyydeksi b_2, uumien ainepaksuudeksi t_w ja laipan ainepaksuudeksi t_f. On suositeltu, että kotelopalkkiprofiilin vapaan reunan leveys b_1 olisi vähintään 25 mm, jotta esimerkiksi jauhekaarihitsausta käytettäessä jauhe pysyisi laipan päällä hitsauksen ajan. (Ongelin et al., 2010, s. 552.) Taulukossa 3 on esitetty kaksoissymmetristen I- ja koteloprofiilien poikkileikkausluokkien rajat lujuusluokille S235-S700.

Taulukko 3. Kaksoissymmetristen I- ja koteloprofiilien poikkileikkausluokkien rajat lujuusluokilla S235-S700 (Ongelin et al., 2010, s. 85).



Kuormitustapaus			Taivutus			Puristus [a)]		
								
Poikkileikkausluokka			1	2	3	1	2	3
f_y (N/mm^2)								
235	b_w/t_w	(uuma)	72,0	83,0	124,0	33,0	38,0	42,0
	c/t_f	(laippa)	9,0	10,0	14,0	9,0	10,0	14,0
	b/t_f	(laippa)	33,0	38,0	42,0	33,0	38,0	42,0
275	b_w/t_w	(uuma)	66,6	76,7	114,6	30,5	35,1	38,8
	c/t_f	(laippa)	8,3	9,2	12,9	8,3	9,2	12,9
	b/t_f	(laippa)	30,5	35,1	38,8	30,5	35,1	38,8
355	**b_w/t_w**	**(uuma)**	**58,6**	**67,5**	**100,9**	**26,8**	**30,9**	**34,2**
	c/t_f	**(laippa)**	**7,3**	**8,1**	**11,4**	**7,3**	**8,1**	**11,4**
	b/t_f	**(laippa)**	**26,8**	**30,9**	**34,2**	**26,8**	**30,9**	**34,2**
420	b_w/t_w	(uuma)	53,9	62,1	92,8	24,7	28,4	31,4
	c/t_f	(laippa)	6,7	7,5	10,5	6,7	7,5	10,5
	b/t_f	(laippa)	24,7	28,4	31,4	24,7	28,4	31,4
460	b_w/t_w	(uuma)	51,5	59,3	88,6	23,6	27,2	30,0
	c/t_f	(laippa)	6,4	7,1	10,0	6,4	7,1	10,0
	b/t_f	(laippa)	23,6	27,2	30,0	23,6	27,2	30,0
500	b_w/t_w	(uuma)	49,4	56,9	85,0	22,6	26,1	28,8
	c/t_f	(laippa)	6,2	6,9	9,6	6,2	6,9	9,6
	b/t_f	(laippa)	22,6	26,1	28,8	22,6	26,1	28,8
550	b_w/t_w	(uuma)	47,1	54,3	81,1	21,6	24,8	27,5
	c/t_f	(laippa)	5,9	6,5	9,2	5,9	6,5	9,2
	b/t_f	(laippa)	21,6	24,8	27,5	21,6	24,8	27,5
600	b_w/t_w	(uuma)	45,1	51,9	77,6	20,7	23,8	26,3
	c/t_f	(laippa)	5,6	6,3	8,8	5,6	6,3	8,8
	b/t_f	(laippa)	20,7	23,8	26,3	20,7	23,8	26,3
620	b_w/t_w	(uuma)	44,3	51,1	76,3	20,3	23,4	25,9
	c/t_f	(laippa)	5,5	6,2	8,6	5,5	6,2	8,6
	b/t_f	(laippa)	20,3	23,4	25,9	20,3	23,4	25,9
650	b_w/t_w	(uuma)	43,3	49,9	74,6	19,8	22,8	25,3
	c/t_f	(laippa)	5,4	6,0	8,4	5,4	6,0	8,4
	b/t_f	(laippa)	19,8	22,8	25,3	19,8	22,8	25,3
690	b_w/t_w	(uuma)	42,0	48,4	72,4	19,3	22,2	24,5
	c/t_f	(laippa)	5,3	5,8	8,2	5,3	5,8	8,2
	b/t_f	(laippa)	19,3	22,2	24,5	19,3	22,2	24,5
700	b_w/t_w	(uuma)	41,7	48,1	71,8	19,1	22,0	24,3
	c/t_f	(laippa)	5,2	5,8	8,1	5,2	5,8	8,1
	b/t_f	(laippa)	19,1	22,0	24,3	19,1	22,0	24,3

a) Tasaisesti puristetun poikkileikkauksen kaikkia PL-luokkien raja-arvoja voidaan käyttää samanaikaisesti puristetun ja taivutetun poikkileikkauksen uumalle ja laipalle varmalla puolella olevina ko. poikkileikkausluokkien rajoina. PL-luokkien tarkat rajat samanaikaisesti puristetun ja taivutetun poikkileikkauksen uumalle ja laipalle voidaan määrittää taulukoiden 2.7 ja 2.8 mukaan.

Kotelopalkki voidaan mitoittaa seuraavien kaavojen avulla (Björk, 2011; Farkas, 2013, s. 44–45):

Poikkileikkauksen jäyhyys x-akselin suhteen saadaan määritettyä kaavasta

$$I_x = 2bt_f \frac{h^2}{4} + 2t_w \frac{h^3}{12} \tag{8}$$

, missä

I_x = poikkileikkauksen jäyhyys x-akselin suhteen.

Taivutusvastus saadaan laskettu kaavasta

$$W = \frac{I}{h/2} = bt_f h + \frac{h^2 t_w}{3} = \frac{M}{f_y} \tag{9}$$

, missä

W= taivustusvastus

M= momentti

Poikkileikkauksen raja-arvojen mittasuhteet valitaan taulukosta 3 poikkileikkausluokan 3 mukaan

$$h = \eta t_w \tag{10}$$

, missä

η= uuman korkeussuhde

$$b = (\beta_b + 2\beta_c)t_f \tag{11}$$

, missä

β_b= uumien välisen etäisyyden suhde

β_c= vapaan reunan suhdeluku

Taivutusvastus voidaan nyt kirjoittaa muotoon:

$$W = \frac{b^2}{\beta_b + 2\beta_c} h + \frac{h^3}{3\eta} \rightarrow \frac{b^2}{\beta_b + 2\beta_c} = \frac{W}{h} - \frac{h^2}{3\eta} \tag{12}$$

Poikkileikkauksen pinta-ala voidaan määrittää kuvan 5 mukaan seuraavasti

$$A = 4t_f b_1 + 2t_f b_2 + 2t_w h \tag{13}$$

tai yksinkertaisemmin

$$A = 2bt_f + 2ht_w \tag{14}$$

Sijoittamalla taivutusvastuksen kaava pinta-alan lausekkeeseen saadaan poikkileikkauksen pinta-alasta seuraava laskentakaava

$$A = 2\frac{b^2}{\beta_b+2\beta_c} + 2\frac{h^2}{\eta} = \frac{2W}{h} - \frac{2h^2}{3\eta} + \frac{2h^2}{\eta} = \frac{2W}{h} + \frac{4h^2}{3\eta} \tag{15}$$

Kotelopalkin optimaalinen korkeus saadaan derivoinnin avulla minimoimalla palkin pinta-ala korkeuden suhteen

$$\frac{dA}{dh} = -\frac{2W}{h^2} + \frac{8h}{3\eta} = 0 \rightarrow h = \sqrt[3]{\frac{3}{4}W\eta} = \sqrt[3]{\frac{3M}{4f_y}\eta} \tag{16}$$

Uuman ainevahvuus saadaan tämän jälkeen ratkaistua aikaisemmin mainitun poikkileikkausluokan raja-arvojen määrityksen mukaan. Uuman paksuus tai korkeus on ratkaistavissa kaavan 17 avulla. Kaavan esimerkissä määritetään laipan t_w paksuutta.

$$t_w \geq \frac{h}{\eta} \tag{17}$$

Laipan leveys saadaan määritettyä kaavasta

$$b \geq \sqrt{\left[\frac{W}{h} - \frac{h^2}{3\eta}\right](\beta_b + 2\beta_c)} = \sqrt{\left[\frac{M}{f_y h} - \frac{h^2}{3\eta}\right](\beta_b + 2\beta_c)} \tag{18}$$

Laipan paksuudeksi saadaan

$$t_f = \frac{b}{\beta_b+2\beta_c} \tag{19}$$

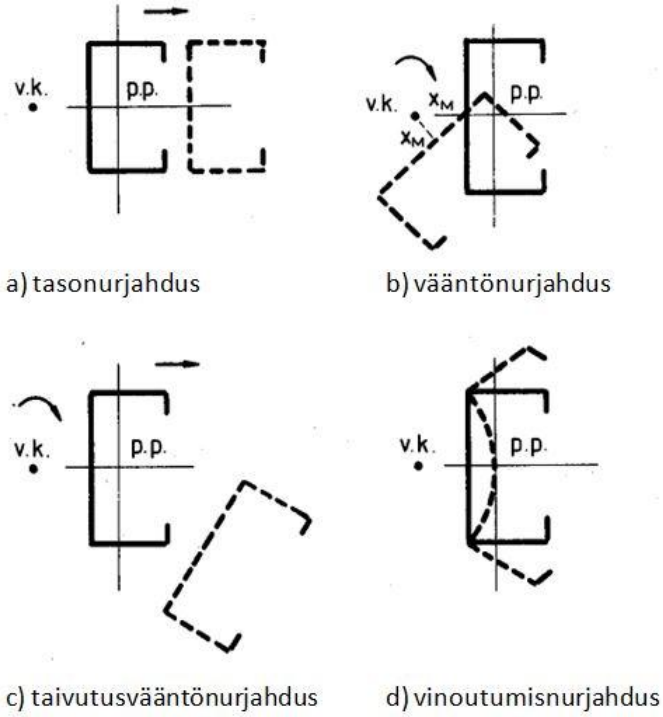
2.2.2 Palkin taipuma

Palkin taipumat eivät saa rajoittaa rakenteen toiminnallisuutta. Uloke ja vapaasti tuetun palkin taipumien kaavoja eri kuormitustilanteissa on listattu kirjallisuudessa mm. Tekniikan taulukkokirjassa (Valtanen, 2008, s. 383–390). Pysyvän kuorman aiheuttamaa taipumaa voidaan kompensoida esikorotuksella. Tämä toimenpide korostuu etenkin, jos palkin jänneväli kasvaa suureksi. Palkin uuman korkeus ja poikkileikkauksen paino pienenevät, jos materiaalina käytetään lujia teräksiä ja suoria tahkoja, mutta samalla se aiheuttaa palkin taipuman kasvua. Tällöin taipuma voi muodostua poikkileikkauksen mitoittavaksi tekijäksi. (Ongelin et al., 2010, s. 10, 37.) Tämä ongelma on mahdollista eliminoida lisäämällä palkin monimutkaisuusastetta esimerkiksi taipeiden ja jäykisteiden avulla.

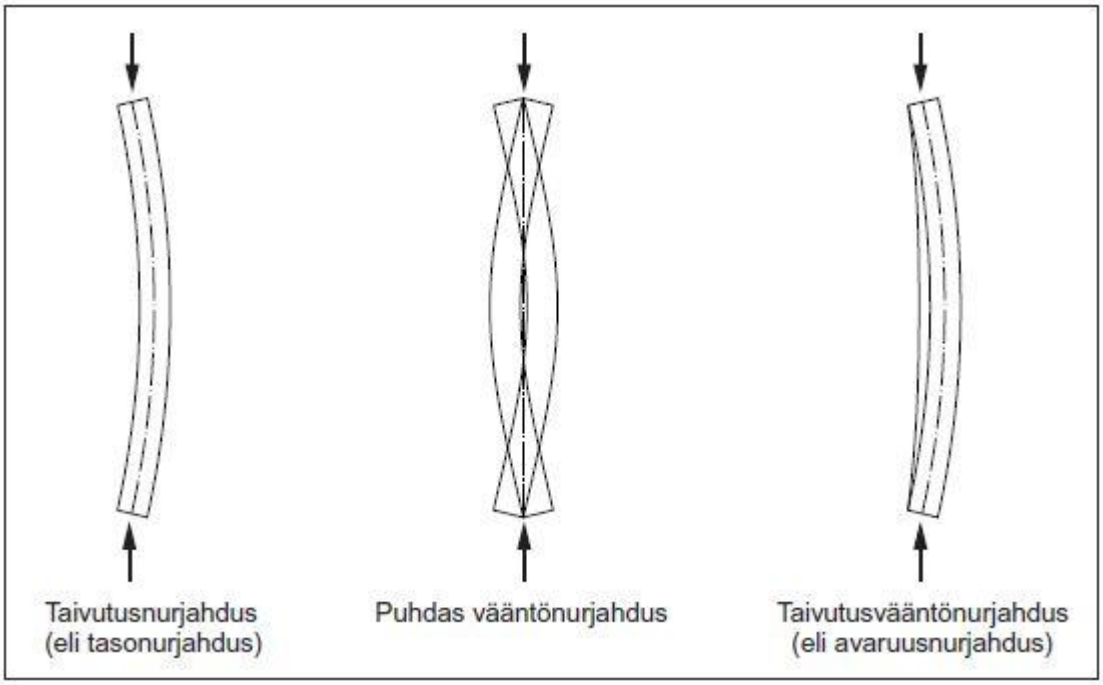
2.2.3 Nurjahdus

Profiilin nurjahtaminen aiheutuu sauvaan kohdistuvasta riittävän suuresta normaalivoimasta. Profiilin muoto vaikuttaa nurjahdusmuotoon. Erilaisia nurjahdusmuotoja ovat tasonur-

jahdus, vääntönurjahdus, taivutusvääntönurjahdus sekä vinoutumisnurjahdus. Kuvissa 6 ja 7 on havainnollistettu eri nurjahdusmuotojen periaatteet.



Kuva 6. Nurjahdusmuodot (Björk, 2011).



Kuva 7. Nurjahdusmuodot 2 (Ongelin et al., 2010, s. 108).

Vääntönurjahdusta tapahtuu lähinnä avoprofiileilla, koska koteloprofiilit omaavat suuremman vääntöjäykkyyden. Kuvasta 6 huomataan, että vääntönurjahdusta voi tapahtua puhtaana vääntönä (b), jolloin poikkileikkaus kiertyy vääntökeskiön ympäri tai taivutusvääntönurjahduksena (c), jossa kiertymä ja poikittainen siirtymä tapahtuu yhtä aikaa symmetrsia-akselilta kohtisuorasti poispäin. Vinoutumisnurjahdusta tapahtuu lähinnä ohutseinämäisillä puristuskuormitetuilla monitahkoisilla profiileilla. Monitahkoisella tarkoitetaan profiilia, jossa tahkojen lukumäärä on vähintään neljä. Mitä enemmän tahkoja on, sitä enemmän on myös vinoutumisvapausasteita. Koteloprofiilit eivät vinoutumisnurjahda, mutta vinoutuvat poikittaiskuormasta, jos se ei kulje profiilin vinoutusmisneliön kautta. Tällöin profiili menee salmiakkimuotoon. (Björk, 2011.)

Nurjahduskestävyydet määritetään erikseen kullekin kyseeseen tulevalle nurjahdusmuodolle ja -suunnalle, mikäli kyseistä nurjahdusmuotoa ei ole sopivilla reunaehdoilla estetty. Erityisesti pitkillä sauvoilla nurjahdus tulee ottaa huomioon, koska tällöin sauvan geometria ja materiaalin elastisuus tulevat merkittäviksi tekijöiksi ja nurjahdus voi tapahtua myötörajaa alemmassa jännitystilassa. Jos koteloprofiileilla reunaehdot poikkeavat pääjäyhyysakselien suunnissa, tasonurjahdus on tarkistettava niin pääjäyhyysakselin suhteen kuin myös reunaehtojen mukaisilla suunnilla. (Ongelin et al., 2010, s. 108.)

Profiilin nurjahduskestävyys voidaan määrittää kriittisen nurjahduskuorman N_{cr} sekä tietylle nurjahdusmuodolle käytettävän nurjahduskäyrän avulla. Käytettävä nurjahduskäyrä määräytyy tutkittavan poikkileikkauksen, nurjahdussuunnan ja teräksen lujuusluokan mukaan ja ne on esitetty kuvassa 8. Nurjahduskuorma N_{cr} määräytyy neliömomentin I ja nurjahduspituuden L_{cr} mukaan.

Ideaalielastinen nurjahduskestävyys määritetään Eulerin-kaavan mukaisesti

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{{L_{cr}}^2} \tag{20}$$

, missä

I = poikkileikkauksen jäyhyys nurjahdussuunnassa

L_{cr} = nurjahduspituus kriittisessä suunnassa

Nurjahduspituus määräytyy sauvan päiden tuennoista. Standardissa SFS-EN 1993 1-1 (2005) ei ole määritetty ohjearvoja nurjahduspituudelle, mutta nurjahduksen perustapauksille on arvioitu seuraavia arvoja (L= sauvan nimellispituus) (Kaitila, 2014, s. 54):

- sauvan molemmat päät on tiukasti kiinnitetty ja sauvan päät eivät pääse kiertymään tai siirtymään toistensa suhteen: $L_{cr} = 0{,}5L$
- sauvan toinen pää on jäykästi kiinnitetty ja toinen pää nivelkiinnitetty. Siirtymistä ei tapahdu toisen pään suhteen: $L_{cr} = 0{,}7L$
- sauvan molemmat päät ovat nivelkiinnitettyjä $L_{cr} = L$
- sauvan toinen pää on kiinnitetty jäykästi, estetty siirtymästä ja kiertymästä, mutta toinen pää on vapaasti siirtyvä: $L_{cr} = 2L$

Puristetut sauvat mitoitetaan niin, että nurjahdusehto on voimassa (SFS-EN 1993 1-1, 2005, s. 61)

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1{,}0 \tag{21}$$

, missä

N_{Ed} = puristusvoiman mitoitusarvo

$N_{b,Rd}$ = sauvan nurjahduskestävyyden mitoitusarvo

Sauvan puristuskestävyyden laskemiseksi pitää ensin määrittää muunnettu hoikkuus, nurjahduksen apukerroin sekä tasonurjahduksen pienennyskerroin, jotka voidaan laskea standardin SFS-EN 1993-1-1(2005) mukaan

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr}}} \tag{22}$$

, missä

$\bar{\lambda}$ = muunnettu hoikkuus

A_{eff} = tehollinen poikkileikkaus (=A poikkileikkausluokissa 1-3)

A = poikkileikkauksen pinta-ala

f_y = myötölujuus

Jos muunnetun hoikkuuden arvo $\bar{\lambda} \leq 0{,}2$ nurjahdusta ei tarvitse tarkistaa vaan pelkkä poikkileikkauksen tarkistus riittää. Tämän ehdon toteutumiseksi sauvat ovat hyvin lyhyitä ja laskennallisesti niillä ei ole käytännön merkitystä. (SFS-EN 1993 1-1, 2005, s. 62.)

Nurjahduksen apukerroin saadaan laskettua kaavasta

$$\phi = 0.5\left\lfloor 1 + \alpha\left(\bar{\lambda} - 0.2\right) + \bar{\lambda}^2 \right\rfloor \tag{23}$$

, missä

ϕ = nurjahduksen apukerroin

$\bar{\lambda}$ = muunnettu hoikkuus

α = epätarkkuustekijä

Epätarkkuustekijä α saadaan määritettyä taulukoiden 4 ja 5 avulla, jossa valitaan nurjahduskäyrä profiilin poikkileikkauksen ja teräslujuuden mukaan. Nurjahduskäyrät on esitettynä kuvassa 8. Kuvassa esiintyvä pienennystekijä χ saadaan määritettyä laskukaavasta

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}}\ ;\ \chi \leq 1{,}0 \tag{24}$$

, missä

χ = tasonurjahduksen pienennyskerroin

ϕ = nurjahduksen apukerroin

$\bar{\lambda}$ = muunnettu hoikkuus

Tämän jälkeen tasonurjahduskestävyys voidaan laskea seuraavasti

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A_{eff} f_y}{\gamma_{M1}} \tag{25}$$

, missä

$N_{b,Rd}$ = tasonurjahduskestävyys

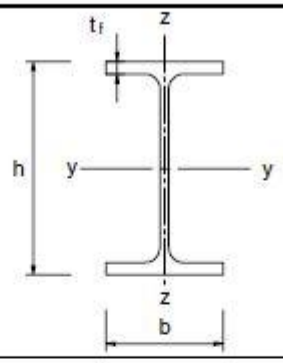
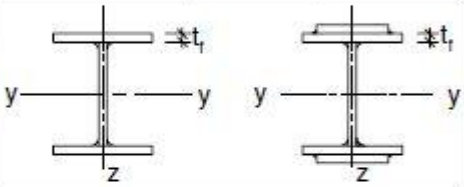
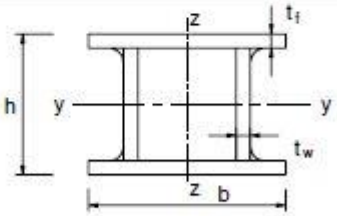
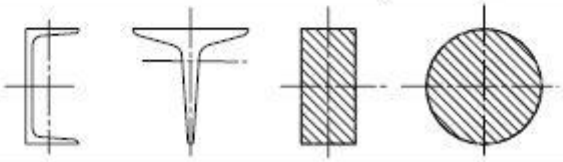
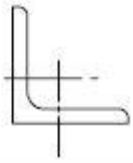
χ = tasonurjahduksen pienennyskerroin

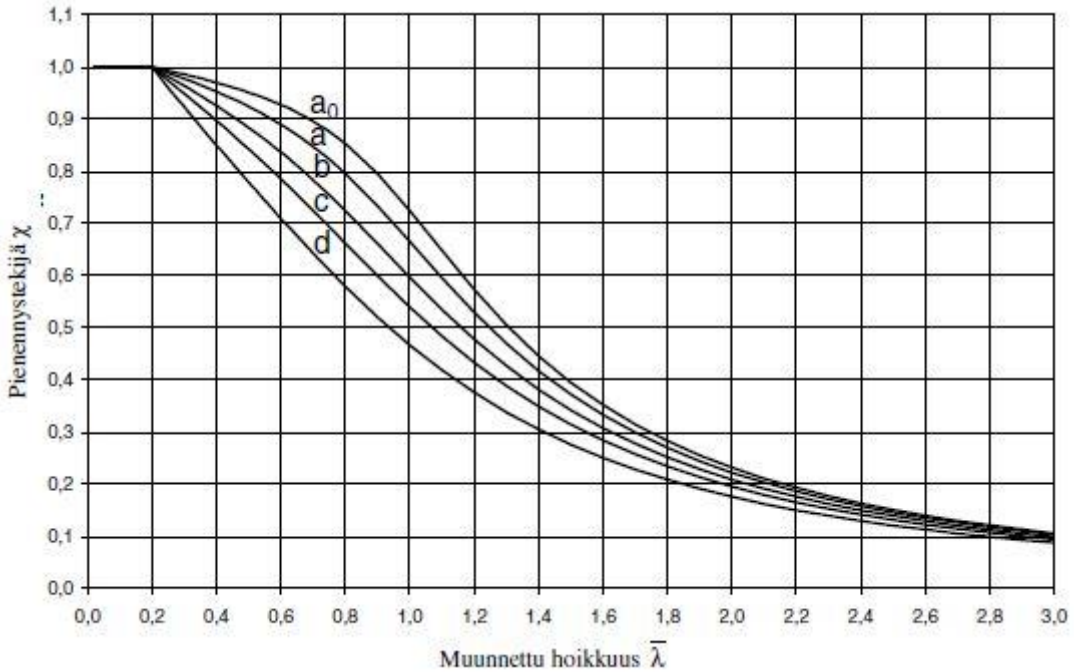
A_{eff} = tehollinen poikkileikkaus (=A poikkileikkausluokissa 1-3)

f_y = myötölujuus

γ_{M1}= materiaalin osavarmuuskerroin

Taulukko 4. Nurjahduskäyrän valinta eri poikkileikkauksille (SFS-EN 1993-1-1,2005, s. 63).

Poikkileikkaus		Rajat		Nurjahdus ko. akselin suhteen	Nurjahduskäyrä S 235 S 275 S 355 S 420	Nurjahduskäyrä S 460
Valssatut profiilit		h/b > 1,2	$t_f \leq 40$ mm	y – y z – z	a b	a_0 a_0
			40 mm < $t_f \leq 100$	y – y z – z	b c	a a
		h/b ≤ 1,2	$t_f \leq 100$ mm	y – y z – z	b c	a a
			$t_f > 100$ mm	y – y z – z	d d	c c
Hitsatut I-profiilit		$t_f \leq 40$ mm		y – y z – z	b c	b c
		$t_f > 40$ mm		y – y z – z	c d	c d
Rakenneputket		Kuumamuovattu		Kaikki	a	a_0
		Kylmämuovattu		Kaikki	c	c
Hitsatut kotelo-profiilit		Yleensä (poikkeus, ks. alla)		Kaikki	b	b
		Paksut hitsit: $a > 0{,}5t_f$ $b/t_f < 30$ $h/t_w < 30$		Kaikki	c	c
U-, T- ja umpiprofiilit				Kaikki	c	c
L-teräkset				Kaikki	b	b



Kuva 8. Nurjahduskäyrät (SFS-EN 1993-1-1, 2005, s. 64).

Taulukko 5. Nurjahduskäyrien epätarkkuustekijät (SFS-EN 1993-1-1,2005, s. 62).

Nurjahduskäyrä	a_0	a	b	c	d
Epätarkkuustekijä α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Mitoituksessa määritetään ensin ideaalielastinen kestävyys analyyttisesti tai numeerisesti, josta tämän jälkeen määritetään standardien mukaisesti kapasiteetti. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää myös epälineaarista analyysiä (FEA) kapasiteetin määrittämiseksi.

2.2.4 Kiepahdus

Kiepahduksessa sauva menettää stabiiliutensa taipumalla sivusuuntaan ja samalla kiertymällä pituusakselinsa ympäri. Profiilien kiepahduskestävyyteen vaikuttaa sauvan pituus, kuormitus, tuenta ja vääntöjäykkyys. Mitä pienempiä vääntöjäykkyys ja sivuttaisjäykkyys ovat, sitä herkemmin sauva kiepahtaa. Tässä on huomattava ero I-profiilien ja koteloprofiilien sivuttaisjäykkyyksien välillä. Hoikat ja korkeat I-palkit ovat kiepahdusherkempiä kuin suljetut kotelo- tai putkiprofiilit. Ero syntyy profiilimuodosta ja profiilin hoikkuus vain numeerisesti kasvattaa eroa. Sivuttaisjäykkyys ja vääntöjäykkyys toimivat tulona kiepahdusta vastaan. Kotelo- ja putkiprofiileissa nämä jäykkyydet ovat huomattavasti suurempia

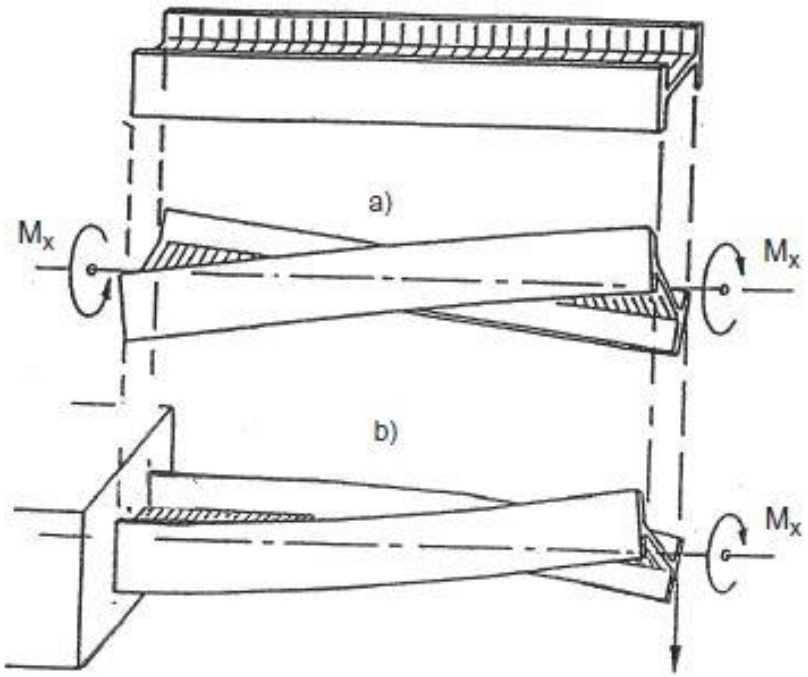
I-profiiliin verrattuna ja tästä johtuen kiepahdusta ei normaalisti tarvitse kotelo- ja putki-profiilien kohdalla ottaa huomioon. (Björk, 2011; Kaitila 2014, s. 57.)

2.2.5 Vääntö

Vääntöä ilmenee tapauksissa, joissa leikkausvoima ei kulje vääntökeskiön kautta tai arinarakenteessa taivutusmomentti muuttuu palkin risteyskohdassa vääntömomentiksi. Vääntöilmiöt voidaan jakaa kolmeen alatyyppiin (Ongelin et al., 2010, s. 163):

- vapaa vääntö (Saint Venantin vääntö)
- estetty vääntö
- yhdistetty vääntö

Vapaassa väännössä poikkileikkaukseen muodostuu vain vapaan väännön aiheuttamia leikkausjännityksiä $\tau_{t,Ed}$. Estetyssä väännössä poikkileikkaukseen syntyy myös normaalijännitystä, koska poikkileikkauksen pinta ei pääse käyristymään. Käyristyminen voidaan estää esimerkiksi hitsaamalla sauvan toinen pää paksuun päätylevyyn, jonka oma vääntöjäykkyys estää sauvan pituussuuntaiset muodonmuutokset. Yhdistetyssä väännössä poikkileikkaukseen syntyy nimensä mukaisesti kaikki edellä kuvatut jännitykset. Kuvassa 9 on esitetty periaatteet sauvan vapaasta väännöstä ja estetystä väännöstä.



Kuva 9. Sauvan vapaa vääntö (a) ja estetty vääntö (b) (Ongelin et al., 2010, s. 164).

Vääntökarakteristikan avulla voidaan analysoida eri vääntötapauksia

$$kL = L\sqrt{\frac{G_l I_t}{E I_w}} \tag{26}$$

, missä

L = sauvan pituus

I_t = vääntöneliömomentti

I_w = käyristymisjäyhyys

G_l = liukumoduuli

E = kimmokerroin

Vääntöluokat voidaan jaotella seuraavasti:

- kyseessä on vapaa vääntö, jos $kL > 15$
- kyseessä on estetty vääntö, jos $kL \leq 0{,}7$
- kyseessä on yhdistetty vääntö, jos $0{,}7 < kL \leq 15$

Sauvan mitoituksen tulee täyttää väännön osalta seuraava ehto (SFS-EN 1993-1-1, 2005, s. 56)

$$T_{Ed} \leq T_{Rd}$$

, missä

T_{Ed} = vääntömomentin mitoitusarvo

T_{Rd} = poikkileikkauksen vääntökestävyys

Vääntömomentti T_{Ed} koostuu vapaan väännön $T_{t,Ed}$ ja estetyn väännön $T_{w,Ed}$ summasta. St.Venantin vääntömomentti on suoraan verrannollinen vääntökulman θ muutokseen ja estetyn väännön vääntömomentti on verrannollinen vääntökulman θ kolmanteen derivaattaan. (Björk, 2011)

$$T_{Ed} = T_{t,Ed} + T_{w,Ed} = G_l I_t \theta' + E I_w \theta''' \tag{27}$$

, missä

G_l = liukumoduuli

E = kimmomoduuli

I_t = vääntöjäyhyysmomentti

I_w = käyristymisjäyhyysmomentti

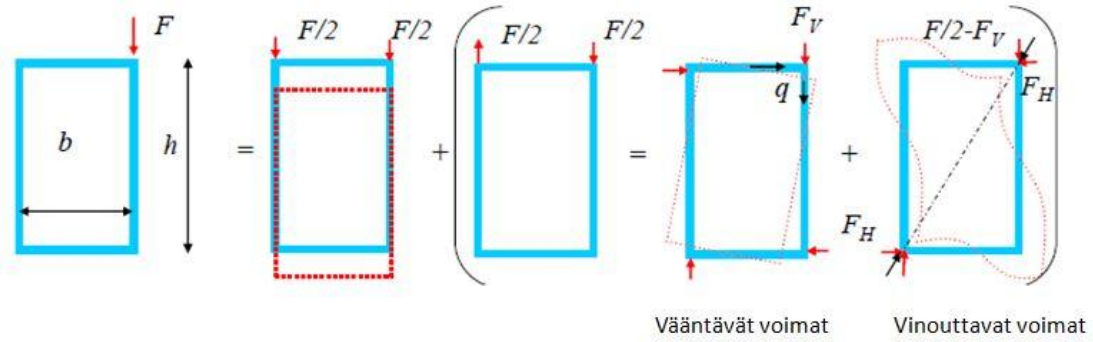
θ' = vääntymä eli kiertymän ensimmäinen derivaatta

θ''' = kiertymän kolmas derivaatta

Suljetuissa profiileissa, kuten koteloissa ja putkissa, vapaan väännön aiheuttamat leikkausjännitykset $\tau_{t,Ed}$ ovat merkittäviä ja estetyn väännön jännitykset voidaan jättää kokonaan huomiotta kestävyystarkastelussa, mikäli rakenne ei ole väsyttävästi kuormitettu (Björk 2011).

2.2.6 Vinoutuminen

Kotelopalkkia väännettäessä syntyy vääntöleikkausvuo ja vinouttava voimapari. Vääntöleikkausvuota voidaan pitää suljetun poikkipinnan jokaisessa osassa vakiona. Vinouttava voimapari muodostuu, kun koteloon kohdistuu ulkoisia kuormia kuvan 10 mukaisesti.



Kuva 10. Kotelopalkkiin kohdistuvat vääntävät ja vinouttavat voimat (Björk, 2011).

Vinouttavat voimat saadaan määritettyä kuvan 10 mukaan seuraavasti:

$$T = F_V b + F_H h = \frac{Fb}{2} \tag{28}$$

, missä

T = kotelopalkkiin kohdistuva voima

F_v = vääntävä voima

F_H = vinouttava voima

Vääntöleikkausvuo q on vakio, joten tästä saadaan

$$q = vakio = \frac{F_V}{h} = \frac{F_H}{b} \rightarrow F_V = \frac{h}{b} F_H \tag{29}$$

Sijoitetaan kaava 29 kaavaan 28, jolloin saadaan

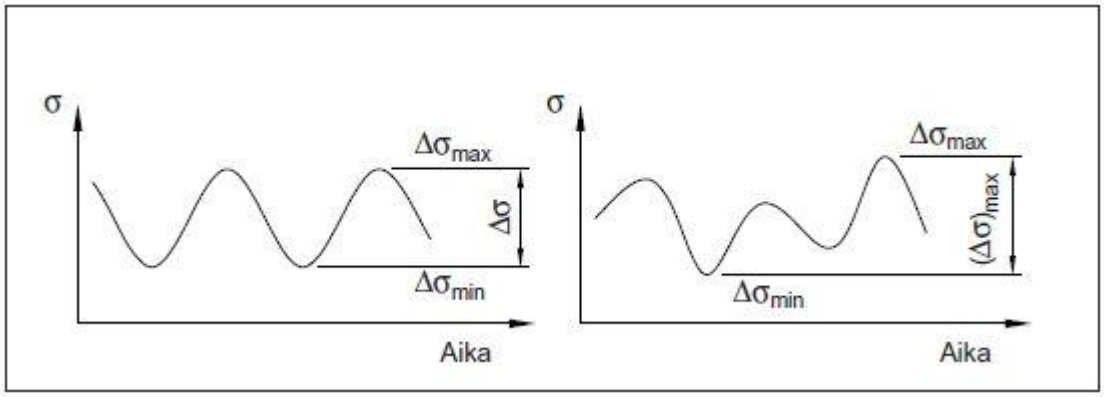
$$F_H h + F_H h = \frac{Fb}{2} \Rightarrow F_H = \frac{Fb}{4h} \tag{30}$$

$$\Rightarrow F_V = \frac{F_H h}{b} = \frac{F}{4}$$

Vinoutuminen estyy, jos poikkileikkaus muodostuu kolmioista. Vinoutumisjännitysten ja siirtymien laskenta voidaan suorittaa erikseen BEF-teorialla, jossa palkki oletetaan olevan kimmoisalla alustalla. BEF-teorian oletuksena on, että uumilla ja laipoilla olisi yhteneväinen tuenta. (Nikula, 1990, s. 16.)

2.2.7 Väsyminen

Rakenne voi murtua väsyttävän kuormituksen seurauksena, vaikka rakenteen staattinen kantokyky kuormalle olisikin riittävä. Kuormitus voi olla suunnaltaan ja suuruudeltaan vaihtelevaa ja kuvan 11 mukaisesti vakio- tai muuttuva-amplitudista. Vakioamplitudisessa kuormituksessa jännitysvaihtelut pysyvät suuruudeltaan vakiona. Muuttuva-amplitudisessa kuormituksessa jännitysvaihtelut muuttuvat ajan suhteen. (Ongelin et al., 2010, s. 425.)



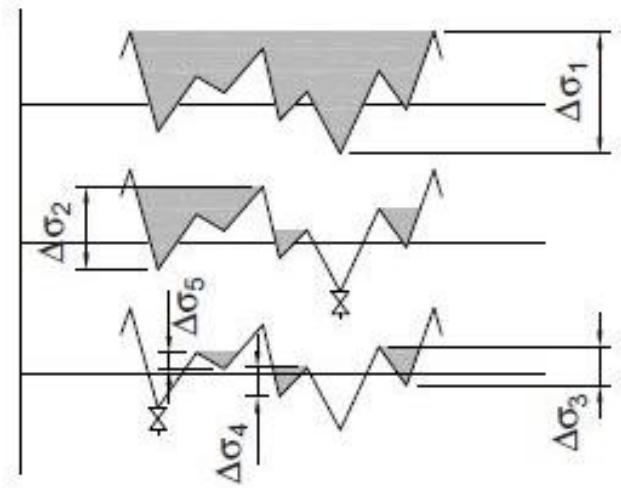
Kuva 11. Vakio- ja muuttuva-amplitudinen kuormitus (Ongelin et al., 2010, s. 425).

Hitsatuissa rakenteissa esiintyy aina pieniä alkusäröjä, ellei niitä ole poistettu esimerkiksi hiomalla. Väsymisen saa aikaan särönkasvun. Särön kasvaminen riittävän suureksi johtaa rakenteen murtumiseen. Hitsatuissa rakenteissa kriittisin paikka on hitsin ja perusaineen välinen rajaviiva tai juuren puoli, josta särö kasvaa jännitysvaihteluiden mukaan. Särö kasvaa aluksi syvyyttä aineen paksuus- ja leveyssuunnassa ja muuttuu lopulta läpimeneväksi säröksi, joka kasvaa edelleen pituutta. Mitä suurempia jännitysvaihtelut $\Delta\sigma$ ovat, sitä nopeammin rakenne väsyy ja lopulta murtuu. (Björk, 2011.) Hitsatun rakenteen väsymiskestävyyteen vaikuttaa lisäksi useita eri tekijöitä, kuten (Ongelin et al., 2010, s. 425–426):

- kuormitusten lukumäärä
- hitsien muotoilu
- alkusäröt ja niiden suurus
- rakenteen epäjatkuvuuskohdat

- materiaalin sitkeys
- jäännösjännitykset

Tarkasteltavista jännitysvaihteluista muodostetaan jännityshistoria, jonka avulla pystytään määrittämään väsymisen kannalta merkittävien jännitysvaihteluiden lukumäärät kuvan 12 mukaisesti. Menetelmää kutsutaan vesisäiliö-menetelmäksi, jossa eri jännitysvaihtelut luokitellaan sopivin porrastuksin omiin vaihtelutasoihin. Suuruusjärjestyksessä $\Delta\sigma_1$ vastaa vedenpinnan suurinta laskua, kun alimmasta kohdasta avataan vesihana. Tämän jälkeen avataan vesihana kohdasta, josta saadaan toiseksi suurin vedenpinnan lasku ja siten jännitysvaihtelu $\Delta\sigma_2$. Samaa periaatetta jatketaan, kunnes kaikki vesi on saatu pois.



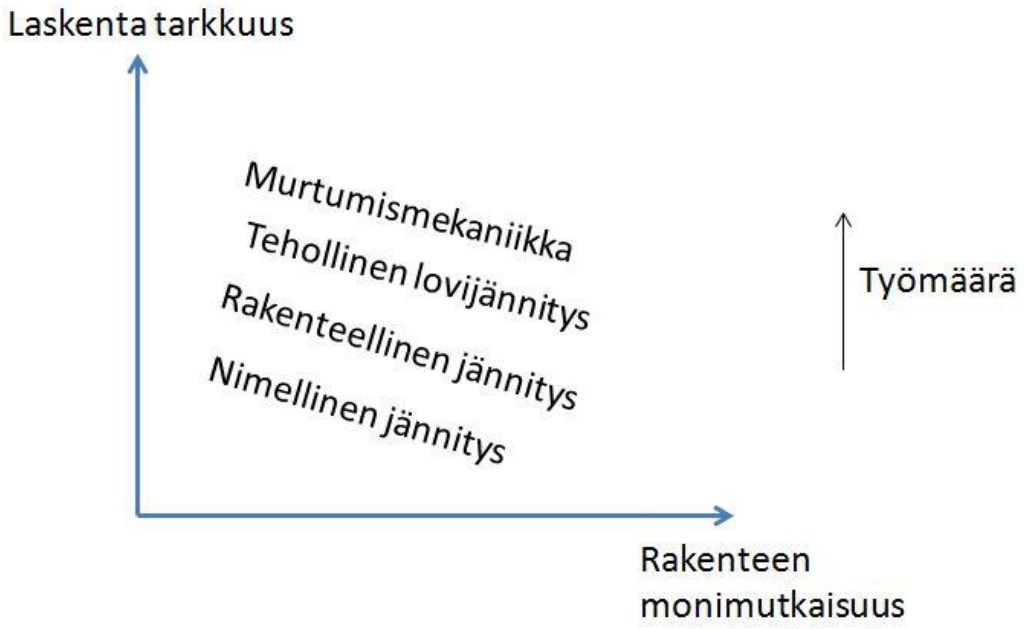
Kuva 12. Vesisäiliö menetelmä (Ongelin et al., 2010, s. 428).

Jos rakennetta kuormitetaan vakiona pysyvällä tykyttävällä kuormituksella, voidaan jännitysheilahduksen ominaisarvona käyttää minimi- ja maksimijännityksen erotusta. Tapauksissa, jotka ovat kuormitettu vaihtuvalla jännitysvaihtelulla, muodostetaan jännitysvaihtelun ominaisarvona käytettävä ekvivalentti jännitysvaihtelu $\Delta\sigma_{ekv}$. Ekvivalentti jännitysvaihtelu saadaan määritettyä seuraavasti vesisäiliömenetelmän avulla. (Niemi, 2003, s. 92–97)

$$\Delta\sigma_{ekv} = \sqrt{\frac{\Sigma(n_i * \Delta\sigma_i{}^3)}{N_{ref}}} \tag{31}$$

Kaavassa n_i on jännitysheilahdusten lukumäärä, $\Delta\sigma_i$ jännitysheilahduksen suuruus ja N_{ref} käyttöikää kuvaava kestoiän yksikkö.

Hitsausliitoksen väsyminen voidaan mitoittaa ainakin neljällä eri menetelmällä: Nimellisen jännityksen, rakenteellisen jännityksen, tehollisen lovijännityksen tai murtumismekaniikan perusteella. (Hobbacher, 2013.) Kuvassa 13 on esitetty nämä mitoitusmenetelmät niiden työmäärän ja tarkkuuden mukaan. Tästä huomataan, että murtumismekaniikka on näistä kaikista tarkin työmenetelmä, mutta se vaatii samalla suurimman määrän työtä. Kuvan ideana on, että yksinkertaisessa tapauksessa menetelmien tarkkuus lähenee toisiaan ja monimutkaisemmassa tapauksessa hajonta on suurempi.

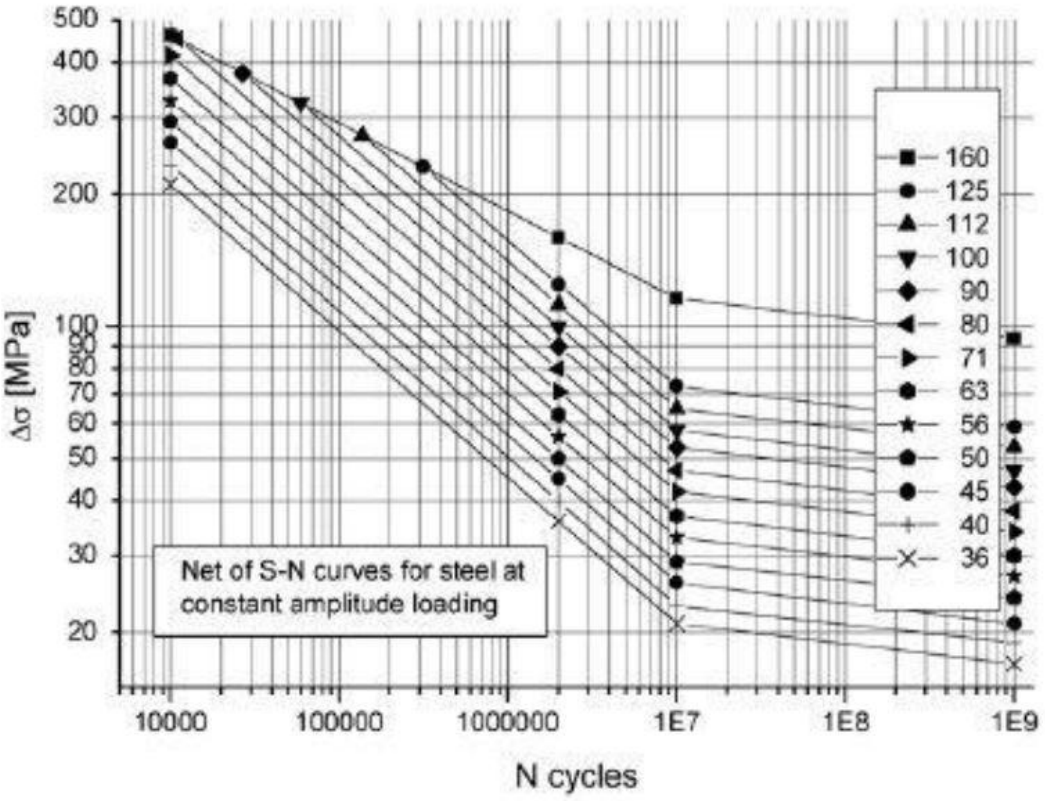


Kuva 13. Hitsausliitoksen väsymisen mitoitusmenetelmät (Björk, 2011).

Nimellisen jännityksen menetelmässä rakenteen jännitykset lasketaan kimmoteorian mukaan. Aksiaali- ja taivutusjännitykset, kuormituksen suunta, reunaehdot ja rakenteen epäjatkuvuuskohdat voidaan jättää huomiotta. Kestoikä saadaan laskettua seuraavasti: (Niemi, 2003, s. 96)

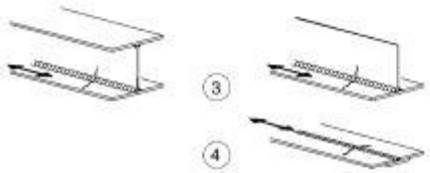
$$N_f = \left[\frac{FAT}{\Delta\sigma}\right]^m * 2 * 10^6 \tag{32}$$

, missä N_f on liitoksen vaurioon johtaneiden kuormanvaihtojen lukumäärä, FAT on rakenteen väsymisluokka, $\Delta\sigma$ on jännitysvaihtelu (MPa) ja m on kuvan 14 S-N-kuvaajan kulmakerroin. Mitä suurempi FAT-luokka on, sitä paremmin liitos kestää kuormanvaihtoja. Kaavasta 32 nähdään esimerkiksi, että kun jännitysvaihtelut pysyvät samana ja samalla FAT-luokkaa kasvatetaan kaksinkertaiseksi, niin kestoikä N_f kasvaa 2^m-kertaiseksi. Näin ollen kestoiän ja FAT-luokan suhde ei ole lineaarinen.



Kuva 14. Vakioamplitudisen kuormituksen S-N-kuvaaja (Hobbacher, 2013).

Standardissa SFS-EN 1993-1-9 (2005) on määritetty hitsatuille profiileille omat väsymiskestävyysluokat, jotka on esitetty kuvassa 15. Paras väsymiskestävyysluokka 125 saavutetaan, kun hitsataan automatisoidusti tai mekaanisesti ilman aloitus- ja lopetuskohtia eli hitsin tulee olla jatkuva koko matkalta. Mikäli rakenteeseen jää hitsin aloitus- tai lopetuskohtia, väsymisluokka on standardin SFS-EN 1993-1-9 (2005) mukaisesti korkeintaan vain 112.

Väsymis-luokka	Rakenneyksityiskohta	Kuvaus	Vaatimukset
125		Jatkuvat pituussuuntaiset hitsit: 1) Automatisoidusti tai täysmekanisoidusti hitsatut kaksipuoliset päittäishitsit. 2) Automatisoidusti tai täysmekanisoidusti hitsatut pienahitsit. Peitelevyn päät tarkistetaan taulukon 8.3 rakenneyksityiskohtien 6) tai 7) mukaan.	Yksityiskohdat 1) ja 2): Lopetus/aloituskohtia ei sallita, paitsi jos korjaus tehdään asiantuntijan toimesta ja tehdään tarkastus sen toteamiseksi, että korjaus on tehty asianmukaisesti.
112		3) Automatisoidusti tai täysmekanisoidusti hitsatut kaksipuoliset piena- tai päittäishitsit, mutta ne sisältävät lopetus- tai aloituskohtia. 4) Automatisoidusti tai täysmekanisoidusti yhdeltä puolelta hitsatut päittäishitsit jatkuvaa juuritukea käytettäessä, mutta ilman lopetus- tai aloituskohtia.	4) Kun tämä rakenneyksityiskohta sisältää lopetus/aloituskohtia käytetään väsymisluokkaa 100.
100		5) Käsivaraisesti hitsatut piena- tai päittäishitsit. 6) Kaikki yhdeltä puolelta hitsatut päittäishitsit, erityisesti koteloprofiilit.	Rakenneyksityiskohdissa 5) ja 6) laippa- ja uumalevyjen välinen erittäin hyvä sovitus on oleellinen. Uuman reunat valmistetaan siten, että juuripinta on sopiva riittävän säännöllisen keskeytymättömän tunkeuman saavuttamiseksi.
100		7) Kaikki hitsattujen piena- tai päittäishitsien korjaukset väsytysluokissa 1)...6).	7) Korjaaminen asiantuntijan tekemällä hiomisella kaikkien näkyvien jälkien poistamiseksi ja riittävä varmistus voivat palauttaa alkuperäisen väsymisluokan.

Kuva 15. Väsymisluokkia hitsatuille profiileille (SFS-EN 1993-1-9, 2005, s. 21).

Rakenteellisen jännityksen eli Hot Spot -menetelmällä laskennassa on mukana hitsin rajaviivalle redusoitu rakenteellinen jännitysvaihtelu. Hot Spot -menetelmä soveltuu hyvin rajaviivalta alkavan väsymisen arviointiin. Hot Spot -menetelmässä jännitys saadaan määritettyä venymäliuskamittauksilla, FEM-ohjelmilla (Finite Element Method, Elementtimenetelmä), analyyttisesti tai kirjallisuudesta. FEM-mallinnus tarkoittaa elementtimenetelmää, jonka avulla rakenteita on mahdollista mallintaa tietokoneavusteisesti ja määrittää kuormitustilanteita. FEM-malleissa on tärkeä valita sopivat elementtityypit ja koot, jotka soveltuvat parhaiten tutkittavaan kohtaan sekä paikantaa jännityspisteiden paikat. Venymäliuskamittauksessa on tärkeää, että liuskat sijoitetaan tarkasti tutkittavaan kohteeseen, jotta muodonmuutokset välittyvät liuskaan mahdollisimman tehokkaasti (Björk, 2011).

Tehollisen lovijännityksen menetelmä käy hyvin tapauksiin, jossa särö ydintyy hitsin rajaviivalta tai juuren puolelta. Tehollinen lovijännitys on menetelmän käyttämän pyöristyksen alueella esiintyvä suurin pää- tai von Mises-jännitys sisältäen sekä rakenteellisen että hitsin aiheuttamat jännitykset. (Ongelin et al., 2010, s. 431.)

Murtumismekaniikan menetelmällä voidaan väsymisikä laskea särön kasvunopeuden avulla. Menetelmä perustuu lineaarielastisen jännitysintensiteettikertoimen vaihteluun ΔK. Kestoikä saadaan määritettyä seuraavan kaavan avulla, jossa vaurioitumiseen tarvittavat syklimäärät saadaan integroimalla särönkasvu. C_0 on kaavassa vakio ($5.21*10^{-13}$ K[$Nmm^{-3/2}$]) (Björk, 2011).

$$N_f = \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{C_0 * \Delta K^m} \tag{33}$$

, missä

a_0 = alkusärö

a_f = loppusärö

C_0 = särönkasvulausekkeen vakio

ΔK = jännitysintensiteettikertoimen vaihtelu

Väsyttävästi kuormitettu rakenne mitoitetaan murtorajatilassa. Korkean teräslujuuden valinnasta ei ole suurta hyötyä, koska hitsattujen rakenteiden väsymislujuus määräytyy ensisijaisesti jännitysvaihteluiden suuruudesta eikä teräslujuudesta. Jännitysvaihteluväliä pystytään pienentämään profiilin poikkileikkausta suurentamalla. Väsymislujuus paranee, mutta haittapuolena tälle menetelmälle on rakenteen painon nousu. Vaihtoehtoinen keino väsymiskestävyyden parantamiseen on liitosten huolellinen sijoittelu ja rakenteen muotoilu. Liitokset tulee sijoitella kohtiin, joissa jännitysvaihteluväli saadaan mahdollisimman pieneksi. (Ongelin et al., 2010, s. 461.)

2.2.8 Teräsrungon jäykistäminen

Teräsrakenteen on pystyttävä säilyttämään stabiiliutensa koko käyttöiän ajan. Stabiiliuden säilyttäminen edellyttää, ettei rakenne pääse nurjahtamaan, lommahtamaan tai kiepahtamaan, eikä kiertymään jäykkänä kappaleena. Ohuet levyt pyrkivät herkemmin lommahtamaan, jolloin rakenteeseen on lisättävä jäykisteitä. Kotelopalkkiin kohdistuvat vinouttavat voimat voidaan maadoittaa jäykistämällä profiilin poikkileikkaus siitä kohdasta, johon ulkoinen vääntömomentti kohdistuu. Jos poikkileikkausta ei jäykistetä, poikkileikkaus voi

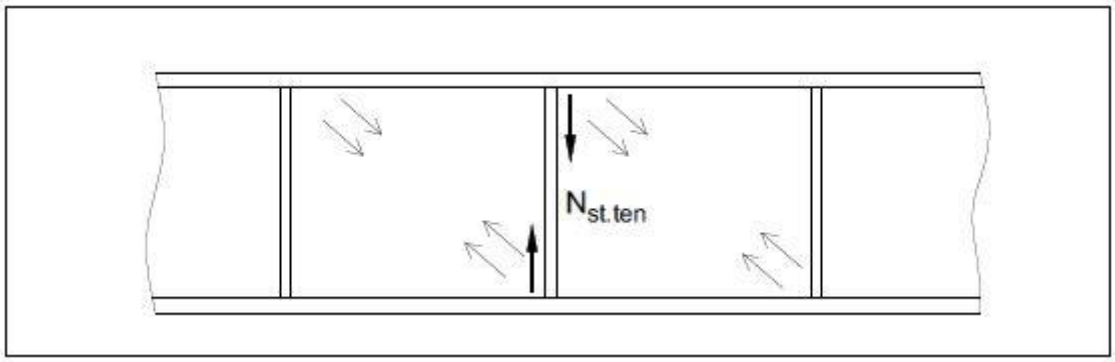
vinoutua. Tällöin rakenteeseen syntyy poikittaissuuntaista taivutusjännitystä ja pituussuuntaista normaalijännitystä. (Nikula, 1990, s. 2–3.)

Kotelopalkkeihin voidaan asentaa poikittais- ja pitkittäisjäykisteitä. Jäykisteet eivät saa rungon tavoin menettää stabiiliuttaan käyttöiän aikana. Poikittaisjäykisteiden avulla rakennetta saadaan jäykistettyä pituussuunnassa. Poikittaisjäykisteet luokitellaan sauvoiksi, jotka ovat päistään nivelellisesti tuettuja ja niihin kohdistuu levykentän tasoa vastaan kohtisuorassa oleva kuormitus. Poikittaisjäykisteiden tulee kestää uuman tasosta johtuvat voimat, jotka aiheutuvat viereisistä puristetuista levykentistä. (Ongelin et al., 2010, s. 243–246.)

Kuvassa 16 $N_{st,ten}$ on aksiaalivoima, joka muodostuu uuman leikkausvoimista ja kalvojännityksestä. Aksiaalivoima voidaan määrittää kaavan 34 mukaisesti.

$$N_{st,ten} = V_{Ed} - \frac{1}{\bar{\lambda}_w^2} \frac{f_{yw} h_w t_w}{\sqrt{3}\gamma_{M1}} \tag{34}$$

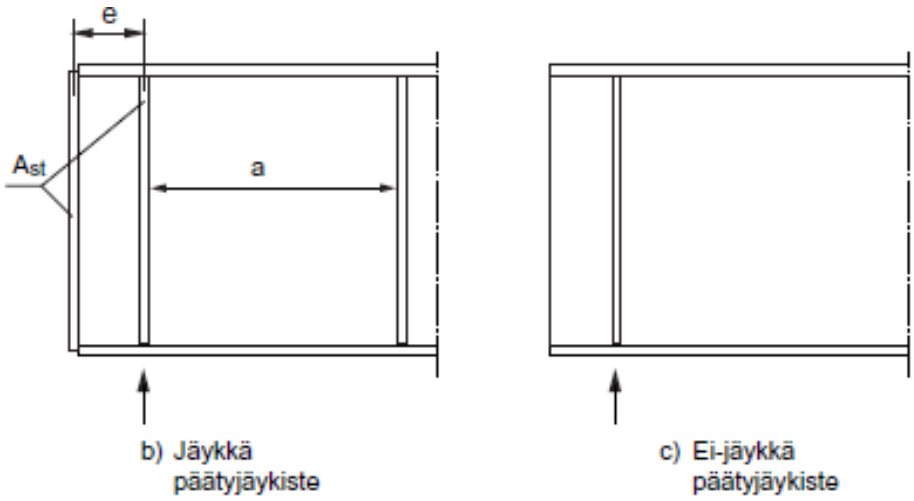
, missä V_{Ed} on leikkausvoiman mitoitusarvo, λ_w on uuman muunnettu hoikkuus, h_w on uuman korkeus, t_w on uuman paksuus, f_{yw} on uuman nimellinen myötölujuus ja γ_{M1} on kestävyyden osavarmuusluku. (Ongelin et al., 2010, s. 250.)



Kuva 16. Poikittaisia välijäykisteitä (Ongelin et al., 2010, s. 250).

Pitkittäisjäykisteitä käytetään vain uumissa ja ne oletetaan epäjatkuviksi, mikäli niitä ei ole yhdistetty poikittaisjäykisteisiin. Pitkittäisjäykisteitä ei oteta huomioon jännityksiä laskettaessa tai kokonaisanalyysissä. Poikkeuksena tapaus, jossa määritetään kimmoteorian mukaisia kriittisiä jännityksiä tai uuman osakenttien tehollisia leveyksiä, jolloin pitkittäisjäykisteet tulee ottaa huomioon. (Ongelin et al. 2010, s. 247–248.)

Kotelopalkkia voidaan jäykistää myös päätyjäykisteillä. Päätyjäykisteet jaotellaan kahteen pääryhmään: jäykkiin ja ei-jäykkiin. (Ongelin et al. 2010, s. 248–49.) Kuvassa 17 on esitetty periaate päätyjäykistämisestä.



Kuva 17. Päätyjäykistäminen (Ongelin et al., 2010, s. 249).

Kuvan 17 mukaan jäykässä päätyjäykisteessä on kaksi jäykistettä vierekkäin ja toinen näistä on sijoitettu profiilin päähän. Jäykisteet ovat etäisyydellä e toisistaan. Jäykkä päätyjäykiste oletetaan omaksi palkiksi, joka mitoitetaan kestämään uuman tasossa vaikuttavat kalvojännitykset. Ei-jäykässä on vuorostaan yksi jäykiste, joka on sijoitettu irti profiilin päästä ja se ei pysty omalla taivutuskestävyydellään kantamaan uumasta johtuvia kalvojännityksiä. Ei-jäykät päätyjäykisteet tulee mitoittaa poikittaisten välijäykisteiden mukaisesti. (Ongelin et al., 2010, s. 248–249.)

2.2.9 Kotelopalkin kaulushitsien määritys

Kotelopalkin kaulushitsit saadaan määritettyä seuraavan kaavan mukaisesti. Kaavassa hitsi mitoitetaan tasalujaksi.

$$a \geq \frac{\beta_w * d * \gamma_{M2} * f_y}{n * \gamma_{M0} * f_u * (1 + \frac{h * d}{6 * B * Tp})} \tag{35}$$

, missä a on hitsin a-mitta, β_w on perusaineen murtolujuus, d on uuman paksuus, γ_{M2} on materiaalin osavarmuuskerroin, f_y on perusaineen myötölujuus, n on hitsien lukumäärä/leikkaus, γ_{M0} on poikkileikkauskestävyyden osavarmuusluku, h on uuman korkeus, B on laipan leveys ja T_p on laipan paksuus. (Björk, 2011.)

3 MODULOINTI

Moduloinnin avulla yrityksessä voidaan saavuttaa säästöjä tuotteiden eri valmistusvaiheista ja kustannuksissa. Erityisesti valmiit moduulirakenteet vähentävät suunnittelukapasiteettiä ja nopeuttavat valmistus- ja kokoonpanovaiheita.

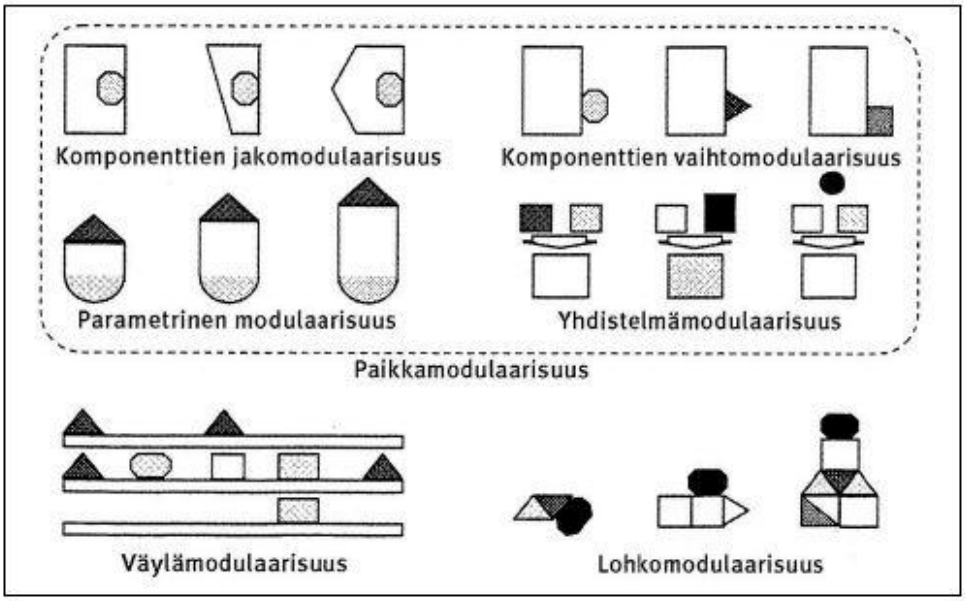
3.1 Modulaarisuuden määritys

Modulaarisuus kuvastaa joustavuutta ja vaihtokelpoisuutta ja sen tavoitteena on yrityksen kilpailukyvyn parantaminen helpottamalla tuotteen valmistusta, kokoonpanoa ja huollettavuutta. Moduloinnilla pyritään kehittämään rakenne, jonka komponentit ovat vaihdettavissa, jolloin tuotteen ominaisuuksia voidaan vaihdella. Asiakkaalle olevia hyötyjä ovat tuotteen parempi muokattavuus ja huollettavuus, kun taas yritys hyötyy modulaarisuudesta nopeammalla valmistuksella ja pienimmillä valmistuskustannuksilla. Modulaarisuuden avulla voidaan hallita tehokkaasti tuotteita ja prosesseja. Moduloitavat tuotteet on mahdollista jakaa omiin komponentteihin, joiden suunnittelu ja valmistus on mahdollista pitää toisistaan erillään, mutta samalla voidaan säilyttää yhdistetty toimiva kokonaisuus.

Moduulit voidaan kasata samanaikaisesti erillään loppukokoonpanosta, jolloin lopputuotteen kokoonpanoaika lyhenee. Tällöin tuotteen toimitusaikaa saadaan lyhennettyä. Modulaarisella tuotteella pyritään täten yhdistämään suunnitteluperiaatteita ja asiakkaan vaatimia tuotteen ominaisuuksia. Moduulien muodostaminen ei tarvitse välttämättä pohjautua vain ominaisuuksien vaihteluun, vaan moduulien käyttö voi perustua myös tuotteen käyttöiän nostamiseen.

Österholmin ja Tuokon mukaan modulaarisen tuoterakenteen luomiseksi on jaoteltava selkeät itsenäiset komponentit eli moduulit, joilla on yksi yhteinen kiinnityskohta tai paikka. Tätä kiinnityskohtaa kutsutaan rajapinnaksi. Rajapintojen määrityksen mukaan kukin komponentti on vaihdettavissa uuteen vastaavaan tai vaihtoehtoisesti uusia ominaisuuksia omaavaan komponenttiin. Tällä tavalla pystytään maksimoimaan vakiokomponenttien lukumäärät ja parantamaan tuotekirjon hallittavuutta (Österholm & Tuokko 2001, s. 8–9). Kuvassa 18 on havainnollistettu modulaarisuuden periaatetta ja eri tyyppejä. Kuvasta 18

voidaan huomata, että moduulit toimivat yksittäisinä rakennuspalikoina, joita yhdistelemällä saadaan erilaisia kokonaisratkaisuja.



Kuva 18. Modulaarisuuden eri tyyppejä (Österholm & Tuokko 2001, s. 11).

Kuvan 18 mukaisesti Österholm & Tuokko (2001, s. 11) jakavat modulaarisuuden eri tyypit seuraavasti:

1. Komponenttien jakomodulaarisuus kuvastaa saman komponentin käyttöä eri rakenteissa. Tässä moduulityypissä vakiokomponentin ympärille lisätään toisia komponentteja ja täten vakiokomponentin käyttöaste paranee.
2. Komponenttien vaihtomodulaarisuus pohjautuu päärunkoon liitettäviin komponentteihin. Tässä vaihtoehdossa komponenttien vaihto tapahtuu tiettyjen rajapintojen kautta. Tuotteen muokattavuus on näin ollen jouhevaa.
3. Parametrinen modulaarisuus tarkoittaa parametrien muuntelua määrätyssä elementissä. Useampaakin komponenttia voidaan muuttaa muiden pysyessä vakioina. Tällöin tuotteen ominaisuuksia voidaan parametrisesti vaihdella.
4. Yhdistelmämodulaarisuus tarkoittaa konseptia, jossa eri komponentteja sekoitetaan keskenään ja saadaan muodostettua aivan uusi tuote.
5. Väylämodulaarisuus tarkoittaa sitä, että komponenttien sijoittelu päärungossa on vapaampaa. Tuoteyhdistelmien luonti ja komponenttien yhteensopivuus on helposti muokattavissa.

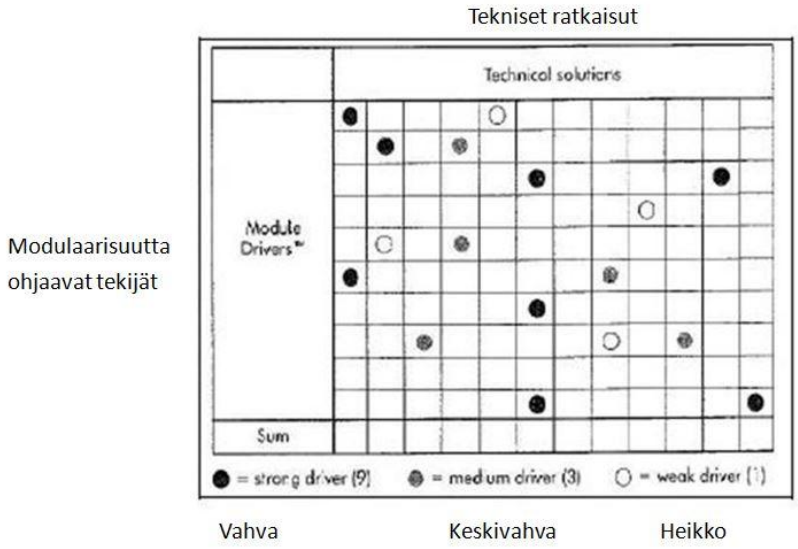
6. Lohkomodulaarisuus kuvastaa tilannetta, jossa tuotteen ennalta määrätylle rajapinnalle voidaan kiinnittää uusia yhdistelmiä. Tämä edellyttää kokoonpantavien moduulien rajapintojen samankaltaisuutta ja yhteensopivuutta. Tuotteen ominaisuuksien muunneltavuuden kannalta lohkomodulaarisuus tarjoaa suurimman määrän eri ratkaisuvaihtoehtoja.

3.1.1 Tuotteen modulaarisuus

Modulaarisen tuotteen ja tuoteperheen suunnitteluun on kehitetty omia työkaluja, joista yksi on MFD-menetelmä (Modular Function Deployment). MFD-menetelmän mukainen suunnittelu koostuu seuraavien vaiheiden mukaan (Österholm & Tuokko, 2001, s. 18–37):

1) Selvitetään asiakastarpeet mahdollisimman tarkasti, jotta valmistettavat moduulit vastaisivat ominaisuuksiltaan mahdollisimman hyvin asiakkaan vaatimuksia.
2) Teknisten ratkaisujen valinta, jossa muodostetaan toimintorakenne sekä analysoidaan erilaiset tekniset ratkaisut ja suoritetaan valinta.
3) Modulaaristen konseptien muodostaminen. Tässä vaiheessa tehdään vertailu toisessa vaiheessa luotujen teknisten ratkaisujen ja yrityksen strategiaan perustuvien modulointia ohjaavien tekijöiden eli moduuliajureiden (module drivers) välillä. Työkaluna voidaan käyttää Module Indication -matriisia (MIM), jonka avulla arvioidaan teknisten ratkaisujen ja moduuliajureiden välinen yhteys vahvana (9), keskivahvana (3) tai heikkona (1). Teknisten ratkaisujen ja moduuliajureiden välille voidaan asentaa painokertoimia, joiden avulla saadaan eri vaihtoehtojen välille eroja ja suhteen välinen yhteys selvitettyä. Kuvan 19 esimerkissä MIM-matriisiin on asetettu vahvalle yhteydelle painokerroin 9, keskivahvalle painokerroin 3 ja heikolle yhteydelle painokerroin 1. Jos yhteyttä ei ole lainkaan, kyseinen ruutu voidaan jättää tyhjäksi. Tämän vertailun avulla pystytään selvittämään helposti järkevimmät moduuliratkaisut.
4) Modulaarisen konseptien arviointi. Neljännessä päävaiheessa analysoidaan rajapinnat, läpimenoajat, tuote- ja järjestelmäkustannukset, tuotteen laatu, huollettavuus sekä tuotteen joustavuus eli tuotteen käytettävyyttä johonkin toiseen moduulirakenteeseen. Nämä kyseiset kohdat tulee olla ratkaistavissa kohdassa kolme saavutettujen konseptien perusteella.
5) Moduulikohtainen suunnittelu, jonka tavoitteena on kehittää moduulirakenteita ja määrittää moduulin tekniset tiedot, kustannustehokkuus sekä tuotteen osien luku-

määrän minimointi. Viimeisen vaiheen tuloksena tulisi olla optimoitu rakenne, jolloin tuotteista tulee yksinkertaisia ja jouhevasti kokoonpantavia.



Kuva 19. MIM-matriisin käyttö, jossa listataan modulaarisuutta ohjaavat tekijät ylhäältä alaspäin ja vaaka-akselille tekniset ratkaisuvaihtoehdot (mukaillen Ericsson, 1999, s. 36).

Modulaarisuutta ohjaavia tekijöitä (module drivers) on yrityksessä monia. Österholmin ja Tuokon mukaan näitä ovat esimerkiksi tuoteominaisuuksien siirto uudelle sukupolvelle, tekninen muunneltavuus, alihankinnan mahdollistaminen, testausjärjestelyt, huolto ja kunnossapito, päivitettävyys sekä kierrätys. (Österholm & Tuokko 2001, s. 14.)

3.2 Modulaarisuuden edut ja haitat

Modulaarisuus ei ole aina ratkaisu yrityksen kilpailukyvyn kasvuun ja tuoteperheiden monipuolistamiseen tai kehitykseen. Kohdissa 3.2.1 sekä 3.2.2 on listattu modulaarisuutta puoltavia sekä rajoittavia tekijöitä.

3.2.1 Edut

Moduulisen rakenteen suurimpia etuja ovat niiden käytön mahdollistaminen useammassa eri tuotteessa, suunnitteluajan lyheneminen, valmistuskustannusten ja kokoonpanoajan pienentäminen sekä kierrätettävyyden parantuminen.

Kokoonpano helpottuu, kun moduulit ovat rajapinnoiltaan yksinkertaisia ja sopivankokoisia, joten loppukokoonpanon aikana ei tarvitse tehdä ylimääräisiä säätöjä. Huolto on helpompaa, koska vianmääritys saadaan kohdistettua aina tiettyyn moduulin sekä kulutusosien vaihto helpottuu. Modulaarisessa tuotteessa tulisi karsia mahdollisuuksien mukaan eri materiaalien käyttöä, jotta elinkaaren lopussa moduulit voidaan helposti purkaa sopiviin paloihin ja kierrätys on vaivattomampaa. (Ericsson & Erixon, 1999, s. 25–26.)

Kustannukset painottuvat aluksi tuotekehityksen alkupuolelle ja suunnittelutyöhön, mutta pidemmällä tähtäimellä moduulien käytöllä saavutetaan kustannussäästöjä. Valmistuskustannuksia saadaan alennettua moduulien rinnakkaisvalmistuksella sekä suuremmilla tuotantomäärillä. Standardoidut moduulirakenteet yksinkertaistavat tuotesuunnittelua ja mahdollistavat erilaisten osien tai osakokoonpanojen massatuotannon. Standardoituja moduuleja voidaan myös ostaa suoraan alihankkijoilla, jotka testaavat moduulit ja ne ovat kokoonpanovalmiita. Tällöin saavutetaan säästöä asennus- ja laaduntarkkailukustannuksissa. Modulaarisen rakenteen avulla tuotteen laatua saadaan parannettua, koska yksittäisten osien tai osakokoonpanojen testaus on mahdollista suorittaa erikseen. (Aarnio, 2003, s. 41–42; Hellström, 2005, s. 31–32.)

Suunnittelun edetessä tulevat mahdolliset muutokset eivät yleensä aiheuta koko tuotteen uudelleensuunnittelua, vaan suunnitteluprosessi on yksinkertaisinta kohdistaa vain yksittäisiin moduuleihin eikä kokonaiseen tuotteeseen kerralla. Lisäksi moduloinnin avulla voidaan vapauttaa suunnitteluresursseja asiakaskohtaisesta räätälöinnistä tuotekehitykseen. Moduloinnin avulla saavutetaan suuri tuotekirjo, koska moduulit voidaan korvata toisilla dimensioilla tai ominaisuuksia omaavilla moduuleilla, joten eri variaatioiden määrä voi tuotekohtaisesti kasvaa todella suureksi.

3.2.2 Haitat

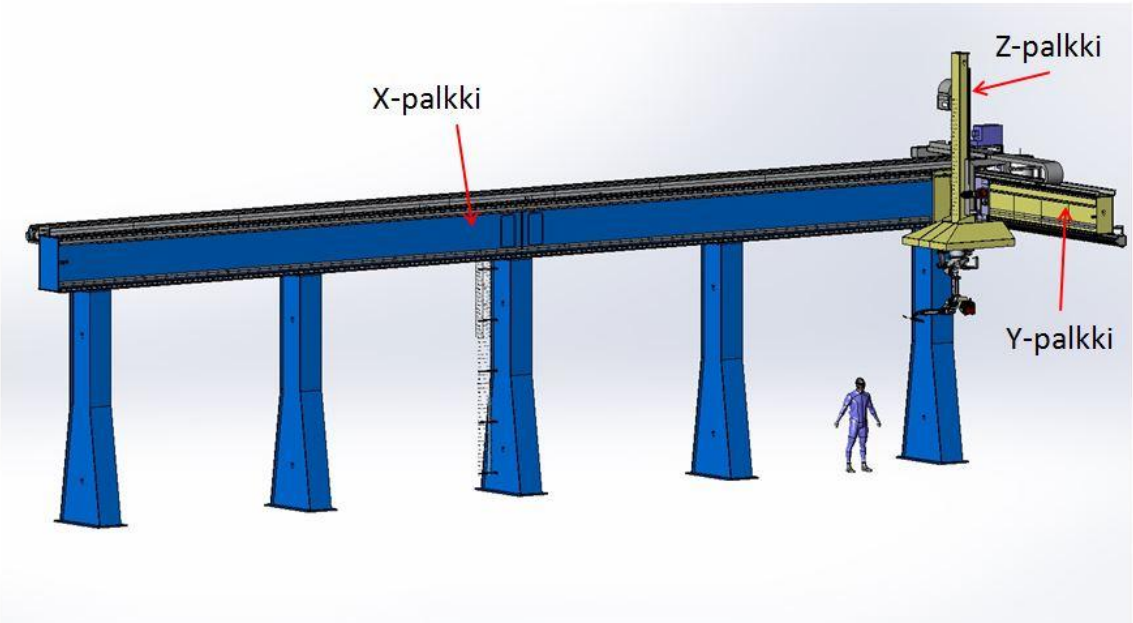
Moduulisen rakenteen huonoina puolina voidaan pitää mahdollisten nimikkeiden suurta määrää, jos tuotteet ovat monimutkaisia ja rajapintoja on useita. Moduulisen rakenteen paino ja koko voivat kasvaa rajapintojen takia suuremmiksi, mikä johtaa ylimääräisiin kuluihin. Painon ja koon kasvaessa moduulisen tuotteen käsiteltävyys heikkenee (Hölttä-Otto 2005, s.30). Painoa ja kokoa voidaan rajoittaa nimikkeiden karsimisella. Liiallinen modulointi voi aiheuttaa myös ongelmia tuotteen jatkokehityksessä, koska osien väliset rajapin-

nat on ennalta määrätty. Vaikka moduloinnin avulla voidaan tuotetta muunnella haluamin tavoin, ei sen avulla pystytä aina täysin täyttämään asiakkaan vaatimuksia, vaan joudutaan tekemään kompromisseja, koska jokaisen tuotteen kohdalla on ennalta määrättävä raja, mihin saakka asiakas voi vaikuttaa ostaessaan tuotteen ennalta sovittuun hintaan. Täysin uuden modulaarisen tuotteen suunnittelu on kannattavaa tehdä vain pidemmällä aikavälillä, koska suunnittelutyöstä koituvat kustannukset ovat korkeita. (Aarnio, 2003, s. 41–42; Hellström, 2005, s. 31–32.)

3.3 Vakio moduulit

Hitsausrobottiportaali koostuu useista eri alikokoonpanoista. Kuvassa 20 on esitetty periaatekuva hitsausrobottiportaalista ja portaalin moduloitavista rakenteista. Edes osittain moduloitaviksi soveltuvia rakenteita robottiportaalissa ovat:

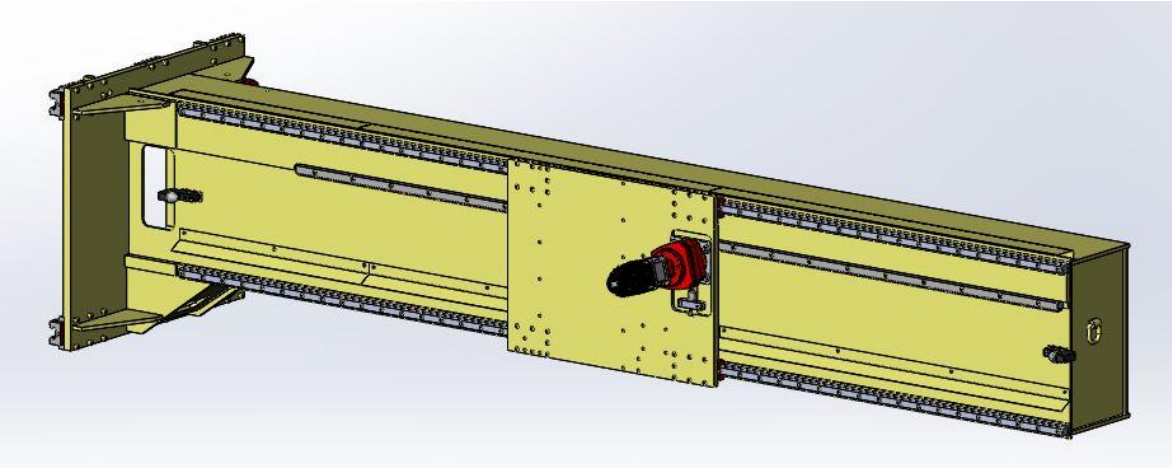
- Jalat (kannattimet)
- X-palkki
- Y-palkki
- Z-palkki
- Robotti- ja hitsausvarustelu Z-palkin alapäässä



Kuva 20. HD-robottihitsausportaali.

Kuvan 20 robottihitsausportaali on gantry-tyyppinen eli liikesarjat tapahtuvat lineaarikelkkojen ja -johteiden sekä hammastankojen avulla suorakulmaisesti. Portaalin korkeus voi olla yli 5 metriä, X-palkilla pituutta yli 20 metriä ja Y-palkilla liikepituutta 5 metriä. Tämä mahdollistaa suuren työalueen ja sillä voidaan hyvin hitsata suuria työkappaleita kuten kuljetuslavoja.

Hitsausrobottiportaalin moduulit koostuvat useammasta pienemmästä komponentista, jotka yhdessä muodostavat moduulin. Moduulin päärunkona toimii kotelopalkin runko sekä hammastangot ja lineaarijohteet. Nämä osat määrittelevät reunaehdot, joiden mukaan modulointi on mahdollista toteuttaa. Kuvassa 21 on esitetty periaate vaakapuomista eli Y-akselin suuntaisesta palkista. Kuvassa 21 voidaan havaita esimerkki moduloinnista, jossa moduulin päärunkoon on liitetty kelkka, joka toimii vaihtokelpoisena komponenttina. Reunaehtojen mukaan kelkassa olevien lineaarikelkkojen koko ja etäisyys toisistaan on oltava yhteneväisiä päärungon lineaarijohteisiin sekä voimansiirron sisältämän hammaspyörän on sovittava yhteen päärungon hammastangon kanssa.

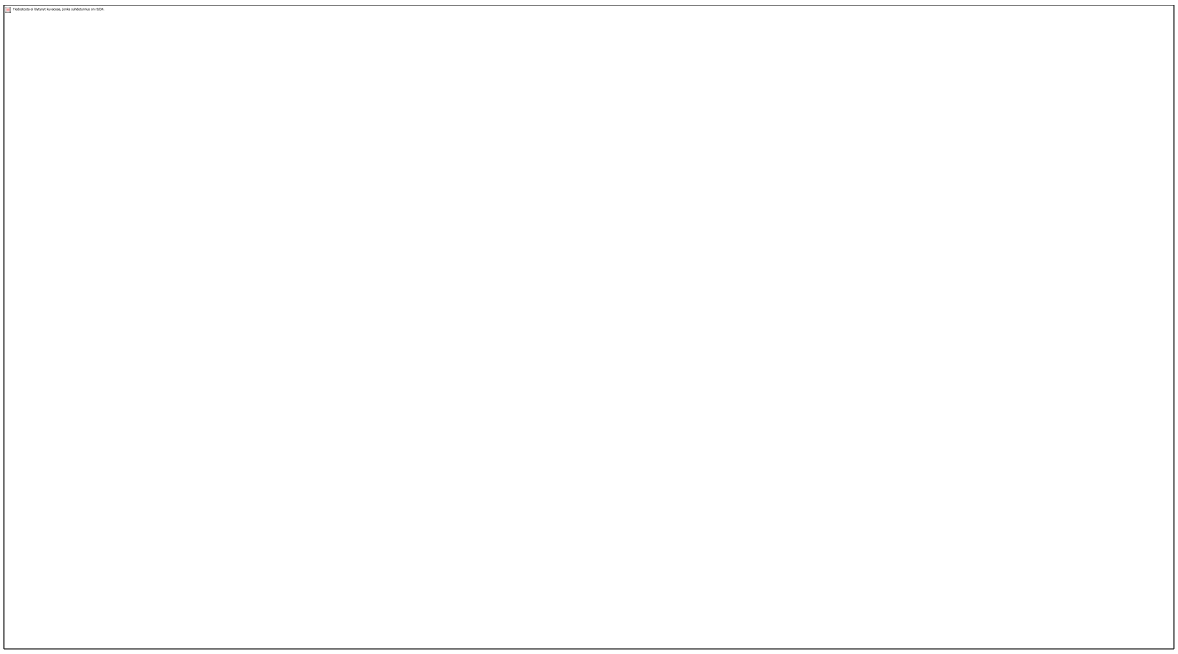


Kuva 21. Vaakapuomi.

Hitsausrobottiportaalin moduulien hallittavuuden ja vaihdettavuuden helpottamiseksi moduulien tulee sisältää myös voimansiirto ja energiaketjut. Näin ollen osien välisten rajapintojen määrä saadaan vakioitua ja samalla yksinkertaistettua tuotesuunnittelua.

3.4 Optio moduulit

Hitsaustobottiportaaliin voidaan lisätä tarpeen vaatiessa lukuisia optiomoduuleja, joista esimerkkinä toimii offline-ohjelmointi eli etäohjelmointi. Kuvan 22 mukaan offline-ohjelmointi koostuu kahdesta pääosasta, robotin ohjelmoinnista ja hitsausarvojen optimoinnista.



Kuva 22. Offline-ohjelmointi moduli (mukaillen Carvalho & McMaster, 1996, s. 14).

Offline-ohjelmoinnin avulla robotin ohjelmointi voidaan suorittaa ilman, että tuotannossa olevan robotin toimintaa tarvitsee keskeyttää, ja samalla saavutetaan kustannussäästöjä. Säästöjä saadaan myös ohjelmoimalla robotit etukäteen valmiiksi, jolloin uuden tuotteen tuotannon aloittaminen nopeutuu. Ohjelmointi suoritetaan tietokoneilla CAD-pohjaisilla ohjelmistoilla ja simulointimalleilla. Offline-ohjelmointia ja simulointimalleja voidaan käyttää apuna uusien tuotteiden suunnittelussa. Simuloimalla robotin liikkeitä voidaan selvittää robotin ulottuvuudet sekä välttää vaaratilanteita ja vaurioita aiheuttavia törmäyksiä (Carvalho & McMaster, 1996. s. 11–12).

3.5 Modulaarisen rakenteen kehittäminen

Modulaarisen rakenteen tavoitteena luoda rakenne, joka toimii perustana useille eri tuotevariaatioille. Hitsattavan rakenteen suunnittelussa on tärkeää, että hyvä hitsattu rakenne sisältää mahdollisimman vähän hitsejä, jotta hitsauksesta aiheutuvia muodonmuutoksia pystytään pienentämään. Muodonmuutokset yleensä heikentävät työkappaleen laatua ja

hitsauksen onnistuminen automatisoidusti edellyttää hitsattavan työkappaleen pysymistä muodossaan. Hitsauksesta aiheutuvia muodonmuutoksia voidaan ennalta ehkäistä silloittamalla työkappale ensin tasaisin välimatkoin, jolloin robotin tehtäväksi jää valmiiden saumojen hitsaus.

Erityisesti robottihitsauksessa muodonmuutokset on otettava huomioon. Jos hitsauksen aikana on syntynyt muodonmuutoksia, voi robotille ohjelmoitu hitsausrata poiketa työkappaleelle suunnitellusta hitsausradasta. Tällöin on suositeltavaa käyttää erilaisia railonhaku- ja railonseurantajärjestelmiä (Ahola, 1988, s. 9–11).

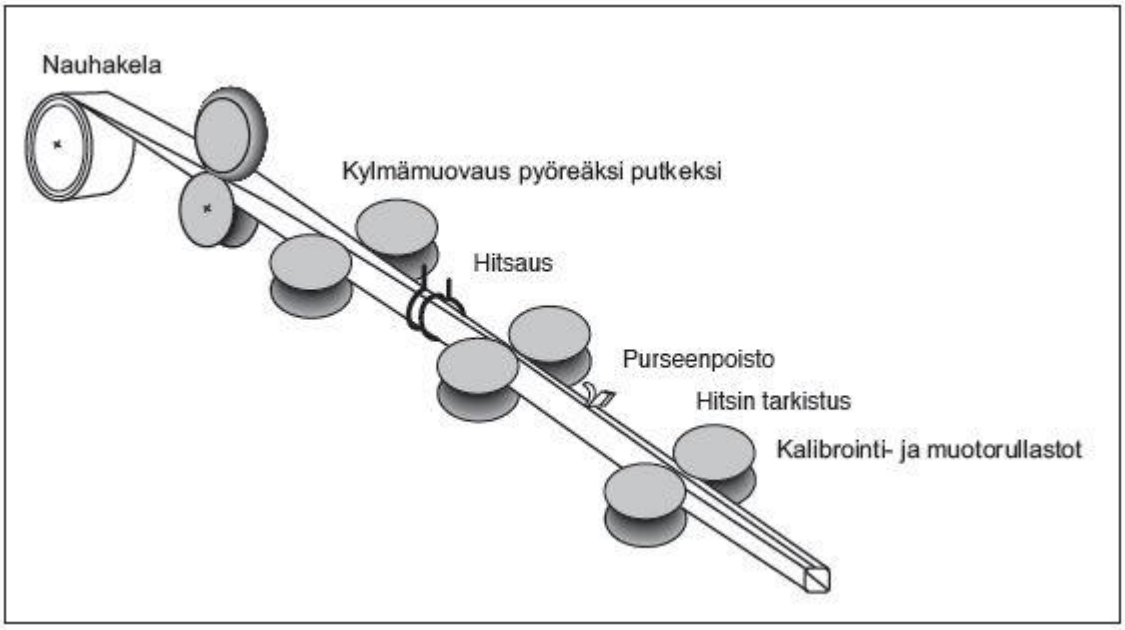
Rakennetta voidaan kehittää käyttämällä vaihtoehtoisia profiilimuotoja tai hybridipalkkeja. Hitsaukselle vaihtoehtoinen ratkaisu on käyttää hyväksi särmäystä, jolloin liitettävien osien lukumäärä pienenee ja samalla hitsien ja muodonmuutosten määrä vähenee. Putkipalkkien käyttö on yleistynyt paljon. Esimerkiksi suorakaideputkipalkin vertailu hitsattuun kotelo-profiiliin kannattaa suorittaa, koska myös suorakaideputkipalkilla on hyvät ominaisuudet niin hitsattavuudessa kuin vääntö- ja taivutusjäykkyydessä (Ongelin et al., 2012, s. 76).

3.5.1 Robottihitsausportaalin rungon modulointi

Robottihitsausportaalin runko on jo olemassa oleva tuote, joten MFD-menetelmän mukaisesti ei ole tarvetta käydä läpi menetelmän vaiheita alusta asti. Ensimmäinen vaihe, eli asiakastarpeiden selvittäminen, on suoritettu aikaisempien tuoteperheen jäsenien kohdalla. Toinen vaihe, eli teknisten ratkaisujen valinta, on käytännössä myös hyvin pitkälle määrätty, jollei rungon poikkileikkausta tai materiaaleja lähdetä vaihtamaan nykyisestä.

Robottihitsausportaalin tapauksessa vaihtoehtoisien profiilimuotojen käyttöä rajoittaa portaalin varusteluosat. Energiaketjut, lineaarijohteet ja hammastangot on pystyttävä sijoittamaan aina mahdollisimman tasaiselle pinnalle. Kotelopalkille vaihtoehtoisena profiilimuotona toimisi esimerkiksi kylmämuovattu suorakaiteen muotoinen rakenneputki, johon tarvittavat varustelut saadaan helposti kiinnitettyä. Kylmämuovattu profiili on helppo valmistaa, ja kun materiaali ja muoto valitaan oikein käyttökohteen mukaan, voidaan saavuttaa merkittäviä säästöjä painossa ja materiaalikustannuksissa. Vaakapuomiksi soveltuva kylmämuovattu profiili voidaan valmistaa esimerkiksi hitsaamalla yhteen kaksi U- tai sigma-

profiilia tai vaihtoehtoisesti kuvan 23 mukaisesti kylmämuovaamalla ja pituussaumahitsaamalla.



Kuva 23. Pituussaumahitsatun rakenneputken valmistusperiaate kylmämuovaamalla (Ongelin et al., 2012, s. 16).

Kotelopalkin käyttöä tosin puoltaa sen helppo valmistettavuus sekä mahdollisten lisäjäykisteiden sijoittelu ja hitsaus valmistusvaiheessa puomin sisään. Koteloprofiilien kylkiin on mahdollista hitsata lattalevyjä, jotka saadaan tarvittaessa koneistettua, jotta niihin on mahdollista asentaa lineaarijohteet ja hammastangot.

Hitsausrobottiportaalissa eri komponenttien sijoittelu on melko tarkasti määrätty, jotta portaalin valmistus, komponenttien asennus ja toimivuus on mahdollisimman tehokasta. Tämä vähentää moduloinnin erilaisten rajapintojen määrää. Energiaketju tulee sijoittaa vaakapuomin päälle, ja esimerkiksi hitsauslankarulla ja – teline kulkevat vaakapuomin lineaarijohteilla kulkevan kelkan mukana. Periaatekuva vaakapuomin varusteluiden sijoittelusta käy ilmi kuvasta 26.

Vaakapuomia voidaan helpoiten moduloida varioimalla vaakapuomin suuntaista Y-liikepituutta. Pidempiä liikepituuksia hallitakseen tulee kotelopalkin sisään lisäillä tarpeen mukaan poikittaisjäykisteitä, jotta vaakapuomi ei menetä stabiiliuttaan. Lyhyemmillä vaa-

kapalkeilla ja liikepituuksilla vaakapuomi taipuu vähemmän ja hallittavuus robottivarustelun polttimen päässä paranee, koska siellä millien heitto vaikuttaa heti hitsauksen laatuun heikentävästi.
Portaalin materiaaleja voidaan myös vaihtaa lujempiin teräslaatuihin. Työssä käytetty portaali on valmistettu yksinkertaistuksen vuoksi teräslaadusta S355, jota pidetään suunniteltavien profiilien peruslujuutena. S355 teräslaadusta valmistettu kotelopalkki voidaan korvata hybridipalkeilla, joissa lujien terästen ominaisuuksia pystytään paremmin hyödyntämään. Hybridipalkissa laipat valmistettaisiin lujemmasta teräksestä kuin uumat.

3.6 Moduloinnin järkevyys

Hitsausrobottiportaalin kehittäminen täysin moduloiviin rakenteisiin on hankalaa. Portaalien kohdalla tulee miettiä, onko modulointi oikea tie haluttuihin säästöihin kustannuksissa ja tuotantoaikatauluissa. Komponenttien ja varusteluosien sijoittelu on melko tarkasti määrätty, joten toiminnallisuutta ei voi heikentää muokkaamalla huomattavasti näiden paikkaa. Hitsausportaalin liikkeet tapahtuvat suorakulmaisesti lineaarijohteiden ja hammastankojen avustuksella. Nämä tulee asentaa koneistettujen ja tasaisten pintojen päälle, jotta liikkeet ovat mahdollista toteuttaa. Energiaketjut tulee sijoittaa myös tasaista pintaa vasten ja esimerkiksi X-liikkeessä energiaketju sijoitetaan puomin päälle. Näin varmistetaan se, ettei kaapelit vaurioidu mahdollisten lisämutkien takia. Robottiportaaleissa lisähaasteen aiheuttaa yli 10 metrin pituiset itse laskeutuvat energiaketjut. Tämä puolestaan asettaa omat rajoitteensa rajapintojen yhteensopivuudelle.

Moduulien kehittäminen robottiportaaleissa kohdistuu lähinnä Y- ja Z-akselien pituuden vaihteluihin. Pitkillä liikepituuksilla vaakapuomi eli Y-akseli voi taipua liikaa, jolloin tulee tehdä muutoksia rakennesuunnitteluun ja mahdollisesti rajapintoja joudutaan muokkaamaan. Liika taipuma vaakapuomin päässä liikuttaa samalla hitsauspolttimen päätä ja pahimmassa tapauksessa tämä voi estää kokonaan hitsauksen.

Loppuun asti modulointi tarkkuutta vaativissa robotiikkasovelluksissa ei ole kustannustehokkain ratkaisu. Vaakapuomiin on mahdollista vakioida paikat eri komponenteille kuten imukanavalle tai lankarullien telineille. Pystypuomiin voidaan optioida paikat hitsauslisävarustukselle kuten esimerkiksi huuvalle, jolla haitalliset hitsauskaasut saadaan kerättyä talteen. Mutta kuten aikaisemmin todettua, moduuliset rakenteet ovat usein kooltaan suu-

rempia ja painavampia asiakasräätälöityihin ratkaisuihin verrattuna. Tämä voi johtaa ongelmiin työkappaleen koon tai asiakkaan tuotantotilojen kanssa.

Modulointi tarjoaa hitsausrobottiportaaleissa enemmänkin vain ohjenuoria hinnoitteluun, myyntiin tai valmistuksellisiin asiakohtiin. Robottiportaalit ovat lähes poikkeuksetta asiakasräätälöityjä ratkaisuita, koska asiakkaan tarpeet, tuotantotilat ja valmistettavat työkappaleet asettavat ehdot portaalin liikepituuksille ja ominaisuuksille. Suunnitteluprosessia voidaan tehostaa pienillä yksityiskohdilla. Mikäli yrityksellä on olemassa valmiita pohjia koteloprofiileista, on niitä mahdollista käyttää hyväkseen muokkaamalla liikepituudet ja rakenteiden väliset rajapinnat vastaamaan asiakkaan tarpeita. Valmiit kokoonpanot hitsausvarustuksista luovat hyvän moduuliratkaisun, joita on helppo asettaa Z-akselin päähän.

Verrattaessa robottiportaaleita saman robotiikkatuoteperheen alle sijoittuviin hitsaustorneihin on modulointiasteessa huomattavia eroja. Hitsaustornit soveltuvat hyvin moduulikohtaiseen suunnitteluun, koska sen pysty- ja vaakapuomit voidaan helposti määrittää omiksi moduuleiksi. Puomien liikepituuksia voidaan muokata ja yhdistää erilaisia pysty- ja vaakapuomiratkaisuja. Pysty- ja vaakapuomit voidaan lisäksi moduloida siten, että ne sisältävät kaikki tarvittavat komponentit voimansiirtoon ja lineaaristen liikkeiden toteuttamiseen. Lisäksi hitsaustornin vaakapuomi toimii hyvänä esimerkkinä vaihtomodulaarisuudesta, koska vaakapuomin kylkeen voidaan vapaasti sijoittaa esimerkiksi lankakeloja tai sen molempiin päihin voidaan tarpeen vaatiessa asentaa erilaisia hitsausvarusteluita.

4 TULOKSET

Tuloksissa käydään läpi FE-analyysin mallintaminen ja runkorakenteeseen liittyvät reunaehdot. Fe-analyysin avulla saavutettiin erilaisia tuloksia niin maksimijännitysten kuin taipumien osalta, kun vaakapuomia kuormitettiin hitsausrobottiportaalin X-liikesuunnan eri kohdissa.

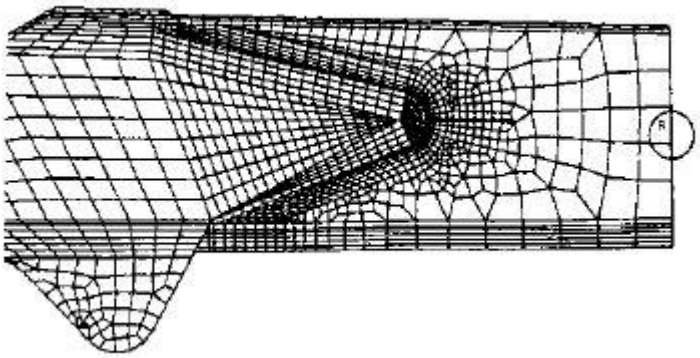
4.1 FE-analyysin käyttö

Suunniteltu rakenne ja profiilin poikkileikkaus voi olla joko liian heikko, ylimitoitettu ja huonosti optimoitu terästen ominaisuuksien kannalta. Huonosti optimoidun tai ylimitoitetun rakenteen tapauksessa aiheutuvat ylimääräiset materiaalikustannukset voivat nousta huomattavan korkeiksi ja liian heikko rakenne voi puolestaan aiheuttaa rakenteen toimimattomuutta esimerkiksi liian suurten siirtymien takia. FE-analyysin käyttö toimii suunnittelun tukena, jotta näiltä ongelmilta vältyttäisiin. FE-analyysin avulla saavutetaan tarkkoja tuloksia, jos tutkittava rakenne on yksityiskohtainen. Mallin tekeminen on aikaa ja resursseja vievää, joten suunnittelijan käyttökokemuksella on suuri rooli. Hän voi tarvittaessa arvioida FE-analyysin käytön tarvetta tapauskohtaisesti tarkasteltavan kohteen geometrian, reunaehtojen ja kuormitusten perusteella.

FE-analyysissä on erityisesti kiinnitettävä huomiota reunaehtojen ja epätarkkuuksien huomioon ottamiseen. Materiaaliominaisuudet, rakenteeseen kohdistuvat kuormat ja rajatilaehdot tulee mallintaa mahdollisimman tarkoituksenmukaisesti, jotta analyysistä saatavat tulokset olisivat suuruusluokaltaan realistista. Rakenteen muoto ei aseta rajoituksia FEM-mallinnukselle, vaan analyysi voidaan tehdä koko rakenteelle tai pienelle osalle päärakenteesta, joka toimii alikokoonpanona päärakenteelle.

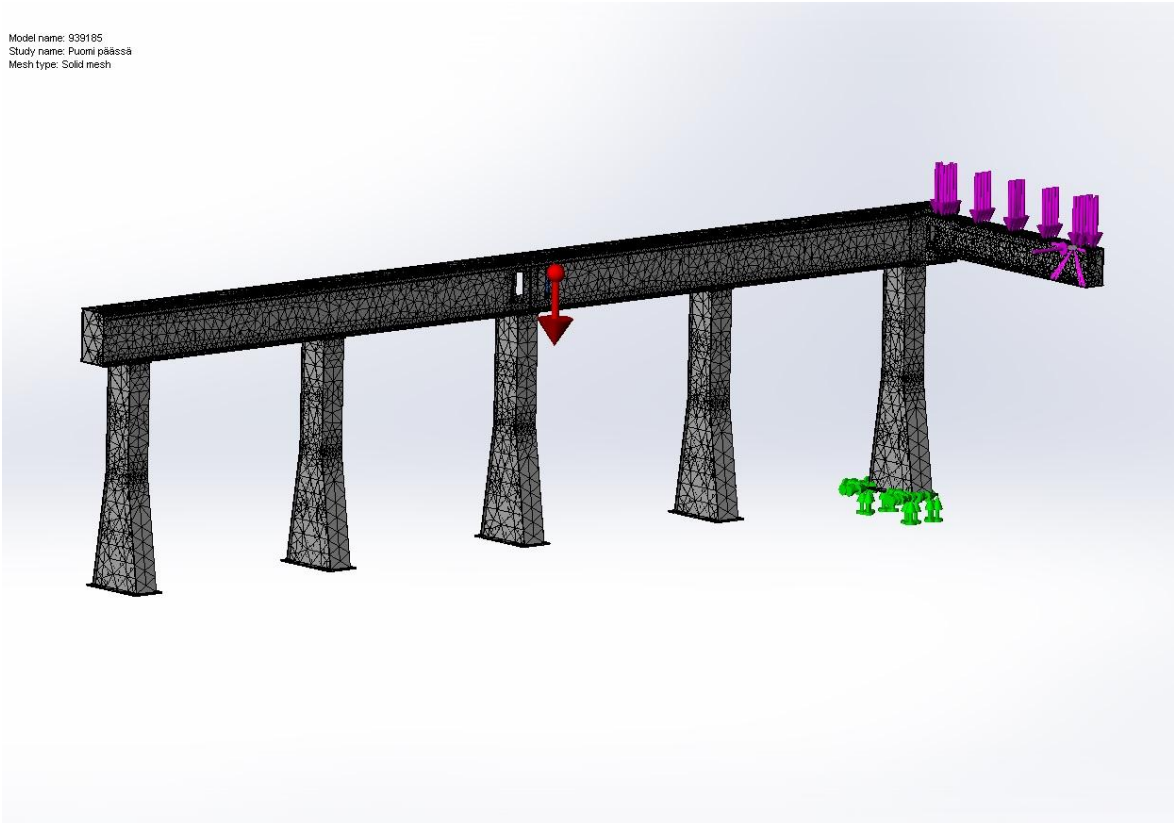
Elementtien valinta ja verkon tiheys vaikuttaa lopputuloksen tarkkuuteen. Suuntaa-antava ohje on, että mitä tiheämpi tutkittavan kohteen elementtiverkotus on, sitä tarkempi tulos siitä saadaan. Kuvassa 24 on esimerkkinä elementtiverkon mallinnusta, jossa verkon kokoa on pienennetty kiinnostavalle alueelle ja vastaavasti harvennettu kauemmas tutkittavasta alueesta mentäessä. Tiheät verkot ovat mallintamisessa hitaampia ja laskennallisesti raskaita. Analyyttistä tarkastelua voidaan suositella käytettävän selkeisiin ja yksinkertaisiin tapa-

uksiin, mutta jos tarkasteltava kohde on geometrisesti haastava ja kuormitukset sekä reunaehdot eivät ole yksiselitteisiä, on FE-analyysi ajan ja resurssien käytön kannalta järkevää suorittaa.



Kuva 24. Elementtiverkon muodostamista tutkittavalle alueelle (Björk, 2011).

Kuvassa 25 on suoritettu robottiportaalin verkotus FE-analyysiä varten. Vaakapuomille on muodostettu tiheämpi verkotus ja vastaavasti verkkoa on harvennettu kauemmas kiinnostavasta tarkastelupisteestä.



Kuva 25. HD-robottiportaalin verkotus SolidWorks-ohjelmistolla FE-analyysiä varten.

4.2 Reunaehdot ja epätarkkuudet

Robottihitsausportaalia mallinnettaessa joudutaan tekemään yksinkertaistuksia, jotta tarkasteltavasta 3D-mallista ei tule laskennallisesti liian raskas. Yksinkertaistuksia tehdään malliin, materiaaliin, liitospintoihin ja tuentoihin sekä kuormituksiin.

4.2.1 Malli

FEM-mallia varten portaalin 3D-malli pyritään saamaan mahdollisimman yksinkertaiseen muotoon, jotta laskentaprosessi sujuisi kevyemmin. Tällöin verkotuksen teko ja tarkasteltavan kohteen analysointi helpottuu. Tämä tarkoittaa mallin yksinkertaistamisessa sitä, että kaikki ylimääräiset koneistukset ja varusteluosat on poistettu mallista ja jäljelle on jätetty vain perus runko.

4.2.2 Materiaalit

Portaalin rungon FE-analyysiä varten valittiin levyjen materiaaleiksi S355-luokan teräs, koska kuten aiemmin jo todettua, sitä pidetään suunniteltavien profiilien peruslujuutena. S355-luokan teräsvalintaa puoltaa sen helppo saatavuus, soveltuvuus konepajavalmistukseen, kuten muovaukseen ja hitsaukseen.

4.2.3 Liitospinnat ja tuennat

Vaakapuomin ja runkopalkin välinen liitospinta on mallinnettu jäykäksi liukuvien lineaarikelkkojen ja -johteiden kohdalta, jotta mallia saadaan yksinkertaistettua riittävästi. Jokaisen liitoksen oletetaan olevan hitsattu ja levyjen väleihin ei jää rakoja. Näin ollen mallin oletetaan olevan täysin jäykkä.

4.2.4 Verkon tiheys

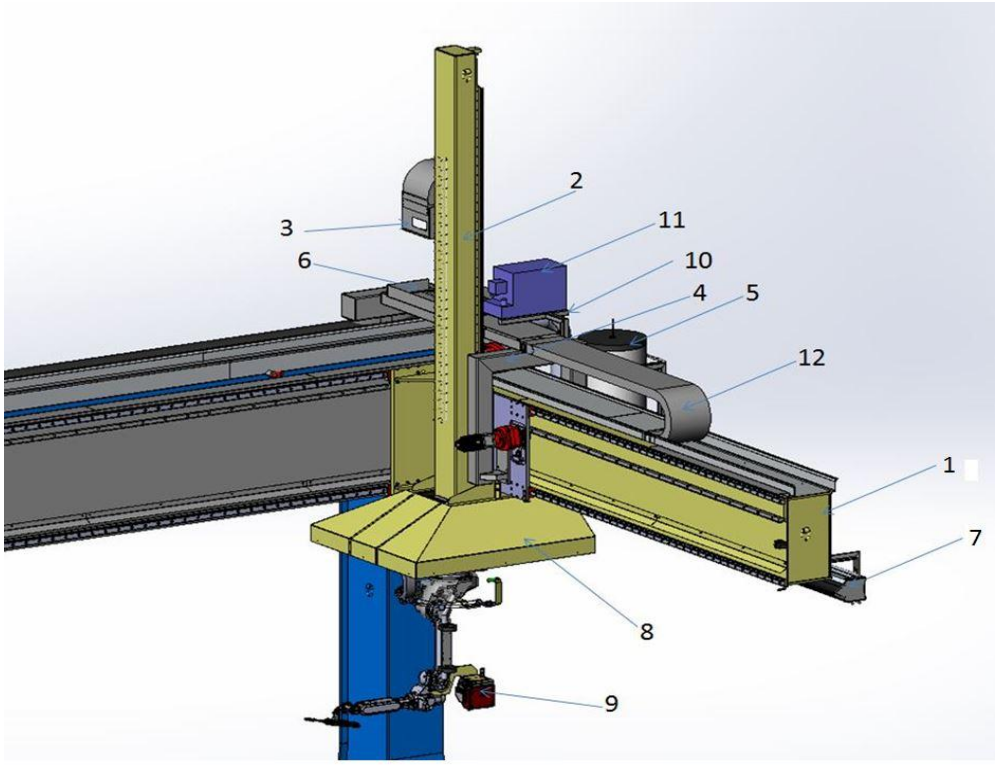
Kuvassa 25 on esitetty mallin verkotus. Kuten jo aikaisemmin mainittiin, vaakapuomin eli Y-akselin kohdalla käytettiin tiheämpää verkotusta, jotta puomin taipumasta saataisiin mahdollisimman tarkkoja arvoja. Verkotusta on harvennettu muualle runkoon ja jalkoihin, jotta laskentamallista tulisi laskennallisesti kevyempi.

4.2.5 Massat ja vaikuttavat voimat

Robottihitsausportaalin vaakapuomin ja varusteluiden massat ovat listattuna taulukossa 6. Taulukon osanumerointi ja varusteluosat on havainnollistettu kuvassa 26. Taulukon 6 varusteluiden massat on määritetty SolidWorks-ohjelmiston avulla.

Taulukko 6. Vaakapuomin ja varusteluosien massoja HD-portaalissa.

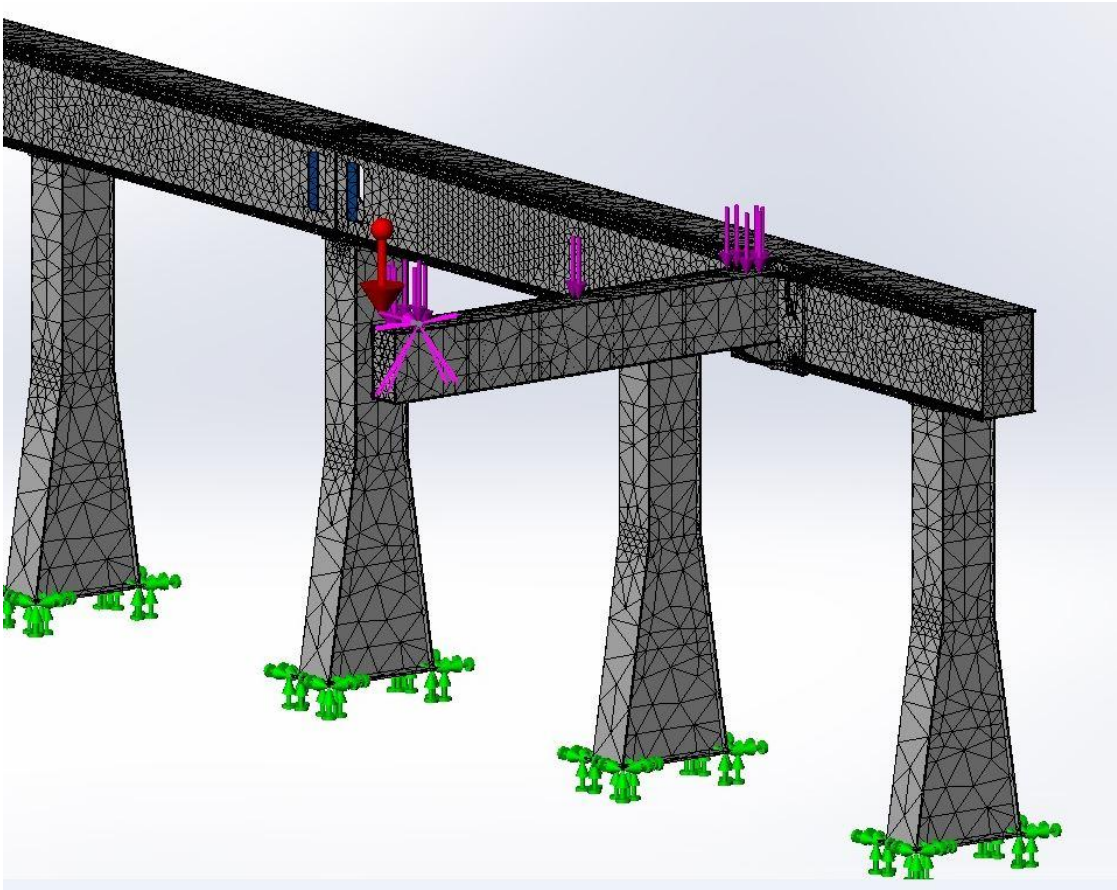
Numero	Kuvaus	Paino [kg]
1	Vaakapuomi	1780
2	Pystyluisti	580
3	Mukaanottaja	8
4	Runko	160
5	Hitsauslanka	250
6	Mukaanottaja	60
7	Imukanava	90
8	Huuva	78
9	Robottivarustelu	250
10	Teline	17
11	Veden jäähdytyslaite	20
12	Energiaketjut	140 (30kg/m)
	YHT.	1513 ilman vaakapuomia 3293 vaakapuomin kanssa



Kuva 26. Robottihitsausportaalin varustelu.

4.3 Kuormien mallinnus

Kuvassa 27 on esitetty periaate kuomien mallinnuksesta portaalin vaakapuomille. Vaakapuomin yläpaarteen päälle oletetaan energiaketjun ja muiden robottivarusteluiden seurauksena aiheutuvan tasainen kuormitus sekä pystyluistista muodostuva pistemäinen kuormitus. Vaakapuomin suurin taipuma saadaan, kun portaalin pystyluisti eli Z-akseli on vaakapuomin päässä. Kuormitus vaakapuomin päähän saadaan laskemalla yhteen pystyluistin, vaakakelkan, huuvan , hitsaus- ja robottivarusteluiden massat.



Kuva 27. Kuormien mallinnus portaalille FE-analyysiä varten.

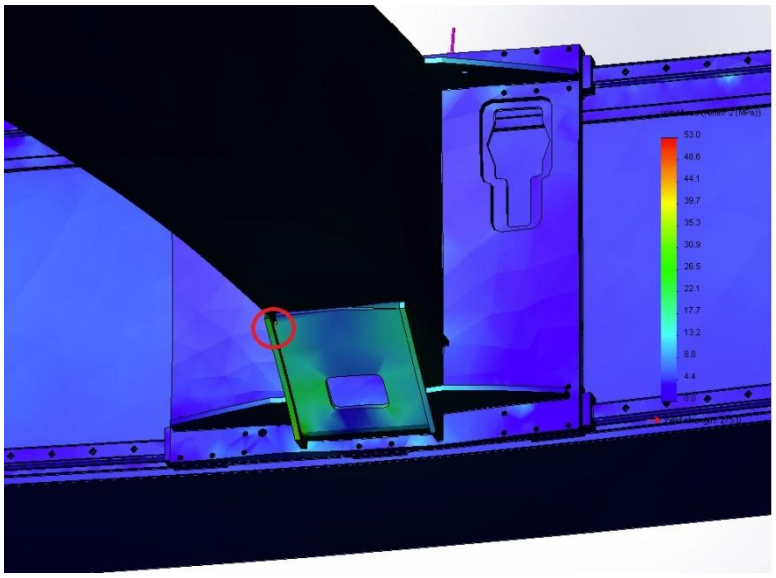
4.4 Taipumat sekä jännitysmaksimit taulukoituna

Robottiportaalin vaakapuomin kärjen suurinta taipumaa tarkasteltiin SolidWorks-ohjelmiston FE-analyysin avulla. Taulukossa 7 on listattuna FE-analyysistä saatua dataa vaakapuomin ja siihen kohdistuvan kuormituksen ollessa robottiportaalin X-liikesuunnan eri kohdissa. Laskentatuloksissa on vaakapuomin pään taipuma mitattu kuormituksen ollessa puomin molemmissa ääriasennoissa. Kuvassa 28 on esitetty maksimijännityksen kohta portaalin vaakapuomia kuormitettaessa. Kuvissa 29–31 on esitetty taipumat kuvaajina vaakapuomin ollessa kolmessa eri kohdassa portaalin x-liikesuunnassa. Jokaisessa kuvassa on eritelty omilla käyrillä tilanteet ääriasennoista, joissa y-akselilla liikkuva pystypuomi (Z-akseli) on vaakapuomin päässä ja vastaavasti toisena ääritilanteena mahdollisimman lähellä X-palkkia.

Taulukko 7. Vaakapuomin päädyn taipumavertailua kolmessa eri X-liikesuunnan kohdassa kuormituksen ollessa Y-akselin ääriasennoissa.

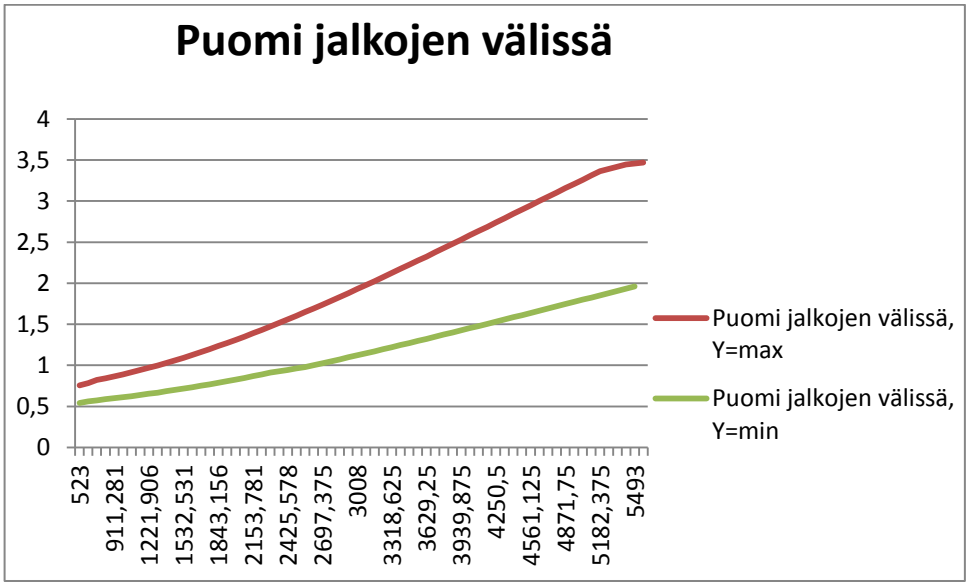
	Jännitys Max [MPa]	Taipuma [mm]
Vaakapuomi kannattimien välissä, y= max	53	3,49
Vaakapuomi kannattimien välissä, y= min	23	1,96
Vaakapuomi keskellä X-liikettä, y= max	19	2,86
Vaakapuomi keskellä X-liikettä, y=min	21	1,49
Vaakapuomi X-liikkeen päässä, y= max	43	4,17
Vaakapuomi X-liikkeen päässä, Y =min	24	2,13

Kuvassa 28 on havainnollistettu kohta, johon maksimijännitys portaalin vaakapalkissa muodostuu. Huomataan, että maksimijännitykset jäävät huomattavasti pienemmäksi kuin materiaalin myötölujuus 355 MPa. FE-analyysin jälkeen jännitysmaksimin sijainti on merkitty punaisella ympyrällä, joka kuvan 28 esimerkkitilanteessa on 53 MPa. Maksimijännitys sijoittuu vaakapuomin alalevyn ja tukilevyn välisen liitoksen kulmaan.

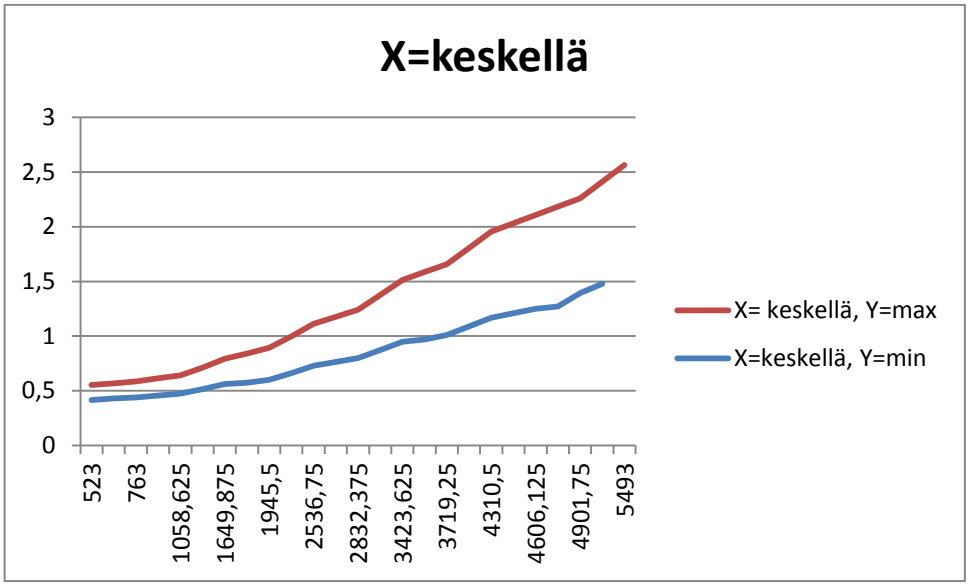


Kuva 28. Maksimijännityksen sijainti Y-akselia kuormitettaessa.

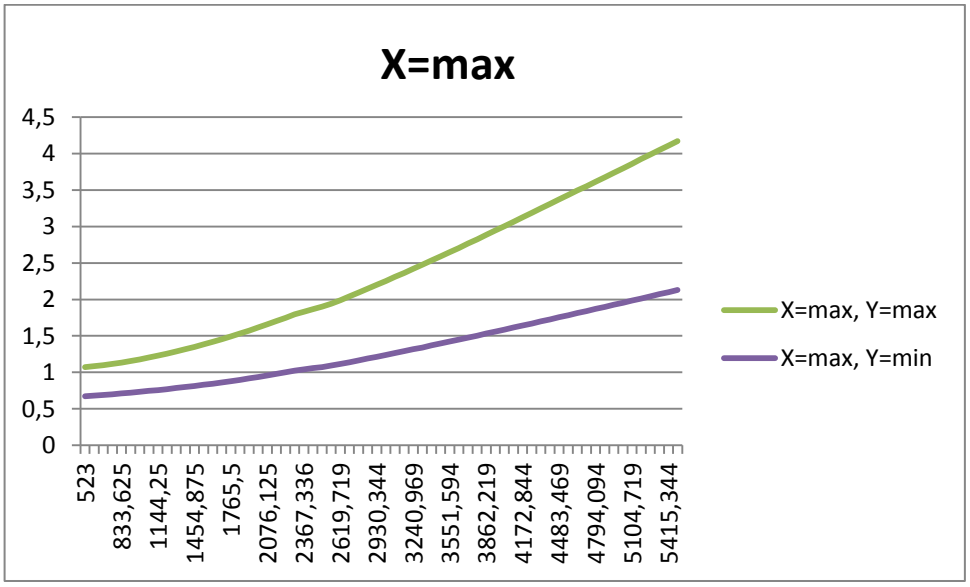
Kuvaajien 29–31 X-akseleilla on esitetty vaakapuomin tarkastelupisteitä tuentakohdasta aina vaakapuomin päätyyn asti. Y-akselilla on esitetty taipuma. Mittayksikkö molemmilla akseleilla on millimetri [mm]. Kuvaajista huomataan, että suurin taipuma saavutetaan vaakapuomin päädyssä, joka sijaitsee 5,5 metrin etäisyydellä portaalin X-runkopalkin seinämästä.



Kuva 29. Robottiportaalin vaakapuomin taipuma puomin ollessa kannatinjalkojen välissä.



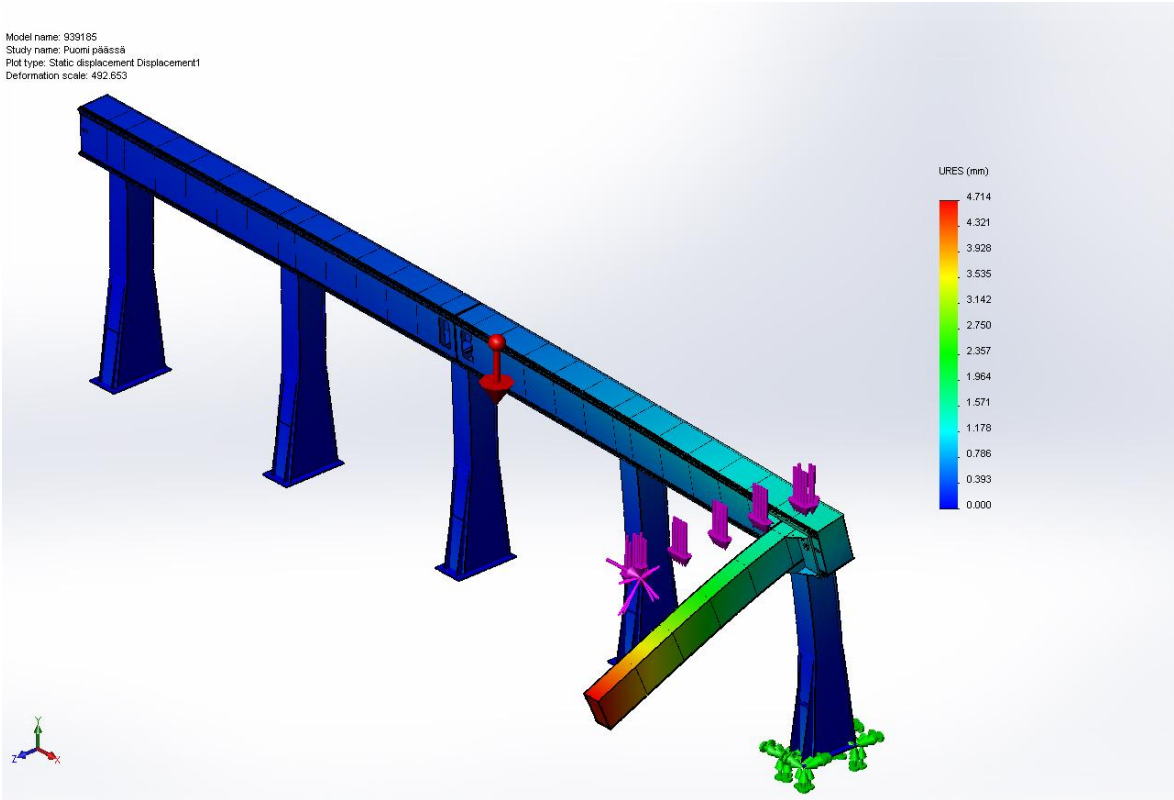
Kuva 30. Robottiportaalin vaakapuomin taipuma puomin ollessa portaalin X-liikesuunnan puolessa välissä.



Kuva 31. Robottiportaalin vaakapuomin taipuma puomin ollessa X-liikesuunnan päässä.

Kuvista 29, 30 ja 31 huomataan, että vaakapuomin suurin taipuma tapahtuu puomin ollessa X-liikesuunnan toisessa ääripäässä. Vaakapuomin suurin taipuma on mitattu SolidWorks FEM -ohjelmiston avulla.

Kuvassa 32 on esitetty portaalin rungon taipuma-analyysi, josta käy ilmi taipuman suuruusluokka rungon rakenteen eri kohdissa. Punainen väri merkitsee suurinta taipumaa ja sininen vastaavasti kohtia, joissa taipumaa ei juurikaan esiinny.



Kuva 32. HD-robottihitsausportaalin taipuma-analyysi SolidWorksin FEM -ohjelmiston avulla. Vaakapuomi eli Y-akseli sijaitsee X-akselin päässä.

Muutettaessa vaakapuomin eli Y-akselin liikepituutta pienemmäksi saavutetaan taulukon 8 mukaisia taipumatuloksia. Portaalin jalkoväli sekä uloimman kannatinjalan ja X-palkin päädyn välinen etäisyys (uloke) pidettiin muuttumattomina.

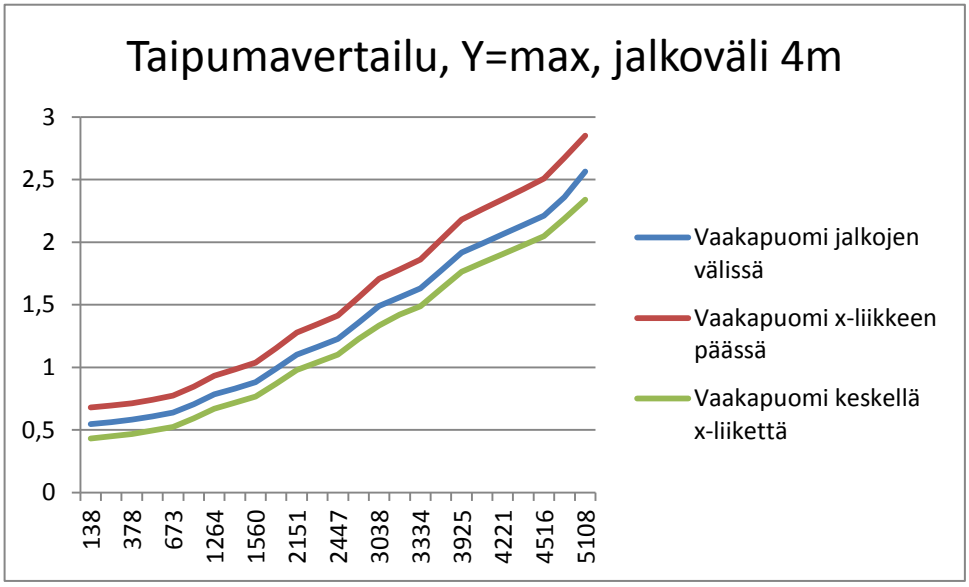
Taulukko 8. Vaakapuomin taipumatuloksia eri Y-akselin liikepituuksilla

Y-liikkeen pituus [mm]	Kannattimien jalkoväli [mm]	Uloke [mm]	Yläpaarteen pituus [mm]	Taipuma [mm]
2500–3000	5000	800	3970	2,35
3000–3500	5000	800	4470	2,55
3500–4000	5000	800	4970	4,17

Taulukon 8 mukaan huomataan, että Y-liikkeen pituuden muutos vaikuttaa selkeästi taipumaan, jos poikkileikkaus, jalkovälit ja uloke pidetään vakioina. Lähtökohtana vaakapalkin yläpaarteen pituus oli 4970 mm, jolloin Y-liikepituudeksi saadaan 3500–4000 mm. Tämän jälkeen tarkasteltiin lyhyempien liikepituuksien taipumia puolen metrin liikepituuk-

sien välein. Mikäli profiilin poikkileikkaus pidetään vakiona ja vaakapalkkia sekä Y-liikepituutta kasvatetaan niin taipuman suuruus vaakapuomin päässä kasvaa, koska kuormituksen momenttivarsi kasvaa samalla.

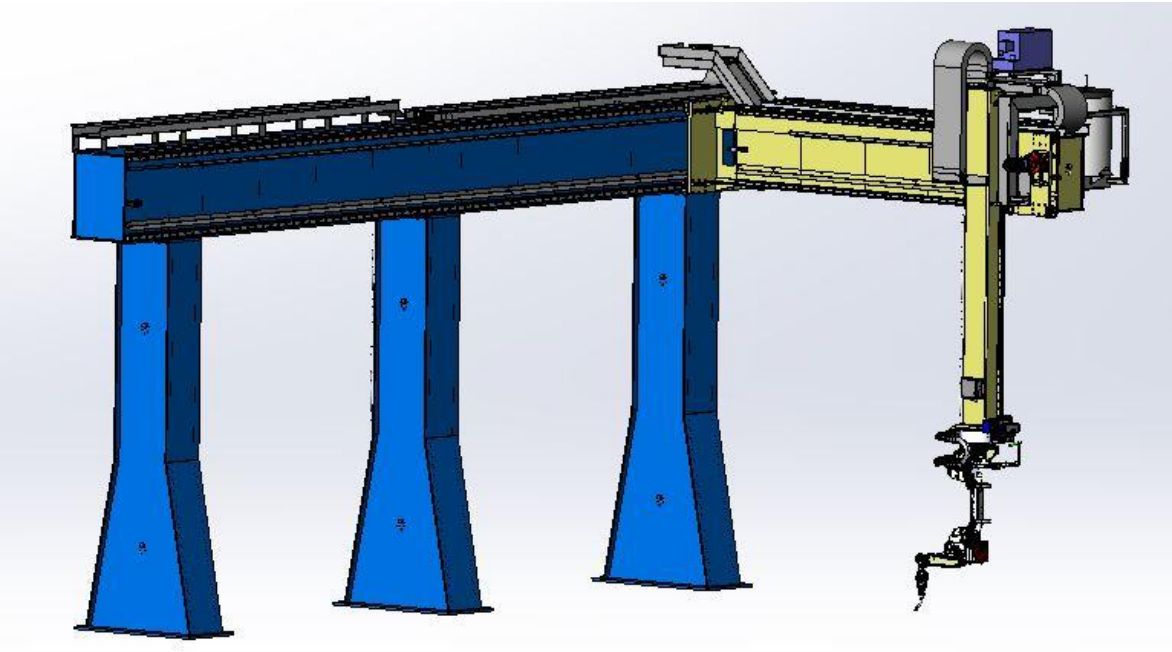
Seuraavaksi tarkasteltiin taipuman muutoksia, jos portaalin rungon rakennetta muokataan jalkovälien osalta pienemmäksi. Alkuperäisessä tilanteessa jalkoväli oli viisi metriä ja uudessa tarkastelussa jalkoväli lyhennettiin neljään metriin. Kuvassa 33 on esitetty taipumatuloksia neljän metrin jalkovälillä.



Kuva 33. Vaakapuomin taipumavertailua 4 metrin jalkovälillä

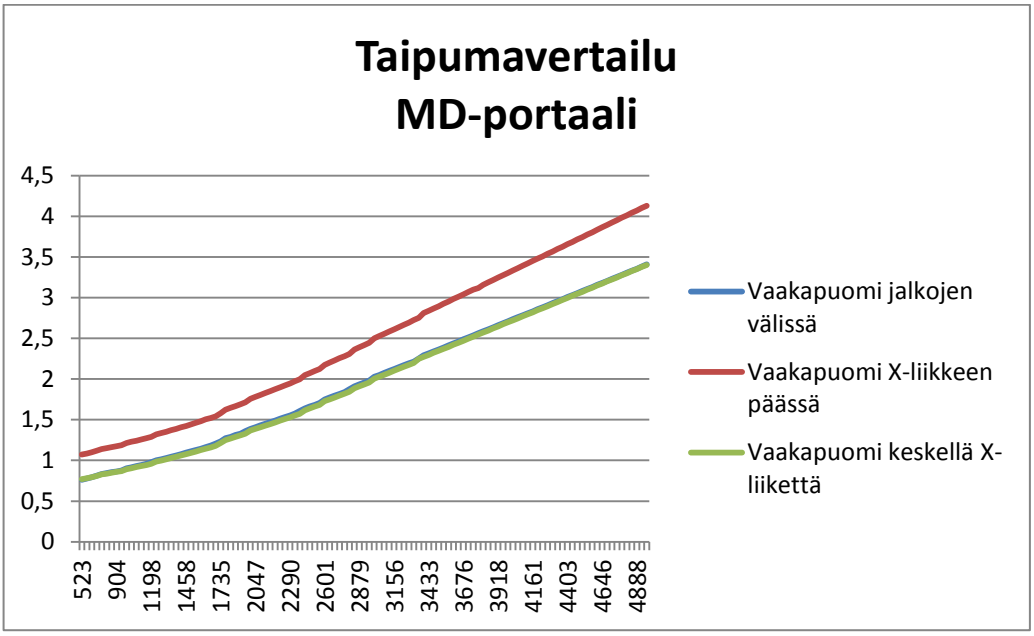
Muutettaessa HD-portaalin kannatinjalkojen jalkoväliä viidestä metristä neljään metriin huomataan muutoksia vaakapuomin taipumassa. Kuvan 33 taipumakäyrien mukaan vaakapuomin taipuma pienenee neljän metrin jalkovälillä verrattaessa viiden metrin jalkovälillä varustettuun portaaliin. Portaalin muut rakenteet pidettiin vakioina. Suurin taipuma 2,85 mm saavutetaan kuvan 33 mukaan vaakapuomin ollessa x-liikkeen päässä. Taipuman muutos viiden metrin jalkovälillä olevaan portaaliin on 4,17 mm – 2,85 mm = 1,32 mm. Taipumatulokset neljän metrin jalkovälillä on listattu liitteessä 2.

Tämän lisäksi tutkittiin pienemmän kokoluokan robottihitsausportaalin (MD-portaali) taipumavertailua vaakapuomin ollessa kolmessa eri X-liikkeen kohdassa. Kuvassa 34 on esitetty kuva pienemmän kokoluokan MD-hitsausportaalista.



Kuva 34. MD-robottihitsausportaali.

Taipumakuvaajat tilanteesta on esitetty kuvassa 35. Kuvan 35 x-akselille on merkitty etäisyys X-runkopalkin seinämätuennasta ja y-akselilla on merkitty taipuman suuruus. Suurin taipuma MD-portaalilla saavutetaan kuvan 35 mukaisesti vaakapuomin ollessa x-liikkeen päässä. Portaaliin kohdistuva kuormitus on sijoitettu vaakapuomin päähän, jolloin saavutetaan suurin momenttivarsi ja suurin taipuma. Portaalin jalkovälinä on neljä metriä. Maksimi taipumaksi saadaan 4,13 mm. Taipumavertailut MD-portaalille on listattu liitteessä 3. Kuvan 35 taipumien perusteella huomataan, että vaakapuomin maksimi taipuma on hyvin lähellä suuremman HD-portaalin vertailulukemaa 4,17 mm. MD-robottihitsausportaalin rungon kotelopalkkien poikkileikkaukset ovat pienemmät verrattaessa HD-portaaliin, jolloin sen kyky ottaa vastaan kuormituksia on heikompi. Tämä selittää tilannetta, miksi MD-portaali taipui suhteessa hieman enemmän kuin HD-portaali.



Kuva 35. MD-hitsausportaalin taipumavertailua

5 KOTELOPROFIILIN POIKKILEIKKAUKSEN OPTIMOINTI

Hitsausrobottiportaalissa on käytetty suuren koon vuoksi runsaasti terästä. On tärkeää pystyä karsimaan turha materiaali pois, jotta materiaalikustannukset laskevat ja kustannustehokkuus paranisi.

5.1 Poikkileikkauksen optimointi

Koteloprofiilin poikkileikkaus optimoitiin alkuperäisen poikkileikkauksen, profiiliin kohdistuvien kuormitusten sekä saatavilla olevien materiaalipaksuuksien perusteella. Vertailu alkuperäisen ja optimoidun profiilin poikkileikkausominaisuuksista on tehty taulukossa 9. Taulukossa on esitelty poikkileikkausten päämitat, pinta-ala, jäyhyys ja pituuspaino-suhde sekä arvojen suhteellinen ero prosenteissa.

Taulukko 9. Alkuperäisen koteloprofiilin ja optimoidun profiilin poikkileikkausominaisuuksien vertailu HD-hitsausportaalille.

	Yksikkö	Alkuperäinen	Optimoitu	$\frac{\text{Optim.} - \text{Alkup.}}{\text{Alkup.}}$
Laipan paksuus	mm	16	10	-37,5 %
Laipan leveys	mm	400	491	+22 %
Uuman paksuus	mm	10	8	-20 %
Uuman korkeus	mm	716	781	+9,1 %
Jäyhyys	mm^4	$2{,}252*10^9$	$2{,}133*10^9$	-5,2 %
Pinta-ala	mm^2	27120	22316	-17,7 %
Pituuspaino	kg/m	274,1	225	-17,7 %

Poikkileikkauksen optimoinnissa huomataan taulukon 9 perusteella suuriakin eroja alkuperäisen ja optimoidun rakenteen välillä. Suurin ero syntyi prosentuaalisesti laipan paksuuden määrittämisessä, jossa alkuperäisestä 16 mm laipan paksuudesta laippa oheni 6 mm. Prosentuaalisesti tämä tarkoitti -37,5 % suhteellista eroa. Laipan leveys puolestaan kasvoi huomattavasti 91 mm leveämmäksi ja prosentuaaliseksi eroksi saadaan alkuperäiseen laipan leveyteen verrattuna +22 %. Taulukon mukaisesti laipan leveys ja uuman korkeus kasvoivat, mutta samalla materiaalivahvuus oheni. Optimoidun rakenteen pinta-alasta muo-

dostui kuitenkin huomattavasti pienempi. Optimoidusta rakenteesta tuli myös hieman kevyempi verrattaessa pituuspaino suhdetta alkuperäiseen ratkaisuun. Prosentuaalisesti pituuspainosuhde putosi noin 18 %. Laskelmien suuruusluokan tarkastelua käsin laskennalla on suoritettu liitteessä 4.

Kotelopalkin kaulushitsien mitoitus määritettiin kaavan 35 mukaisesti tasalujaksi. Tuloksena saatiin hitsin a-mitaksi 2,6 mm eli hitsin a-mitta pyöristettäisiin 3 millimetriin. Kiinnityshitsejä ei yleensä tarvitse suunnitella tasalujiksi liitettävien osien kanssa, koska kiinnityshitsien voimat ovat tyypillisesti palkissa sen verran pieniä, että suhteellisen pienet a-mitat kelpaavat pienahitseissä. Liitteessä 4 on mitoitettu kotelopalkin kaulushitsin a-mitta.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOKEHITYSTOIMENPITEET

Tuotteen rakenteen optimointi on tärkeää tarkastaa, jotta turhilta materiaalikustannuksilta vältyttäisiin. Tämä konkretisoituu etenkin suurissa kokonaisuuksissa, joissa terästä on käytetty paljon. Yrityksen tuotteiden valmistus on kustannustehokkaampaa, mitä vähemmän materiaalia pystytään käyttämään ja rakenteen stabiilius kuitenkin varmistamaan, jotta toimintavarmuus ja turvallisuus säilyvät tuotteen käytön aikana. Suunnittelijan on pyrittävä tutkimaan mahdollisimman monia eri kokonaisratkaisuja, jotta paras vaihtoehto lopulliseen tuotteeseen löydetään. Tässä on syytä käyttää apuna tietokoneavusteisia ohjelmia, jotta suunnittelutyötä pystytään keventämään.

Tutkimuksen tavoitteena oli tutkia robottihitsausportaalin rakennetta ja suorittaa vaakapuomille taipumatarkastelua. Esimerkkitapauksina HD-portaaleille ja pienemmän kokoluokan MD-portaaleille tutkittiin vaakapuomin taipumatarkastelua. Näiden mallien avulla taipuman lukuarvo määritettiin vaakapuomin vapaan pään yläpaarteen reunasta. Taipumat pysyivät eri kuormitustilanteissa hyvinkin maltillisina (2–4 mm). Tämä ei vielä rajoittanut liikaa portaalilla työskentelyä ja toimintavarmuus pystyttiin ylläpitämään. Taipumat pystytään ottamaan huomioon robotin ohjelmoinnissa, jolloin pyritään varmistamaan paras mahdollinen hitsin laatu. Esimerkkitapausten avulla saatuja tuloksia voidaan käyttää hyväksi jatkossa suunniteltaessa uusia hitsattuja kotelopalkkiratkaisuja hitsausportaaleille. Varsinaista tietoa optimoidun rakenteen toimivuudesta ei tosin voida vielä saada ennen kuin portaali on suunniteltu, valmistettu, testattu ja saatu riittävästä tietoa uudesta mallista. Tutkimus kuitenkin tarjoaa ohjenuoria tuleville projekteille hitsausrobottiportaalin ja kotelopalkkien mitoituksesta.

Hitsausrobottiportaalin runkoon ja etenkin vaakapuomin jäykkyyteen tulee kiinnittää erityisesti huomiota. Toinen vaihtoehto optimoidun profiilin poikkileikkauksen rinnalle olisi tehdä uusi rakenne samanpainoiseksi nykyisen kanssa, mutta kasvattaa ulkomittoja. Rakenne toimisi jäykkänä paremmin ja samalla hitsaustyötä olisi vähemmän.

Hitsausrobottiportaalin jalkovälin muutoksella viidestä metristä neljään metriin saatiin taipumavertailussa pienempiä lukuarvoja. Suurin taipuma 2,85 mm saavutettiin kuormituksen

ollessa X-liikesuunnan toisessa ääripäässä. Tämä neljän metrin muunnos tarkoittaisi pidemmillä X-liikesuunnan portaaleilla kannatinjalkojen määrän kasvua. Tämä vuorostaan lisää kustannuksia. Toinen vaihtoehto olisi pidentää hieman päätyä ja täten hakea optimia jalkojen sijoittelulle pitämällä taipuman ja lujuuden kriteereinä. Näin ollen on tapauskohtaisesti selvitettävä valmistettavan tuotteen ja tilavaatimusten perusteella, että millainen portaalisovellus on riittävä.

Tuotteiden modulointimahdollisuus ja samalla tuotesuunnittelun ja valmistuksen nopeuttaminen tarjoavat enemmän vaihtoehtoja asiakaskunnan tarpeiden tyydyttämiseen. Parhaimmassa tapauksessa tehokkaasti suunniteltu ja helposti moduloitavissa oleva tuoteperhe tarjoaa keinon kasvattaa yrityksen kilpailukykyä ja avaa mahdollisuuden tuotevalikoiman massatuotantoon ja -räätälöintiin.

Robottiikkatuoteperhe koostuu useista muuttuvista rakenteista, joita mahdollisuuksien mukaan räätälöidään asiakkaan tarpeiden ja työkappaleiden mukaan. Robottihitsausportaaliin on mahdollista lisätä laajasti lisävarusteluita, kuten erilaisia hitsausvarusteluita, kameroita ja railonseurantoja, joten tuotekirjosta muodostuu laaja. Robottihitausportaalin suurimmat päärakenteet eli X-, Y-, Z-puomit sekä kannatinjalat soveltuvat paremmin uniikkiin tuotantoon ja asiakaskohtaiseen räätälöintiin. Tämä perustuu kustannustehokkuuteen, koska liian suuren portaalin valmistus ei ole järkevää ja liian pienillä X-, Y- ja Z-akselien liikepituuksilla voi hitsattava työkappale jäädä valmistettavuuden kannalta vajaaksi tai laadullisesti liian huonoksi. Pahimmassa tapauksessa kaikkia vaadittavia hitsejä ei pystytä hitsaamaan tai hitsausasennosta ei päästä haluttuun vaihtoehtoon ja vaadittua hitsauslaatua ei saavuteta.

Kiristyvä kilpailutilanne ja teknologian nopea kehitys on hyvin merkityksellinen jatkosuunnittelua ja tuotekehitystä ajatellen. Se tarjoaa mahdollisuuksia modulaarisen rakenteen suunnitteluun, kuin myöskin rajoittaa sitä. Uusien innovaatioiden ja rakenteiden suunnittelu voi aiheuttaa liiallista kuormitusta valmistusvaiheeseen, mikäli rakenteen suunnitteluvaiheessa ei ole osattu ottaa asennettavuutta huomioon. Tuotteet tulisi olla helposti valmistettavissa, jotta esimerkiksi asennusvaiheessa vältytään turhilta ongelmatilanteilta. Modulointia koskevia muutoksia tulisi hallita pienin muutoksin, jotta mahdollisten ongelmakohtien ja vikojen paikannus helpottuu. Modulaarisen tuotteen suunnittelu ja valmistus on

kannattavaa vain, jos asiakkaat ovat tyytyväisiä tuotteen käytettävyyteen ja ominaisuuksiin. Lisäksi kokonaan uuden modulaarisen tuotteen suunnittelu on kannattavaa vain pidemmällä aikavälillä, koska se vaatii erityisesti alussa runsaasti suunnittelukapasiteettia. Ominaisuuksiltaan liian monipuolista tai tehokasta tuotetta ei myöskään ole kannattavaa valmistaa. Mikäli tuote on ominaisuuksiltaan parempi kuin mitä asiakkaan vaatimukset ovat, eivät asiakkaat ole välttämättä halukkaita maksamaan ylimääräistä paremmasta suorituskyvystä.

Hitsausrobottiportaaleissa tulee yrityksen tarkkaan miettiä, onko modulointi se paras ratkaisu kustannustehokkuuden kannalta. Modulointiaste jää vähäisemmälle, jos modulointi kohdistuu lähinnä kannatinjalkojen korkeuden sekä y-akselin eli vaakapuomin pituuden muutoksiin tai hitsausvarustelun vaihdoksiin. Lujuustekninen tarkastelu on syytä tehdä huolella, koska robottihitsausportaalin suuren koon takia pelkästään omasta massasta aiheutuvat kuormitukset voivat olla suuria. Moduloidut rakenteet ovat usein räätälöityjä ratkaisuita painavampia. Tämä lisää suunnitteluvaiheen merkitystä, jolloin rakenteelliset muutokset ovat mahdollisia, jotta myös lisävarusteluista aiheutuvat kuormitukset eivät kuormita portaalia liikaa ja hitsaus on mahdollista toteuttaa. Lisäksi portaalit ovat usein kooltaan suuria ja työkappaleisiin kohdistuvat tilavaatimukset sekä asiakkaan tilat johtavat portaaleissa usein asiakasräätälöityyn ratkaisuun. Näin olen robottihitsausportaaleiden kokonaisvaltainen modulointi ole näin ollen järkevää.

Tarkasteltaessa robottihitsausportaalin nykyistä rakennetta huomataan, että eri osarakenteiden toiminnallisuus on suunniteltu tehokkaaksi. Suuret ja suorakulmaiset liikeradat sekä robotin helppo ohjelmointi mahdollistavat suurten työkappaleiden hitsauksen. Kehityskohteina voitaisiin tutkia erilaisten profiilimuotojen ja eri teräksen lujuusluokkien käyttöä. Koteloprofiilien käytön suuri etu on sen helppo valmistettavuus sekä valmistuksen aikana koteloprofiilin sisään voidaan asentaa tarvittavia jäykistelevyjä vinoutumisjäykkyyden takaamiseksi, jos kuormitustilanteessa rakenteen stabiilius olisi ilman niitä vaarassa.

Lisäksi jatkokehitystoimenpiteinä tulisi suorittaa väsymistarkastelua johonkin kriittiseen kohtaan. Poikkileikkauksen vinoutumiseen tulisi perehtyä enemmän ja tarkastella myös välilevyjen määrää sekä sijoittelua. Poikkileikkauksen vinoutumisessa voitaisiin tarkastella

miten paljon se vaikuttaa ulokkeen taipumaan. Lopuksi kotelopalkin kaulushitsin lujuutta tulisi tarkastella vinoutumisen yhteydessä.

7 YHTEENVETO

Kotelopalkkeja käytetään runsaasti eri teollisuuden aloissa ja monessa eri tuoteratkaisuissa. Erityisesti koteloprofiili on suosittu vaihtoehto raskaissa rakenteissa. Pemamek Oy valmistaa hitsausautomaatiosovellutuksia raskaaseen konepajateollisuuteen. Yrityksen valmistamien robottihistausportaalien runkorakenteet koostuvat lähinnä erilaisista hitsatuista kotelopalkkiprofiileista.

Työn tavoitteina oli tutkia robottihitsausportaalin rungon taipumakäyttäytymistä erilaisissa kuormitustilanteissa, optimoida vaakapuomin runkorakennetta sekä tarkastella rakenteen soveltuvuutta moduloinnille. Tutkimuksessa käytettiin hyväksi yrityksen jo asiakkaille suunnittelemia konseptiratkaisuita eri portaaleista, joiden pohjalta tarkasteltiin yrityksen suuremman kokoluokan HD-robottihitsausportaalin sekä pienemmän kokoluokan MD-robottihitsausportaalin kuormitustilanteita. Näiden lähtötietojen perusteella kehitettiin optimointi malli sekä tutkittiin moduloinnin mahdollistamista suunnittelun työkaluksi sekä valmistuksen helpottamiseksi.

Teoriaosuudessa käsiteltiin lyhyesti materiaalivalintaan sekä teräksen lujuusluokan valintaan liittyviä asiakohtia sekä suoritetaan katsaus koteloprofiilin teoreettiseen tarkasteluun. Teoriaosuudessa käytiin lisäksi läpi moduloinnin periaate ja mahdollistaminen robottihitsausportaalisovellutuksiin. Tutkimusosioissa esiteltiin robottihitsausportaalin rungon rakennetta sekä varusteluita, luodaan kuormitustilanteet ja suoritetaan taipumatarkastelua FEM-analyysiä hyväksi käyttäen. Lopuksi tutkittiin optimointimallin eroja alkuperäiseen rakenteeseen verrattuna.

Tutkimuksessa selvisi vaakapuomin taipuman vaihtelevan vain reilun kahden millimetrin verran kuormituksen ollessa hitsausrobottiportaalin eri kohdissa. Vaakapuomin runko on suunniteltu hyvinkin jäykäksi, jotta riittävä tarkkuus säilytetään robottihitsaussovellutuksissa, koska jo muutaman millimetrin heitto hitsauspolttimen päässä heikentää hitsin laatua merkittävästi. Koteloprofiilipalkin optimointimallissa saavutettiin huomattavia eroja koteloprofiilin dimensioissa verrattuna alkuperäiseen tutkimuskohteeseen. Optimointimallin mukaan laipan ja uuman materiaalipaksuudet ohenivat, kun taas laipan leveys ja uuman

korkeus kasvoivat. Lopullisen optimointimallin rakenteesta syntyi alkuperäiseen rakenteeseen verrattuna kevyempi ratkaisu. Esitetyt muutokset alkuperäisen mallin ja optimoidun mallin välillä vaikuttavat järkeviltä, koska painoa saatiin alas hitsauksen ohella.

Modulaarinen tuoteratkaisu on joustava ja yksinkertaistaa suunnitteluprosessia ja valmistusta. Modulaarisessa tuotteessa moduuleja voidaan vaihtaa uusiin tai uudelleen käyttää jossain muussa sovelluksessa. Tämä mahdollistaa tuotteen elinkaaren pitenemisen ja asiakaskunnan laajenemisen. Modulointi kohdistuisi helpoiten hitsausvarustuksen vaihteluun sekä portaalin vaakapuomin liikepituuden muutoksiin. Robottihitsausportaaleissa loppuun asti modulointi on kuitenkin hankalaa suorittaa, koska asiakkaan tilat sekä valmistettavat työkappaleet asettavat vaatimuksia ja rajoitteita hitsauksen onnistumiselle. Modulointiaste jää robottihitsausportaaleissa alhaiseksi, joten tämä on merkittävä syy portaalien asiakaskohtaiseen räätälöintiin.

Robottihitsausportaalin taipumadatasta ja optimointimallin tuloksista saatiin hyödyllistä informaatiota, jota voidaan hyvin käyttää hyödyksi jatkosuunnittelussa. Profiilin poikkileikkauksen vinoutumisen tarkastelu sekä vaihtoehtoisien profiilimallien tutkiminen ja toimivuus robottihitsausportaaleissa ovat vielä tutkimatta, joten nämä tarjoavat mielenkiintoisia haasteita tulevaisuuden tuotekehitykseen.

LÄHTEET

Aarnio, J. 2003. Modularization by Integration: Creating Modular Concepts for Mechatronic Products. Väitöskirja. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto. 157s.

Ahola, H. 1988. Automatisoidun kaarihitsauksen huomioonottaminen tuotteen suunnittelussa. Tekninen tiedotus 16/88. Helsinki: Metalliteollisuuden kustannus Oy. 45 s.

Björk, T. 2011. Design of Steel Structures. Luentokalvot. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. LUT Metalli.

Carvalho, G.C & McMaster, R. 1996. A Strategy for offline programming and adaptive control of a robotic welding cell. Science and Technology of Welding and Joining (UK) vol. 1, no. 1. s. 11–15.

Ericsson, A. & Erixon, G. 1999. Controlling Design Variants – Modular Product Platforms. Dearborn, USA: Society of Manufacturing Engineers. 145 s.

Farkas J. & Jármai K. 2013. Optimum Design of Steel Structures. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 265 s.

Hellström, M. 2005. Business concepts based on modularity: a clinical inquiry into the business of delivering projects. Väitöskirja. Turku: Åbo Akademi University Press. 189 s.

Hobbacher, A. 2013. Recommendations for fatigue design of welded joints and components. International Institute of Welding (IIW). Springer International Publishing. 143 s.

Hölttä-Otto, K. 2005. Modular product platform design. Väitöskirja. Helsinki university of technology. Espoo: Department of Mechanical engineering.

Kaitila, O. 2014. Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus. Eurocode 3- oppikirja. Helsinki: Teräsrakenneyhdistys ry. 183 s.

Niemi, E. 2003. Levyrakenteiden suunnittelu. Tekninen tiedote 2/2003. Teknologiainfo Teknova Oy. 136 s.

Nikula, S. 1990. Haarukkavoimien aiheuttamat vinoutumisjännitykset puomissa. Diplomityö. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, Konetekniikan osasto. 53 s.

Ongelin P. & Valkonen I. 2010. Hitsatut profiilit EN 1993- Käsikirja. Hämeenlinna: Rautaruukki Oyj. 608 s.

Ongelin P. & Valkonen I. 2012. Rakenneputket EN 1993- Käsikirja. Hämeenlinna: Rautaruukki Oyj. 690 s.

Pemamek Oy, 2014. About Us [verkkodokumentti]. Päivitetty 2014. [Viitattu 10.3.2015]. Saatavissa: http://www.pemamek.com/about-us

Pemamek Oy, 2013. Company Brochure. Loimaa: Pemamek Oy.

SFS-EN 1993-1-1, 2005. Eurocode 3: Teräsrakenteiden suunnittelu, Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN 1993-1-5, 2006. Eurocode 3: Teräsrakenteiden Suunnittelu, Osa 1-5: Levyrakenteet. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN 1993-1-9, 2005. Eurocode 3: Teräsrakenteiden Suunnittelu, Osa 1-9: Väsyminen. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

Valtanen, E. 2008. Tekniikan taulukkokirja. 16. painos. Jyväskylä: Genesis-kirjat Oy. 1152 s.

Österholm J. & Tuokko R. 2001. Systemaattinen menetelmä tuotemodulointiin, Modular Function Deployment. MET-julkaisu nro 21/2001. Helsinki: Metalliteollisuuden Keskusliitto. 64 s.

HD-portaalin taipumadata vaakapuomille viiden metrin jalkovälillä.

Vaakapuomi kannatinjalkojen välissä, jalkoväli 5m, y=max.

Etäisyys tuennasta [mm]	Vaakapuomi kannatinjalkojen välissä, taipuma [mm]
523	0,756
678,313	0,785
833,625	0,822
911,281	0,843
988,938	0,866
1066,594	0,89
1144,25	0,915
1221,906	0,942
1299,563	0,97
1377,219	0,998
1454,875	1,029
1532,531	1,06
1610,188	1,092
1687,844	1,126
1765,5	1,161
1843,156	1,197
1920,813	1,234
1998,469	1,272
2076,125	1,311
2153,781	1,35
2231,438	1,391
2309,094	1,432
2386,75	1,473
2464,406	1,516
2542,063	1,559
2619,719	1,603
2697,375	1,647
2775,031	1,693
2852,688	1,739
2930,344	1,786
3008	1,833
3085,656	1,88
3163,313	1,928
3240,969	1,976

Etäisyys tuennasta [mm]	Vaakapuomi kannatinjalkojen välissä, taipuma [mm]
3318,625	2,025
3396,281	2,074
3473,938	2,124
3551,594	2,174
3629,25	2,224
3706,906	2,275
3784,563	2,325
3862,219	2,377
3939,875	2,428
4017,531	2,48
4095,88	2,532
4172,844	2,584
4250,5	2,636
4328,156	2,688
4405,813	2,74
4483,469	2,792
4561,125	2,844
4638,781	2,896
4716,438	2,948
4794,094	3
4871,75	3,052
4949,406	3,104
5027,063	3,157
5104,719	3,209
5182,375	3,261
5260,031	3,314
5337,688	3,366
5376,516	3,393
5415,344	3,419
5454,172	3,445
5473,586	3,458
5493	3,471

Vaakapuomi keskellä X-liikettä, Y= max, jalkoväli 5 m.

Etäisyys tuennasta [mm]	Vaakapuomi keskellä x-liikettä, taipuma [mm]
523	0,555
643	0,569
763	0,587
910,813	0,614
1058,625	0,643
1354,25	0,712
1649,875	0,794
1797,688	0,841
1945,5	0,892
2241,125	0,999
2536,75	1,113
2684,563	1,177
2832,375	1,242
3128	1,376
3423,625	1,514
3571,438	1,586
3719,25	1,658
4014,875	1,806
4310,5	1,956
4458,313	2,031
4606,125	2,106
4753,938	2,182
4901,75	2,258
5197,375	2,41
5493	2,563

Vaakapuomi X-liikkeen päässä, Y= max, jalkoväli 5 m.

Etäisyys tuennas-ta [mm]	Vaakapuomi x-liikkeen päässä, taipuma[mm]
523	1,072
600,656	1,085
678,313	1,1
755,969	1,116
833,625	1,135
911,281	1,157
988,938	1,179
1066,594	1,204
1144,25	1,23
1221,906	1,257
1299,563	1,286
1377,219	1,317
1454,875	1,349
1532,531	1,383
1610,188	1,419
1687,844	1,455
1765,5	1,494
1843,156	1,533
1920,813	1,574
1998,469	1,616
2076,125	1,659
2153,781	1,703
2231,438	1,749
2309,094	1,795
2367,336	1,831
2425,578	1,867
2483,82	1,903
2542,063	1,94
2619,719	1,99
2697,375	2,041
2775,031	2,093
2852,688	2,146
2930,344	2,199

Etäisyys tuennasta [mm]	Vaakapuomi x-liikkeen päässä, taipuma[mm]
3008	2,254
3085,656	2,308
3163,313	2,364
3240,969	2,42
3318,625	2,476
3396,281	2,533
3473,938	2,59
3551,594	2,648
3629,25	2,706
3706,906	2,765
3784,563	2,824
3862,219	2,884
3939,875	2,944
4017,531	3,004
4095,188	3,065
4172,844	3,126
4250,5	3,187
4328,156	3,248
4405,813	3,309
4483,469	3,37
4561,125	3,431
4638,781	3,492
4716,438	3,553
4794,094	3,614
4871,75	3,675
4949,406	3,737
5027,063	3,798
5104,719	3,86
5182,375	3,922
5260,031	3,983
5337,688	4,045
5415,344	4,107
5493	4,169

HD-portaalin taipumadata vaakapuomille neljän metrin jalkovälillä

Taipumavertailu HD-portaali:
Jalkoväli 4m, y=max

Etäisyys tuennasta [mm]	Vaakapuomi jalkojen välissä, taipuma [mm]	Vaakapuomi x-liikkeen päässä, taipuma [mm]	Vaakapuomi keskellä x-liikettä, taipuma [mm]
138	0,547	0,68	0,433
258	0,563	0,695	0,449
378	0,582	0,714	0,468
525	0,609	0,742	0,495
673	0,639	0,774	0,525
969	0,706	0,845	0,592
1264	0,786	0,932	0,671
1412	0,832	0,983	0,718
1560	0,881	1,037	0,767
1856	0,989	1,154	0,87
2151	1,103	1,279	0,979
2299	1,164	1,346	1,04
2447	1,227	1,415	1,101
2743	1,358	1,559	1,227
3038	1,491	1,707	1,335
3186	1,56	1,783	1,421
3334	1,63	1,861	1,489
3629	1,773	2,019	1,626
3925	1,917	2,18	1,765
4073	1,99	2,262	1,835
4221	2,064	2,343	1,905
4368	2,138	2,425	1,976
4516	2,212	2,508	2,047
4812	2,36	2,674	2,189
5108	2,564	2,85	2,34

LIITE 3,1

MD-hitsausportaalin taipumadata
Y=max, Jalkoväli 4m

Etäisyys tuennasta [mm]	Vaakapuomi jalkojen välissä, taipuma [mm]	Vaakapuomi x-liikkeen päässä, taipuma [mm]	Vaakapuomi keskellä x-liikettä, taipuma [mm]
523	0,763	1,071	0,768
592	0,778	1,085	0,78
661	0,794	1,101	0,794
730	0,812	1,12	0,81
800	0,832	1,14	0,828
834	0,843	1,152	0,838
869	0,855	1,164	0,848
904	0,866	1,176	0,859
938	0,878	1,188	0,87
1008	0,903	1,215	0,893
1042	0,916	1,229	0,905
1077	0,93	1,243	0,918
1112	0,943	1,257	0,93
1146	0,957	1,272	0,944
1198	0,978	1,288	0,957
1250	1	1,32	0,985
1285	1,015	1,336	0,999
1319	1,031	1,353	1,014
1354	1,046	1,371	1,029
1389	1,062	1,388	1,045
1423	1,078	1,406	1,06
1458	1,095	1,424	1,076
1493	1,111	1,443	1,093
1527	1,128	1,462	1,109
1562	1,145	1,481	1,126
1597	1,163	1,504	1,143
1631	1,181	1,521	1,16
1683	1,208	1,541	1,178
1735	1,235	1,582	1,214
1804	1,272	1,625	1,251
1839	1,291	1,646	1,269
1874	1,311	1,668	1,288
1908	1,33	1,69	1,308
1960	1,359	1,713	1,327
2012	1,389	1,758	1,366
2047	1,409	1,781	1,386
2082	1,429	1,804	1,406
2116	1,45	1,828	1,427

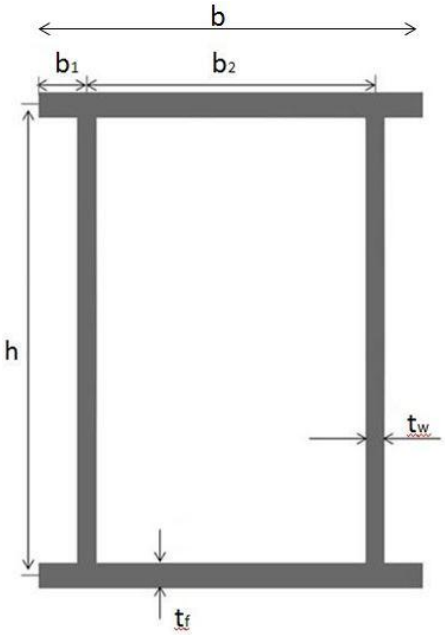
LIITE 3,2

Etäisyys tuen-nasta [mm]	Vaakapuomi jalkojen välissä, taipuma [mm]	Vaakapuomi x-liikkeen päässä, taipuma [mm]	Vaakapuomi keskellä x-liikettä, taipuma [mm]
2151	1,47	1,852	1,447
2186	1,491	1,875	1,468
2220	1,512	1,899	1,489
2255	1,533	1,924	1,51
2290	1,554	1,948	1,531
2324	1,575	1,973	1,552
2376	1,607	1,998	1,573
2428	1,64	2,048	1,617
2463	1,662	2,073	1,639
2497	1,684	2,099	1,661
2532	1,706	2,124	1,683
2601	1,75	2,176	1,728
2636	1,773	2,203	1,75
2671	1,795	2,229	1,773
2705	1,818	2,255	1,796
2740	1,841	2,282	1,819
2792	1,875	2,309	1,842
2844	1,91	2,363	1,888
2879	1,933	2,39	1,912
2913	1,956	2,417	1,935
2948	1,98	2,444	1,959
3017	2,027	2,5	2,006
3052	2,05	2,527	2,03
3086	2,074	2,555	2,054
3121	2,098	2,583	2,077
3156	2,122	2,611	2,102
3190	2,146	2,639	2,126
3225	2,17	2,667	2,15
3260	2,194	2,695	2,174
3294	2,212	2,724	2,198
3346	2,254	2,752	2,248
3398	2,291	2,81	2,272
3433	2,315	2,838	2,297
3468	2,339	2,867	2,322
3502	2,364	2,896	2,346
3537	2,388	2,925	2,371
3572	2,416	2,954	2,396
3606	2,438	2,983	2,421
3641	2,462	3,012	2,446
3676	2,487	3,041	2,471
3710	2,512	3,071	2,496

LIITE 3,3

Etäisyys tuennasta [mm]	Vaakapuomi jalkojen välissä, taipuma [mm]	Vaakapuomi x-liikkeen päässä, taipuma [mm]	Vaakapuomi keskellä x-liikettä, taipuma [mm]
3745	2,537	3,1	2,522
3779	2,562	3,12	2,547
3814	2,587	3,159	2,572
3849	2,612	3,188	2,597
3883	2,636	3,217	2,622
3918	2,661	3,247	2,647
3953	2,685	3,276	2,672
3987	2,71	3,305	2,697
4022	2,735	3,334	2,722
4057	2,759	3,363	2,746
4091	2,784	3,392	2,771
4126	2,808	3,421	2,796
4161	2,833	3,451	2,821
4195	2,858	3,48	2,846
4230	2,883	3,509	2,871
4265	2,907	3,539	2,896
4299	2,932	3,568	2,922
4334	2,957	3,598	2,947
4368	2,982	3,627	2,972
4403	3,007	3,657	2,997
4438	3,032	3,686	3,022
4472	3,056	3,716	3,047
4507	3,081	3,745	3,073
4542	3,106	3,775	3,098
4576	3,131	3,804	3,123
4611	3,156	3,834	3,148
4646	3,181	3,864	3,173
4680	3,206	3,893	3,199
4715	3,231	3,923	3,224
4750	3,256	3,953	3,249
4784	3,281	3,983	3,275
4819	3,306	4,012	3,3
4854	3,331	4,042	3,325
4888	3,356	4,072	3,351
4923	3,381	4,102	3,376
4958	3,408	4,131	3,401

Koteloprofiilin tarkastelua käsinlaskennalla



Kuva 36. Kotelopalkki

Alkuarvot:

- Uuman paksuus t_w =10
- Laipan paksuus t=16
- Laipan leveys b=400
- Uuman korkeus h=716
- Uumien välinen etäisyys b_b=395
- Valitaan materiaaliksi S355, jolloin raja-arvoiksi PL3 mukaan saadaan

Raja-arvot: S355

<u>laipan arvot</u>:

$\frac{b_2}{t_f} = 34{,}2 = \beta_b$

Laipan vapaa reuna $\beta_c = 11{,}4$

<u>Uuma:</u>

$\frac{h}{t_w} = 100{,}9$

Vaakapuomi on 5m pitkä ja kuorma vaakapuomin päässä on 1500kg ilman vaakapuomin omaa massaa. Momentiksi saadaan näin ollen:

$$M = l * F = 5m * 1500kg * 9{,}81\frac{kg}{m^2} = 73{,}575kNm$$

Oletetaan, että työkiertoja tulee elinkaaren aikana seuraavasti:

$$n = 4 * \frac{8h}{vrk} * \frac{250vrk}{vuosi} * 20vuotta = 160000$$

Valitaan FAT-luokaksi 80. Tällöin väsymiskestoiän kaavasta saadaan ratkaistua:

$$\sigma_{ekv} = \sqrt[3]{\frac{2 * 10^6}{n} * FAT} = 185{,}66Mpa$$

Taivutusvastus väsymisen suhteen W_f saadaan ratkaistua seuraavasti:

$$W_f = \frac{M}{\sigma_{ekv}} = 396288{,}9mm^3$$

Kotelopalkin mitoitus:
Jäyhyys x-akselin suhteen:

$$I = \frac{bth^2}{4} + 2\frac{t_w h^3}{12} = 2{,}252 * 10^9 mm^4$$

Taivutusvastus:

$$W = bth + \frac{t_w * h^2}{3} = 6{,}291 * 10^6 mm^3$$

Uuman korkeus:

$$h = \sqrt[3]{\frac{3}{4} W_f \eta} = \sqrt[3]{\frac{3}{4} * 6{,}291 * 10^6 mm^3 * 100{,}9} = 780{,}8mm \Rightarrow 781mm$$

Uumien paksuudet:

$$t_w = \frac{h}{\eta} = \frac{780{,}8mm}{100{,}9} = 7{,}8 \Rightarrow 8mm$$

Laipan leveys:

$$b \geq \sqrt{\left(\frac{W}{h} - \frac{h^2}{3\eta}\right)(\beta_b + 2b_c)} = \sqrt{\left(\frac{6.291 * 10^6}{780{,}8} - \frac{780{,}8^2}{3 * 100{,}9}\right)(34{,}2 + 2 * 11{,}4)}$$
$$= 490{,}5mm \Rightarrow 491mm$$

Laipan paksuus:

$$t = \frac{b}{\beta_b + 2\beta_c} = \frac{491mm}{34{,}2 + 2 * 11{,}4} = 8{,}61mm \Rightarrow 10mm$$

Taivutusvastuksen tarkistus:

$$I_x = 2\left[\frac{491 * 10^3}{12} + 395{,}5^2(491 * 10)\right] + 2\left[\frac{8 * 781^3}{12}\right] = 2171{,}3 * 10^6 mm^4$$

$$W_x = \frac{I_x}{e} = \frac{2171{,}3 * 10^6 mm^4}{400{,}5mm} = 5{,}421 * 10^6 mm^3 > W_f \Rightarrow OK!$$

Päivitetyn koteloprofiilin pinta-ala:
A = (2*8*781+2*10*491)mm^2 = 22316mm^2

Päivitetyt jäyhyys ja taivustusvastus arvot:
I_uusi = 2,133*10^9mm^4
W_uusi = 5,461*10^6mm^3

Kotelopalkin kaulushitsin tasaluja mitoitus kaavan 35 mukaisesti:

$$a \geq \frac{\beta_w * d * \gamma_{M2} * f_y}{n * \gamma_{M0} * f_u * (1 + \frac{h * d}{6 * B * T})}$$

kaavassa *a* on hitsin a-mitta, β_w on perusaineen murtolujuus, d on uuman paksuus, γ_{M2} on materiaalin osavarmuuskerroin, f_y on perusaineen myötölujuus, *n* on hitsien lukumäärä/leikkaus, γ_{M0} on poikkileikkauskestävyyden osavarmuusluku,*h* on uuman korkeus, *B* on laipan leveys ja *T* on laipan paksuus. Tällöin hitsin a-mitaksi saadaan:

$$a \geq \frac{0{,}9 * 8mm * 1{,}25 * 355Mpa}{2 * 1 * 510Mpa * (1 + \frac{781mm * 8mm}{6 * 491mm * 10mm})} = 2{,}58mm \rightarrow a = 3mm$$